



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

CARACTERIZACIÓN DEL RECUBRIMIENTO CON ELECTRODO B-83 SOBRE ACERO DÚPLEX 2205.

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

ORTIZ GÓMEZ GISSELA STEPHANIE
gissela.ortiz@epn.edu.ec

SÁNCHEZ DEL CASTILLO JOHANA GABRIELA
johana.sanchez@epn.edu.ec

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

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

Quito, Abril 2020

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **GISSELA STEPHANIE ORTIZ GÓMEZ Y JOHANA GABRIELA SÁNCHEZ DEL CASTILLO**, bajo mi supervisión.

Ing. Carlos Díaz, M.Sc.
DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Homero Barragán, M.Sc.
CO-DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotras, **Gissela Stephanie Ortiz Gómez** y **Johana Gabriela Sánchez Del Castillo**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra 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 correspondiente 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.

Gissela Stephanie Ortiz Gómez

Johana Gabriela Sánchez Del Castillo

DEDICATORIA

Este trabajo es dedicado a mis padres, Marco y Carmen quienes han estado siempre para mí, siendo mi apoyo incondicional, gracias a su esfuerzo y dedicación he logrado cumplir una meta más en mi vida. Gracias a su confianza y amor pude superar todos los obstáculos que se presentaron en mi etapa universitaria.

También agradezco a mi hermano Alvaro, quien a pesar de las diferencias que hemos tenido me ha mostrado a su manera su apoyo y cariño. Y finalmente a mi sobrino Adiel, quien con su ternura y travesuras alegra mi vida.

Giss.

DEDICATORIA

A Dios y a la Virgencita de “Las Lajas” quienes me cuidaron con su manto divino, como también fueron mi compañía en todo momento, salvándome de toda adversidad que tuve que pasar, como también dándome las fuerzas necesarias para hoy poder ver cristalizada esta meta.

A mis papitos Edwin y Mayra quienes han dedicado su vida entera por crear una persona de bien, con valores bien cimentados, enseñándome que la vida no es fácil, y si uno desea conseguir algo hay que luchar por ello y jamás vencerse, que todo sacrificio al final tiene su recompensa.

A mis hermanas Cylene y Salomé, quienes han sido mi ejemplo a seguir y que me han demostrado que la universidad no es carrera de velocidad, sino de resistencia.

A mi Sebas, mi hermanito menor, que con su corta edad me ha demostrado que si existen un límite para poder cumplir los sueños es el cielo.

Gaby.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres ya que sin ellos no hubiera logrado cumplir un sueño más, siempre han estado a mi lado aconsejándome y motivándome a mejorar cada día. A mi hermano que la mayoría de veces que lo he necesitado ha estado ahí para mí y que me ha dado uno de los mejores regalos en la vida con la llegada de mi lindo sobrino a la familia. A mi tía y amiga Gaby quien siempre ha estado para mí cuando he necesitado alguien con quien hablar. A toda mi familia quienes me han apoyado a lo largo de este camino, siempre dándome ánimos para seguir; esencialmente a una personita que ya no está presente en este mundo, pero siempre estará en mi corazón.

A los ingenieros Carlos Díaz y Homero Barragán por compartir sus conocimientos y guiarnos en el desarrollo de este trabajo de titulación. Al ingeniero Gabriel Velastagui, Jorge Guzmán y técnico René Jame por la paciencia y colaboración brindada. Al laboratorio de Desgaste y Falla por la ayuda brindada para realizar los diferentes ensayos requeridos para culminar este proyecto.

A todos mis amigos y babacos, desde los que conocí en primer semestre hasta aquellos que conocí al final, con quienes he pasado muchos buenos y malos momentos a lo largo de mi etapa estudiantil, siempre ofreciéndome su apoyo y cariño para continuar aún en los peores momentos. Especialmente a los ingenieros Marjorie Chiran y Xavier Pila, gracias a sus consejos se arreglaron algunos errores y se culminó esta tesis.

A mis mejores amigos del colegio Dome y Sami, quienes a pesar del tiempo siguen brindándome su amistad incondicional, cariño y apoyo.

Finalmente, a Gaby a mi compañera, no solo de tesis, también de toda la carrera con quien compartimos muchas materias, momentos de desesperación y alegría, pero siempre estuvimos apoyándonos hasta el final.

Giss.

AGRADECIMIENTO

A mis papitos Edwin y Mayra, por haberme brindado la confianza y la oportunidad de poder salir de mi querido Tulcán a realizar mis estudios, por estar pendientes de mí a pesar de la distancia y otorgarme su apoyo económico como emocional en todo momento, sobre todo por creer en mí, cuando ni yo misma creía. A mis hermanas mayores Cylene y Salomé, por cuidar de mí, por su cariño, abrazos y palabras de aliento durante mi vida universitaria. A mi Sebas quien es mi inspiración y mi confidente, por estar en todo momento conmigo, apoyándome innumerables veces en las decisiones que he tomado, como también brindándome los ánimos necesarios para poder concluir con este trabajo de titulación; los dos estamos separados por una gran distancia, pero unidos por nuestros corazones.

A mis amigas del colegio Kari, Shirley y Anabel, por haber estado, aunque a distancia en los momentos adecuados y por todas esas “chilterias” que nos han sabido dejar gratos recuerdos. A mi Mire, por siempre estar conmigo sonriendo a carcajadas o secando mis lágrimas, por haber sido mi profesora de cabecera y ayudarme a pasar algunas materias.

A mis poliamigos Nogalitos, Darwinsin, Migue, Sami y Win, quienes fueron los primeros en demostrarme que la amistad verdadera también existe en la “U”, que cada momento de estudio, estrés y risas, son los mejores recuerdos que me quedan de prepo. A mis amigos “los 04” Mayu, los Carlitos y Tulca, con los que compartí un montón de cosas, que con cada ocurrencia que decían, las risas nunca faltaban y hacían más llevadera la estancia en la Poli; por ser como mi familia cuando estaba lejos de casa.

A Gis mi compañera tesis, por haberme brindado su apoyo y paciencia durante la realización de este trabajo de titulación, como también durante todos los semestres de la carrera; compartiendo momentos de alegría y tristeza, pero logrando el objetivo que nos habíamos planteado.

A mi “querido profesor” Ing. Carlos Díaz quien fue mi tutor durante todo mi recorrido en la FIM, como también por haberme guiado con sus conocimientos, al Ing. Homero Barragán por su asesoramiento, a la Ing. Patricia Proaño como al LMDF por la apertura para realizar este proyecto de titulación. A don René Jame por la paciencia brinda durante la realización de las probetas.

A Xavi Pila por sus consejos para mejorar la tesis, como también a cada una de las personas que fueron parte de este largo camino, que estuvieron junto a mí, apoyando con un granito de arena para que se pueda ver hoy cristalizada esta meta.

Gaby.

CONTENIDO

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	v
CONTENIDO DE FIGURAS.....	xi
CONTENIDO DE TABLAS.....	xv
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
INTRODUCCIÓN.....	1
1. MARCO TEÓRICO.....	2
1.1. Aceros Inoxidables.....	2
1.1.1. Acero dúplex 2205.....	3
1.2. Recubrimiento.....	6
1.3. Tipo de recubrimientos.....	7
1.3.1. No metálicos.....	7
1.3.2. Metálicos.....	10
1.4. Recubrimientos duros.....	11
1.5. Soldadura de mantenimiento y reparación.....	12
1.6. Desgaste.....	13
1.6.1. Mecanismos de desgaste.....	13
1.6.1.1. Desgaste por abrasión.....	13
1.6.1.2. Desgaste adhesivo.....	15
1.6.1.3. Desgaste por impacto.....	15
1.6.1.4. Desgaste por calor.....	16
1.6.1.5. Cavitación.....	16
1.6.1.6. Erosión.....	17
1.6.1.7. Desgaste corrosivo.....	17
1.6.1.8. Desgaste por fatiga superficial.....	19

1.7. Tipos de fallas.....	20
1.8. Protección y reparación por soldadura.....	20
1.9. Soldadura eléctrica al arco con electrodo revestido (Shield metal arc welding-SMAW).....	22
1.9.1. Principio de funcionamiento.....	22
1.9.2. Equipos.....	23
1.9.2.1. Máquinas de corriente alterna.....	23
1.9.2.2. Máquinas de corriente continúa.....	23
1.9.2.3. Maquinas transformador – rectificador.....	24
1.9.2.4. Inversores.....	24
1.10. Electrodos recubiertos.....	24
1.10.1. Especificaciones de electrodos y varillas para recubrimientos duros.....	26
1.10.2. Electrodo EFeMn-A (AGA B-83).....	26
1.10.3. Electrodo E312-16 (AGA R-91).....	28
1.10.4. Diagrama de Schaeffler.....	29
2. METODOLOGÍA.....	32
2.1. Proceso de obtención de las probetas.....	32
2.2. Proceso de soldadura SMAW.....	34
2.3. Ensayo de doblado.....	39
2.4. Ensayo de tintas penetrantes.....	41
2.5. Ensayo de radiografía industrial.....	42
2.6. Ensayos metalográficos.....	43
2.6.1. Preparación de probetas.....	43
2.6.2. Ensayo de micrografía.....	45
2.6.3. Ensayo de macrografía.....	47
2.6.4. Ensayo de microdureza.....	47
2.6.5. Ensayo de corrosión por inmersión.....	48
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	52
3.1. Resultados.....	52

3.1.1. Ensayo de doblado.....	52
3.1.2. Ensayo de microdurezas.	54
3.1.2.1. Probeta material base.	54
3.1.2.2. Probetas sin exposición a corrosión.....	54
3.1.2.3. Probetas expuestas a 72 horas de corrosión.	57
3.1.3. Ensayo de macrografía.	60
3.1.3.1. Probetas obtenidas del ensayo de doblado sin exposición a corrosión.	60
3.1.4. Ensayo de micrografía.....	62
3.1.4.1. Probeta material base.	62
3.1.4.2. Probetas sin exposición a corrosión.....	62
3.1.4.3. Probetas obtenidas del ensayo de doblado sin exposición a corrosión.	65
3.1.4.4. Probetas expuestas a 72 horas de corrosión.	66
3.1.5. Ensayo de tintas penetrantes	69
3.1.6. Ensayo de radiografía.	70
3.1.7. Ensayo de corrosión.....	72
3.2. Análisis de los resultados obtenidos.	74
3.2.1. Caracterización del acero dúplex 2205.....	74
3.2.2. Ensayo de doblado.....	75
3.2.3. Ensayo de microdurezas.	75
3.2.4. Ensayo de micrografía.....	76
3.2.5. Ensayo de tintas penetrantes.	77
3.2.6. Ensayo de radiografía.	78
3.2.7. Ensayo de corrosión.....	78
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	80
4.1. CONCLUSIONES.	80
4.2. RECOMENDACIONES.	82
Referencias Bibliográficas.....	83
ANEXOS	88
ANEXO I.....	88

ANEXO II.....	90
ANEXO III.....	93
ANEXO IV.....	96
ANEXO V.....	99
ANEXO VI.....	103
ANEXO VII.....	118

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1.1. Microestructura austenítica.	3
Figura 1.2. Microestructura ferrítica.	3
Figura 1.3. Microestructura del acero dúplex.	4
Figura 1.4. Rango de temperaturas para cambio de fase.	5
Figura 1.5. Recubrimiento con aceite.....	7
Figura 1.6. Recubrimiento con pinturas, barnices y lacas.	7
Figura 1.7. Recubrimiento de esmalte.	8
Figura 1.8. Estructura de la capa de esmalte.....	8
Figura 1.9. Recubrimiento con esmaltado vítreo.	8
Figura 1.10. Recubrimiento con conchura negra.....	9
Figura 1.11. Recubrimiento fosfatado.	9
Figura 1.12. Recubrimiento fosfático.....	9
Figura 1.13. Estructura de recubrimiento metálico.	10
Figura 1.14. Recubrimiento por inmersión.	11
Figura 1.15. Recubrimiento por electrolisis.	11
Figura 1.16. Elemento de la industria minera.....	12
Figura 1.17. Abrasión penetrante.....	14
Figura 1.18. Abrasión pulverizante.....	14
Figura 1.19. Abrasión por erosión.....	15
Figura 1.20. Desgaste adhesivo.....	15
Figura 1.21. Desgaste por impacto.	16
Figura 1.22. Desgaste por calor.....	16
Figura 1.23. Cavitación.....	17
Figura 1.24. Erosión.....	17
Figura 1.25. Corrosión uniforme.	18
Figura 1.26. Corrosión galvánica.	18
Figura 1.27. Corrosión por picaduras.....	18
Figura 1.28. Corrosión intergranular.	19
Figura 1.29. Corrosión por esfuerzo.....	19
Figura 1.30. Desgaste por fatiga superficial.	19
Figura 1.31. Tipos comunes de cordón de soldadura.....	21
Figura 1.32. Esquema de un circuito de soldadura.	22
Figura 1.33. Transformador.	23
Figura 1.34. Moto-generador.	23
Figura 1.35. Transformador – Rectificador.....	24
Figura 1.36. Inversor.....	24

Figura 1.37. Estructura de un electrodo recubierto.	24
Figura 1.38. Electrodo AGA B-83.....	27
Figura 1.39. Electrodo AGA R-91.....	28
Figura 1.40. Diagrama de Schaeffler del electrodo B-83 con el acero dúplex 2205.	30
Figura 1.41. Diagrama de Schaeffler del electrodo R-91 con el acero dúplex 2205.	31
Figura 2.1. Tubería acero dúplex 2205.	32
Figura 2.2. Medidas del acanalado.	33
Figura 2.3. Tubería con el acanalado.....	34
Figura 2.4. (a) Tubería con acanalado. (b) Colocación de la interfase R-91 en el acanalado.	35
Figura 2.5. Tubería con las dos configuraciones, dos con R-91+B-83 y dos con B-83.	35
Figura 2.6. Tubería señalada para cortar las probetas.....	37
Figura 2.7. Modelado en Inventor de la probeta según el código ASME sección IX.....	37
Figura 2.8. Medidas de la probeta según el código ASME sección IX.....	38
Figura 2.9. Cortadora.....	38
Figura 2.10. Tubería acoplada en la cortadora.....	38
Figura 2.11. Probeta cortada.	39
Figura 2.12. Probetas para el ensayo de tintas penetrantes.	41
Figura 2.13. (a) Penetrante y (b) revelador.	42
Figura 2.14. Las probetas colocadas en el molde para resina.	44
Figura 2.15. Dimensiones de las probetas para el ensayo de corrosión.....	49
Figura 2.16. Cloruro férrico en la balanza digital.	50
Figura 2.17. Probetas sumergidas en la solución de cloruro férrico.	50
Figura 2.18. Probetas después del ensayo de corrosión.....	51
Figura 3.1 Microdurezas, indentaciones en el material base acero dúplex 2205.....	54
Figura 3.2. Comparación de las microdurezas en Rockwell para la configuración B-83, antes y después de la corrosión.	59
Figura 3.3. Comparación de las microdurezas en Rockwell para la configuración R-91+B-83, antes y después de la corrosión.	59
Figura 3.4. Macrografías del ensayo de doblado longitudinal en la configuración B-83, inicio de falla a 4X e inicio de fisuras a 20X.	60
Figura 3.5. Macrografía del ensayo de doblado transversal en la configuración B-83, inicio de falla, fisura y separación del material de aporte (a) 4X y (b) 10X.	60
Figura 3.6. Macrografía del ensayo de doblado longitudinal en la configuración R-91+B-83, inicio de falla a 4X e inicio de fisuras a 10X.	61

Figura 3.7. Macrografía del ensayo de doblado transversal en la configuración R-91+B-83, inicio de falla y fisuras a 4X y 10X.....	61
Figura 3.8. Microestructura del acero dúplex 2205 a 500X	62
Figura 3.9. (a) Microestructura del material de aporte B-83 (recubrimiento), en la configuración B-83 y R-91+B-83, (b) microestructura de acero, a 500X.....	63
Figura 3.10. (a) Microestructura del material de aporte dos (MA2_R-91) en la configuración R-91+B-83, (b) microestructura típica de la martensita en listón, a 500X.	63
Figura 3.11. (a) Microestructura de la configuración B-83, en la zona afectada por el calor (ZAC), (b) detalle de la zona afectada por el calor, a 500X.	64
Figura 3.12. (a) Microestructura de la zona afectada por el calor (ZAC) en la configuración R-91+B-83, (b) microestructura de la zona afectada por el calor en acero combinado, a 500X.	64
Figura 3.13. (a) Microestructura del material base (MB) en la configuración R-91+B-83 y configuración B-83, (b) microestructura de acero dúplex 2205, a 500X.....	65
Figura 3.14. Punto de inicio de fisura en el doblado longitudinal de la configuración B-83 a 500X.	65
Figura 3.15. Punto de inicio de fisura en doblado transversal en la configuración B-83 a 500X.	65
Figura 3.16. Puntos de inicio de fisura en doblado longitudinal en la configuración R-91+B-83 a 100X.....	66
Figura 3.17. Puntos de inicio de fisura en doblado transversal en la configuración R-91+B-83 a 100X.....	66
Figura 3.18. Pérdida del material en el borde del recubrimiento de la (a) configuración B-83, (b) configuración R-91+B-83 a 500X.	67
Figura 3.19. Medición de la profundidad de corrosión en los puntos de penetración más notables de la configuración B-83 a 100X y 500X.....	67
Figura 3.20. Medidas de penetración de la corrosión en los puntos más notables de la configuración R-91+B-83 a 100X y 500X respectivamente.	68
Figura 3.21. Medidas de penetración y áreas de picaduras en la configuración R-91+B-83 a 100X.	68
Figura 3.22. Medición de las áreas de las picaduras en la configuración B-83 a 500X.	69
Figura 3.23. Discontinuidades mostradas en el ensayo de tintas penetrantes a la configuración	69
Figura 3.24. Discontinuidades mostradas en el ensayo de tintas penetrantes a la configuración B-83.....	70

Figura 3.25. Mordedura mostrada en el ensayo de radiografía en la configuración R-91+B-83.....	70
Figura 3.26. Porosidades mostradas en el ensayo de radiografía en la configuración B-83.	71
Figura 3.27. Dimensiones de las probetas expuestas al medio corrosivo.	72
Figura 3.28. Probetas después del ensayo de corrosión.....	73

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1.1. Composición química del acero dúplex 2205 según ASTM A182/A182M-18.	4
Tabla 1.2. Propiedades mecánicas del acero dúplex según ASTM A182/A182M-18. ...	5
Tabla 1.3. Grupos principales para metales de recubrimiento y relleno según AWS A.5.21.	26
Tabla 1.4. Composición química del electrodo B-83 según AGA S.A.	27
Tabla 1.5. Corriente y polaridad para el electrodo B-83 según AGA S.A.	27
Tabla 1.6. Composición química del electrodo R-91 según AGA S.A.	28
Tabla 1.7. Corriente y polaridad para el electrodo R-91 según AGA S.A.	29
Tabla 2.1. Características del torno.	33
Tabla 2.2. Características de la soldadora.	34
Tabla 2.3. Tiempos de consumo de los electrodos en la configuración uno.	35
Tabla 2.4. Tiempos de consumo de los electrodos en la configuración dos.	36
Tabla 2.5. Tiempos de consumo del electrodo en la configuración tres.	36
Tabla 2.6. Tiempos de consumo del electrodo en la configuración cuatro.	37
Tabla 2.7. Características de la máquina universal de ensayos.	39
Tabla 2.8. Posiciones de doblado.	40
Tabla 2.9. Características de la desbastadora.	44
Tabla 2.10. Características de la pulidora automática.	45
Tabla 2.11. Características de los reactivos.	46
Tabla 2.12. Características del microscopio.	46
Tabla 2.13. Características del microscopio.	47
Tabla 2.14. Características del microdurómetro.	48
Tabla 2.15. Características de la balanza de precisión.	49
Tabla 2.16. Masa en gramos de las probetas antes de la corrosión.	49
Tabla 2.17. Características de la balanza digital.	50
Tabla 2.18. Masa en gramos de las probetas después de la corrosión.	51
Tabla 3.1. Probetas después de realizar el ensayo de doblado.	52
Tabla 3.2. Resultados obtenidos en el ensayo de microdurezas efectuadas en el material base acero dúplex 2205.	54
Tabla 3.3. Resultados obtenidos en el ensayo de microdurezas efectuadas en las zonas de interés de la configuración B-83.	55
Tabla 3.4. Resumen de los resultados obtenidos en el ensayo de microdurezas efectuadas en las tres zonas de la configuración B-83.	55

Tabla 3.5. Resultados obtenidos en el ensayo de microdurezas efectuadas en las zonas de interés de la configuración R-91+B-83.	56
Tabla 3.6. Resumen de los resultados obtenidos en el ensayo de microdurezas efectuadas en las cuatro zonas de la configuración R-91+B-83.....	56
Tabla 3.7. Resultados obtenidos en el ensayo de microdurezas efectuadas en las zonas de interés de la configuración B-83 sometida a corrosión.	57
Tabla 3.8. Resumen de los resultados obtenidos en el ensayo de microdurezas efectuadas en las tres zonas en la configuración B-83 sometida a corrosión.....	57
Tabla 3.9. Resultados obtenidos en el ensayo de microdurezas efectuadas en las zonas de interés de la configuración R-91+B-83 sometida a corrosión.	58
Tabla 3.10. Resumen de los resultados obtenidos en el ensayo de microdurezas efectuadas en las cuatro zonas en la configuración R-91+B-83 sometida a corrosión.	58
Tabla 3.11. Dimensiones de las porosidades encontradas en el recubrimiento de la configuración B-83.....	71
Tabla 3.12. Pérdida de masa obtenido el ensayo de corrosión para las dos configuraciones.....	73
Tabla 3.13. Cálculo de la velocidad de corrosión para las dos configuraciones.	74

RESUMEN

El presente trabajo tiene como finalidad analizar el comportamiento del recubrimiento metálico realizado con el electrodo B-83 sobre el acero dúplex 2205, con y sin la ayuda de una interfase realizada con el electrodo R-91 entre ambos. Tanto la interfase como el recubrimiento metálico fueron depositados mediante el proceso de soldadura SMAW. Para la evaluación del recubrimiento por medio del código ASME sección IX se obtuvieron dieciséis probetas, ocho sin el uso de la interfase, configuración B-83 y ocho con el uso de la interfase, configuración R-91+B-83.

El código ASME sección IX establece los parámetros de aceptación o rechazo para los ensayos de doblado guiado y tintas penetrantes, para el primero se usan cuatro probetas de cada configuración, dos en dirección transversal y dos en dirección longitudinal, mientras que para el segundo se usa una probeta de la configuración B-83 y una probeta de la configuración R-91+B-83. Para un mejor análisis del depósito obtenido como recubrimiento se realizó un ensayo de radiografía industrial a las probetas utilizadas para tintas penetrantes, esto permite determinar si existen discontinuidades internas que puedan afectar la conducta del material.

Para establecer los cambios microestructurales que se producen y como afectan al comportamiento mecánico, antes y después de realizar un proceso de corrosión, se realizan ensayos adicionales como macrografía, micrografía y microdureza para las dos configuraciones.

El proceso de corrosión permite predecir el comportamiento del recubrimiento cuando es puesto a trabajar en ambientes expuestos al aire libre.

Palabras clave: Acero, B-83, configuración, dúplex, R-91, recubrimiento.

ABSTRACT

The purpose of this work is to analyze the behavior of the overlay made with electrode B-83 on duplex steel 2205, with and without the help of an interfase made with electrode R-91 between them. Both the interfase and the overlay were deposited through the SMAW welding process. For the evaluation of the overlay through of the ASME section IX code, sixteen test pieces were obtained, eight of them without the use of the interfase, configuration B-83 and the other eight with the use of the interfase, configuration R-91 + B-83.

The ASME section IX code establishes the acceptance or rejection parameters for guided bending tests and penetrating inks, for the first one, four test pieces of each configuration are used, two in transverse direction and two in longitudinal direction, while for the second one it is used a test piece of configuration B-83 and other of configuration R-91 + B-83. For a better analysis of the deposit obtained as an overlay, an industrial radiography test was performed on the test pieces used for penetrating inks, this allows to determine if there are internal discontinuities that can affect the behavior of the material.

To establish the microstructural changes that occur and how they affect to mechanical behavior, additional tests such as macrography, micrography and microhardness are performed for the two configurations before and after performing a corrosion process. The corrosion process makes it possible to predict the behavior of the overlay when it works in exposed outdoor environments.

Keywords: Steel, B-83, configuration, duplex, R-91, overlay

CARACTERIZACIÓN DEL RECUBRIMIENTO CON ELECTRODO B-83 SOBRE ACERO DÚPLEX 2205

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe información limitada que estudie la relación entre la aplicación de un recubrimiento duro y sus propiedades mecánicas, sobre la superficie de diferentes aceros; para el caso de un recubrimiento duro sobre el acero dúplex 2205 no existe la información suficiente, que ayude a determinar las características mecánicas. Los ensayos mecánicos, las metalografías y ensayos químicos ayudarán a establecer de forma adecuada los parámetros que influyen en la unión del recubrimiento (electrodo AGA B-83) con el material base (acero dúplex 2205) cuando sean puestos en condiciones de servicio. El acero dúplex 2205 combina dos fases equilibradas en el sistema Fe – Cr – Ni, las cuales son ferrita y austenita; la ferrita posee características que permiten obtener una buena soldabilidad, y la austenita provee una resistencia a la corrosión; razón por la cual el acero dúplex 2205 es elegido como material base, en diferentes proyectos de investigación. Un recubrimiento puede ser metálico o no metálico, y debe tener un espesor específico para evitar el desgaste, mejorar el aspecto de las superficies y alargar la vida útil. En el presente estudio, el recubrimiento duro (metálico) se lo realiza con electrodo AGA B-83 que posee buenas propiedades mecánicas, además de ser fácil de maquinar y también puede ser utilizado para soldadura de reparación; para un mejor análisis del recubrimiento se utiliza electrodo AGA R-91 como interfase, que ayuda a una mejor adherencia entre diferentes metales; en el proceso de soldadura se utilizan diferentes configuraciones, las cuales son R-91+B-83 y B-83.

Objetivo general

Caracterizar el recubrimiento con electrodo B-83 sobre acero dúplex 2205.

Objetivos específicos

- Investigar el proceso y las variables de soldadura adecuadas para poder realizar un recubrimiento duro.
- Aplicar el recubrimiento duro utilizando como interfase el electrodo R-91 y sin el uso de una interfase.
- Realizar diferentes ensayos que permitan conocer las propiedades mecánicas del recubrimiento duro.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Aceros Inoxidables

Son aleaciones que tienen como base hierro, con muy bajo contenido de carbono (aproximadamente 0,08%) y bajo contenido de cromo (aproximadamente 11%). En algunas ocasiones también se le suele adicionar níquel.

La característica principal es el desarrollo de una resistencia alta a la corrosión, la cual es resultado de la espontánea formación de una capa muy fina de óxido de cromo en la superficie del acero. Esta capa se restaura de forma rápida con la presencia de oxígeno por lo que los daños que se producen por abrasión, corte o mecanizado se reparan rápido. (Escola & Gavilanes, 2018)

Cuenta con grandes ventajas como son:

- Resistencia a la corrosión.
- Resistencia a altas y bajas temperaturas.
- Facilidad para la fabricación.
- Buena resistencia mecánica.
- Buena apariencia estética.
- Buenas propiedades higiénicas.
- Ciclo de trabajo largo.

Los tipos principales de aceros inoxidable son los siguientes:

- Austeníticos: El principal elemento aleante es el níquel, el cual permite estabilizar la austenita a temperaturas bajas.
- Ferríticos: Se caracterizan por mantener la estructura ferrítica a cualquier temperatura.
- Martensíticos: Son aleaciones en el campo gamma del diagrama Fe – Cr, cuando se produce un recocido se comportan como ferríticos, pero al enfriarse rápidamente en aire o un líquido adquieren la estructura martensítica.
- Endurecibles por precipitación: Tienen como elementos aleantes al cromo, níquel y elementos que favorecen la precipitación (Mo, Ti, N, Cu, Al, Ta, Nb, B y V).
- Dúplex: Los elementos aleantes son el cromo, molibdeno y otros elementos que ayudan a obtener un balance entre las fases ferríticas y austeníticas (Ibarra , Nuñez, & Huerta, 2010).

1.1.1. Acero dúplex 2205

Los aceros inoxidable dúplex son aleaciones de doble fase en el sistema Fe-Cr-Ni con porcentajes de carbono muy bajos (menores a 0,03%), gozan de propiedades combinadas de aceros austeníticos (Figura 1.1.) y ferríticos (Figura 1.2.). Estas combinaciones fueron desarrolladas para facilitar materiales con características excepcionales. La microestructura que posee es de proporciones casi semejantes de ferrita y austenita (Figura 1.3.).

Como el acero se produce mediante un proceso de fundición primero se forma la fase ferrítica como al empezar la etapa de solidificación, mientras que la fase austenítica se forma en la etapa de enfriamiento.

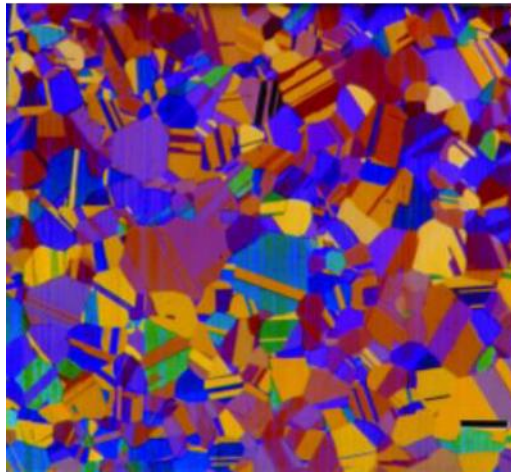


Figura 1.1. Microestructura austenítica.

(Fuente: Handbook Vol. 9)

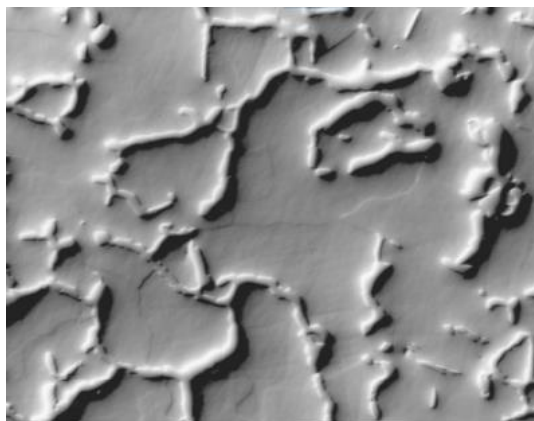


Figura 1.2. Microestructura ferrítica.

(Fuente: Handbook Vol. 9)

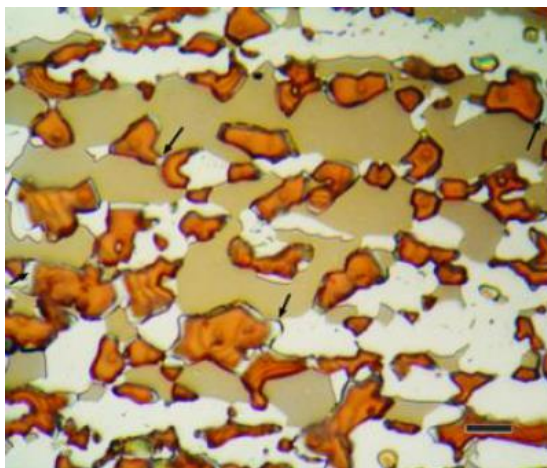


Figura 1.3. Microestructura del acero dúplex.

(Fuente: Handbook Vol. 9)

Para los aceros inoxidable existe una gran variedad, entre los cuales se encuentra la familia 2205. En el proceso de fabricación de este acero se añade nitrógeno a la mezcla para retrasar la formación de fases perjudiciales que se presentan en los aceros inoxidables con alto contenido de cromo y molibdeno, adicionalmente permite controlar las dificultades que se presentan a causa de la corrosión y ayuda a estabilizar la fase austenítica.

Para lograr unas buenas propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión debe existir un equilibrio entre la ferrita y austenita. Cuando se realice el proceso de soldadura se debe controlar un adecuado balance de las mismas y evitar la formación de fases secundarias para no alterar las características del acero. (Escola & Gavilanes, 2018)

Los elementos aleantes del acero dúplex 2205 se detallan a continuación (Tabla 1.1.):

Tabla 1.1. Composición química del acero dúplex 2205 según ASTM A182/A182M-18.

Elemento	Porcentaje
C	0,03
Mn	2,00
P	0,03
S	0,03
Si	1,00
Ni	4,50 - 6,50
Cr	21,00 – 23,00
Mo	2,50 – 3,50
N	0,08 -0,20

(Fuente: Norma ASTM A182/A182M-18)

Este tipo de aceros permiten la aplicación de tratamientos térmicos como: recocido, normalizado y temple para mantener el equilibrio de las fases. En la Figura 1.32. Se muestra el diagrama Fe-Cr-Ni con el rango de temperaturas para que se produzca el cambio de fase. (Figura 1.4.)

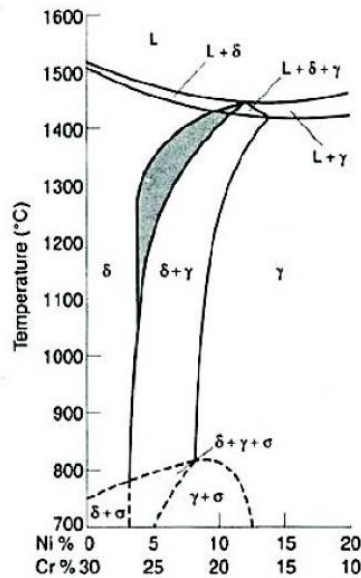


Figura 1.4. Rango de temperaturas para cambio de fase.

(Fuente: Gunn)

Conjuntamente las propiedades mecánicas que se desarrollan por la combinación de las fases austenítica y ferrítica son superiores a las que se consiguen individualmente y se especifican en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Propiedades mecánicas del acero dúplex según ASTM A182/A182M-18.

Propiedad	Valor
Resistencia a la tracción	620 [MPa]
Limite elástico	450 [MPa]
Elongación en 50 mm	25 [%]
Dureza Máxima	30 [HRC]

(Fuente: Norma ASTM A182/A182M-18)

Las aplicaciones más comunes para el acero dúplex 2205 son:

- Tuberías de intercambiadores térmicos, de petróleo y en línea.
- Plataformas de ultramar y cuerpos de válvulas para agua de mar
- Bombas de fundición.
- Pozos de gas.
- Industria de procesamiento químico.
- Plantas desalinizadoras y petroquímicas. (Escola & Gavilanes, 2018)

1.2. Recubrimiento

Un recubrimiento es un material con espesor limitado que al aplicarse sobre una superficie la protege, mejora el aspecto e impide que agentes externos interactúen con la misma.

Uno de los objetivos del recubrimiento en un metal es facilitar una resistencia prolongada a ambientes perjudiciales que generan desgaste. Otro de los objetivos es aumentar la vida útil del elemento y en casos determinados proporcionar un aislamiento eléctrico.

Para colocar adecuadamente un recubrimiento es importante adecuar la superficie para que exista una buena adhesión. Se debe realizar una limpieza completa que dependerá del material, geometría y tipo de recubrimiento que se aplicará. (Matsumoto, 1999)

Los tipos de limpieza principales son:

- Limpiadores: Existen tres limpiadores básicos los cuales se detallan a continuación.
 1. Emulsiones orgánicas: Combinan las propiedades de un solvente con las de un agente que remueve la suciedad.
 2. Soluciones alcalinas: Remueven la mayoría de tipos de suciedad, pero afecta a las superficies.
 3. Ácidos suaves: Son usados principalmente para eliminar óxidos, fundentes y escamas.

Para poder utilizar estos limpiadores se los debe mezclar, razón por la cual se usa como disolvente y removedor el agua.

- Limpieza electrolítica: Se somete al elemento a una inmersión en una solución alcalina, siendo este el cátodo del circuito. Debido al gas que se libera en la superficie las partículas extrañas son separadas.

Desengrasado por vapor: Se coloca un solvente no inflamable en el fondo de un tanque que se va calentando en un rango de temperatura de 45 a 145°C, lo que permite su vaporización. El componente a limpiarse se mantiene a bajas temperatura para que al contacto con el vapor este se condense disolviendo y removiendo las impurezas.

- Limpieza electro-sónica: El elemento es sumergido en un fluido de limpieza, para después generar ondas sonoras de alta frecuencia, provocando la formación y colapso de burbujas que separan los contaminantes de la superficie.
- Limpieza mecánica: Se usa principalmente materiales abrasivos en contacto con la superficie para eliminar polvo, cascarilla, etc. (Chalá Gonzalón & Molina Velasco, 2010)

1.3. Tipo de recubrimientos

Existen diferentes tipos de recubrimientos para las distintas superficies, bien sean estas no metálicas o metálicas, dependiendo de ello se elige el recubrimiento más conveniente para el material.

1.3.1. No metálicos

Las funciones que cumplen estos recubrimientos son proteger al material contra la corrosión por calor y ambientes extraños, aumentando la vida útil del elemento, así como mejorar el aspecto externo e incrementar el aislamiento eléctrico.

Este tipo de recubrimiento se puede aplicar sobre gran variedad de materiales como son: plásticos, cerámicos, metales, polímeros, madera, minerales sólidos, etc.; los recubrimientos no metálicos se clasifican de la siguiente manera:

Aceite y engrasado: Protege la superficie a la vez que le da un aspecto brillante. Se debe usar aceites y grasa minerales. (Figura 1.5.)



Figura 1.5. Recubrimiento con aceite.

(Fuente: www.tecnologiaysistemas.es)

Pintado: Los materiales más usados para este tipo de recubrimiento son las pinturas, barnices y lacas. Los mismos que pueden ser aplicados de diversas maneras. (Figura 1.6.)



Figura 1.6. Recubrimiento con pinturas, barnices y lacas.

(Fuente: pinturassuau.com)

Material sintético: Se usan principalmente los esmaltes debido a que se tiene un mayor espesor de la capa y una mejor adherencia para superficies ásperas, previo a la colocación del esmalte debe realizarse un engrasado sobre la superficie. (Figura 1.7. y 1.8.)



Figura 1.7. Recubrimiento de esmalte.
(Fuente: sinteplastindustria.com)

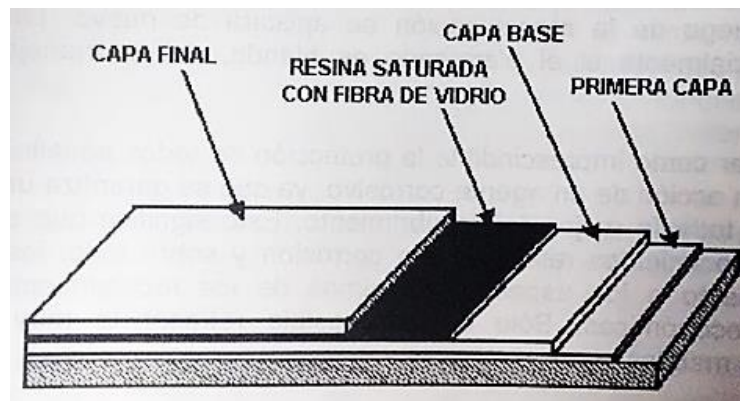


Figura 1.8. Estructura de la capa de esmalte.
(Fuente: blog.utp.edu.co)

Esmaltado vítreo: El principal componente es el polvo de vidrio, el cual es aplicado sobre el elemento mediante pulverización o inmersión y se lo fija al ser colocado en el horno. (Figura 1.9.)



Figura 1.9. Recubrimiento con esmaltado vítreo.
(Fuente: www.slideshare.net)

Por procesos químicos: Generalmente se crean películas delgadas distribuidas uniformemente sobre la superficie a proteger, comúnmente se realiza en aceros y los tipos más utilizados son:

- ❖ **Conchura negra:** Es una capa negra de aceite de linaza, aceite mineral o cera fundida de abeja, que es de poca duración, y usualmente evita la corrosión. (Figura 1.10.)



Figura 1.10. Recubrimiento con conchura negra.

(Fuente: www.slideshare.net)

- ❖ **Fosfatado:** Es una capa de fosfato de hierro que se logra mediante baños en soluciones fosfáticas acuosas, teniendo espesores de 0.2 a 20 mm. (Figura 1.11.)



Figura 1.11. Recubrimiento fosfatado.

(Fuente: www.slideshare.net)

- ❖ **Fosfáticos:** Se aplica una solución ácida diluida de fosfato a la superficie del elemento lo que provoca que se convierta en fosfato cristalino insoluble. (Figura 1.12.) (Bedoya Piedrahita, Giraldo Giraldo, Galeano Galviz, & Cardenas Figueroa, 2015).



Figura 1.12. Recubrimiento fosfático.

(Fuente: www.slideshare.net)

1.3.2. Metálicos

El objetivo principal del recubrimiento metálico es proteger a otros metales de los distintos tipos de desgaste, como también mejorar o añadir propiedades en los metales a los que se aplica el recubrimiento; cabe recalcar que la protección va a depender del método de aplicación y del espesor del recubrimiento. (Sierra, 2017)

En los recubrimientos metálicos existen dos categorías principales que son:

1. **Directo:** Es una capa protectora que debe poseer la menor cantidad de porosidades u otras discontinuidades, y de este modo impedir que el metal base reaccione con el ambiente; los elementos más usados en el recubrimiento tienen una mayor capacidad de protección y características específicas, que se detalla a continuación:

- **Cobre:** Ayuda a mejorar la conductividad y la resistencia a la corrosión por rozamiento.
- **Níquel:** Se usa principalmente para el contacto con productos químicos y permite una mejor resistencia a altas temperaturas y a la oxidación.
- **Cromo:** Permite un mejor acabado estético con depósitos gruesos. (Ortiz , Díaz, & Cataforesis, 2013)

2. **Sacrificio:** Es una capa protectora que absorbe todos los agentes dañinos, preservando de este modo al metal base (metal débil), motivo por el cual no es de importancia las discontinuidades que puedan existir, sin embargo, es recomendable evitarlas ya que así se asegura un mayor tiempo de protección. En este tipo de recubrimiento el elemento más usado es:

- **Zinc:** Proporciona una protección contra la corrosión. (Vázquez, 2015)

La estructura del recubrimiento metálico empieza desde la superficie del metal base, seguido de cobre, níquel y finalmente el cromo. (Figura 1.13.)

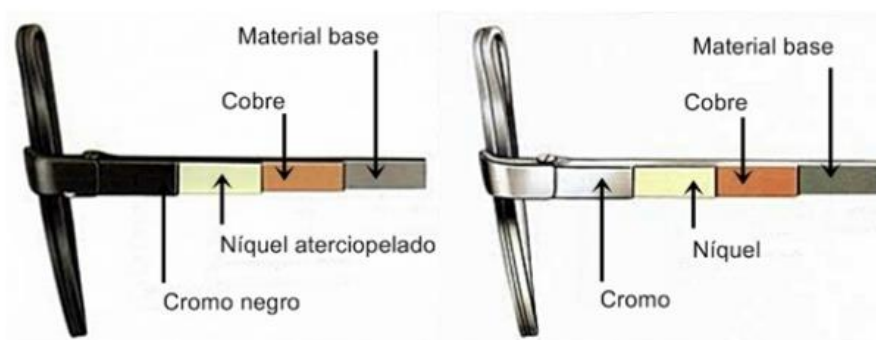


Figura 1.13. Estructura de recubrimiento metálico.

(Fuente: histoptica.com)

Existe una variedad de procesos para la aplicación del recubrimiento metálico, pero los más usuales son los siguientes:

Por inmersión: Se recubre a los elementos metálicos con una capa delgada de zinc, generalmente se usa para productos de uso cotidiano. (Figura 1.14.) (Heredia, 2018)



Figura 1.14. Recubrimiento por inmersión.

(Fuente: tornillosytuercas.mx)

Galvanotecnia: Se aplica una corriente eléctrica a una solución acuosa de sales metálicas en la cual está sumergido el elemento a recubrir, lo que permite que se cree una capa de óxido superficial que no se desprende. Es comúnmente usada para aleaciones de aluminio. (Figura 1.15) (Heredia, 2018)

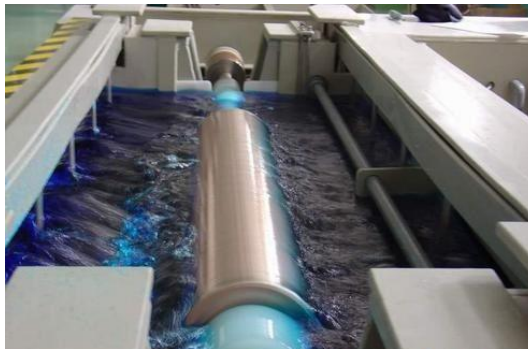


Figura 1.15. Recubrimiento por electrolisis.

(Fuente: www.areatecnologia.com)

1.4. Recubrimientos duros

Los recubrimientos duros y la soldadura de mantenimiento prolongan la vida útil de la maquinaria, al obtener altos rendimientos durante más tiempo y reducir el número de fallas.

Los recubrimientos duros surgieron de la necesidad de minimizar el desgaste o recuperar elementos desgastados, reduciendo de esta manera el costo que implicaría cambiar los mismos por nuevos. Generalmente son aplicados por soldadura y se mejora el acabado

superficial mediante un maquinado. Para una correcta aplicación se debe conocer el proceso y material de aplicación.

El recubrimiento duro cubre un amplio control del desgaste, como por ejemplo el desgaste por abrasión debido a la pulverización y ruptura de piedras hasta el desgaste por fricción entre metales que debe ser el mínimo posible.

Las industrias que comúnmente utilizan estos recubrimientos con un grado alto de éxito son la minera, petrolera y de construcción civil. (Figura 1.16)

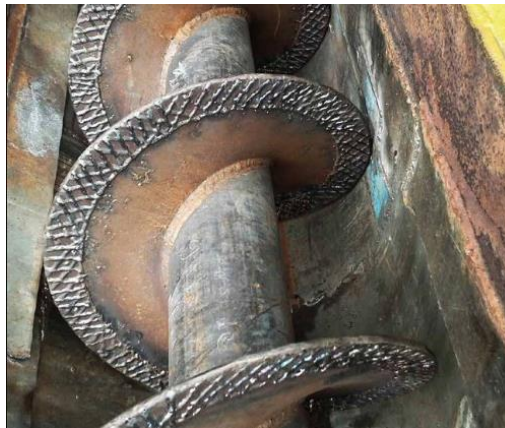


Figura 1.16. Elemento de la industria minera.

(Fuente: es.readkong.com)

1.5. Soldadura de mantenimiento y reparación.

Para este tipo de soldadura usualmente no se conoce exactamente las características del metal base, debido a que son elementos que han sufrido corrosión o han sido fracturados por causas externas. Para realizar correctamente esta soldadura se debe tener un conocimiento claro de la variedad de materiales de aporte, así como sus características dependiendo de cada fabricante.

El principio de la soldadura en general es mantener una homogeneidad entre materiales, tanto en propiedades como en composición. Como no se sabe claramente la naturaleza del material base, para cumplir con el principio antes descrito es necesario realizar análisis químicos.

Otra dificultad que se presenta en esta soldadura es identificar correctamente el mecanismo y tipo de desgaste al que está expuesto el material. Esto implica una necesidad de aplicar aleaciones especiales y combinar diferentes procesos que permitan mantener o mejorar las propiedades del material base. (Chalá Gonzalón & Molina Velasco, 2010)

Para un análisis preciso es necesario conocer:

- Material base.
- Tipo de trabajo.
- Tipo de medioambiente.
- Temperatura de trabajo.
- Mecanismo y nivel de desgaste.
- Dimensiones originales.

1.6. Desgaste

Se define como el deterioro gradual de una superficie debido a diferentes factores ambientales o de servicio.

Normalmente es dañino, pero dependiendo de la severidad del daño y la frecuencia de reposición del elemento se cataloga en normal y destructivo. Generalmente no provoca fallas violentas, pero si afecta a la eficiencia, potencia y lubricación del conjunto. (Chalá Gonzalón & Molina Velasco, 2010)

1.6.1. Mecanismos de desgaste

Existen diferentes formas para el deterioro de los materiales en elementos mecánicos, dicho deterioro puede ser intenso o despreciable, aunque de igual manera afecta de forma desfavorable al funcionamiento del sistema. A continuación, se detallan los tipos de desgaste más comunes.

1.6.1.1. Desgaste por abrasión

Es producto de partículas que se deslizan sobre la superficie provocando desprendimiento de material, rayaduras y dislocaciones de cristales.

La velocidad del desgaste está determinada por el grado de penetración del material abrasivo, por lo tanto, depende de la dureza superficial, tenacidad y rugosidad del material. Otros factores que influyen para este desgaste son las cargas de trabajo, condiciones ambientales y temperaturas de servicio. (Chalá Gonzalón & Molina Velasco, 2010)

El desgaste abrasivo es medido mediante la velocidad normal a que el metal es eliminado de la superficie, generalmente esta expresado en términos de milésimas por hora. El desgaste abrasivo se puede clasificar en:

Penetrante: Es provocada por altos esfuerzos, lo que provoca una micro deformación notable. Además, como las partículas están en un soporte se tiene similares efectos a un instrumento de corte. Es la que tiene la tasa más alta de desgaste en la abrasión. (Figura 1.17.)

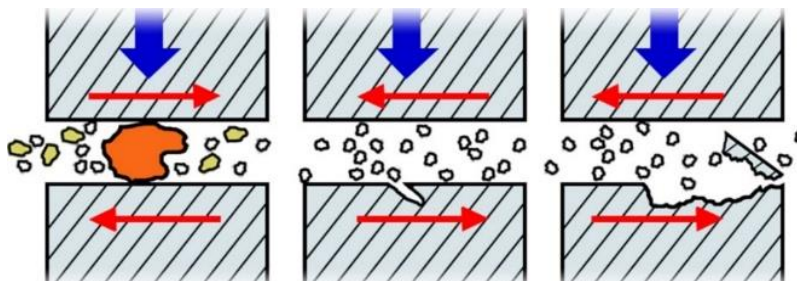


Figura 1.17. Abrasión penetrante.

(Fuente: www.datamovilidad.com)

Pulverizante: Ocurre al estar dos superficies en fricción en un medio arenoso debido a fuerzas de trituración que producen partículas del material a triturar. Debido a que el área de las partículas es muy pequeña los esfuerzos son muy altos, esto provoca pequeñas grietas o fracturas en materiales frágiles. Los granos triturados generalmente están afilados por lo que se produce un rayado en las superficies en contacto. (Figura 1.18.)

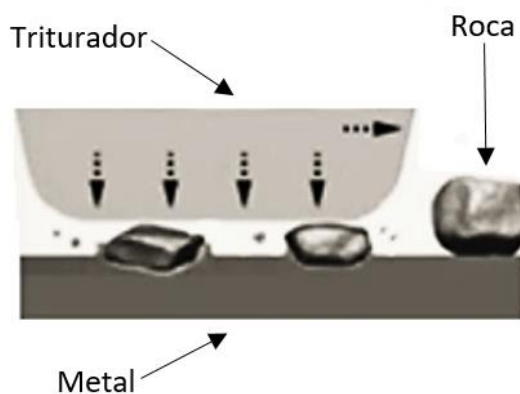


Figura 1.18. Abrasión pulverizante.

(Fuente: tesis.pucp.edu.pe)

Por erosión: Se debe principalmente a dos factores que son la velocidad y el bajo impacto en un movimiento paralelo a la superficie de contacto de abrasivo (flujo). Cuando el impacto es muy bajo lo ideal es usar un material mucho más duro. Generalmente este tipo de desgaste depende de tres regímenes de dureza. (Figura 1.19.)

1. **Débil:** Dureza del abrasivo es menor a la superficie
2. **Transición:** Dureza del abrasivo es igual a la superficie
3. **Severo:** Dureza del abrasivo es mayor a la superficie



Figura 1.19. Abrasión por erosión.

(Fuente: Baena)

1.6.1.2. Desgaste adhesivo

Ocurre cuando dos superficies en movimiento entran en contacto sin un material intermedio y existen fragmentos unidos debido a soldadura bajo presión a altas temperaturas locales. También es conocido como rayado, muesca o arañazo. (Figura 1.20.)

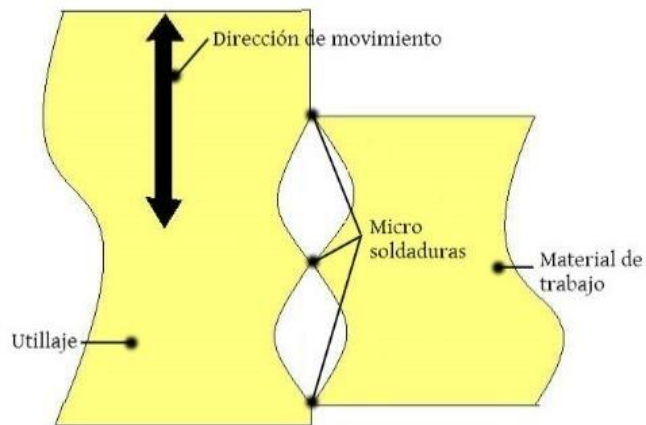


Figura 1.20. Desgaste adhesivo.

(Fuente: commons.wikimedia.org)

Como medida de prevención se utilizan lubricantes antifricción para crear una pequeña capa de separación. Se debe tener cuidado con el calor generado por la fricción para no sobrepasar las condiciones de servicio. Este tipo de desgaste puede ser el detonante de la fatiga por picaduras (Chalá Gonzalón & Molina Velasco, 2010).

1.6.1.3. Desgaste por impacto

Se da por el efecto de fuerzas de choque o compresión entre una masa dura sobre una superficie. Depende del ritmo, velocidad de golpeteo y del peso de la pieza. El factor que se debe tomar en cuenta es el límite elástico, ya que de este depende la aparición de fisuras (Figura 1.21.) (Chalá Gonzalón & Molina Velasco, 2010).

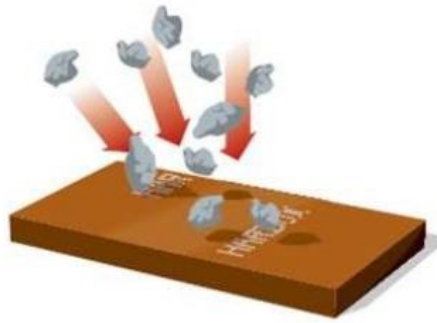


Figura 1.21. Desgaste por impacto.

(Fuente: www.slideshare.net)

1.6.1.4. Desgaste por calor

Principalmente ocurre en elementos endurecidos por tratamientos térmicos, los mismos que producen cambios de fase que afectan a la dureza, fragilidad y efecto del ataque químico.

El calor por fricción se transfiere hacia los materiales de menor temperatura bajo la superficie, pero una cantidad del mismo se concentra en algunos puntos locales generando una alta temperatura, disminuyendo la energía necesaria para la fusión y soldadura y aumentando la tasa de desgaste. También modificará las propiedades del material expuesto, además de acelerar las transformaciones estructurales y reacciones químicas. (Figura 1.22.)

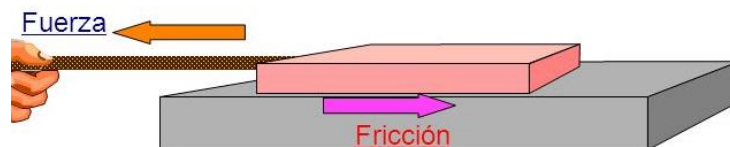


Figura 1.22. Desgaste por calor.

(Fuente: www.slideshare.net)

Los materiales que tienen una composición que forma óxidos estables, duros y con punto de fusión elevado son resistentes a este desgaste (Chalá Gonzalón & Molina Velasco, 2010).

1.6.1.5. Cavitación

Es resultado del movimiento relativo de las burbujas de un fluido sobre una superficie sólida. Al cambiar la velocidad de un fluido se produce una conversión de energía que cambia la presión estática a presión de vapor, originando así las burbujas de cavitación. A medida que el fluido va recuperando la presión estática estas burbujas van desapareciendo debido al colapso de las mismas, cuando este es muy cercano a los límites de la superficie,

se producen los daños por cavitación que tienen una apariencia parecida a las picaduras por erosión (Figura 1.23.) (Chalá Gonzalón & Molina Velasco, 2010).

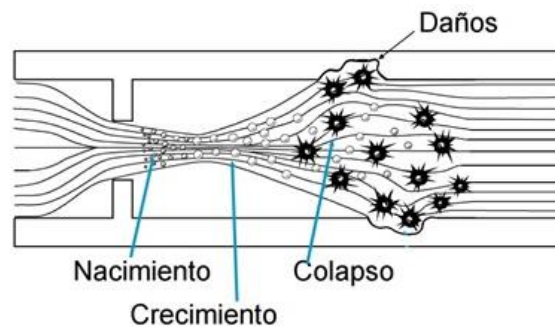


Figura 1.23. Cavitación.

(Fuente: www.iagua.es)

1.6.1.6. Erosión

Se da por la acción de partículas que son transportadas por un fluido y que golpean la superficie de la pieza, generalmente es la eliminación progresiva de las capas protectoras y depende del ángulo de incidencia, tipo, tamaño y forma de material impactante. El aspecto común de este desgaste son pequeños orificios lisos, principalmente producidos por la turbulencia a altas velocidades (Figura 1.24.) (Luddey & Trujillo, 2007).

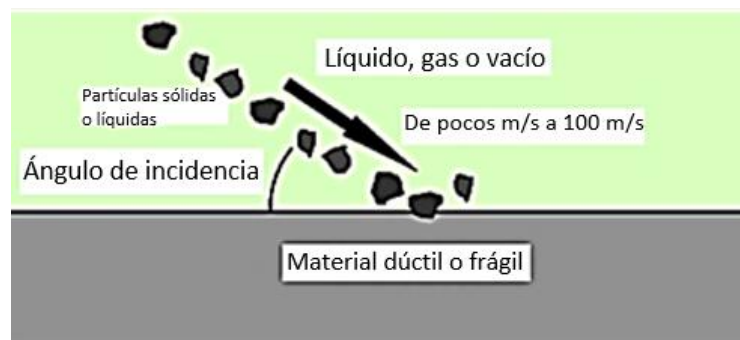


Figura 1.24. Erosión.

(Fuente: docplayer.es)

1.6.1.7. Desgaste corrosivo

Se define como el deterioro o destrucción de materiales debido a cargas mecánica e interacción del material y el medio ambiente. Existen diferentes clasificaciones de corrosión, pero la más usada depende de la apariencia del material (Chalá Gonzalón & Molina Velasco, 2010).

Uniforme: Puede ser una reacción química o electroquímica entre el metal y el medio ambiente, la cual ocurre uniformemente sobre toda la superficie del elemento. (Figura 1.25.)



Figura 1.25. Corrosión uniforme.

(Fuente: ingenieriamecanicacol.blogspot.com)

Galvánica: Sucede cuando metales de diferentes potenciales entran en contacto. Esto provoca la manifestación de un cátodo y un ánodo. (Figura 1.26.)



Figura 1.26. Corrosión galvánica.

(Fuente: www.slideshare.net)

Por picaduras: Es una de las formas más destructivas de corrosión debido a que ocasiona perforación y penetración en las superficies protegidas con recubrimientos. (Figura 1.27.)



Figura 1.27. Corrosión por picaduras.

(Fuente: ingenieriamecanicacol.blogspot.com)

Intergranular: Se localiza en los límites de grano generando una descomposición de los bordes por pérdida de resistencia. (Figura 1.28.)

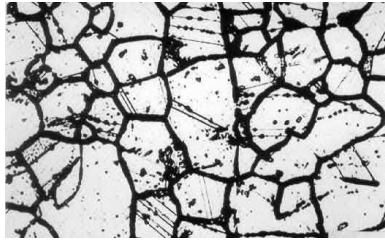


Figura 1.28. Corrosión intergranular.
(Fuente: www.corrosionclinic.com)

Por esfuerzo: Es causado por los esfuerzos internos que están por debajo del límite de elasticidad después de una deformación en frío y forman microgrietas que son invisibles a simple vista. (Figura 1.29.)



Figura 1.29. Corrosión por esfuerzo.
(Fuente: ingenieriamecanicacol.blogspot.com)

1.6.1.8. Desgaste por fatiga superficial

Solo ocurren en elementos carburados, está caracterizado por cavidades grandes que comúnmente tienen su origen en el límite centro – superficie de partes endurecidas. Depende de la resistencia al corte de la región sub – superficial, a menor resistencia mayor desgaste (Chalá Gonzalón & Molina Velasco, 2010).

Cuando las superficies se deslizan bajo presión, están sujetas a calentamientos repetitivos o ciclos de enfriamiento produciendo fatiga por esfuerzos térmicos, lo que genera fisuras superficiales y grandes fracturas (Figura 1.30.).

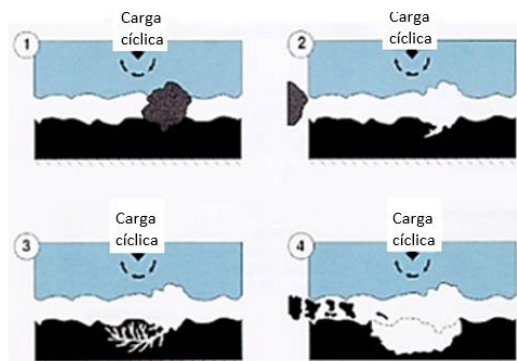
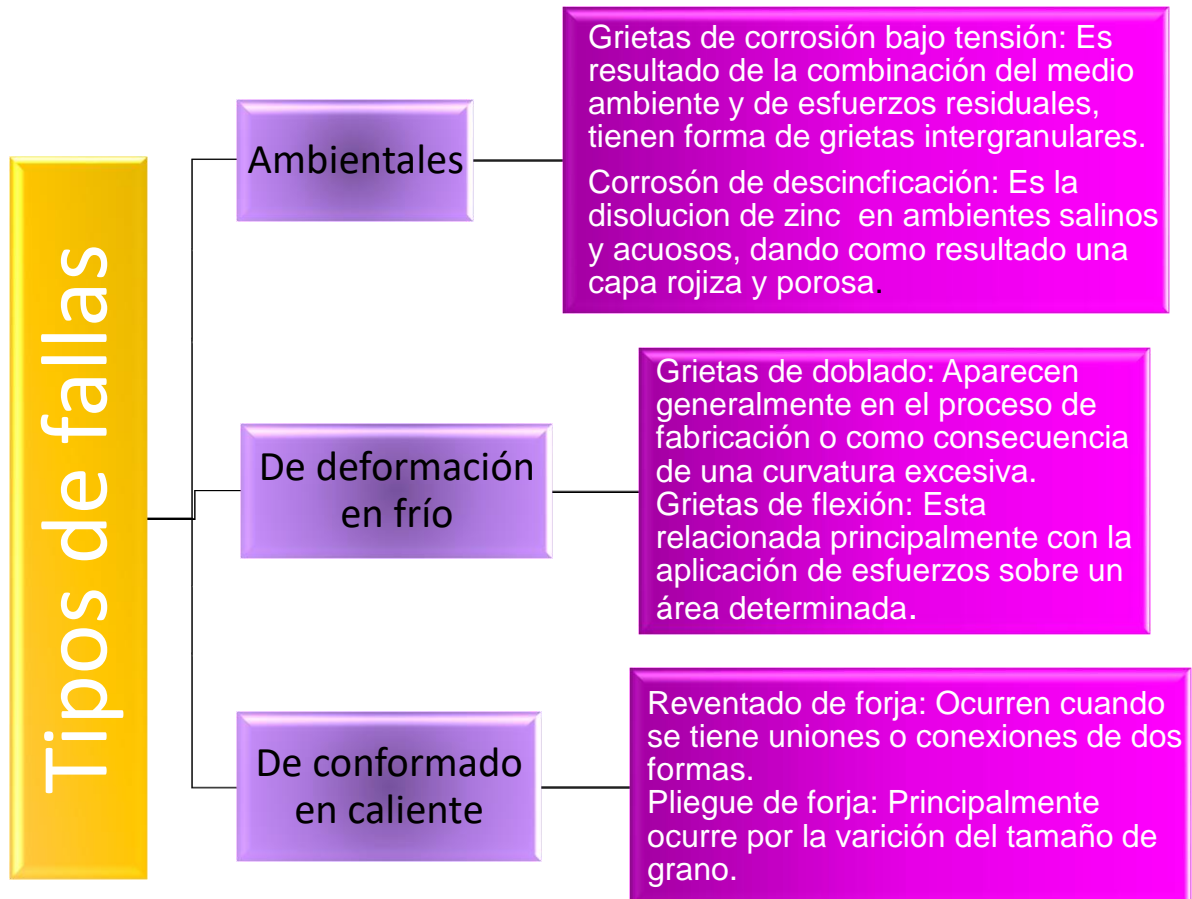


Figura 1.30. Desgaste por fatiga superficial.
(Fuente: docplayer.es)

1.7. Tipos de fallas

Para un mejor análisis de las fallas que se puedan encontrar en el recubrimiento de estudio, se realiza una clasificación de los tipos de fallas comunes en elementos metálicos, detallando sus características específicas en el siguiente mapa conceptual.



1.8. Protección y reparación por soldadura

Es una técnica de soldadura que tiene como finalidad proteger y/o restaurar las condiciones iniciales de las superficies de trabajo que están expuestas a desgaste por medio de la adición de un material adicional, otro objetivo es poder extender la vida útil de las piezas.

Los mecanismos de desgaste pueden aparecer solos o combinados, razón por la cual se debe seleccionar adecuadamente el electrodo para proteger de la mejor manera al material base.

Para una correcta aplicación del recubrimiento duro hay que preparar la superficie, es decir realizar una limpieza completa de suciedad, material corroído o deformado y lo más recomendable es tratar de soldar en posición plana.

Para seleccionar una aleación para el recubrimiento duro se deben tener en cuenta los costos y beneficios que se van a tener a corto y largo plazo.

La elección del proceso de soldadura adecuado también debe ser tomada con criterio de los requerimientos de servicio, características y propiedades metalúrgicas del material base, el electrodo seleccionado, la calidad del depósito de soldadura, habilidad del soldador y finalmente el costo de operación.

Se debe realizar un completo control de los siguientes factores para un buen recubrimiento:

- ✓ Composición y forma del metal base.
- ✓ Proceso de soldadura.
- ✓ Composición del recubrimiento.

Cuando los elementos están severamente desgastados, es necesario realizar una recuperación de la superficie para poder aplicar el recubrimiento, esta se debe realizar con aleaciones compatibles tanto con el metal base como con el electrodo, generalmente es usado un metal similar al de aporte.

Para seleccionar la mejor forma del cordón de soldadura es necesario tener en cuenta el tiempo de servicio del recubrimiento y la energía que requiere para lograr una buena adherencia. Los tipos más comunes son mostrados en la Figura 1.31.

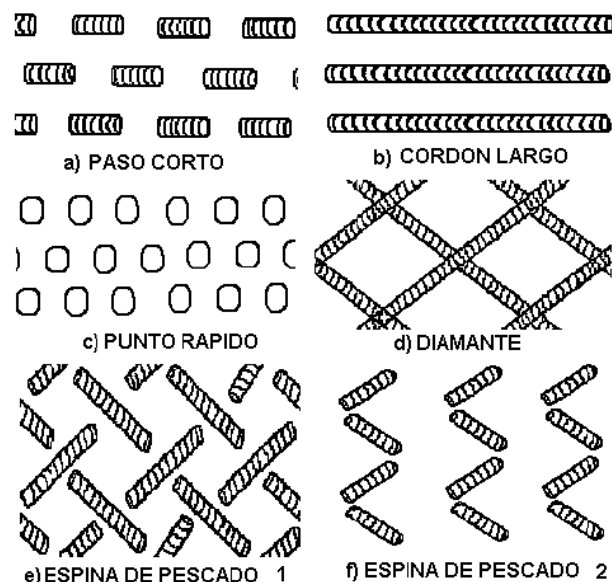


Figura 1.31. Tipos comunes de cordón de soldadura.

(Fuente: Luddey & Trujillo)

Para evitar el choque térmico, la formación de grietas y disminuir la distorsión es recomendable realizar un precalentamiento a la temperatura especificada para la forma, espesor y composición del metal base. (Luddey & Trujillo, 2007)

1.9. Soldadura eléctrica al arco con electrodo revestido (Shield metal arc welding- SMAW)

Es un proceso de soldadura en el que se produce la unión de metales como producto del calor generado por un arco eléctrico entre la punta del electrodo recubierto y la superficie del metal base a soldar.

Como el electrodo posee como núcleo una varilla metálica, esta permite la conducción de la corriente eléctrica al arco y el metal de aporte de la soldadura.

La capa del electrodo cumple principalmente con las funciones de estabilización del arco eléctrico y la protección del metal de aporte a los gases generados cuando se derrite.

Cuando se usa este tipo de proceso de soldadura para recubrimientos duros, lo más aconsejable es realizar dos pases para obtener una buena condición de servicio (Chalá Gonzalón & Molina Velasco, 2010).

1.9.1. Principio de funcionamiento

Es el proceso más utilizado en comparación con los otros procesos de arco. Este aprovecha el calor que genera el arco para derretir el metal base y el electrodo. El circuito eléctrico está formado por una fuente de potencia eléctrica, un portaelectrodo, una conexión con la pieza de trabajo y el electrodo (Figura 1.32.).

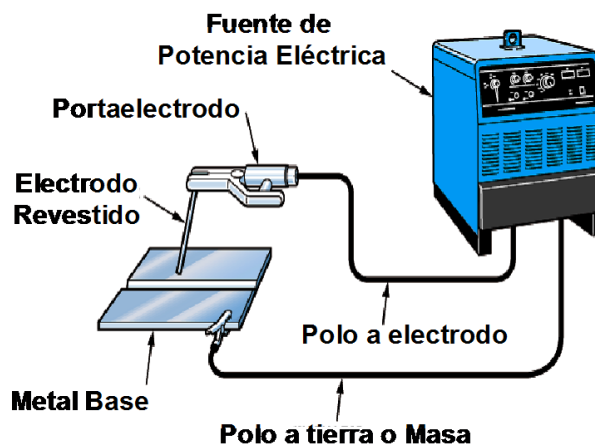


Figura 1.32. Esquema de un circuito de soldadura.

(Fuente: procesosdemanzufacturaymateriales.blogspot.com)

El inicio del arco eléctrico sucede por medio de un cortocircuito al poner en contacto la punta del electrodo con el metal base y al separarlos se da lugar al arco. Como la superficie en la que actúa el arco es muy pequeña se genera un aumento de temperatura (aproximadamente 3500°C) por el Efecto Joule, dando como resultado un flujo de electrones que se añade a la corriente eléctrica para una mayor estabilidad.

A medida que el electrodo se va consumiendo se empieza con el movimiento para formar el cordón de soldadura (Chalá Gonzalón & Molina Velasco, 2010).

1.9.2. Equipos

Para lograr soldaduras de calidad es necesario utilizar las máquinas e insumos detallados a continuación:

1.9.2.1. Máquinas de corriente alterna

También son llamadas transformadores debido a que transforman la corriente de alimentación (bajo amperaje) en corriente útil y segura para soldar. Posee un sistema de devanado primario y secundario junto a un reactor móvil (Figura 1.33.).

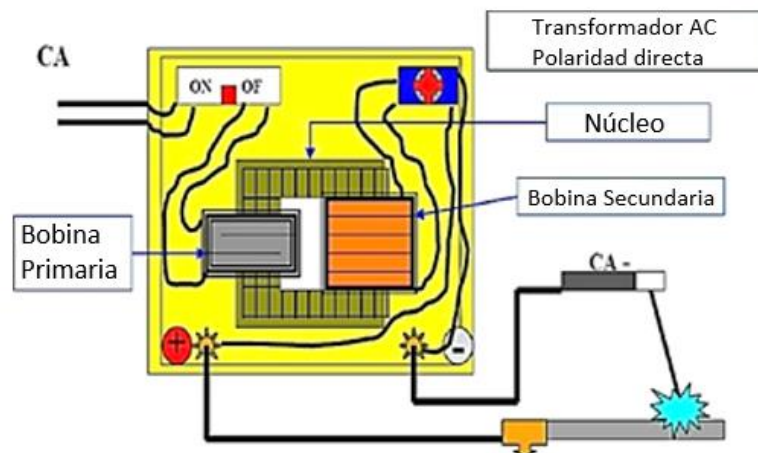


Figura 1.33. Transformador.

(Fuente: www.slideshare.net)

1.9.2.2. Máquinas de corriente continúa

Conocidas como moto-generadores, en estas la corriente es producida por la rotación de una armadura dentro de un campo eléctrico, la misma es atraída por un conjunto de escobillas de carbón y un colector para ser convertida en corriente continua (Figura 1.34.).

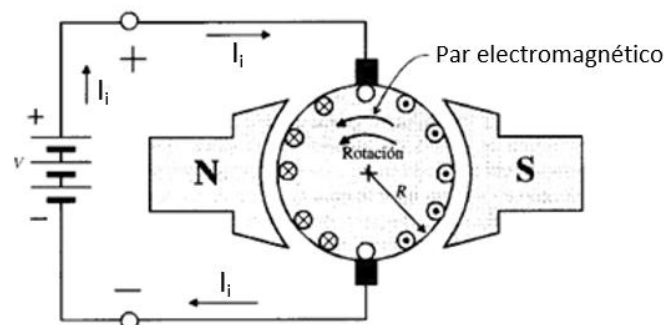


Figura 1.34. Moto-generador.

(Fuente: www.sectorelectricidad.com)

1.9.2.3. Maquinas transformador – rectificador

Es una combinación de las máquinas de corriente alterna y continua. La corriente alterna que provee el transformador es llevada hacia el rectificador para ser transformada en corriente continua (Figura 1.35.).



Figura 1.35. Transformador – Rectificador.

(Fuente: <http://www.stargas.com.ve>)

1.9.2.4. Inversores

Son fuentes de energía que se manejan a muy altas frecuencias lo que permite un ahorro de energía en comparación con las máquinas de corriente alterna (Figura 1.36.).



Figura 1.36. Inversor.

(Fuente: toolstore.com.co)

1.10. Electrodo recubiertos

Están constituidos por un centro metálico generalmente en forma cilíndrica y un recubrimiento que varía en su composición dependiendo de las condiciones de trabajo. (Figura 1.37.) (Chalá Gonzalón & Molina Velasco, 2010)

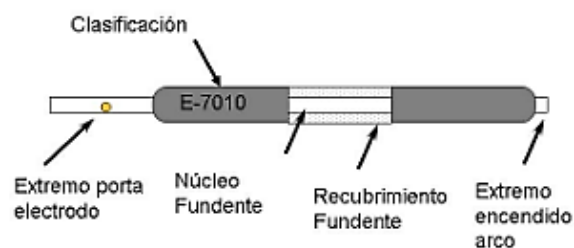


Figura 1.37. Estructura de un electrodo recubierto.

(Fuente: www.esab.com.ar)

No existe una composición específica para el recubrimiento, debido a que es una mezcla de materiales orgánicos y minerales que permiten una función determinada dependiendo de la proporción en la que se encuentren. Los elementos más utilizados son:

- Óxidos naturales: Hierro, ilmenita, rutilo, sílice.
- Silicatos naturales: Caolín, talco, mica, feldespato.
- Orgánicos: Celulosa, serrín.
- Fundentes.
- Productos químicos: Carbonatos.
- Ferroaleaciones: De manganeso, silicio, titanio.
- Aglomerantes: Silicato sódico y potásico.

Las sustancias químicas que componen al núcleo tienen las siguientes funciones:

- Dirección del arco a una fusión uniforme u equilibrada.
- Protección contra el oxígeno y nitrógeno mediante la creación de gases.
- Evita el enfriamiento brusco por medio de la creación de escoria sobre el material de aporte.
- Permite obtener una buena fusión con diferentes tipos de materiales.
- Proporcionan características específicas a la fusión del metal de aporte.
- Estabiliza el arco eléctrico.

Existen diferentes tipos de electrodos que son:

- Celulósicos.
- Rutílicos.
- Básicos.
- Para recubrimientos.
- Aceros inoxidable.
- Fundición de hierro.
- Bronce.
- Cobre.
- Aluminio.
- Corte.

1.10.1. Especificaciones de electrodos y varillas para recubrimientos duros

Para comprobar el correcto desempeño de un electrodo para recubrimiento se deben cumplir los siguientes requisitos:

- El metal debe fluir libremente sobre la superficie sin gotear.
- Debe funcionar sin dificultades o exceso de salpicaduras dentro de los rangos de corriente establecidos por el fabricante.
- La escoria formada debe ser fácilmente removible.
- Después de un proceso de maquinado, el recubrimiento debe estar libre de discontinuidades visibles a simple vista.

Los grupos principales para metales de recubrimiento y relleno de acuerdo a la norma AWS A.5.21 se observan en la Tabla 1.3. (Matsumoto, 1999).

Tabla 1.3. Grupos principales para metales de recubrimiento y relleno según AWS A.5.21.

Material	Código	Observación
Varillas y electrodos para aceros rápidos	RFe5-A, RFe5-B, EFe5-A, EFe5-B, EFe5-C	Aleaciones de elevada dureza para aceros de herramientas.
Electrodos para aceros austeníticos al manganeso	EFeMn-A, EFeMn-B	Aleaciones resistentes a abrasión de endurecimiento por trabajado.
Varillas y electrodos austeníticos de alto cromo	FFeCr-A1, EFeCr-A1	Aceros inoxidable de bajo carbono resistentes a corrosión.
Varillas y electrodos de carburo de tungsteno	EWC-XX, EWC-YX	Existen 13 grados de carburos de W, dependiendo de su granulometría.

(Fuente: Norma AWS A.5.21)

1.10.2. Electrodo EFeMn-A (AGA B-83)

Es de bajo contenido de hidrógeno, puede ser utilizado para soldaduras de reconstrucción, los cordones pueden ser maquinados, posee una alta resistencia a la compresión y una buena resistencia a la abrasión moderada (Figura 1.38.). El electrodo AGA B-83 está compuesto por los elementos que se observan en la Tabla 1.4.

Las superficies depositadas comúnmente tienen una dureza de trabajo de HCR 20 hasta unos 50 HCR (AGA, 2001).



Figura 1.38. Electrodo AGA B-83.

(Fuente: Propia)

Tabla 1.4. Composición química del electrodo B-83 según AGA S.A.

Elemento	Porcentaje
C	0,1
Mn	0,9
Si	0,8
Cr	3,2

(Fuente: Manual AGA)

Las posiciones recomendadas para soldar son:

- Plana.
- Horizontal.
- Sobre-cabeza.
- Vertical ascendente.

Los valores de corriente y polaridad para el electrodo AGA B-83 en sus diferentes diámetros se detallan en la Tabla 1.5.

Tabla 1.5. Corriente y polaridad para el electrodo B-83 según AGA S.A.

Electrodo al polo positivo en AC y DC	
Diámetro [in]	Amperaje [A]
1/8	110-130
5/32	140-180
3/16	190-240

(Fuente: Manual AGA)

Se puede utilizar para las siguientes aplicaciones:

- En rodillos de alimentación, poleas, zapatas de frenos.
- Para rellenar ruedas dentadas de tractores.
- Para recubrimientos duros en aceros al carbono.
- Muñones, ejes y orugas de palas mecánicas.

- Cilindros de trituradoras.
- Rodillos de transportadoras.

1.10.3. Electrodo E312-16 (AGA R-91)

Es especial para ser aplicado con bajos amperajes en todo tipo de acero (Figura 1.39.). Como posee una composición equilibrada se pueden obtener depósitos libres de poros y lisos; es usado cuando se requiere mayor resistencia a la tracción, corrosión, calor, impacto y fisuras. El electrodo AGA R-91 está compuesto por los elementos que se observan en la Tabla 1.6. Las superficies depositadas comúnmente tienen una dureza de trabajo de 210 a 460 HB. (AGA, 2001)



Figura 1.39. Electrodo AGA R-91.

(Fuente: Propia)

Las propiedades mecánicas que posee son:

- Resistencia a la tracción: 80 kg/mm².
- Porcentaje de elongación: 25%.

Tabla 1.6. Composición química del electrodo R-91 según AGA S.A.

Elemento	Porcentaje
C	0,12
Mn	1,80
Si	0,8
Cr	30,00
Ni	10,00

(Fuente: Manual AGA)

Las posiciones recomendadas para soldar son:

- Plana.
- Horizontal.
- Sobrecabeza.
- Vertical ascendente.

Los valores de corriente y polaridad para el electrodo AGA R-91 en sus diferentes diámetros se detallan en la Tabla 1.7.

Tabla 1.7. Corriente y polaridad para el electrodo R-91 según AGA S.A.

Electrodo al polo positivo en AC y DC	
Diámetro [in]	Amperaje [A]
1/8	50 – 90
5/32	80 – 110
3/16	100 – 140

(Fuente: Manual AGA)

Se puede utilizar para las siguientes aplicaciones:

- Para soldar acero de bajo, mediano y alto contenido de carbono.
- Aceros de herramientas, inoxidable y de aleación.
- Para unir aceros disimiles.
- Para soldar y rellenar ejes, matrices, herramientas.
- Resortes, hojas de muelles y cadenas.
- Tanques de presión, impulsores y sinfín.
- Cuerpos de maquinaria pesada.
- Como recubrimiento de piezas sometidas a desgaste por fricción, impacto y corrosión.
- Como capa de transición en piezas que deben ser protegidas con aleaciones anti-desgaste.

1.10.4. Diagrama de Schaeffler

Es una herramienta grafica que ayuda a predecir la estructura que se obtendrá al soldar aceros inoxidable con aceros al carbono o aceros inoxidable disimiles mediante su composición química, calculando el contenido equivalente de cromo y níquel (Ecuación 1.1. y 1.2.).

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1,5\%Si + 0,5\%Nb$$

Ecuación 1.1. Cálculo del cromo equivalente.

(Fuente: Gracia)

$$Ni_{eq} = \%Ni + 30\%C + 0,5\%Mn$$

Ecuación 1.2. Cálculo del níquel equivalente.

(Fuente: Gracia)

Para utilizar este diagrama se deben tener en cuenta que los elementos aleantes no deben superar los siguientes valores:

- C máx. 0.2%
- Mn máx. 1.0%
- Si máx. 1.0%
- Mo máx.3.0%
- Nb máx. 1.5%

Adicionalmente se debe tener en cuenta el porcentaje de dilución para el proceso de soldadura SMAW, el cual tiene un valor de 30%.

Acero dúplex 2205

$$Cr_{eq} = 17,79 + 3,178 + 1,5 * 0,554 = 22,40\%$$

$$Ni_{eq} = 6,718 + 30 * 0,032 + 0,5 * 1,163 = 8,26\%$$

Electrodo AGA B-83

$$Cr_{eq} = 3,2 + 1,5 * 0,8 = 4,40\%$$

$$Ni_{eq} = 30 * 0,1 + 0,5 * 0,9 = 3,45\%$$

Electrodo AGA R-91

$$Cr_{eq} = 30 + 1,5 * 0,8 = 31,20\%$$

$$Ni_{eq} = 10 + 30 * 0,12 + 0,5 * 1,8 = 14,50\%$$

Para la combinación de acero dúplex 2205 y electrodo AGA B-83 se muestra el diagrama en la Figura 1.40.

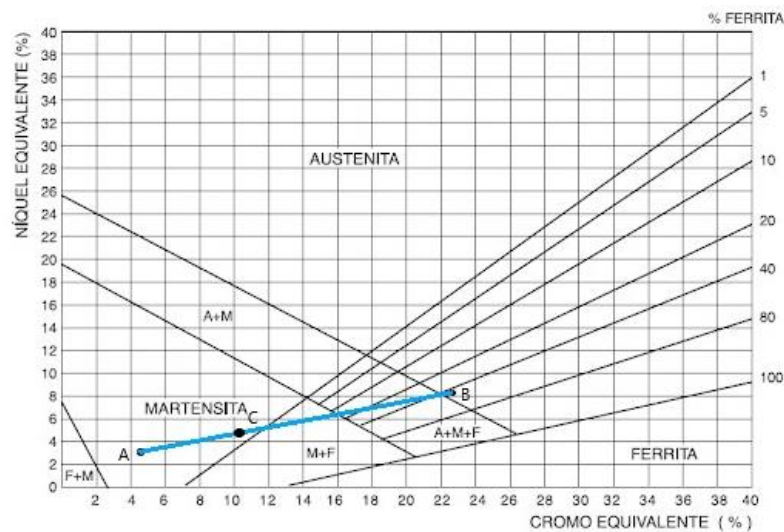


Figura 1.40. Diagrama de Schaeffler del electrodo B-83 con el acero dúplex 2205.

(Fuente: Propia)

El punto A es el correspondiente al electrodo, el punto B es el correspondiente al acero dúplex, al unir ambos puntos con una recta y desplazándose sobre la misma una distancia tomando en cuenta el porcentaje de dilución (30%) desde el punto A, se obtiene el punto C que permite predecir una estructura martensítica la cual es propensa a sufrir fisuración por temple, pero al tener porcentajes de carbono menores 0,35% no es recomendable este tratamiento.

Para la combinación de acero dúplex 2205 y electrodo AGA R-91 se muestra el diagrama en la Figura 1.41.

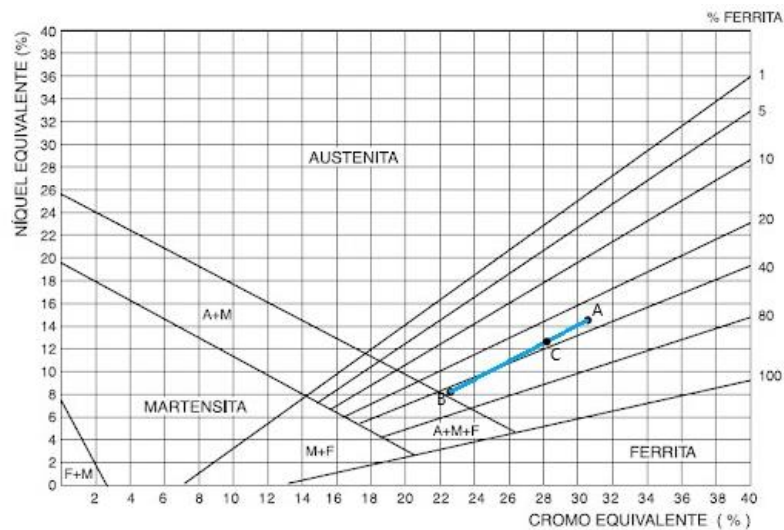


Figura 1.41. Diagrama de Schaeffler del electrodo R-91 con el acero dúplex 2205.

(Fuente: Propia)

El punto A es el correspondiente al electrodo, el punto B es el correspondiente al acero dúplex, al unir ambos puntos con una recta y desplazándose sobre la misma una distancia tomando en cuenta el porcentaje de dilución (30%) desde el punto A, se obtiene el punto C que permite predecir una estructura con un 39% de ferrita lo que ayuda a disminuir la aparición de grietas por calentamiento.

2. METODOLOGÍA

En el presente trabajo se determinan las características del recubrimiento duro con el electrodo B-83 sobre la superficie del acero dúplex 2205.

Se realizan varios ensayos, mediante los cuales se pueda respaldar y adquirir información necesaria, con la ayuda de una tubería de la cual se obtienen dieciséis probetas soldadas mediante el proceso SMAW; ocho de ellas tienen colocada una interfase con el electrodo R-91 y un recubrimiento con el electrodo B-83, y las otras ocho probetas tienen solamente el recubrimiento con el electrodo B-83.

2.1. Proceso de obtención de las probetas

El material que se utilizará como base para la aplicación del recubrimiento es una tubería de acero dúplex 2205 con las siguientes dimensiones:

- Largo de 700 [mm].
- Diámetro de 220 [mm].
- Espesor de 8 [mm].

Primero se realiza una limpieza básica con thinner, detergente, jabón líquido y alcohol industrial, para eliminar las impurezas que se puedan haber impregnado en la tubería (Figura 2.1.).

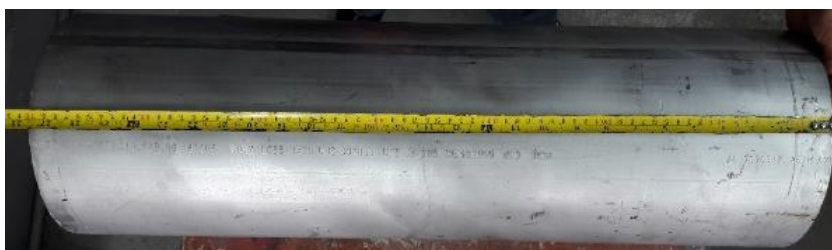



Figura 2.1. Tubería acero dúplex 2205.

(Fuente: Propia)

Posteriormente se realiza un proceso de mecanizado por torno (Tabla 2.1.), en un extremo de la tubería para obtener el acanalado, con un tamaño de 38,1 mm de ancho y 2 mm de profundidad (Figura 2.2.); en el mismo se deposita el electrodo R-91 que servirá como interfase (Figura 2.3.).

Tabla 2.1. Características del torno.

	<p style="text-align: center;">CARACTERISTICAS</p> <ul style="list-style-type: none"> * Marca: E. Colombo Peregallo – Milano. * Modelo: VUP. * Diámetro de giro sobre la cama 1500mm. * Diámetro de giro en el espacio de 1660mm. * Diámetro de giro sobre el soporte 1200mm. * Distancia entre centros 10000mm.
---	---

(Fuente: Propia)

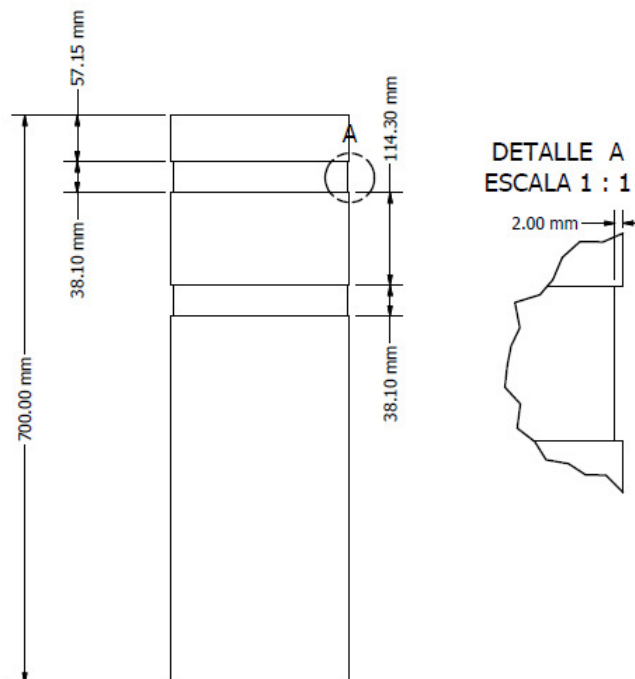


Figura 2.2. Medidas del acanalado.

(Fuente: Propia)



Figura 2.3. Tubería con el acanalado.


(Fuente: Propia)

2.2. Proceso de soldadura SMAW

Una vez realizados los acanalados se coloca el recubrimiento duro mediante la técnica de soldadura de arco eléctrico (SMAW); las características que tiene la soldadora se muestran en la Tabla 2.2. Cabe mencionar que la tubería no fue sometida a un precalentamiento para evitar alterar sus propiedades.

En los dos canales que se realizan en uno de los extremos de la tubería, se coloca el electrodo AGA R-91 (Figura 2.4.) como interfase entre el material base y el electrodo AGA B-83 que cumplirá con la función del recubrimiento. Mientras que en el extremo en el que no se realiza el maquinado se coloca solamente el electrodo B-83 como recubrimiento; en la Figura 2.5. se puede apreciar la tubería con las dos configuraciones, dos con R-91+B-83 y dos con B-83.

Tabla 2.2. Características de la soldadora.

	CARACTERISTICAS
	<ul style="list-style-type: none"> * Marca: Lincoln Electric. * Modelo: Invertec V350 Pro. * Proceso: SMAW. * Voltaje R-91: 58 – 60 [V]. * Voltaje B-83: 19 – 21 [V]. * Amperaje R-91: 98 – 100 [A]. * Amperaje B-83: 129 – 131 [A]. * Frecuencia: 60 [Hz]. * Fase: 1[Ph].

(Fuente: Propia)

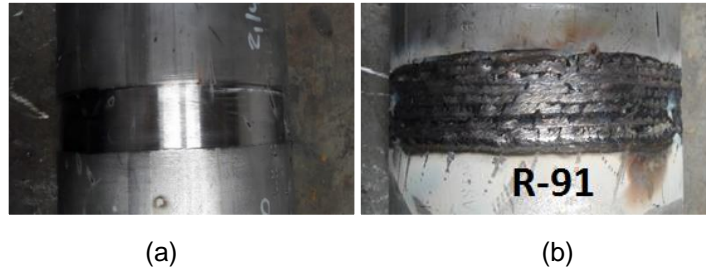


Figura 2.4. (a) Tubería con acanalado. (b) Colocación de la interfase R-91 en el acanalado.

(Fuente: Propia)

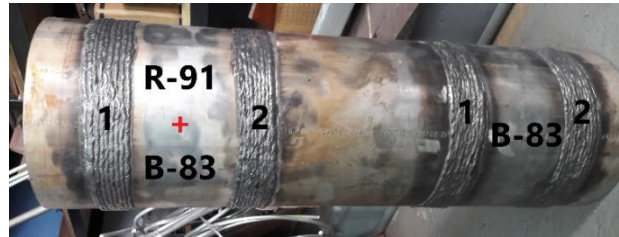


Figura 2.5. Tubería con las dos configuraciones, dos con R-91+B-83 y dos con B-83.

(Fuente: Propia)

Los valores de las corrientes y tiempo de soldadura se detallan a continuación para cada electrodo; como también para las cuatro configuraciones que se tiene en la tubería (Tabla 2.3., 2.4., 2.5. y 2.6.).

Tabla 2.3. Tiempos de consumo de los electrodos en la configuración uno.

CONFIGURACIÓN R-91+B-83 (1)			
ELECT. R-91	TIEMPO	ELECT. B-83	TIEMPO
1	01:02.40	1	01:37.25
2	01:03.82	2	01:21.60
3	01:02.31	3	01:35.04
4	01:06.94	4	01:23.05
5	01:04.96	5	01:31.88
6	01:01.46	6	01:25.70
7	01:02.36	7	01:26.92
8	01:08.01	8	01:28.82
9	01:03.86	9	01:26.53
10	01:06.79	10	01:35.85
11	01:08.44	11	01:36.00
12	01:11.11	12	01:28.88
13	01:08.32	13	01:37.19
14	01:07.75	14	01:32.94
15	01:06.93	15	01:30.30
		16	01:38.13
		17	01:30.79
		18	00:39.75 (1/3)

(Fuente: Propia)

Tabla 2.4. Tiempos de consumo de los electrodos en la configuración dos.

CONFIGURACIÓN R-91+B-83 (2)			
ELECT. R-91	TIEMPO	ELECT. B-83	TIEMPO
1	01:07.12	1	01:19.87
2	00:54.83	2	01:39.25
3	00:59.18	3	01:47.82
4	01:03.23	4	01:30.36
5	01:04.30	5	01:26.71
6	01:02.15	6	01:31.17
7	01:03.61	7	01:38.54
8	01:06.14	8	01:28.25
9	01:00.29	9	01:38.13
10	01:06.33	10	01:31.85
11	01:02.40	11	01:31.21
12	01:07.82	12	01:25.23
13	01:06.62	13	01:36.36
14	01:09.83	14	01:36.96
15	01:09.58	15	01:30.41
		16	01:19.73
		17	00:27.48

(1/3)

(Fuente: Propia)

Tabla 2.5. Tiempos de consumo del electrodo en la configuración tres.

CONFIGURACIÓN B-83 (1)	
ELECT. B-83	TIEMPO
1	00:56.66
2	01:33.54
3	01:30.71
4	01:23.80
5	01:28.71
6	01:19.36
7	01:30.82
8	01:34.21
9	01:35.26
10	01:27.76
11	01:23.39
12	01:28.75
13	01:28.91
14	01:30.07
15	00:53.80

(Fuente: Propia)

Tabla 2.6. Tiempos de consumo del electrodo en la configuración cuatro.

CONFIGURACIÓN B-83 (2)	
ELECT. B-83	TIEMPO
1	00:21.84 (1/3)
2	01:28.45
3	01:35.67
4	01:35.06
5	01:32.55
6	01:30.39
7	01:26.10
8	01:32.84
9	01:30.86
10	01:32.09
11	01:28.60
12	01:25.44
13	01:28.40
14	00:53.46 (2/3)

(Fuente: Propia)

Después del proceso de soldadura se procede a señalar la tubería con las dimensiones especificadas en el código ASME sección IX para cortar las probetas (Figura 2.6.), y realizar los diferentes ensayos. La probeta (Figura 2.7.) tiene de largo 152,4 mm (6 in) y de ancho 152,4 mm (6 in) (Figura 2.8).

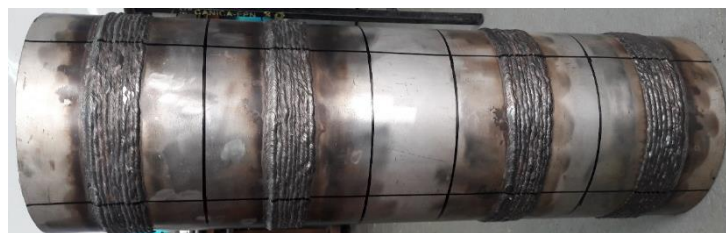


Figura 2.6. Tubería señalada para cortar las probetas.

(Fuente: Propia)

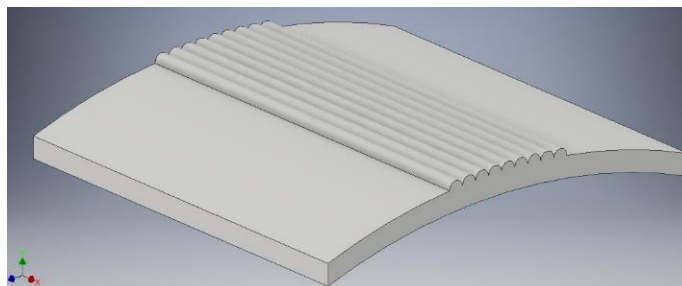


Figura 2.7. Modelado en Inventor de la probeta según el código ASME sección IX.

(Fuente: Propia)

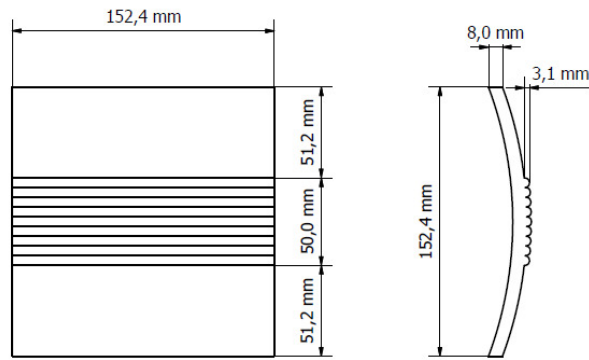


Figura 2.8. Medidas de la probeta según el código ASME sección IX.

(Fuente: Propia)

El proceso de corte se lo realiza mediante una cortadora (Figura 2.9) que usa agua como refrigerante para evitar un cambio en las propiedades de los metales debido al calor; la tubería debe de ser acoplada en la cortadora (Figura 2.10) para proceder a obtener las probetas (Figura 2.11.).



Figura 2.9. Cortadora.

(Fuente: Propia)



Figura 2.10. Tubería acoplada en la cortadora.

(Fuente: Propia)



Figura 2.11. Probeta cortada.

(Fuente: Propia)

2.3. Ensayo de doblado

Es un procedimiento de prueba bajo la norma ASTM E-190 de doblado guiado, para establecer la ductilidad y solidez de una soldadura en materiales ferrosos y no ferrosos, además permite detectar discontinuidades que no se muestran en las radiografías gracias a una sobrecarga progresiva localizada.

Se van a realizar dos tipos de doblado:

- **Doblado transversal de la cara:** la soldadura es transversal al eje longitudinal de la probeta que se dobla.
- **Doblado longitudinal de la cara:** la soldadura es paralela al eje longitudinal de la probeta que se dobla.

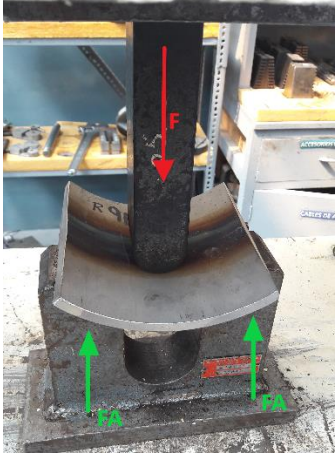
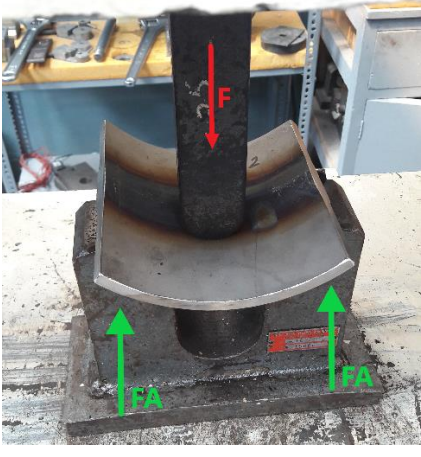

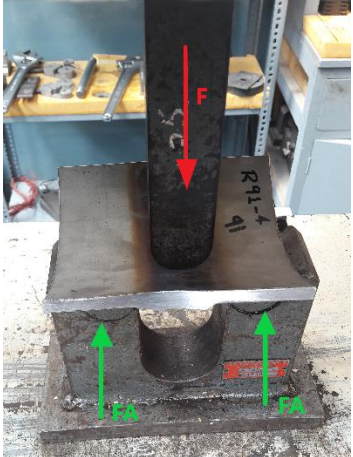
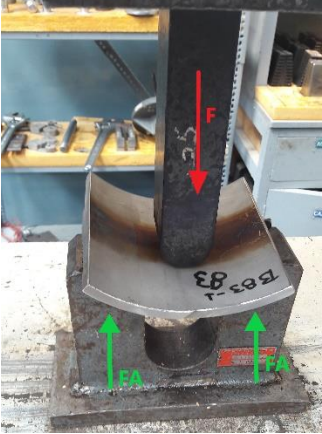
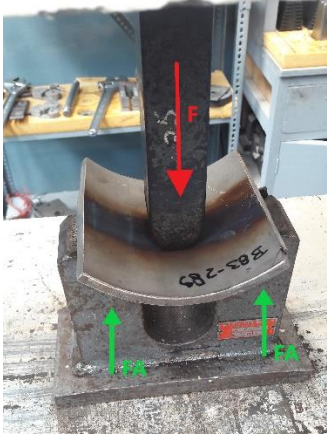
Para el proceso de doblado se utiliza una máquina universal de ensayos (Tabla 2.7.), donde se coloca la probeta en la posición del tipo de doblado que se va a realizar sobre la matriz para después por medio del embolo aplicar una carga hasta que la probeta tome una forma semejante a una “U” o se produzca una falla (Tabla 2.8.).

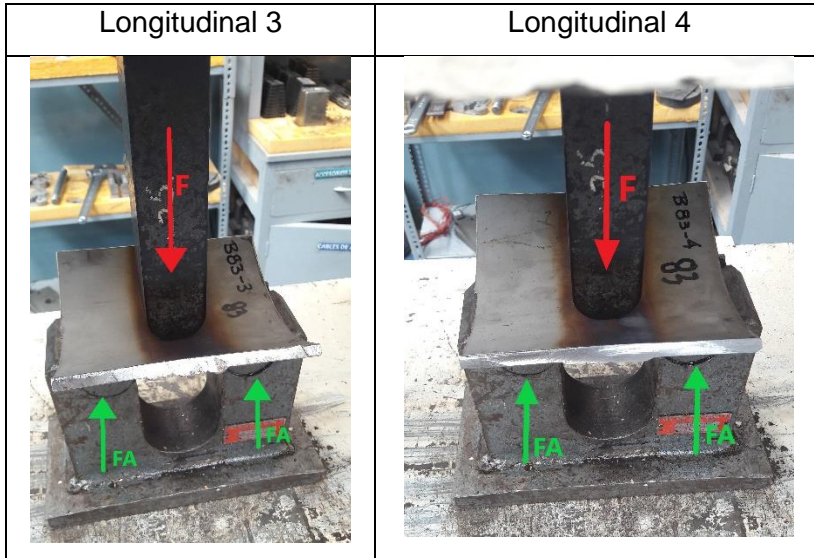
Tabla 2.7. Características de la máquina universal de ensayos.

	<p style="text-align: center;">CARACTERISTICAS</p> <ul style="list-style-type: none"> * Marca: TINIUS OLSEN. * Modelo: SÚPER L * Aplicación de carga: Hidráulico. * Capacidad de carga: 3000 [kN].
--	---

(Fuente: Propia)

Tabla 2.8. Posiciones de doblado.

PROBETAS EN LA MAQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS	
CONFIGURACIÓN (R – 91 + B – 83)	
Transversal 1	Transversal 2
	
Longitudinal 3	Longitudinal 4
	
CONFIGURACIÓN (B – 83)	
Transversal 1	Transversal 2
	



(Fuente: Propia)

Finalmente se retira la probeta de la matriz y se examina la superficie doblada en busca de defectos y grietas.

2.4. Ensayo de tintas penetrantes

Es un procedimiento no destructivo bajo la norma ASTM E-165 que incluye instrucciones para detectar discontinuidades abiertas a la superficie en materiales no porosos, metálicos, ferrosos, no ferrosos, no metálicos como cerámicas barnizadas o plenamente compactadas, ciertos plásticos no porosos y vidrio.

Para realizar el ensayo de tintas penetrantes lo primero que se debe realizar es un prelavado de la superficie a examinar para eliminar las impurezas sólidas y líquidas que puedan estar en las discontinuidades (Figura 2.12.).



Figura 2.12. Probetas para el ensayo de tintas penetrantes.

(Fuente: Propia)

Para que exista una buena penetración de la tinta se debe dejar secar completamente la probeta, esto se puede hacer en equipos como hornos o al aire.

Para la aplicación del penetrante existen diferentes formas, pero la que se va a utilizar es con ayuda de un spray como se observa en la Figura 2.13. (a), este es rociado sobre la zona de examinación, se retira el exceso que se pueda tener y se espera el tiempo recomendado por el fabricante para que tenga el efecto deseado. El penetrante utilizado es visible y removible con solvente.

Para que se puedan observar adecuadamente las discontinuidades de la superficie se debe utilizar conjuntamente con el penetrante un revelador como se observa en la Figura 2.13. (b), el cual también se lo aplica con la ayuda de un spray y se lo deja actuar por el tiempo sugerido por el fabricante.



(a)

(b)

Figura 2.13. (a) Penetrante y (b) revelador.

(Fuente: Propia)

Pasado el tiempo recomendado se puede observar las discontinuidades existentes en la superficie para realizar una evaluación posterior de las mismas.

Finalmente se realiza un post – lavado de la probeta para retirar todos los químicos utilizados y así evitar daños en el material.

2.5. Ensayo de radiografía industrial

Es un procedimiento de prueba bajo la norma ASTM E-1032 que describe las instrucciones para realizar un examen radiográfico de soldaduras.

Para ejecutar este ensayo se debe tener una fuente de rayos X, película radiográfica, masking, índices de calidad de imagen (IQI) y marcadores de identificación.

Es recomendable efectuar una preparación de la superficie, eliminando las ondulaciones e irregularidades de la superficie soldada para mejorar la detección de cualquier discontinuidad.

Una vez realizada la preparación, se procede a colocar la película radiográfica sobre la zona soldada y se la fija con el masking, evitando así que se mueva.

Después se debe seleccionar todos los parámetros que se detallan a continuación, para obtener una buena radiografía.

- Voltaje: 200 kV.
- Amperaje: 10 mA.
- Tiempo de exposición: 3 min.
- Distancia a la fuente: 54 cm.
- Técnica utilizada: Pared simple, imagen simple.

La dirección de la radiación debe ser perpendicular al centro del área efectiva de película o hacia un plano tangente al centro de la película.

Se debe escoger un índice IQI que tenga un espesor menor del material al cual se va a realizar el ensayo. Una vez seleccionado el índice IQI se procede a colocarlo junto a la soldadura.

Finalmente se colocan los marcadores de identificación en una zona en la que no se interponga con la soldadura a estudiar.

2.6. Ensayos metalográficos

Se detalla brevemente el procedimiento para la obtención de probetas que sirven para el análisis metalográfico.

2.6.1. Preparación de probetas

La preparación de probetas se realiza bajo la norma ASTM E-3; el principal objetivo de un análisis metalográfico es revelar la estructura y los componentes de los metales y sus aleaciones por medio de microscopios de luz. Para lograrlo es necesario tener una preparación adecuada de las probetas.

Se corta las probetas con medidas de 37 mm de largo y 20 mm de ancho para que alcance en el molde para resina (Figura 2.14.); luego de ello en la desbastadora (Tabla 2.9.) se

realiza un desbaste grueso con la lija # 100 por un tiempo de cinco minutos aproximadamente hasta lograr, que la superficie de la probeta quede igual.

Tabla 2.9. Características de la desbastadora.

DESBASTE GRUESO	
	CARACTERISTICAS
	<ul style="list-style-type: none"> * Marca: BUEHLER. * Modelo: 121-OM-84. * Enfriamiento: Agua. * Amperaje: 6.2 [A]. * Voltaje: 220 [V]. * Potencia del motor: 1 [HP]. * Aplicación de presión: Manual.

(Fuente: Propia)

Una vez que se encuentra la probeta lista, se la coloca en el molde para resina centrándolas lo mejor posible, se vierte la resina y se deja secar por unos treinta minutos.

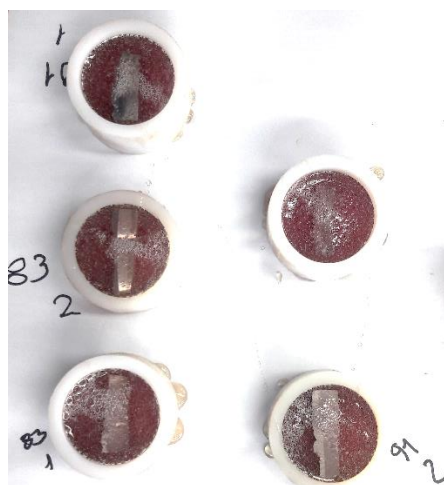


Figura 2.14. Las probetas colocadas en el molde para resina.

(Fuente: Propia)

En la pulidora automática (Tabla 2.10.) con la ayuda de diferentes números de lijas (#240, #320, #400, #600 y #1200) se realiza el desbaste fino por un tiempo de tres minutos en cada lija, usando agua como refrigerante, esto ayuda a eliminar las líneas que tenga el material.

Una vez que se termina de realizar el desbaste con la lija #1200 se procede a realizar el pulido con un paño de microfibra de una micra, por un tiempo aproximado de ocho horas para las nueve probetas, en las que se realizan las metalografías. El pulido se lo realiza hasta que se obtenga una superficie espejo sin líneas, ni colas de cometa que afecten al ensayo de metalografía; para ello se utiliza:

- Alúmina de 1 micra - 2ml cada veinte segundos.
- Alúmina de 0,3 micras – 2 ml cada veinte segundos.
- Shampoo Neutro – 5 ml cada veinte segundos.

Tabla 2.10. Características de la pulidora automática.

DESBASTE FINO Y PULIDO	
	CARACTERISTICAS
	<ul style="list-style-type: none"> * Marca: METKON. * Modelo: FORCIPOL 2V. * Diámetro de plantos: 250 [mm] * Voltaje: 220 [V]

(Fuente: Propia)

Por último, se debe limpiar cada probeta primero con agua, después con alcohol y se lo seca rápidamente con aire caliente. Para evitar afectar la zona pulida se debe evitar el contacto con cualquier elemento contaminante.


2.6.2. Ensayo de micrografía

Procedimiento para micro ataque: Metales y aleaciones

Es un procedimiento bajo la norma ASTM E-407 que detalla las soluciones e instrucciones químicas que se utilizan para el ataque de metales y aleaciones previo a realizar un examen micrográfico.


Al realizar el ataque químico cada probeta fue sumergida con la cara pulida en contacto con los reactivos preparados (Vilela, Nital 10% y Marble) y se aplica glicerina para mejorar el accionar de los químicos durante el ataque (Tabla 2.11.), esto se lo realiza en un tiempo específico, luego es lavada con agua, sumergida en alcohol y secada con aire caliente. Seguidamente se coloca las probetas bajo el microscopio (Tabla 2.12.) para poder observar las diferentes estructuras y componentes de los materiales con la ayuda de los diferentes lentes para la magnificación.

Tabla 2.11. Características de los reactivos.

	CARACTERISTICAS
	<ul style="list-style-type: none"> * Glicerina: 2mL. * Vilela: 5 mL. * Nital: 5 mL. * Marble: 5 mL.

(Fuente: Propia)

Tabla 2.12. Características del microscopio.


	CARACTERISTICAS
	<ul style="list-style-type: none"> * Marca: OLYMPUS * Modelo: GX41F * Objetivos: 5X - 10X - 20X - 50X - 100X. * Voltaje: 100 - 120 [V] 230 - 240 [V] * Frecuencia: 60 [Hz] * Micrografía.

(Fuente: Propia)

2.6.3. Ensayo de macrografía

Es un procedimiento que permite encontrar las discontinuidades que puede presentar el recubrimiento después del proceso de soldadura, con la ayuda de un microscopio (Tabla 2.13.) que tiene un rango de objetivos de 0,4X a 6,3X; para realizar este ensayo se usan las mismas probetas que se ocuparon para el ensayo de micrografía, debido a que estas ya fueron atacadas químicamente y permiten una mejor visualización.

Tabla 2.13. Características del microscopio.

	CARACTERISTICAS
	<ul style="list-style-type: none">* Marca: OLYMPUS* Modelo: SZX7* Objetivos: 0,4X – 0,63X – 0,8X – 1X – 1,25X – 1,6X – 2X – 2,5X – 2,8 – 3,2X – 4X – 5X – 5,6X – 6,3X.* Voltaje: 100 – 120 [V] 230 – 240 [V]* Frecuencia: 60 [Hz]* Macrografías.

(Fuente: Propia)

2.6.4. Ensayo de microdureza.


Es una prueba bajo la norma ASTM E-384 que determina la dureza de un material estableciendo la resistencia a un instrumento de penetración (indentador).

Para comenzar con la prueba es necesario calibrar y verificar el microdurómetro (Tabla 2.14.) con la ayuda de un indentador de punta de diamante específico para el material que se va a analizar.

Las probetas que se utilizan son las mismas que se emplean para las metalografías debido al acabado superficial y ataque químico realizados.

Se debe colocar la probeta en la posición correcta y se toma dos medidas en el material base, materiales de aporte y zona afectada por el calor; con una fuerza de 300 [gf] y por un tiempo de quince segundos.

Tabla 2.14. Características del microdurómetro.

	CARACTERISTICAS
	<ul style="list-style-type: none"> * Marca: METKON. * Modelo: DUROLINE – M. * Carga: 10 – 1000 [gf]. * Indentador: Diamante para Vickers y Knoop. * Objetivos: 10X – 20X – 40X. * Tiempo de carga: 5 – 99 [s].

(Fuente: Propia)

2.6.5. Ensayo de corrosión por inmersión

Es un método de prueba bajo la norma ASTM G48, que cubre los procedimientos para determinar la resistencia a la corrosión por picaduras o grietas de los aceros inoxidable y sus aleaciones cuando se los exponen a ambientes de cloruro oxidante. Se describe los procedimientos que son:

- **Método A:** Prueba de picadura de cloruro férrico.
- **Método B:** Prueba de grietas de cloruro férrico.
- **Método C:** Prueba de temperatura crítica de picadura para la base de níquel y las aleaciones que contienen cromo.
- **Método D:** Prueba de temperatura crítica de grietas para aleaciones con base de níquel y cromo.
- **Método E:** Prueba de temperatura crítica de picadura para aceros inoxidables.
- **Método F:** prueba de temperatura crítica para grietas en aceros inoxidables.

Antes de realizar el ensayo de corrosión se procede a cortar las probetas de 152,4 [mm] x 152,4 [mm] (6 [in] x 6 [in] según el código ASME sección IX) con configuración R-91+B-83 y configuración B-83; en cuatro partes iguales como se observa en la Figura 2.15.

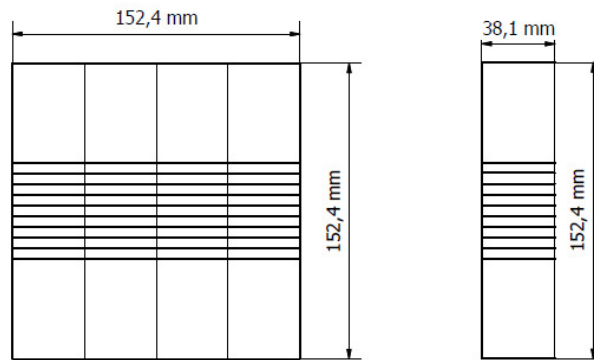



Figura 2.15. Dimensiones de las probetas para el ensayo de corrosión.

(Fuente: Propia)

Una vez obtenidas las cuatro partes (probetas para corrosión) se pesa cada una de ellas en la balanza de precisión (Tabla 2.15.) obteniendo lo que se observa en la Tabla 2.16.

Tabla 2.15. Características de la balanza de precisión.

	CARACTERISTICAS
	<ul style="list-style-type: none"> * Marca: OHAUS. * Modelo: AX 523 * Capacidad: 0 -520 [g].

(Fuente: Propia)

Tabla 2.16. Masa en gramos de las probetas antes de la corrosión.

Nº	R-91+B83 - 1	R-91+B83 - 2	R-91+B83 - 3	R-91+B83 - 4
1	347,331	285,169	313,118	320,437
2	347,331	285,171	313,117	320,435
3	347,331	285,170	313,117	320,434
Nº	B83 - 1	B83 - 2	B83 - 3	B83 - 4
1	336,181	318,836	313,890	352,087
2	336,182	318,838	313,892	352,088
3	336,181	318,836	313,892	352,087

(Fuente: Propia)

Para preparar la solución con la cual se va a realizar el ensayo de corrosión, se debe hacer una mezcla de 940 mL de agua destilada con 60 g de cloruro férrico (Figura 2.16.) que se pesa en la balanza digital (Tabla 2.17.).



Figura 2.16. Cloruro férrico en la balanza digital.

(Fuente: Propia)

Tabla 2.17. Características de la balanza digital.

	CARACTERISTICAS
	<ul style="list-style-type: none"> * Marca: N/A. * Modelo: N/A. * Capacidad: 0 – 500 [g]. * Apreciación: 0,01 [g].

(Fuente: Propia)

Una vez que se tiene la solución se colocan las probetas en un recipiente y se las sumerge como se observa en la Figura 2.17.



Figura 2.17. Probetas sumergidas en la solución de cloruro férrico.

(Fuente: Propia)

Se colocan los recipientes que contienen a las probetas dentro de una cámara hermética para que no exista variación de temperaturas; se las deja durante un tiempo de setenta y dos horas, seguidamente se saca las probetas de la solución y se las lava bajo una corriente de agua, con shampoo neutro y un cepillo de fibras de nylon para poder retirar

toda la solución, para finalizar se les coloca alcohol y rápidamente se seca con aire caliente (Figura 2.18.).



Figura 2.18. Probetas después del ensayo de corrosión.

(Fuente: Propia)

Una vez que se termina de hacer la limpieza, se procede a pesar en la balanza de precisión y se tiene lo que se observa en la Tabla 2.18.

Tabla 2.18. Masa en gramos de las probetas después de la corrosión.

Nº	R-91+B83 - 1	R-91+B83 - 2	R-91+B83 - 3	R-91+B83 - 4
1	346,065	284,111	311,620	319,168
2	346,063	284,088	311,577	319,165
3	346,064	284,112	311,622	319,168
Nº	B83 - 1	B83 - 2	B83 - 3	B83 - 4
1	335,032	317,918	312,550	350,922
2	335,028	317,922	312,552	350,923
3	335,028	317,918	312,552	350,922

(Fuente: Propia)

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el presente capítulo se detallan los resultados y análisis de los ensayos mecánicos, macrográficos, metalográficos, no destructivos y químicos; los mismos que se realizaron a las probetas extraídas bajo el código ASME sección IX, el cual también provee criterios de aceptación o rechazo del proceso de soldadura ejecutado sobre el acero dúplex 2205.



También se determinan las microestructuras del material base, material aporte uno (B-83), material de aporte dos (R-91) y zona afectada por el calor; así como las discontinuidades que favorecen el surgimiento de fallas sobre el recubrimiento.

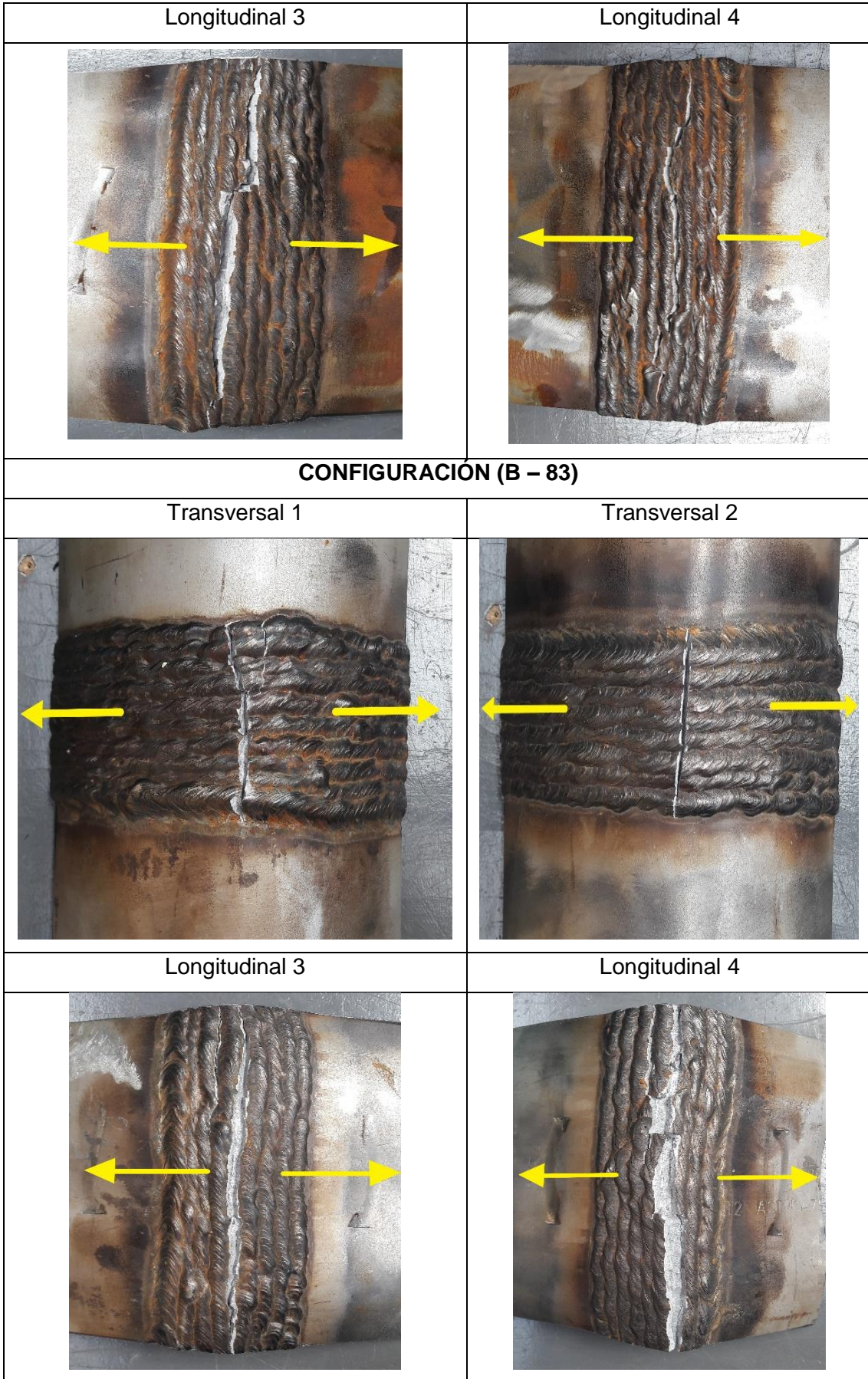
3.1. Resultados

3.1.1. Ensayo de doblado

Una vez realizado el ensayo de doblado transversal y longitudinal en las probetas se observa que en la configuración R-91+B-83 y B-83, el recubrimiento se fractura longitudinalmente y transversalmente, ver Tabla 3.1.; además presenta un cierto grado de desprendimiento del material de aporte.

Tabla 3.1. Probetas después de realizar el ensayo de doblado.

CONFIGURACIÓN (R - 91 + B - 83)	
Transversal 1	Transversal 2
	



(Fuente: Propia)

3.1.2. Ensayo de microdurezas.

Por medio del ensayo de microdureza, se determina la dureza del material base (MB), zona afectada por el calor (ZAC), material de aporte dos (MA2_R-91) y material de aporte uno (MA1_B-83); para la configuración B-83 y configuración R-91+B-83, dicha información se puede ver a detalle en el ANEXO VI

3.1.2.1. Probeta material base.

En la Figura 3.1. se observan dos indentaciones en el material base (acero dúplex 2205) y los resultados se encuentran tabulados en la Tabla 3.2., dando como promedio de las dos indentaciones un valor de 24,50 HRC.

Tabla 3.2. Resultados obtenidos en el ensayo de microdurezas efectuadas en el material base acero dúplex 2205.

PUNTO	HRC	HV	D1	D2	DIAGONAL PROMEDIO
O1	24,00	259,34	45,89	46,73	46,31
O2	25,00	261,62	46,54	45,68	46,11
PROMEDIO	24,50	260,48	46,22	46,21	46,21

(Fuente: Propia)

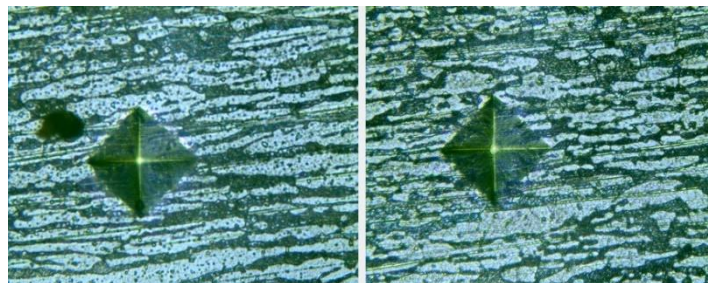


Figura 3.1 Microdurezas, indentaciones en el material base acero dúplex 2205.

(Fuente: Propia)

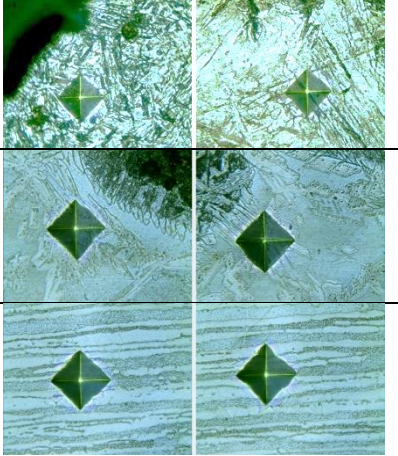
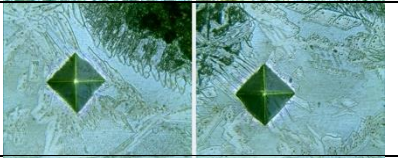
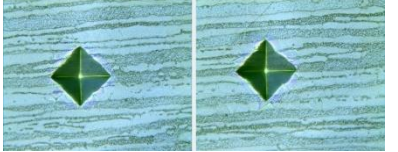
3.1.2.2. Probetas sin exposición a corrosión.

A continuación, se muestran los resultados de las indentaciones de microdurezas realizadas a las probetas de las configuraciones B-83 y R-91+B-83, que no fueron expuestas a corrosión, ni a ningún ensayo destructivo y no destructivo.

Recubrimiento - configuración B-83.

En la Tabla 3.3., se observa que se realizaron dos indentaciones sobre el material de las zonas de interés, obteniendo como resultados en el material de aporte (MA) un promedio de 44,50 HRC, en la zona afectada por el calor (ZAC) un valor de 26,00 HRC y en el material base (MB) un promedio de 25,50 HRC.

Tabla 3.3. Resultados obtenidos en el ensayo de microdurezas efectuadas en las zonas de interés de la configuración B-83.

ZONAS DE MEDICIÓN	PUNTO	HRC	HV	D1	D2	DIAG. PROM.	INDENTACIONES
MA	O1	47,00	463,94	34,98	34,26	34,62	
	O2	46,00	452,98	35,39	34,69	35,04	
	PROM.	46,50	458,46	35,19	34,47	34,83	
ZAC	O1	26,00	271,51	45,26	45,26	45,26	
	O2	26,00	271,96	46,31	44,14	45,22	
	PROM.	26,00	271,74	45,78	44,70	45,24	
MB	O1	26,00	270,67	44,97	45,69	45,33	
	O2	25,00	264,15	46,31	45,47	45,89	
	PROM.	25,50	267,41	45,64	45,58	45,61	

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.4. se presenta un resumen con los resultados de las microdurezas en el material de aporte, zona afectada por el calor y material base, de la configuración B-83.

Tabla 3.4. Resumen de los resultados obtenidos en el ensayo de microdurezas efectuadas en las tres zonas de la configuración B-83.

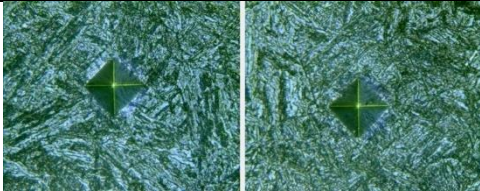
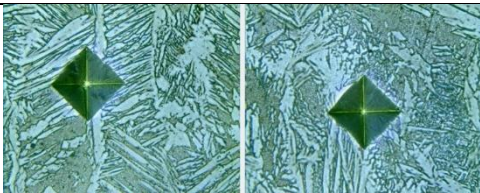
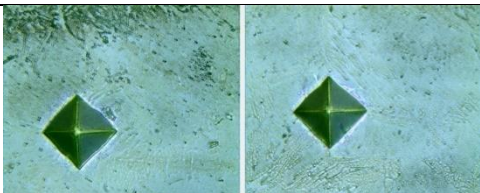
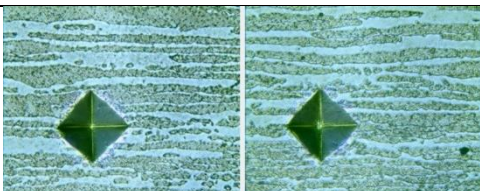
MA		ZAC		MB	
HRC	HV	HRC	HV	HRC	HV
47,00	463,94	26,00	271,51	26,00	270,67
46,00	452,98	26,00	271,96	25,00	264,15
PROMEDIO					
46,50	458,46	26,00	271,74	25,50	267,41

(Fuente: Propia)

Recubrimiento - configuración R-91 + B-83.

En la Tabla 3.5., se observa que en la configuración R-91 + B-83 se realizaron dos indentaciones sobre las zonas de interés, obteniendo como resultados en el material de aporte uno (MA1) un promedio de 45,00 HRC, en el material de aporte dos (MA2) 26,50 HRC, en la zona afectada por el calor (ZAC) un valor de 28,00 HRC y en el material base (MB) un promedio de 30,50 HRC.

Tabla 3.5. Resultados obtenidos en el ensayo de microdurezas efectuadas en las zonas de interés de la configuración R-91+B-83.

ZONAS DE MEDICIÓN	PUNTO	HRC	HV	D1	D2	DIAG. PROM.	INDENTACIONES	
MA1 (B-83)	O1	46,00	448,68	35,31	35,10	35,21		
	O2	44,00	432,94	35,52	36,16	35,84		
	PROM.	45,00	440,81	35,42	35,63	35,53		
MA2 (R-91)	O1	26,00	270,32	45,26	45,46	45,36		
	O2	27,00	273,25	45,18	45,05	45,12		
	PROM.	26,50	271,79	45,22	45,26	45,24		
ZAC	O1	27,00	278,48	45,47	43,91	44,69		
	O2	29,00	286,96	43,91	44,14	44,03		
	PROM.	28,00	282,72	44,69	44,03	44,36		
MB	O1	30,00	296,25	43,57	43,09	43,33		
	O2	31,00	304,22	43,07	42,45	42,76		
	PROM.	30,50	300,24	43,32	42,77	43,05		

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.6. se presenta un resumen con los resultados de las microdurezas en el material de aporte uno (B-83), material de aporte dos (R-91), zona afectada por el calor y material base, de la configuración R-91+B-83.

Tabla 3.6. Resumen de los resultados obtenidos en el ensayo de microdurezas efectuadas en las cuatro zonas de la configuración R-91+B-83.

MA1 (B-83)		MA2 (R-91)		ZAC		MB	
HRC	HV	HRC	HV	HRC	HV	HRC	HV
46,00	448,68	26,00	270,32	27,00	278,48	30,00	296,25
44,00	432,94	27,00	273,25	29,00	286,96	31,00	304,22
PROMEDIO							
45,00	440,81	26,50	271,79	28,00	282,72	30,50	300,24

(Fuente: Propia)

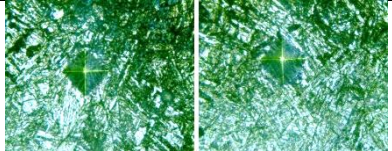
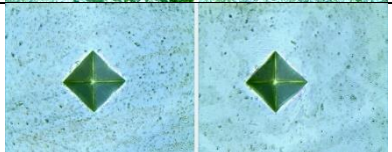

3.1.2.3. Probetas expuestas a 72 horas de corrosión.

Las indentaciones fueron realizadas en las probetas sometidas a 72 horas en solución de cloruro férrico, en las configuraciones B-83 y R-91+B-83.

Recubrimiento - configuración B-83.

En la Tabla 3.7., se observa que se realizaron dos indentaciones sobre el material de las zonas de interés sometidas a corrosión, obteniendo como resultados en el material de aporte (MA) un promedio de 46,50 HRC, en la zona afectada por el calor (ZAC) un valor de 25,50 HRC y en el material base (MB) un promedio de 24,50 HRC.

Tabla 3.7. Resultados obtenidos en el ensayo de microdurezas efectuadas en las zonas de interés de la configuración B-83 sometida a corrosión.

ZONAS DE MEDICIÓN	PUNTO	HRC	HV	D1	D2	DIAG. PROM.	INDENTACIONES	
MA	O1	46,00	454,08	35,31	34,69	35,00		
	O2	43,00	421,94	37,92	34,69	36,31		
	PROM.	44,50	438,01	36,62	34,69	35,66		
ZAC	O1	26,00	268,24	44,76	46,31	45,54		
	O2	25,00	265,38	45,67	45,89	45,78		
	PROM.	25,50	266,81	45,22	46,10	45,66		
MB	O1	25,00	262,92	46,10	45,89	45,99		
	O2	24,00	259,34	45,47	47,16	46,31		
	PROM.	24,50	261,13	45,78	46,53	46,15		

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.8. se presenta un resumen con los resultados de las microdurezas en el material de aporte, zona afectada por el calor y material base, de la configuración B-83 sometida al ensayo de corrosión.

Tabla 3.8. Resumen de los resultados obtenidos en el ensayo de microdurezas efectuadas en las tres zonas en la configuración B-83 sometida a corrosión.

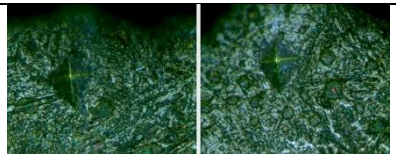
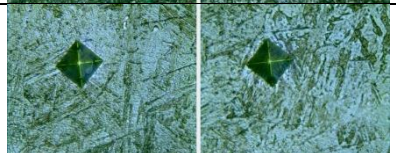
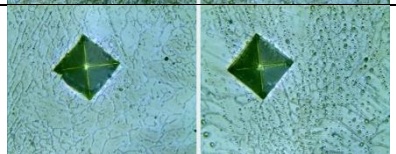

MA		ZAC		MB	
HRC	HV	HRC	HV	HRC	HV
46,00	454,08	26,00	268,24	25,00	262,92
43,00	421,94	25,00	265,38	24,00	259,34
PROMEDIO					
44,50	438,01	25,50	266,81	24,50	261,13

(Fuente: Propia)

Recubrimiento - configuración R-91+ B-83.

En la Tabla 3.9. se observa que en la configuración R-91 + B-83 sometida a corrosión se realizaron dos indentaciones sobre las zonas de interés, obteniendo como resultados en el material de aporte uno (MA1) un promedio de 44,00 HRC, en el material de aporte dos (MA2) 43,50 HRC, en la zona afectada por el calor (ZAC) un valor de 18,50 HRC y en el material base (MB) un promedio de 22,00 HRC.

Tabla 3.9. Resultados obtenidos en el ensayo de microdurezas efectuadas en las zonas de interés de la configuración R-91+B-83 sometida a corrosión.

ZONAS DE MEDICIÓN	PUNTO	HRC	HV	D1	D2	DIAG. PROM.	INDENTACIONES
MA1 (B-83)	O1	42,00	404,70	38,76	35,38	37,07	
	O2	46,00	452,24	37,78	32,36	35,07	
	PROM.	44,00	428,47	38,27	33,87	36,07	
MA2 (R-91)	O1	44,00	423,85	36,42	36,03	36,22	
	O2	43,00	415,26	37,24	35,96	36,60	
	PROM.	43,50	419,56	36,83	36,00	36,41	
ZAC	O1	20,00	235,25	47,91	49,34	48,62	
	O2	17,00	222,37	49,59	50,44	50,01	
	PROM.	18,50	228,81	48,75	49,89	49,32	
MB	O1	22,00	246,24	47,84	47,21	47,53	
	O2	22,00	243,85	48,28	47,24	47,76	
	PROM.	22,00	245,05	48,06	47,23	47,65	

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.10. se presenta un resumen con los resultados de las microdurezas en el material de aporte uno (B-83), material de aporte dos (R-91), zona afectada por el calor y material base, de la configuración R-91+B-83 sometida al ensayo de corrosión.

Tabla 3.10. Resumen de los resultados obtenidos en el ensayo de microdurezas efectuadas en las cuatro zonas en la configuración R-91+B-83 sometida a corrosión.

MA1 (B-83)		MA2 (R-91)		ZAC		MB	
HRC	HV	HRC	HV	HRC	HV	HRC	HV
42,00	404,70	44,00	423,85	20,00	235,25	22,00	246,24
46,00	452,24	43,00	415,26	17,00	222,37	22,00	243,85
PROMEDIO							
44,00	428,47	43,50	419,56	18,50	228,81	22,00	245,05

(Fuente: Propia)

Para la configuración B-83, en la Figura 3.2. se observa la comparación entre las microdurezas de las probetas sin exposición a corrosión (Tabla 3.4.) versus las microdurezas de las probetas expuestas a 72 horas de corrosión (Tabla 3.8.).

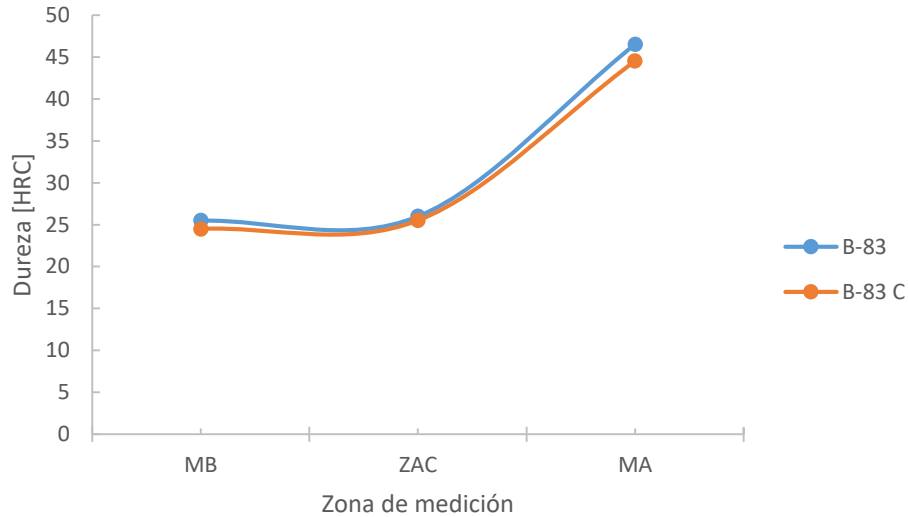


Figura 3.2. Comparación de las microdurezas en Rockwell para la configuración B-83, antes y después de la corrosión.

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.3. para la configuración R-91+B-83, se observa la comparación entre las microdurezas de las probetas sin exposición a corrosión (Tabla 3.6.) versus las microdurezas de las probetas expuestas a 72 horas de corrosión (Tabla 3.10.); para apreciar la variación que existe entre ellas.

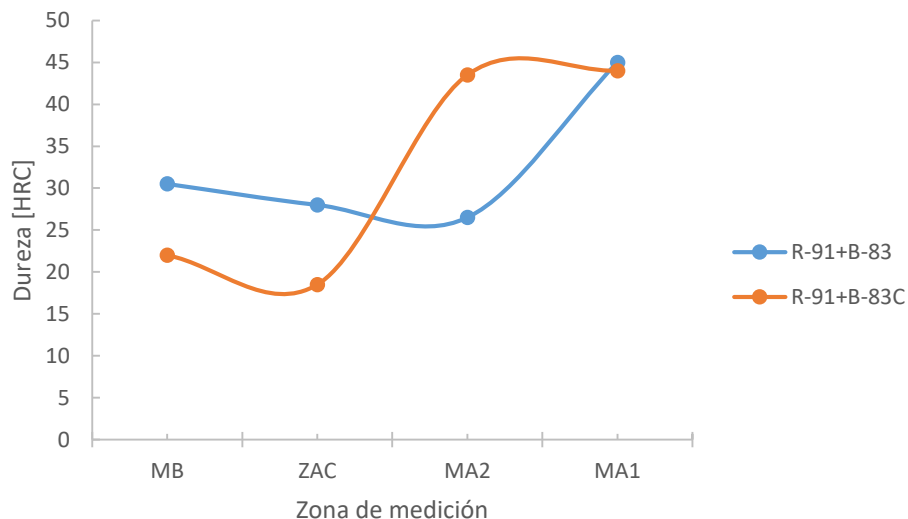


Figura 3.3. Comparación de las microdurezas en Rockwell para la configuración R-91+B-83, antes y después de la corrosión.

(Fuente: Propia)

3.1.3. Ensayo de macrografía.

Las macrografías permiten tener una mejor visión de las discontinuidades que se producen en el proceso de soldadura debido a las variaciones de voltaje, también se observan los inicios de fallas y propagación de las grietas que se originaron en el ensayo de doblado, tanto transversal como longitudinalmente, a su vez apreciar en que material se dan las mismas.

3.1.3.1. Probetas obtenidas del ensayo de doblado sin exposición a corrosión.

Para la configuración B-83, en el ensayo de doblado longitudinal, a una magnificación de 4X y 20X, respectivamente (Figura 3.4.), se observa que el inicio de la falla se da en el material de aporte, propagándose hasta la superficie del material base, provocando fisuras y desplazamiento de las grietas en el material de aporte (B-83). En el ensayo de doblado transversal, a una magnificación de 4X y 10X, respectivamente (Figura 3.5.), se puede observar que el inicio de falla se da en el material de aporte, provocando una separación de 2727,75 μm , como también fisuras.

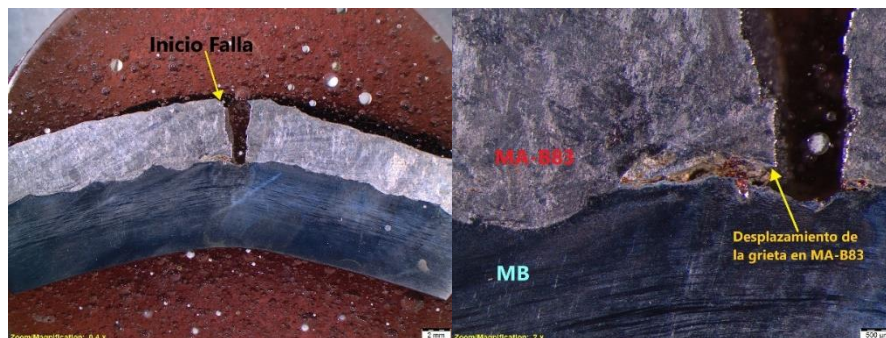


Figura 3.4. Macrografías del ensayo de doblado longitudinal en la configuración B-83, inicio de falla a 4X e inicio de fisuras a 20X.

(Fuente: Propia)

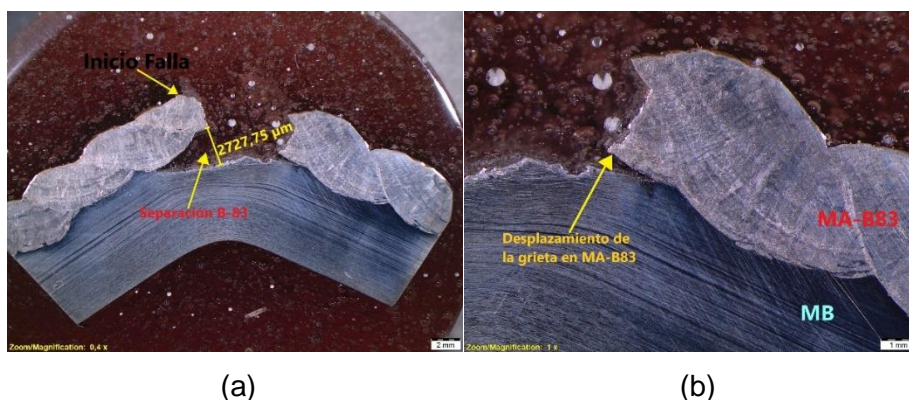


Figura 3.5. Macrografía del ensayo de doblado transversal en la configuración B-83, inicio de falla, fisura y separación del material de aporte (a) 4X y (b) 10X.

(Fuente: Propia)

Para la configuración R-91+B-83, en las probetas ensayadas longitudinalmente, a una magnificación de 4X y 10X, respectivamente (Figura 3.6.), se observa que el inicio de la falla se da en el material de aporte uno (B-83), propagándose hacia el material de aporte dos (R-91) así como al material base; en el material de aporte dos existen fisuras y desplazamiento de las grietas.

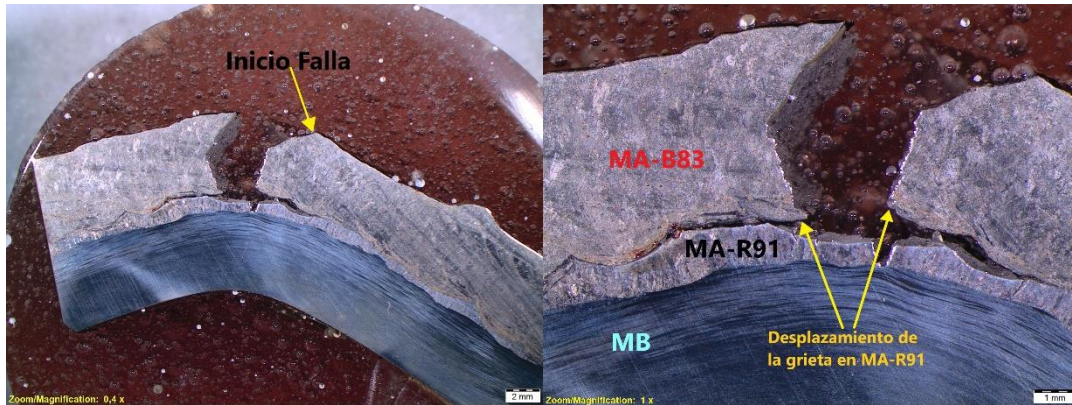


Figura 3.6. Macrografía del ensayo de doblado longitudinal en la configuración R-91+B-83, inicio de falla a 4X e inicio de fisuras a 10X.

(Fuente: Propia)

En las probetas ensayadas transversalmente (Figura 3.7.), a la misma magnificación que las macrografías anteriores, se observa que el inicio de falla se da en el material de aporte uno (B-83), propagándose hasta la superficie del material base; en la unión del material de aporte uno y material de aporte dos, existe una separación del material de aporte uno; sobre la superficie del material de aporte dos se presentan fisuras y desplazamiento de grietas.



Figura 3.7. Macrografía del ensayo de doblado transversal en la configuración R-91+B-83, inicio de falla y fisuras a 4X y 10X.

(Fuente: Propia)

3.1.4. Ensayo de micrografía.

En las micrografías obtenidas con el microscopio, se observan las diferentes estructuras del material base como son ferrita y austenita antes del proceso de soldadura, así como las estructuras del material de aporte y zona afectada por el calor después del proceso de soldadura.

A su vez se observan los inicios de las micro-fallas en las probetas de doblado; como también se visualiza por donde ingresa la corrosión en las probetas expuestas a cloruro férrico.

3.1.4.1. Probeta material base.

A una magnificación de 500X en la Figura 3.8. (a), se observa la microestructura del acero dúplex 2205, donde se puede diferenciar las zonas claras que corresponde a austenita y las zonas oscuras a ferrita.

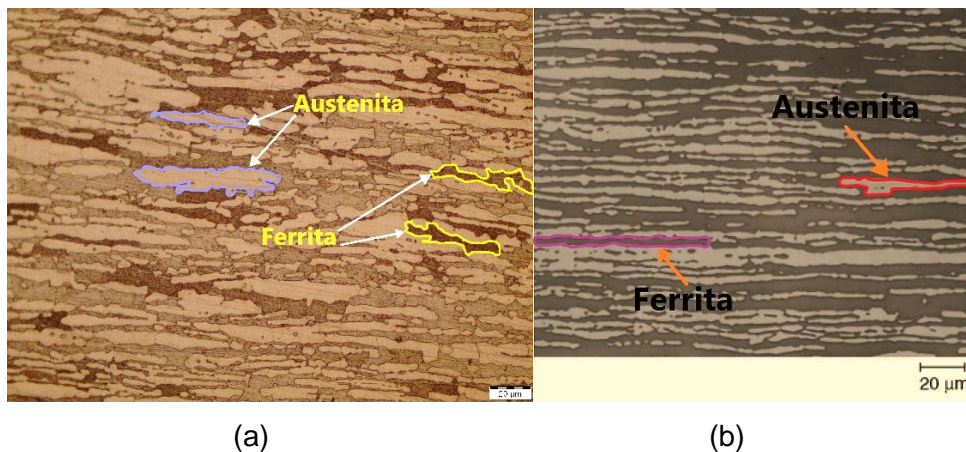


Figura 3.8. Microestructura del acero dúplex 2205 a 500X

(Fuente: (a) Propia, (b) Handbook Vol. 9)

3.1.4.2. Probetas sin exposición a corrosión.

Para la configuración B-83 y R-91+B-83, se tiene el mismo material de aporte (B-83) como recubrimiento, a una magnificación de 500X en la Figura 3.9. (a), se observa la microestructura del material de aporte (B-83), teniendo matriz martensítica con ferrita delta en forma de agujas alargadas.

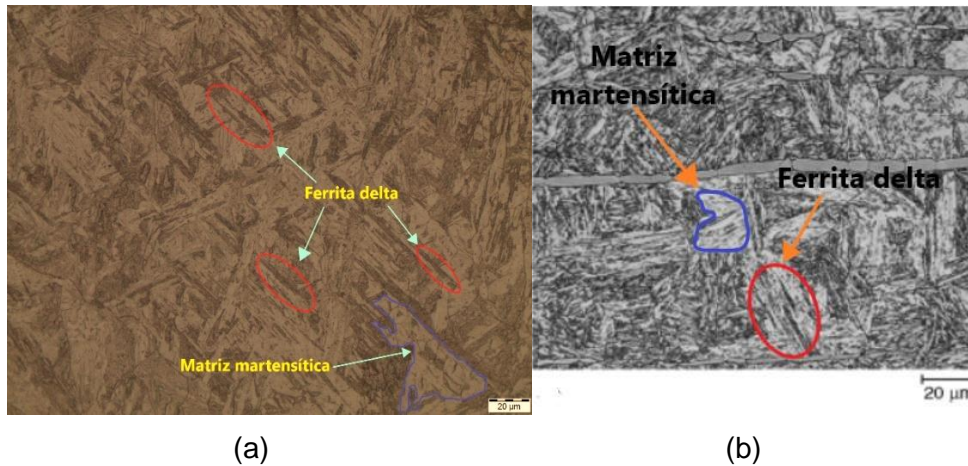


Figura 3.9. (a) Microestructura del material de aporte B-83 (recubrimiento), en la configuración B-83 y R-91+B-83, (b) microestructura de acero, a 500X.

(Fuente: (a) Propia, (b) Handbook Vol. 9)

A una magnificación de 500X en la Figura 3.10. (a) se observa la microestructura del material de aporte dos (R-91), donde se puede diferenciar que las zonas claras pertenecen a matriz austenítica, líneas delgadas de tipo listón en forma de tallos de césped pertenecientes a martensita y ferrita delta en forma de agujas alargadas.

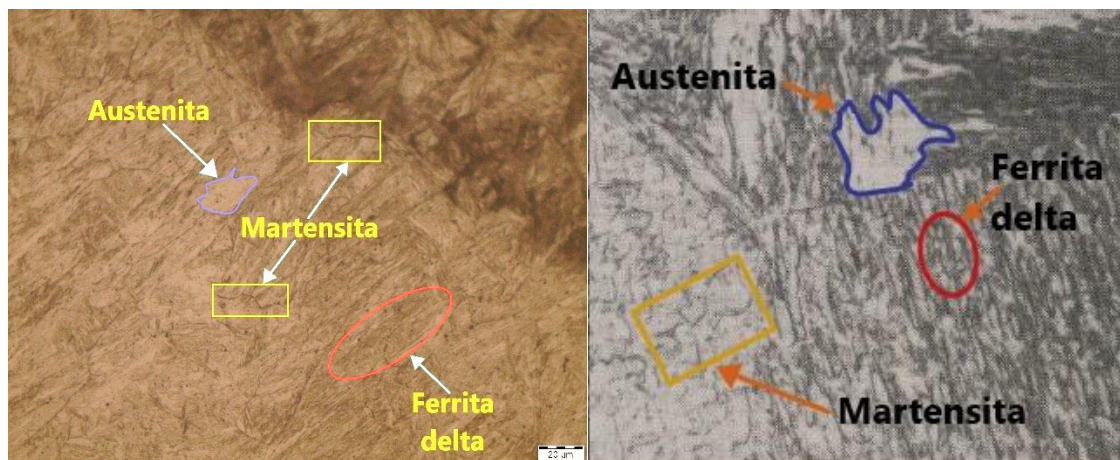


Figura 3.10. (a) Microestructura del material de aporte dos (MA2_R-91) en la configuración R-91+B-83, (b) microestructura típica de la martensita en listón, a 500X.

(Fuente: (a) Propia, (b) Camero Espinal, Benavides Ortega, & Morales Sierra)

En la Figura 3.11. con una magnificación de 500X, se observa la microestructura de la zona afectada por el calor en la configuración B-83, teniendo fase austenita y ferrita.

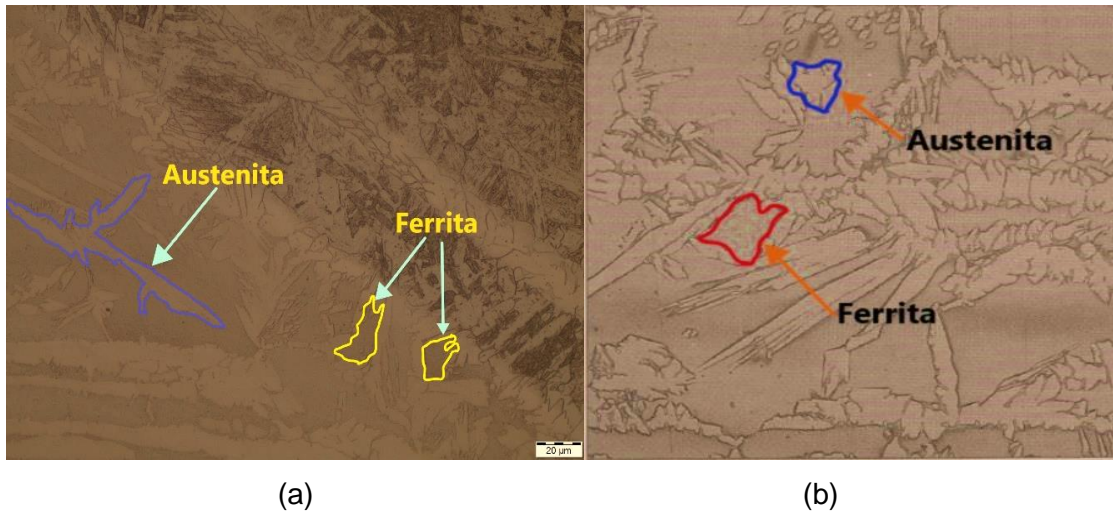


Figura 3.11. (a) Microestructura de la configuración B-83, en la zona afectada por el calor (ZAC), (b) detalle de la zona afectada por el calor, a 500X.
(Fuente: (a) Propia, (b) Porta, Ignoto, Cerpa, León, & Quintero)

En la Figura 3.12. (a) con una magnificación a 500X, se observa la microestructura de la zona afectada por el calor, en la configuración R-91+B-83, donde se puede diferenciar que hay presencia de zonas oscuras pertenecientes matriz ferrítica con zonas claras pertenecientes a austenita.

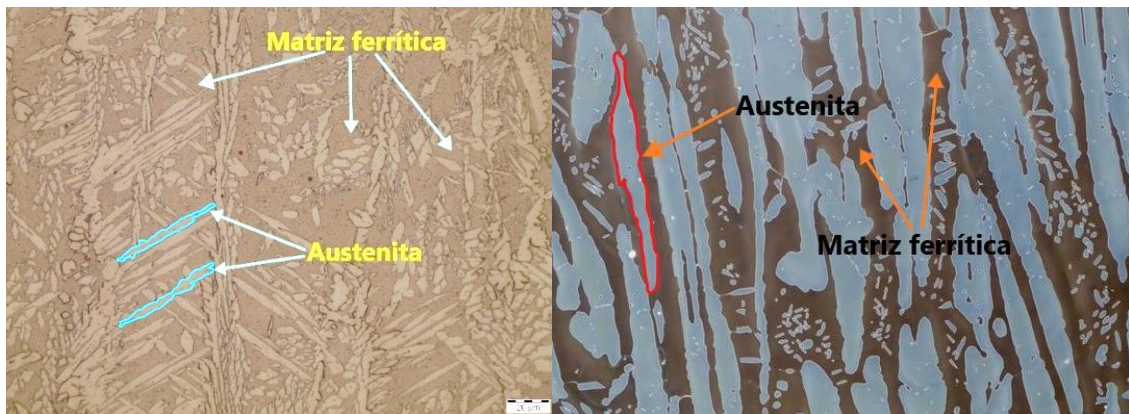


Figura 3.12. (a) Microestructura de la zona afectada por el calor (ZAC) en la configuración R-91+B-83, (b) microestructura de la zona afectada por el calor en acero combinado, a 500X.
(Fuente: (a) Propia, (b) Schnar)

En la configuración R-91+B-83 y configuración B-83, el material base es el mismo, por lo cual a una magnificación de 500X en la Figura 3.13. (a) se observa la microestructura del material base, teniendo fase austenita (clara) con ferrita (obscura) en forma alargada, producida por el proceso de laminado.

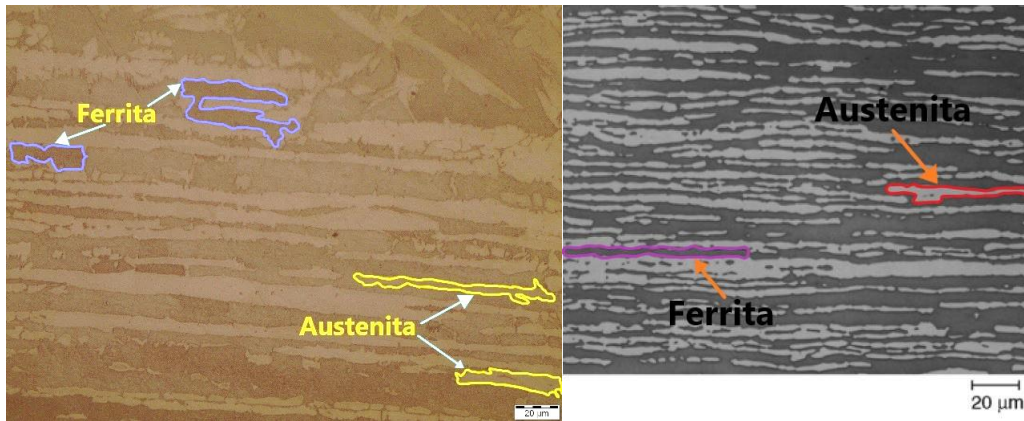


Figura 3.13. (a) Microestructura del material base (MB) en la configuración R-91+B-83 y configuración B-83, (b) microestructura de acero dúplex 2205, a 500X.

(Fuente: (a) Propia, (b) Handbook Vol. 9)

3.1.4.3. Probetas obtenidas del ensayo de doblado sin exposición a corrosión.

En la Figura 3.14. a una magnificación de 500X, se observan los inicios de fisuras ocasionados por el doblado longitudinal en la configuración B-83.

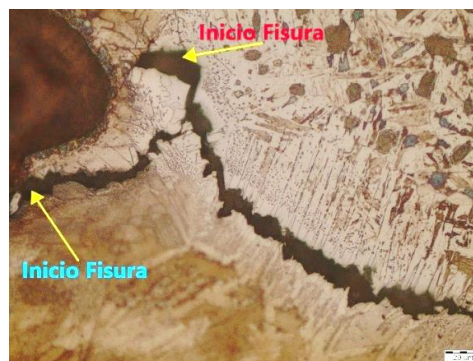


Figura 3.14. Punto de inicio de fisura en el doblado longitudinal de la configuración B-83 a 500X.

(Fuente: Propia)

A una magnificación de 500X, en la Figura 3.15., se observa el inicio de fisura ocasionados por el doblado transversal en la configuración B-83.

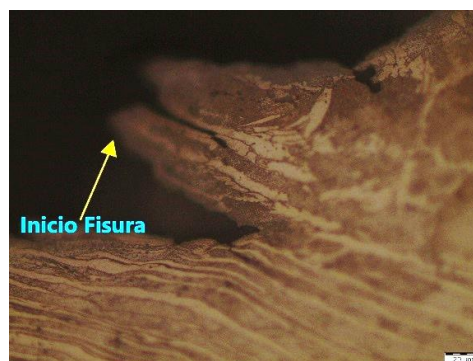


Figura 3.15. Punto de inicio de fisura en doblado transversal en la configuración B-83 a 500X.

(Fuente: Propia)

Para la configuración R-91+B-83 a una magnificación de 100X, en la Figura 3.16., se observa el inicio de fisura en la probeta ensayada longitudinalmente.

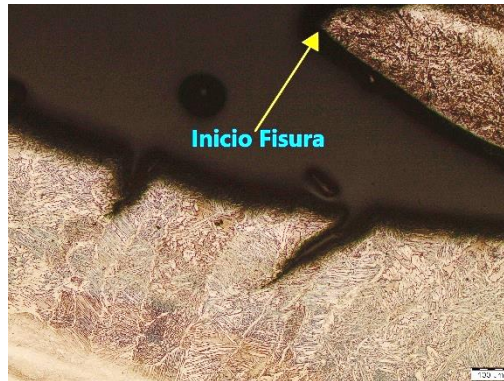


Figura 3.16. Puntos de inicio de fisura en doblado longitudinal en la configuración R-91+B-83 a 100X.

(Fuente: Propia)

A una magnificación de 100X, en la Figura 3.17., se observa el inicio de fisura en la probeta ensayada transversalmente en la configuración R-91+B-83.



Figura 3.17. Puntos de inicio de fisura en doblado transversal en la configuración R-91+B-83 a 100X.

(Fuente: Propia)

3.1.4.4. Probetas expuestas a 72 horas de corrosión.

A una magnificación de 500X, en la Figura 3.18. (a) perteneciente a la configuración B-83 se observa la pérdida del material en el borde del recubrimiento; en la Figura 3.18. (b) perteneciente a la configuración R-91+B-83 de igual manera se observa la pérdida del material de recubrimiento.

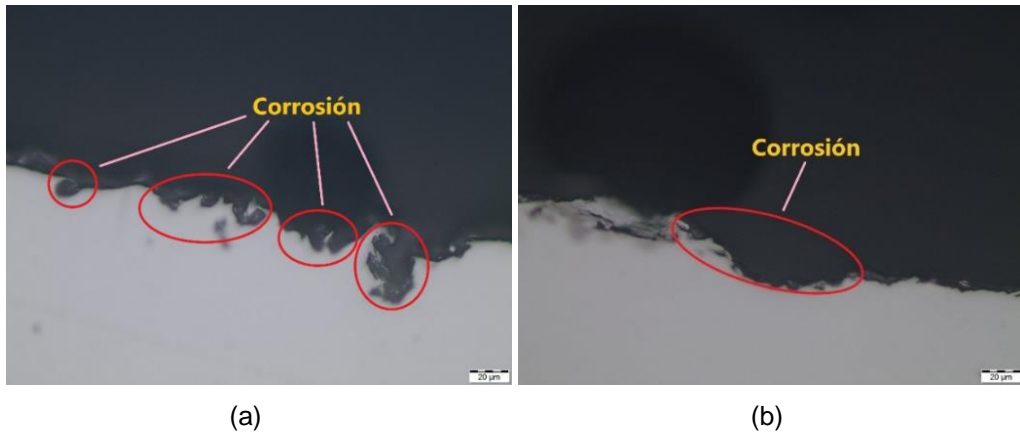


Figura 3.18. Pérdida del material en el borde del recubrimiento de la (a) configuración B-83, (b) configuración R-91+B-83 a 500X.

(Fuente: Propia)

A una magnificación de 100X y 500X, respectivamente en la Figura 3.19. se observan la profundidad de corrosión en los puntos de penetración más notables de la configuración B-83; teniendo valores de 222,96 μm , 76,68 μm y 74,62 μm .

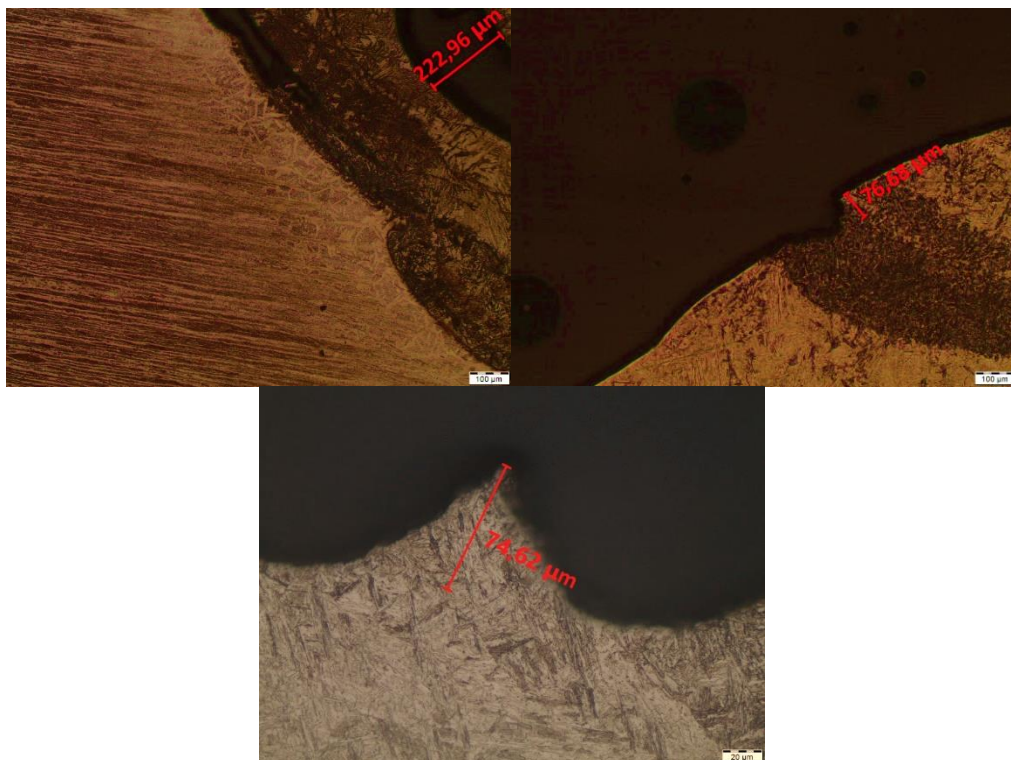


Figura 3.19. Medición de la profundidad de corrosión en los puntos de penetración más notables de la configuración B-83 a 100X y 500X.

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.20. a una magnificación de 100X y 500X, respectivamente, se observan los puntos de pérdida de material a causa de la corrosión en la configuración B-83, teniendo valores de 212,91 μm y 109,61 μm de penetración.

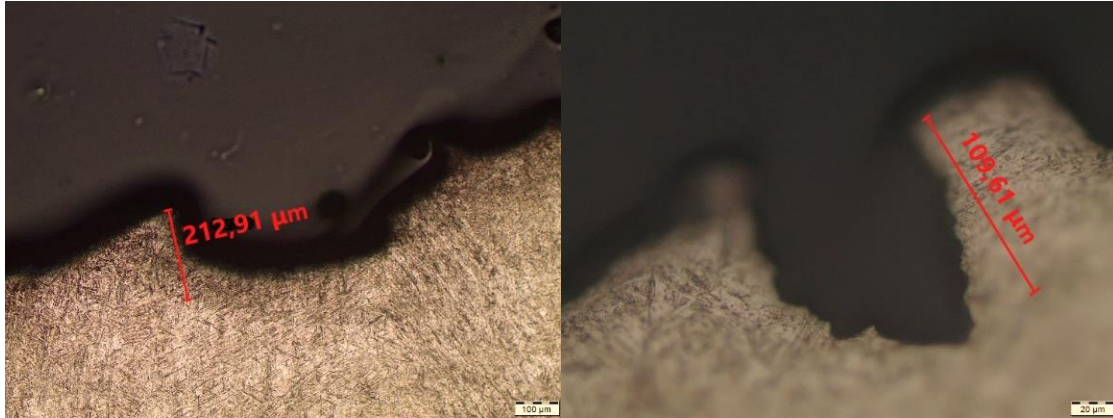


Figura 3.20. Medidas de penetración de la corrosión en los puntos más notables de la configuración R-91+B-83 a 100X y 500X respectivamente.

(Fuente: Propia)

En la configuración R-91+B-83, a una magnificación de 100X en la Figura 3.21., se observan los puntos de penetración con valores de 632,51 μm , 334,86 μm , 55,81 μm y 217,04 μm ; como también las áreas de picaduras con valores de 3788,39 μm^2 y 5150,72 μm^2 .

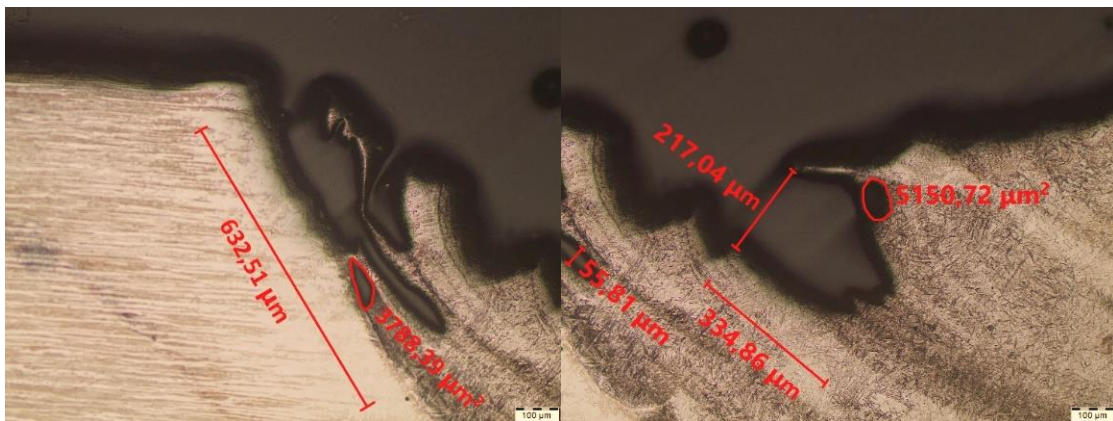


Figura 3.21. Medidas de penetración y áreas de picaduras en la configuración R-91+B-83 a 100X.

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.22. a una magnificación de 500X, de la configuración B-83 se observan las áreas de las picaduras con valores de 67,47 μm^2 , 71,53 μm^2 , 65,50 μm^2 y 208,80 μm^2 , de izquierda a derecha respectivamente.

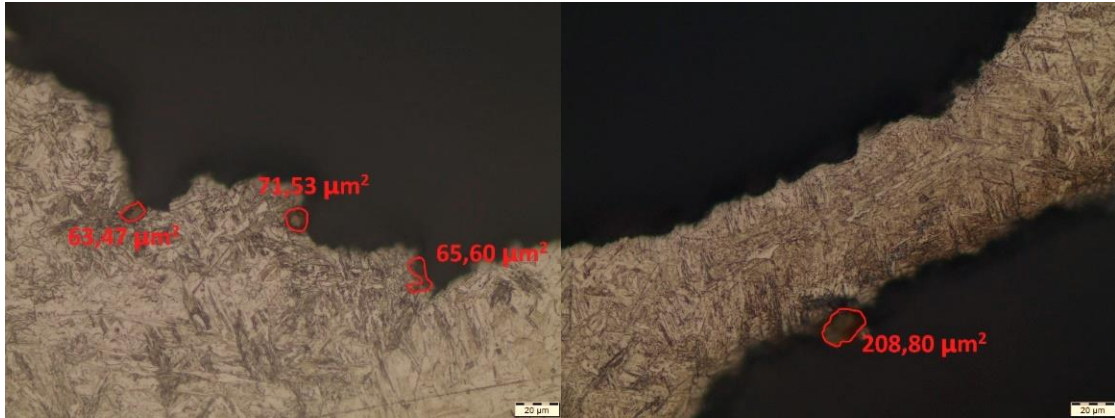


Figura 3.22. Medición de las áreas de las picaduras en la configuración B-83 a 500X.
(Fuente: Propia)

3.1.5. Ensayo de tintas penetrantes

Con la ayuda del ensayo de tintas penetrantes se puede apreciar las discontinuidades en la superficie del recubrimiento, en la Figura 3.23. de la configuración R-91+B-83 se observa que existen dos manchas redondeadas de 11 mm y 9 mm de diámetro respectivamente.



Figura 3.23. Discontinuidades mostradas en el ensayo de tintas penetrantes a la configuración R-91+B-83.
(Fuente: Propia)

En la Figura 3.24. de la configuración B-83 se observa que existe una mancha alargada de 12 mm y una mancha redondeada de 4 mm de diámetro.

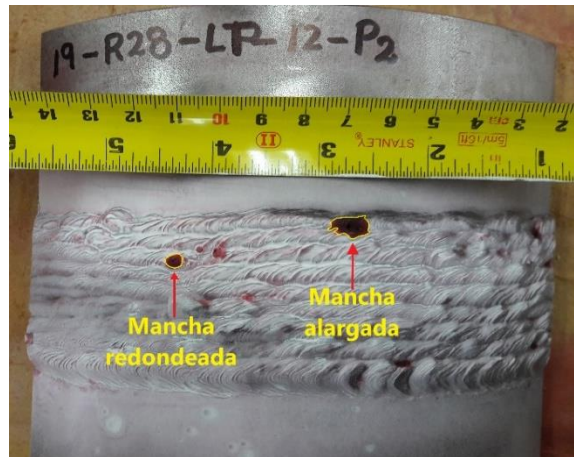


Figura 3.24. Discontinuidades mostradas en el ensayo de tintas penetrantes a la configuración B-83.

(Fuente: Propia)

3.1.6. Ensayo de radiografía.

Las imágenes radiográficas de las probetas permiten observar las discontinuidades que no están abiertas a la superficie y que no son detectables con el ensayo de tintas penetrantes.

En la Figura 3.25. de la configuración R-91+B-83, se observa una mordedura de 12 mm de longitud a una distancia de 32 mm medida desde el extremo izquierdo de la probeta.

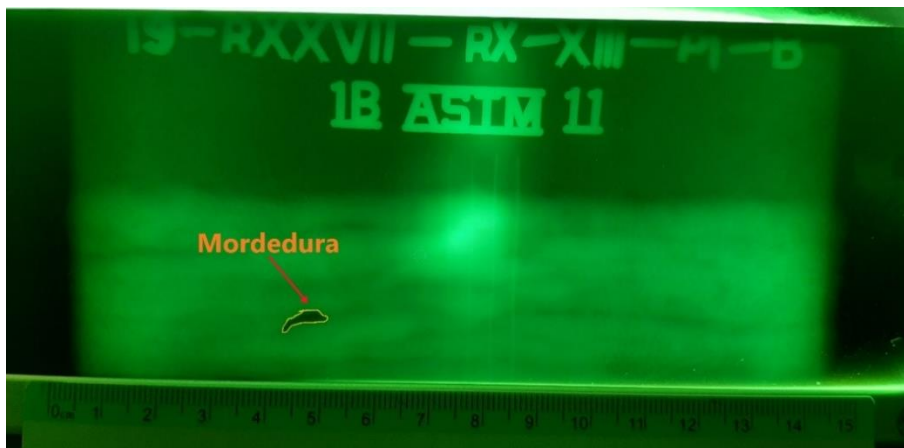


Figura 3.25. Mordedura mostrada en el ensayo de radiografía en la configuración R-91+B-83.

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.26. de la configuración B-83, se observan diecisiete porosidades en todo el ancho del recubrimiento; los diámetros (Dim) de los mismos se encuentran detallados en la Tabla 3.11.; donde "X" es la distancia de cada porosidad medida desde el extremo izquierdo de la probeta.

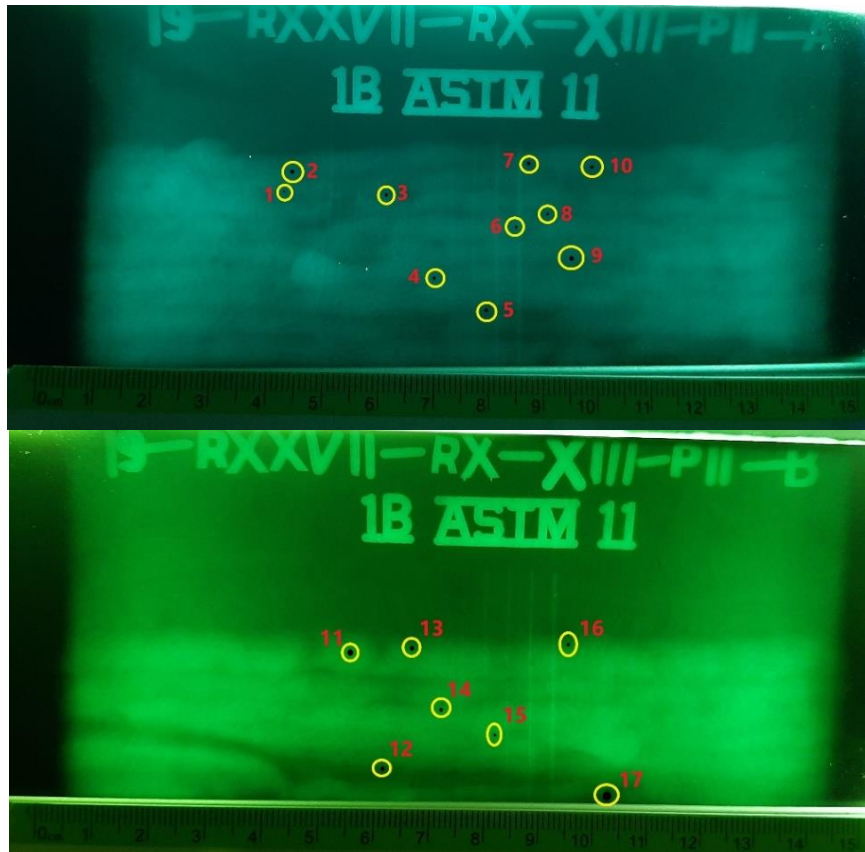


Figura 3.26. Porosidades mostradas en el ensayo de radiografía en la configuración B-83.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.11. Dimensiones de las porosidades encontradas en el recubrimiento de la configuración B-83.

N°	DISCONTINUIDAD	X(mm)	Dim. (mm)
1	POROSIDAD	39,46	0,70
2		40,80	0,83
3		59,54	0,83
4		68,80	0,78
5		77,77	0,69
6		80,10	0,82
7		81,59	0,98
8		84,72	0,77
9		87,06	1,26
10		99,82	0,90
11		54,22	1,2
12		56,56	0,94
13		64,00	0,40
14		70,66	0,40
15		80,72	0,94
16		98,50	1,00
17		99,40	1,35

(Fuente: Propia)

3.1.7. Ensayo de corrosión.

Como se mencionó en el capítulo 2, el ensayo de corrosión se lo realiza con cloruro férrico en cuatro probetas con configuración R-91+B83, y cuatro con configuración B-83; dichas probetas tienen las dimensiones ($L=152,4\text{mm}$ y $a = 38,1\text{mm}$) que se observa en la Figura 3.27., las cuales ayudan a calcular el área expuesta al medio corrosivo. El cálculo del área expuesta al medio corrosivo se lo obtiene con la Ecuación 3.1.

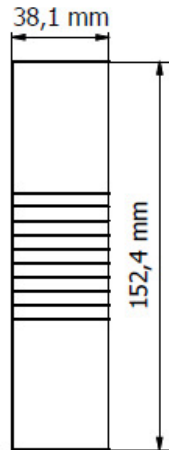


Figura 3.27. Dimensiones de las probetas expuestas al medio corrosivo.

(Fuente: Propia)

$$A = L * a$$

Ecuación 3.1. Cálculo del área expuesta al medio corrosivo.

(Fuente: Propia)

Donde:

L: Largo [cm].

a: ancho [cm].

$$A = 15,24 * 3,81$$

$$A = 58,064[\text{cm}^2]$$

El cálculo de la pérdida de masa, se lo realiza como se muestra en la Ecuación 3.2.; el resultado de la pérdida de masa es muy importante, porque con ello se puede calcular la velocidad de corrosión.

$$W = W_i - W_f$$

Ecuación 3.2. Cálculo de la pérdida de masa.

(Fuente: Sáenz, Castillo, & Márquez)

Donde:

W: Pérdida de masa [g].

W_i : Masa inicial [g].

W_f : Masa final [g].

$$W = 347,331 - 346,064$$

$$W = 1,267 [g]$$

En la Tabla 3.12., se detalla la pérdida de masa que sufrió cada probeta tanto para la configuración R-91+B-83, como para la configuración B-83; en la Figura 3.28. se observa el estado de las probetas después de haber sido sometidas al ensayo de corrosión con cloruro férrico.

Tabla 3.12. Pérdida de masa obtenido el ensayo de corrosión para las dos configuraciones.

Configuración	Probeta	Masa Inicial W_i [g]	Masa Final W_f [g]	Pérdida de masa W [g]
R-91+B83	1	347,331	346,064	1,267
	2	285,170	284,104	1,066
	3	313,117	311,606	1,511
	4	320,435	319,167	1,268
B83	1	336,181	335,029	1,152
	2	318,837	317,919	0,917
	3	313,891	312,551	1,340
	4	352,087	350,922	1,165

(Fuente: Propia)



Figura 3.28. Probetas después del ensayo de corrosión.

(Fuente: Propia)

La velocidad de corrosión se calcula mediante la Ecuación 3.5.

$$CR = \frac{K * W}{A * d * t}$$

Ecuación 3.3. Cálculo de la velocidad de corrosión.

(Fuente: González)

Donde:

CR: Velocidad de corrosión.

W: Pérdida de masa [g].

K: Constante de transformación de unidades [$8,76 \times 10^4$ mm/año].

A: Área promedio inicial que será expuesto al medio corrosivo [cm^2].

d: Densidad del material [g/cm^3] [Dúplex 2205 = $7,80 \text{ g}/\text{cm}^3$].

t: Tiempo de exposición en horas [h].

$$CR = \frac{8,76 \times 10^4 \left[\frac{\text{mm}}{\text{año}} \right] * 1,267 [\text{g}]}{58,064 [\text{cm}^2] * 7,80 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right] * 72 [\text{h}]}$$

$$CR = 3,4037 \left[\frac{\text{mm}}{\text{año}} \right]$$

En la Tabla 3.13. se muestran los resultados de la velocidad de corrosión, en las cuatro probetas de las dos configuraciones; dándose la mayor velocidad en la probeta 3 de la configuración R-91+B-83 con un valor de 4,0591 mm/año y la menor velocidad en la probeta 2 de la configuración B-83 con un valor de 2,4643 mm/año.

Tabla 3.13. Cálculo de la velocidad de corrosión para las dos configuraciones.

Config.	Probeta	Pérdida de masa W [g]	Área [cm^2]	Densidad [g/cm^3]	Tiempo [h]	Constante de transformación [mm/año]	Velocidad de corrosión [mm/año]
R-91 + B83	1	1,267	58,064	7,8	72	8,76E+04	3,4037
	2	1,066					2,8646
	3	1,511					4,0591
	4	1,268					3,4072
B83	1	1,152					3,0947
	2	0,917					2,4643
	3	1,340					3,5998
	4	1,165					3,1297

(Fuente: Propia)

3.2. Análisis de los resultados obtenidos.

3.2.1. Caracterización del acero dúplex 2205.

Los resultados de composición química descritos en el ANEXO II, detallan los porcentajes referentes a los elementos principales que son el carbono 0,032%, silicio 0,0554%, manganeso 1,163%, fósforo 0,022%, cromo 17,79%, molibdeno 3,178%, níquel 6,718% y también la presencia de otros elementos en una proporción menor; cabe mencionar que el

porcentaje del cromo es menor que el descrito en la norma, por otro lado el porcentaje del níquel es un poco mayor, compensando de esta manera la proporción perdida, comparando con la especificación estandarizada (ASTM A182/A182M-19a, 2019) (ANEXO I), se observa que la composición es de un acero dúplex 2205.

3.2.2. Ensayo de doblado.

De acuerdo a los criterios de aceptación del código ASME sección IX detallado en el inciso QW-163, la longitud permitida en las fisuras es 1,58 mm en dirección transversal o longitudinal, y entre la línea de unión es de 3,18 mm; comparando los resultados obtenidos del ensayo de doblado en las probetas con configuración B-83 y configuración R-91 + B-83 (Tabla 3.1.) se observa que todas las fisuras se encuentran fuera del rango aceptable.

Todas las probetas sufrieron fracturas de tipo frágil tanto transversal como longitudinalmente en el recubrimiento, además se observa que las fallas en las probetas sometidas a doblado con la configuración B-83 empiezan en el material de aporte (B-83) propagándose hacia el material base, siendo el comportamiento de desplazamiento desde el exterior hacia el interior; las fallas en las probetas con la configuración R-91 + B-83 tienen su origen en el material de aporte uno (B-83), propagándose hacia el material de aporte dos (R-91) y material base (MB), con un comportamiento de desplazamiento similar a la configuración B-83, estas se pueden apreciar en las Figuras 3.4. - 3.7. que son a un nivel macrográfico, mientras que en las Figuras 3.14. - 3.17. son a nivel micrográfico; también con la ayuda de los ensayos no destructivos (ANEXOS IV y V) se encuentran los defectos presentes en los materiales de aporte que favorecen al comportamiento antes mencionado, los defectos se convierten en concentradores de esfuerzos y propician una rápida propagación de la grieta, cuando es sometida a una carga externa; adicionalmente una alta dureza provoca una mayor resistencia a la deformación aumentando la fragilidad como lo señala (Gere & Goodno, 2009).

Cabe mencionar que en el material base no se aprecian fracturas, debido a que su límite elástico es de 450 MPa como se indica (ASTM A182/A182M-19a, 2019), por ende este permanece intacto aún con el accionar de las fuerzas aplicadas en el doblado transversal (152 MPa) y longitudinal (248 MPa).

3.2.3. Ensayo de microdurezas.

Según la norma (ASTM A182/A182M-19a, 2019) se establece que la dureza del acero dúplex 2205 debe ser máximo de 30 HRC, obteniendo en la probeta material base un promedio de 24,50 HRC (Tabla 3.2.), mismo que cumple con lo expuesto anteriormente.

De los valores obtenidos en las microdurezas que se muestra en la Figura 3.2., tanto para la probeta sin exposición a corrosión como para la probeta expuesta a 72 horas de corrosión, de la configuración B-83, se puede comparar que existe una disminución de dureza de 3.92% en el material base, de 1.92% en la zona afectada por el calor y en el material de recubrimiento (B-83) de 4.49% esto debido a que después del proceso corrosivo existe sensibilización de los materiales; comparando con el estudio de (RAUMER, 2013) esta sensibilización causa pérdida de las características de resistencia mecánica y dureza.

Para el caso de la configuración R-91 + B-83 los valores obtenidos en las microdurezas tanto para la probeta sin exposición a corrosión como para la probeta expuesta a 72 horas de corrosión, se puede comparar en la Figura 3.3. que existe una disminución de dureza de 19,67% en el material base y de 8,93% en la zona afectada por el calor, esto debido a que el acero dúplex 2205 fue sometido a un doble calentamiento en el proceso de soldadura, produciendo de este modo un gradiente de temperatura que reduce el contenido de carbono, reduciendo la dureza en la probetas expuestas a corrosión como en los resultados obtenidos por (Tovar Gómez, 2005). Sin embargo, en el material que actúa como interfase (R-91) existe un aumento de 64,15% en la dureza esto debido a una buena fusión con el recubrimiento y el material base por lo cual es complicado determinar la zona en la que fue tomada la indentación; en el caso del recubrimiento hay disminución de 2,22% estando dentro del rango aceptado en el manual de (AGA, 2001).

El ensayo de microdureza demuestra que el recubrimiento para las dos configuraciones, conserva los valores de dureza especificados en (AGA, 2001), aún después de que las probetas fueron expuestas a corrosión, comprobando de este modo que mantiene sus propiedades.

3.2.4. Ensayo de micrografía.

Tomando como referencia la microestructura presentada por (Adams, 2004), y comparándola con el material de aporte (B-83) en la Figura 3.9., se identifica una estructura compuesta por ferrita delta en una matriz martensítica (clara), la ferrita delta (en forma de agujas alargadas agrupadas y oscuras) es el resultado del proceso de calentamiento que sufrió el material de aporte para ser fundido, mientras que (Najera, 2015) indica que la matriz martensítica se consigue gracias al enfriamiento que sufre la soldadura y de este modo mejora la dureza del material.

En la Figura 3.10. (a) de la configuración R-91 + B-83 que pertenece al material de aporte dos (R-91), se observa una microestructura con una matriz austenítica (clara) y ferrita delta,

con pequeñas presencias de martensita (líneas oscuras en forma de tallos de césped); como se menciona en el artículo de (Camero Espinal, Benavides Ortega, & Morales Sierra, 2012), la ferrita delta se da por efecto de las temperaturas necesarias para la fusión (sobre los 1000°C); la martensita ayuda a la austenita a ser más estable a temperaturas ambientes y por otro lado, la austenita proporciona al material una mejor resistencia a la corrosión.

La Figura 3.11. (a) es de la zona afecta por el calor (ZAC) de la configuración B-83 y la Figura 3.11. (b) perteneciente a la investigación de (Porta, Ignoto, Cerpa, León, & Quintero, 2003), permite determinar la microestructura donde se observa que existe un pequeño cambio de las fases ferrítica y austenítica del material base, aumentando el contenido de ferrita por el calor que se genera al momento de realizar la soldadura, y como consecuencia una posible pérdida de propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión, estos resultados también fueron presentados por (Juraga, Stojanovic, & Ljubenkovic, 2014) en sus estudios.

En la configuración R-91 + B-83 mostrada en la Figura 3.12., se observa que la zona afectada por el calor (ZAC) tanto para este trabajo como para el estudio de (Schnarr, 2019) sufre un cambio de las fases ferrítica – austenítica que están en equilibrio, a una matriz ferrítica con austenita distribuida en la misma, como lo menciona (Zappa, Zalazar, & Surian, 2017) el crecimiento de la ferrita se debe al doble calentamiento al que fue sometido el material base (MB), primero al depositar la interfase (R-91) y posteriormente al aplicar el recubrimiento (B-83); estas dos capas ayudan a que la velocidad de enfriamiento sea baja en comparación con la configuración B-83 y favorece la transformación de ferrita a austenita.

El material base para las dos configuraciones es el mismo, en la Figura 3.13. se observa una comparación de la microestructura del Handbook Vol. 9 y la obtenida en este trabajo, apreciando una microestructura con fases ferrítica y austenítica equilibradas, con una forma alargada por el proceso de laminación al que fue sometido el acero dúplex 2205. Según (Juraga, Stojanovic, & Ljubenkovic, 2014) al tener las dos fases dicho acero es más propenso a sufrir una variación de su microestructura debido al calor que se produce por la soldadura.

3.2.5. Ensayo de tintas penetrantes.

Los criterios de aceptación o rechazo por medio de los cuales se evalúa el recubrimiento son basados en el código ASME sección IX.

Mediante el proceso de soldadura SMAW se coloca el recubrimiento duro con las configuraciones B-83 y R-91 + B-83 sobre la superficie del acero dúplex 2205, al efectuar el ensayo de tintas penetrantes se observa en las Figuras 3.23. y 3.24. que las manchas alargadas y redondeadas corresponden a mordeduras por las dimensiones que presentan, mismas que superan el límite permitido para discontinuidades que es de 4,7625 mm, el cual esta descrito en el inciso QW-195.2; en conclusión, se tiene que ambas probetas no cumplen con el código ASME sección IX.

3.2.6. Ensayo de radiografía.

El código ASME sección IX no contempla criterios de aceptación o rechazo para los resultados del ensayo de radiografía industrial en recubrimientos, aunque al tratarse de indicaciones producidas en el proceso de soldadura se realiza una evaluación con la ayuda de los criterios para tintas penetrantes bajo el código ASME sección IX.

En la Figura 3.25. se observa una mordedura; según la investigación de (Almaraz, 2015), habitualmente es ocasionada por un amperaje demasiado elevado para soldar, un ángulo de avance pequeño o demasiada distancia entre electrodo y material base, produciendo un arco largo.

Al observar la Tabla 3.11. y la Figura 3.26. se aprecia que existen diecisiete porosidades en la probeta de la configuración B-83, pero todas están dentro del rango de aceptación tanto para tamaño (4,7625 mm) como para distancia entre ellas (1,58 mm) por lo tanto cumplen con el código ASME sección IX. Cabe mencionar que estas porosidades al ser numerosas comprometen la resistencia de la estructura, por lo tanto al aplicar una carga externa como en un ensayo de doblado se producen fuerzas intersticiales; como lo explica el manual de soldadura (EXSA, 2010) ocasionando que se fracture el material de aporte (B-83) y que se desprenda del material base (MB).

3.2.7. Ensayo de corrosión.

En las superficies de las probetas de las configuraciones B-83 y R-91+ B-83 (Figura 3.20.), se observa una pérdida de material en la zona del recubrimiento (B-83) por efecto de la corrosión, donde se aprecia que existen pequeños agujeros lo que de acuerdo a (Ginwalla, 2004) corresponde a una corrosión por picadura.

Analizando las micrografías mostradas en las Figuras 3.19. - 3.22., se observan las profundidades y áreas de las picaduras, como también que la corrosión hace su ingreso por los bordes del recubrimiento y penetrando a través de la fase ferrítica, como sustenta

el estudio de (Lippold & Kotecki, 2005); también en las micrografías se puede observar que existe una mayor presencia de ferrita en el recubrimiento lo que ocasiona una disminución de la resistencia a la corrosión cuando está expuesto a altas temperaturas como muestran los resultados de (Villate, 1976).

En los datos de la Tabla 3.12. se aprecia la pérdida de masa que existe en las diferentes probetas, siendo la configuración R-91+B-83 la que tiene una mayor pérdida, en comparación con la configuración B-83; debido a la presencia de mordeduras tanto en la interfase como en el recubrimiento, (Dilon, 1982) describe que esto provoca pérdida de la resistencia del acero y acelera otros tipos de corrosión.

En la Tabla 3.13 se observa el resultado del cálculo de la velocidad de corrosión para las dos configuraciones y ocho probetas; teniendo un rango de velocidad de 2 a 4 [mm/año]; estas velocidades altas se deben a la sustancia que se utilizó como medio corrosivo (cloruro férrico), (Termans, 2019) señala que este tipo de sustancia es altamente agresiva con los aceros. También estas velocidades son producto de las porosidades que se originan en el proceso de soldadura, debido a que a mayor cantidad de porosidades mayor sensibilidad a la corrosión porque se da un contacto mayor entre el material y la sustancia líquida como lo argumenta (Aramburo, Palacios, & Rivera, 2013). Consecuencia de esto, el recubrimiento no es apto para ser usado en ambientes nocivos.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

4.1. CONCLUSIONES.

En el presente trabajo de investigación se cumple con los objetivos establecidos en un principio.

Al realizar todos los ensayos que indica el código ASME sección IX, para calificar el recubrimiento, las probetas sometidas al ensayo de doblado no aprueban según el inciso QW-163, es decir que el proceso de soldadura SMAW no es el más adecuado ya que produce depósitos de calidad deficiente.

Mediante las fallas producidas en el ensayo de doblado, se determina que la fractura es de tipo frágil, el recubrimiento posee una alta dureza lo que provoca una menor ductilidad, la fractura se propaga desde la superficie del recubrimiento (B-83) hacia la superficie del material base (MB), debido a las porosidades presentes.

Las probetas dobladas en sentido longitudinal presentan una mayor resistencia a la fractura, debido a que la distribución de las fuerzas sigue la misma dirección del cordón del recubrimiento.

El uso de una interfase ayuda a tener una mejor adhesión entre el recubrimiento y el material base, también se determina que el electrodo R-91 es una excelente opción para ser usado como interfase.

Con la ayuda de los resultados obtenidos en el ensayo de microdurezas, se determina que el recubrimiento cumple con el rango de durezas manteniendo sus propiedades aún después de estar expuesto a corrosión.

La variación de la temperatura ocasionada por el arco eléctrico de la soldadura SMAW, produce cambios en la microestructura de la zona afectada por el calor (ZAC) aumentando la fase ferrítica en el acero dúplex 2205 y disminuyendo la dureza del material.

Con los ensayos no destructivos, se determina que el recubrimiento tiene porosidades y una mordedura, las mismas que aceleran un proceso corrosivo reteniendo impurezas o sustancias químicas que afectan al recubrimiento.

A través del ensayo metalográfico fue posible observar la corrosión por picaduras presente en los materiales de aporte (B-83 y R-91), ingresando por el borde del recubrimiento y propagándose por la fase ferrítica.

4.2. RECOMENDACIONES.

Para obtener una mejor calidad en el depósito del recubrimiento se aconseja utilizar un proceso de soldadura en el que se puede tener un mejor control de las variables que intervienen en el mismo.

Realizar un control de temperatura tanto para el recubrimiento como para la interfase, para evitar altas velocidades de enfriamiento que dan como resultado la formación de fases secundarias no deseadas, mismas que podrían dificultar ciertos análisis.

Para realizar un mejor análisis del efecto de la corrosión en el recubrimiento, es preferible usar una sustancia corrosiva menos agresiva, para evitar grandes pérdidas de masa que no se dan en la vida real.

Referencias Bibliográficas.

- Adams, B. (2004). *ASM Handbook, Volumen 9, Metallography and Microstructures 2004*. Ohio: ASM International.
- AGA, S. (2001). *Catalogo de electrodos comunes, especiales & gases para corte y soldadura*. Guayaquil.
- Almaraz, Á. (2015, Septiembre 21). *REPARA TU CULTIVADOR*. Retrieved from <https://www.reparatucultivador.com/defectos-de-soldadura/>
- AMERICAN WELDING SOCIETY. (1996). *Manual de soldadura*. México: Prentize-Hall Hispanoamérica.
- Aramburo, D., Palacios, A., & Rivera, K. (2013). Comparación de corrosión en metales vs refractarios. *UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA*, 1-6.
- ASME Sección IX. (1998). *Soldadura: Desarrollo y calificación de Procedimientos y Soldadores*. New York.
- ASTM A182/A182M-19a. (2019). *Standard Specification for Forged or Rolled Alloy and Stainless Steel Pipe Flanges, Forged Fittings, and Valves and Parts for High-Temperature Service*. Pennsylvania.
- ASTM E1032. (2019). *Standard Practice for Radiographic Examination of Weldments Using Industrial X-Ray Film*. Pennsylvania.
- ASTM E165. (2019). *Standard Practice for Liquid Penetrant Testing for General Industry*. Pennsylvania.
- ASTM E190. (2014). *Standard Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds*. Pennsylvania.
- ASTM E3. (2017). *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*. Pennsylvania.
- ASTM E384. (2017). *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*. Pennsylvania.
- ASTM E407. (2015). *Standard Practice for Microetching Metals and Alloys*. Pennsylvania.
- ASTM G48. (2015). *Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution*. Pennsylvania.

- Baena, J. C. (2008). *Interdependencia entre las condiciones de operación y el desgaste en rodetes tipo pelton fabricados en acero ASTM A743 GRADO CA6NM*. Sydney: UNSW.
- Bedoya Piedrahita, L. F., Giraldo Giraldo, L. F., Galeano Galviz, B. E., & Cardenas Figueroa, J. L. (2015, Diciembre 13). *Metalografía-Universidad Tecnológica de Pereira*. Retrieved from http://blog.utp.edu.co/metalografia/proteccion-contra-la-corrosion-recubrimiento-con-polimeros/?fbclid=IwAR2aHRg6x2YAXGoVLAS0_qY6JYLk0qomggWwoHrruU3L-QuINxI9xnKZim4
- Camero Espinal, S., Benavides Ortega, B., & Morales Sierra, L. E. (2012, Julio 26). *METALOGRAFÍA – UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA*. Retrieved from <http://blog.utp.edu.co/metalografia/7-aceros-inoxidables/#parte6>
- Chalá Gonzalón, J. X., & Molina Velasco, E. D. (2010). *Análisis y selección de los procesos para recubrimientos duros en la recuperación de piezas industriales*. Quito: EPN.
- Correa, F. (2014, Septiembre 29). *Procesos de manufactura y materiales*. Retrieved from <http://procesosdemanufacturaymateriales.blogspot.com/>
- Corrosion Consulting Services*. (1995). Retrieved from <https://www.corrosionclinic.com/>
- Cosín, C. (2019). *IAGUA*. Retrieved from <https://www.iagua.es/>
- DataMovilidad*. (2019). Retrieved from www.datamovilidad.com
- Dilon, C. (1982). *Forms of Corrosion: RECOGNITION AND PREVENTION*. Texas: National Association of Corrosion Engineers.
- ESAB*. (2019). Retrieved from <https://www.esab.com.ar>
- Escola, A., & Gavilanes, J. (2018). *Estudio de corrosión acelerada sobre una junta soldada de acero dúplex 2205 soldada con electrodo ER-2594*. Quito.
- EXSA, O. (2010). *Manual de Soldadura*. Lima.
- Gar, C. (2019). *ingeniería mecánica blog*. Retrieved from ingenieriamecanicacol.blogspot.com
- Gere, J., & Goodno, B. (2009). *Mecánica de Materiales*. México: Cengage Learning Editores.

- Ginwalla, B. (2004, Febrero 4). *UPV*. Retrieved from https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm12/pfcm12_4_3.html
- Goenaga, J., Mejía, M., Rojas, D., Viaña, K., & Niebles, E. (2007). Recubrimientos duros: Alternativa de recuperación en piezas afectadas por el desgaste. *Prospectiva*, 69-77.
- Grundfos. (2020, Enero 12). *GRUNDFOS MÉXICO*. Retrieved from <https://mx.grundfos.com/service-support/encyclopedia-search/intergranular-corrosion.html>
- Gunn, R. (1997). *Duplex Stailess Steels: Microstructure, properties and applications*. ABINGTON PUBLISHING.
- Heredia, P. (2018, Diciembre 14). *Área Tecnología*. Retrieved from https://www.areatecnologia.com/materiales/galvanotecnia.html?fbclid=IwAR1W9PYOUcvkYtNb13xkCpU0c_2y1ofkYO7I01gbXhPfF83BYIFnMyvll4
- Hurtado, D. (2011, Junio 11). *Wikimedia*. Retrieved from commons.wikimedia.org
- Ibarra , M., Nuñez, E., & Huerta, J. (2010). Manual: Aceros inoxidable. *Indura*, 14-21.
- Juraga, I., Stojanovic, I., & Ljubenkov, B. (2014). Experimental research of the duplex stainless steel welds in shipbuilding. *BRODOGRANDNJA/SHIPBUILDING*, 73-85.
- Lippold, J., & Kotecki, D. (2005). *WELDING METALLURGY AND WELDABILITY OF STAINLESS STEELS*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Luddey, J., & Trujillo, G. (2007). Recuperación de piezas desgastadas con recubrimientos protectores. *Scientia et Technica*, 199-204.
- Maidana, A. (2016). *DOCPLAYER*. Retrieved from docplayer.es
- Manzanares, R. (2011, Junio). *PUCP*. Retrieved from tesis.pucp.edu.pe
- Matsumoto, E. (1999, Diciembre). *Revista del instituto de investigación*. Retrieved from http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/geologia/v02_n4/recubrimientos_pindustriales.htm
- Mendez, C. (2013). *CORROSIÓN DE ACEROS INOXIDABLES MARTENSÍTICOS CrNiMo DE BAJO CONTENIDO DE CARBONO DE USO EN LAS INDUSTRIAS DE GAS Y PETRÓLEO*. La Plata: Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata.

- Méndez, P. (2015). *Recubrimientos duros para protección al desgaste en petróleo y minería*. Alberta: Canadian Centre For Welding And Joining.
- Najera, J. (2015). Estructura y propiedades de las aleaciones. *UNLP*, 1-23.
- Ortiz , E., Díaz, I., & Cataforesis, M. A. (2013, Agosto 13). *PREZI*. Retrieved from <https://prezi.com/qw4bqqagl1rg/recubrimientos-metalicos/>
- Ortiz Gallardo, G. (2014, Junio 29). *SlideShare*. Retrieved from <https://es.slideshare.net/gabrielortiz5661/informe-ensayo-no-destructivos1listo1>
- Porta, C., Ignoto, V., Cerpa, S., León, J., & Quintero, A. (2003). Soldadura de un acero inoxidable dúplex 2205 por GMAW mediante el uso de la técnica de arco pulsado. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 21-26.
- RAUMER. (2013). *LOS ACEROS INOXIDABLES Y LA CORROSIÓN*. Schio: raumersrl.
- READKONG. (2019). Retrieved from <https://es.readkong.com/>
- Rodríguez, I., & Correa, R. (2014, Agosto). *ResearchGate*. Retrieved from https://www.researchgate.net/figure/Comportamiento-del-deposito-del-electrodo-E-312-16-El-punto-1-corresponde-a-la_fig12_278027916
- Romero, S. (2019). *FERREPRO*. Retrieved from <http://ferrepro.mx/>
- Sáez, L., Castillo, J., & Márquez, J. (2017). Suceptibilidad a la corrosión del acero inoxidable dúplex 2205 expuesto a inmersión. *Redalyc UAEM*, 59-72.
- Schnarr, H. (2019, Diciembre 23). *Stuers Ensuring Certainty*. Retrieved from <https://www.struers.com/es-ES/Knowledge/Materials/Stainless-Steel#main>
- SectorElectricidad. (2019). Retrieved from <http://www.sectorelectricidad.com/sobre-nosotros/>
- Sierra, E. (2017, Septiembre 19). *SLIDESHARE*. Retrieved from <https://es.slideshare.net/edusierra1994/recubrimiento-metalicos>
- Sintoplast: Pinturas Industriales*. (2011). Retrieved from <http://sintoplastindustria.com/es>
- SlideShare*. (2019). Retrieved from <https://www.slideshare.net/>
- STARGAS. (2019). Retrieved from <http://www.stargas.com.ve/>
- SUAU pinturas y barnices*. (2014). Retrieved from <http://pinturassuau.com/>
- Tecnología*. (2019, Noviembre). Retrieved from <https://www.areatecnologia.com/>

- Tecnología y Sistemas Roda, SAL.* (2019). Retrieved from <http://www.tecnologiaysistemas.es/>
- Termans, J. (2019, Diciembre 8). *CLORUROS.* Retrieved from <https://www.clorurosodio.com/cloruro-ferrico/>
- TOOLSTORE.* (2019). Retrieved from <https://toolstore.com.co/>
- Tornillos y Tuercas Tepeyac.* (2017). Retrieved from <http://tornillosytuercas.mx/>
- Tovar Gómez, C. A. (2005). *ESTUDIO DEL EFECTO DE LA CORROSIÓN EN EL PROCESO DE SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES MEDIANTE LAS TÉCNICAS SMAW, GMAW Y GTAW.* Santiago de Cali: UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE.
- Universidad Tecnológica de Pereira.* (2011, Julio). Retrieved from <http://blog.utp.edu.co/>
- Valencia Rodríguez, C. A. (2016). *EFECTO DEL AMPERAJE EN LA MICROESTRUCTURA DE LAS UNIONES SOLDADAS CON EL PROCESO GMAW EN ESPESORES DE 1/4 IN 3/8 IN Y 1/2 IN DE ACERO A-36.* Bogotá: Universidad Francisco José de Caldas.
- Vázquez, M. V. (2015, Junio 19). *Aprende en línea.* Retrieved from <http://aprendeonline.udea.edu.co/lms/ocw/mod/page/view.php?id=270>
- Villate, J. (1976). CONSIDERACIONES METALURGICAS SOBRE EL EFECTO DE LA FERRITA DELTA EN LA SOLDADURA DE ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS. *DYNA Ingenieria e Industria*, 41-45.
- Zappa, S., Zalazar, M., & Surian, E. (2017). Efecto de la Composición Química del Metal de Aporte y del Calor Aportado Sobre la Microestructura y las Propiedades Mecánicas de Juntas Soldadas de Aceros Inoxidables Dúplex. *Soldagem & inspeção*, 116-128.

ANEXOS

ANEXO I

PROPIEDADES DEL ACERO DÚPLEX 2205 SEGÚN NORMA ASTM A182/A182M

TABLE 1 Continued

Grade	Heat Treat Type	Austenitizing/Solutioning Temperature, Minimum or Range, °F [°C] ^A	Cooling Media	Quenching Cool Below °F [°C]	Tempering Temperature, Minimum or Range, °F [°C]
F 317L	solution treat and quench	1900 [1040]	liquid ^E	500 [260]	B
F 72	solution treat and quench	1975-2155 [1080-1180]	liquid ^E	500 [260]	B
F 73	solution treat and quench	1975-2155 [1080-1180]	liquid ^E	500 [260]	B
F 347	solution treat and quench	1900 [1040]	liquid ^E	500 [260]	B
F 347H	solution treat and quench	2000 [1095]	liquid ^E	500 [260]	B
F 347LN	solution treat and quench	1900 [1040]	liquid ^E	500 [260]	B
F 348	solution treat and quench	1900 [1040]	liquid ^E	500 [260]	B
F 348H	solution treat and quench	2000 [1095]	liquid ^E	500 [260]	B
F 321	solution treat and quench	1900 [1040]	liquid ^E	500 [260]	B
F 321H	solution treat and quench	2000 [1095]	liquid ^E	500 [260]	B
F XM-11	solution treat and quench	1900 [1040]	liquid ^E	500 [260]	B
F XM-19	solution treat and quench	1900 [1040]	liquid ^E	500 [260]	B
F 20	solution treat and quench	1700-1850 [925-1010]	liquid ^E	500 [260]	B
F 44	solution treat and quench	2100 [1150]	liquid ^E	500 [260]	B
F 45	solution treat and quench	1900 [1040]	liquid ^E	500 [260]	B
F 46	solution treat and quench	2010-2140 [1100-1140]	liquid ^E	500 [260]	B
F 47	solution treat and quench	1900 [1040]	liquid ^E	500 [260]	B
F 48	solution treat and quench	1900 [1040]	liquid ^E	500 [260]	B
F 49	solution treat and quench	2050 [1120]	liquid ^E	500 [260]	B
F 56	solution treat and quench	2050-2160 [1120-1180]	liquid ^E	500 [260]	B
F 58	solution treat and quench	2085 [1140]	liquid ^E	500 [260]	B
F 62	solution treat and quench	2025 [1105]	liquid ^E	500 [260]	B
F 63	solution treat and quench	1900 [1040]	liquid ^E	500 [260]	B
F 64	solution treat and quench	2010-2140 [1100-1170]	liquid ^E	500 [260]	B
F 904L	solution treat and quench	1920-2100 [1050-1150]	liquid ^E	500 [260]	B
F 70	solution treat and quench	1900 [1040]	liquid ^D	500 [260]	B
Ferritic-Austenitic Stainless Steels					
F 50	solution treat and quench	1925 [1050]	liquid	500 [260]	B
F 51	solution treat and quench	1870 [1020]	liquid	500 [260]	B
F 52 ^C			liquid	500 [260]	B
F 53	solution treat and quench	1880 [1025]	liquid	500 [260]	B
F 54	solution treat and quench	1920-2060 [1050-1125]	liquid	500 [260]	B
F 55	solution treat and quench	2010-2085 [1100-1140]	liquid	500 [260]	B
F 57	solution treat and quench	1940 [1060]	liquid	1.75 [80]	B
F 59	solution treat and quench	1975-2050 [1080-1120]	liquid	500 [260]	B
F 60	solution treat and quench	1870 [1020]	liquid	500 [260]	B
F 61	solution treat and quench	1920-2060 [1050-1125]	liquid	500 [260]	B

TABLE 2 Continued

Grade/Identification Symbol	UNS Designation	Composition, %										
		Carbon	Manganese	Phosphorus	Sulfur	Silicon	Nickel	Chromium	Molybdenum	Columbium	Titanium	Other Elements
F 20	N08020	.07	2.00	0.045	0.035	1.00	32.0-38.0	19.0-21.0	2.00-3.00	...	...	Cu 3.0-4.0
F 44	S31254	0.020	1.00	0.030	0.010	0.80	17.5-18.5	19.5-20.5	6.0-6.5	...	...	Cu 0.50-1.00 N 0.18-0.25
F 45	S30815	0.05-0.10	0.80	0.040	0.030	1.40-2.00	10.0-12.0	20.0-22.0	...	...	...	N 0.14-0.20 Ce 0.03-0.08
F 46	S30900	0.018	2.00	0.020	0.020	3.7-4.3	14.0-15.5	17.0-18.5	0.20	...	...	Cu 0.50
F 47	S31725	0.030	2.00	0.045	0.030	0.75	13.0-17.5	18.0-20.0	4.0-5.0	...	...	N 0.10
F 48	S31725	0.030	2.00	0.045	0.030	0.75	13.5-17.5	17.0-20.0	4.0-5.0	...	...	N 0.10-0.20
F 49	S34565	0.030	5.0-7.0	0.030	0.010	1.00	16.0-18.0	23.0-25.0	4.0-5.0	0.10	...	N 0.40-0.60
F 56	S33228	0.04-0.08	1.00	0.020	0.015	0.30	31.0-33.0	26.0-28.0	...	0.6-1.0	...	Ce 0.05-0.10 Al 0.025
F 58	S31266	0.030	2.0-4.0	0.035	0.020	1.00	21.0-24.0	23.0-25.0	5.2-6.2	...	...	N 0.35-0.60 Cu 1.00-2.50 W 1.50-2.50
F 62	N08967	0.030	2.00	0.040	0.030	1.00	23.5-25.5	20.0-22.0	6.0-7.0	...	...	N 0.18-0.25 Cu 0.75
F 63	S32615	0.07	2.00	0.045	0.030	4.8-6.0	19.0-22.0	16.5-19.5	0.30-1.50	...	...	Cu 1.50-2.50
F 64	S30601	0.015	0.50-0.80	0.030	0.013	5.0-5.6	17.0-18.0	17.0-18.0	0.20	...	...	Cu 0.35, N 0.05
F 904L	N08904	0.020	2.0	0.040	0.030	1.00	23.0-28.0	19.0-23.0	4.0-5.0	...	...	Cu 1.00-2.00 N 0.10
Ferritic-Austenitic Stainless Steels												
F 50	S31200	0.030	2.00	0.045	0.030	1.00	5.5-6.5	24.0-26.0	1.20-2.00	...	...	N 0.14-0.20
F 51	S31803	0.030	2.00	0.030	0.020	1.00	4.5-6.5	21.0-23.0	2.5-3.5	...	...	N 0.08-0.20
F 69	S32101	0.040	4.00-6.00	0.040	0.030	1.00	1.35-1.70	21.0-22.0	0.10-0.80	...	...	N 0.20-0.25 Cu 0.10-0.80

TABLE 3 Continued

Grade Symbol	Tensile Strength, min, ksi [MPa]	Yield Strength, min, ksi [MPa] ^a	Elongation in 2 in. [50 mm] or 4D, min, %	Reduction of Area, min, %	Brinell Hardness Number, HBW, unless otherwise indicated
F 47	75 [525]	30 [205]	40	50	...
F 48	80 [550]	35 [240]	40	50	...
F 49	115 [795]	60 [415]	35	40	...
F 56	73 [500]	27 [185]	30	35	...
F 58	109 [750]	61 [420]	35	50	...
F 62	95 [655]	45 [310]	30	50	...
F 63	80 [550]	32 [220]	25	...	192 max
F 64	90 [620]	40 [275]	35	50	217 max
F 70	70 [480]	25 [175]	35	...	HRB 90 max
F 904L	71 [490]	31 [215]	35	...	...
Ferritic-Austenitic Stainless Steels					
F 50	100-130 [690-900]	65 [450]	25	50	...
F 51	90 [620]	65 [450]	25	45	...
F 52	100 [690]	70 [485]	15	...	...
F 53 ≤ 2 in. [50 mm] ^d	116 [800]	80 [550]	15	...	310 max
F 53 > 2 in. [50 mm] ^d	106 [730]	75 [515]	15	...	310 max
F 54	116 [800]	80 [550]	15	30	310 max
F 55	100-130 [750-895]	80 [550]	25	45	...
F 57	118 [820]	85 [585]	25	50	...
F 59	112 [770]	80 [550]	25	40	...
F 60	95 [655]	65 [450]	25	45	...
F 61	109 [750]	80 [550]	25	50	...

ANEXO II

INFORME TÉCNICO DE COMPOSICIÓN QUÍMICA MEDIANTE ESPECTROMETRÍA POR CHISPA



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

DEPARTAMENTO DE MATERIALES

LABORATORIO DE FUNDICIÓN

INFORME TÉCNICO

Solicitado por: Ing. Carlos Wime Díaz Msc

Tipo de Trabajo: Espectrometría por chispa

Fecha: 11 de febrero del 2020

Realizado por: Ing. Oscar Sotomayor/Ing. Luis G. Huilca

Descripción: Muestra de material metálico


1. ANTECEDENTES.

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

Se solicita realizar la prueba de espectrometría con la finalidad de determinar los componentes presentes en la muestra entregada.

2. IDENTIFICACIÓN DE LA PROBETA.

La probeta para el análisis correspondiente es identificada como se muestra a continuación:

Nombre	Identificación de la probeta	Identificación Gráfica
MUESTRA METÁLICA	Sample M1	



3. ANTECEDENTES TÉCNICOS

3.1. Limpieza Superficial: Según norma ASTM E415 – 17 Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry

3.2. Método: Fe 130 Cr/Ni Steel

4. VALORES OBTENIDOS

El análisis de espectrometría por chispa se realiza empleando el espectrómetro marca BRUKER modelo Q2 ION. Para el análisis se tomaron 2 mediciones en distintos puntos del espécimen y finalmente se promedió su valor.

		Muestra M1
Elemento		Valor [%]
Carbono	[C]	0,032
Silicio	[Si]	0,554
Manganeso	[Mn]	1,163
Fósforo	[P]	0,022
Cromo	[Cr]	17,79
Molibdeno	[Mo]	3,178
Níquel	[Ni]	6,718
Cobre	[Cu]	0,134
Cobalto	[Co]	0,174
Vanadio	[V]	0,057
Hierro	[Fe]	70,17
Total		99,99



Ing. Luis G. Huilca

Técnico Responsable



LABORATORIO DE FUNDICIÓN

Ing. Oscar Sotomayor

Jefe del Laboratorio de Fundición.



Con la finalidad de mejorar nuestros servicios, solicitamos de la manera más comedida se llene la encuesta mediante la captura del código QR adjunto, agradecemos su colaboración.

Bruker Analysis Report



Sample: M1

Analysis Time: 11.02.2020 09:46:15

Method: Fe130

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]
∅	0,032	0,554	1,163	0,022	<0,0030
	Cr [%]	Mo [%]	Ni [%]	Cu [%]	Al [%]
∅	17,79	3,178	6,718	0,134	<0,0020
	Co [%]	Nb [%]	Ti [%]	V [%]	Fe [%]
∅	0,174	<0,0100	0,0077	0,057	70,17



ANEXO III

INFORME DEL ENSAYO DE DOBLADO



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
MECÁNICA



LABORATORIO DE ANÁLISIS
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

F01-PE-LAEV-01 Rev.00

INFORME

LAEV – M19.143

Quito, 15 de noviembre de 2019

Solicitado por: Msc. Carlos Díaz
Persona de contacto: Johanna Sánchez, Gissela Ortiz
Teléfono: 0984325519
Correo: gissela.ortiz@epn.edu.ec
Fecha de recepción: 15/11/2019
Fecha de ejecución: 15/11/2019

ORDEN DE TRABAJO N°: N/A

- 1. MUESTRAS:** Ocho (8) probetas metálicas para ensayo de doblado.
- 2. GENERALIDADES E IDENTIFICACIÓN:**

La siguiente descripción fue proporcionada por el cliente:

Título de la tesis: CARACTERIZACION DEL RECUBRIMIENTO CON ELECTRODO B-83 SOBRE ACERO DUPLEX 2205.

En la tabla 1 se muestra la identificación de las muestras a ser ensayadas:

Tabla 1. Identificación de las muestras.

Id. cliente	Id. del LAEV
B83-1 (transversal)	M19.143.01
B83-2 (transversal)	M19.143.02
B83-3 (longitudinal)	M19.143.03
B83-4 (longitudinal)	M19.143.04
R91-1 (transversal)	M19.143.05
R91-2 (transversal)	M19.143.06
R91-3 (longitudinal)	M19.143.07
R91-4 (longitudinal)	M19.143.08

3. CONDICIONES AMBIENTALES:

Temperatura: $16,2 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$

Humedad relativa: $72,2 \pm 0,2\%$



Dirección: Av. Mena Caamaño e Isabel la Católica Esquina (Escuela Politécnica Nacional)
Teléfono: 022976300 ext. 3715, 3716

Página 1 de 3

4. ENSAYO DE DOBLADO



En la tabla 2 se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de doblado.

Tabla 2. Resultados del ensayo de doblado.

Identificación	Observaciones
M19.143.01	Falla en el cordón de soldadura
M19.143.02	Falla en el cordón de soldadura
M19.143.03	Falla en el cordón de soldadura
M19.143.04	Falla en el cordón de soldadura
M19.143.05	Falla en el cordón de soldadura
M19.143.06	Falla en el cordón de soldadura
M19.143.07	Falla en el cordón de soldadura
M19.143.08	Falla en el cordón de soldadura

En el anexo se presenta las fotografías de los ensayos.

Nota.- Los resultados contenidos en el presente informe corresponden únicamente a las muestras ensayadas por el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV).

	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Firma:		
Nombre:	Ing. Jonathan Castro, M.Sc.	Ph.D. Wilson Guachamin
Cargo:	ESPECIALISTA DE LABORATORIO	JEFE
LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES		



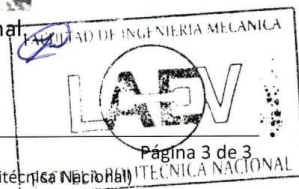
ANEXOS



Fotografía 1. Ensayo de doblado transversal.



Fotografía 2. Ensayo de doblado longitudinal.



Dirección: Av. Mena Caamaño e Isabel la Católica Esquina (Escuela Politécnica Nacional)
Teléfono: 022976300 ext. 3715, 3716

ANEXO IV

INFORME TÉCNICO DEL ENSAYO DE TINTAS PENETRANTES

REPORTE DE INSPECCIÓN POR LIQUIDOS PENETRANTES

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
LABORATORIO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS
DEPARTAMENTO DE MATERIALES

DATOS GENERALES

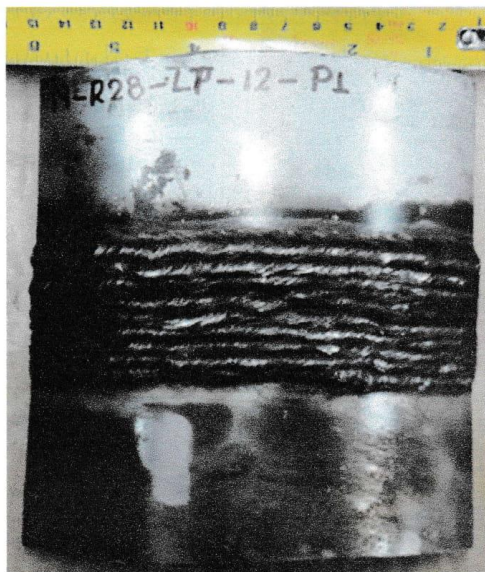
Cliente: Johana Sánchez, Ortiz, estudiantes de titulación	Reporte N°: LABEND-EPN-2019-R28-LP-12
Fecha: 02/08/2019	Lugar: Quito-Ecuador

IDENTIFICACIÓN DE LA PIEZA

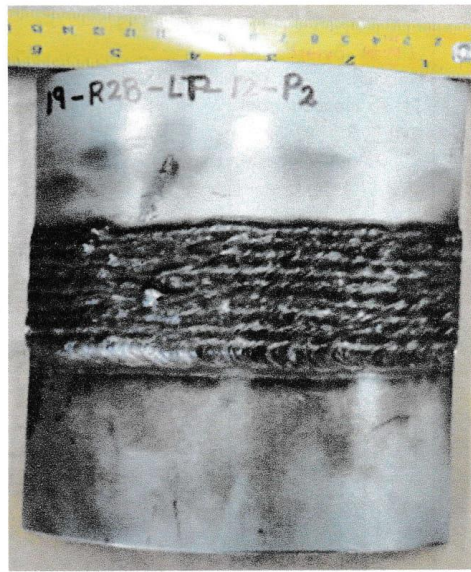
Descripción: 2019-R28-LP-12-001: de acero soldada de L: 150 mm, A: 154 mm 2019-R28-LP-12-002: de acero soldada de L: 400 mm, A:154 mm.	Identificación: 2019-R28-LP-12-001 2019-R28-LP-12-002
Material: Acero HSLA	Estado Superficial: Rugosidad Normal del Material

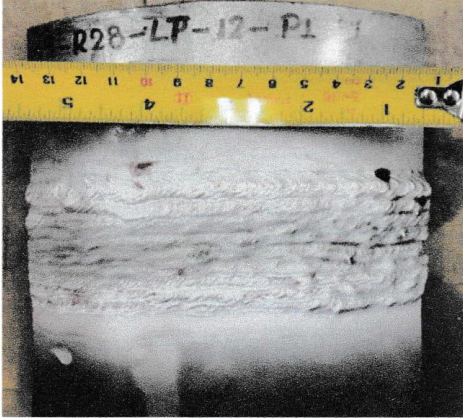
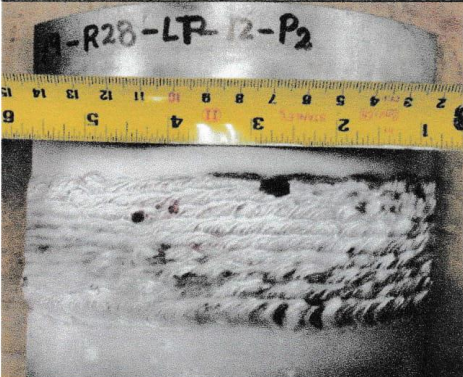
ESQUEMA DE LA PIEZA

2019-R24-LP-10-001



2019-R24-LP-10-002



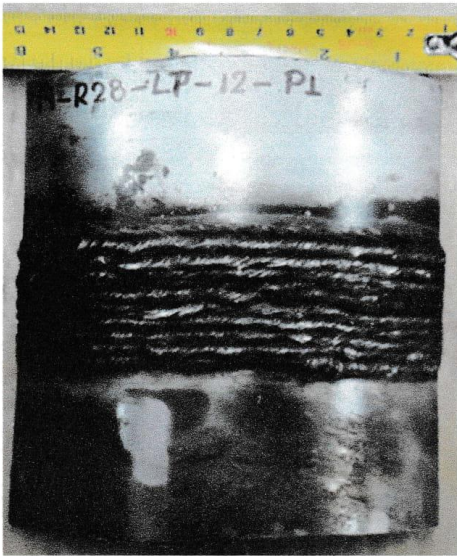
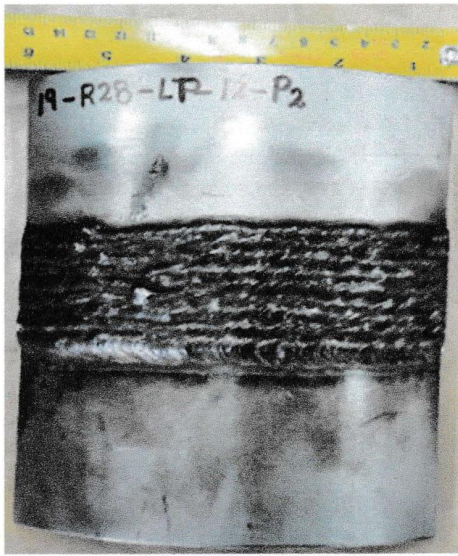
MATERIALES Y EQUIPOS		
Líquidos:		
Limpiador / removedor: Met-L-check E-59A		Emulsificador: N/A
Penetrante Met-L-check VP-30		Revelador Met-L-check D-70
Accesorios: N/A		
CONDICIONES DE TRABAJO		
Procedimiento: Basado en ASTM E 165, Tipo II método A		Limpieza: Con Agua
Tiempos:		
Penetrante: 12 minutos	Emulsificador: N/A	Revelador: 5 minutos
Luz de observación: Visible (sobre los 1000 lux).		Tiempo:
Normas de Aceptación / Rechazo: NA		
RESULTADOS		
IDENTIFICACIÓN	IMAGEN	OBSERVACIONES
2019-R28-LP-12-P1		Se observó en P1, dos manchas redondeadas, de 11 mm y 9 mm respectivamente.
2019-R28-LP-12-P2		Se observó 2 manchas, una mancha alargada de 12mm y una redondeada de 4 mm de diámetro, en P2

OPERADOR: Santiago Camacho	
Laboratorio de Ensayos No Destructivos LAB-END	Ciente
Firma:  Ing. Santiago Camacho ASISTENTE DE ENSAYOS LAB-END ASNT NIVEL II EN LÍQUIDOS PENETRANTES	Firma: Nombre: Johana Sánchez Cargo: Estudiante titulación FIM Contacto: 0991500935 Correo: sanchez@epn.edu.ec
Firma:  Ing. Verónica Sotomayor JEFE LAB-END ASNT NIVEL II EN LÍQUIDOS PENETRANTES	Firma: Nombre: Ortiz Cargo: Estudiante titulación FIM Contacto: Correo: ortiz @epn.edu.ec
Fecha: 25/09/2019	Fecha: 25/09/2019



ANEXO V

INFORME TÉCNICO DEL ENSAYO DE RADIOGRAFÍA



REPORTE DE INSPECCION RADIOGRÁFICA ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL LABORATORIO DE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS DEPARTAMENTO DE MATERIALES		
Información General		
Cliente: Johana Sanchez, Ortiz Gissela, Estudiantes titulación	Reporte N°: LAB-END-EPN-2019-R27-RX13	
Fecha de inspección: 02 de agosto de 2019	Lugar: Quito – EPN	
Identificación de la Pieza		
Descripción: 2019-R27-RX-13-P1: de acero soldada de L: 150 mm y A: 154 mm 2019-R27-RX-13-P2: de acero soldada de L: 150 mm y A: 154 mm	Identificación: 2019-R27-RX-13-P1-A 2019-R27-RX-13-P1-B 2019-R27-RX-13-P2-A 2019-R27-RX-13-P2-B	
Material: Acero Dúplex 2205 con recubrimiento B-83 y recubrimiento B83+R19.	Estado Superficial: Rugosidad Normal del Material	
Componente(s) a Inspeccionar		
2019-R17-RX-10-P1	2019-R17-RX-10-P1	
		
Equipos y Materiales		
Equipo de RX		
Marca: Baltographe	Modelo: BF 200/10	kV: 200 kV
		mA: 10 mA
Película		
Marca: Structurix	Tipo: II – D7	
Condiciones de Trabajo		
Normas de Referencia:		
Pieza: 2019-R17-RX-10-P1		
Tomas: 1	Kv: 160 kV	mA: 5 mA
Tiempo de Exp: 3 min s	Distancia a la Fuente: 54 cm	Técnica Utilizada: Simple Pared Simple Imagen
Observaciones: IQJ Tipo 1B		

Pieza: 2019-R17-RX-10-P2		
Tomas: 1	Kv: 140 kV	mA: 5 mA
Tiempo de Exp: 3 min 18 s	Distancia a la Fuente: 54 cm	Técnica Utilizada: Simple Pared Simple Imagen
Observaciones: IQI Tipo 1B		

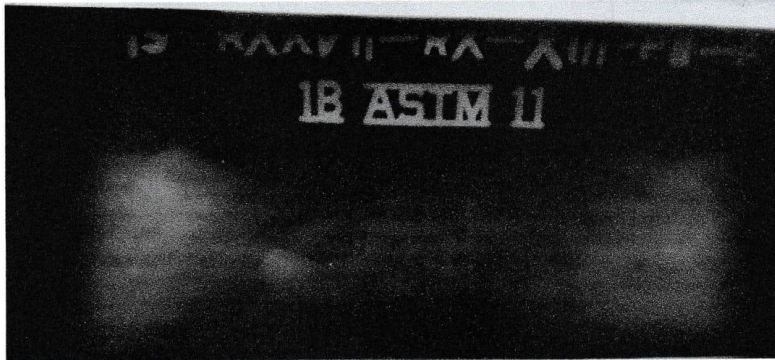
Procesamiento de Película

Temp. Ambiente: 20 °C	T. Revelado: 3 min	T. Parada: 1 min	T. Fijado: 6 min
Baño de Parada: 1 min	T. Lavado Final: NA	T. Lav. Deshumectante: NA	T. de Secado: 30 min

Imágenes Radiográficas

<p>TOMA 1 2019-R27-RX-13- P1-A</p>	
<p>TOMA 1 2019-R27-RX-13- P1-B</p>	

TOMA 1
2019-R27-RX-13-
P2-A




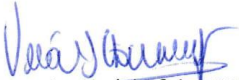
TOMA 1
2019-R27-RX-13-
P2-b



Discontinuidades	Identificación de Discontinuidades							
	TOMA 1 2019-R27-RX-13-P1-A		TOMA 1 2019-R27-RX-13-P1-B		TOMA 1 2019-R27-RX-13-P2-A		TOMA 1 2019-R27-RX-13-P2-B	
	X (mm)	Dim. (mm)	X (mm)	Dim. (mm)	X (mm)	Dim. (mm)	X (mm)	Dim. (mm)
Falta de Penetración	---	---	---	---	---	---	---	---
Fusión Incompleta	---	---	---	---	---	---	---	---
Penetración excesiva	---	---	---	---	---	---	---	---
Inclusiones de Escoria	---	---	---	---	---	---	---	---
Porosidad	---	---	---	---	40.8 87.06 39.46 59.54 77.77 80.1 81.59 84.72 99.82 68.8	0.83 1.26 0.7 0.83 0.69 0.82 0.98 0.77 0.9 0.78	98.5 56.56 64 70.66 80.72 54.22 99.4	1 0.94 0.4 0.81 0.94 1.2 1.35

Nido de poros	---	---	---	---	---	---	---	---
Grietas	---	---	---	---	---	---	---	---
Mordeduras	---	---	32	12	---	---	---	---
Escoria Alargada	---	---	---	---	---	---	---	---
Quemón	---	---	---	---	---	---	---	---
Concavidad interna	---	---	---	---	---	---	---	---


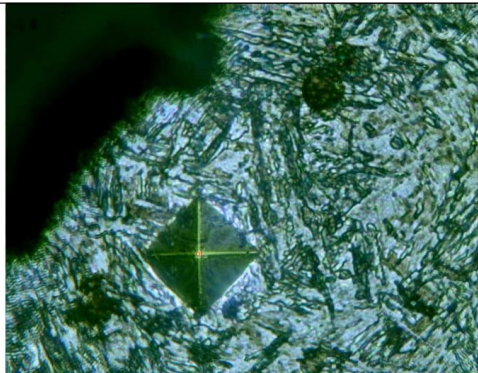

Observaciones: Distancia medida desde el extremo izquierdo de la película.

Laboratorio de E.N.D	Cliente
Firma:  Elaborado por: Ing. Santiago Camacho ASNT Nivel II en Radiografía Limitada a la interpretación Asistente de Ensayos LAB-END Firma:  Revisado por: Ing. Verónica Sotomayor, Jefe de Laboratorio de Ensayos No Destructivos Fecha: 27/09/2019	Firma: Nombre: Sanchez Johana Cargo: Estudiante titulación FIM Correo: johana.sanchez@epn.edu.ec Firma: Nombre: Ortiz Gissela Cargo: Estudiante titulación FIM Correo: gissela.ortiz@epn.edu.ec Fecha: 27/09/2019



CONFIGURACIÓN B-83


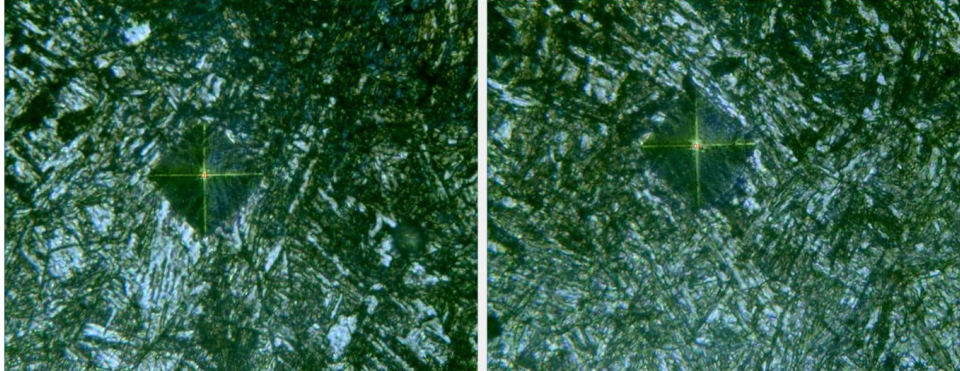
Material de Aporte

		Micro Hardness Analysis Report				
Sample		Date	15/11/2019			
Material		Load	300			
Reported by		Eht	1			
Label	HRC	HV	D1	D2	Mean Diagonal	Depth
O1	47	463,94	34,98	34,26	34,62	
O2	46	452,98	35,39	34,69	35,04	
Mean	46,50	458,46	35,19	34,47	34,83	0,00
Signed by:			Unit	μm		
 						

RECUBRIMIENTO EXPUESTO A 72 HORAS DE CORROSIÓN


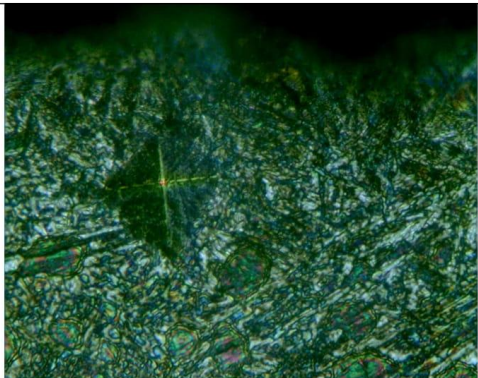
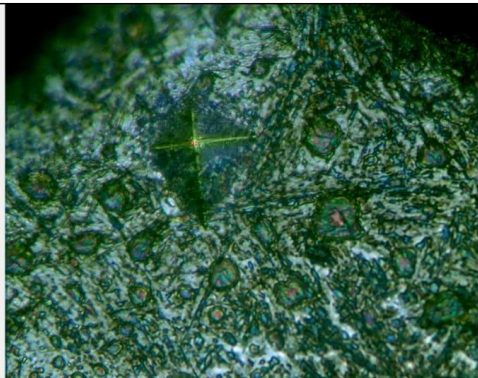
CONFIGURACIÓN B-83

Material de Aporte

		Micro Hardness Analysis Report				
Sample		Date	15/11/2019			
Material		Load	300			
Reported by		Eht	1			
Label	HRC	HV	D1	D2	Mean Diagonal	Depth
O1	46	454,08	35,31	34,69	35,00	
O2	43	421,94	37,92	34,69	36,31	
Mean	44,50	438,01	36,62	34,69	35,66	0,00
Signed by:			Unit	µm		
						

CONFIGURACIÓN R-91+B-83

Material de aporte uno

		Micro Hardness Analysis Report				
Sample		Date	15/11/2019			
Material		Load	300			
Reported by		Eht	1			
Label	HRC	HV	D1	D2	Mean Diagonal	Depth
O1	42	404,70	38,76	35,38	37,07	
O2	46	452,24	37,78	32,36	35,07	
Mean	44,00	428,47	38,27	33,87	36,07	0,00
Signed by:			Unit	µm		
 						

ANEXO VII

COSTOS DE PRODUCCIÓN

Para obtener los costos de producción, se procede a calcular por separado los diferentes costos que se detallan a continuación con sus respectivas ecuaciones:

Costos indirectos (limpieza y preparación). - se suman los valores de todos los insumos que se ocupó para limpieza y preparación de la superficie del acero dúplex 2205.

$$CI = Thinner + Detergente + Jabón líquido + alcohol industrial$$

Ecuación 1. Cálculo costo indirectos.

(Fuente: Propia)

Costo realización de ranura. - valor total de la realización del torneado.

$$CRR = Valor total de torneado$$

Ecuación 2. Cálculo costo realización de ranura.

(Fuente: Propia)

Costo energía

$$CE = \frac{Voltaje * Corriente * tiempo * valor de la energía}{1000}$$

Ecuación 3. Cálculo costo energía.

(Fuente: Propia)

Costo mano de obra

$$CMO = Valor mano de obra * horas trabajadas$$

Ecuación 4. Cálculo costo realización de ranura.

(Fuente: Propia)

Costo soldadura

$$CS = Valor de la soldadura * horas trabajadas$$

Ecuación 5. Cálculo costo soldadura.

(Fuente: Propia)

Costo materia prima

$$CMP = Valor total de los kilogramos de electrodo$$

Ecuación 6. Cálculo costo materia prima.

(Fuente: Propia)

En la Tabla 1, se observan los diferentes costos calculados con las ecuaciones 1, 2, 3, 4, 5 y 6; para realizar la aplicación del electrodo R-91; dando un total de costo de aplicación de \$ 136.62.

Tabla 1 Costos de aplicación del R-91.

COSTO	DETALLE	VALOR	UNIDADES	TOTAL	UNIDADES
INDIRECTO (LIMPIEZA Y PREPARACIÓN)	Thinner	3.50	[USD]	9.75	[USD]
	Detergente	1.00	[USD]		
	Jabón líquido	1.25	[USD]		
	Alcohol industrial	4.00	[USD]		
REALIZACIÓN DE RANURA	Torneado	75.00	[USD]	75.00	[USD]
ENERGIA	Voltaje	60	[V]	1.62	[Kwh]
	Corriente	100	[A]		
	Tiempo	1	[hora]		
	Valor de la energía	0.27	[USD]		
MANO DE OBRA	Valor mano de obra	13.00	[USD]	13.00	[USD]
	Horas trabajadas	1	[hora]		
SOLDADURA	Valor de la soldadura	3.25	[USD]	3.25	[USD]
	Horas trabajadas	1	[hora]		
MATERIA PRIMA	Electrodo AGA R-91 (1kg)	34.00	[USD]	34.00	[USD]
TOTAL COSTOS DE APLICACIÓN DEL R-91				136.62	[USD]

(Fuente: Propia)

En la Tabla 2, se observan los diferentes costos calculados con las ecuaciones 1, 3, 4, 5 y 6; para realizar la aplicación del electrodo B-83; dando un total de costo de aplicación de \$ 71.99.

Tabla 2 Costos de aplicación del B-83.

COSTO	DETALLE	VALOR	UNIDADES	TOTAL	UNIDADES
ENERGIA	Voltaje	21	[V]	1.49	[Kwh]
	Corriente	131	[A]		
	Tiempo	2	[hora]		
	Valor de la energía	0.27	[USD]		
MANO DE OBRA	Valor mano de obra	13.00	[USD]	26.00	[USD]
	Horas trabajadas	2	[hora]		
SOLDADURA	Valor de la soldadura	3.25	[USD]	6.50	[USD]
	Horas trabajadas	2	[hora]		
MATERIA PRIMA	Electrodo AGA B-83 (4Kg)	38.00	[USD]	38.00	[USD]
TOTAL COSTOS DE APLICACIÓN DEL B-83				71.99	[USD]

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3, se observan los costos para la configuración B-83 con un valor total de \$81.74 y la configuración R-91 + B-83 con un valor total de \$ 208.61.

Tabla 3 Costos totales de las dos configuraciones.

CONFIGURACIÓN	COSTO	VALOR	UNIDADES
R-91+B-83	Aplicación del R-91	136.62	[USD]
	Aplicación del B-83	71.99	[USD]
TOTAL CONFIGURACIÓN R-91 + B-83		208.61	[USD]
B-83	Indirecto (Limpieza y preparación)	9.75	[USD]
	Aplicación del B-83	71.99	[USD]
TOTAL CONFIGURACIÓN B-83		81.74	[USD]

(Fuente: Propia)