

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO
DE MORELOS**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E
INGENIERÍA**

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN
DE UN ACERO DUAL EN MEDIO ALCALINO**

TESIS PROFESIONAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**LICENCIATURA EN INGENIERÍA
INDUSTRIAL**

PRESENTA

**GISSELLE WENDOLYNE RENDÓN
ARANDA**

DIRECTORA: DRA. AMÉRICA MARÍA RAMÍREZ ARTEAGA

RESUMEN

En el presente trabajo se muestran los resultados de la evaluación de la resistencia a la corrosión de un acero de alta resistencia, conocido como acero dual, en cloruro de sodio (NaCl) a diferentes concentraciones: 0.5, 0.1, 0.05 y 0.1 M. En el caso de las temperaturas de trabajo se llevo a cabo una comparación inicial a 25 y 60° C, donde la resistencia a la corrosión se mostró con mejor comportamiento a 60° C; por tal motivo se decidió realizar el análisis a esta temperatura empleando técnicas electroquímicas tales como curvas de polarización, ruido electroquímico y espectroscopia de impedancia electroquímica.

Los resultados mostraron que a esta temperatura los valores más estables se presentaron en las concentraciones de 0.5 y 0.1 M. Observándose además que los valores de R_p y R_n presentan la misma tendencia.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mi asesora la Dra. América María Ramírez Arteaga por estar ahí orientándome cuando la investigación se hacía confusa, sin su paciencia y constancia no lo hubiera logrado.

Gracias a mi sinodales, la Mtra. Aranda Manjarrez Eghna, la Mtra. Galindo Flores Angelica, el Dr. López Sesenes Roy y la Ing. Karen Guadalupe Suarez Sánchez por compartir sus conocimientos de manera profesional e invaluable, por su dedicación, perseverancia y tolerancia.

Gracias a mi abuelo por ser el mejor ejemplo de vida que pude tener y por acompañarme en cada momento aun sin estar presente.

Gracias a mi abuelita por ser mi aliada incondicional y estar a mi lado siempre, brindándome palabras de aliento que me evitaron claudicar.

Gracias a toda mi familia por apoyarme en todo momento de manera incondicional, sobre todo a mi mamá y hermano.

Gracias a cada persona que me encontré a lo largo del camino, me dio ánimos y apoyo cuando no sentía que avanzaba.

INDICE

RESUMEN	2
AGRADECIMIENTOS.....	3
INDICE.....	4
INDICE DE FIGURAS	7
INDICE DE TABLAS	10
INTRODUCCIÓN.....	11
CAPITULO 1.....	13
MARCO TEÓRICO.....	13
1.1 METALES Y CORROSIÓN.....	13
1.1.1 METALES FERROSOS.....	13
1.1.2 METALES NO FERROSOS	13
1.1.3 CORROSIÓN.....	14
1.2 CLASIFICACIÓN DE LA CORROSIÓN	16
1.2.1. CORROSIÓN GALVÁNICA	17
1.2.2. POR EROSIÓN	18
1.2.3. POR AGRIETAMIENTO.....	19
1.2.4. POR PICADURA	20
1.2.5. POR EXFOLIACIÓN.....	21
1.2.6. DE ATAQUE SELECTIVO	21
1.2.7. CORROSIÓN INTERGRANULAR.....	22
1.2.8. CORROSIÓN BAJO TENSIÓN.....	23
1.3. ACEROS	23
1.4. ACEROS HSLA (HIGH-STRENGTH LOW-ALLOY).....	24
1.5. ACEROS DUALES	25
1.6. DIAGRAMA DE FASE Fe-C	26
1.6.1. AUSTENITA (γ)	27
1.6.2. FERRITA (α)	27
1.6.3. CEMENTITA (Fe_3C).....	28
1.6.4. PERLITA.....	29
1.6.5. MARTENSITA.....	30

1.6.6. BAINITA.....	31
1.7. ESTUDIOS PREVIOS EN LA CORROSIÓN EN ACEROS DUALES.....	31
1.7.1. INFLUENCIA MICROESTRUCTURAL EN EL COMPORTAMIENTO DE CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA DE ACEROS BIFÁSICOS EN SOLUCIÓN DE NaCl AL 3.5%.....	32
1.7.2. CORROSIÓN DE ACEROS FERRÍTICOS EN LOS LADOS DE AIRE DE LOS TUBOS DE CALDERAS EN UN AMBIENTE DUAL VAPOR/AIRE.	32
1.7.3. EFECTO DE DIVERSOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE DOS FASES SOBRE EL COMPORTAMIENTO A LA CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO UTILIZADO EN LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO....	33
1.7.4. CORRELACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA CORROSIÓN MICROGALVÁNICA CON LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN EL PROCESO DE CORROSIÓN INICIAL DEL ACERO DE DOBLE FASE.	34
1.7.5. ENTRADA DE HIDRÓGENO AL ACERO DURANTE CORROSIÓN ATMOSFÉRICA.....	35
1.8. HIPÓTESIS.....	35
1.9. OBJETIVO	35
CAPITULO 2.....	35
DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	35
2.1. MATERIAL	36
2.2. MEDIO ALCALINO	38
2.3. TEMPERATURAS EXPERIMENTALES	39
2.4. PREPARACIÓN DE PROBETAS	39
2.4.1. CORTE.....	39
2.4.2. ENCAPSULADO.....	39
2.4.3. DESBASTE	40
2.4.4. PULIDO.....	41
2.4.5. ATAQUE	41
2.5. ESTUDIO DE LA MICROESTRUCTURA	42
2.5.1. DUREZA	42
2.6. PREPARACIÓN DE ELECTRODOS DE TRABAJO.....	43
2.7. CELDA ELECTROQUÍMICA.....	44
2.8. TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS	46

2.8.1. CURVAS DE POLARIZACIÓN.....	46
2.8.2. RUIDO ELECTROQUÍMICO	47
2.8.3. ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA	47
2.9. OBTENCIÓN DE DATOS.....	48
CAPÍTULO 3.....	49
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	49
3.1. CARACTERIZACIÓN DEL ACERO DUAL	49
3.2. CURVAS DE POLARIZACIÓN	50
3.3. RUIDO ELECTROQUÍMICO.....	54
3.4. R_p y R_n	57
3.5. ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA	58
3.6. CIRCUITOS EQUIVALENTES	60
3.7. COMPARACIÓN DE VALORES EN LAS DIFERENTES SOLUCIONES DE TRABAJO	61
CAPITULO 4.....	63
4.1. CONCLUSIONES	63
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Corrosión Puente Tampico.	15
Figura 2. Proceso de Corrosión.	15
Figura 3. Corrosión en Tanques	16
Figura 4. Corrosión que Pone en Peligro al Trabajador	16
Figura 5. Corrosión uniforme.	17
Figura 6. Fotografía de corrosión uniforme de metal expuesto en la azotea de una casa.....	17
Figura 7. Corrosión galvánica sobre una placa de acero (ánodo) en contacto con tornillos y tuercas de acero inoxidable.	18
Figura 8. Mecanismo esquemático de corrosión-erosión.	19
Figura 9. Tubería con ondulaciones y huecos.....	19
Figura 10. Corrosión por agrietamiento.....	20
Figura 11. Tubería metálica que presenta corrosión-picadura.	21
Figura 12. Mecanismo de corrosión-picadura.	21
Figura 13. Corrosión por exfoliación.	21
Figura 14. Mecanismo de corrosión de ataque selectivo.....	22
Figura 15. Ataque de corrosión selectiva.	22
Figura 16. Corrosión intergranular en un metal.....	23
Figura 17. Detalles microfotográficos de corrosión intergranular.....	23
Figura 18. Corrosión bajo tensión.	23
Figura 19. Micrografía de un acero dual.....	26
Figura 20. Diagrama de fases hierro-carbono.....	26
Figura 21. Austenita.....	27
Figura 22. Ferrita	28
Figura 23. Cementita.	28
Figura 24. Perlita.	29
Figura 25. Cuatro fases.	30
Figura 26. Detalles microfotográficos de Martensita.	31
Figura 27. Detalles microfotográficos de Bainita.	31
Figura 28. Proceso de fabricación del acero dual.	37
Figura 29. Cortadora LECO VC-50.	38
Figura 30. Resina pp cristal y catalizador K-2000.	40

Figura 31. Probeta para microestructura	40
Figura 32. Pulidora LECO Spectrum System 1000.	41
Figura 33. Indentador utilizado para las pruebas de dureza Vickers.	43
Figura 34. Probeta terminada para pruebas electroquímicas.....	44
Figura 35. Multímetro marca Truper.....	44
Figura 36. Celda electroquímica para las pruebas a 25 °C. (1) Electrodo de referencia Ag/AgCl, (2) Electrodo de trabajo, (3) Electrodo auxiliar (grafito), (4) Potenciostato, (5) Computadora, (6) Matraz de tres bocas de 250 ml, (7) Soporte para matraz.	45
Figura 37 Celda electroquímica para las pruebas a 60 °C. (1) Electrodo de referencia Ag/AgCl, (2) Electrodo de trabajo, (3) Electrodo auxiliar (grafito), (4) Termómetro, (5) Potenciostato, (6) Matraz de tres bocas de 250 ml, (7) PC, (8) Parrilla de calentamiento.	46
Figura 38. Microestructura del acero dual a 4KX.	50
Figura 40. Curvas de polarización del acero dual en 0.5 M NaCl a 25 y 60 °C	51
Figura 41. Variación de la I_{corr} con respecto a la temperatura.	52
Figura 42. Curvas de polarización del acero dual en NaCl a 60 °C a diferentes concentraciones.....	53
Figura 43. Variación de la I_{corr} para el acero dual con respecto a diferentes concentraciones de NaCl a 60° C.	54
Figura 44. Serie de Tiempo en Corriente para el acero dual en 0.5 M NaCl a 25 °C. 55	
Figura 45. Serie de Tiempo en Potencial para el acero dual en 0.5 M NaCl a 25 °C. 55	
Figura 46. Serie de Tiempo en Corriente para el acero dual en 0.5 M NaCl a 60 °C. 55	
Figura 48. Serie de Tiempo en Corriente para el acero dual en 0.1 M NaCl a 60 °C. 56	
Figura 49. Serie de Tiempo en Potencial para el acero dual en 0.1 M NaCl a 60 °C. 56	
Figura 50. Serie de Tiempo en Corriente para el acero dual en 0.05 M NaCl a 60 °C.	56
Figura 51. Serie de Tiempo en Potencial para el acero dual en 0.05 M NaCl a 60 °C.	56
Figura 52. Serie de Tiempo en Corriente para el acero dual en 0.01 M NaCl a 60 °C 57	
Figura 53. Serie de Tiempo en Potencial para el acero dual en 0.01 M NaCl a 60 °C 57	
Figura 54. Valores de R_p y R_n del acero dual.....	58
Figura 55. Diagrama de Nyquist del acero dual en 0.5 M NaCl a 25 y 60 °C.	59
Figura 56. Diagrama de Nyquist del acero dual en NaCl a 60 °C.....	59
Figura 57. Diagrama de Nyquist del acero dual en 0.1 y 0.5 M NaCl a 60 °C.	60

Figura 58. Circuitos equivalentes..... 61

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química del acero.....	37
Tabla 2. Preparación de concentraciones de NaCl.	38

INTRODUCCIÓN

La edad de los metales fue hace 7000 A.C años cuando los humanos empezaron a crear herramientas de metal con la que se podía cazar y cultivar más fácil. Esta edad se divide en tres, donde la primera corresponde a la del cobre el cual fue el primer metal descubierto, no era muy resistente así que se usaba para hacer joyas y utensilios, también, se elaboraban armas rudimentarias con las que podían defenderse y atacar durante los enfrentamientos o cazas de animales. Con el cobre no se utilizaban técnicas de fundición sólo se golpeaba con piedras para moldearlo. La edad de bronce fue donde se descubrió el bronce, es un metal es duro, si es afilado podía cortar y se usaba para hacer armas de caza. Por último, la edad de hierro, este fue el último metal que se descubrió, el hierro tenía más dureza y durabilidad, con este metal se podían fabricar herramientas de trabajo como lo eran las armas, estructuras entre otras. Esta edad era la etapa más avanzada de la Prehistoria, para moldear los metales los calentaban a temperaturas muy altas en hornos especiales de esa época cuando ya estaba fundido el metal lo ponían en moldes o lo golpeaban para que tuvieran la forma que quisieran para crear herramientas y utensilios este proceso se creó en la edad de los metales¹. Cabe mencionar que estos últimos son abundantes en la naturaleza teniendo como los de más fácil acero al cobre y el aluminio. En la actualidad estos elementos se pueden combinar para formar lo que se conoce como aleaciones las cuales se realizan para mejorar las características tanto física como mecánica de los materiales en su forma individual. Usualmente consiste en un metal como base (la parte mayor de la aleación) y una cantidad menor de otros metales. En el caso del latón el cobre es el material base mientras que el zinc el elemento de menor proporción en la mezcla lo mismo sucede en el caso del acero el cual contiene una cantidad mayoritaria de Fe y en baja proporción la del carbono en este sentido los metales pueden ser ferrosos al contener una gran cantidad de hierro; y no ferrosos ya que carecen de este

¹ Rojas Ochoa Daniel Andres. Edad de los metales. Presentación Power Point.

elemento en su composición. Así el acero es una aleación ferrosa que se agrupa en aceros al carbono, aceros aleados, entre otros. Los aceros al carbono se clasifican de acuerdo con su contenido de carbono en peso, la cantidad de carbono se proporciona en puntos (100 puntos es igual a 1%) o como porcentaje. Los aceros aleados incluyen, además del hierro y el carbono uno o más elementos, estos se añaden con el objetivo de implementar una calidad deseada al metal. También, los aceros se clasifican por la forma en que están hechos y por lo que contienen².

Es importante mencionar que los metales sufren procesos de degradación debido a los diferentes ámbitos industriales (petróleo, energía nuclear, aeroespacial, etc.) a los cuales se encuentran sometidos ya que normalmente se encuentran expuestos a condiciones de tensión o/y en contacto con algún medio corrosivo, generando que estos presenten problemáticas diferentes³. Así los procesos de corrosión en superficies metálicas son considerados uno de los gastos más grandes en los procesos de transformación y transporte de productos y/o servicios.

² L. Feirer, John. (2000). Maquinado de metales con máquinas herramientas, principios y prácticas. Ed. Quinta, México, D.F, Continental, S.A. de C.V.

³ Cocuyo, M. I. F., & Martínez, R. G. Estudio electroquímico del fenómeno de corrosión de aceros API 5L utilizados en sistemas de ductos que transportan hidrocarburos.

CAPITULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 METALES Y CORROSIÓN

1.1.1 METALES FERROSOS

Dentro de ese grupo como se mencionó anteriormente se encuentran todos aquellos que contengan Fe como material base tales como el acero inoxidable y el hierro fundido. El acero es una aleación que contiene principalmente hierro, carbono y algunos otros elementos aleantes como por ejemplo silicio, azufre, fósforo y magnesio. El contenido de carbono presente es lo que determina en gran parte la máxima dureza obtenida, a mayor contenido de carbón, más elevada será su dureza, es decir aquellos con un bajo porcentaje Fe son óptimos para usar en la fabricación de piezas de baja resistencia, los de un contenido intermedio contenido se emplean para piezas forjadas y otras aplicaciones donde sea necesario el aumento en la resistencia. Por ende, para actividades donde la resistencia sea importante se recomienda el uso de aceros con alto contenido de Fe.

1.1.2 METALES NO FERROSOS

Son aquellos que no tienen Hierro (Fe) como componente principal. Pueden ser de tres tipos: los pesados los cuales se caracterizan por tener una densidad que oscila alrededor de los 5 g/cm^3 tales como el Cu, Sn, Zn, Ni, Cr y Cb; los ligeros por su parte presentan valores de densidad entre 2 y 5 g/cm^3 , tales como el Al y el Ti. Finalmente los ultraligeros con una densidad menor a 2 g/cm^3 tales como el Be y el Mg⁴.

⁴ Acreditación FCJPSyRRII. Metales Ferrosos y no ferrosos.

1.1.3 CORROSIÓN

La corrosión es un proceso con el que se conoce al proceso del deterioro de las superficies metálicas debido a las condiciones ambientales a las cuales éste se encuentra sometido generando con ello un intento de los materiales en volver a su estado natural. En este sentido la corrosión puede definirse también como la degradación de un metal por reacción electroquímica con su medio⁵

El problema de la corrosión no detectada a tiempo genera un alto costo económico por sus reparaciones ya que en el peor de los casos es pérdida de la pieza o bien supone el riesgo de afectaciones al ser humano y su entorno ya que esta puede sufrir agrietamientos que llevan a comprometer la estructura de la cual son parte (Figura 1). Al ser los metales una de las principales materias primas empleadas en la construcción de diversas estructuras estas como ya se mencionó pueden contribuir a la contaminación de los subsuelos y mantos acuífero tales el caso de los ductos empleados para el transporte de hidrocarburos o gasolinoductos los cuales pueden ser liberados al ambiente si el medio de transporte empleado para contenerlas falla generando la exposición de especies de animales y plantas con sustancias tóxicas y contaminantes, generando además serios problemas sociales.

Con base en esto es importante el desarrollo de nuevos materiales, así como el desarrollo de sustancias para su protección para saber abordar los desafíos que se presentan gracias a los efectos negativos y desafíos que nos presenta la corrosión en dichos materiales de uso cotidiano.

⁵ Vázquez, Marcela. (2014). El peor de los villanos cuando dominan los metales. Primera edición. Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina.



Figura 1. Corrosión Puente Tampico⁶.

Hay que enfatizar que la degradación en las superficies metálicas puede o no ser visibles generando cambios en su estructura interna a nivel intergranular comprometiendo la estructura metálica. El poco mantenimiento a las mismas es uno de los principales causantes de fallos en ellas⁷. Otra, de muchas definiciones de la corrosión, la enuncia como una alteración escalonada provocada por oxidación química o electroquímica (Figura 2). Esto debido a que los materiales pierden su estado elemental retoman su condición original. Este fenómeno genera el deterioro de numerosas estructuras en la industria sea química, de transporte, construcción, entre otras, estimándose al 3.5% del PIB de todos los países. Así, la corrosión es algo que se espera controlar, y prevenirse, para disminuir las velocidades de corrosión.

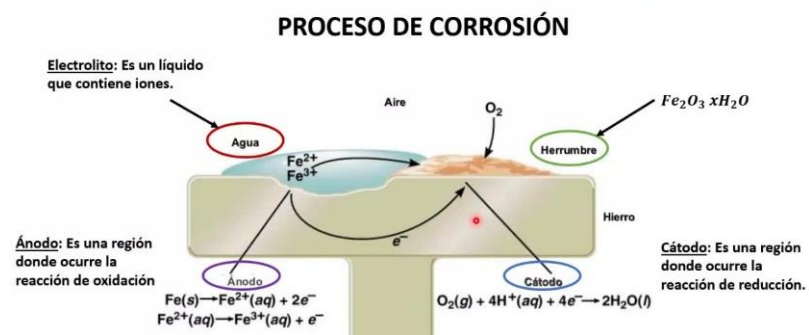


Figura 2. Proceso de Corrosión⁸.

⁶ Hernández Mirna. Puente Tampico es un riesgo para conductores. El sol de Tampico. 2020.

⁷ Corrosión y degradación de los metales. Escuela Politécnica Nacional.

⁸ El proceso de corrosión. Ingeniería Química desde cero. Canal de Youtube.

La corrosión externa, se define como el deterioro en la superficie de una estructura, y visible a simple vista (Figura 3 y 4) ⁹. La cual puede generar su inhabilitación de forma parcial total derivando en pérdidas económicas. De igual forma esta trae consigo consecuencias secundarias que se asocian con este tipo de deterioro tales como el reemplazo de la parte o partes corroídas, contaminación de un producto final, paro en líneas de producción que genera inversión en la realización de otro tipo de análisis tales como de fallo incluso hasta un rediseño para mejorar su funcionalidad. Lo anterior justifica claramente el por qué la corrosión incluye en la época actual debe ser abordada desde un punto de vista científico y de nivel ingeniería con la finalidad de tomar decisiones basadas en análisis específicos que permitan su mitigación a corto plazo.



Figura 3. Corrosión en Tanques¹⁰



Figura 4. Corrosión que Pone en Peligro al Trabajador¹¹

1.2 CLASIFICACIÓN DE LA CORROSIÓN

Existen dos tipos de corrosión, la **corrosión uniforme y localizada**. La primera ocurre sobre toda la superficie del material de manera generalizada provocando gran pérdida de material, la cual dentro de sus ventajas es que es fácil de predecir y controlar evitando el deterioro severo de la superficie metálica. Otro factor que influye en la velocidad de su deterioro es la composición de este a nivel

⁹ PDVSA GAS. La corrosión en la industria petrolera.

¹⁰ Industrial Cleaning. La Eliminación de Óxido y el Control de la Corrosión es una Tarea Industrial Vital. By Painters USA Team. January 30, 2023.

¹¹ LINE-X México: Líder mundial en recubrimiento termoplástico.

microestructural viendose influenciada por la existencia de impurezas y fases distintas (Figura 5 y 6), (ΔS indica la cantidad de material que se perdió).

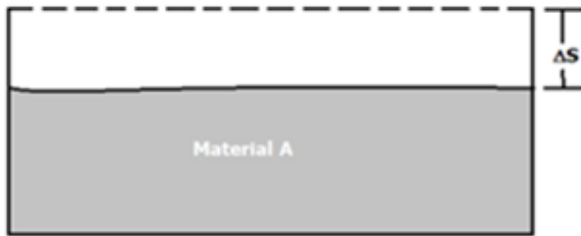


Figura 5. Corrosión uniforme.



Figura 6. Fotografía de corrosión uniforme de metal expuesto en la azotea de una casa.

La prevención de la corrosión uniforme se logra llevando a cabo una selección idónea del material, así como del uso de compuestos químicos o recubrimientos. El uso del diagrama de Pourbaix resulta útil para definir la tipicidad y la estabilidad de la corrosión uniforme, este consiste en una representación gráfica del potencial de corrosión del material en función del pH bajo condiciones termodinámicas standard (25 °C)¹².

La **corrosión localizada**, representa un mayor riesgo ya que no es detectable a simple vista y se propaga al interior del material generando fallos repentinos de alto impacto esto se debe a diversas condiciones como composición, así como factores mecánicos que pueden generar fallos localizado. Los procesos de corrosión localizada de mayor ocurrencia son galvánicos, por fisura, por picaduras, por cavitación y microbiológica entre otros. A continuación de describe cada uno de ellos de manera breve.

1.2.1. CORROSIÓN GALVÁNICA

La corrosión galvánica se debe a la unión entre dos materiales disimiles con potenciales de corrosión (E_{corr}) disimiles formando una celda electroquímica entre ellos, generando con esto que el material más activo (con potencial más negativo,

¹² Muñoz Portero, M. J. (2011). Características y usos de los diagramas de Pourbaix.

anodo) se corroa y el de potencial más noble (más positivo, cátodo) se proteja, dando lugar a un deterioro localizado en presencia de un medio conductor (electrolito). Donde un factor importante es el área entre el ánodo y el cátodo lo cual puede acelerar de manera significativa los procesos de corrosión localizada. Un factor de importante a considerar, es la relación de área de la zona de contacto entre los materiales. Entre mayor sea la relación del ánodo respecto al cátodo, el proceso de corrosión ocurre con mayor velocidad (Figura 7).

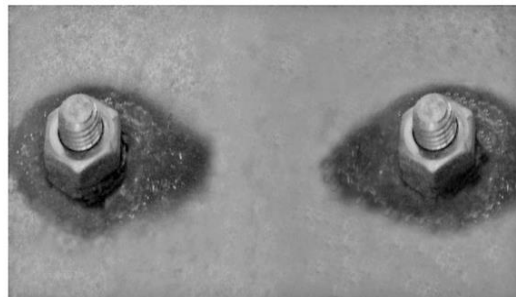


Figura 7. Corrosión galvánica sobre una placa de acero (ánodo) en contacto con tornillos y tuercas de acero inoxidable.

Para combatir la corrosión galvánica, algunas veces se usan varias técnicas como es la correcta selección de los materiales lo más cercano posible en la serie galvánica, aislamiento eléctrico, aplicación de recubrimientos, y uso de inhibidores.

1.2.2. POR EROSIÓN

Se define como la pérdida de material debido a su exposición a trabajos mecánicos repetitivos de partículas sólidas, líquidas o gaseosas o una combinación de ellas. Esto se lleva a cabo en tuberías donde el transporte de fluidos genera fricción mecánica en la superficie interior ocasionando pérdida localizada de material (Figura 8). Cualquier estructura expuesta de manera repetitiva a fluidos en movimiento es susceptible a este tipo de corrosión tales como válvulas, bombas, propulsores, impulsores, agitadores, tanques agitados, hojas de turbinas, entre otros (Figura 9). Diversas alternativas se han implementado para disminuir los

efectos de este a través de cambios en el diseño de los componentes mecánicos, control de parámetros hidrodinámicos y la correcta selección de materiales^{13 14}.

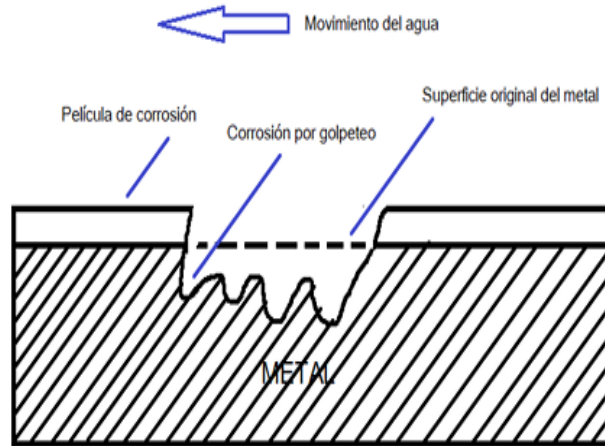


Figura 8. Mecanismo esquemático de corrosión-erosión.



Figura 9. Tubería con ondulaciones y huecos.

1.2.3. POR AGRIETAMIENTO

La corrosión por agrietamiento ocurre cuando el material se fractura o se parte debido a su exposición a cargas prolongadas produciendo la rotura de las películas de protección de óxidos que evitan la corrosión con una mayor rapidez¹⁵. Los lugares

¹³ Kosel, T. H., & Ahmed, T. (1992). The edge effect in solid particle erosion of ceramic second-phase particles. *Key Engineering Materials*, 71, 149-194.

¹⁴ Salazar-Jiménez, J. (2015) Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica). *Tecnología en Marcha*. Vol. 28, N° 3.

¹⁵ PDVSA GAS. La corrosión en la industria petrolera.

donde comúnmente se da en empaques, traslapes, tornillos, o remaches, donde además puede darse la formación de depósitos de suciedad que contribuyen a su debilitamiento. Se le atribuye en la mayoría de los casos a factores tales como acidez, escasez de oxígeno, desarrollo de iones diferentes y agotamiento de los medios empleados para su protección como recubrimientos o inhibidores (Figura 10)¹⁶.



Figura 10. Corrosión por agrietamiento.

1.2.4. POR PICADURA

La corrosión por picadura, es un proceso de óxido-reducción que ocurre en zonas localizadas en la superficie de metales cubiertos por una capa pasiva¹⁷. Se considera peligrosa, ya que los orificios creados pueden ser tan pequeños que forman canales a través de los materiales, debilitando su estructura. Esta se da como se explicó anteriormente debido a la diferencia de potenciales entre dos materiales en la serie galvánica. Hay varias soluciones disponibles para ayudar en la prevención y el tratamiento de este tipo de corrosión las cuales ya fueron citadas en el apartado de corrosión localizada (Figura 11 y 12)¹⁸.

¹⁶ Carlos Javier Selvan Farris. Corrosión por agrietamiento. 2015.

¹⁷ Salazar-Jiménez, J. A. (2015). Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales. Revista Tecnología en Marcha, 28(3), 127-136.

¹⁸ Corrosión por picadura o “pitting”. NCH Latin America. 2022.



Figura 11. Tubería metálica que presenta corrosión-picadura.

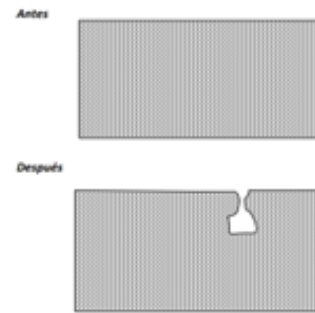


Figura 12. Mecanismo de corrosión-picadura¹⁹.

1.2.5. POR EXFOLIACIÓN

La corrosión por exfoliación es un tipo de corrosión superficial que comienza sobre una superficie limpia la cual se extiende debajo de ella. Se caracteriza por capas completas de material corridas de aspecto escamoso y con ampollas en la superficie metálica. Generando un aspecto de hojas una encima de otra. Se combate utilizando aleaciones y tratamientos térmicos (Figura 13)²⁰.



Figura 13. Corrosión por exfoliación²¹.

1.2.6. DE ATAQUE SELECTIVO

¹⁹ Vázquez, Marcela. (2014). El peor de los villanos cuando dominan los metales. Primera edición. Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina.

²⁰ Carlos Javier Selvan Farris. Corrosión por exfoliación y disolución selectiva. 2015

²¹ Koch, G. (2017). Cost of corrosion. Trends in oil and gas corrosion research and technologies, 3-30.

La corrosión de ataque selectivo se presenta solo en metales nobles como Plata-Cobre o Cobre-Oro. Quizá la parte más nociva de esta clase de ataques está en que la corrosión pareciera generalizada sin embargo debajo de esta se recubre las picaduras y hace parecer al metal corroído como si no lo estuviera generando problemas de fisura graves²². Un ejemplo de esto es el latón (70%Cu-30%Zn) donde el ataque corrosivo se produce sobre el zinc, debilitando el material que adquiere un aspecto esponjoso (Figura 14 y 15)²³.

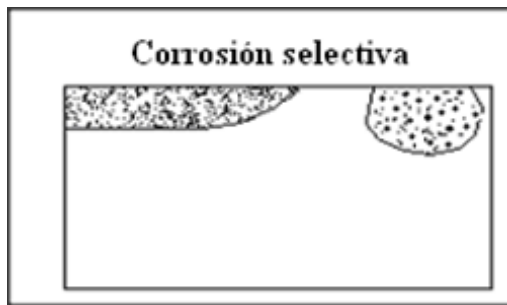


Figura 14. Mecanismo de corrosión de ataque selectivo.



Figura 15. Ataque de corrosión selectiva.

1.2.7. CORROSIÓN INTERGRANULAR

La corrosión intergranular, es un tipo de corrosión localizada el que la preferencia en la corrosión se genera a lo largo de los límites de grano de un metal. Normalmente esta se presenta debido proceso de soldadura y los tratamientos térmicos generando un reacomodo en la estructura cristalina del material (Figura 16 y 17)²⁴ de manera macro y microscópicamente²⁵.

²² Juan Pablo Chumba Lara. Tipos de Corrosión - Textos Científicos.

²³ Corrosión selectiva - ingeniería mecánica. Abril 13, 2015.

²⁴ Satya Vani Yadla, V.Sridevi, M.V.V.Chandana Lakshmi, S.P.Kiran Kumari. A review on corrosion of metals and protection.

²⁵ La corrosión en la industria petrolera.

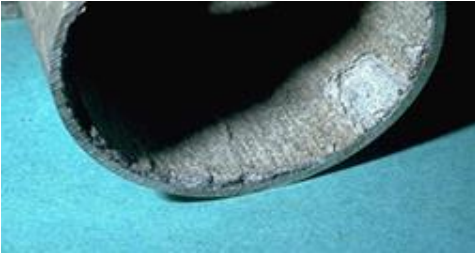


Figura 16. Corrosión intergranular en un metal.

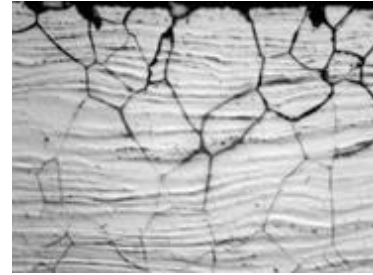


Figura 17. Detalles microfotográficos de corrosión intergranular.

1.2.8. CORROSIÓN BAJO TENSIÓN

La corrosión bajo tensión como su nombre lo indica se debe a la tensión a la cual se encuentra sometida el material generando grietas en ambiente corrosivo. Puede acelerarse por tensiones residuales internas en el metal o por tensiones aplicadas externamente altamente influenciada a altas temperaturas de trabajo. El agrietamiento por corrosión bajo tensión sólo puede producirse si se cumplen los tres factores siguientes, presencia de material susceptible, sujeción a un ambiente corrosivo y tensiones de tracción (Figura 18)²⁶.

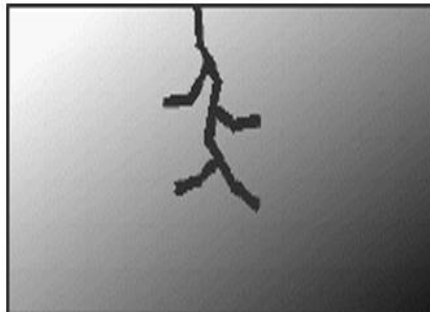


Figura 18. Corrosión bajo tensión²⁷.

1.3. ACEROS

²⁶S. Harsimran K. Santosh1 K. Rakesh, (2021), Harsimran et al., Proceedings on Engineering Sciences, Vol. 03, overview of corrosion and corrosion control: a critical review.

²⁷ Corrosión selectiva - ingeniería mecánica. Abril 13, 2015.

El acero es una aleación de hierro y carbono (máximo 2.11% de C), que cuenta con otros elementos que le confieren propiedades mecánicas específicas. Algunas propiedades del acero son la dureza, tenacidad y resistencia, se oxida con facilidad, pero permite una buena soldadura, también se conoce que entre más sea su porcentaje de carbono tendrá más resistencia.

Se clasifican en dos grupos, **aleados o especiales y no aleados o al carbono. Los primeros** pasan por un afinado para añadir otros metales o no metales para mejorar sus propiedades físicas y mecánicas. Se dividen en baja aleación (< 5% de aleantes) y de alta aleación (>5% de aleantes). Además, cuenta con una gran variedad de aplicaciones en máquinas, cortes, equipos quirúrgicos, reactores nucleares. Un ejemplo de este tipo de aceros son los inoxidable que están aleados con un mínimo del 10.5% de Cromo y un máximo del 1.2% de carbono. **Los aceros no aleados o al carbono, simples o comunes** están constituidos por el hierro y carbono y se usan en la fabricación de herramientas, clavos, tornillos, relojes, vehículos ferroviarios, automóviles, entre otros. En este grupo entran los de bajo, medio y alto porcentaje de carbono. Este debe ser templeado a una temperatura específica, para aumentar sus propiedades elásticas y durabilidad. sin embargo este proceso puede generar la aparición de grietas dando lugar a procesos de corrosión²⁸.

1.4. ACEROS HSLA (HIGH-STRENGTH LOW-ALLOY)

Los aceros micro aleados, también conocidos como aceros HSLA (High Strength Low Alloy Steels) pueden definirse como aquellos que contienen pequeñas cantidades de aleantes, (< 0.15 %) que forman carburos, nitruros y carbonitruros controlando directa o indirectamente la resistencia y otras propiedades de éstos²⁹.

²⁸ [https://recursos.edu.xunta.gal/sites/default/files/recurso/1464947174/42_metales_ferrosos.html#:~:text=Los%20metales%20ferrosos%20son%20el,\(2%C2%BA%20metal%20m%C3%A1s%20abundante\)](https://recursos.edu.xunta.gal/sites/default/files/recurso/1464947174/42_metales_ferrosos.html#:~:text=Los%20metales%20ferrosos%20son%20el,(2%C2%BA%20metal%20m%C3%A1s%20abundante))

²⁹ J. Ma. Gómez de Salazar J.C. Suarez, G.D. Velasco Y A. Ureña, Caracterización de un acero H.S.L.A. De fabricación nacional, Madrid

También ofrecen una alta resistencia considerándose además aleaciones ligaras(entre un 20-30% con respecto al acero al carbón) empleadas en carrocerías y chasis, suspensiones, vigas y bastidores auxiliares. Cuentan con un límite elástico mayor a 275 MPa (40 ksi). Su bajo contenido de carbono y de aleantes le confieren mejor ductilidad, resistencia y soldabilidad haciéndolos más económicos ³⁰.

1.5. ACEROS DUALES

Los aceros duales ofrecen propiedades mecánicas tales como una mejor resistencia y ductilidad. Además de la ventaja de ser económicos, cuentan con una mejor conformabilidad y excelente acabado superficial³¹. Cuentan un bajo contenido de ferrita-bainita-martensita lo cual genera una disminución de la resistencia y límite elástico, mejorando el porcentaje de alargamiento y del exponente de endurecimiento por deformación. Las propiedades mecánicas en caso de aceros de doble fase ferrítico-martensíticos estas relacionadas con la cantidad de estas fases en la estructura lo cual puede provocar que con las tensiones y la densidad de dislocación la fluidez plástica ocurra fácilmente. Como resultado, la cedencia ocurre en muchos sitios a través de la ferrita, y la cedencia discontinua es suprimida. La Figura 19 muestra la estructura bifásica de un acero de bajo carbono, donde la martensita (partes oscuras), se encuentra dispersa en la ferrita (partes claras), formando islas.

³⁰ Illescas Fernández, Silvia. (2007) Estudio del efecto de los elementos microaleantes en un acero HSLA, Madrid.

³¹ A. Kumar et al., Mater. Sci. Eng. A (2007), Influence of bainite/martensite-content on the tensile properties of low carbon dual-phase steels

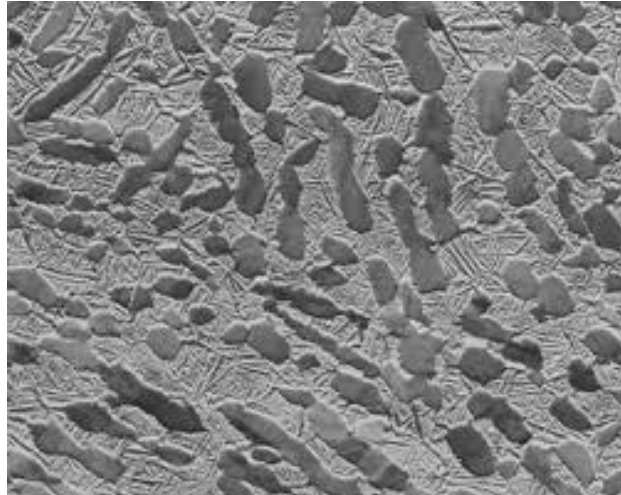


Figura 19. Micrografía de un acero dual.

1.6. DIAGRAMA DE FASE Fe-C

El diagrama de fase Fe-C (hierro-carbono) es una herramienta que representa la transformación que sufren los aceros al carbono con son sometidos a cambios de temperatura graduales y lentas, sean de calentamiento (o enfriamiento) permitiendo que los procesos de difusión (homogeneización) tengan tiempo para completarse. Este tipo de diagramas se obtiene de forma experimental, identificando los puntos críticos a las que se producen las sucesivas transformaciones (Figura 20).

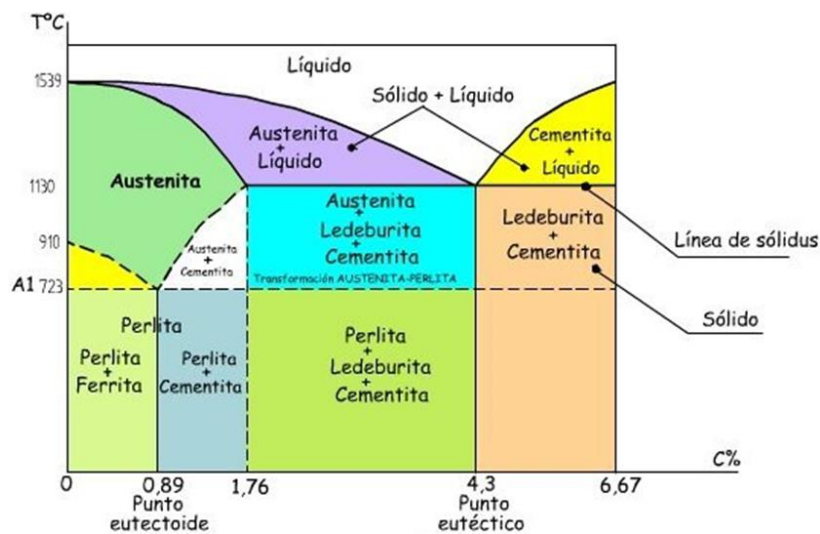


Figura 20. Diagrama de fases hierro-carbono³².

³² <https://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/21700290/helvia/aula/archivos/repositorio/0/42/html/diagrama.html>

A continuación se describen las fases formadas en el diagrama de la Figura 20

1.6.1. AUSTENITA (γ)

Esta presenta una solubilidad máxima del carbono (2.06%) a una temperatura de 1140 °C. Inestable debajo de 723 °C y se transforma en ferrita, perlita o bien cementita + perlita, esta microestructura del tipo poliédrica es precursor de la transformación martensítica que endurece a los aceros en un proceso de templado (Figura 21).

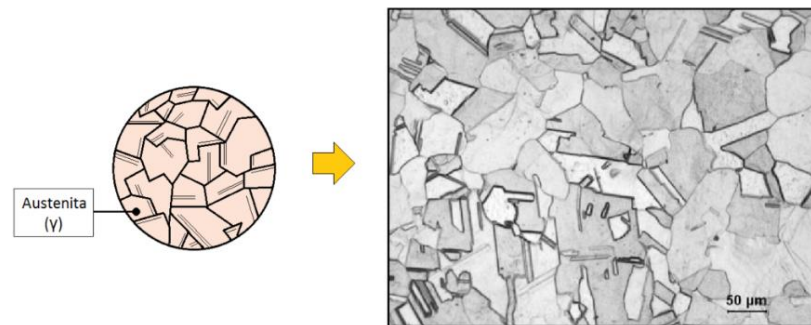


Figura 21. Austenita.

1.6.2. FERRITA (α)

La ferrita o hierro alfa se considera hierro puro (resistencia = $280\text{N}/\text{mm}^2$). el cual es un material cerámico ferromagnético compuesto de hierro, boro, bario, estroncio o molibdeno. Es uno de los constituyentes más simples del sistema metaestable Fe-C, donde el carbono forma el compuesto intermetálico Fe^3C . dentro de sus propiedades presenta una alta permeabilidad magnética, lo que le permite almacenar campos magnéticos más fuertes que el hierro y es por ello que se utiliza para fabricar imanes permanentes aleados con cobalto y bario, en núcleos de inducción y transformadores con níquel, zinc o manganeso³³. Presenta además baja solubilidad de C (máximo 0.02 % a 723 °C) y a temperatura ambiente no llega a

³³ <http://www.derematerialia.com/practic-as-metalograficas/ferrita/>

disolver ni un 0.008% de C. En la Figura 22 se muestra un ejemplo de esta la cual aparece en forma de granos monofásicos, con límites de grano del tipo globular.

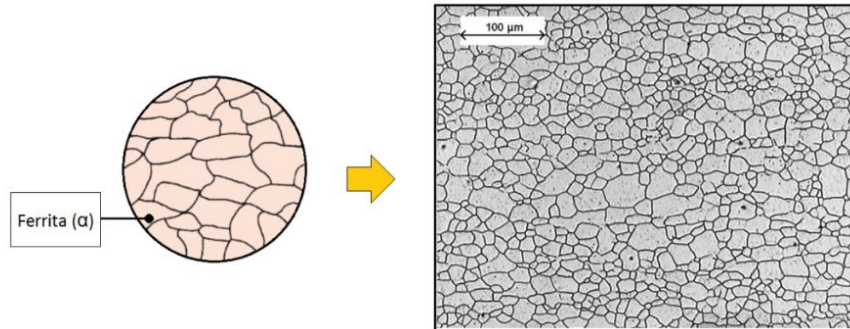


Figura 22. Ferrita.

1.6.3. CEMENTITA (Fe_3C)

La cementita es el compuesto químico de fórmula Fe_3C (carburo de hierro) y su composición química es equivalente a 6.67% C. Este compuesto presenta elevada dureza y fragilidad. El cementita en los aceros aparece de forma laminar dentro de los granos de ferrita en los aceros hipoeutectoides. En la figura 23 podemos observar la Cementita.

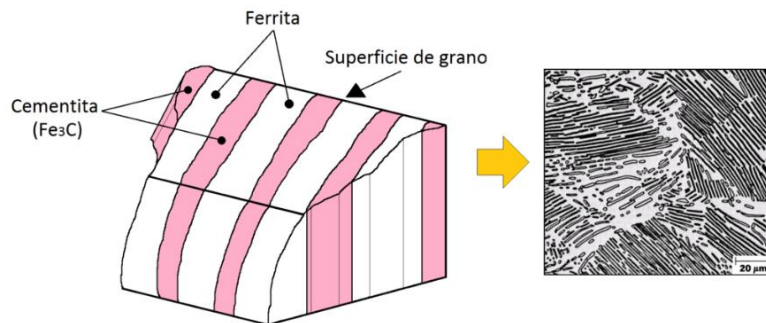


Figura 23. Cementita³⁴.

³⁴ <http://dualmetalurgia.com/metalurgia/elementos-de-aleacion-y-defectos-cristalinos/diagrama-de-fases-fe-c/>

1.6.4. PERLITA

La perlita está compuesta por el 86.5 % de ferrita y el 13.5 % de cementita. Su microestructura está formada por capas o láminas alternas de las dos fases (ferrita y cementita). En esta la fase mayoritaria es la ferrita, por lo cual sus propiedades estarán más próximas a esta. Hay dos tipos de perlita, la perlita fina, que es dura y resistente (espacio de 0.025 micras y dureza: 300 Brinell) y la perlita gruesa, que es menos dura y más dúctil (espacio interlaminar de 0.4 micras y dureza de 200 Brinell). La perlita aparece en granos llamados colonias, donde dentro de cada una las capas están orientadas en una sola dirección la cual varía de una colonia a otra. Las capas delgadas claras son de ferrita y las perlitas de color negro (Figura 24) sin embargo en condiciones normales de ataque son blancas³⁵.

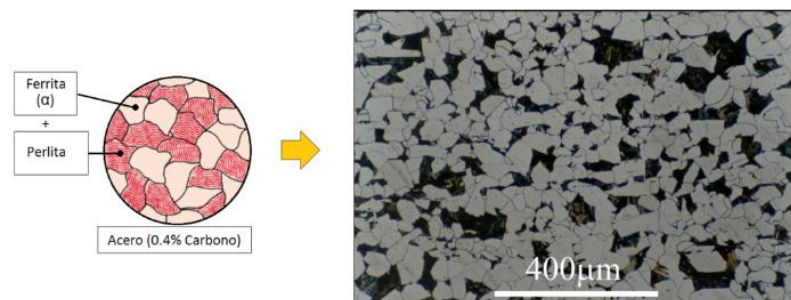


Figura 24. Perlita.

Para poder observar más a detalle, la Figura 25 muestra las cuatro fases presentes en el acero (ferrita, perlita, austenita y martensita).

³⁵ <https://www.feandalucia.ccoo.es/docu/p5sd8732.pdf>

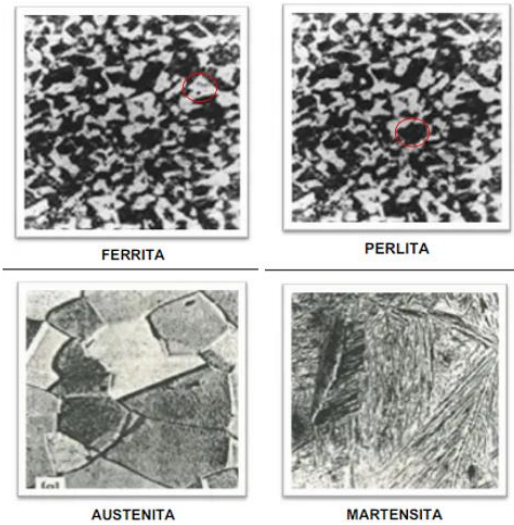


Figura 25. Cuatro fases.

1.6.5. MARTENSITA

La martensita es una solución sobresaturada de carbono sólido en hierro alfa, el componente más duro de los aceros endurecidos. Formado a bajas temperaturas ($< 215^{\circ} \text{C}$) como resultado de la transformación no difusiva de la austenita³⁶. Hay una reordenación colectiva de los átomos de Fe y C, pasando de la estructura cúbica centrada en las caras de la austenita a la estructura tetragonal centrada en el cuerpo (similar a un cubo centrado en el cuerpo, pero con lados más largos), que corresponde a la martensita, porque no implica difusión, ocurre casi inmediatamente (no depende del tiempo). La velocidad de transformación martensítica depende únicamente de la temperatura a la que la aleación se enfría rápidamente (endurecimiento). Es la microestructura del acero más dura y resistente, pero también la más frágil. Su durabilidad es casi nula. Su dureza depende del porcentaje de carbono en la solución y varía de 25-67 HRC, aproximadamente. En la figura 26 podemos observar detalles microfotográficos de martensita.

³⁶<https://www.fceia.unr.edu.ar/materialescivil/presentaciones/10.%20Tratamientos%20T%C3%A9rmicos.pdf>

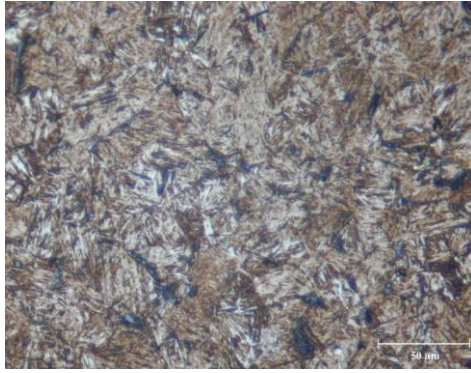


Figura 26. Detalles microfotográficos de Martensita³⁷.

1.6.6. BAINITA

La bainita tiene forma de placa y se forma a partir de la austenita debido a que la velocidad de enfriamiento no es lo suficientemente rápida para producir martensita, sin embargo si lo son como para que el carbono no tenga tiempo suficiente de difundirse y formar perlita, (200 y 300°C). Cabe mencionar que la perlita cuenta con capas alternas de ferrita y cementita, mientras que la bainita tiene una microestructura en forma de placa (Figura 27)³⁸.

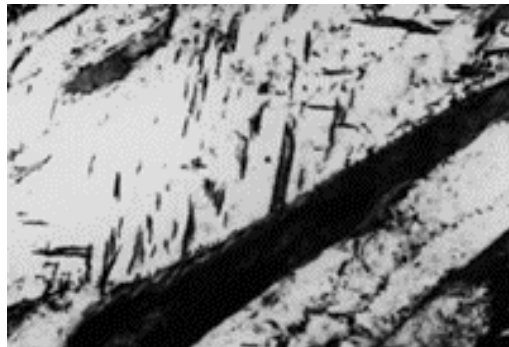


Figura 27. Detalles microfotográficos de Bainita.

1.7. ESTUDIOS PREVIOS EN LA CORROSIÓN EN ACEROS DUALES

³⁷ <http://www.derematerialia.com/practicass-metalograficas/martensita/>

³⁸ Rodríguez Galeano, Karol. (2013), Aceros Bainíticos y la Influencia del Boro sobre sus Propiedades Mecánicas, Colombia.

Se realizó búsqueda y análisis de estudios de corrosión en aceros duales, donde se encontró:

1.7.1. INFLUENCIA MICROESTRUCTURAL EN EL COMPORTAMIENTO DE CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA DE ACEROS BIFÁSICOS EN SOLUCIÓN DE NaCl AL 3.5%.

El objetivo fue analizar el proceso de corrosión del acero DP en una solución de 3.5% NaCl con respecto a la variación en la cantidad y morfología de los constituyentes de la fase desarrollados a través del recocido intercrítico discontinuo de un acero con vanadio al 0.2% C-Mn. Se ha evaluado el comportamiento de corrosión galvanostática de cinco aceros de doble fase (DP) con diferentes morfologías y contenido de martensita en comparación con un acero de ferrita-perlita en una solución de NaCl al 3.5%. Se observó que tanto la cantidad de martensita como la morfología de los constituyentes de la fase tienen una influencia definitiva en el comportamiento en los procesos de corrosión del acero, así como una corrosión acelerada con base en la cantidad de martensita presente y un mayor refinamiento de los constituyentes de la fase³⁹.

1.7.2. CORROSIÓN DE ACEROS FERRÍTICOS EN LOS LADOS DE AIRE DE LOS TUBOS DE CALDERAS EN UN AMBIENTE DUAL VAPOR/AIRE.

En el trabajo realizado por Nakagawa et al., se investigó el proceso de corrosión presente en aceros ferríticos resistentes al calor para tubos de calderas en un entorno dual vapor/aire que simula las áreas no calentadas a 600°C. Las tasas de corrosión de los aceros ferríticos en los lados del aire en condiciones de ambientes duales de vapor/aire aumentaron significativamente en condiciones de aire simple debido a la permeación de hidrógeno desde el lado del vapor. Las cantidades de hidrógeno permeadas a través de los tubos de ensayo se midieron

³⁹ PP Sarkar, P. Kumar, Manas Kumar Manna, PC Chakraborti, (2005) Microstructural influence on the electrochemical corrosion behaviour of dual-phase steels in 3.5% NaCl solution, India.

electroquímicamente usando un electrolito sólido conductor de protones. Los resultados de las mediciones de la corriente de permeación de hidrógeno muestran que la cantidad de hidrógeno permeado desde los lados del vapor disminuyó parabólicamente con el tiempo y disminuyó al aumentar el contenido de Cr en los aceros. El ataque de corrosión de las superficies exteriores saturadas bajo un cierto nivel de hidrógeno permeado y el contenido marginal de hidrógeno necesario para acelerar la corrosión del lado del aire dependían del contenido de Cr en el acero. Por lo tanto, una parte del hidrógeno permeado reacciona con el oxígeno para formar H₂O en la interfaz metal/óxido en los lados del aire. Es decir, el mecanismo de corrosión puede ser el mismo que el de la oxidación con vapor⁴⁰.

1.7.3. EFECTO DE DIVERSOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE DOS FASES SOBRE EL COMPORTAMIENTO A LA CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO UTILIZADO EN LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO.

Keleştemur y Yıldız Examinaron el efecto de los tratamientos térmicos en la corrosión de seis aceros diferentes de fase dual con diferentes morfologías y contenido de martensita en comparación con acero ferrita-perlita en concreto. Se han aplicado tratamientos térmicos de recocido intercrítico y templado intermedio al acero de armadura con el fin de obtener aceros con diferentes morfologías y contenido de martensita. Los autores plantearon el desarrollo experimental en dos etapas. La primera etapa se midió el potencial de corrosión de los aceros embebidos en concreto diariamente durante un período de 30 días. En la segunda etapa se obtuvieron los valores de polarización anódica y catódica de estos aceros y luego se determinaron las corrientes de corrosión con ayuda de curvas de polarización catódica. Se ha observado que tanto la cantidad de martensita como la morfología de los constituyentes de la fase tienen un efecto definitivo sobre el comportamiento

⁴⁰ Kiyokazu Nakagawa, Yasuo Matsunaga & Takahiro Yanagisawa (2003) Corrosion behavior of ferritic steels on the air sides of boiler tubes in a steam/air dual environment, *Materials at High Temperatures*, 20:1, 67-73, DOI: [10.1179/mht.2003.010](https://doi.org/10.1179/mht.2003.010).

de corrosión del acero incrustado en hormigón. Como resultado de este estudio, se encuentra que la corrosión del acero dual aumenta con el aumento de la cantidad de martensita⁴¹.

1.7.4. CORRELACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA CORROSIÓN MICROGALVÁNICA CON LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN EL PROCESO DE CORROSIÓN INICIAL DEL ACERO DE DOBLE FASE.

En este artículo de investigación Zhaochong *et al.*, estudiaron la corrosión presente en el acero dual producido por el proceso de recocido continuo (CAP) inmerso en una solución de NaCl. La microestructura, la nobleza de las fases y el comportamiento de la corrosión microgalvánica fueron caracterizadas con técnicas microscópicas, difracción de electrones retro dispersados (EBSD), fuerza de sonda Kelvin de barrido (SKPFM) y espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS). Los resultados indican que hay dos tipos de martensita, a saber, martensita fresca (FM) y martensita templada (TM), incrustadas en la matriz de ferrita. Los dos tipos de martensita están rodeados de dislocaciones y conectados entre sí como en una red en forma de cadena en el límite del grano de ferrita. Tanto FM como TM pueden actuar como un microcátodo para promover la disolución anódica de la matriz de ferrita adyacente, ya que FM es noble hasta 15 mV con respecto a la matriz de ferrita y TM es noble hasta 30 MV. El proceso de corrosión del acero se puede dividir en dos etapas. La primera etapa implica un aumento de la velocidad de corrosión del acero debido a la aparición sucesiva de TM y FM catódicos, mientras que la velocidad de corrosión disminuye en la segunda etapa debido a la separación de martensita⁴².

⁴¹ Oğuzhan Keleştemur, Servet Yıldız, (2009), Effect of various dual-phase heat treatments on the corrosion behavior of reinforcing steel used in the reinforced concrete structures. Construction and Building Materials, Tukey.

⁴² Heng Chen, Zhaochong Lv, Lin Lu, Yunhua Huang, Xiaogang Li (2021), Correlation of micro-galvanic corrosion behavior with corrosion rate in the initial corrosion process of dual phase steel. Journal of Materials Research and Technology.

1.7.5. ENTRADA DE HIDRÓGENO AL ACERO DURANTE CORROSIÓN ATMOSFÉRICA.

Tsuru et al, estudiaron el efecto de entrada y permeación de hidrógeno en un acero empleando métodos electroquímicos durante la reacción de corrosión atmosférica. La permeación de hidrógeno mejoró en las películas pasivas porque la adsorción de hidrógeno aumentó por la evolución de hidrógeno. La tasa de permeación durante un ciclo de corrosión húmedo y seco mostró un máximo en el proceso de secado dependiendo del pH de la superficie y el potencial de corrosión. El contaminante como Na_2SO_3 que disminuye el pH y el potencial de corrosión provocan un aumento en la tasa de permeación⁴³.

1.8. HIPÓTESIS

Dadas las propiedades y características del acero dual estudiado, este podría tener buena resistencia a la corrosión en el medio cloruro de sodio a diferentes temperaturas.

1.9. OBJETIVO

En este estudio se busca evaluar la resistencia a la corrosión de un acero dual en medio alcalino (NaCl) a diferentes temperaturas, las cuales son 25 ° C y 60° C, con concentraciones de 0.05 M, 0.01 M, 0.5 M y 0.1 M, utilizando técnicas electroquímicas y estudios metalográficos.

CAPITULO 2

DESARROLLO EXPERIMENTAL

⁴³ Tooru Tsuru, Yanliang Huang, Md. Rostom Ali, Atsushi Nishikata, (October 2005), Corrosion Science, Hydrogen entry into steel during atmospheric corrosion process

Se presentan a continuación las condiciones y las pruebas con las que se trabajó el material para poder ser evaluado, las cuales fueron realizadas en el Centro de Investigación en Ingenierías y Ciencias Aplicadas de la UAEM.

2.1. MATERIAL

El acero dual utilizado en esta investigación fue elaborado en *Ternium Hylsa*, empresa fabricante de aceros laminados, recubiertos, varillas, tubería y más; su historia se remonta a 1942 cuando fue fundada como Hojalata y Lámina S.A. (Hylsa) en la ciudad de San Nicolás de los Garza, ubicado en Nuevo León, México⁴⁴. Sus actividades abarcan desde la extracción de mineral de hierro en sus propias minas y la fabricación de acero, hasta la elaboración de productos terminados de alto valor agregado y su distribución. En 2005 fue comprada por el grupo ítalo-argentino Techint para formar Ternium.

Para fabricar el acero antes mencionado, se usan hornos de inducción al vacío en atmósfera inerte, donde placas semi laminadas de 30 mm de espesor son recalentadas a 1250° C por un tiempo aproximado de 45 minutos y posteriormente laminadas en caliente, esto con la finalidad de obtener un espesor de 3 mm, terminando el proceso a 900° C. Para el enfriamiento, la velocidad es de 100° C/s hasta llegar a 600° C , por último enfriamiento total con aire forzado a 2.5° C/s, el proceso se muestra en la Figura 2.1⁴⁵.

⁴⁴ Basáñez, Miguel (1990). La lucha por la hegemonía en México 1968-1990. México: Siglo XXI Editores. ISBN 978-968-23-1659-3.

⁴⁵ Ramírez-Arteaga, A. M. (2011). Efecto de la velocidad de enfriamiento y de recocidos intercríticos en la corrosión por H₂SO₄, NaCl y NaOH de un acero de doble fase. Tesis doctoral. Centro de Investigación en Materiales Avanzados.

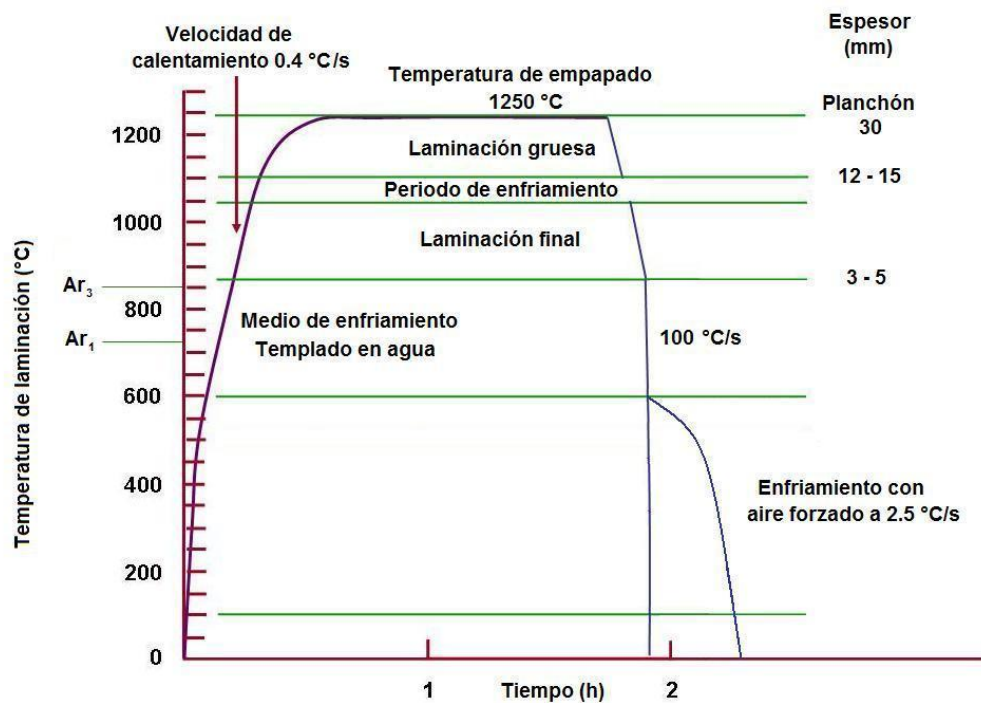


Figura 28. Proceso de fabricación del acero dual.

Tabla 1. Composición química del acero.

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
% Peso	0.085	0.034	1.5	< 0.000	< 0.000	0.601	0.043
Elemento	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V
% Peso	0.012	0.054	0.007	0.032	0.033	0.004	0.0004

De una placa de 1 m² de área, se cortaron piezas de 1 x 1 cm en un equipo *LECO VC-50*. Para eliminar residuos de grasa y humedad, las piezas se enjuagaron con acetona y se secaron con pistola de aire caliente.

En la Figura 29, se muestra la cortadora *LECO VC50*, la cual es ideal para el corte preciso de cerámicas, minerales, metales, entre otros. Genera muestras cortadas de un máximo de 1.5" (38 mm) de diámetro con una mínima pérdida o deformación del material. Se utilizan componentes electrónicos para supervisar y mantener velocidades constantes (hasta 500 RPM) en diversas condiciones de carga, mientras que el medidor muestra claramente la velocidad en pies superficiales por

minuto. Se completa con un disco de corte de diamante con un grosor de 5" (127 mm) x 0.014" (0.38 mm)⁴⁶.

Las piezas cortadas se utilizaron para el análisis de la microestructura, determinación de dureza y estudios de corrosión.



Figura 29. Cortadora LECO VC-50.

2.2. MEDIO ALCALINO

Como medio electrolítico se usó un medio alcalino (pH >7). Como medio acuoso se utilizó cloruro de sodio a diferentes concentraciones molares, las cuales fueron preparadas con reactivos grado analítico y matraces aforados de 500 y 1000 ml, los gramos fueron pesados en balanza analítica (Tabla 2).

Tabla 2. Preparación de concentraciones de NaCl.

Reactivo	C (M ó mol/L)	Peso del reactivo (g)	Solución total (L)
NaCl	0.5	29.22	1
	0.1	2.922	0.5
	0.05	1.461	0.5
	0.01	0.292	0.5

⁴⁶ <https://la.leco.com/product/vc50-diamond-saw>

2.3. TEMPERATURAS EXPERIMENTALES

Para determinar las temperaturas de trabajo se realizó una revisión bibliográfica. Por lo anterior, se establecieron dos temperaturas a 25 y 60 °C.

Para las pruebas a 25 °C la celda electroquímica se dejó expuesta a la temperatura del medio ambiente, a diferencia de 60 °C donde se empleó una parrilla para mantener la temperatura durante los análisis electroquímicos.

2.4. PREPARACIÓN DE PROBETAS

2.4.1. CORTE

El corte de las piezas utilizadas en esta parte experimental se describe en el punto 2.1, de este capítulo.

2.4.2. ENCAPSULADO

Las muestras previamente cortadas fueron embebidas en resina epóxica para lo cual se emplearon tubos de PVC como molde a diferentes diámetros, previamente lavados, lijados y engrasados para que las probetas puedan desmoldarse fácilmente.



Figura 30. Resina pp cristal y catalizador K-2000⁴⁷.

Posteriormente se llena el molde con resina hasta cubrir completamente la pieza, dicha resina se prepara pesando 100 g de ésta y agregando entre 36-40 gotas de catalizador K-2000. Estas piezas se dejan secar 48 horas y se desmoldan, para posteriormente ser lijadas y pulidas, ver figura 31.

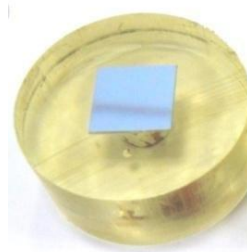


Figura 31. Probeta para microestructura⁴⁸.

2.4.3. DESBASTE

Existen dos tipos de desbaste, grueso y fino, el primero se realiza usando una pulidora marca LECO (Figura 32), la cual emplea como abrasivos lijas de SIC con tamaños de grano de 80, 120 y 240.

⁴⁷ Guerrero Vaca, G. R. (2013). Análisis comparativo de los procesos de eliminación de recubrimientos antiadherentes fluoropoliméricos en superficies metálicas entre tecnologías láser y pirolíticas. Tesis doctoral. Universidad de Málaga.

⁴⁸ <https://www.poliformas.mx/productos/producto/detalle/pp-cristal-preparada>



Figura 32. Pulidora LECO Spectrum System 1000.

El proceso de desbaste fino se efectúa utilizando lijas con tamaños de grano de 320 hasta 1500 o 2000. rotando la pieza 90° en cada cambio de grado de papel de SiC en forma tal que las rayas hechas por las distintas lijas formen ángulos rectos con las del desbaste anterior hasta alcanzar una superficie menos heterogenea. .

Para dar por finalizado el desbaste se tiene que obtener una cara plana en el metal, con rayas muy finas en toda la superficie y en un sólo sentido.

2.4.4. PULIDO

Para el pulido de la pieza posterior a su desbaste con papel abrasivo se empleó un paño combinado con una suspensión de alúmina de 3 μm de diámetro. Para obtener un buen resultado ésta última etapa se realiza a baja velocidad. Una vez terminada la muestra, se enjuaga, se seca y la superficie expuesta del material se cubre con algodón, para evitar que se oxide o se raye⁴⁹.

2.4.5. ATAQUE

Para poder observar la microestructura del material de prueba se debe realizar un ataque químico sobre la superficie del metal empleando un reactivo conocido como

⁴⁹ Standard ASTM G-1. Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens.

Nital 2, el cual se prepara mezclando 2 ml de ácido nítrico en 98 ml de alcohol etílico. La superficie del metal se ataca sumergiendo la probeta en la sustancia aproximadamente 30 segundos⁵⁰, 51.

Después del ataque, las muestras se cubren con algodón y se guardan en recipientes herméticos, posteriormente se analizan en microscopio electrónico de barrido.

2.5. ESTUDIO DE LA MICROESTRUCTURA

Para el análisis microestructura del material de prueba se empleó un microscopio electrónico de barrido el cual permite identificar el tipo de distribución y forma de los granos en la superficie metálica, así como la obtención imágenes a diferentes escalas nanométricas⁵².

Este equipo cuenta con un filamento que genera un haz de electrones que inciden en la superficie del metal reflectándose hacia un detector de electrones creando una imagen con las características de la superficie bajo análisis dando información como formas, texturas y composición química de la muestra bajo estudio⁵³.

2.5.1. DUREZA

Para establecer propiedades mecánicas de la muestra se realizaron pruebas de dureza con la finalidad de determinar la resistencia a la penetración de la superficie

⁵⁰ Sarkar, P. P., Kumar, P., Manna, M. K., & Chakraborti, P. C. (2005). Microstructural influence on the electrochemical corrosion behaviour of dual-phase steels in 3.5% NaCl solution. *Materials Letters*, 59(19-20), 2488-2491.

⁵¹ Walker, P., & Tarn, W. H. (Eds.). (1990). *CRC handbook of metal etchants*. CRC press.

⁵² Ipohorsky, M. (2011). Una mirada al microscopio electrónico de barrido. *Hojitas de Conocimiento. Materiales*; n° 4.

⁵³ <https://www.scai.uma.es/areas/micr/sem/sem.html>

metálica representando con ello la resistencia a los rayones o a la indentación del material⁵⁴.

La prueba realizada fue la de dureza Vickers empleando un microdurómetro marca LECO; para lo cual se estableció un ángulo de abertura del vértice de 136° (Figura 33) y este consiste en aplicar cargas controladas haciendo uso de un indentador de diamante de forma piramidal de base cuadrada⁵⁵.

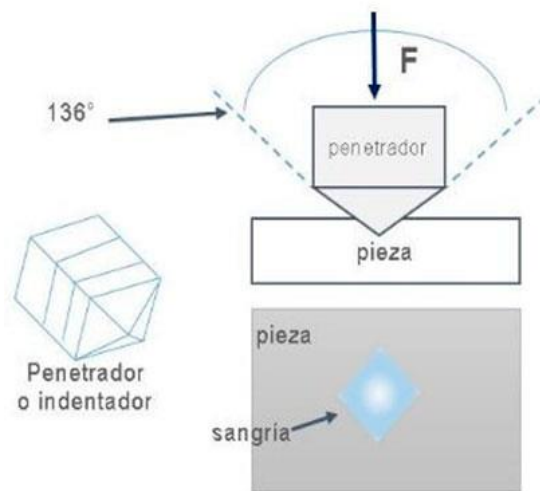


Figura 33. Indentador utilizado para las pruebas de dureza Vickers.

2.6. PREPARACIÓN DE ELECTRODOS DE TRABAJO

Para la realización de la caracterización electroquímica se realizó la preparación de las probetas se usaron las piezas previamente cortadas, y se procedió a lo siguiente

- Colocar un alambre de cobre pegado con cinta de cobre para garantizar la conductividad entre la probeta y el equipo de prueba.
- Para hacer más fácil su manejo y exposición a la solución acuosa, la probeta con el alambre fue encapsuladas en resina epóxica a 2 cm de altura.

⁵⁴ Askeland, D. R., Llidó, J. B., & de Pedro, J. B. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (Vol. 3). México: International Thomson Editores.

⁵⁵ <https://materiales.phemtycs.com/ensayo-de-dureza-vickers/>

- Después de 48 horas, se desmoldaron y se procedió al proceso de desbaste la superficie expuesta empleando lijas de carburo de silicio grado 80, 120, 240, 320, 400, 500 y 600.
- Finalmente, las probetas se enjuagaron con acetona y/o metanol secándolas con aire caliente (Figura 34)
- Para asegurar la transferencia de electrones, la “continuidad” en la probeta se verifica con un multímetro (Figura 35).



Figura 34. Probeta terminada para pruebas electroquímicas.



Figura 35. Multímetro marca Truper.

2.7. CELDA ELECTROQUÍMICA

Para la caracterización electroquímica se empleó un Potenciostato ACM Instrumentes GillAC el cual se encuentra equipado con un software capaz de realizar pruebas tales como curvas de polarización, ruido electroquímico, y espectroscopia de impedancia electroquímica las cuales permiten obtener datos como la densidad de corriente, potencial de corrosión, resistencia a la polarización y resistencia al ruido , registrando en forma automática los valores a lo largo de la prueba⁵⁶.

⁵⁶ Perez, J. B., Palacio, J. A. A., Picon, A. A., Rueda, J. J. A., Sua, G. E. G., & Suarez, L. C. M. (2004). Diseño y construcción de un prototipo de potenciostato galvanostato para el laboratorio de corrosión de la escuela de ingeniería metalúrgica. *Revista UIS Ingenierías*, 3(1), 29-40.

Para ello se empleó una celda electroquímica de tres electrodos usando como electrodo de referencia un electrodo de Ag/AgCl (RE), como contraelectrodo (a menudo llamado el electrodo auxiliar, AE) un electrodo de grafito y como electrodo de trabajo (WE) los materiales de prueba previamente encapsulados (Figura 36)⁵⁷.

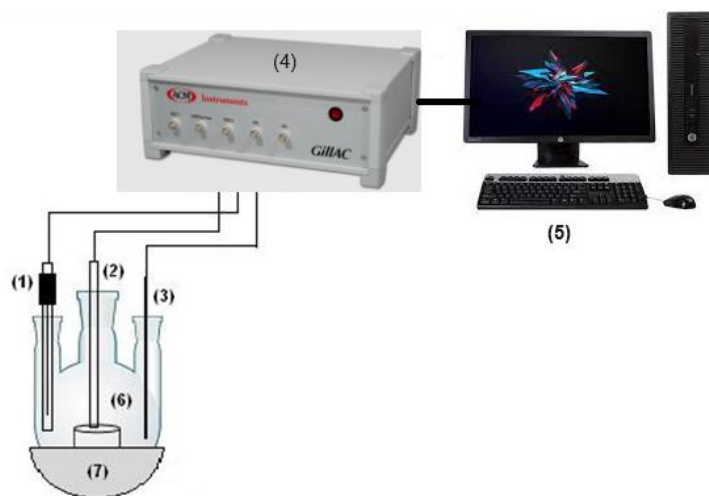


Figura 36. Celda electroquímica para las pruebas a 25 °C. (1) Electrodo de referencia Ag/AgCl, (2) Electrodo de trabajo, (3) Electrodo auxiliar (grafito), (4) Potenciostato, (5) Computadora, (6) Matraz de tres bocas de 250 ml, (7) Soporte para matraz.

Para la celda electroquímica donde se trabaja con NaCl a 60° C, además de los electrodos arriba mencionados, fue necesario utilizar un termómetro y una parilla para mantener la temperatura del medio acuoso constante (Figura 37)

⁵⁷ JoVE Science Education Database. Química analítica. Electrochemical Measurements of Supported Catalysts Using a Potentiostat/Galvanostat. JoVE, Cambridge, MA, (2023).

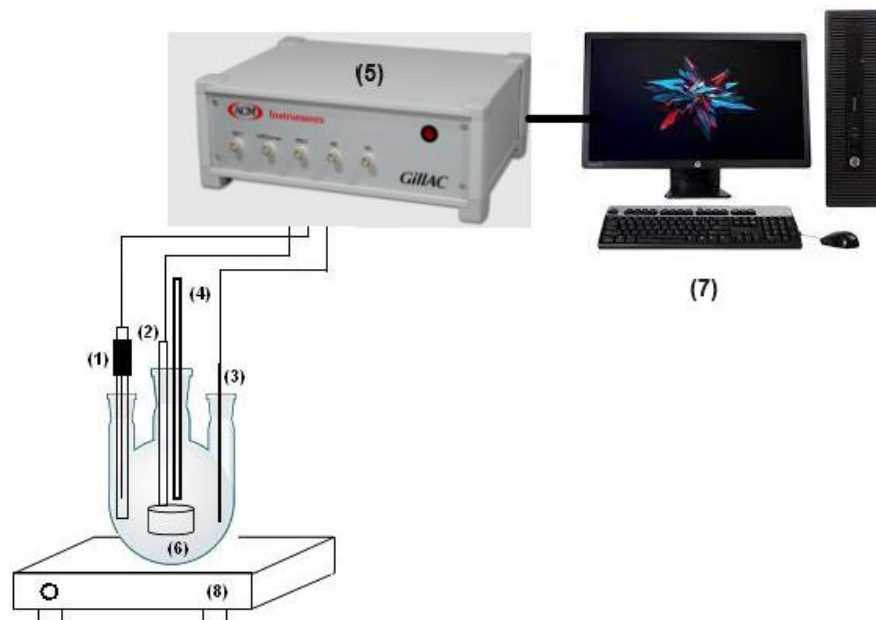


Figura 37 Celda electroquímica para las pruebas a 60 °C. (1) Electrodo de referencia Ag/AgCl, (2) Electrodo de trabajo, (3) Electrodo auxiliar (grafito), (4) Termómetro, (5) Potenciostato, (6) Matraz de tres bocas de 250 ml, (7) PC, (8) Parrilla de calentamiento.

2.8. TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS

En esta evaluación se utilizaron las siguientes técnicas electroquímicas:

- Curvas de Polarización
- Ruido Electroquímico y
- Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS, por sus siglas en inglés).

2.8.1. CURVAS DE POLARIZACIÓN

Esta técnica consiste en aplicar un potencial de polarización de valores negativos a positivos a una velocidad de barrido específico, que permite medir la velocidad del paso de electrones en la superficie del metal como el potencial va de valores negativos (rama catódica) a valores positivos (rama anódica) logrando establecer posibles zonas de pasivación, corrientes límites entre otros parámetros útiles para determinar los valores de densidad de corriente (i_{corr}) y potencial de corrosión (E_{corr}) con base a las condiciones entradas en la celda electroquímica.

Para su realización se programo en el software una velocidad de barrido de 60 mV/min polarizando las muestras de -1000 a 1500 mV con respecto al potencial de libre de corrosión.

2.8.2. RUIDO ELECTROQUÍMICO

Con la finalidad de observar el comportamiento de la superficie metálica inmersa en el electrolito se realizaron mediciones de corriente y potencial con la finalidad de observar el comportamiento de los transitorios, sus fluctuaciones y la frecuencia de los mismos. Esto permite establecer el tipo de corrosión presente en la superficie del metal permitiendo establecer la resistencia al ruido (R_n).^{58 59 60}.

Para esta medición los electrodos empleados fueron 2 electrodos de trabajo (WE1 y WE2) idénticos y un electrodo de Ag/AgCl en conexión ZRA. Se registraron 1024 valores de corriente y potencial a 1 punto por segundo.

2.8.3. ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA

Para conocer el tipo de mecanismo que gobierna los procesos de corrosión en la superficie del material de prueba así como establecer la resistencia a la polarización que esta tiene con base a las condiciones encontradas en el electrolito se empleó la técnica de impedancia electroquímica la cual consiste en realizar un barrido en el rango de frecuencia de 3 kHz a 0.1 Hz aplicando un perturbación sinusoidal de 10 mV. Lo anterior permitirá obtener un semicírculo con características específicas que permitirán definir los parámetros anteriormente descritos.

⁵⁸ Escobar, D., Calderón, J., & Minotas, J. (2011). Estudio de la corrosión mediante la técnica de ruido electroquímico.

⁵⁹ R. A. Cottis, "Interpretation of Electrochemical noise data", Corrosion, Vol. 57, No. 3, pp. 265-285, 2001.

⁶⁰ B. Baroux. "Further insights on the pitting corrosion of stainless steels", in (Eds.) P. Marcus, J. Oudar, Corrosion mechanisms in theory and practice, Marcel Dekker Inc., New York, 1995.

2.9. OBTENCIÓN DE DATOS

Los datos obtenidos en las pruebas electroquímicas se “*convierten*” en archivos con extensión *.txt y *.xls. Todos los datos obtenidos deben de graficarse para su posterior análisis. En este sentido para obtener los parámetros de E_{corr} e i_{corr} se aplica el método de extrapolación Tafel el cual consiste en trazar dos líneas tangentes a la rama anódica y catódica respectivamente trazando una línea horizontal que las corte permitiendo con ello establecer los parámetros anteriores.

En el caso de los datos de Ruido Electroquímico estos fueron analizados aplicando análisis estadístico a los valores de corriente y potencial medidos en el tiempo para poder determinar la desviación estándar de ambos parámetros y con ello obtener la R_n .

Para el procesamiento de datos de espectroscopia por impedancia electroquímica se realizaron simulaciones de funciones de transferencia utilizando LabVIEW®, además del ajuste de datos experimentales para lo cual se establecieron circuitos eléctricos equivalentes⁶¹⁶². Lo anterior permitirá establecer los elementos presentes en la superficie metálica interactuando con el electrolito, lo cual ayudara a definir los valores de resistencia de los productos de corrosión, resistencia a la transferencia de carga entre otros.

⁶¹ De Impedancia Electroquímica, E. I. S. (2006). SIMULACIÓN DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA PARA ESPECTROSCOPIA. REVISTA COLOMBIANA DE FÍSICA, 38(3), 1331.

⁶² Martín Saavedra, R. (2014). Simulación mediante circuitos equivalentes de la impedancia electroquímica de armaduras de acero inoxidable en mortero (Tesis de Maestría).

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se realiza el análisis de los resultados derivados del análisis microestructural y de la caracterización electroquímica del material de prueba a distintas concentraciones y temperaturas de la solución de trabajo.

3.1. CARACTERIZACIÓN DEL ACERO DUAL

En la Figura 38 y 39 se puede observar la fase martensítica de alta dureza de los materiales de prueba. Dicha fase les provee de una excelente ductilidad generando una alta tasa de endurecimiento por deformación^{63,64,65,66}. La microestructura del acero dual evaluado (rolado en frío), se obtuvo una dureza Vickers de 324 HVN, donde se aprecian como se mencionó anteriormente regiones de martensita, con algunas zonas de perlita fina.

Co base en las ecuaciones 38 y 39 cuando la cantidad de ferrita presente en el acero dual es baja, se considera que es más resistente a la corrosión. Mientras que altos contenidos de martensita pueden disminuir la resistencia a la corrosión.



⁶³ Iron and Steel Institute, “Advanced High Strength Steels (AHSS): Application Guidelines”, Iron and Steel Institute, Committee of Automotive Applications, 2005.

⁶⁴ S. Lalam, B. Yan, “Weldability of AHSS”, Society of Automotive Engineers, International Congress, Detroit, 2004.

⁶⁵ M. Delince, Y. Brechet, J.D. Embury, M.G.D. Geers, P.J. Jacques, T. Pardo, “Structure–property optimization of ultrafine-grained dual-phase steels using a microstructure-based strain hardening model”, *Acta Materialia* 55, 2007, pp. 2337-2350.

⁶⁶ Lorusso, H., Burgueño, A., & Svoboda, H. (2008). Propiedades mecánicas y caracterización microestructural de diferentes aceros Dual-Phase. *SAM/CONAMET*, 8, 282-285.

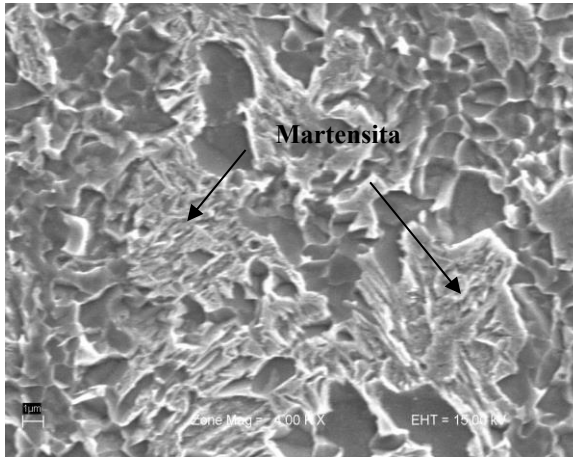


Figura 38. Microestructura del acero dual a 4KX.

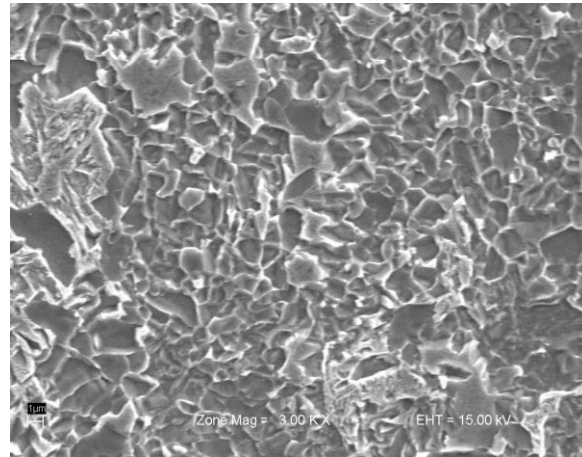


Figura 39. Microestructura del acero dual a 3KX

3.2. CURVAS DE POLARIZACIÓN

La Figura 40 muestra las curvas de polarización para el acero dual inmersos en 0.5 M NaCl a 25 y 60 °C, de donde se observa que la E_{corr} a 25 °C se mueve hacia valores más activos (- 769.47 mV) mientras que el valor más noble se presenta para la prueba a 60 °C con un valor de - 708.70 mV. Con respecto a los valores de I_{corr} , el menor corresponde a la prueba realizada a 60 °C con un valor de 2.57×10^{-6} mA/cm². Lo anterior demuestra que la temperatura contribuye a la generación de una capa pasiva en la superficie del metal permitiendo disminuir los efectos de la corrosión en el material bajo prueba. Si embargo no se observan zonas de pasivación a ninguna temperatura

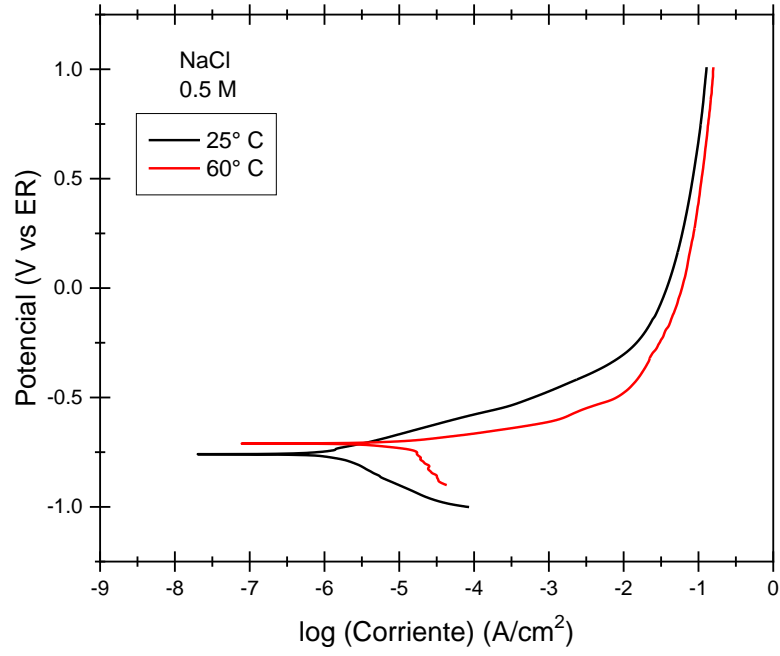


Figura 40. Curvas de polarización del acero dual en 0.5 M NaCl a 25 y 60 °C.

La Figura 41, ilustra el comportamiento de la i_{corr} con respecto a la temperatura.

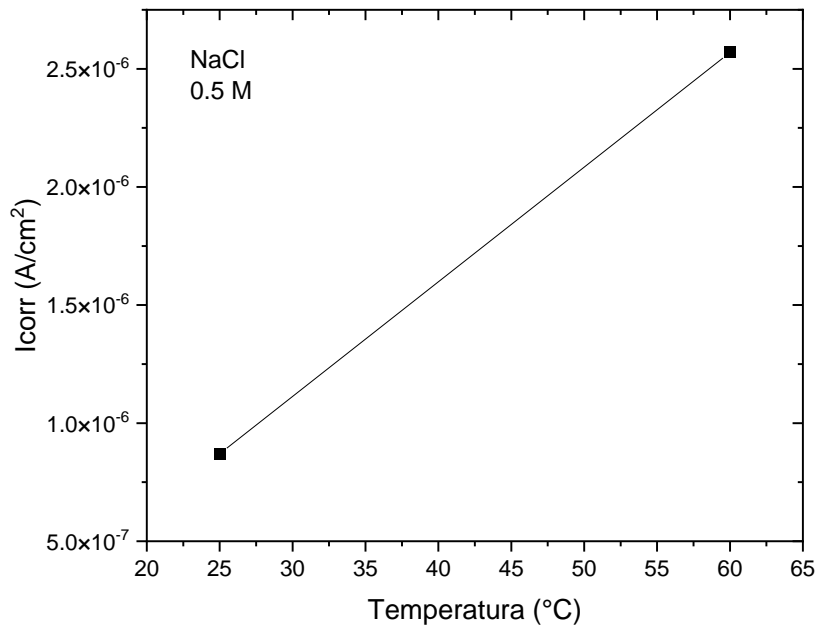


Figura 41. Variación de la I_{corr} con respecto a la temperatura.

Para observar el efecto de la concentración en la corrosión del material de prueba se establecieron diferentes concentraciones de NaCl (0.01, 0.05, 0.01 y 0.5 M) empleando una temperatura de trabajo de 60 °C; los resultados se muestran en la Figura 42 de donde se puede observar que el valor de E_{corr} más activo es para la concentración de 0.1 M con -839.10 mV, mientras que el valor más noble corresponde a 0.05 M NaCl con un valore de - 518.38 mV. Con respecto a los valores de I_{corr} , la menor densidad corresponde a la solución de 0.01 M NaCl con 1.86×10^{-6} mA/cm². De igual forma que en la prueba a temperatura no se presenta la formación de una capa pasiva en la superficie del metal

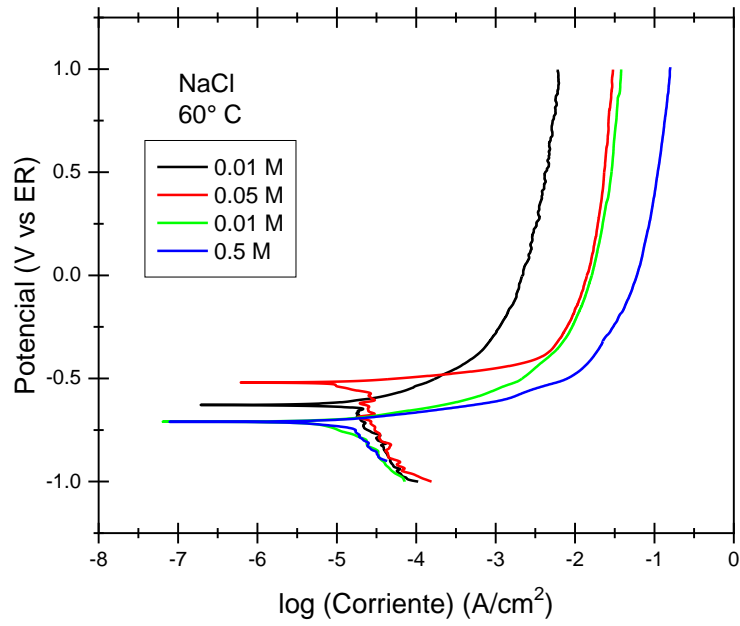


Figura 42. Curvas de polarización del acero dual en NaCl a 60 °C a diferentes concentraciones.

El comportamiento de la i_{corr} con la concentración a 60 °C se muestra en la Figura 43

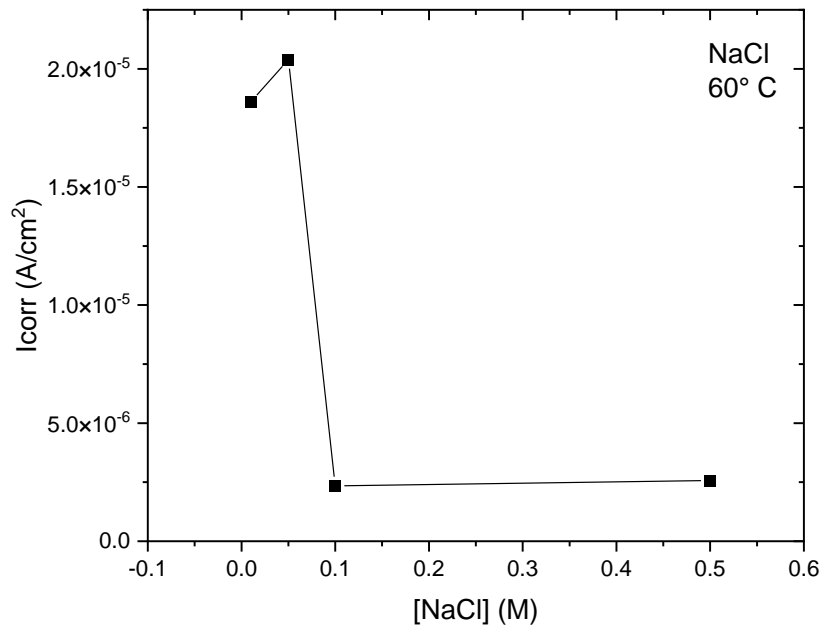


Figura 43. Variación de la I_{corr} para el acero dual con respecto a diferentes concentraciones de NaCl a 60° C.

3.3. RUIDO ELECTROQUÍMICO

En las Figuras 44 y 45, muestran las series de tiempo para el potencial y la corriente del acero en 0.5 M NaCl a 25 °C. Es posible observar que no existe la formación de transientes de alta amplitud o alta frecuencia sugiriendo un tipo de corrosión localizada sobre la superficie del acero.

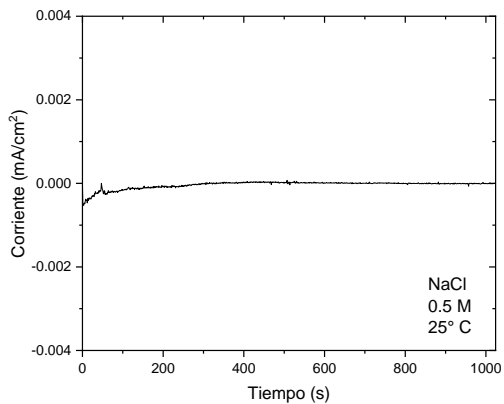


Figura 44. Serie de Tiempo en Corriente para el acero dual en 0.5 M NaCl a 25 °C.

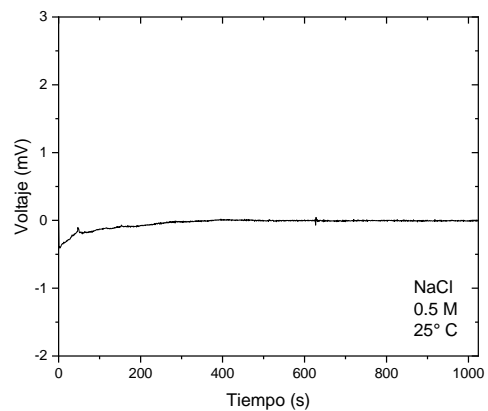


Figura 45. Serie de Tiempo en Potencial para el acero dual en 0.5 M NaCl a 25 °C.

Sin embargo, con la temperatura a 60 °C (Figura 46 y 47), se muestra la formación de transientes de alta amplitud y frecuencia lo cual sugiere la ruptura de la capa pasiva formada en la superficie metálica, sugiriendo además un tipo de corrosión localizada.

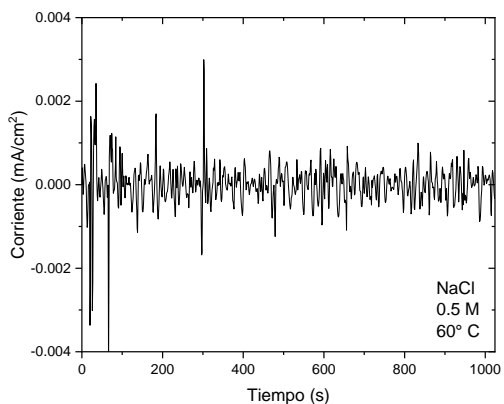


Figura 46. Serie de Tiempo en Corriente para el acero dual en 0.5 M NaCl a 60 °C.

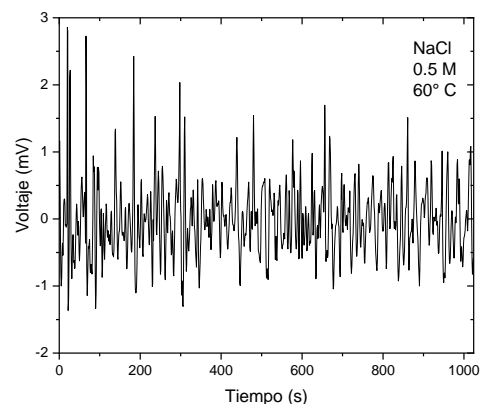


Figura 47. Serie de Tiempo en Potencial para el acero dual en 0.5 M NaCl a 60 °C.

Para la concentración a 0.1 M NaCl a 60 °C (Figuras 48 y 49) se observa nuevamente la formación de transientes de alta frecuencia y magntus sugiriendo nuevamente la presencia de un tipo de corrosión localizada como en los casos

anteriores cabe mencionar que la intensidad de estos aumentó a esta concentración debido a una mayor difusión de los iones de Cl^- en la superficie del metal.

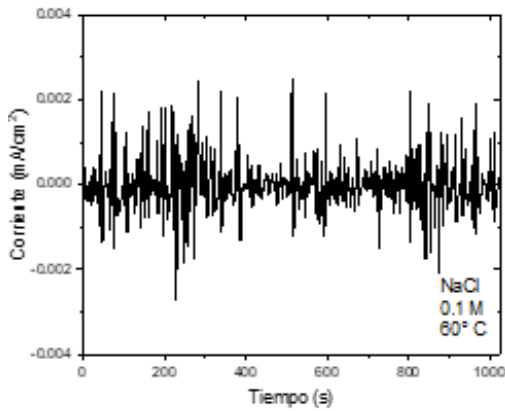


Figura 48. Serie de Tiempo en Corriente para el acero dual en 0.1 M NaCl a 60 °C.

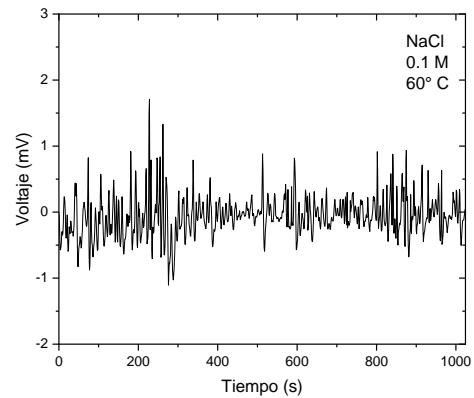


Figura 49. Serie de Tiempo en Potencial para el acero dual en 0.1 M NaCl a 60 °C.

A 0.05 M NaCl a 60 °C (Figura 50 y 51). Es claro una disminución de la intensidad de los transientes tanto para el potencial como para la corriente. Sin embargo, se observan algunos de mayor magnitud sugiriendo un tipo de corrosión mixto entre generalizado y localizado formando una capa pasiva inestable.

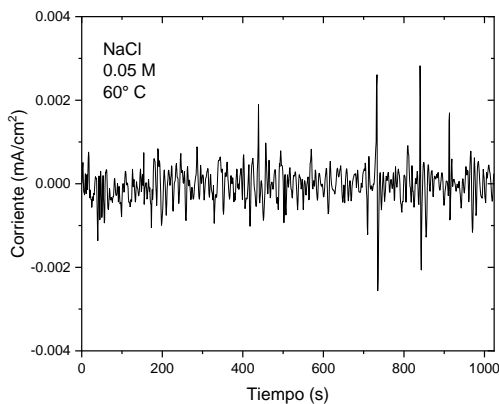


Figura 50. Serie de Tiempo en Corriente para el acero dual en 0.05 M NaCl a 60 °C.

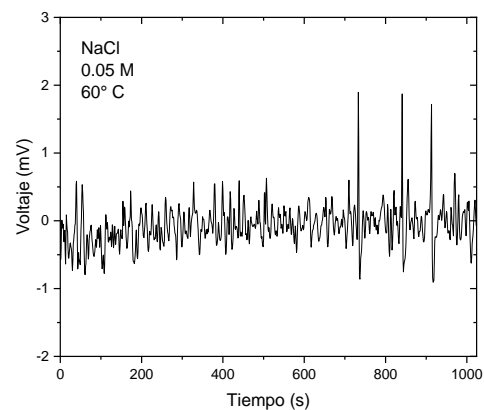


Figura 51. Serie de Tiempo en Potencial para el acero dual en 0.05 M NaCl a 60 °C.

A una menor concentración de cloruros (0.01 M NaCl) a 60 °C (Figura 52 y 53). Se observa una clara disminución de los transientes en la corriente con magnitud estable en el tiempo sugiriendo un tipo de corrosión generalizada. De igual manera las fluctuaciones en el potencial permanecen estables en el tiempo con transientes de baja magnitud.

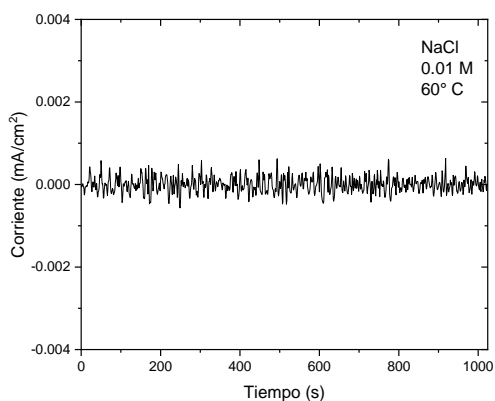


Figura 52. Serie de Tiempo en Corriente para el acero dual en 0.01 M NaCl a 60 °C

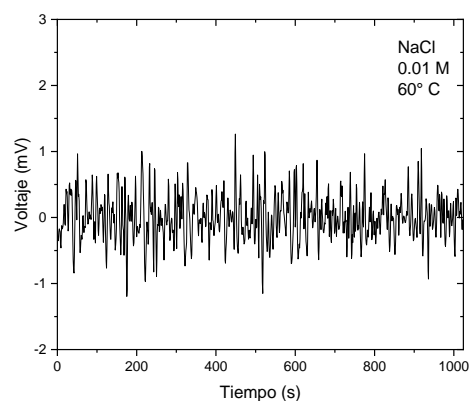


Figura 53. Serie de Tiempo en Potencial para el acero dual en 0.01 M NaCl a 60 °C.

3.4. R_p y R_n

En la Figura 54, se muestran los valores de R_p y R_n los cuales presentan valores muy similares con la misma tendencia, pero diferente magnitud con lo cual se establece la confiabilidad de los datos calculados a través de las técnicas de ruido electroquímico y espectroscopia de impedancia electroquímica.

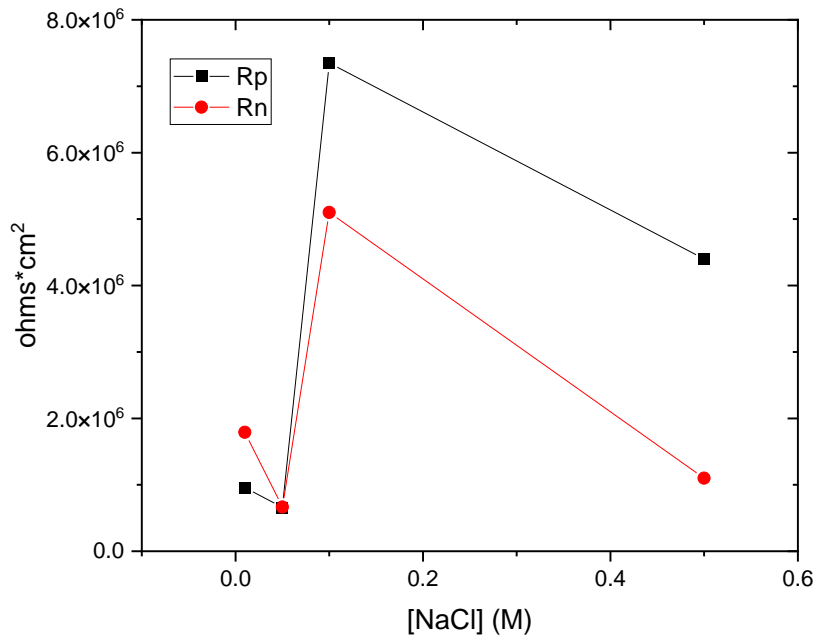


Figura 54. Valores de Rp y Rn del acero dual.

3.5. ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA

La Figura 46, muestra el Diagrama de Nyquist del acero dual, en la solución de 0.5 M NaCl a 25 y 60 °C. Donde se puede observar la formación de semicírculos con su eje en el centro real, el cual tiende a modificarse con la concentración y la temperatura de la solución. La Figura 55 muestra las pruebas realizadas al acero dual a 25 y 60 °C observándose una resistencia de aproximadamente 60 y 40 Ωcm^2 respectivamente. La Figura 56 observa un incremento de los valores de impedancia de alrededor de 500 y 600 Ωcm^2 para las pruebas a 0.01 y 0.05 M NaCl, respectivamente. Se observa además un decremento con el incremento de la concentración a 0.1 y 0.5 M con valores de impedancia de 60 y 40 Ωcm^2 , respectivamente (Figura 57), sugiriendo que a altas concentraciones de cloruro los procesos de corrosión en la superficie del metal se aceleran.

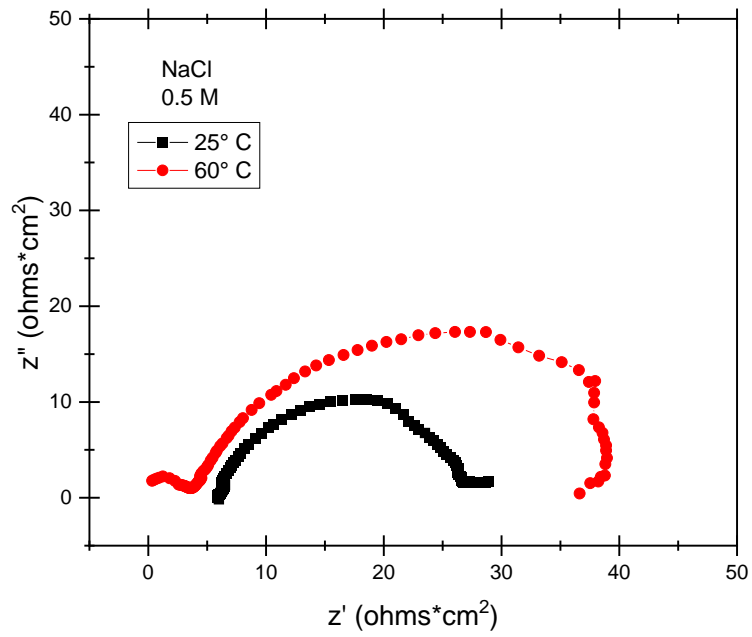


Figura 55. Diagrama de Nyquist del acero dual en 0.5 M NaCl a 25 y 60 °C.

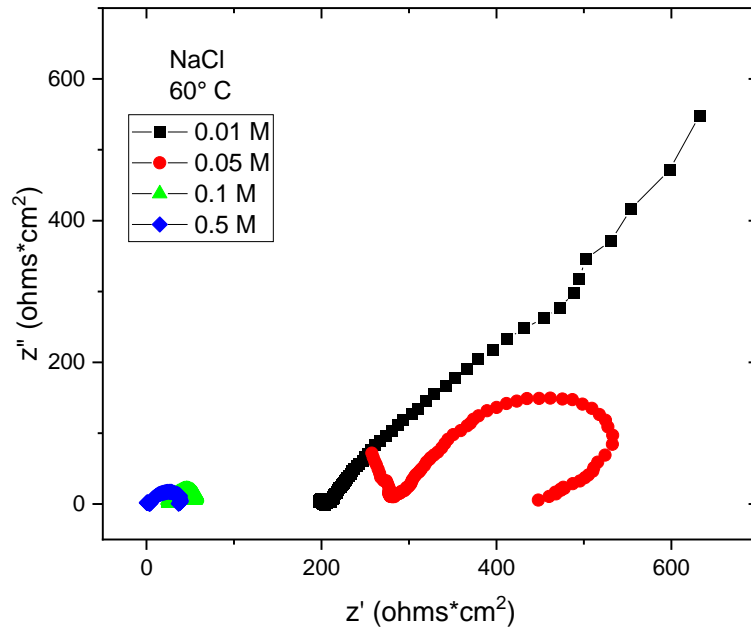


Figura 56. Diagrama de Nyquist del acero dual en NaCl a 60 °C.

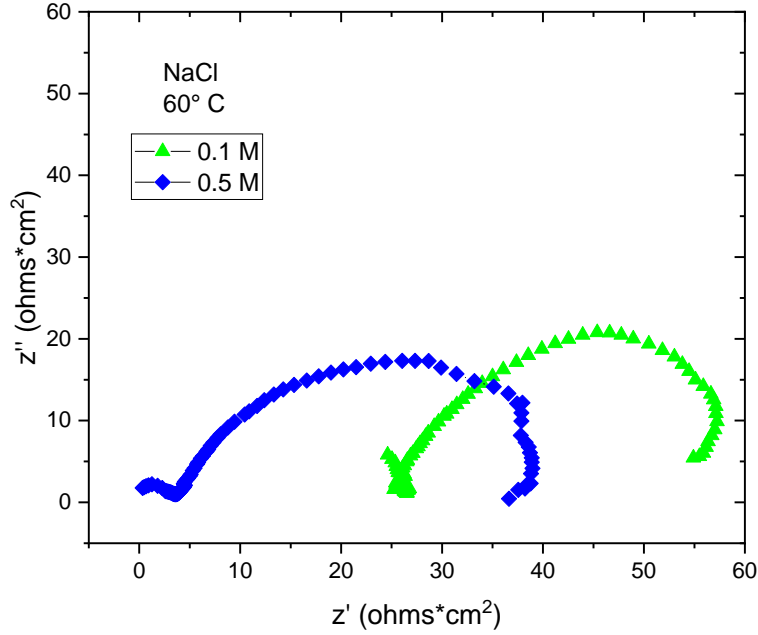
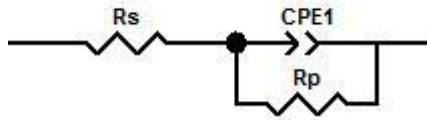


Figura 57. Diagrama de Nyquist del acero dual en 0.1 y 0.5 M NaCl a 60 °C.

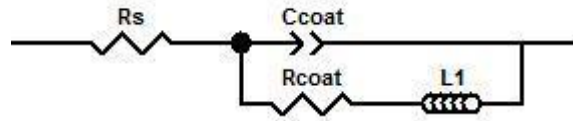
3.6. CIRCUITOS EQUIVALENTES

Los circuitos eléctricos equivalentes mostrados en la Figura 58, son el resultado del ajuste en LabView de las pruebas de impedancia electroquímica.

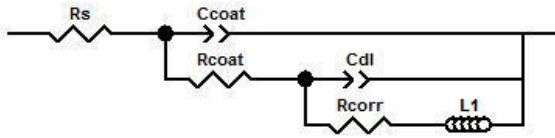
Estos incluyen una resistencia a la solución, R_s , un elemento de fase constante para la doble capa electroquímica, CPE1, y una resistencia a la polarización o a la transferencia de carga, R_p . estos últimos conectados en paralelo. El circuito equivalente propuesto para las pruebas en NaCl 0.5 y 0.1 M a 60° C, incluye un inductor, L1, el cual representa una distorsión en el segundo semicírculo del Diagrama de Nyquist sugiriendo procesos de adsorción de especies sobre la superficie del metal.



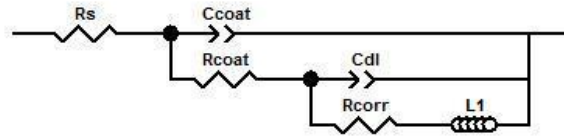
(a) NaCl 0.5 M a 25 °C.



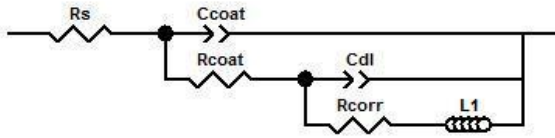
(b) NaCl 0.5 M y 0.1 M a 60 °C.



(c) NaCl 0.05 M a 60 °C.



(d) NaCl 0.05 M a 60 °C.



(e) NaCl 0.01 M a 60 °C.

Figura 58. Circuitos equivalentes

3.7. COMPARACIÓN DE VALORES EN LAS DIFERENTES SOLUCIONES DE TRABAJO

Solución y temperatura de trabajo	Curvas de Polarización			Ruido Electroquímico
	I_{corr} A	E_{corr} mV	R_p ohms cm ²	R_n ohms cm ²
NaCl 0.5 M 25° C	8.70E-07	- 769.47	2.75E+07	8.12E+06
NaCl 0.5 M 60° C	2.57E-06	- 708.70	4.40E+06	1.10E+06
NaCl 0.1 M 60° C	2.34E-06	- 839.10	7.35E+06	5.10E+06
NaCl 0.05 M	2.04E-05	- 518.38	6.58E+05	6.65E+05

60° C				
NaCl 0.01 M 60° C	1.86E-05	- 630.57	9.59E+05	1.79E+06

CAPITULO 4

4.1. CONCLUSIONES

Los resultados mostraron en un inicio, que la resistencia a la corrosión del acero dual en NaCl es mayor a 60° C, a esta temperatura los valores más estables se presentaron en las concentraciones entre 0.5 y 0.1 M.

Tanto la R_p y R_n del acero antes mencionado tienen una clara similitud, es decir que ambas tienen una tendencia igual con respecto a la concentración de la solución de trabajo.

Sin embargo, cuando se hace la evaluación en el cloruro de sodio a diferentes concentraciones y temperatura de 60° C se observa que la resistencia a la corrosión del acero dual es mayor a bajas concentraciones del medio acuoso, por lo que se recomendaría trabajar en concentraciones intermedias estudiadas en el presente trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. A, Kumar et al., Mater. Sci. Eng. A (2007), Influence of bainite/martensite-content on the tensile properties of low carbon dual-phase steels.
2. Acreditación FCJPSyRRII. Metales Ferrosos y no ferrosos.
3. Askeland, D. R., Llidó, J. B., & de Pedro, J. B. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales* (Vol. 3). México: International Thomson Editores.
4. B. Baroux. "Further insights on the pitting corrosion of stainless steels", in (Eds.) P. Marcus, J. Oudar, Corrosion mechanisms in theory and practice, Marcel Dekker Inc., New York, 1995.
5. Báez, S., Tristáncho, J. L., Peña, D. Y., Vázquez, C., & Anaya, H. A. (2004). La espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) aplicada al estudio del mecanismo de la corrosión en caliente por sales fundidas. *Dyna*, 71(144), 39-47.
6. Basáñez, Miguel (1990). La lucha por la hegemonía en México 1968-1990. México: Siglo XXI Editores. ISBN 978-968-23-1659-3.
7. Carlos Javier Selvan Farris. Corrosión por agrietamiento. 2015.
8. Carlos Javier Selvan Farris. Corrosión por exfoliación y disolución selectiva. 2015.
9. Cocuyo, M. I. F., & Martínez, R. G. Estudio electroquímico del fenómeno de corrosión de aceros API 5L utilizados en sistemas de ductos que transportan hidrocarburos.
10. Corrosión por picadura o "pitting". NCH Latin America. 2022.
11. Corrosión selectiva - ingeniería mecánica. Abril 13, 2015.
12. Corrosión y degradación de los metales, escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2771/1/CD-0553.pdf>
13. Corrosión y degradación de los metales. Escuela Politécnica Nacional.
14. Criado M, Fajardo S, Valdez B, Bastidas JM. Aspectos cinéticos de la corrosión y fenómenos de pasividad. En Valdez Salas B, & Schorr Wiener M (Eds.). Corrosión y preservación de la infraestructura industrial. Barcelona, España: OmniaScience; 2013. pp. 11-32.
15. El proceso de corrosión. Ingeniería Química desde cero. Canal de Youtube.

16. Escobar, D., Calderón, J., & Minotas, J. (2011). Estudio de la corrosión mediante la técnica de ruido electroquímico.
17. Formación de Picaduras – Corrosión. Merus.
18. Guerrero Vaca, G. R. (2013). Análisis comparativo de los procesos de eliminación de recubrimientos antiadherentes fluoropoliméricos en superficies metálicas entre tecnologías láser y pirolíticas. Tesis doctoral. Universidad de Málaga.
19. Heng Chen, Zhaochong Lv, Lin Lu, Yunhua Huang, Xiaogang Li (2021), Correlation of micro-galvanic corrosion behavior with corrosion rate in the initial corrosion process of dual phase steel. *Journal of Materials Research and Technology*.
20. Hernández Mirna. Puente Tampico es un riesgo para conductores. El sol de Tampico. 2020.
21. Illescas Fernández, Silvia. (2007) Estudio del efecto de los elementos microaleantes en un acero HSLA, Madrid.
22. Industrial Cleaning. La Eliminación de Óxido y el Control de la Corrosión es una Tarea Industrial Vital. By Painters USA Team. January 30, 2023.
23. Ipohorsky, M. (2011). Una mirada al microscopio electrónico de barrido. *Hojitas de Conocimiento. Materiales; n° 4*.
24. Iron and Steel Institute, “Advanced High Strength Steels (AHSS): Application Guidelines”, Iron and Steel Institute, Committee of Automotive Applications, 2005.
25. Iturralde Borbor, E. R. (2010). Determinación de curvas de polarización potencioestáticas y galvanostáticas para conocer la velocidad de corrosión en aceros a42 e inox 304 a inmersión en agua al 3.5% de cloruro de sodio (Bachelor's thesis).
26. J. Ma. Gómez de Salazar J.C. Suarez, G.D. Velasco Y A. Ureña, Caracterización de un acero H.S.L.A. De fabricación nacional, Madrid
27. JoVE Science Education Database. Química analítica. Electrochemical Measurements of Supported Catalysts Using a Potentiostat/Galvanostat. JoVE, Cambridge, MA, (2023).
28. Juan Pablo Chumba Lara. Tipos de Corrosión - Textos Científicos.

29. Kiyokazu Nakagawa, Yasuo Matsunaga & Takahiro Yanagisawa (2003) Corrosion behavior of ferritic steels on the air sides of boiler tubes in a steam/air dual environment, *Materials at High Temperatures*, 20:1, 67-73, DOI: [10.1179/mht.2003.010](https://doi.org/10.1179/mht.2003.010).
30. Koch, G. (2017). Cost of corrosion. *Trends in oil and gas corrosion research and technologies*, 3-30.
31. Kosel, T. H., & Ahmed, T. (1992). The edge effect in solid particle erosion of ceramic second-phase particles. *Key Engineering Materials*, 71, 149-194.
32. L. Feirer, John. (2000). *Maquinado de metales con máquinas herramientas, principios y prácticas*. Ed. Quinta, México, D.F, Continental, S.A. de C.V.
33. LINE-X México: Líder mundial en recubrimiento termoplástico.
34. Lorusso, H., Burgueño, A., & Svoboda, H. (2008). Propiedades mecánicas y caracterización microestructural de diferentes aceros Dual-Phase. *SAM/CONAMET*, 8, 282-285.
35. M. Delince, Y. Brechet, J.D. Embury, M.G.D. Geers, P.J. Jacques, T. Pardo, "Structure–property optimization of ultrafine-grained dual-phase steels using a microstructure-based strain hardening model", *Acta Materialia* 55, 2007, pp. 2337-2350.
36. Martín Saavedra, R. (2014). Simulación mediante circuitos equivalentes de la impedancia electroquímica de armaduras de acero inoxidable en mortero (Tesis de Maestría).
37. Muñoz Portero, M. J. (2011). Características y usos de los diagramas de Pourbaix.
38. Oğuzhan Keleştemur, Servet Yıldız, (2009), Effect of various dual-phase heat treatments on the corrosion behavior of reinforcing steel used in the reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials*, Tukey.
39. PDVSA GAS. La corrosión en la industria petrolera
40. Perez, J. B., Palacio, J. A. A., Picon, A. A., Rueda, J. J. A., Sua, G. E. G., & Suarez, L. C. M. (2004). Diseño y construcción de un prototipo de potencióstato galvanostato para el laboratorio de corrosión de la escuela de ingeniería metalúrgica. *Revista UIS Ingenierías*, 3(1), 29-40.

41. PP Sarkar, P. Kumar, Manas Kumar Manna, PC Chakraborti, (2005) Microstructural influence on the electrochemical corrosion behaviour of dual-phase steels in 3.5% NaCl solution, India.
42. R. A. Cottis, "Interpretation of Electrochemical noise data", Corrosion, Vol. 57, No. 3, pp. 265-285, 2001.
43. Ramírez-Arteaga, A. M. (2011). Efecto de la velocidad de enfriamiento y de recocidos intercríticos en la corrosión por H₂SO₄, NaCl y NaOH de un acero de doble fase. Tesis doctoral. Centro de Investigación en Materiales Avanzados.
44. Rodríguez Galeano, Karol. (2013), Aceros Bainíticos y la Influencia del Boro sobre sus Propiedades Mecánicas, Colombia.
45. Rojas Ochoa Daniel Andres. Edad de los metales. Presentación Power Point.
46. S. Harsimran K. Santosh¹ K. Rakesh, (2021), Harsimran et al., Proceedings on Engineering Sciences, Vol. 03, overview of corrosion and corrosion control: a critical review.
47. S. Lalam, B. Yan, "Weldability of AHSS", Society of Automotive Engineers, International Congress, Detroit, 2004.
48. Salazar-Jiménez, J. (2015) Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales (Nota técnica). Tecnología en Marcha. Vol. 28, N° 3,
49. Salazar-Jiménez, J. A. (2015). Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales. Revista Tecnología en Marcha, 28(3), 127-136.
50. Sarkar, P. P., Kumar, P., Manna, M. K., & Chakraborti, P. C. (2005). Microstructural influence on the electrochemical corrosion behaviour of dual-phase steels in 3.5% NaCl solution. *Materials Letters*, 59(19-20), 2488-2491.
51. Satya Vani Yadla, V.Sridevi, M.V.V.Chandana Lakshmi, S.P.Kiran Kumari. A review on corrosion of metals and protection.
52. Standard ASTM G-1. Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens.

53. Tooru Tsuru, Yanliang Huang, Md. Rostom Ali, Atsushi Nishikata, (October 2005), Corrosion Science, Hydrogen entry into steel during atmospheric corrosion process
54. Vázquez, Marcela. (2014). El peor de los villanos cuando dominan los metales. Primera edición. Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina.
55. Vázquez, Marcela. (2014). El peor de los villanos cuando dominan los metales. Primera edición. Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina.
56. Vázquez, Marcela. (2014). El peor de los villanos cuando dominan los metales. Primera edición. Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina.
57. Walker, P., & Tarn, W. H. (Eds.). (1990). *CRC handbook of metal etchants*. CRC press.

Clave Única de Registro de Población (CURP): REAG000104MGRNRSA1

Clave Conahcyt del tesista (CVU/6 o 7 dígitos): 2034769

Clave Conahcyt del Director (a) de tesis (CVU/6 o 7 dígitos): 171770



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA
Programas educativos de calidad reconocidos por CIEES, CACEI y CONACYT
SGI certificado en la norma ISO 9001:2015 e ISO 21001:2018

Gestión Académica.
Jefaturas de Programa Educativo.



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

FORMA T-4A
NOMBRAMIENTO COMITÉ REVISOR

Cuernavaca, Mor., a **31 de mayo de 2024**

DR. ROY LOPEZ SESENES
MTRA. EGHNA ARANDA MANJARREZ
DRA. AMERICA MARIA RAMIREZ ARTEAGA
MTRA. ANGELICA GALINDO FLORES
ING. KAREN GUADALUPE SUAREZ SANCHEZ
P R E S E N T E

Me permito comunicarles que han sido designados integrantes del **COMITÉ REVISOR** del trabajo de **TESIS** titulada:
EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE UN ACERO DUAL EN MEDIO ALCALINO.

Que presenta la **C. GISELLE WENDOLYNE RENDON ARANDA**

Dirigido por: **DRA. AMERICA MARIA RAMIREZ ARTEAGA**

Del programa educativo de: **INGENIERÍA INDUSTRIAL** de la **FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA**

Para obtener el grado académico de: **LICENCIATURA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

ATENTAMENTE
Por una humanidad culta

Se anexa firma electrónica
MTRA. ANGÉLICA GALINDO FLORES
DIRECTORA INTERINA DE LA FCQel

D I C T A M E N

MTRA. ANGÉLICA GALINDO FLORES
DIRECTORA INTERINA DE LA FCQel
P R E S E N T E

En respuesta a su amable solicitud para emitir DICTÁMEN sobre el trabajo que se menciona, me permito informarle que nuestro voto es:

VOTO	NOMBRE
APROBATORIO	DR. ROY LOPEZ SESENES
APROBATORIO	MTRA. EGHNA ARANDA MANJARREZ
APROBATORIO	DRA. AMERICA MARIA RAMIREZ ARTEAGA
APROBATORIO	MTRA. ANGELICA GALINDO FLORES
APROBATORIO	ING. KAREN GUADALUPE SUAREZ SANCHEZ

Se anexan firmas electrónicas de cada revisor, en las cuáles se incluye la fecha y hora que se ha emitido el voto aprobatorio.

AGF/kgss





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

ANGELICA GALINDO FLORES | Fecha:2024-06-03 10:37:47 | FIRMANTE

e80C7WDpiZLNC06lhWJ5BpeHZPzJyG65H0ThlWcCRMvVXk0JiBfeLA4xNpfs00Tzaai4LySJKQO2B3Nm+fQpGXofyOOtxFvdi5OqRaREEsP1fVhAgAKdNEdODlbnq50Op+B3IRyIYiKYJ9wKoV+GUK0hl7Isqycy7Ww3guq6kvNBvPRtCSxVzZN+KOewhTwDc0HV4VxzSFVBJFuJil7Z999hhwiveYMJDYSMomK6AnlQ1/KyUPHQVArjE57RH5gQEeGDBvYkw7gynEgLv1LONI+RrjvR4zzTbrfp+FpRD/juuUT3MC2rfBw8Yl6iJK4p9zIGuGvjmFZCeVXT0lqodg==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[CVnacuGh9](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/osao83wo0O7kMwNQb9ikzekPLHqfb9sM>



UAEM
RECTORÍA
2023-2029



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

EGHNA ARANDA MANJARREZ | Fecha:2024-06-03 22:21:29 | FIRMANTE

fnjpiNubNHMnT5umSxYeXnHEtK5n3stciUF+7aLWbTU25AneEBZ+bTvGY6QjNZ2Sm3e15goPTKNu9hTJTHXRZssJ7ngz1+LIFV1Lio/OOL8YF3Xm95cUjBTbUj8aJM17SrEcAy5878web7czF7sXpmcqCQq7Fmc3oUr6U64BCszcCPD6EIS0cB6zvsXctqPfZ/HGwVGVw0ETgSEn6Az8RRpq7mRHnZlh+5FPXzMXRxsUQCe6yz1+A6wQcN4CBk+joh9KB9EPtr7pe+YmJXNSOeoY94+wC6hmOJA07ak7BsBDa0o/e/fjgO/W69wLzeafqHttC9aZQ/BYJzbPpRA==

KAREN GUADALUPE SUAREZ SANCHEZ | Fecha:2024-06-04 10:47:40 | FIRMANTE

KjLAd25kHYqc7inF9PVHbKqU3pLNZSSRT95f1TDzNUXE9XR9Wnlu3s7J4hBIT14TYhPIPCDcbWSn+sphOfnBSwULM48VMjsb6ToObSPUZod8g7qqqZ55o4YNZEC3rjbjNQUPqRpBT2BvSCi9FwQyMGkhFK6KESIHMovtB0lc0vg6hSsHP3HwCfcVdQw4s2+QC7uWuyIVkwwp3HnrIKVCMsQ6m6eqQ46ClrL5EWGPMqYK175MLPXWC0tY29V2WwPjt27wJ/PK5vVo+kiZpvaalPiMoS+oPYooAYTTTj73KfYLc0ouZ8W0+zBgOu/0vNnbXR9f7eWSk4PvLZZPZ6Ow==

ANGELICA GALINDO FLORES | Fecha:2024-06-04 13:04:01 | FIRMANTE

qzpSBnJxzoqS8YL4Wpz2q730Ujgk8cHi1dYjvzZ39WAKG+PAoE+INFXmHJur9ruCEO7o/NM7A5v8BOMch4iWst99ajkgPr3N92XdNOEYUeU3wlan09FAr66dH0J6nhPvseDdOGNXO2K08ss5IUvPvgKXogkp3VUjK5PHcX1fmzSSdn1ArrpEaASi5ATb3UD246oKYZjG2NmnDJkKLhJxqbaeCmy1ifVysZ4TeBSB0VOOPxKjEgJcKYiWfllilzx/x47BINfVlgZrelk4hWspKhjIUALtQJeOYwAu8pkZkfp64EKQXGPGaSUdspmZXIYKfMyfz2KL/99q/VWH0pffQ==

AMERICA MARIA RAMIREZ ARTEAGA | Fecha:2024-06-05 17:18:13 | FIRMANTE

SLBNkFokjRCVpaMaV7S+t3Ut3l27mGcOudouT1N4DB2Pmd2LinyJ3iYem1YqTVhfhq1hVKFVzv2FDd0fOz9cww7OEcDv0A13Pa0gl3r7LyHu86SllkC8SeGCUXfsR0ggIqa2irgc+BxfOhkGa8ryFC0Rkxx8ToS8K9k/GqT6hkI07vpcprF84GZA0w27lJjXMeUJ3mRytnNkYtPsulHh5sL+2Fon7p7oQMxwXpiEftQMbzYmZNI3EurThKq58SJ0Nn1LRwhsZ0tU3UpYuOUY//rhPuHTIK+Pu9tHpJxl/BaQ0ZukMmbK/ETfWRHl8oguoImh7psW46aRBOPUWew==

ROY LOPEZ SESENES | Fecha:2024-06-05 18:16:27 | FIRMANTE

jUCVp+UTXb1BmkcYtM4+XOsQARJJtesxUwv1si/edMHT3i4hf/KzTsC2SKjRvBrBUBhrw19tFub3zNY/FznEaM5R0ei/CnYMdNL89/7mi/JmZv5KI6L2QZF5FZw5ABI0/zouSSc4Sf2HwahdxSxEx8n9KZsNMV54jK/9V7fLF2a0yrmPqWlM2Y/pNxlcrNo9binZT9bgTHYt6VLtOlvy4kO5iWvoiP3iSVOLvNb7fwKkKfali1XVRCwQxW/U5bl/x2NjKbEXKmTeSi7wPdb7nDPGdxOGmVkpAOI3zsDbN4jKr6owb76RC1yzCKAgtckpwwqbjN4i88Hh7ZpQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



XdcNKpPon

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/S0qWbHcUP5CWUJjwImftADtSv8MY1P>



UAEM
RECTORÍA
2023-2029