



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE CHIHUAHUA

**“COMPORTAMIENTO ELECTROQUÍMICO DE UN NUEVO
ELEMENTO METÁLICO PROPUESTO COMO SUSTITUTO
EN EL SISTEMA ACERO-CONCRETO”**

T e s i s

Que presenta para obtener el grado de:

DOCTOR EN INGENIERÍA

p r e s e n t a

Adán Borunda Terrazas

EGRESADO DEL PROGRAMA DOCTORAL EN INGENIERIA

DIRECCIÓN:

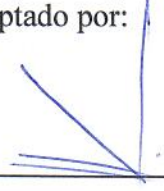
Dr. Juan Pablo Flores De Los Ríos

Chihuahua, Chih.

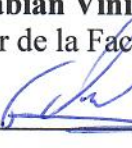
Octubre de 2025



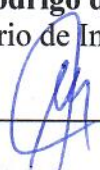
Comportamiento Electroquímico de un nuevo elemento metálico propuesto como sustituto en el sistema acero-concreto. Tesis presentada por Adán Borunda Terrazas como requisito parcial para obtener el grado de Doctorado en Ingeniería, ha sido aprobado y aceptado por:



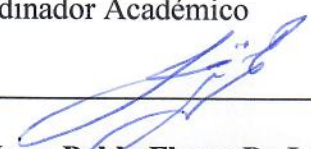
M.I. Fabián Vinicio Hernández Martínez
Director de la Facultad de Ingeniería



M.I. Rodrigo de la Garza Aguilar
Secretario de Investigación y Posgrado



Dr. Alejandro Villalobos Aragón
Coordinador Académico



Dr. Juan Pablo Flores De Los Ríos
Director de Tesis

Marzo 2026

COMITÉ

Dr. Juan Pablo Flores De Los Ríos

Dr. José G. Chacón Nava

Dra. Claudia Georgina Nava Dino

Dra. María Cristina Maldonado Orozco

Dr. Roberto Narro García



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

22 de abril de 2026.

M.C. ADAN BORUNDA TERRAZAS
Presente. -

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Doctor en Ingeniería, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director **Dr. Juan Pablo Flores De Los Ríos** para que lo desarrolle como Tesis, con el título **"Comportamiento electroquímico de un nuevo elemento metálico propuesto como sustituto en el sistema acero-concreto"**.

Índice de Contenido

Lista de figuras
Lista de tablas
Resumen

CAPITULO I. INTRODUCCION

- 1.1 Planteamiento del problema
- 1.2 Antecedentes
- 1.3 Justificación del estudio
- 1.4 Objetivo de la Investigación
- 1.5 Objetivos particulares
- 1.6 Hipotesis

CAPITULO II. CONCRETO

- 2.1 Concreto
- 2.2 Tipos de cemento
 - 2.2.1 Especificación de estándar para cemento Portland
- 2.3 Corrosión en estructuras de concreto
- 2.4 Factores que afectan la durabilidad del concreto
 - 2.4.1 Dosificación del Concreto
 - 2.4.2 Compacidad y Homogeneidad
 - 2.4.3 Espesor del recubrimiento del concreto
 - 2.4.4 Humedad Ambiental
 - 2.4.5 Efecto del Oxígeno
 - 2.4.6 Efecto de la temperatura
 - 2.4.7 Estado Superficial del Acero



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

- 2.4.8 Carbonatación
- 2.4.9 Ataque por cloruros
- 2.5 Deterioro de elemento metálico en el sistema acero-concreto
- 2.6 Pasivación de los elementos metálicos
- 2.7 Soluciones poro
- 2.8 Elementos metálicos utilizados el sistema acero-concreto
 - 2.8.1 Barras de Refuerzo de Acero
 - 2.8.2 Barras de Refuerzo Galvanizadas
 - 2.8.3 Barras de Refuerzo de Acero Inoxidable

CAPITULO III. ACEROS INOXIDABLES

- 3.1 Introducción
 - 3.1.1 Número equivalente de Resistencia a Picaduras (PREN).
- 3.2 Aceros inoxidable ferríticos
- 3.3 Aceros inoxidable austeníticos
- 3.4 Aceros inoxidable martensíticos
- 3.5 Aceros inoxidable endurecibles por precipitación
- 3.6 Aceros inoxidable supermartensíticos
- 3.7 Aceros inoxidable Duplex
- 3.8 Función primordial de elementos de aleación
 - 3.8.1 Influencia de los elementos de aleación en el acero inoxidable
- 3.9 Tratamientos térmicos de los aceros inoxidable
- 3.10 Uso de los aceros inoxidable en la Ingeniería Civil

CAPITULO IV. TECNICAS ELECTROQUIMICAS y MEB

- 4.1 Introducción
- 4.2 Curvas de polarización (CP)
- 4.3 Potencial de Corrosión (E_{cor})
- 4.4 Resistencia a la polarización lineal (R_p)
- 4.5 Curvas Cíclicas de Polarización (CCP)
- 4.6 Ruido Electroquímico (R_n)
- 4.7 Microscopía Electrónica de Barrido MEB

CAPITULO V. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

- 5.1 Caracterización del material metálico propuesto como elemento de refuerzo, acero inoxidable supermartensítico UNS S41425



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

- 5.1.5 Materiales y equipo
- 5.1.2 Caracterización microestructural
- 5.1.3 Determinación de la dureza Rockwell C
- 5.1.4 Composición química
- 5.1.5 Propiedades mecánicas
- 5.2 Caracterización del comportamiento mecánico de las tres relaciones agua/cemento 0.45, 0.55 y 0.65
- 5.3 Elaboración de los especímenes de concreto a las diferentes relaciones agua/cemento, 0.45, 0.55 y 0.65, utilizando los dos elementos metálicos
- 5.4 Comportamiento Electroquímico en los medios propuestos, solución salina y soluciones poro
 - 5.4.1 Potencial de corrosión
 - 5.4.2 Resistencia a la polarización (Rn)
 - 5.4.3 Curvas Cíclicas de Polarización (CCP)
- 5.5 Comportamiento electroquímico en solución salina y poro
- 5.6 Solución poro con diferentes contenidos de cloruro de sodio
- 5.7 Pruebas en solución salina a diferentes pH
- 5.8 Identificación de los productos de corrosión mediante Microscopía Electrónica de Barrido

CAPITULO VI. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

- 6.1 Composición química del acero inoxidable supermartensítico UNS S41425
- 6.2 Propiedades mecánicas del acero inoxidable supermartensítico UNS S41425
- 6.3 Dureza del acero inoxidable supermartensítico UNS S41425
- 6.4 Metalografía en las condiciones de recibido del acero inoxidable supermartensítico UNS S41425
- 6.5 Resistencia del concreto a la compresión de las tres relaciones agua/cemento, 0.45, 0.55 y 0.65
- 6.6 Potencial de corrosión
 - 6.6.1 Acero al carbono AISI 1018
 - 6.6.2 Acero inoxidable supermartensítico UNS S41425
- 6.7 Cinética de corrosión en los medios de experimentación propuestos, salina y soluciones poros
 - 6.7.1 Probetas con las tres relaciones agua cemento embebidas (0.45, 0.55 y 0.65) inmersas en NaCl 5%
- 6.8 Estados de pasivación-activación-transpasivación y los parámetros electroquímicos correspondientes



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

- 6.8.1 Acero AISI 1018, solución poro con tres contenidos de NaCl (1%, 3% y 5%)
- 6.8.2 SM S41425 solución poro con contenidos NaCl (1%, 3% y 5%)
- 6.8.3 Solución salina 5% de NaCl con dos valores de pH a 6.5 y 12
- 6.9 Condiciones finales de los elementos metálicos
- 6.10 Morfologías obtenidas después de la experimentación mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

CAPITULO VII. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

Recomendaciones para trabajos posteriores

Referencias Bibliograficas

ATENTAMENTE
"naturam subiecit allis"

EL DIRECTOR

M.I. FABIÁN VINICIO HERNÁNDEZ

FACULTAD DE
INGENIERÍA
U.A.CH.



SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO

M.I. RODRIGO DE LA GARZA AGUILAR

DIRECCIÓN

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a la Universidad Autónoma de Chihuahua que, a través del Posgrado de la Secretaría de Investigación y Posgrado de la Facultad de Ingeniería, me brindó la oportunidad de desarrollar mis estudios profesionales para la obtención del grado de Doctor en Ingeniería.

A mis directores, Dr. Juan Pablo Flores De Los Ríos y al Dr. José Guadalupe Chacón Nava en su acompañamiento, consejos y aportaciones académicas durante todo el proceso de realización de mi investigación para la culminación de mi Tesis Doctoral.

A los integrantes asignados en mi comité tutorial, que me acompañaron y brindaron sus conocimientos, revisiones y aportaciones durante todo este tiempo:

Dra. Claudia Georgina Nava Dino

Dra. María Cristina Maldonado Orozco

Dr. Roberto Narro García

Dr. Juan Pablo Flores De Los Ríos

Dr. José Guadalupe Chacón Nava

Al Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C., por brindarme la oportunidad de desarrollar parte de mi experimentación en sus laboratorios, en especial al personal del Laboratorio de Corrosión y Protección.

A todos los compañeros y amigos que de una u otra manera contribuyeron en este logro, brindándome siempre su amistad y apoyo.

DEDICATORIA

*Con un sentimiento muy especial y profundo dedico
este logro de mi vida a mi esposa “Diany”
la C.P. Diana Leticia Corral Díaz, por todo su
apoyo incondicional y grande amor brindado
durante todo este acompañamiento de mi vida.*

*Así como a mis dos fuentes de inspiración, mis hijas
Diana María, “Dianita” y Mariana, “Marianita”
por su inmenso amor que siempre me han mostrado
y que sido una gran fuente de energía para el logro
de este propósito de mi vida.*

A mi padre Celestial



CONTENIDO

Lista de figuras.....	05
Lista de tablas.....	10
Resumen.....	11

CAPITULO I. INTRODUCCION

1.1 Planteamiento del problema.....	17
1.2 Antecedentes.....	17
1.3 Justificación del estudio.....	21
1.4 Objetivo de la Investigación.....	23
1.5 Objetivos particulares.....	23
1.6 Hipotesis.....	25

CAPITULO II. CONCRETO

2.1 Concreto.....	26
2.2 Tipos de cemento.....	28
2.2.1 Especificación de estándar para cemento Portland.....	29
2.3 La corrosión del acero en el concreto.....	32
2.4 Factores que afectan la durabilidad del concreto.....	34
2.4.1 Dosificación del Concreto.....	35
2.4.2 Compacidad y Homogeneidad.....	36
2.4.3 Espesor del recubrimiento del concreto.....	37
2.4.4 Humedad Ambiental.....	37
2.4.5 Efecto del Oxígeno.....	38
2.4.6 Efecto de la temperatura.....	39
2.4.7 Estado Superficial del Acero.....	39
2.4.8 Carbonatación.....	40
2.4.9 Ataque por cloruros.....	43
2.5 Deterioro de elemento metálico en el sistema acero-concreto...47	
2.6 Pasivación de los elementos metálicos.....	50
2.7 Soluciones poro.....	53



2.8 Elementos metálicos utilizados el sistema acero-concreto.....	56
2.8.1 Barras de Refuerzo de Acero.....	56
2.8.2 Barras de Refuerzo Galvanizadas.....	59
2.8.3 Barras de Refuerzo de Acero Inoxidable.....	61

CAPITULO III. ACEROS INOXIDABLES

3.1 Introducción.....	62
3.1.1 Número equivalente de Resistencia a Picaduras (PREN).....	63
3.2 Aceros inoxidable ferríticos.....	64
3.3 Aceros inoxidable austeníticos.....	66
3.4 Aceros inoxidable martensíticos.....	70
3.5 Aceros inoxidable endurecibles por precipitación.....	71
3.6 Aceros inoxidable supermartensíticos.....	72
3.7 Aceros inoxidable Duplex.....	74
3.8 Función primordial de elementos de aleación.....	76
3.8.1 Influencia de los elementos de aleación en el acero inoxidable.....	76
3.9 Tratamientos térmicos de los aceros inoxidable	79
3.10 Uso de los aceros inoxidable en la Ingeniería Civil.....	84

CAPITULO IV. TECNICAS ELECTROQUIMICAS y MEB

4.1 Introducción.....	87
4.2 Curvas de polarización (CP).....	89
4.3 Potencial de Corrosión (E_{corr}).....	90
4.4 Resistencia a la polarización lineal (R_p).....	92
4.5 Curvas Cíclicas de Polarización (CCP).....	95
4.6 Ruido Electroquímico (R_n).....	101
4.7 Microscopía Electrónica de Barrido MEB.....	103

CAPITULO V. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

5.1 Caracterización del material metálico propuesto como elemento de refuerzo, acero inoxidable supermartensítico UNS S41425....	104
--	-----



5.1.1 Materiales y equipo.....	104
5.1.2 Caracterización microestructural.....	106
5.1.3 Determinación de la dureza Rockwell C.....	108
5.1.4 Composición química.....	109
5.1.5 Propiedades mecánicas.....	110
5.2 Caracterización del comportamiento mecánico de las tres relaciones agua/cemento 0.45, 0.55 y 0.65.....	112
5.3 Elaboración de los especímenes de concreto a las diferentes relaciones agua/cemento, 0.45, 0.55 y 0.65, utilizando los dos elementos metálicos.....	113
5.4 Comportamiento Electroquímico en los medios propuestos, solución salina y soluciones poro.....	114
5.4.1 Potencial de corrosión.....	116
5.4.2 Resistencia a la polarización (R_n).....	118
5.4.3 Curvas Cíclicas de Polarización (CCP).....	119
5.5 Comportamiento electroquímico en solución salina y poro.....	120
5.6 Solución poro con diferentes contenidos de cloruro de sodio.....	121
5.7 Pruebas en solución salina a diferentes pH.....	122
5.8 Identificación de los productos de corrosión mediante Microscopía Electrónica de Barrido.....	125

CAPITULO VI. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

6.1 Composición química del acero inoxidable supermartensítico UNS S41425.....	126
6.2 Propiedades mecánicas del acero inoxidable supermartensítico UNS S41425.....	128
6.3 Dureza del acero inoxidable supermartensítico UNS S41425..	130
6.4 Metalografía en las condiciones de recibido del acero inoxidable supermartensítico UNS S41425.....	131
6.5 Resistencia del concreto a la compresión de las tres relaciones agua/cemento, 0.45, 0.55 y 0.65.....	132
6.6 Potencial de corrosión.....	135
6.6.1 Acero al carbono AISI 1018.....	136
6.6.2 Acero inoxidable supermartensítico UNS S41425.....	139
6.7 Cinética de corrosión en los medios de experimentación propuestos, salina y soluciones poros.....	141



6.7.1 Probetas con las tres relaciones agua cemento embebidas (0.45, 0.55 y 0.65) inmersas en NaCl 5%.....	142
6.8 Estados de pasivación-activación-transpasivación y los parámetros electroquímicos correspondientes.....	154
6.8.1 Acero AISI 1018, solución poro con tres contenidos de NaCl (1%, 3% y 5%).....	154
6.8.2 SM S41425 solución poro con contenidos NaCl (1%, 3% y 5%).....	159
6.8.3 Solución salina 5% de NaCl con dos valores de pH a 6.5 y 12.....	165
6.9 Condiciones finales de los elementos metálicos.....	174
6.10 Morfologías obtenidas después de la experimentación mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).....	178
 CAPITULO VII. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES.....	193
 Recomendaciones para trabajos posteriores.....	196
 Referencias Bibliograficas.....	197



Lista de figuras

Figura 1. Colado de un concreto mediante equipo industrial.....	27
Figura 02. Reacciones anódicas y catódicas del acero en corrosión.....	34
Figura 03. Corrosión del acero en soluciones acuosas como una función del pH, mostrando el efecto de la capa pasiva cercas de un pH 12.5.....	41
Figura 04. Niveles de pH para la carbonatación, corrosión e indicador de la fenolftaleína.....	41
Figura 05. Rompimiento de pasividad de una armadura embebida en concreto..	45
Figura 06. Alto de nivel de corrosión en el hierro de una armadura.....	48
Figura 07. Formación de la pasivación de un acero inoxidable.....	52
Figura 08. Relación de familia de los aceros inoxidable ferríticos.....	66
Figura 09. Diagrama Schaeffler-Delong.....	69
Figura 10. Relación de familia de los aceros inoxidable austenítico.....	70
Figura 11. Relación de familia de los aceros inoxidable martensíticos.....	74
Figura 12. Tipos de familias de aceros inoxidable en función del contenido de cromo y níquel.....	78
Figura 13. Tipos de familias de aceros inoxidable en función del contenido de cromo y carbono.....	78
Figura 14. Embarcadero de Progreso, Yucatán (México).....	86
Figura 15. Las curvas de polarización en un estado de activación	89
Figura 16. Conexiones con el electrodo de referencia a la estructura de concreto reforzado.....	90
Figura 17 Equipo e instrumentos de medición para el Potencial de Corrosión.....	91
Figura 18. Curva típica de resistencia a la Polarización Lineal	94
Figura 19. Lazo de histéresis de una curva de polarización cíclica.....	96
Figura 20. Procesamiento de las series de tiempo de voltaje y corriente.....	102
Figura 21. Seccionamiento de la barra del acero SM UNS S41425.....	104
Figura 22. Elementos metálicos utilizados en el sistema acero-concreto.....	105



Figura 23. Equipo metalográfico utilizado.....	106
Figura 24. Muestra metalográfica del acero supermartesítico UNS S41425.....	107
Figura 25. Microscopio Metalúrgico acoplado a analizador de imágenes.....	107
Figura 26. Sitios de dureza del acero inoxidable UNS S41425.....	108
Figura 27. Medidor de dureza Rockwell C.....	109
Figura 28. Espectrómetro de Emisión por Plasma (ICP-OES).....	110
Figura 29. Máquina Universal Instron utilizada para las pruebas de tensión.....	111
Figura 30. Máquina Universal Instron utilizada para las pruebas de tensión.....	112
Figura 31. Máquina de compresión universal.....	113
Figura 32. Probetas de concreto utilizadas en la experimentación.....	114
Figura 33. Monitoreo electroquímico de las muestras de acero-concreto.....	115
Figura 34. Multímetro de alta impedancia utilizado en la experimentación.....	117
Figura 35. Electrodo o material de estudio mediante el arreglo electroquímico.....	119
Figura 36. Montaje experimental utilizado.....	124
Figura 37. Arreglo electroquímico característico.....	124
Figura 38. Microscopio Electrónico de Barrido	125
Figura 39. Curva de esfuerzo deformación de la probeta 1 del UNS S41425	128
Figura 40. Curva de esfuerzo deformación de la probeta 2 del UNS S41425	129
Figura 41. Metalografía proporcionada y obtenida en el laboratorio.....	132
Figura 42. Cilindros de concretos cabeceados con azufre.....	133
Figura 43. Resistencia a la compresión del concreto en función de la relación agua cemento.....	134
Figura 44. Esquema gral para realizar la medición de potenciales de corr.....	135



Figura 45. Comportamiento del acero al carbono durante todo el periodo de exposición.....	138
Figura 46. Comportamiento del acero inoxidable supermartensítico UNS S41425 durante todo el periodo de exposición.....	141
Figura 47. Comportamiento del ac. AISI 1018 en el primer año de exposición...	143
Figura 48. Comportamiento del SM UNS S41425 Del primer año de exposición.	143
Figura 49. Comportamiento del AISI 1018 en el segundo año de exposición.....	145
Figura 50. Comportamiento SM UNS S41425 en el segundo año de exposición.	145
Figura 51. Comportamiento del ac. AISI 1018 en el tercer año de exposición....	147
Figura 52. Comportamiento del ac. UNS S 41425 del tercer año de exposición..	148
Figura 53. Comportamiento del acero AISI 1018 al finalizar la exposición.....	150
Figura 54. Comportamiento del acero UNS S41425 al finalizar la exposición....	150
Figura 55. Comportamiento del acero AISI 1018 expuesto en la solución poro..	155
Figura 56. Acero AISI 1018 expuesto en la solución poro con NaCl 1%.....	156
Figura 57. Acero AISI 1018 expuesto en la solución poro con NaCl 3%.....	157
Figura 58. Acero AISI 1018 expuesto en la solución poro con NaCl 5%.....	158
Figura 59. Acero SM UNS S41425 expuesto en la solución poro.....	160
Figura 60. Acero SM UNS S41425 expuesto en la solución poro con NaCl 1%..	161
Figura 61. Acero SM UNS S41425 expuesto en la solución poro con NaCl 3%...	163
Figura 62. Acero SM UNS S41425 expuesto en la solución poro con NaCl 5%...	164
Figura 63. Acero AISI 1018 expuesto en la solución de NaCl 5% y a pH 6.5.....	166
Figura 64. Acero AISI 1018 expuesto en la solución de NaCl 5% y a pH 12.....	167
Figura 65. Ac. AISI 1018 expuesto en la solución de NaCl 5% a pH de 6.5 y 12..	168



Figura 66. Ac. SM UNS S41425 expuesto en solución de NaCl 5% y a pH 6.5...	169
Figura 67. Ac. SM UNS S41425 expuesto en la solución de NaCl 5% y a pH 12.	170
Figura 68. UNS S41425 expuesto en la solución de NaCl 5% a pH de 6.5 y 12...	171
Figura 69. Ambos aceros expuestos en la solución de NaCl 5% a pH de 6.5.....	172
Figura 70. Ambos aceros expuestos en la solución de NaCl 5% a pH de 12.....	173
Figura 72. Condiciones finales del acero AISI 1018, relación a/c 0.45.....	175
Figura 73. Condiciones finales del acero AISI 1018, relación a/c 0.55.....	175
Figura 74. Condiciones finales del acero AISI 1018, relación a/c 0.65.....	176
Figura 75. Condiciones finales del acero UNS 41425, relación a/c 0.45.....	176
Figura 76. Condiciones finales del acero UNS 41425, relación a/c 0.55.....	177
Figura 77. Condiciones finales del acero UNS 41425, relación a/c 0.65.....	177
Figura 78. Comparativo de los dos elementos metálicos utilizados.....	178
Figura 79. Espectro DRX y Morfología de sup. del AISI 1018, con a/c 0.45.....	179
Figura 80. Espectro DRX y Morfología de superficie del AISI 1018, con a/c 0.45..	180
Figura 81. Espectro DRX y Morfología de superficie del AISI 1018, con a/c 0.45..	181
Figura 82. Espectro DRX y Morfología de superficie del AISI 1018, con a/c 0.55..	181
Figura 83. Espectro DRX y Morfología de superficie del AISI 1018, con a/c 0.65..	182
Figura 84. Espectro DRX y Morfología de sup. del UNS S41425, con a/c 0.45...	183
Figura 85. Espectro DRX y Morfología de superficie del AISI 1018, con a/c 0.65..	184
Figura 86. Espectro DRX y Morfología de sup. del UNS S41425, con a/c 0.45...	185
Figura 87. Espectro DRX y Morfología de sup. del UNS S41425, con a/c 0.45....	186
Figura 88. Espectro DRX y Morfología de sup. del UNS S41425, con a/c 0.45...	187



Figura 89. Espectro DRX y Morfología de sup. del UNS S41425, con a/c 0.55...188

Figura 90. Espectro DRX y Morfología de sup. del UNS S41425, con a/c 0.55...189

Figura 91. Espectro DRX y Morfología de sup. del UNS S41425, con a/c 0.55...190

Figura 92. Espectro DRX y Morfología de sup. del UNS S41425, con a/c 0.55...191

Figura 93. Espectro DRX y Morfología de sup. del UNS S41425, con a/c 0.65...192



Lista de tablas

Tabla 01. Transformaciones de los compuestos del cemento portland.....	28
Tabla 02. Soluciones poro utilizadas en distintas investigaciones.....	55
Tabla 03. Clasificación del acero según el esfuerzo de fluencia.....	59
Tabla 04. Aceros inoxidables austeníticos serie 300.....	79
Tabla 05. Propiedades mecánicas mínimas de los ac. inoxidables martensíticos..	83
Tabla 06. Nomenclatura y técnicas electroquímicas utilizadas en las probetas....	116
Tabla 07. Parámetros electroquímicos utilizados.....	121
Tabla 08. Nomenclatura y técnicas electroquímicas utilizadas soluciones poro...	122
Tabla 09. Nomenclatura y técnicas electroquímicas utilizadas con el pH.....	123
Tabla 10. Composición Química del Acero Inoxidable Súper Martensítico	127
Tabla 11. Composición química, especificación ASTM A706/A706M.....	127
Tabla 12. Composición Química para una barra de acero AIS 1018.....	128
Tabla 13. Condesado de resultados del acero inoxidable SM UNS S41425.....	129
Tabla 14. Valores ténsiles de ambos elementos metálicos.....	130
Tabla 15. Dureza del Acero Inoxidable Súper Martensítico	131
Tabla 16. Resultados de las pruebas de compresión de los cilindros.....	133
Tabla 17. Condensado de resultados de las técnicas electroquímicas del acero AISI 1818.....	152
Tabla 18. Condensado de resultados de las técnicas electroquímicas del acero SM UNS S41425.....	153

RESUMEN

La sustitución de nuevos materiales en los procesos, resulta de gran relevancia debido a que esto permite poder mejorar la eficiencia de los mismos, como es por mencionar algunos, la duración del tiempo de vida, ahorro sustantivo en los mantenimientos tanto predictivos como correctivos, ahorro considerable de recursos y desde luego uno de los más importantes evitar fallas catastróficas, disminuyendo los riesgos de seguridad en la pérdida de vidas humanas, así como evitando la contaminación ambiental con el fallo de los mismos. En esta investigación se presentan los resultados obtenidos en la posible sustitución del elemento metálico utilizado en el sistema acero-concreto, la varilla de refuerzo de la familia de aceros al carbono, por un acero inoxidable supermartensítico UNS S41425. Para desarrollar lo antes descrito, se utilizaron distintas técnicas de valoración, determinación de Composición Química, Propiedades Mecánicas y Metalúrgicas como una etapa inicial en el desarrollo de la investigación, en una segunda etapa se determina su comportamiento corrosivo, se prepararon probetas estandarizadas de acero-concreto con tres relaciones agua-cemento de 0.45, 0.55 y 0.65 embebidas en una solución salina al 5% de NaCl, además de electrodos electroquímicos con el acero inoxidable supermartensítico UNS S41425, para ser evaluados ambos sistemas con distintas técnicas de Corrosión Electroquímicas, medición del Potencial de Corrosión bajo la norma ASTM C876, Resistencia a la Polarización Lineal bajo la norma ASTM G5, Curvas Cíclicas de



Polarización bajo la ASTM G59, para el desarrollo de estas pruebas se utilizaron soluciones salinas con diferentes pH y soluciones poro, las morfologías de superficie de las muestras de manera complementaria son estudiadas mediante Microscopia Óptica y Microscopia Electrónica de Barrido. Los resultados obtenidos de este estudio mostraron resultados muy favorables en la sustitución del elemento metálico como varilla de refuerzo en el sistema acero concreto, una disminución de la velocidad de corrosión del orden de hasta tres magnitudes con respecto a elemento metálico convencional.



CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

El concreto es un material pétreo artificial, se obtiene al mezclar determinadas proporciones de cemento, agregados gruesos y finos con agua. El concreto y el agua forman una pasta que rodea a los agregados, dando por resultado un material de gran durabilidad que fragua y endurece, incrementando su resistencia con el paso del tiempo. El concreto simple es resistente a la compresión, pero es débil en tracción, por lo cual se le debe de armar convenientemente con barras de acero que adsorban los esfuerzos de tracción y eviten la formación de grietas en la masa del concreto [1]. El uso de las barras de acero cobra una gran importancia, cuando son utilizadas en el sistema acero concreto en diferentes estructuras, sobre todo al estar expuestas en medios ambientes muy agresivos, medios costeros o marinos, urbanos e industriales principalmente. [2] Se puede mencionar que la principal causa de daño y fallas muy tempranas de las estructuras reforzadas y pre-forzadas es la corrosión de la barra de refuerzo, originando muy altos costos de mantenimiento y restauración alrededor del mundo [3]. Las características mecánicas del concreto armado, explican su aplicación a nivel mundial como base de estructuras de un sin número de construcciones arquitectónicas como puentes, edificaciones, muelles entre otros. Dichas características se derivan de la combinación fisicoquímica entre los elementos constitutivos de la mezcla del concreto



y el acero al ser embebido en ella, lo que le imprime cualidades de rigidez, tenacidad y potencia, que lo sitúan como primera opción en el plano de la Ingeniería Civil [4].

En el 2010 se llevó a cabo una investigación bibliográfica con el propósito de identificar aceros de bajo costo resistentes a la corrosión como materiales de refuerzo, encontraron que una de las aleaciones de acero al cromo (12% a 15% Cr), se han desarrollado para varios tipos de aplicaciones, este tipo de aleaciones recientemente han sufrido modificaciones en su contenido [5].

En este proyecto de investigación se seleccionará una aleación de esta familia que actualmente se producen en forma de barra, que podrá ser considerada y probada como posible candidato de bajo costo a ser utilizada como varilla de refuerzo embebida en concretos con diferentes relaciones agua cemento (a/c). Este sistema propuesto deberá ser más resistente a la corrosión sin perder de vista las propiedades mecánicas, comparadas a las que posee un sistema convencional, el acero AISI 1018 utilizado comúnmente como varilla de refuerzo en el sistema acero concreto.

Dicha evaluación se llevará a cabo mediante la determinación del comportamiento electroquímico y propiedades mecánicas, las Técnicas Electroquímicas, en conjunto con las Técnicas Microscopía Óptica,



Microscopia Electrónica de Barrido, Análisis Metalúrgico, herramientas útiles y necesarias, para estudiar y predecir el comportamiento corrosivo de la aleación propuesta.

En el capítulo I se describe de manera general las bases del planteamiento de la investigación, donde se describen algunos puntos relevantes del sistema acero-concreto, tales como su comportamiento mecánico y sus bondades en la aplicación de la Ingeniería Civil, sin embargo, es necesario y obligado hacer hincapié en el comportamiento que tiene dicho sistema cuando se encuentra expuesto en diferentes ambientes, uno en especial es cuando dichas estructuras están coexistiendo en ambientes agresivos como pueden ser los ambientes con altos contenidos de cloruros. En este mismo capítulo se describe la justificación de este estudio, haciendo imperante hacer conciencia del uso de nuevos materiales de sustitución que nos permitan aumentar el tiempo de vida útil de las estructuras y de manera adicional y significativa más seguras, evitando accidentes catastróficos y contaminaciones ambientales. Se describe el propósito de la investigación, así como el planteamiento de los resultados esperados al concluir la investigación propuesta.

En el capítulo II y III, son capítulos teóricos, donde se presentan generalidades del concreto y del sistema acero-concreto y una descripción general de las familias de aceros inoxidable, desglosando temas de relevancia afines a la temática propuesta, como son las



mecanismos y formas del comportamiento corrosivo en diferentes ambientes, mencionando algunas aleaciones que pudieran ser bajo estricto rigor, posibles candidatos a utilizar como barra de refuerzo.

En el capítulo IV, se describen las técnicas experimentales utilizadas para desarrollar y cumplir con la investigación propuesta, por último, en el capítulo VI y VII, se presentan los resultados obtenidos después de su análisis riguroso, y por último en el capítulo VIII se muestran las conclusiones de la investigación.

Sin embargo, el elevado e incierto del costo de algunos de los elementos de aleación del acero inoxidable, especialmente el níquel, ha sido motivo de preocupación. Por ello, en la última década la industria ha desarrollado grados alternativos de acero inoxidable con una composición menos costosa. Dicha evaluación se llevará a cabo mediante la determinación del comportamiento electroquímico y propiedades mecánicas, las Técnicas Electroquímicas, en conjunto con las Técnicas Microscopía Óptica, Microscopía Electrónica de Barrido, Análisis Metalúrgico, son herramientas útiles y necesarias, para estudiar y predecir el comportamiento corrosivo de esta nueva aleación, que son utilizadas en diferentes ambientes, marítimos, industriales, urbanos etc. Para desarrollar la investigación se dispone de la infraestructura de las dos instituciones, Universidad Autónoma de Chihuahua y el Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C., mediante lo cual, se espera poder finalizar el estudio propuesto sin complicaciones.



1.1 Planteamiento del problema

Los estudios de corrosión y protección juegan un papel importante para las economías desarrolladas, generando una adecuada actividad industrial haciendo los procesos confiables y seguros. Lamentablemente, las estadísticas obtenidas a partir de fallas catastróficas presentadas en varias estructuras de obra civil a nivel nacional e internacional (Edificios, puentes, plataformas o muelles, etc) enfatizan la necesidad de asegurar la calidad de la operación y vida útil de estas estructuras. Es debido a esta problemática, que son necesarios los estudios e investigaciones dirigidos a la búsqueda de nuevos materiales (aleaciones y concretos) que posean mejores propiedades fisicoquímicas que los que se utilizan cotidianamente, para que al ser utilizados puedan garantizar menores riesgos y mayores tiempos de vida útil.

1.7 Antecedentes

En México es todavía escasa la presencia y aplicación de barras corrugadas de acero inoxidable en estructuras de concreto armado, y por tanto mucho menor el número de obras y construcciones que se realizan utilizando este tipo de armaduras de acero inoxidable.

La causa principal de la escasa utilización de aceros inoxidables es debido a los altos costos del precio de estas aleaciones (de la familia de la serie 300 principalmente), debido a lo anterior, es completamente justificable la búsqueda de nuevos elementos promisorios metálicos que tengan un menor costo y superen las propiedades mecánicas y



resistencia a la corrosión del acero normalmente empelado AISI 1018. La aplicación de nuevos materiales de refuerzo y concretos promisorios en estructuras que satisfagan propiedades mecánicas y condiciones frente al deterioro por corrosión, presagia un mayor tiempo de vida útil en servicio, por tanto, un incremento de las garantías de durabilidad e integridad estructural. Un enfoque es el desarrollo de aleaciones con menos componentes caros del acero inoxidable, en particular el níquel y el molibdeno [6]. Para proporcionar los 75 a 100 años de vida útil que exigen las especificaciones actuales para los puentes de las autopistas y otras estructuras importantes, la idea de utilizar acero inoxidable como barra de refuerzo en estructuras expuestas a condiciones climáticas severas y en particular, a las sales de deshielo, es cada vez más atractiva.

En todo el mundo se utiliza más concreto que cualquier otro material fabricado por el hombre, con aproximadamente 12 billones de toneladas anuales. La producción de cemento Portland representa entre el 6% y el 8% del CO₂ generado por el hombre. El Reino Unido produce 100 millones de toneladas, lo que equivale a 2 toneladas de concreto por persona y año. De acuerdo con la Asociación de Cemento Portland de Estados Unidos, se espera que el consumo de cemento en Norteamérica en 2006 supere los 130 millones de toneladas métricas, un 3,7% más que en 2005 [7].



Se prevé un aumento medio anual del 2,5% hasta 2009. Una intervención correctamente seleccionada que repare una estructura de concreto de forma rentable ayuda a conservar los recursos y a reducir la contaminación. Según una estimación estadounidense, los daños por corrosión en los puentes de las autopistas interestatales ascienden a 150 billones de dólares debido a la corrosión inducida por el deshielo y la sal marina.

En un informe del Transportation Research Board sobre los costos del deshielo se estimaba que el costo anual de las reparaciones de los tableros de los puentes era de 50-200 millones de dólares, que las subestructuras y otros componentes requerían 100 millones de dólares al año y otros 50-150 millones de dólares al año en estacionamientos de varios pisos [8].

En un estudio más reciente sobre los costos de la corrosión, el costo directo anual de la corrosión en los puentes de las autopistas estadounidenses se estimó en 8.3 billones de dólares, de los cuales 4.0 billones correspondían a los costos de capital y mantenimiento de los tableros y subestructuras de los puentes de concreto armado. Los costos indirectos debidos a los retrasos del tráfico se calcularon en más de 10 veces los costos directos [9]. En el Reino Unido, el Departamento de Transporte (DoT) estima que los daños por corrosión inducidos por la sal ascienden a un total de 616,5 millones de libras sólo en los



puentes de las autopistas y carreteras principales de Inglaterra y Gales, [10].

Estos puentes representan alrededor del 10% del inventario total de puentes del país. Por tanto, el costo final puede ser 10 veces superior a la estimación del DoT. Las estadísticas de Europa, el Pacífico asiático y Australia son similares. En Oriente Medio, las duras condiciones del clima marino cálido, especialmente en las zonas más pobladas, con aguas subterráneas salinas, aumentan todos los problemas de corrosión. Esto se ve agravado por la dificultad de curado del concreto, que ha dado lugar a tiempos de vida muy cortos para las estructuras de concreto armado [11].

Antes se consideraba que la corrosión del acero en el concreto causaba problemas de ingeniería y económicos. Sin embargo, se han dado casos de grandes pedazos de concretos caídos de puentes en Norteamérica, con la pérdida de la vida de un automovilista en Nueva York. El fallo de los tendones de postensado de un puente provocó el derrumbe de un puente con la pérdida de la vida de un conductor de camión cisterna en Europa y otro fallo de un puente peatonal en Estados Unidos. Se han registrado colapsos de estacionamientos y otros fallos importantes en Estados Unidos, Canadá y el Reino Unido (no siempre atribuidos directamente a la corrosión de las armaduras) [12]. Las pérdidas económicas y los daños causados por la corrosión del acero en el concreto hacen que sea posiblemente el mayor problema de



infraestructuras al que se enfrentan los países industrializados. Nuestros puentes, servicios públicos, plantas químicas y edificios envejecen. Algunos pueden sustituirse, otros causarían grandes costos e inconvenientes si se pusieran fuera de servicio [13].

1.8 Justificación del estudio

Las características mecánicas del concreto armado, explican su aplicación a nivel mundial como base de estructuras de un sin número de construcciones arquitectónicas como puentes, edificaciones, muelles entre otros. Dichas características se derivan de la combinación fisicoquímica entre los elementos constitutivos de la mezcla del concreto y el acero al ser embebido en ella, lo que le imprime cualidades de rigidez, tenacidad y potencia, que lo sitúan como primera opción en el plano de la Ingeniería Civil. Sin embargo, no podemos dejar de lado, la realidad a las que estos tipos de estructuras se encuentran expuestas, dentro de sus tiempos de vida útil, originando que estas estructuras puedan sucumbir ante el deterioro por corrosión en el acero de refuerzo debido a la interacción de diferentes ambientes agresivos, marinos, industrial, etc. [14]. Uno de los más importantes objetivos del mantenimiento de la integridad de obra civil tales como puentes, túneles, carreteras, muelles etc., de un país, son los requerimientos de mantenimiento prematuro evaluados en billones de dólares debido a la corrosión del acero de refuerzo embebido en el concreto, además mencionaron que en México no se tiene información que proporcione una idea del problema, por otro lado, se tienen más de diez mil



kilómetros de línea costera, donde existen muchas estructuras de concreto reforzado susceptibles a daño por corrosión, causas externas de la naturaleza no-estructural que usualmente afectan la durabilidad de la estructura de concreto en servicio [15].

En este proyecto de investigación se seleccionará una aleación, que podrá ser considerada y probada como posible candidato de bajo costo como varilla de refuerzo embebida en concreto en diferentes relaciones agua-cemento. Este sistema propuesto deberá ser más resistente a la corrosión sin perder de vista las propiedades mecánicas, comparadas a las que posee un sistema convencional mediante un acero AISI 1018 utilizado comúnmente como varilla de refuerzo en el sistema acero concreto.

Con este estudio se pretende hacer la aportación, correspondiente a la respuesta y comportamiento de un sistema acero-concreto, enfocado al deterioro provocado por la corrosión en la barra de refuerzo. Con lo anterior se pretende fundamentar la propuesta de evaluar un material metálico en el sistema acero-concreto que mejore las propiedades de deterioro y mecánicas aumentando la durabilidad de las estructuras.

Dicha evaluación se llevará a cabo mediante la determinación del comportamiento electroquímico y propiedades mecánicas, a través de Técnicas Electroquímicas, en conjunto con las Técnicas de Microscopía



Óptica, Microscopia Electrónica de Barrido y Análisis Metalúrgico, herramientas útiles y necesarias, para estudiar y predecir el comportamiento corrosivo de esta nueva aleación, que podría ser utilizada en diferentes ambientes marítimos, industriales, urbanos etc.

1.9 Objetivo de la Investigación

Caracterización del comportamiento electroquímico de un acero de refuerzo inoxidable del tipo supermartensítico, que, al ser comparado con un acero al carbono convencional, se busque ofrecer desde un punto de vista científico y tecnológico las bases de su utilización dadas las mejores prestaciones que ofrecen, a través de resultados rigurosos de investigación.

1.9.1 Objetivos particulares

- Desarrollar una búsqueda en la literatura de materiales metálicos de refuerzo, que sean identificados como posibles candidatos, con el propósito de demostrar que presentan mejores propiedades de resistencia a la corrosión y mecánicas, con respecto a un acero al carbono convencional utilizado en el sistema acero-concreto.
- Una vez seleccionado el elemento metálico a estudiar y como punto de partida, se deberán caracterizar sus propiedades



metalúrgicas, con la finalidad de verificar y comprobar sus propiedades físico-químicas.

- Para desarrollar el estudio comparativo del elemento metálico identificado como posible sustituto en el sistema acero-concreto y el acero al carbono convencional, se fabricarán especímenes con diferentes relaciones agua/cemento, 0.45, 0.55 y 0.65, de acuerdo con la normatividad ASTM.
- Se llevará a cabo una selección de la propuesta experimental disponible, que permita identificar el comportamiento electroquímico y mecánico del elemento metálico propuesto como candidato a utilizar en el sistema acero concreto.
- Determinar la probabilidad de corrosión mediante la técnica de Potencial de Corrosión (E_{corr}), así como la cinética y los mecanismos de corrosión empleando las técnicas de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) y Curvas Cíclicas de Polarización (CCP), en dos medios de exposición: ambiente salino y soluciones poro.
- Una vez concluida la exposición de los especímenes en la solución salina al 5% y extraídos los elementos metálicos, se efectuará un análisis de morfología superficial y composición química vía EDAX, para determinar los elementos químicos presentes y su concentración en los productos de corrosión



observados, empleando un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) acoplado a un sistema de microanálisis químico EDAX.

1.10 Hipotesis

El elemento metálico propuesto dada a su composición y propiedades metalúrgicas, mejorará la resistencia al deterioro por corrosión y debido a sus mejores propiedades mecánicas, originará un aumento en la durabilidad del sistema acero-concreto con respecto al sistema convencional.

CAPITULO II. EL CONCRETO

2.1 Concreto

El concreto reforzado es un material de construcción, versátil, económico y exitoso. Puede ser modelado a una variedad de formas y acabados. En la mayoría de los casos es durable y resistente, funcionando adecuadamente a lo largo de su vida útil. Sin embargo, en algunos casos no se comporta adecuadamente debido a un mal diseño, mala construcción, selección de inadecuados materiales, a medios más severos que los anticipados o a una combinación de estos factores [16].

El concreto es también conocido como hormigón, es el material que resulta de la mezcla de cemento con grava, gravilla, o arena, con agua figura 1. Cabe destacar que la mezcla de cemento con arena y agua se conoce también como mortero.

El cemento cuando se mezcla con el agua gana propiedades adherentes y se hace mucho más fácil de moldear; el fraguado es rápido y una vez concluido éste, se endurece hasta tomar la consistencia de la piedra, figura 1.

El concreto tiene muchas características, pero una de las principales es la alta resistencia a las fuerzas de compresión, pero no así frente a la tracción, a la flexión o al corte. Es común relacionarlo con el acero, y de allí recibe el nombre de hormigón armado o concreto armado. El uso del

concreto es generalizado en muchas obras de construcción o de ingeniería, como edificios, puentes, túneles, etc.

Aun si la estructura principal se realiza en acero, el concreto será indispensable para estructurar la cimentación, [17]



Figura 1. Colado de un concreto mediante equipo industrial

Es decir, el concreto presenta tensiones muy débiles, y mientras el acero de refuerzo proporciona las tensiones necesarias, el concreto proporciona un ambiente perfecto para el acero, actuando como una barrera física protectora al ingreso de agentes agresivos, y dando una protección química en la forma de un medio altamente alcalino, [18].

Una definición del concreto es: “Es una combinación o mezcla de dos componentes: agregados y pasta”. La pasta compuesta de cemento portland y agua, une a los agregados (arena y grava y piedra triturada), la cual endurece formando una piedra artificial semejante a una roca, este endurecimiento se debe a la reacción química entre el agua y el

cemento. Lo anterior, junto con la varilla de acero conforma el sistema conocido como concreto reforzado [19].

2.2 Tipos de cemento

El cemento portland se produce al pulverizar el Clinker, que consiste principalmente en silicatos hidráulicos de calcio junto con algunos aluminatos de calcio y aluminoferritos de calcio. Normalmente contiene una o más formas de sulfato de calcio (yeso), como adición de la molienda. En presencia del agua los compuestos del cemento se hidratan (Tabla 01) para formar nuevos compuestos, que constituyen la infraestructura de la pasta del cemento endurecido en el concreto [20]

Tabla 01. Transformaciones de los compuestos del cemento portland.

$2(3\text{CaO}\bullet\text{SiO}_2)$ (Silicato tricálcico)	+	$6\text{H}_2\text{O}$ (Agua)	=	$3\text{CaO}\bullet 2\text{SiO}_2\bullet 3\text{H}_2\text{O}$ (Gel de tabermorita)	+	$3\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Hidróxido de calcio)
$2(2\text{CaO}\bullet\text{SiO}_2)$ (Silicato dicálcico)	+	$4\text{H}_2\text{O}$ (Agua)	=	$3\text{CaO}\bullet 2\text{SiO}_2\bullet 3\text{H}_2\text{O}$ (Gel de tabermorita)	+	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Hidróxido de calcio)
$3\text{CaO}\bullet\text{Al}_2\text{O}_3$ (aluminato tricálcico)	+	$12\text{H}_2\text{O}$ (Agua)	+	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Hidróxido de calcio)	=	$3\text{CaO}\bullet\text{Al}_2\text{O}_3\bullet 3\text{Ca}(\text{OH})_2\bullet 12\text{H}_2\text{O}$ (Hidrato de aluminato tetracálcico)
$4\text{CaO}\bullet\text{Al}_2\text{O}_3\bullet\text{Fe}_2\text{O}_3$ (aluminoferrito tetracálcico)	+	$10\text{H}_2\text{O}$ (Agua)	+	$2\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Hidróxido de calcio)	=	$6\text{CaO}\bullet\text{Al}_2\text{O}_3\bullet\text{Fe}_2\text{O}_3\bullet 12\text{H}_2\text{O}$ (Hidrato de aluminoferrito de calcio)
$3\text{CaO}\bullet\text{Al}_2\text{O}_3$ (aluminato tricálcico)	+	$10\text{H}_2\text{O}$ (Agua)	+	$\text{CaSO}_4\bullet 2\text{H}_2\text{O}$ (Yeso)	=	$3\text{CaO}\bullet\text{Al}_2\text{O}_3\bullet \text{CaSO}_4\bullet 12\text{H}_2\text{O}$ (Hidrato monosulfo aluminato de calcio)



2.2.1 Especificación de estándar para cemento Portland

1.1 Esta especificación abarca diez tipos de cementos Portland, a saber (consulte la Nota 2):

1.1.1 Tipo I: Para uso cuando no se requieran las propiedades especiales especificadas para cualquier otro tipo.

1.1.2 Tipo IA: Cemento con incorporación de aire para los mismos usos que los del Tipo I, cuando se desee incorporación de aire.

1.1.3 Tipo II: Para uso general, pero más especialmente cuando se desee una resistencia moderada a sulfatos.

1.1.4 Tipo IIA: Cemento con incorporación de aire para los mismos usos que los del Tipo II, cuando se desee incorporación de aire.

1.1.5 Tipo II(MH): Para uso general, pero más especialmente cuando se desee un calor de hidratación moderado y una resistencia a sulfatos moderada.



1.1.6 Tipo II(MH)A: Cemento con incorporación de aire para los mismos usos que los del Tipo II(MH), cuando se desee incorporación de aire.

1.1.7 Tipo III: Para uso cuando se desee una alta resistencia inicial.

1.1.8 Tipo IIIA: Cemento con incorporación de aire para los mismos usos que los del Tipo III, cuando se desee incorporación de aire.

1.1.9 Tipo IV: Para uso cuando se desee un bajo calor de hidratación.

1.1.10 Tipo V: Para uso cuando se desee una alta resistencia a sulfatos.

NOTA 1: Algunos cementos se designan con una clasificación de tipo combinada, como, por ejemplo, el Tipo I/II, lo cual indica que el cemento cumple con los requisitos de los tipos indicados y se ofrece como apropiado para el uso cuando se desee utilizar cualquiera de esos tipos.

NOTA 2: En algunas áreas, no hay disponibilidad comercial de cemento que cumpla con los requisitos de todos los tipos. Antes de especificar el uso de un cemento que no sea el de Tipo I, determine si el tipo de cemento sugerido está disponible o podría estarlo.

1.2 Los valores indicados en unidades del Sistema Internacional (SI) o en pulgadas-libra se deben considerar como el estándar por separado. Los valores indicados en cada sistema pueden no ser equivalentes



exactos entre sí; por lo tanto, cada sistema se deberá utilizar de forma independiente del otro. Combinar valores de los dos sistemas puede generar faltas de conformidad con el estándar. Los valores en unidades del Sistema Internacional (SI) [o unidades pulgadas-libra] se deberán obtener realizando mediciones en unidades SI [o unidades pulgadas-libra] o mediante la conversión correspondiente de las mediciones hechas en otras unidades [o unidades SI] utilizando las Reglas para conversión y redondeo (Rules for Conversion and Rounding) que se proporcionan en IEEE/ASTM SI 10. Los valores se expresan en unidades SI solo cuando las unidades pulgadas-libra no se utilizan en la práctica [21].

1.3 El texto de esta especificación hace referencia a notas y notas al pie que proporcionan material explicativo. Esas notas y notas al pie (excluyendo las de las tablas y figuras) no se deberán considerar requisitos del estándar.

1.4 Este estándar internacional fue desarrollado de conformidad con principios de estandarización reconocidos a nivel internacional y establecidos en la Decisión sobre Principios para el Desarrollo de Estándares, Guías y Recomendaciones Internacionales (Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations) publicada por el Comité de Acuerdo sobre Obstáculos Técnicos al Comercio (Technical Barriers to Trade, TBT) de la Organización Mundial del Comercio



2.3 La corrosión del acero en el concreto

La corrosión del acero de refuerzo en el concreto es un problema importante que enfrentan los ingenieros civiles hoy en día, ya que mantienen una infraestructura envejecida. Potencialmente es muy grande el mercado para aquellos que desarrollan la experiencia para hacer frente al problema. También es un gran quebradero de cabeza para quienes se encargan de hacer frente a las estructuras que lo padecen, [22].

La corrosión del acero en el concreto solía ser considerada la causa de problemas económicos y de ingeniería, sin embargo, se han tenido casos de fallas de grandes elementos de concreto de puentes en Norte América, con la pérdida de vida de automovilistas en la ciudad de New York. La falla de tendones post-tensionados en un puente causó el colapso del puente con la pérdida de la vida de un conductor de camión cisterna en Europa y otra falla de un puente peatonal en los Estados Unidos. Un colapso de un estacionamiento y otras fallas importantes se han registrado en los Estados Unidos, Canada y el Reino Unido (no siempre directamente atribuidos a la corrosión del refuerzo), [23]

Los científicos e ingenieros en corrosión gastan mucho de su tiempo intentado encontrar formas de detener la corrosión del acero aplicando recubrimientos proyectivos. La capa pasiva es el sueño del recubrimiento de corrosión de los ingenieros como se genera por sí



misma y se mantendrá y reparará por si sola siempre que el medio de pasivación (alcalino) está presente para regenerarla si esta se daña.

Sin embargo, el medio de pasivación no siempre se mantiene, dos condiciones pueden romper el medio de pasivación en el concreto sin atacar primero al concreto. Una es la carbonatación y la otra es el ataque por cloruros, [24]

Una vez que la capa pasiva se destruye, entonces áreas de herrumbre comenzarán a aparecer en la superficie del acero. Las reacciones químicas son las mismas si la corrosión ocurre por ataque por cloruros o carbonatación. Cuando el acero en concreto corrido disuelto en el agua de los poros cede electrones:



Los dos electrones creados en la reacción anódica deben ser consumidos en otra parte en la superficie del acero para preservar la neutralidad eléctrica. En otras palabras, no podemos tener grandes cantidades de cargas eléctricas acumulándose en un lugar del acero. Debe haber otra reacción química para consumir los electrones. Esta es una reacción que consume agua y oxígeno:



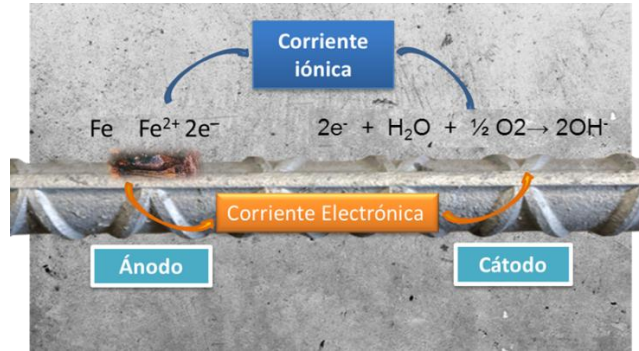


Figura 02. Reacciones anódicas y catódicas del acero en corrosión.

2.4 Factores que afectan la durabilidad del concreto

De acuerdo como lo menciona el Manual de Inspección Evaluación y Diagnostico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado, se definen como aquel conjunto de circunstancias que inducen la despasivación del acero en el concreto. La corrosión solo se induce si el pH baja hasta valores ácidos (<8). Existen varios factores que afectan, desencadenan o producen ambos efectos en el proceso de corrosión de las armaduras. El acero y el concreto reunidos en un material mixto, le dotan de la buena resistencia a la tracción del primero y de la buena resistencia a la compresión del segundo. La excelente unión entre ambos garantiza la transferencia de propiedades de un material al otro y facilita, además, la acción protectora del concreto contra la corrosión del acero. Esta acción protectora es de doble naturaleza:

- Por una parte, cuando el concreto se ejecuta correctamente, debido a su elevado pH (aprox. 12,6), mantiene a las armaduras embebidas en el estado pasivo.



- Por otra, el concreto supone un considerable impedimento físico a la penetración por difusión de oxígeno, humedad, cloruros, anhídrido carbónico y otras sustancias agresivas hasta la superficie del acero, [25].

2.4.1. Dosificación del Concreto

El concreto debe ser sólido, homogéneo, compacto, resistente y poco poroso, que garantice, además de sus significativas prestaciones mecánicas, la protección de la armadura de acero de la estructura, de las acciones agresivas de los agentes externos

La dosificación del concreto es un factor que influye de forma significativa en el comportamiento futuro de este, como elemento protector del acero de refuerzo.

El concreto que envuelve las varillas de refuerzo de una armadura debe cumplir una doble función protectora:

- a). Como barrera física que se opone a la penetración de los agentes agresivos externos y
- b). Originando una capa de pasivación sobre el acero como función de su pasividad.

La porosidad de la masa del concreto la aporta fundamentalmente la pasta del cemento endurecida y es a través de ella que el agua ejerce su función de vector de transferencia de los elementos agresivos



externos, razón por la cual, la relación agua-cemento, el grado de hidratación y la cantidad de pasta son factores determinantes en la cantidad y tipo de poros en el hormigón, [26].

2.4.2. Compacidad y Homogeneidad

La compacidad del concreto es la propiedad más importante del mismo a los efectos de su resistencia a la penetración de los agentes agresivos externos. Es inversamente proporcional a la porosidad y mientras más alta sea la primera, expresa en qué magnitud está protegido el acero de la armadura contra los ataques de los cloruros, que son los agentes agresivos más importantes, [27].

La compacidad es función principalmente de la cantidad y calidad de los materiales y de la adecuada proporción entre ellos. Sin embargo, cumpliéndose con esta condición, la compacidad puede afectarse por un mal mezclado y un mal transporte, ya que esto afecta la homogeneidad del concreto propiciando la segregación de los materiales, [28].

Las mezclas con relación a/c baja (<0.4) son usadas en ambientes agresivos por la alta protección brindada a la armadura (baja porosidad y alta alcalinidad), por otro lado, la homogeneidad del concreto es la cualidad por la cual los distintos componentes de este aparecen igualmente distribuidos en toda su masa. El concreto, por su origen, es



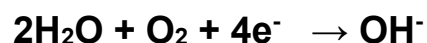
un material heterogéneo y se puede lograr su homogeneidad mediante un adecuado proceso tecnológico de producción, transporte, colocación, compactación y curado, [29].

2.4.3. Espesor del recubrimiento del concreto

El espesor de la capa del concreto es muy importante para garantizar la protección de la armadura, dependiendo del ambiente al cual va a estar expuesto, existen normas internacionales donde se especifican los espesores adecuados a la agresividad ambiental, EH-88, CODIGO MODELO, ACI-318, JASS-5-1986, etc., [30]. Sin embargo, estructuralmente es recomendable que este espesor sea el mínimo indispensable, ya que, por ser una zona desprovista de armadura, pudiera verse afectada por fisuración, particularmente si el elemento está sometido a esfuerzos de tracción. Por tal motivo, las normas recomiendan que en ambientes agresivos debe utilizarse una mezcla de calidad con alto contenido de cemento y baja relación de agua-cemento, garantizando así que espesores de 2 a 3 pulgadas permiten alta durabilidad de la estructura, [31].

2.4.4. Humedad Ambiental

La presencia del agua es imprescindible para la corrosión en medios neutros y alcalinos, pues intervienen en el proceso catódico de reducción de oxígeno:





Además, el agua es necesaria para la movilidad de los iones a través del electrólito. La existencia de una cierta cantidad mínima de humedad en los poros del concreto permitirá el desarrollo de los procesos corrosivos. Por lo tanto, cuanto mayor sea el contenido de humedad en los poros del concreto, menor será el valor de la resistividad eléctrica y más elevadas podrán ser, en principio, las velocidades de corrosión, [32].

2.4.5. Efecto del Oxígeno

No es posible que el proceso de corrosión se desarrolle sin que llegue una mínima cantidad de oxígeno hasta las armaduras, es decir, es necesaria una cierta “aireación” de las mismas. Existen varios ensayos en los que se intenta correlacionar la mayor o menor permeabilidad del concreto frente a los gases con su menor o mayor capacidad protectora en procesos de corrosión, sin embargo, se ha demostrado que debido a que la corrosión es un proceso electroquímico, sólo son válidos los valores de flujo de oxígeno cuando se miden utilizando “fuerzas impulsoras” de tipo electroquímico y no aquellas provenientes de fuerzas mecánicas. En la práctica, una aproximación gruesa, pero suficiente y no sofisticada, para conocer la mayor o menor bondad de un concreto en relación con su permeabilidad al oxígeno es medir su porosidad o índice de “huecos” accesibles, [33].



2.4.6. Efecto de la temperatura

El incremento de la temperatura promueve la movilidad de las moléculas facilitando el transporte de sustancias, [34].

Es importante destacar los factores ambientales de humedad, temperatura y el oxígeno tienen efectos contrapuestos y que, por tanto, no es fácil predecir la evolución del proceso de corrosión del acero, por ejemplo, una mayor humedad facilita la corrosión, pero impide el acceso de oxígeno o bien una mayor temperatura acelera la corrosión, pero disminuye la condensación, lo anterior conduce a múltiples predicciones erróneas del comportamiento de las armaduras.

2.4.7. Estado Superficial del Acero

Es la superficie del acero la primera interfase con el medio es lógico pensar que su estado superficial afectará las reacciones que tendrán lugar en contacto con él. En términos generales, el acero cuya superficie posee los óxidos provenientes del proceso de conformado ("mill scale") se presenta menos reactivo que aquel cuya superficie está libre de dicha capa. Adicionalmente, los productos de corrosión presentes en forma masiva, no adherentes, deben ser eliminados, ya que ocasiona problemas de adherencia o condiciones propicias para la corrosión de la armadura en el concreto, [35].

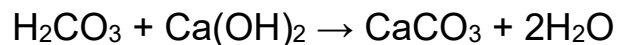


2.4.8. Carbonatación

La carbonatación es el resultado de la interacción del gas carbónico de la atmósfera con los hidróxidos alcalinos del concreto. Como muchos otros gases, el dióxido de carbono se disuelve en agua para formar un ácido. A diferencia de la mayoría de los demás ácidos, el ácido carbónico no ataca la pasta de cemento, sino que se limita a neutralizar los álcalis del agua de los poros, formando principalmente carbonato cálcico que recubre los poros:



Gas Agua Acido Carbonico



Acido Carbonico Solución Poro

Hay mucho más hidróxido de calcio en los poros del concreto que puede disolverse en el agua de los poros. Esto ayuda a mantener el pH en su nivel habitual de 12-13 mientras se produce la reacción de carbonatación. Los álcalis provenientes de las materias primas, así como el hidróxido de calcio segregado durante la hidratación llevan al pH de la fase acuosa de los poros a valores extremadamente alcalinos, generalmente mayores que 13, [36]. Sin embargo, a medida que el dióxido de carbono reacciona con el hidróxido de calcio (y otros hidróxidos) en la solución, todo el hidróxido de calcio reacciona, precipitando el carbonato de calcio y permitiendo que el pH descienda a un nivel en el que el acero se corroerá. Esto se ilustra en las figuras 01 y 02, que muestran la caída del pH a través del frente de

carbonatación y la velocidad de corrosión del acero a medida que cambia el pH. El daño por carbonatación se produce más rápidamente cuando el recubrimiento del concreto de la armadura es escaso. También puede ocurrir cuando el recubrimiento es alto pero la estructura de los poros es abierta, los poros están bien conectados entre sí y permiten la rápida entrada de CO_2 y cuando las reservas alcalinas en los poros son bajas. Esto ocurre cuando hay un bajo contenido de cemento, una alta relación agua cemento y un mal curado del concreto.

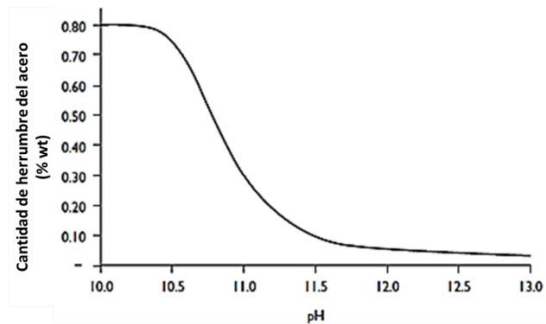


Figura 03. Corrosión del acero en soluciones acuosas como una función del pH, mostrando el efecto de la capa pasiva cerca de un pH 12.5. [Adapted from Shalom and Raphael J ACI, 1959, 30(12): 1251–1268.]

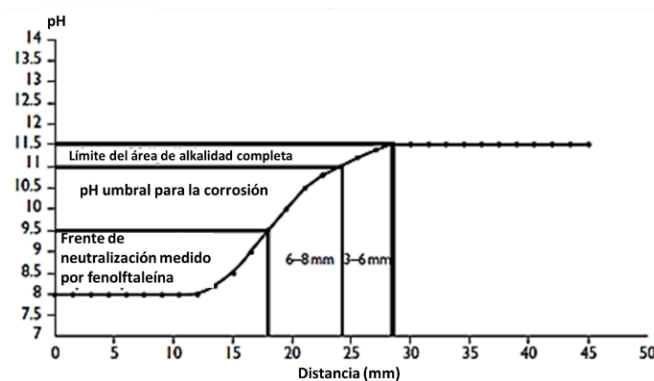


Figura 04. Niveles de pH para la carbonatación, corrosión e indicador de la fenolftaleína [Adapted from Shalom and Raphael J ACI, 1959, 30(12): 1251–1268.]



Un frente de carbonatación penetra en el concreto siguiendo aproximadamente las leyes de la difusión. Éstas se definen más fácilmente mediante la afirmación de que la velocidad es proporcional al espesor:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{D_o}{x} \quad (1)$$

Donde x es la distancia, t es el tiempo y D_o es el constante de difusión.

Muchos factores influyen en la capacidad del concreto armado para resistir la corrosión inducida por la carbonatación. Como la velocidad de carbonatación es función del espesor, un buen recubrimiento es esencial para resistir la carbonatación. Como el proceso consiste en neutralizar la alcalinidad del hormigón, se necesitan buenas reservas de álcali, es decir, un alto contenido de cemento.

El ciclo húmedo-seco acelerará la carbonatación al permitir la entrada de CO_2 y entonces suministrar el agua para que se disuelva en ella.

Empíricamente, se han utilizado varias ecuaciones para relacionar los índices de carbonatación, la calidad del concreto y el medio ambiente. Por lo general, existe una dependencia de $t^{1/2}$. Como ya se ha



comentado, los demás factores son la exposición, la relación agua/cemento, la resistencia y el contenido de CaO (ambos en función del cemento y, por tanto, del contenido de álcali) [37].

Consideramos la ecuación básica:

$$d = At^n \quad (2)$$

Donde:

d = Profundidad de carbonatación

t = tiempo en años

A = Coeficiente de Difusión

n = Exponente (aproximadamente 1/2)

2.4.9. Ataque por cloruros

Los iones cloruro- y, en menor medida, otros iones halógenos- rompen la pasividad y previenen su formación en el hierro, el cromo, el níquel, el cobalto y los aceros inoxidable. Desde la perspectiva de la teoría óxido-película, el Cl^- penetra en la película de óxido a través de poros o defectos más fácilmente que otros iones, como el SO_4^{2-} . Alternativamente, el Cl^- puede dispersar coloidalmente la película de óxido y aumentar su permeabilidad.



Por otra parte, según la teoría de la adsorción, el Cl^- se adsorbe en la superficie del metal en competencia con el O_2 o el OH^- disueltos. Una vez en contacto con la superficie metálica, el Cl^- favorece la hidratación de los iones metálicos y aumenta la facilidad con la que éstos entran en solución, frente al efecto del oxígeno adsorbido, que disminuye la velocidad de disolución del metal. En otras palabras, los iones cloruro adsorbidos aumentan la corriente de intercambio (disminuyen el sobrevoltaje) para la disolución anódica de los metales mencionados por encima del valor que prevalece cuando el oxígeno cubre la superficie. El efecto es tan pronunciado que el hierro y los aceros inoxidable no se pasivan anódicamente con facilidad en soluciones que contengan una concentración apreciable de Cl^- . Por el contrario, el metal sigue disolviéndose a altas velocidades tanto en el rango de potencial activo como en el pasivo.

El rompimiento de la pasividad por Cl^- se produce de forma local y no general, y los lugares preferidos de la superficie vienen determinados quizás por pequeñas variaciones en la estructura y el grosor de la película pasiva. Se forman diminutos ánodos de metal activo rodeados de grandes zonas catódicas de metal pasivo figura 03. La diferencia de potencial entre estas zonas es de 0,5 V o más, y la célula resultante se denomina célula pasivo-activa. Las altas densidades de corriente en el ánodo provocan altas velocidades de penetración del metal, acompañadas de una protección catódica de la zona metálica que rodea inmediatamente al ánodo. Esto fija el ánodo en su lugar y provoca la corrosión por picaduras. Además, cuanto mayor es el flujo de corriente

y la protección catódica en cualquier picadura, menos probable es que se inicie otra picadura cerca; por lo tanto, el número observado de picaduras profundas por unidad de superficie suele ser menor que el de picaduras superficiales más pequeñas. Es evidente, debido a la posibilidad de formación de celdas pasivo-activas, que las picaduras profundas son mucho más comunes con metales pasivos que con metales no pasivos.

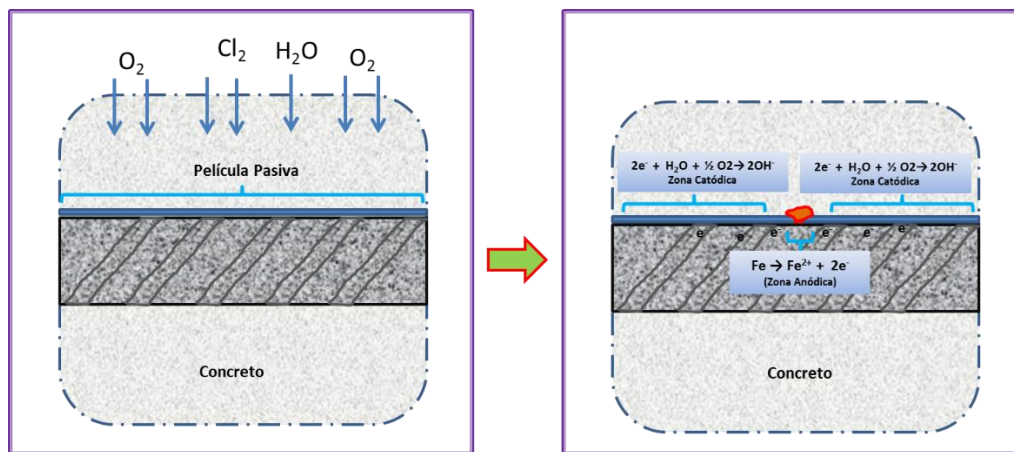


Figura 05. Rompimiento de la pasividad de una armadura embebida en concreto

Los iones halógenos tienen menos efecto sobre el comportamiento anódico del titanio, tántalo, molibdeno, wolframio y circonio. La pasividad de estos metales puede continuar en medios de alta concentración de cloruro, en contraste con el comportamiento del hierro, cromo y aleaciones Fe-Cr, que pierden pasividad. Este comportamiento se explica a veces por la formación de películas protectoras insolubles de Ti, Ta, Mo, etc., cloruro básico. Sin embargo, la verdadera situación está probablemente relacionada con la alta afinidad de estos metales por el oxígeno, lo que hace más difícil que el Cl^- desplace al oxígeno de



la película pasiva, de acuerdo con los potenciales críticos nobles de estos metales por encima de los cuales se inicia la picadura, si es que ésta se produce, [38].

Se hace mencionan que tres son los aspectos importantes para tener en consideración en el caso de los cloruros que ingresan desde el exterior a las armaduras:

1. El tiempo que tardan en llegar hasta las armaduras.
2. La proporción que induce la despasivación y
3. La velocidad de corrosión que provocan una vez desencadenada la corrosión.

En cuanto al tiempo que los cloruros tardan en llegar a la armadura en una estructura ya construida, lo importante es averiguar a que profundidad han penetrado en el momento de hacer una inspección, ya que el recubrimiento del concreto debe ser superior a la profundidad que sean capaces de alcanzar estos iones en el tiempo previsto de vida útil de la estructura, [39].

La velocidad de avance de los cloruros es, en general, una función de la raíz cuadrada del tiempo, ecuación 3:

$$X_{Cl^-} = K_{Cl^-} \sqrt{t} \quad (3)$$

X_{Cl^-} = Profundidad alcanzada por una cierta proporción de cloruros

K_{Cl^-} = Constante dependiente del concreto y del medio

t = Tiempo



2.5 Deterioro del elemento metálico en el sistema acero-concreto

El concreto armado (o reforzado) es una matriz de concreto que contiene barras de acero en su interior (armaduras). Las excelentes propiedades de este material se deben a la combinación de la resistencia a la compresión, propia del concreto, y a la alta resistencia a la tracción que le transfiere el acero, [40].

La corrosión de las armaduras de acero en el concreto armado es una de las causas más frecuente de deterioro de estructuras construidas con este material. La corrosión del acero (que químicamente se le puede considerar como hierro) en el hormigón es un proceso electroquímico en el cual, el electrolito es la humedad presente, [41].

La corrosión se manifiesta sobre el acero disminuyendo su capacidad mecánica al disminuir su diámetro (y con ello su sección eficaz); sobre el concreto, porque se fisura debido a la presencia de productos de corrosión más voluminosos que el acero que lo origina; y sobre la adherencia acero/concreto, que impide que se ponga de manifiesto el efecto benéfico que tiene sobre las propiedades mecánicas de la estructura el contacto íntimo entre el concreto y el acero, [42].

La corrosión de los metales, y en particular del hierro, es un proceso electroquímico en el cual el elemento que contiene el metal que se corroe presenta zonas anódicas y catódicas; en que el hierro, en presencia de humedad, se oxida al entrar en contacto con el oxígeno del aire, dando como resultado un producto color café que carece de las propiedades estructurales del hierro metálico. El producto de referencia se conoce como óxido de hierro hidratado o herrumbre figura 06.



Figura 06. Alto de nivel de corrosión en el hierro de una armadura, [43].

En las condiciones de pH existentes en un concreto “sano” (entre 12,6 y 14), y en presencia de una cierta cantidad de oxígeno, el acero de las armaduras se encuentra “pasivado”, esto es, recubierto por una película de óxidos transparente, compacta y continua de aproximadamente 1 a 100 nanómetros de espesor, que lo protege de la corrosión. No obstante, lo expuesto, bajo ciertas condiciones, la película protectora se destruye originando determinados procesos corrosivos cuyas características dependen de cuál es el agente causante. Las principales causas de corrosión son la disminución de la alcalinidad del medio que



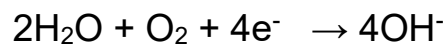
conduce a la corrosión generalizada de la armadura; y la presencia de iones cloruro provenientes del medio externo o incorporados durante la etapa de amasado del concreto, que conducen a la corrosión localizada del acero. Al disminuir el pH hasta valores por debajo de 9, la película pasiva deja de ser estable, pasando a ser termodinámicamente posible la disolución del hierro, de forma tal que la armadura se disuelve en forma generalizada [44]. Los productos de corrosión (óxidos, hidróxidos, óxidos hidratados, etc.) tienen un volumen más que 6 veces mayor que el del hierro del cual provienen, por lo cual ejercen presión sobre la cubierta del concreto hasta provocar fisuras, descascaramientos y delaminaciones. Por su parte, la corrosión localizada es un tipo de corrosión en la que el ataque se produce en zonas muy pequeñas, en algunos casos difíciles de detectar, donde la cantidad de material disuelto no guarda ninguna relación con el daño que puede ocasionar, [45].

Los iones cloruro tienen la propiedad de destruir en forma puntual la capa pasivante, lo que provoca un tipo de corrosión denominado “picado”. Los cloruros pueden estar en el hormigón, bien porque se añaden con sus componentes (aditivos, agua, etc.) o bien porque penetran desde el exterior a través de la red de poros. Esta última situación es la que se da en ambientes marinos o cuando se utilizan sales de deshielo en carreteras o puentes en climas fríos. El límite inferior de contenido de cloruros, por debajo del cual no existe la posibilidad de la aparición de picado depende de varios factores como ser el tipo de cemento, relación agua/cemento, contenido de humedad,



etc., pero un valor medio generalmente aceptado es de 0,4% en relación con el peso de cemento.

Es importante destacar que es necesaria la presencia de humedad para que todos estos fenómenos de corrosión tengan lugar ya que el agua es imprescindible porque no solo permite la movilidad de los iones a través del electrolito, sino que también interviene en el proceso catódico de reducción de oxígeno en medios neutros o básicos a través de la reacción:



Si los poros están saturados de humedad, las velocidades de corrosión serán moderadas o bajas porque el acceso de oxígeno hasta las armaduras (para que pueda ocurrir la reacción catódica) está dificultado por la presencia de agua. Por el contrario, si los poros están secos, el oxígeno tiene fácil acceso a la estructura, pero no hay agua disponible para que la reacción pueda ocurrir, [46].

2.6 Pasivación de los elementos metálicos

La pasivación de metales es un proceso natural de acumulación de una capa estable y tenaz de óxido metálico o barrera protectora en la superficie del metal que actúa como una barrera que separa la



superficie del metal del medio ambiente. La pasividad disminuye o detiene el proceso de corrosión debido a la formación de la capa.

La pasividad es la característica de un metal que se exhibe cuando ese metal no se activa en la reacción de corrosión. La pasividad disminuye o detiene el proceso de corrosión debido a la formación de la capa. Afortunadamente, desde el punto de vista de la ingeniería, los metales más susceptibles a este tipo de comportamiento son los materiales de ingeniería y estructurales comunes, incluidos el hierro, el níquel, el silicio, el cromo, el titanio y las aleaciones que contienen estos metales.

Por ejemplo, el acero inoxidable debe sus propiedades de resistencia a la corrosión a la formación de una película superficial pasiva autocurativa. Para que se produzca la pasivación y se mantenga estable, la aleación Fe-Cr debe tener un contenido mínimo de cromo de aproximadamente 10,5% en peso, por encima del cual puede producirse pasividad y por debajo del cual es imposible. Una vez que se limpia la superficie y la composición a granel del acero inoxidable se expone al aire, la película pasiva se forma inmediatamente. La resistencia a la corrosión que ofrecen los aceros inoxidables está controlada por la formación de esta fina película protectora en la superficie que se encuentra en estado pasivo figura 05. La rotura de esta película provoca la corrosión localizada y, en última instancia, el deterioro de las propiedades del acero inoxidable.

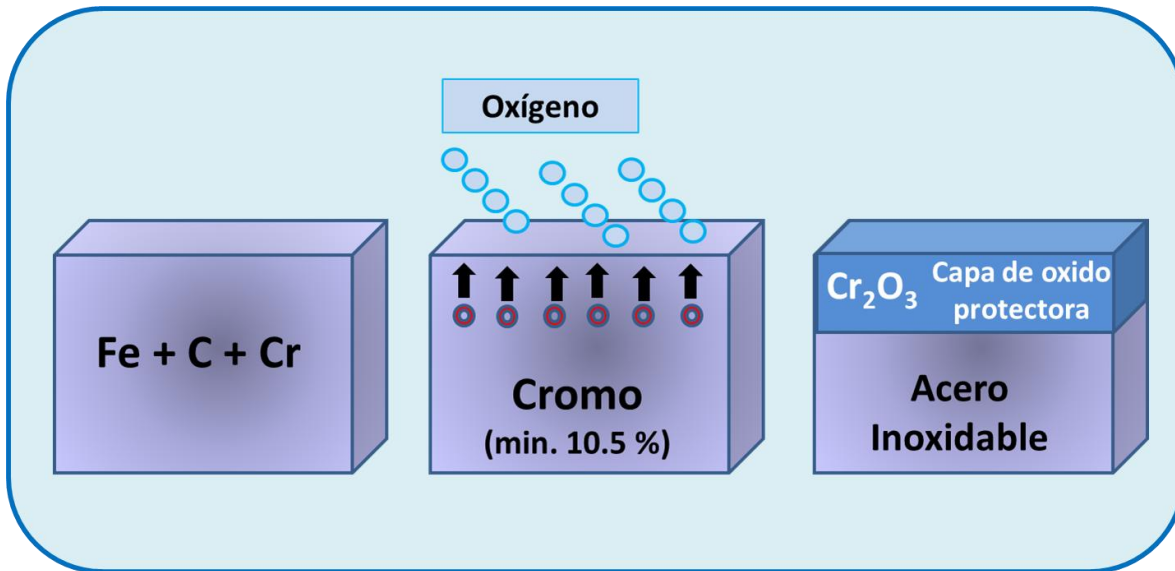


Figura 07. Formación de la pasivación de un acero inoxidable

El aluminio es muy resistente a la corrosión en muchos entornos porque también se pasiva. Si se daña, la película protectora normalmente se vuelve a formar muy rápidamente. Sin embargo, un cambio en el carácter del medio ambiente (por ejemplo, una alteración en la concentración de las especies corrosivas activas) puede hacer que un material pasivado vuelva a su estado activo. Generalmente, a altas temperaturas (en agua, la corrosión limita el uso del aluminio a temperaturas cercanas a los 100 ° C), la resistencia relativamente baja y las malas propiedades de corrosión del aluminio lo hacen inadecuado como material estructural, [47] - [55].

Los científicos e ingenieros especializados en corrosión dedican gran parte de su tiempo a encontrar formas de detener la corrosión del acero mediante la aplicación de revestimientos protectores.

Se utilizan otros metales, como el zinc, y polímeros, como los acrílicos o los epoxis, para impedir que las condiciones corrosivas lleguen a las superficies de acero. La capa pasiva es el revestimiento soñado por los ingenieros de corrosión, ya que se forma por sí misma y se mantiene y repara siempre que el entorno pasivante (alcalino) esté ahí para regenerarla si se daña. Si se puede mantener el entorno pasivante, es mucho mejor que cualquier revestimiento artificial como el galvanizado o el epoxi unido por fusión, que pueden dañarse o consumirse, permitiendo que la corrosión continúe en las zonas dañadas. Sin embargo, el entorno pasivante no siempre se mantiene. Dos condiciones pueden romper el medio de pasivación del concreto sin atacarlo primero. Una es la carbonatación y la otra el ataque por cloruros, [56].

2.7 Soluciones poro

Las reacciones y los equilibrios en el cemento son complicados y no están bien definidos. Se forman muchas fases sólidas diferentes durante la hidratación del cemento y estas fases van cambiando con el tiempo. El agua de los poros suele estar sobresaturada con respecto al hidróxido de calcio, [57].

Por lo tanto, es imposible realizar una estimación cuantitativa teórica de la composición de la solución de poros en un momento dado. Las investigaciones experimentales de las soluciones de poros de los



cementos han sido realizadas anteriormente para los cementos Portland y de escorias por Longuet et al, [58].

El proceso de difusión es más fácil si el concreto tiene una estructura de poros abierta. A escala macroscópica, esto significa que debe haber una buena compactación. A escala microscópica, un concreto bien curado tiene poros pequeños y una menor conectividad de los poros para que el CO_2 tenga más dificultades para desplazarse por el concreto [59].

Por medio de soluciones sintéticas es posible estudiar el fenómeno de corrosión en varilla de refuerzo inmersas en el concreto para tratar de reproducir la solución poro del concreto en el intervalo de pH de 9 a 13.6 [60]. Aunque, las velocidades de corrosión medidas en solución no se pueden extrapolar de forma directa al comportamiento real del concreto, si se puede evaluar los factores que influyen en el proceso de corrosión y el peso relativo que tienen en el comportamiento global [61], [62], y [63]. En la Tabla 02 se muestran las soluciones que se han empleado en distintas investigaciones, [64].

Tabla 02. Soluciones poro utilizadas en distintas investigaciones

Solución poro (SPS)	pH	NaOH	KOH	Ca(OH) ₂	Ca(SO ₄).H ₂ O	NaHCO ₃	Na ₂ CO ₃
SPS 1	13			2.0 (g/L)			
SPS 2	13	3.7 (g/L)	10.5 (g/L)	2.0 (g/L)			
SPS 3	12	0.0833 (g/L)	0.233 (g/L)				
SPS 4	13	0.1 (mol/L)	0.03 (mol/L)	0.03 (mol/L)	0.002 (mol/L)		
SPS 5	14	8.33 (g/L)	23.3 (g/L)	2 (g/L)			
SPS 6	14	0.9 (mol/L)					
SPS 8	13			Saturada			
SPS 9	9					0.3 (mol/L)	0.1 (mol/L)
SPS 10	9					0.015 (mol/L)	0.005 (mol/L)
SPS 11	14	0.14 (mol/L)	0.23 (mol/L)	0.002 (mol/L)			

Se concluye que un determinado contenido total de cloruro por sí solo no es un criterio adecuado para la evaluación del riesgo de corrosión.



Los resultados de los estudios sobre los cambios en la composición de la solución de los poros y el contenido total de cloruro de las muestras de pasta de cemento mostraron que el cloruro se absorbe con relativa rapidez, pero sólo se elimina con bastante lentitud. Esto puede explicarse, al menos en parte, por la disminución de la concentración de OH^- en la solución de poros durante el almacenamiento a la intemperie y la influencia de la concentración de OH^- en la fijación del cloruro, [65].

2.8 Elementos metálicos utilizados en el sistema acero-concreto

2.8.1 Barras de Refuerzo de Acero

La varilla de construcción se clasifica por su esfuerzo de fluencia nominal, es decir, su resistencia que se determina en Grados 40 y 60 convencionalmente. Al igual se ofrecen en diferentes diámetros en octavos de pulgada o milímetros, que se pueden adaptar a las necesidades de una variedad de proyectos de construcción.

Su composición química, permite que el acero se pueda soldar bajo condiciones controladas. También, se regula la masa nominal en kg/m, a partir de la cual se puede calcular las dimensiones de radio, área de la sección transversal y perímetro de la varilla Ternium deformada.

La varilla de acero, además se puede doblar hasta 180° sin que presente alguna tensión o daño en su estructura que afecte su



desempeño. Sin olvidar mencionar que se puede cortar y aplicar con facilidad, gracias a la resistencia del acero.

Las varillas corrugadas se pueden encontrar en diferentes Grados de acero que define la resistencia con la que cuenta a los esfuerzos de tensión y compresión que por lo regular generan las cargas o pesos de la estructura. Entre las existentes se encuentran :

- Varilla corrugada grado 40: Es la barra más comercial debido a su bajo costo y se utiliza en casi todos los proyectos de construcción, como en la edificación de viviendas con hasta plantas, sin que presente complicaciones.
- Varilla grado 50: Este tipo de varilla se ocupa en la construcción de edificaciones de concreto armado como de viviendas, edificios, puentes y obras industriales.
- Varilla grado 80: Estas varillas son ideales para conformar estructuras con exigencias más complejas, en donde las varillas comunes como la de Grado 50, no dan la posibilidad de establecer un factor de seguridad aceptable.
- Varilla grado 6000: Este acero laminado se utiliza para construir losas sólidas y aligeradas, castillos ahogados en muros de mampostería, como refuerzo horizontal en muro de mampostería, anillos o estribos, así como refuerzo adicional para sistemas de



viguetas-bovedilla, dalas y castillos, viguetas y trabes, en elementos prefabricados y postes de concreto.

Ventajas de utilizar la varilla corrugada de acero

1. Es resistente a la tracción y torsión.
2. Es barata, por lo que no representa una gran inversión para la construcción.
3. Es un producto reciclable ya que sus residuos se pueden reutilizar.
4. Dispone de una gran flexibilidad.
5. Brinda seguridad a la construcción gracias a su capacidad de soportar grandes cargas.
6. Es resistente a fuerzas sísmicas.
7. Es fácil de soldar y manejar, gracias a su gran nivel de ductilidad, [66].

Otra clasificación de las barras refuerzo es indicado por la norma N-CMT.2.03.001/07, donde se indican los requisitos de calidad para el acero de refuerzo proveniente de lingote o palanquilla que se utilice en estructuras de concreto hidráulico. La norma lo define como el conjunto de varillas de acero que se utilizan para tomar los esfuerzos internos de tensión que se generan por la aplicación de cargas, contracción por fraguado y cambios de temperatura en una estructura de concreto



hidráulico, pueden ser varilla lisas o corrugadas. La clasificación dada por la norma de acuerdo con la tabla 03, se clasifica según el esfuerzo de fluencia que pueda resistir.

Tabla 03. Clasificación del acero según el esfuerzo de fluencia

Esfuerzo de Fluencia MPa(Kg/cm ²)	Grado
294 (3 000)	30
412 (4 200)	42
510 (5 200)	52
412 (4 200)	42 baja aleación

2.8.2 Barras de Refuerzo Galvanizadas

Las primeras investigaciones realizadas en EE.UU. demostraron en general que el galvanizado era una opción inferior a la armadura revestida con epoxi unido por fusión cuando se enfrentaba al ataque del cloruro. El memorando de la FHWA The FHWA memorandum (Manning et al., 1982 sugirieron una vida útil de 15 años para las barras de refuerzo galvanizadas en hormigón de buena calidad, [67]. Sus conclusiones están respaldadas por Andrade et al. (1995) con respecto



al ataque por cloruros, [68]. Las barras galvanizadas pueden ser más eficaces contra la carbonatación. Sin embargo, una reciente reevaluación de las estructuras sobre el terreno sugiere que es más duradero de lo que se pensaba en ambientes marinos y otros entornos con cloruros. Yeomans da numerosos ejemplos que sugieren un aumento del umbral de corrosión del rango 0,2-1,0% para el acero negro al 1,0-2,0% para el acero galvanizado, alcanzando los 50 años de vida útil hasta la primera reparación que la FHWA buscaba como daño en la manipulación, ya que el revestimiento se corroe sacrificadamente y los defectos no son tan importantes como en el caso del FBECR, [69]. Su principal desventaja es el riesgo de corrosión galvánica acelerada del revestimiento si la armadura galvanizada está unida al acero negro touncoated. Es un riesgo tal como el de los paneles de revestidos. La galvanización puede realizarse fácilmente en la mayoría de los países, aunque la calidad y composición del revestimiento pueden afectar a su durabilidad. Sufre menos problemas cuando se manipula bruscamente porque el revestimiento es sacrificial y protege las zonas desnudas. Puede producirse un agotamiento acelerado de la galvanización si se mezclan barras de refuerzo galvanizadas con barras no galvanizadas. Si se utilizan en la misma estructura (por ejemplo, en el tablero de un puente, pero no en la subestructura, o viceversa), debe garantizarse el aislamiento eléctrico completo de las barras galvanizadas y no galvanizadas. Puede ser muy arriesgado aplicar tratamientos electroquímicos al acero de armadura galvanizado. Pueden producirse picaduras muy graves. NCT, los titulares de las patentes de las técnicas



de realcalinización y desalinización, no recomiendan su uso en estructuras que contengan barras de refuerzo galvanizadas, [70].

2.8.3 Barras de Refuerzo de Acero Inoxidable

Las barras de refuerzo de acero inoxidable se han aplicado en circunstancias especiales, pero son una opción muy cara. Actualmente se está comercializando un acero inoxidable revestido con un núcleo de acero dulce y 1-2 mm exteriores de acero inoxidable, que sigue siendo relativamente caro, pero cuesta aproximadamente la mitad que la barra de refuerzo de acero inoxidable puro. Los aceros inoxidables pueden sufrir picaduras, por lo que debe utilizarse el grado correcto de acero inoxidable. Parece que ha habido problemas de control de calidad y garantía del proceso de fabricación, [71]. El problema de la mezcla de metales se aplica al acero inoxidable con el acero dulce, al igual que al acero galvanizado y no galvanizado en la sección anterior. El acoplamiento galvánico del acero dulce y el acero inoxidable acelerará la corrosión del acero dulce. Este problema se ha observado en balcones y fachadas, [72]. Sin embargo, los últimos documentos de orientación sobre el acero inoxidable han encontrado indicaciones de que los aceros inoxidables son cátodos pobres, el efecto galvánico es mínimo y hay poca aceleración de la velocidad de corrosión.), [73]. Obviamente, es una buena práctica de diseño garantizar que la armadura de acero dulce tenga un riesgo muy bajo de exposición a los cloruros si se mezcla con barras de acero inoxidable, [74].



CAPITULO III. ACEROS INOXIDABLES

3.1 Introducción

Día a día como miembros de una comunidad podemos apreciar las diversas estructuras o mecanismos creados por el hombre, cada una de estas creaciones desarrollará una función distinta, pero que sucede si el material usado no es el adecuado, pues se reduce la vida útil de este ocasionando mayores costos de los previstos en lo que viene a ser mantenimiento, antiguamente el material más usado en estructuras metálicas fue el acero al carbono, hoy por hoy ha dejado de ser así pues el acero inoxidable el cual es una aleación de hierro (Fe) y cromo (Cr), nos brinda una mayor vida útil, este no se verá afectado por el maltrato, siempre mantendrá una buena imagen sin presentar óxido.

Se define metalúrgicamente al acero inoxidable como una aleación de acero con un mínimo de 10,5% de cromo y un máximo de 1.2% de carbono. El porcentaje de cromo y otros componentes varía según el grado deseado de acero. A pesar de que se le llama “inoxidable”, no es totalmente a prueba de óxido. También se le llama CRES, por sus siglas en inglés, o acero resistente a la corrosión, en especial cuando la aleación no tiene grado. Se encuentra disponible en varios grados y acabados de superficie para cumplir con los requerimientos industriales y domésticos y del ambiente el cuál se expone el metal, [75].



La adición de otros elementos permite formar un amplio conjunto de materiales. En los aceros inoxidable, dos elementos se destacan: el cromo, siempre presente, por su importante papel en la resistencia a la corrosión y el níquel, por su contribución en la mejora de las propiedades mecánicas, [76].

La importancia de este tipo de aceros se debe a su amplio uso en diferentes ramas de la industria, que se extiende desde aplicaciones de la vida cotidiana hasta industrias como la mundial elevada (producción mundial de acero inoxidable en el primer semestre del año 2009 fue de 10,85 millones de toneladas [77]. Los aceros inoxidables son actualmente imprescindibles en la vida cotidiana.

El acero inoxidable puede ser clasificado en cinco familias diferentes; cuatro de ellas corresponden a las particulares estructuras cristalinas formadas en la aleación: austenita, ferrita, martensita y dúplex (austenita más ferrita); mientras que la quinta son las aleaciones endurecidas por precipitación, que están basadas más en el tipo de tratamiento térmico usado que en la estructura cristalina, [78].

3.1.1 Número equivalente de Resistencia a Picaduras (PREN)

La mayoría de las aleaciones analizadas como posibles sustitutos o candidatos en el concreto se desarrollaron con objetivos distintos a los de servir de acero de refuerzo. Por lo tanto, se dispone de muy poca información sobre cómo se comportarían en entornos alcalinos y cuál sería su umbral de Cl^- en tales soluciones. La mayoría son aceros de



alta resistencia que se utilizan en diversas aplicaciones industriales. Además, el número de equivalencia de resistencia a la picadura (PREN) sólo ha tenido un éxito marginal en la predicción de la resistencia a la corrosión en el concreto según varios investigadores a pesar de su amplio éxito en soluciones acuosas que contienen Cl^- .

Mediante el cálculo del PREN es posible comparar la resistencia de tipos de acero contra la corrosión por picaduras. Cuanto mayor sea el número, mejor es la resistencia, [79], [80], [81], [82], [83], [84] y [85].

Obviamente los PREN por sí solos no se pueden usar para predecir si un tipo en particular será adecuado para una aplicación dada.

$$\text{PREN} = \% \text{Cr} + 3.3\% \text{Mo} + 16\% \text{N},$$

Donde:

$\% \text{Cr}$ = Contenido de cromo en %wt

$\% \text{Mo}$ = Contenido de Molibdeno en %wt

$\% \text{N}$ = Contenido de Nitrógeno en %wt

3.2 Aceros inoxidables ferríticos

Los aceros inoxidables ferríticos se tratan de aleaciones de hierro y cromo (contenido de cromo: de 10,5 a 30 %). A penas contienen níquel y presentan una buena resistencia a la corrosión en líquidos y a la oxidación a alta temperatura. Son más baratos que los austeníticos y muy resistentes a la corrosión, especialmente en atmósferas sulfurosas. No sufren transformación alotrópica y al ser ferríticos se conforman



aceptablemente. Pese a algunos inconvenientes (fragilidad por formación de fase σ y por impurezas) pueden reemplazar en condiciones no muy severas a los austeníticos.

Su estructura permanece fundamentalmente ferrítica y cúbica centrada en el cuerpo BCC.

Estos aceros tienen un comportamiento ferromagnético.

Se aplican en intercambiadores de calor, equipos de destilación, silenciadores de tubos de escape, electrodomésticos, cubertería, menaje, [86].

Las especificaciones más comunes son AISI 430, 409 y 434.

Propiedades básicas:

Resistencia a la corrosión de moderada a buena, la cual se incrementa con el contenido de Cromo y en algunas aleaciones de Molibdeno.

Magnético, no endurecible y siempre usado en condiciones de recocido.

Su soldabilidad es pobre por lo que generalmente se limitan las uniones por soldadura a calibres delgados. En el caso del 409 se adiciona titanio como estabilizador, mejorando su facilidad de soldado.

Los usos comunes incluyen: equipo y utensilios domésticos como cuchillería, utensilios de cocina, adornos, dispenseros, etc. En la arquitectura se utilizan como revestimiento en interiores y en ambientes poco agresivos.

En aplicaciones industriales se encuentran en líneas de alivio, líneas de conducción, mesas de trabajo, silos, vertederos, componentes para bandas transportadoras, tanques, andadores, lavaderos, equipo para el manejo y lavado de minerales, equipo de transporte, extractores de humos y polvos, tubo calibrado para evaporadores, convertidores catalíticos, etc., [87].

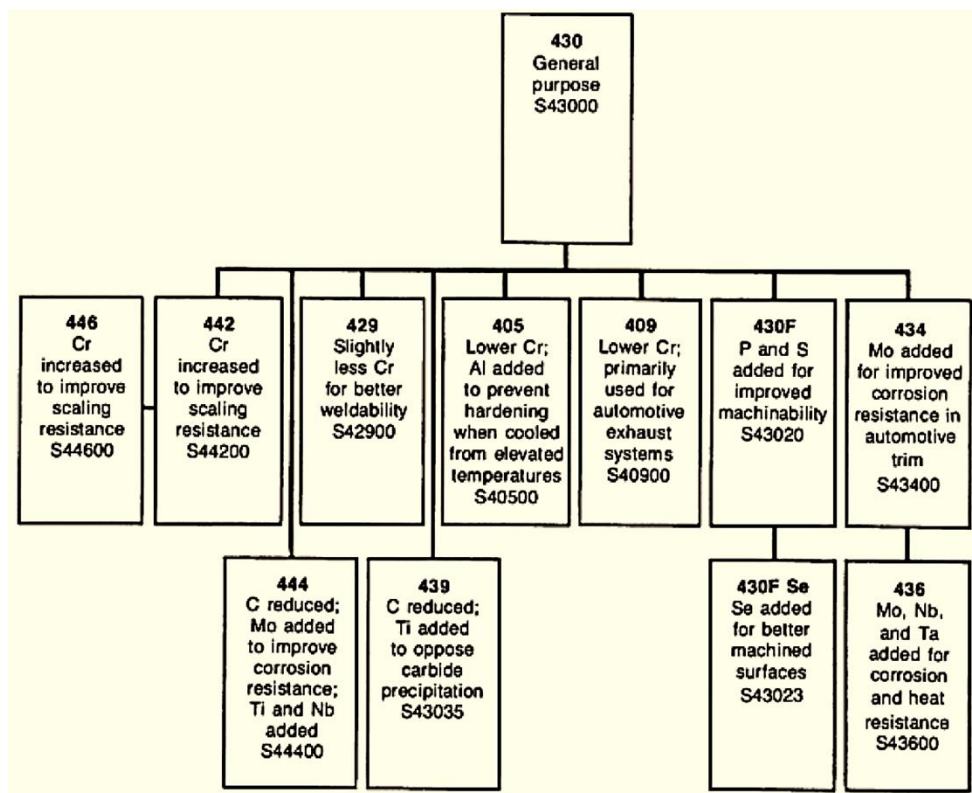


Figura 08. Relación de familia de los aceros inoxidable ferríticos [88].

3.3 Aceros inoxidables austeníticos

Los aceros inoxidables austeníticos tienen una amplia gama de composiciones químicas. Los mayores elementos de aleación son el



cromo (Cr), el níquel (Ni) y el molibdeno (Mo); pero hay muchos otros elementos que contribuyen a la diversidad de las propiedades.

Los aceros austeníticos tienen un porcentaje bajo de carbono ($C < 0,08\%$), el contenido de cromo puede oscilar entre el 16 hasta el 28 % y el contenido de níquel de 3,5 a 32 %. Los elementos aleantes están divididos en estabilizadores de ferrita o austenita, donde el cromo es un estabilizador de la ferrita mientras que el níquel estabiliza la austenita. También los hay de «bajo carbón» o «grados L» (0,30% C máx.) y grados estabilizados aleados con titanio o Niobio, para prevenir en las estructuras soldadas la corrosión en la región cercana a la soldadura.

Las especificaciones más comunes son AISI 304, 304L, 321, 316, 316L, 316Ti y 317L.

Una herramienta muy común para predecir la estructura a temperatura ambiente según la composición química es el diagrama de Schaeffler-Delong que se muestra en la figura 07, en el diagrama se observa también que los aceros austeníticos de baja aleación se sitúan en la parte inferior izquierda del diagrama. Están por lo tanto en la región de la martensita y esos grados se llaman aceros inoxidable austeníticos metaestables, desde el momento que son susceptibles a la transformación martensítica inducida por deformación. Aceros inoxidable austeníticos más aleados serán más estables y no transformarán en martensita durante la deformación, [89].

Propiedades básicas:



- Excelente resistencia a la corrosión (mejorada con la adición de molibdeno).
- Excelente factor de higiene y limpieza.
- Formado sencillo y de fácil transformación.
- Excelente soldabilidad.
- Endurecido por trabajo en frío, no por tratamiento térmico.
- Su uso es en la condición de recocido, en la cual no son magnéticos.
- Tienen la habilidad de ser funcionales en temperaturas extremas, bajas temperaturas (criogénicas), previniendo la fragilización y altas temperaturas (hasta 925°C).
- Resistencia a la escamación.
- Resistencia a la corrosión húmeda por abrasión y herrumbre.

Los usos comunes cubren un rango muy extenso en equipo y mobiliario doméstico como estantería, cubiertos, mesas para legumbres, mingitorios, así como aplicaciones arquitectónicas y mobiliario urbano. En el proceso de alimentos el equipo requiere de propiedades de resistencia a la corrosión, higiene y limpieza, en las industrias de lácteos, cervezas, vinos, bebidas, procesadoras y empacadoras de alimentos, así como en la preparación y servicio de los mismos, son indispensables.

Son usados a muy bajas temperaturas (criogénicas) para el almacenamiento de gases licuados; a altas temperaturas para intercambiadores de calor, componentes de hornos, para equipos de prevención y control de la contaminación, extracción de humos y plantas

para el tratamiento de aguas residuales. La excelente resistencia a la corrosión húmeda y su soldabilidad, los hacen ideales para la fabricación de tuberías, tanques, recipientes a presión y de proceso para las industrias química, petroquímica, del petróleo, extracción de minerales, papel y pulpa, etc, en conexiones, válvulas, abrazaderas, mallas, cribas.

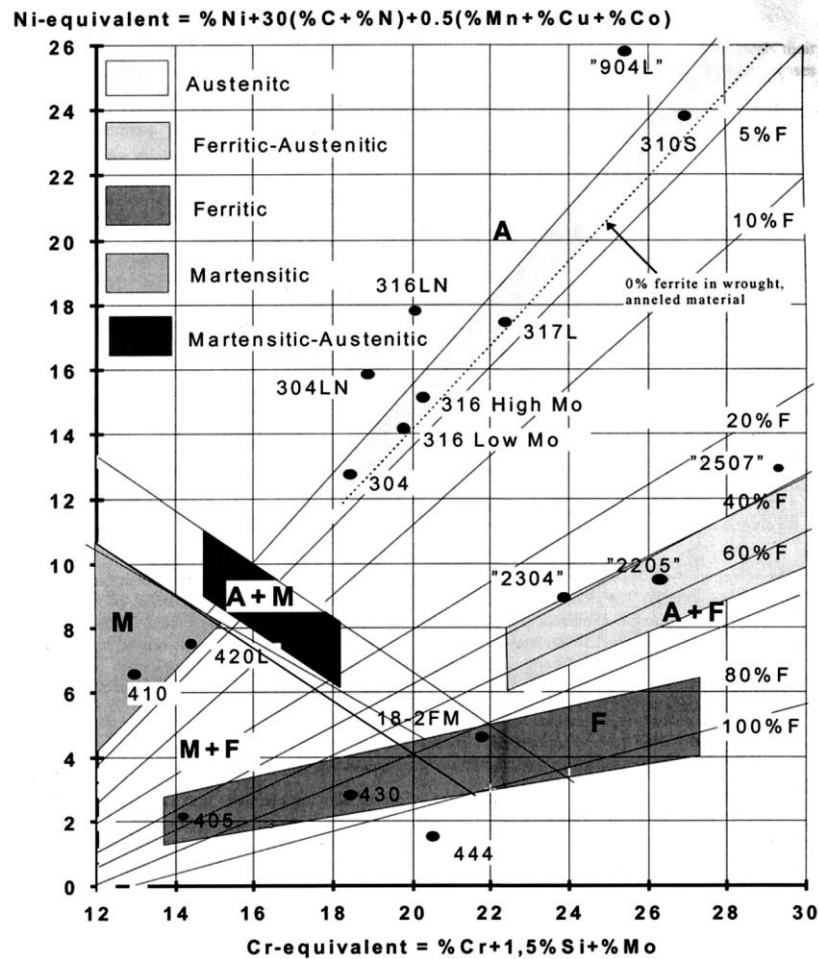


Figura 09. Diagrama Schaeffler-Delong, [90].

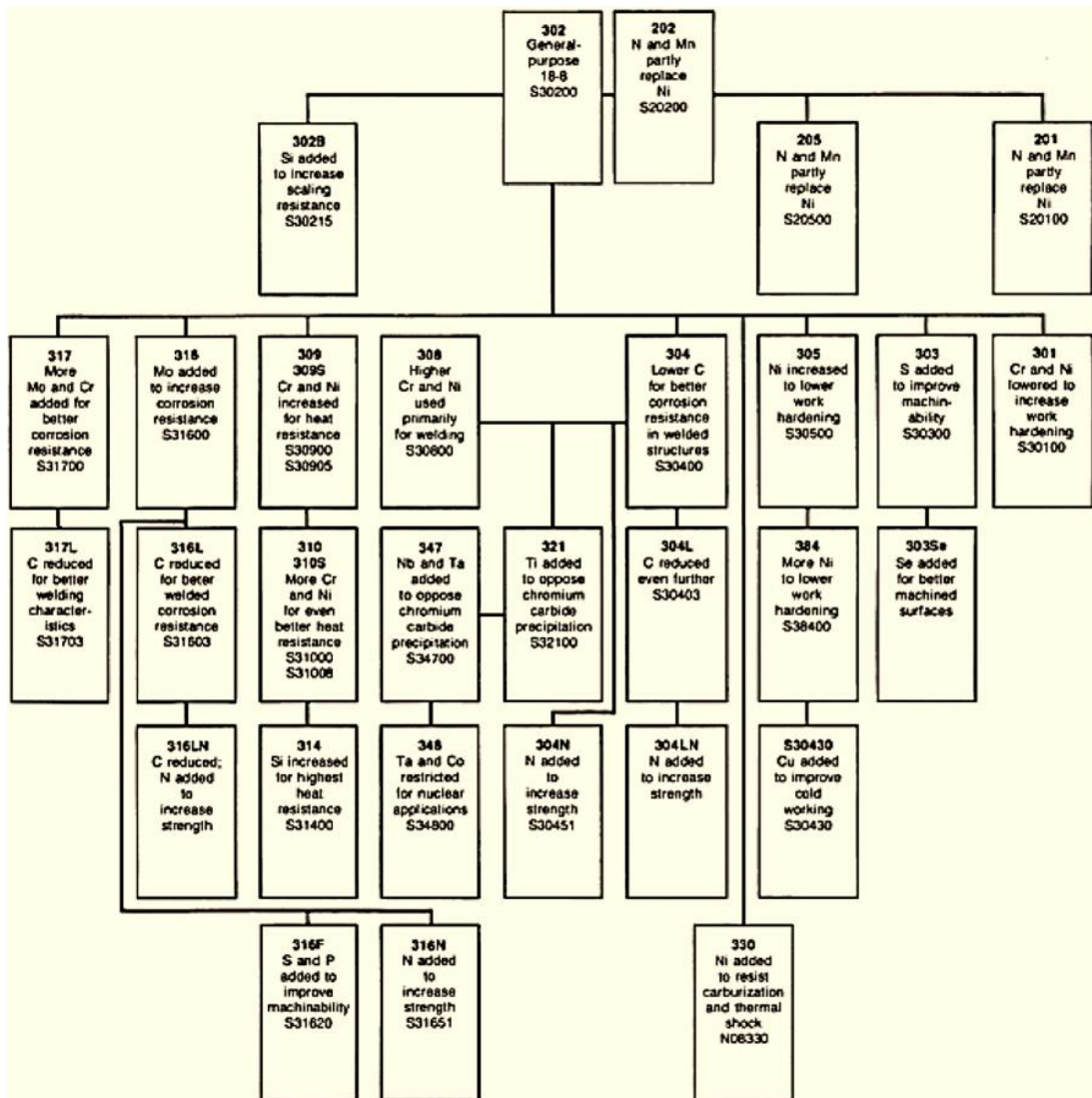


Figura 10. Relación de familia de los aceros inoxidable austenítico, [91].

3.4 Aceros inoxidables martensíticos

Los aceros inoxidables martensíticos son la primera rama de los aceros inoxidables simplemente al Cromo. Fueron los primeros desarrollados industrialmente (acero inoxidable para cuchillería). Tienen relativamente un alto contenido de Carbón y un 12 a 18% de Cromo.



Las especificaciones comunes AISI son el 410, 420 y 431.

Propiedades básicas:

- Resistencia moderada a la corrosión
- Endurecibles por tratamiento térmico y por tanto, se pueden desarrollar altos niveles de resistencia mecánica y dureza.
- Debido al alto contenido de Carbón y a la naturaleza de su dureza, es de pobre soldabilidad.
- Magnéticos.

Los usos comunes incluyen aquellas aplicaciones en donde se necesitan dureza y resistencia mecánica tal, como en hojas de cuchillos y tijeras, instrumental quirúrgico, pernos, ejes toberas, flejes, resortes, alabes de turbinas y abrazaderas, [94].

3.5 Aceros inoxidables endurecibles por precipitación

Los aceros inoxidables endurecibles por precipitación (PH) son una familia muy especializada de aceros inoxidables cuya existencia se debe a la necesidad de materiales de muy alta resistencia con una buena resistencia a la corrosión. El caballo de batalla son las aleaciones martensíticas PH, que se utilizan de muchas formas. Se utilizan principalmente como piezas forjadas, barras y otras formas trabajadas en caliente, pero también pueden obtenerse en chapas y flejes laminados en frío, aunque no con la planitud que se espera de los inoxidables no PH. Las aleaciones semiausteníticas son más fáciles de producir en forma de chapas, flejes y alambres, y están diseñadas para



aplicaciones que requieren un gran conformado antes del endurecimiento.

Si el costo es una preocupación mayor que la resistencia a la corrosión o la tenacidad, deben considerarse los inoxidables martensíticos para aplicaciones en las que se requiera una resistencia y dureza superiores a las de los inoxidables ferríticos y austeníticos recocidos. El aumento del uso de aleaciones de titanio y materiales compuestos avanzados puede producirse a expensas de las aleaciones de PH inoxidables y, al mismo tiempo, puede crear nuevos nichos de aplicación para ellas, [92].

Aleaciones endurecibles por precipitación 17-4 PH, 15-5 PH martensíticos en estado recocido, contienen niobio y cobre. Desarrollan su alta resistencia mecánica y dureza a través de tratamiento térmico que precipita el cobre, mientras que las aleaciones endurecibles por precipitación 17-7 PH, PH 15-7 MO Son austeníticos en estado recocido, pero martensíticos en condición endurecida, su composición del 17-7 PH incluye cromo, níquel y aluminio; el 15-7 MO incluye, además, molibdeno, [93].

3.6 Aceros inoxidables supermartensíticos

Los aceros inoxidables supermartensíticos provienen de los aceros inoxidables martensíticos los cuáles son aleaciones con cantidades de cromo entre 11.5 y 18%, que pueden trabajarse en frío sin dificultad y en caliente fácilmente, que se maquinan satisfactoriamente, que tienen



buena tenacidad, buena resistencia mecánica, gran resistencia al desgaste y moderada resistencia a la corrosión. Desafortunadamente los aceros martensíticos se han visto limitados por las desventajas de baja ductilidad y alta susceptibilidad a la precipitación de carburos de cromo cuando poseen altos contenido de carbono, además de exhibir sensibilidad al agrietamiento en presencia de ácido sulfhídrico.

Desventajas por las cuáles los aceros inoxidable supermartensíticos se han desarrollado como una alternativa tecnológica para la industria del gas y del petróleo, siendo una opción económica, ofreciendo buena resistencia a la corrosión y adecuadas propiedades mecánicas, especialmente en ambientes que contienen dióxido de carbono y bajos niveles de ácido sulfhídrico [8]; con bajos contenidos de carbono (abajo del 0.03%), para suprimir la reducción de Cr en la matriz a causa de la precipitación de carburos de cromo. Alrededor de 4- 5.5% de Ni para asegurar la fase de martensita y entre 1-2% de Mo para proveerle resistencia a la corrosión localizada y la corrosión asistida por esfuerzo.

En estas condiciones el acero inoxidable supermartensítico (UNS S41125) desarrolla mayor resistencia a la corrosión aún en soluciones con cloruros de sodio y gran resistencia a la corrosión asistida por esfuerzo en ambientes con pequeñas cantidades de H₂S, que un acero martensítico (UNS S42000) convencional, [95] y [96].

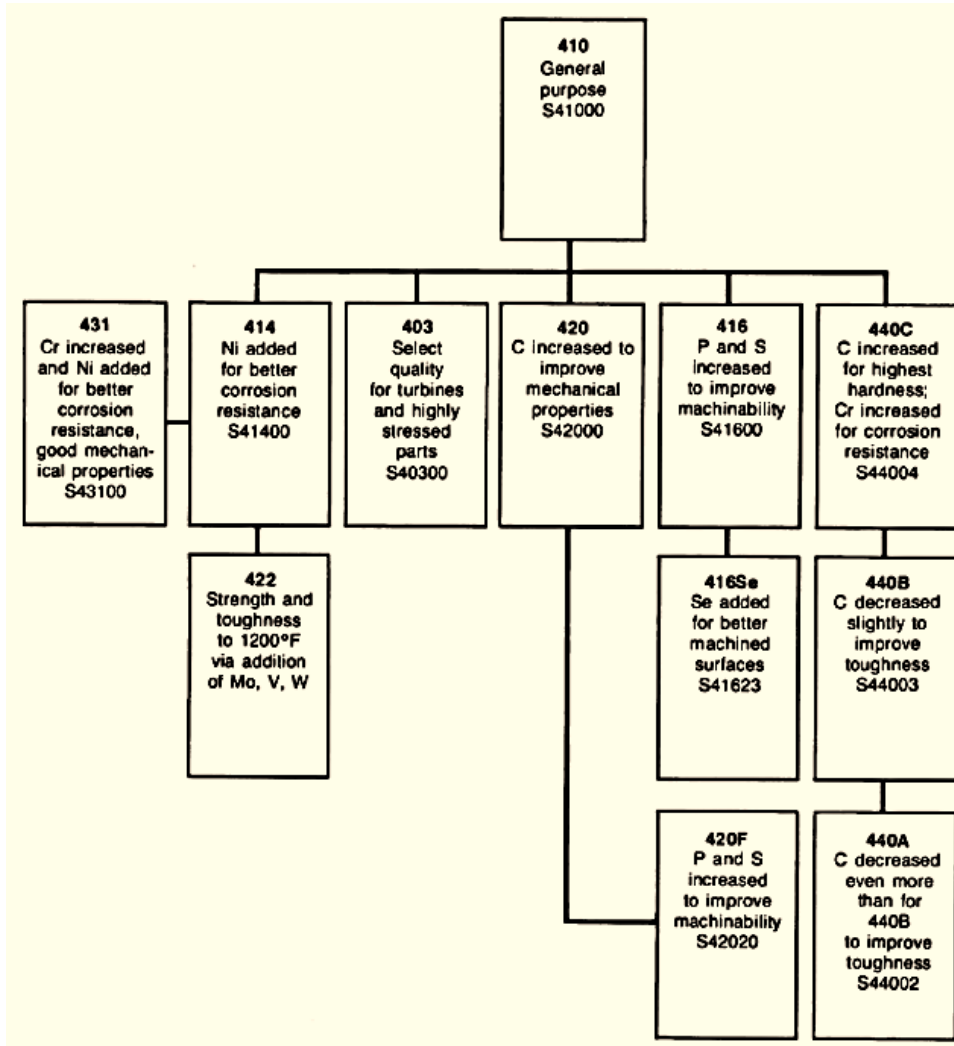


Figura 11. Relación de familia de los aceros inoxidables martensíticos, [97].

3.7 Aceros inoxidables Duplex

Son aleaciones bifásicas austenítico-ferríticas (aleaciones cromo-níquel-molibdeno) Los dúplex tienen un contenido de cromo de entre 18 y 26% y de níquel de 4.5 a 6.5%. La adición de elementos de nitrógeno, molibdeno, cobre, silicio y tungsteno imparten ciertas características de resistencia a la corrosión cuyo límite elástico duplica al de los aceros austeníticos y la resistencia a la corrosión similar, La adición de



elementos como nitrógeno, molibdeno, cobre, silicio, y tungsteno permite controlar el balance en la configuración metalográfica, así como impartir ciertas características de resistencia a la corrosión, [98].

El contenido de Níquel de 4,5 a 6% Ni, es insuficiente para desarrollar completamente la estructura cristalina austenítica. La mayoría de los grados contienen Molibdeno en el rango de 2,5 a 3% Mo.

Las especificaciones más comunes son AISI 329 y Aleaciones de patente.

Propiedades básicas:

- Estructura Duplex (ferrita y austenita), alta resistencia a la corrosión de fractura bajo tensión.
- Corrosión por picaduras. Alta resistencia.
- Buena soldabilidad.
- Muy buena resistencia mecánica.

Los usos comunes incluyen aplicaciones tales como paneles y tuberías de intercambiadores de calor, equipos para el manejo de materiales, tanques y recipientes en donde estén presentes altas concentraciones de cloruros, como son los casos de enfriadores de agua marina, desalinizadoras, plantas de encurtido de alimentos y aguas minerales agresivas, extracción de petróleo en plataformas marinas.



Los aceros dúplex se caracterizan por un alto límite elástico, que varía entre 550 y 690 MPa. El aumento del nitrógeno en los aceros dúplex aumenta el porcentaje de la austenita hasta aproximadamente un 50%, [99].

3.8 Función primordial de los elementos de aleación

El modelado de procesos se está desarrollando en la medida en que el diseñador del proceso es capaz de tomar la especificación microestructural para una composición dada, que controla las propiedades del material, y definir una ruta de fabricación óptima para obtener el material y el rendimiento deseados. Las aleaciones modernas dependen, por tanto, de la integración adecuada de la composición y la estructura de la aleación con el procesamiento para obtener las propiedades y el rendimiento deseados, [100].

3.8.1 Influencia de los elementos de aleación en el acero inoxidable

Cromo, principal elemento de la aleación, permite que se forme en la superficie del material una película de óxido, favorece la formación de ferrita. Incrementa la resistencia a la oxidación y la corrosión.

Níquel, favorece la formación de austenita. Incrementa la resistencia a temperaturas elevadas y criogénicas, aumenta la resistencia a la corrosión y la ductilidad.



Molibdeno, favorece la formación de ferrita. Mejora notablemente la resistencia a altas temperaturas y la resistencia a la corrosión.

Carbón, fuerte formador de austenita, mejora las propiedades mecánicas, pero puede causar corrosión intergranular por los carburos que forma con el cromo.

Manganeso, estabiliza la austenita a temperatura ambiente, pero forma ferrita a temperaturas elevadas. Inhibe la fisuración en caliente.

Titanio, favorece la formación de ferrita, actúa como refinador de grano, pues se combina con el carbono reduciendo la susceptibilidad a la corrosión intergranular.

Otros elementos que forman parte de la aleación son: el Niobio (Nb), Fósforo (P),

Azufre (S), Selenio (Se), Silicio (Si), Nitrógeno (N); cada uno de ellos tiene diferente influencia en las características físicas, químicas y mecánicas de los aceros inoxidables, [101].

Como la definición de acero inoxidable viene dada por el porcentaje de cromo, que tiene que superar el 10.5 %, el aumento de este porcentaje y la combinación con el níquel (figura 09) y el carbono (figura 10) determina la naturaleza y la proporción de las fases presentes y en consecuencia define el tipo del acero inoxidable.

Figura 12. Tipos de familias de aceros inoxidables en función del contenido de cromo y níquel, [102].

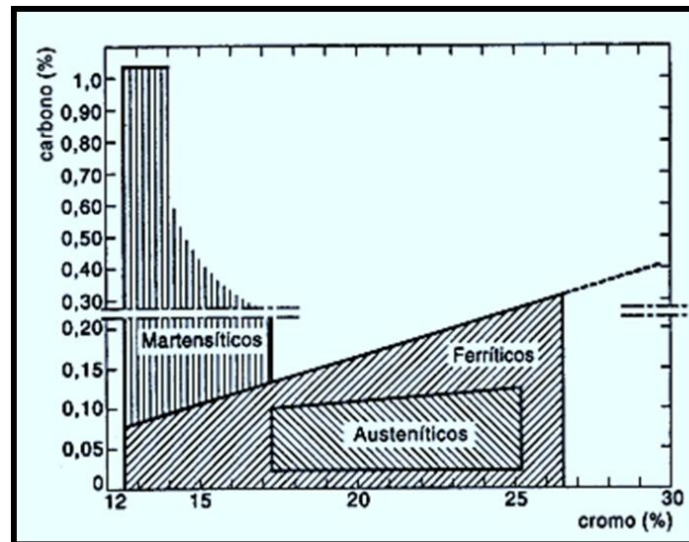


Figura 13. Tipos de familias de aceros inoxidables en función del contenido de cromo y carbono, [103].

La tabla 05. Muestra un condensado del efecto de la adición o disminución de algunos elementos de aleación en los aceros inoxidables austeníticos de la serie 300, para mejorar algunas de sus propiedades, dependiendo de su uso o aplicación.

Tabla 04. Aceros inoxidables austeníticos serie 300.

Tipo AISI	Descripción	Aplicaciones más comunes
302 (18% Cr, 8% Ni)	Aleación básica	
303 (18% Cr, 9% Ni, 0.15% S)	Agregado de S para mejorar maquinabilidad.	Conectores, cerraduras, tuercas y tornillos, partes maquinadas, partes para bombas.
304 (18% Cr, 8% Ni)	Menos % C (0.08%) que el 302 para mejorar resistencia a la corrosión intergranular.	Equipo químico de procesos, manejo de alimentos y equipos para hospitales.
304L (18% Cr, 8% Ni)	Menos de 0.03% C (para reducir los riesgos de corrosión intergranular).	Reducción de carbono para evitar la corrosión intergranular en la soldadura.
309/309S (23% Cr, 13% Ni)	Más Cr y Ni para aumentar la resistencia a la formación de escamas a altas temperaturas. 309 0.2% C y 309S 0.08% C	Calentadores de aire, equipos para tratamientos térmicos de aceros.
316 (17% Cr, 12% Ni, 3% Mo)	Agregado de Mo, mejora la resistencia a la tracción a altas temperaturas. 0.08%C	Equipos para el procesamiento de alimentos, farmacéuticos, fotográficos, textil.
316 L (17% Cr, 12% Ni, 3% Mo)	Reducción del % de C para evitar la corrosión intergranular durante la soldadura. 0.03%C.	Intercambiadores de calor, prótesis temporarias.
330 (21% Cr, 36% Ni)	Más Ni para aumentar la resistencia al shock térmico y carburación.	Hornos de recocido, partes para turbinas de gas e intercambiadores de calor.
347 (18% Cr, 10% Ni)	Estabilizado con Nb y Ta para evitar los carburos de Cr.	Tanques soldados para el almacenamiento de sustancias químicas orgánicas.

3.9 Tratamientos térmicos en los aceros inoxidables

Los Tratamientos Térmicos son una herramienta muy utilizada para la obtención de propiedades mecánicas adecuadas necesarias en



determinados procesos de producción, tales como cambios en la dureza del material y efectos sobre el material, resistencia mecánica, resistencia a la corrosión entre otros.

El Tratamiento Térmico involucra varios procesos de calentamiento y enfriamiento para efectuar cambios estructurales en un material, los cuales modifican sus propiedades mecánicas. El objetivo de los tratamientos térmicos es proporcionar a los materiales propiedades específicas adecuadas para su conformación o uso final. No modifican la composición química de los materiales, pero si otros factores tales como los constituyentes estructurales y la granulometría, y como consecuencia las propiedades mecánicas.

Los aceros inoxidables austeníticos tienen una alta expansión térmica, un 50% más alta que los aceros bajo carbono, pueden ser tratados juiciosamente para evitar deformación de las partes a temperaturas elevadas.

Los austeníticos convencionales no pueden endurecerse mediante tratamiento térmico, pero se endurecerán como resultado del trabajo en frío. Estos aceros suelen comprarse recocidos o trabajados en frío después de un proceso de soldadura o tratamiento térmico, puede ser necesario un recocido posterior para obtener una resistencia a la corrosión, ablandamiento y una ductilidad óptima. Durante el recocido, los carburos de cromo, que disminuyen notablemente la resistencia a la



corrosión intergranular, se disuelven. Las temperaturas de recocido, que varían, en función de la composición del acero, [104].

Los aceros inoxidables ferríticos no son normalmente endurecidos por temple, sino que desarrollan una dureza mínima y una máxima ductilidad, tenacidad y resistencia a la corrosión en la condición de recocido y templado. Por lo tanto, el único tratamiento térmico que se aplica a los ferríticos es el recocido. Este tratamiento alivia las tensiones desarrolladas durante la soldadura o el trabajo en frío y proporciona una estructura más homogénea disolviendo los productos de transformación formados durante la soldadura. El tratamiento térmico posterior a la soldadura de los aceros inoxidables ferríticos de baja intersticialidad es generalmente innecesario y con frecuencia indeseable.

Los inoxidables dúplex constan de una microestructura mixta de austenita y ferrita. Algunos inoxidables dúplex son ricos en ferrita, otros en austenita y otros están equilibrados a partes iguales. En comparación con el tipo 316, las aleaciones dúplex recocidas ofrecen una mayor resistencia al agrietamiento por corrosión bajo tensión por cloruros.

Aunque los grado dúplex no suelen ser tan resistentes a la SCC como los ferríticos de baja intersticialidad, normalmente están disponibles en secciones de mayor espesor. Otra característica útil de los dúplex es que suelen tener un límite elástico más del doble que los inoxidables austeníticos convencionales. En secciones más gruesas, las aleaciones dúplex son más resistentes al impacto que las aleaciones ferríticas.



Los aceros inoxidables dúplex, como SAF 2205, AF 22, DP 3 y la aleación de ferro-aluminio 255, se alean con 0,15 a 0,20% de N. De este modo se minimiza la segregación de elementos de aleación entre la ferrita y la austenita, mejorando así la resistencia a la corrosión cuando se suelda en comparación con la aleación de tipo 329. La adición de nitrógeno también aumenta la precipitación de austenita durante la colada y la soldadura y evita un alto contenido de ferrita en las soldaduras enfriadas rápidamente.

Estos aceros Inoxidables Martensíticos pueden ser templados y revenidos de la misma manera que los aceros aleados. Tienen una excelente resistencia mecánica y son magnéticos. En la tabla 06 se observan las propiedades mínimas de estos aceros.

Los aceros Inoxidables Martensíticos se templean cuando son enfriados en el proceso de laminación en caliente, por lo tanto, deben ser recocidos entre 650°C y 760°C por alrededor de 4 horas luego de la laminación. Este recocido del proceso difiere del recocido total, que se realiza a 815-870°C con un enfriamiento dentro del horno a velocidades de 40 a 55°C / hora hasta los 540°C y luego enfriados en aire hasta temperatura ambiente. Ocasionalmente, los Aceros Martensíticos son comercializados en la condición de revenido, o sea enfriándolos directamente desde la temperatura de laminado al aire, con el objeto de Templar al Acero y luego reviniéndolos a 540-650°C o también recalentándolos hasta 1010-1065°C, enfriándolo al aire para templearlos y luego reviniéndolos a 540-650°C, [105].

Tabla 05. Propiedades mecánicas mínimas de los aceros inoxidable martensíticos.

Propiedades Mecánicas Mínimas de los Aceros Inoxidable Martensíticos						
UNS number	Designación común	Resistencia a la Tracción MPa	Resistencia a la Fluencia MPa	Alargamiento o a la Rotura %	Reducción en área %	Dureza
S40300	403	485	205	25(b)		HRB 88 max
S41000	410	450	205	22(b)		HRB 95 max
S41008	410S	415	205	22		HRB 95 max
S41040	410Cb	485	275	12	35	
S41400	414	795	620	15	45	
S41800	418(c)	1450 (d)	1210(d)	18(d)	52(d)	
S42000	420(e)	1720	1480(d)	8(d)	25(d)	HRC 52(d)
S42200	422(f)	965	760	13	30	
S43100	431(c)	1370(d)	1030(d)	16(d)	55(d)	
S44002	440A	725(d)	415(d)	20(d)		HRB 95(d)
S44003	440B	740(d)	425(d)	18(d)		HRB 96(d)
S44004	440C	760(d)	450(d)	14(d)		HRB 97(d)
S50100	501	485(d)	205(d)	28(d)	65(d)	
S50200	502	485(d)	205(d)	30(d)	70(d)	
	414L	795(d)	550(d)	20(d)	60(d)	
	416 plusX	515	275	30	60	

c) Revenido a 260°C d) Valores Típicos. E) Revenido a 205°C. f) Doble revenido

- 1) En el Tratamiento Térmico de Aceros inoxidable Martensíticos, temperaturas de hasta 480°C se consideran temperaturas de Distensionado o relevamiento de las tensiones Residuales, debido al poco cambio en la Resistencia a la Tracción y la Dureza de aceros Templados y calentados a estas relativamente bajas temperaturas.
- 2) Temperaturas del orden de 540-650°C se las denomina Temperaturas de revenido
- 3) Temperaturas entre 650-760°C se denominan Temperaturas de recocido, aunque estas temperaturas estén por debajo de AC1.



3.10 Uso de los aceros inoxidables en la Ingeniería Civil

La corrosión del acero de refuerzo es la causa más importante del deterioro prematuro de las estructuras de concreto reforzado [106].

El utilizar el acero inoxidable como refuerzo se considera una acción preventiva, para estructuras que estén expuestas a medios agresivos, como muelles, puentes, edificios, lo que traería como resultado un periodo de vida útil o de servicio mayor y con ello una reducción en los costos de mantenimiento preventivo y correctivo, M. Baltazar, recomiendan el uso inteligente del acero inoxidable en los elementos más susceptibles a la corrosión de estructuras como puentes, muelles que estarán en contacto con medios altamente agresivos, como serían las zonas costeras, suelos contaminados, zonas industriales entre otros, [107].

La armadura del concreto es uno de los usos menos glamurosos del acero inoxidable en estructuras. En puentes, aparcamientos y otras estructuras de hormigón, el agua salada puede penetrar en el cemento.

En puentes, estacionamientos y otras estructuras de concreto, el agua salada puede penetrar en el cemento con el tiempo. Si las varillas de refuerzo internas se corroen, la expansión de los productos de la corrosión el concreto, provocan el fallo de la estructura.

Un enfoque más seguro es utilizar varillas de refuerzo de acero inoxidable. El acero inoxidable para esta tarea no necesita resistir la corrosión por picaduras, que afecta a un porcentaje minúsculo del



volumen de acero. Por lo tanto, puede emplearse un grado barato y bajo en níquel, como 409, 430 o 201. Hasta la fecha, la mayoría de los trabajos se han realizado con grados más caros, como 316 y 2205. Los dúplex magros son ideales para esta aplicación por su alta resistencia, su resistencia a la corrosión y a la SCC, y su costo moderado.

El uso incluso de estas aleaciones reduce el costo a largo plazo de estas estructuras, por lo que la futura adopción de aceros inoxidable menos caros es muy prometedora. Los departamentos de transporte más ilustrados del Reino Unido, Ontario (Canadá) y Michigan, Nueva Jersey y Oregón (Estados Unidos) han liderado este desarrollo, [108].

Como prácticamente no existe riesgo de corrosión galvánica por contacto entre el acero inoxidable y el acero al carbono [109], y [110], se pueden combinar ambos tipos de armadura en la misma estructura, de forma que las inoxidables se destinen únicamente a los elementos estructurales que estén expuestos a las agresiones ambientales (pilares vistos, aleros, voladizos, etc.) dejando el resto de la estructura interior, protegida por la fachada de la edificación, armada normalmente con acero al carbono.

Las armaduras de acero inoxidable han demostrado que prolongan la vida útil de las estructuras de concreto hasta compensar su superior costo respecto a las de acero al carbono, al menos en las obras de ingeniería situadas en la costa y en los puentes de carretera donde es frecuente la utilización de las sales de deshielo, obras públicas que

valoran el ciclo de vida de la estructura y no el beneficio a corto plazo, [111].

El primer uso del armado de acero inoxidable fue en 1941 en el embarcadero de Progreso, en el Golfo de México. En la estructura se utilizó un acero equivalente al grado EN 1.4301 (AISI 304), con un 8% de níquel, para armar los arcos del embarcadero, que se extiende 2 km mar adentro. Aún hoy, la estructura está en perfecto estado de uso, sin necesidad de reparaciones significativas, mientras que un segundo embarcadero construido a su lado en 1969, con armado de acero al carbono, ha desaparecido casi por completo. Durante los 40 años siguientes no hay otros usos significativos y documentados de armaduras de acero inoxidable. Figura 14. [112].



Figura 14. Embarcadero de Progreso, Yucatán (México)

CAPITULO IV. TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS y MEB

4.1 Introducción

Las técnicas electroquímicas son un conjunto de métodos analíticos cuantitativos y cualitativos basado en las propiedades eléctricas que poseen los analitos cuando se encuentran disueltos en una solución. Las técnicas electroquímicas se basan en la imposición de una perturbación al sistema en estudio, registrando la respuesta obtenida. La medición de las variables de corriente y voltaje obtenidas por medio de alguna técnica electroquímica puede proporcionar información sobre velocidad de corrosión, comportamiento de recubrimientos y películas, pasividad, tendencias a picaduras y otros parámetros importantes.

Con el objetivo de determinar la velocidad de corrosión se han aplicado diferentes técnicas electroquímicas, las cuales se basan en las leyes de Faraday, que relacionan el flujo de masa por unidad de área y tiempo, con el flujo de corriente.

La velocidad en los procesos de corrosión depende de la velocidad de dos reacciones, la anódica (oxidación) y la catódica (reducción), [113].

Durante la corrosión, puntos discretos en la superficie del metal que se corroe, tendrán diferentes potenciales electroquímicos. Ya que están unidos eléctricamente por la masa del metal, la corriente fluirá de uno



hasta el otro, mientras que ambos permanezcan en el mismo arreglo. La importancia de seleccionar una prueba, una técnica o un método para determinar el fenómeno de corrosión, es primordial, especialmente en lo que se refiere a aplicaciones prácticas. Por esta razón es necesario definir el motivo para elegir un determinado método, con la ventaja adicional de obtener mediciones rápidas y precisas, y ante todo evita la realización de pruebas que a menudo no son necesarias. Las técnicas de análisis directo, pérdida de peso, se efectúan en tiempos relativamente largo y requieren la no formación de productos adherentes de corrosión.

Para cuantificar este proceso se involucra la medición de cargas eléctricas, donde los métodos electroquímicos empleados (con fundamento en las leyes de Faraday) se basan en la excitación eléctrica exterior del sistema para analizar su repuesta.

Algunas ventajas de los métodos electroquímicos son:

1. Tiempo de medición
2. Alta fiabilidad
3. Control continuo de la corrosión.

El monitoreo de la corrosión mediante técnicas electroquímicas se ha tornado en un importante aspecto en el diseño y operación de las instalaciones industriales modernas. Con el empleo de estas técnicas los ingenieros de planta pueden hoy en días percatarse del grado de

deterioro causado por la corrosión y la velocidad con la que se está manifestando bajo diversas condiciones de operación, [114].

4.2 Curvas de Polarización (CP)

Cualquier material metálico sumergido en un medio corrosivo tiene un potencial característico en ausencia de influencias externas, que se conoce por potencial de reposo, en circuito abierto o de corrosión y se denominara E_{corr} . Externamente se puede actuar sobre el sistema imponiéndole un potencial y registrando la intensidad y viceversa. Al valor $E - E_{\text{corr}}$ medido desde la modificación impuesta desde afuera, es lo que se conoce como polarización, n , y a la relación que se establece entre el potencial y la intensidad como curvas de polarización figura 15.

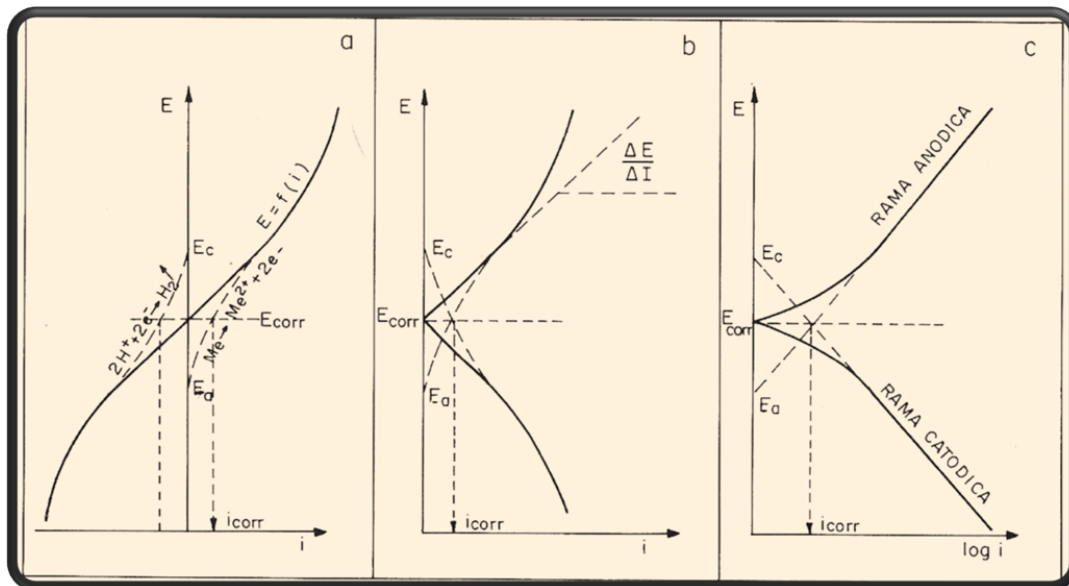


Figura 15. Representaciones de las curvas de polarización en un estado de activación

4.3 Potencial de Corrosión

Este método proporciona un valioso respaldo a técnicas electroquímicas y resulta ser muy útil por sí sólo, aun cuando no proporciona una medida directa de la velocidad de corrosión o de la corrosión total. La información obtenida mediante este método puede ser difícil o imposible de obtener por otros métodos.

Consiste en medir el potencial de corrosión del acero de refuerzo en el concreto mediante uso de electrodos de referencia. Se determinará el potencial electroquímico, que es un potencial eléctrico del metal, relativo a un electrodo de referencia, medido bajo condiciones de circuito abierto, figura 16.



Figura 16. Conexiones con el electrodo de referencia a la estructura de concreto reforzado.

El monitoreo de potencial es una técnica en la que se relacionan el estado de corrosión y el potencial de corrosión de un metal, como una medida de inicio o de la severidad de corrosión. En el estado pasivo se refleja un potencial de corrosión noble (velocidad de corrosión baja), y en el estado activo para el mismo material se refleja un potencial de corrosión menos noble (velocidad de corrosión alta). Consecuentemente el potencial puede ser monitoreado para mostrar si el material se corroe lenta o rápidamente, [117].

A pesar de su importancia, las mediciones de potencial han encontrado hasta hoy aplicaciones limitadas principalmente por dos motivos:

- Pueden ser seguidas sólo en presencia de un electrolito
- Su interpretación requiere una experiencia particular y especialización



Figura 17. Equipo e instrumentos de medición para el Potencial de Corrosión



El análisis de resultados basados en la norma ASTM C-876 indica la siguiente interpretación:

- Si los potenciales medidos con el electrodo de Cu/CuSO₄ son más positivos que -200mV, el riesgo de que ocurra corrosión es del 10%
- Si están entre -200 y -350mV, se tiene una incertidumbre
- Si son más negativos que -350, entonces se tendrá una probabilidad del 90% que se esté corroyendo el acero.

Las medidas de potencial pueden jugar un papel fundamental para controlar y prevenir el inicio de formas de corrosión localizada, crítica para la integridad de las instalaciones, [118].

4.4 Resistencia a la Polarización Lineal (LPR)

Este procedimiento puede ser utilizado para verificar el comportamiento de las mediciones del equipo de Resistencia a la Polarización, incluyendo electrodos de referencia, celdas electroquímicas, potenciostatos, generadores de barrido, mediciones y aparatos de registros. El método de ensayo también es útil para la capacitación de operadores en la preparación de la muestra y técnicas experimentales para las mediciones de resistencia a la polarización.



La resistencia a la Polarización puede relacionarse a la velocidad de corrosión general para los metales en o cerca de su potencial de corrosión, E_{corr} . Las mediciones de Resistencia a la Polarización son una precisa y manera rápida de medir la velocidad de corrosión general. El tiempo real del monitoreo de corrosión es una aplicación común. La técnica también puede ser utilizada como una forma de clasificar la resistencia a la corrosión general de las aleaciones, los inhibidores y así sucesivamente.

Emplea pequeñas polarizaciones para realizar las mediciones. Considerando en la ecuación que relaciona el potencial y la intensidad de corriente una diferencia de potencial que tiende a cero, se puede observar una tendencia lineal que se reflejará directamente en las curvas de polarización, cuando éstas se aproximan al potencial de corrosión. La pendiente de las rectas estará relacionada directamente con la velocidad de corrosión.

En cuanto a la práctica, se harán polarizaciones de $\pm 10\text{-}20\text{mV}$ en torno al potencial de corrosión. A través de las mediciones del cociente de $\Delta E/\Delta I$, pendiente de la curva de polarización, se determina la intensidad de corrosión. El cociente anterior tendrá las dimensiones de una resistencia, por lo que esto se denominará la resistencia a la polarización figura 18.

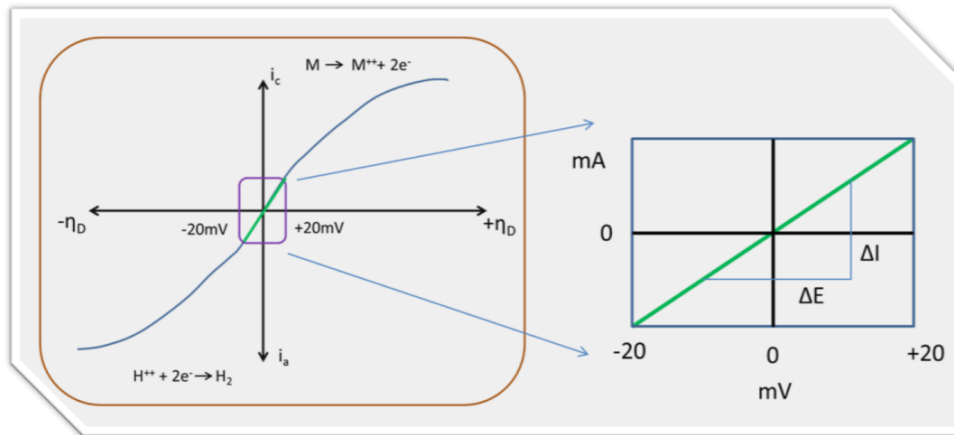


Figura 18. Curva típica de resistencia a la Polarización Lineal

En este método de ensayo, se aplica un barrido de potencial pequeño, ($\Delta E = E - E_{\text{corr}}$), a una muestra de metal. Se registra la corriente resultante. La Resistencia a la Polarización, R_p , de un metal en corrosión está definida de la ecuación 4, como la pendiente de un potencial versus la pendiente de la densidad de corriente en $i = 0$.

$$R_p = \left(\frac{\partial \Delta E}{\partial i} \right)_{i=0, dE/dt \rightarrow 0} \quad (4)$$

La densidad de corriente está dada por i . La densidad de corriente de corrosión, i_{corr} , es mA/cm^2 , y B está en V. El coeficiente de Stern-Geary está [119], relacionado a las pendientes de Tafel anódica, b_a , y catódica b_b , como en la ecuación 5:



$$B = \frac{b_a b_c}{2.303(b_a + b_c)} \quad (5)$$

Las dimensiones del cociente que determina la pendiente de interés pertenecen a las de una resistencia, de aquí el nombre del método propuesto por Stern y Geary, donde la intensidad de corrosión se obtiene mediante la fórmula (B = constante definida por las pendientes anódica y catódica; R_p = **resistencia a la polarización**, ecuación [120], [121].

$$I_{\text{corr}} = B / R_p \quad (6)$$

Las unidades de las pendientes de Tafel son V. La velocidad de corrosión, VC , son mm por año, pueden ser determinados de la ecuación, en la cual PE es el equivalente de las especies en corrosión en gramos y ρ es la densidad de los materiales en corrosión en g/cm^3 .

$$VC = 3.27 \times 10^{-3} \frac{i_{\text{corr}} PE}{\rho} \quad (7)$$

4.5 Curvas Cíclicas de Polarización. (CCP)

El principio de operación de los Métodos Electroquímicos experimentales es provocar una perturbación en el sistema Electroquímico, con el objetivo de obtener una señal como respuesta característica de la operación cinética de un determinado sistema

electroquímico. La respuesta media obtenida en la interfase como un Régimen lineal (Perturbación débil) define una impedancia o una transferencia de masa revelando información determinística que fija el estado de la interface y lo separa de fenómenos elementales tales como, la difusión, adsorción, reacción química, electroquímica. Siendo: E_r : Potencial de Ruptura ó E_{np} : potencial de nucleación de picaduras, E_{pr} : Potencial de repasivación o Protección como se aprecia en la figura 19.

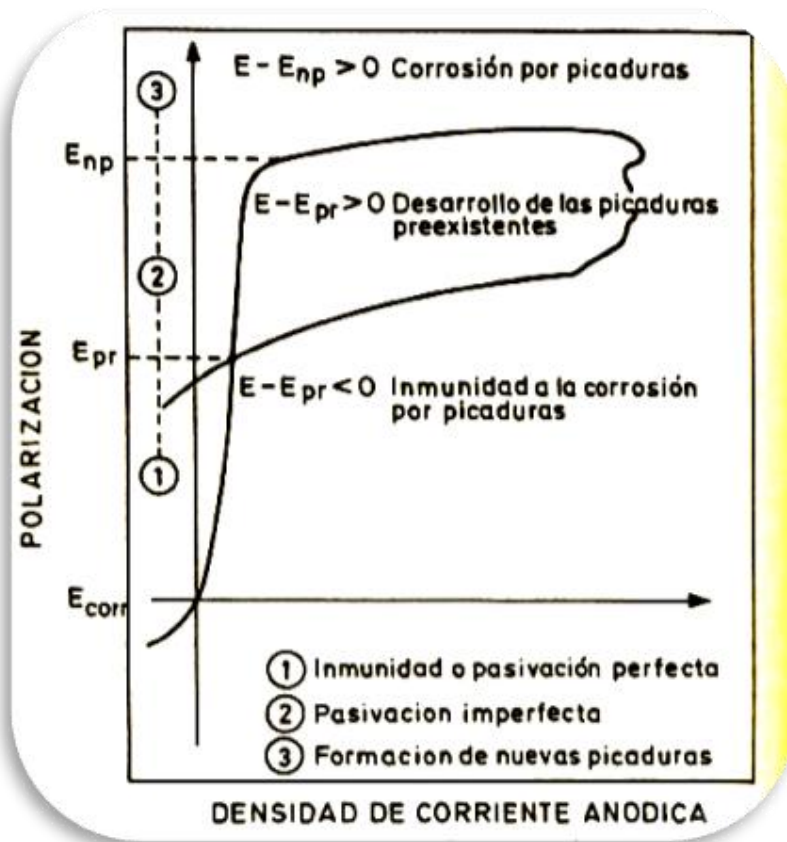


Figura 19. Lazo de histéresis de una curva de polarización cíclica.



La perturbación puede realizarse en potencial registrando la respuesta en corriente. La curva de polarización lineal puede obtenerse de manera potencioestática aplicando escalones equipotenciales y esperando a que alcance el estado estacionario antes de registrar la respuesta en corriente. La función de transferencia entre estímulo y respuesta es la R_p . Si por el contrario la curva se realiza de manera potenciodinámica, se puede aplicar la metodología de la norma ASTM G-59.

No se acostumbra a realizar la perturbación en corriente y registrando el potencial (galvanostática o galvanodinámica), sin embargo, este tipo de perturbación es muy útil cuando se tiene un sistema en el cual el potencial no es estable. En las curvas potencioestáticas y potenciodinámicas, es indispensable determinar el potencial de corrosión y que éste sea estable.

La técnica es una forma adecuada para investigar el comienzo de la pasividad, la ruptura de la película de óxido, la susceptibilidad a la repasivación y el cálculo de la velocidad de corrosión por picaduras debido al amplio rango de barrido del potencial. Aunque la prueba CCP es un método rápido y razonable, no es posible interpretar todo tipo de curvas CCP. Por lo tanto, el objetivo de esta revisión es estudiar la técnica CCP y una interpretación más precisa de sus resultados para predecir el comportamiento de corrosión de los materiales de manera adecuada. Por lo tanto, esta técnica es aplicable como un método para la predicción de la corrosión localizada y también es beneficiosa para las aleaciones que se pasivan espontáneamente y sufren corrosión localizada. En la prueba CCP, la posición relativa del potencial de



picadura y el potencial de repasivación o potencial de protección con respecto al potencial de corrosión son los parámetros más importantes para evaluar el comportamiento de corrosión por picadura. La mayor diferencia entre las densidades de corriente es el resultado del rompimiento de la pasividad superficial a potenciales altos. Por lo tanto, a más grandes tamaños del bucle de histéresis significa mayor rompimiento de la película pasiva, precedido con más dificultad para restaurar la película pasiva dañada

La forma general de la curva CCP es como sigue; después de pasar por la región de corrosión activa, la densidad de corriente disminuye a un potencial crítico, llamado “potencial Flade” (E_f) o “potencial de pasivación primaria”. Esta disminución se debe a la formación de la capa pasiva en la superficie del metal. La histéresis positiva está relacionada con la disminución de la pasividad debido a la corrosión localizada (corrosión por picaduras y hendiduras) que causa el aumento de la densidad de corriente en el barrido inverso, en comparación con la densidad de corriente en el barrido de avance al mismo potencial. En la histéresis positiva, la dirección de la densidad de corriente cambia a densidades de corriente más bajas. Por lo tanto, la lenta disminución de la densidad de corriente en el barrido inverso en la histéresis positiva es indicativa de la dificultad de la repasivación de la superficie o detener el crecimiento de picaduras, [115].



Esta técnica es una forma simple de evaluar la susceptibilidad a las picaduras, ya que nos permite obtener diagramas predictivos del comportamiento de corrosión localizada de diferentes materiales a varias concentraciones y diversos medios agresivos. En esta técnica se aplica un barrido de potencial anódico, desde el potencial de corrosión, E_{corr} , hasta el potencial al cual se alcanza un valor de $5\text{mA}/\text{cm}^2$, llamada corriente de reversa, i_{rev} . En este punto el potencial se invierte, barriéndose en reversa (dirección catódica), hasta cruzar la curva anódica o hasta que la corriente tienda a cero [21], [116]

Analizando la curva de polarización cíclica podemos identificar: E_o u E_{corr} , potencial al cual da inicio la corrosión, E_p , potencial de picadura. La diferencia entre el potencial de corrosión E_{corr} y el potencial de picadura E_p , determinará la facilidad con que el material en un medio dado, tenderán a presentar susceptibilidad a la corrosión localizada.

En el E_p , la densidad de corriente incrementa después de la zona pasiva hasta el potencial de protección E_{prot} (mostrados en la figura anterior), debido a la nucleación y propagación de picaduras. Sin embargo, para saber cuándo una picadura nucleada previamente tenderá a activarse y mantendrá su propagación, se analiza este intervalo de potenciales relacionados con la propagación. En la zona generada entre el potencial E_p y el E_{prot} , nuevas picaduras no nuclean, pero las existentes pueden propagarse. Por debajo del E_{prot} , las picaduras no nuclean ni crecen.



Al aplicarse el barrido en reversa pueden presentarse 3 casos. El primero cuando el E_{prot} cruza la curva de ida en la zona pasiva, indicación de que la picadura iniciada se detuvo por la pasivación de la misma, es decir la reconstrucción de la capa pasiva, en este caso se puede hablar de un potencial de pasivación. El segundo caso, cuando la picadura no se detiene, sino hasta un valor cercano al E_{corr} , o menor, por lo que se puede decir que la picadura sólo se detiene al regresar al equilibrio o cuando el material es protegido catódicamente.

En este caso estaríamos hablando de una susceptibilidad a la corrosión localizada muy grande, como es el caso de corrosión asistida por esfuerzo, picaduras o hendiduras. En última instancia cuando la curva regresa por el mismo camino o por un valor de corriente menor, el material no presenta tendencia a la corrosión localizada, es decir, que el incremento de la corriente no se debe a la corrosión localizada, si no a alguna otra reacción anódica, ya que el área permanece constante.

De esta técnica aparte de la zona de nucleación y propagación de picadura, zonas de inmunidad y las zonas de activo-pasiva que son regiones susceptibles a la CAE, además de obtener los potenciales en las que se encuentran (figura 2.15).



4.6 Ruido Electroquímico (R_n)

El monitoreo por ruido electroquímico es esencialmente el monitoreo de pequeñas variaciones de potencial y de corriente en una muestra entre dos electrodos idénticos. Al ocurrir la corrosión, estas variaciones se incrementan.

Esta técnica es sensitiva a corrosión localizada, tal como picaduras. Si se usan muestras en condiciones de esfuerzo, la técnica de ruido es también muy sensitiva al agrietamiento asistido por el medio, [122].

El registro e interpretación del ruido electroquímico para el estudio de la corrosión involucra, no obstante, una forma completamente diferente de concebir el fenómeno a la empleada por los métodos electroquímicos tradicionales. Según estos, la corrosión es considerada como un proceso en equilibrio y de cinética constante, mientras que, en el caso del ruido electroquímico, se registran desequilibrios en las reacciones electroquímicas en intervalos de tiempo muy cortos. Entender el origen del ruido electroquímico es el principio para entender la aplicabilidad de esta técnica. En este sentido, la interfase metal (capa de productos de corrosión) / electrolito es el punto donde se producen en forma continua las señales de ruido electroquímico en forma de pequeñas variaciones (transcientes) en potencial y corriente, las cuales están relacionadas con los procesos de transferencia de carga que allí ocurren.

Por lo tanto, el fenómeno del ruido electroquímico no es bajo ninguna circunstancia, la respuesta a algún tipo de excitación externa del

sistema, sino en realidad una consecuencia inherente a los procesos electroquímicos involucrados en la corrosión, que ocurre aun cuando no se esté midiendo.

Los resultados procesados dan como resultado las series de tiempo en potencial y corriente como una de las herramientas para el procesamiento del monitoreo en esta técnica utilizan la remoción de la tendencia por el método del polinomio para interpretar dicha información y dar explicación al tipo y a la velocidad de corrosión presente como se muestra en la figura 21.

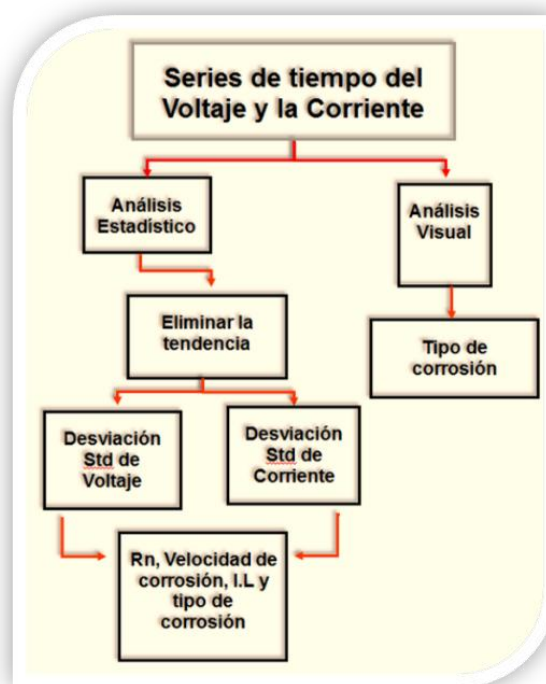


Figura 20. Procesamiento de las series de tiempo de voltaje y corriente.



4.7 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Existen diferentes tipos de microscopios electrónicos, los más conocidos y empleados: microscopio electrónico de transmisión (TEM), microscopio electrónico de barrido (MEB), microscopio de emisión de iones (FIM), microscopio efecto túnel (STM). La base de la microscopía electrónica es utilizar como fuente de iluminación un haz de electrones acelerados y su focalización sobre la superficie de la muestra mediante lentes condensadoras, [123]. Para estudios de morfología se requiere obtener imágenes, donde se definan atributos del material, siendo los microscopios SEM y TEM, los más utilizados. Para fines de esta investigación se requiere el uso del MEB O SEM por sus siglas en ingles.

El microscopio electrónico de barrido emplea un haz de electrones para iluminar las muestras, la fuente de electrones, las lentes condensadoras y el sistema de vacío, el microscopio de barrido se utiliza principalmente para estudiar la superficie o la estructura cercana a la superficie de muestras gruesas, [123].

CAPITULO V. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

5.1 Caracterización del material metálico propuesto

En este capítulo se presenta la metodología para la caracterización llevada a cabo de los materiales e infraestructura utilizados en el desarrollo del seguimiento experimental.

5.1.1 Materiales y equipo

Para el desarrollo de esta actividad, fue necesario maquinar una barra de acero inoxidable supermartensítico UNS S41425 distintas piezas, mismas que servirán para llevar a cabo las diferentes actividades correspondientes a la caracterización del UNS S41425, actividad necesaria para la verificación de la aleación, es decir, que realmente corresponda al acero propuesto para la investigación y desarrollo planteado, misma donde fueron tomadas diferentes secciones para las diferentes pruebas propuestas en la investigación, foto 21.



Figura 21. Seccionamiento de la barra del acero supermartensítico UNS S41425.

De las diferentes secciones se obtuvieron mediante el empleo de un torno industrial CNC las 6 muestras, barras cilíndricas del acero inoxidable supermartensítico UNS S41425, con una longitud aproximada de 15.0 cm por 0.9525 cm, (6 pulgadas de longitud por 0.375 pulgadas de diámetro). El acero al carbono utilizado correspondió a una varilla corrugada de 3/8", de donde se obtuvieron las 6 secciones foto 22.



Figura 22. Elementos metálicos utilizados en el sistema acero-concreto

5.1.2 Caracterización microestructural

Para la caracterización microestructural del acero supermartensítico UNS S41425, se seleccionó una sección transversal, la cual se montó en resina cristal y a través de la técnica metalográfica, nos permite obtener mediante de un proceso de lijado utilizando diferentes lijas de carburo de silicio y un pulido final con alúmina una superficie totalmente liza, para posteriormente ser revelado los detalles de la microestructura, la cual se obtiene mediante un ataque químico y de esta manera definir sus condiciones microestructurales, foto 23.



Figura 23. Equipo metalográfico utilizado.

Se realizó un corte en sección transversal del acero inoxidable supermartensítico UNS S41425, para la determinación de la microestructura, en la foto 24 podemos observar las condiciones finales de la preparación metalográfica de la muestra, antes del ataque químico

para el relevado de su microestructura, mediante ataque químico utilizando el reactivo químico nital al 3%.



Figura 24. Muestra metalográfica del acero supermartensítico UNS S41425.



Figura 25. Microscopio Metalúrgico acoplado a software analizador de imágenes

5.1.3 Determinación de la dureza Rockwell C

A través de la determinación de la dureza, nos permite obtener información paralela con las propiedades metálicas de un metal o una aleación, es decir, se puede correlacionar su resistencia mecánica a través de los resultados de este método, el cual, en esencia consiste hacer una indentación por medio de un indentador aplicando una carga en la superficie homogénea del material, la huella o marca que se queda al momento de retirar la carga en el indentador, nos permite obtener los datos de la dureza, el equipo utilizado en ese determinación corresponde a un Durómetro Rockwell C, foto 27.

Para la determinación de la dureza del acero inoxidable supermartensítico UNS S41425, se prepara una sección del mismo acero, misma que fue desbastada en ambos lados, para mantener una superficie paralela de los dos lados, se procede a través del durómetro Rockwell C, a obtener los valores en 6 sitios, foto 26.



Figura 26. Sitios de dureza del acero inoxidable UNS S41425.

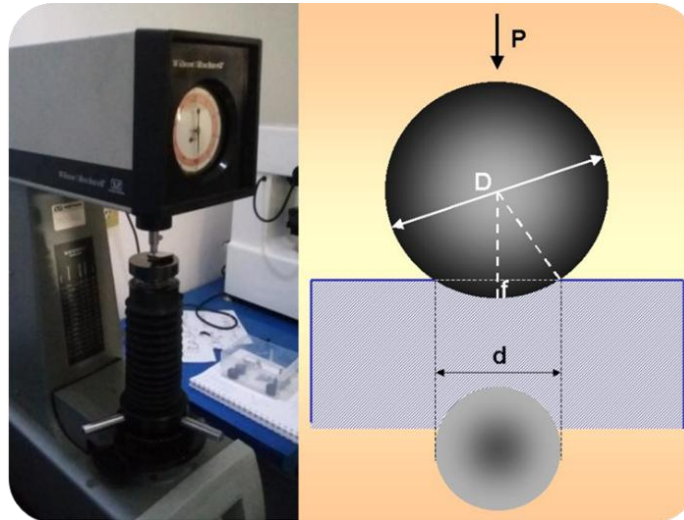


Figura 27. Medidor de dureza Rockwell C.

5.1.4 Composición química

Para la determinación de la composición química del acero inoxidable supermartensítico UNS S41425, es utilizada la técnica de Espectrometría de Emisión por Plasma (ICP-OES), es muy necesario e importante poder denotar cada uno de los elementos correspondientes en la aleación, de esta forma se estará verificando que realmente estamos llevando y/o desarrollando el estudio con el material correcto. El plasma de acoplamiento inductivo (ICP) es una fuente de ionización que junto a un espectrofotómetro de emisión óptico (OES) constituye el equipo de ICP-OES, En esta técnica, la introducción continua de la muestra líquida y un sistema de nebulización forma un aerosol que es transportado por el Argón a la antorcha del plasma, acoplado inductivamente por radio frecuencia. En el plasma, debido las altas temperaturas generadas, los analitos son atomizados e ionizados generándose los espectros de Emisión atómicos de líneas

características. Los espectros son dispersados por la red de difracción y el detector sensible a la luz se encarga de medir las intensidades de las líneas. La información es procesada por el sistema informático, foto 28.



Figura 28. Espectrómetro de Emisión por Plasma (ICP-OES)

5.1.5 Propiedades mecánicas

Son aquellas que expresan el comportamiento de los materiales frente a esfuerzos o cargas que tienden a alterar su forma, así mismo la resistencia es la capacidad de soportar una carga externa, si el metal debe soportarla sin romperse se denomina carga de rotura y puede producirse por tracción, por compresión, por torsión o por cizallamiento,

habrá una resistencia a la rotura (Kg/mm^2) para cada uno de estos esfuerzos.

Para el desarrollo de esta prueba se maquinaron dos probetas, mismas que fueron sometidas al ensayo de tensión en una máquina universal Instron, mediante los requerimientos de la norma ASTM E8/E8M, [Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials], las dimensiones de las probetas maquinadas se muestran en la foto 30.

El alcance del ensayo de tensión será obtener la curva tensión-deformación. Luego, obtener características del material interpretando los resultados obtenidos.



Figura 29. Máquina Universal Instron utilizada para las pruebas de tensión.

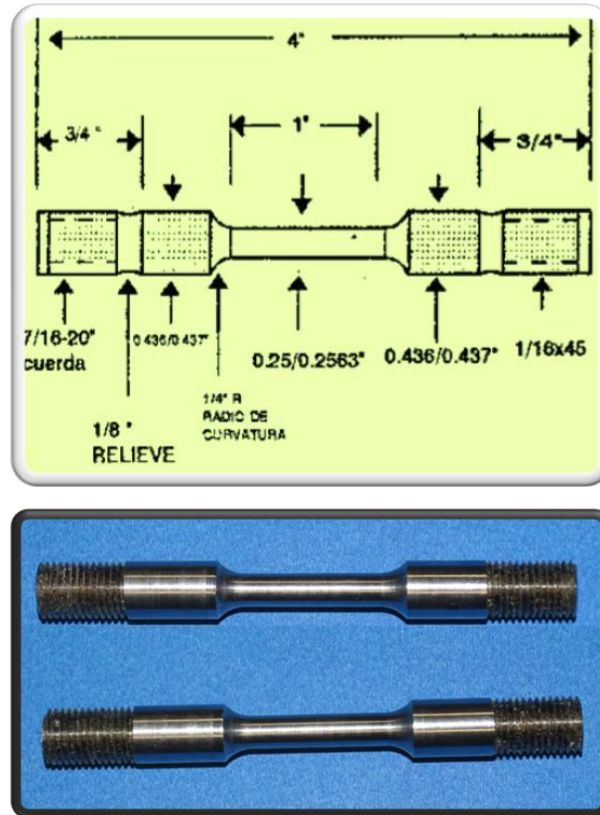


Figura 30. Dimensiones y probetas de acuerdo a la norma ASTM E8.

5.2 Caracterización del comportamiento mecánico de las tres relaciones agua/cemento 0.45, 0.55 y 0.65

Equipo:

Máquina de compresión: Cuenta con una cabeza de carga con un casquete esférico que le permita tomar la posición exacta de la superficie de apoyo del cilindro, para lograr una carga axial. Presenta

un diámetro mínimo igual al de la superficie del espécimen que se va a probar, foto 31.



Figura 31. Máquina de compresión universal

5.3 Elaboración de los especímenes de concreto a las diferentes relaciones agua/cemento, 0.45, 0.55 y 0.65, utilizando los dos elementos metálicos

Se utilizaron las relaciones agua/cemento, 0.45, 0.55 y 0.65, utilizando la varilla de refuerzo convencional acero AISI 1018 y el elemento metálico propuesto el acero inoxidable supermartensítico UNS S41425.

Ambos aceros son embebidos en probetas cilíndricas de acuerdo con la normatividad ASTM C192/C, y expuestas a una solución salina a una concentración de 5% en peso, con tres relaciones agua cemento (a/c) de 0.45, 0.55 y 0.65, la experimentación se lleva a cabo bajo condiciones de laboratorio, las mediciones se realizan con una

repetibilidad de 2 para cada una de las relaciones de agua cemento, para ambos elementos metálicos, foto 32.

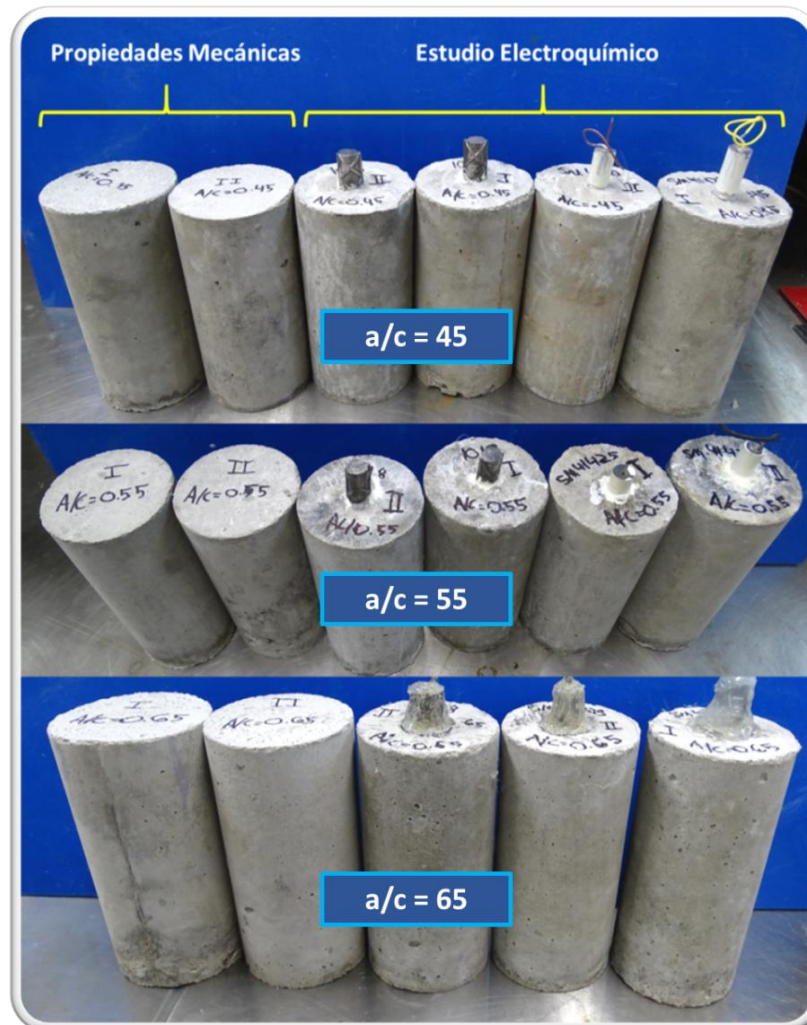


Figura 32. Probetas de concreto utilizadas en la experimentación

5.4 Comportamiento Electroquímico en los medios propuestos

Para la determinación de los parámetros y caracterización electroquímica, como son los estados activo-pasivo, velocidad de

corrosión, susceptibilidad al picado, Potencial de Corrosión (E_{corr}), se emplearon las técnicas electroquímicas de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL), Curvas Cíclicas de Polarización (CCP) y medición del Potencial de Corrosión, desarrollándose las mediciones, tanto en el acero inoxidable supermartensítico UNS S41425 como en el AISI 1018, la foto 33, muestra las probetas de acero-concreto y el potenciostato-galvanostato Gill ACM ZRA Instruments utilizado.



Figura 33. Monitoreo electroquímico de las muestras de acero-concreto

En la tabla 06, se muestra la nomenclatura y técnicas electroquímicas utilizadas para las dos aleaciones bajo estudio, así mismo se denotan las técnicas electroquímicas utilizadas en las probetas del sistema acero concreto.

Tabla 06. Nomenclatura y técnicas electroquímicas utilizadas en las probetas

Acero	Relación a/c	Nomenclatura	RPL	CCP	E _{corr}
AISI 1018	0.45	AC_0.45_I	✓	✓	✓
		AC_0.45_II			
	0.55	AC_0.55_I	✓	✓	✓
		AC_0.55_II			
	0.65	AC_0.65_I	✓	✓	✓
		AC_0.65_II			
UNS S41425	0.45	SM_0.45_I	✓	✓	✓
		SM_0.45_II			
	0.55	SM_0.55_I	✓	✓	✓
		SM_0.55_II			
	0.65	SM_0.65_I	✓	✓	✓
		SM_0.65_II			

5.4.1 Potencial de corrosión

Es una técnica en la que se relacionan el estado de corrosión y el potencial de corrosión de un metal, como una medida de inicio o de la severidad de corrosión. Designation: C 876, *Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. Foto 34.



Figura 34. Multímetro de alta impedancia utilizado en la experimentación

El análisis de resultados basados en la norma ASTM C-876-91 indica la siguiente interpretación:

- Si los potenciales medidos con el electrodo de Cu/CuSO_4 son más positivos que -200 mV , el riesgo de que ocurra corrosión es del 10%
- Si están entre -200 y -350 mV , se tiene una incertidumbre
- Si son más negativos que -350 , entonces se tendrá una probabilidad del 90% que se esté corroyendo el acero.



5.4.2 Resistencia la Polarización Lineal (RPL)

En todos los casos de la experimentación es utilizada agua de Osmosis Inversa Tipo IV, de acuerdo con la norma ASTM D1193, así mismo, antes de iniciar la exposición en alguna de las pruebas indicadas, el agua siempre es deaerada mediante un gas inerte, para este caso se utilizó nitrógeno gaseoso con un flujo correspondiente a 30 min/L.

Cabe mencionar que la técnica más utilizada para medir velocidad instantánea de corrosión corresponde a la **Resistencia la Polarización Lineal (RPL)**, misma que se basa en la medición de la resistencia del electrodo de trabajo cuando se polariza anódica o catódicamente a valores de sobrepotencial no mayores de ± 20 mV.

El método de RPL puede ser derivado de la teoría del potencial mixto, la ecuación desarrollada por Stern y Geary (Mansfeld, 1976), ecuación 8:

$$i_{\text{corr}} = B / R_p \quad (8)$$

Esta ecuación por su similitud con la Ley de Ohm, establece que la diferencia de potencial entre dos puntos resulta en un flujo de corriente limitado por la presencia de una resistencia.

Para el sistema de varillas de acero al carbono embebido el valor de la constante B de Stern-Geary se toma de 52mV para la consideración de la varilla en estado pasivo y de 26mV cuando ésta se presenta en estado activo. Estos valores son ampliamente aceptados y utilizados en las

pruebas electroquímicas para determinar la cinética y las formas de corrosión.

5.4.3 *Curvas Cíclicas de Polarización (CCP)*

Contrario a la técnica de Resistencia a la Polarización Lineal (RPL), que está basada en una pequeña región de la polarización donde el comportamiento es lineal, las **Curvas Cíclicas de Polarización (CCP)** es una técnica más perturbativa, se aplica una polarización del material desde -600mV hasta 1200mV, a partir de este valor se inicia el regreso de la perturbación hasta alcanzar el potencial de inicio de -600mV, con una velocidad de barrido de 30mV/min. En resumen, mediante esta técnica se puede determinar si un material metálico va a presentar corrosión generalizada, pasivación del material y/o corrosión localizada o mejor conocida como corrosión por picaduras.



Figura 35. Electrodos o material de estudio mediante el arreglo electroquímico



Los parámetros de experimentación utilizados en la técnica de resistencia a la Polarización Lineal, R_p , se muestran a continuación:

- Potencial de Barrido de Potencial de Barrido de ± 20 mV
- Velocidad de Barrido 10mV/min

5.5. Comportamiento electroquímico en solución salina y solución poro.

Para la determinación del comportamiento electroquímico en los dos materiales metálicos propuestos, se emplearon las siguientes técnicas:

- Potencial de Corrosión (E_{corr})
- Curvas Cíclicas de Polarización (CCP)

La técnica RPL, es utilizada tanto en las probetas de acero-concreto como para electrodos de trabajo en las pruebas electroquímicas propuestas, en donde es necesario el montaje de nuestro sistema a evaluar a través de un material inerte como puede ser el caso de una resina epóxica, mediante lo cual podemos delimitar un sección de área, misma que estará expuesta a nuestra solución de prueba, mientras que

la demanda de corriente generada en la interfase metal-electrólito es medida a través del conductor metálico, foto 35.

5.6 Solución poro con diferentes contenidos de cloruro de sodio

Dentro de la experimentación propuesta, empleando una solución poro, constituida por 8.33 g/L de Hidróxido de Sodio (NaOH), 23.3 g/L de Hidróxido de Potasio (KOH) y 2 g/L de Hidróxido de Calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$, se prepararon cuatro soluciones, la solución poro propiamente mencionada, dicha solución fue dosificada con NaCl 1%, NaCl 3% y NaCl 5%, en la tabla 08, se muestran las soluciones y las concentraciones utilizadas, así como las técnicas electroquímicas empleadas en esta fase de la experimentación para los dos elementos metálicos.

Los parámetros electroquímicos y nomenclatura utilizados durante la experimentación en las pruebas electroquímicas se denotan en la tabla 07 y 08

Tabla 07. Parámetros electroquímicos utilizados

Parámetros Electroquímicos Utilizados				
Técnica	Potencial de Barrido (mV)	Velocidad de Barrido (mV/min)	Electrodo Referencia	Electrodo Auxiliar
RPL	± 20	10	Ag/AgCl	Platino
CCP	-600 a 1200	30	Ag/AgCl	Platino

Tabla 08. Nomenclatura y técnicas electroquímicas utilizadas soluciones poro

Acero	Solución	Nomenclatura	RPL	CCP
UNS S41425	Poro	UNS S41425_S-PORO	✓	✓
	Poro + NaCl 1%	UNS S41425_S-PORO_NaCl 1%	✓	✓
	Poro + NaCl 3%	UNS S41425_S-PORO_NaCl 3%	✓	✓
	Poro + NaCl 5%	UNS S41425_S-PORO_NaCl 5%	✓	✓
AISI 1018	Poro	AISI 1018_S-PORO	✓	✓
	Poro + NaCl 1%	AISI 1018_S-PORO_NaCl 1%	✓	✓
	Poro + NaCl 3%	AISI 1018_S-PORO_NaCl 3%	✓	✓
	Poro + NaCl 6%	AISI 1018_S-PORO_NaCl 5%	✓	✓

5.7 Pruebas en solución salina a diferentes pH.

Se preparan electrodos de trabajo electroquímicos para determinar mediante las técnicas Resistencia a la Polarización Lineal (RPL) y Curvas Cíclicas de Polarización (CCP), empleando una solución salina al 5% NaCl grado reactivo, desarrollándose las pruebas con dos valores de pH a 6.5 y 12, en ambos elementos metálicos bajo estudio, (AISI



1018 y UNS 41425), y poder determinar su comportamiento electroquímico bajo estas condiciones, tabla 09.

Tabla 09. Nomenclatura y técnicas electroquímicas utilizadas con el pH.

Acero	Solución NaCl 5%	Nomenclatura	RPL	CCP
UNS S41425	pH 6.5	UNS S41425_pH-6.5	✓	✓
	pH 12	UNS S41425_pH-12	✓	✓
AIS 1018	pH 6.5	AISI 1018_pH-6.5	✓	✓
	pH 12	AISI 1018_pH-12	✓	✓

Se muestra en la foto 36 el montaje experimental y el equipo utilizado, un Potenciostato Galvanóstato GillAC, ACM Instruments ZRA, como electrodo de referencia, un electrodo Plata Cloruro de Plata (Ag/AgCl), alambre de Platino como electrodo auxiliar y el electrodo de trabajo corresponde a uno de los elementos metálicos a evaluar según sea el caso, embebidos en la solución salina al 5%, ajustando el pH a 6.5 y a 12.

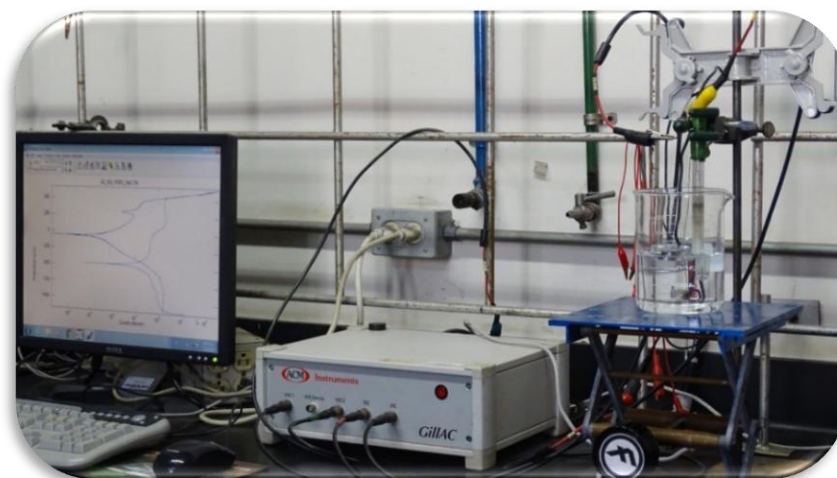


Figura 36. Montaje experimental utilizado.

El arreglo característico utilizado en las pruebas electroquímicas es mostrado en la figura 37, Electrodo de trabajo (WE), aleación bajo estudio, electrodo de referencia (RE), Electrodo de Plata Cloruro de Plata (Ag/AgCl) y electrodo auxiliar (AE).

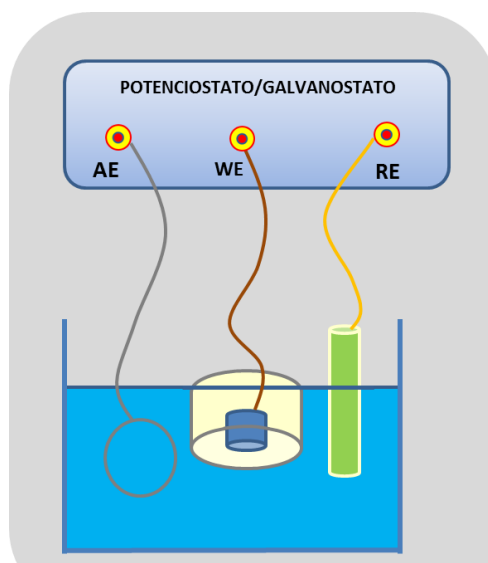


Figura 37. Arreglo electroquímico característico

5.8 Identificación de los productos de corrosión mediante Microscopía Electrónica de Barrido

Mediante las técnicas de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) acoplado a un sistema de Microanálisis De Energía Dispersiva de Rayos X (EDS o EDX), nos permite la identificación de una forma semicuantitativa elemental de los elementos presentes en zonas de superficie de las muestras bajo estudio lo cual permite realizar un análisis espectro gráfico, además cuenta con un detector de electrones secundarios (SEI) con lo que obtenemos las imágenes de alta resolución y un detector de electrones retro dispersados (BEI) con menos resolución de imagen pero mayor contraste para obtener la topología de la superficie. Foto 38.

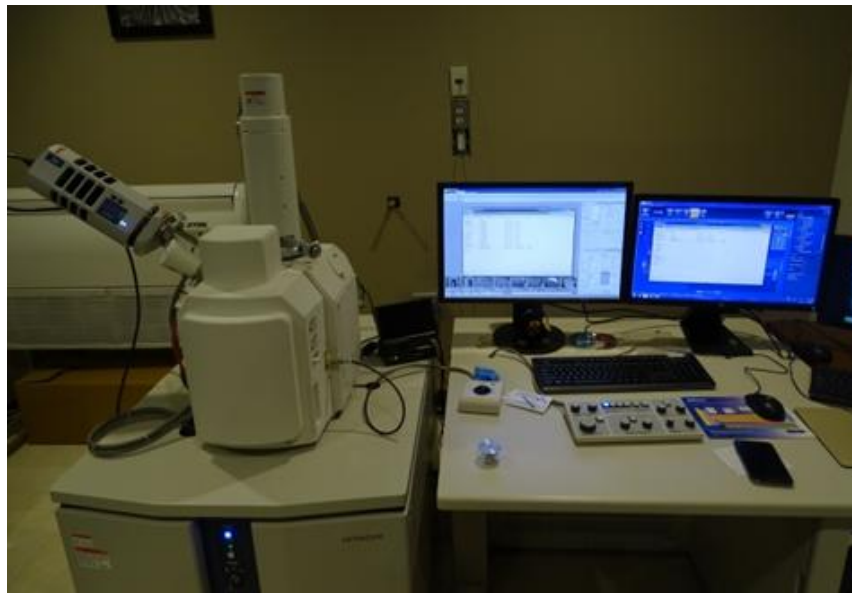


Figura 38. Microscopio Electrónico de Barrido

CAPITULO VI.

RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos a través de todas las metodologías mencionadas propuestas en el CAPITULO V, para la determinación del comportamiento electroquímico y mecánico del elemento metálico propuesto como posible elemento de sustitución en el sistema acero-concreto. Se detallan en primera instancia, la caracterización que fue realizada para la verificación del acero inoxidable supermartensítico UNS S41425, composición química, microestructura y propiedades mecánicas, posteriormente se presentan los resultados de las técnicas electroquímicas utilizadas en el laboratorio, Potencial de Corrosión (E_{corr}), Resistencia a la Polarización Lineal (RPL), Curvas Cíclicas de Polarización Lineal (CCP) y Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

6.1 Composición química del SM UNS S41425

Los resultados de la composición química del acero inoxidable supermartensítico UNS S41425, obtenidos a través de la técnica de Espectrometría de Emisión por Plasma (ICP/CHNS-O) y del acero AISI 1018 se presentan en las tablas 10 y 11, se muestra la composición química respectiva del análisis, así como la composición teórica de llegada, en términos generales se puede mencionar que la composición

obtenida mediante el análisis es bastante similar a la proporcionada por el proveedor de la superaleación UNS S41425, los valores cuantificados del Carbono, Níquel y Cromo en ambos casos son muy cercanos, lo cual, es indicativo de la correspondencia química de que la superaleación propuesta es correcta.

Tabla 10. Composición Química del Acero Inoxidable Súper Martensítico

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S	P	Cu	N
0.021	0.691	0.295	13.603	4.556	1.77	0.001	ND	ND	0.068
0.02	0.75	0.3	13.5	4.7	1.84	0.0002	0.0017	0.06	0.07

Balance Fe.



Análisis por ICP/CHNS-O



Condición teórica de llegada

La composición química del acero AISI 1018 queda denotado por la especificación ASTM A706/A706M, de acuerdo con la tabla 11 y 12, donde podemos observar los diferentes contenidos de los elementos constituyentes del acero.

Tabla 11. Composición química, especificación ASTM A706/A706M.

Norma	Requisito	Elemento									
		Carbono (C)	Manganeso (Mn)	Fósforo (P)	Azufre (S)	Silicio (Si)	Cobre (Cu)	Níquel (Ni)	Cromo (Cr)	Molibdeno (Mb)	Vanadio (V)
ASTM A706	1. Análisis de cada elemento por colada de acero	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	2. Máximo contenido permitido por colada de acero	0,30%	1,50%	0,035%	0,045%	0,50%	A definir por el fabricante				
	3. Máximo contenido permitido en una barra terminada	0,33%	1,56%	0,043%	0,053%	0,55%	A definir por el fabricante				

Tabla 12. Composición Química para una barra de acero AIS 1018.

% C	% Mn	% Si	% S	% P
0.30	1.50	0.50	0.045	0.035

6.2 Propiedades mecánicas del acero inoxidable UNS S41425

Los resultados obtenidos en la determinación de las propiedades mecánicas de acuerdo con la norma ASTM E8 a una velocidad de 0.54 mm/min se muestran en las curvas esfuerzo deformación para dos probetas de la superaleación UNS S41425, figuras 39 y 40, así como un condensado de los mismos en las tablas 13 y 14, donde se puede denotar los valores encontrados. Donde podemos denotar que los valores obtenidos en ambas probetas son muy similares, una carga máxima de tensión de alrededor de 28kN y un esfuerzo máximo de 870MPa.

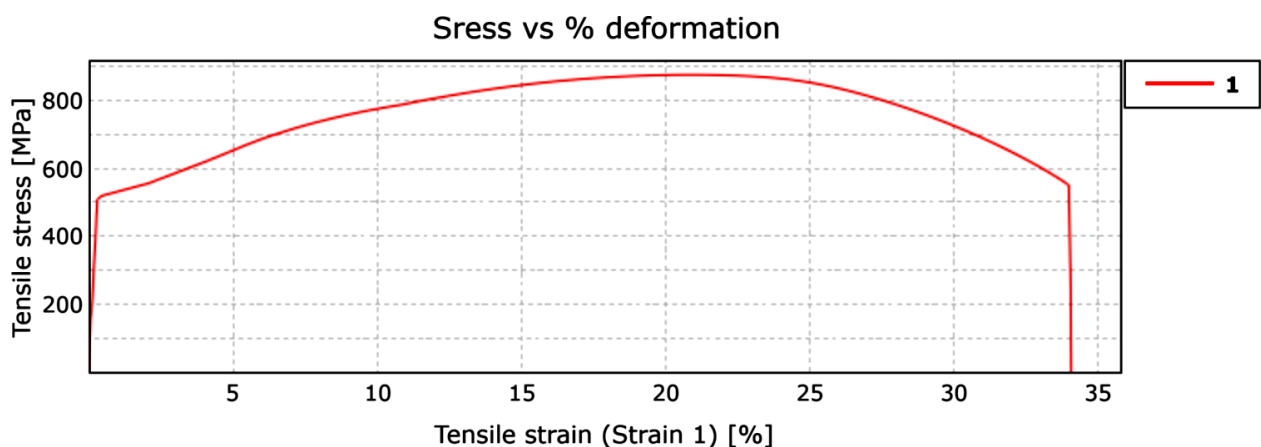


Figura 39. Curva de esfuerzo deformación de la probeta 1 del UNS S41425

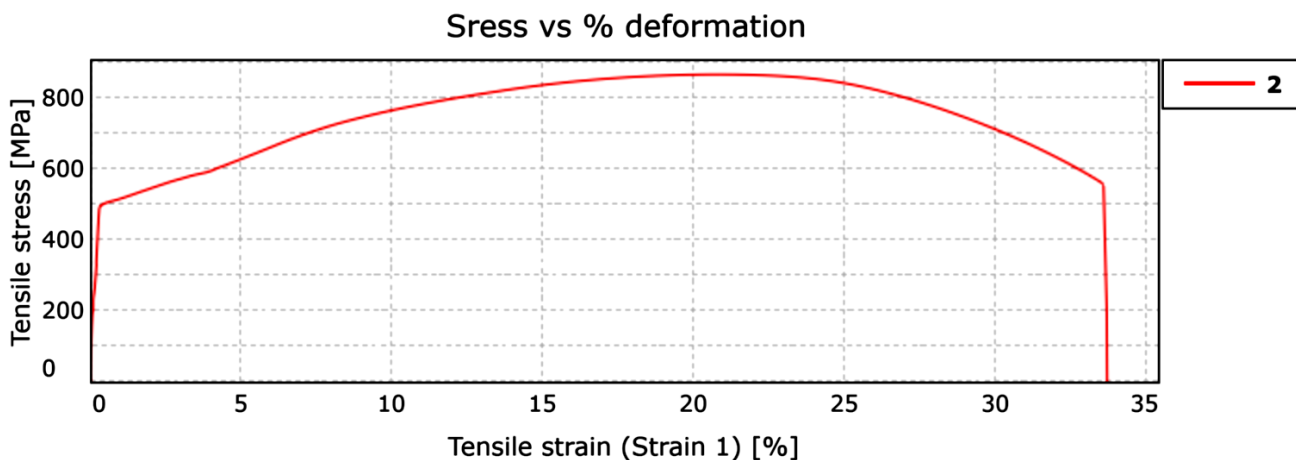


Figura 40. Curva de esfuerzo deformación de la probeta 2 del UNS S41425

Tabla 13. Condesado de resultados del acero inoxidable SM UNS S41425

	Specimen label	Force at Maximum Load [kN]	Tensile stress at Maximum Load [MPa]
1	acero 1	28.42	875.23
2	acero 1	28.15	867.04

	Force at Yield (Offset 0.2 %) [kN]	Tensile stress at Yield (Offset 0.2 %) [MPa]	Strain at Machine break [%]
1	16.91	520.68	-----
2	16.40	505.06	-----

	Width [mm]	Thickness [mm]	Diameter [mm]
1			6.43
2			6.43

	Area [cm ²]	Modulus (E-modulus) [MPa]
1	0.32	148502.51
2	0.32	124636.44

En la tabla 14, se presentan los valores ténsiles de dos aceros al carbono, un grado 60 y un grado 80, de acuerdo a la norma ASTM A615/A615M-22 y del acero inoxidable supermartensítico UNS S41425, donde podemos denotar que los valores de resistencia a la tensión de la superaleación corresponde a 126 000psi, (870MPa) el cual, es superior a los valores de los aceros grado 60 y 80, 60psi (420 MPa) y 80psi (550 MPa), mientras que los datos del esfuerzo de cedencia para el acero UNS S41425, se encuentra dentro de los valores de los otros aceros, de acuerdo a lo descrito en la tabla, se puede confirmar que la superaleación UNS S41425, presenta mejores propiedades mecánicas que los aceros al carbono grado 60 y 80.

Tabla 14. Valores ténsiles de ambos elementos metálicos

	Requerimientos Ténsiles		
	Grado 60 [420] ^a	Grado 80 [550] ^a	UNS S41425
Resistencia a la tensión, psi (MPa)	80 000 [550]	100 000 [690]	126 000 [870]
Esfuerzo de cedencia, psi (MPa)	60 000 [420]	80 000 [550]	74 350 [513]

a: Norma ASTM A615/A615M-22

6.3 Dureza del acero inoxidable UNS S41425

Los resultados obtenidos de la dureza se muestran en la tabla 15, la medición se obtiene a través del durómetro Rockwell C utilizando una carga de 150 Kg, se obtiene un promedio de 6 lecturas, dando un valor

de 25.93 HRC, muy cercano al valor proporcionado por el proveedor de la superaleación.

Tabla 15. Dureza del Acero Inoxidable Súper Martensítico

Dureza Rockwell C (HRC)						
1	2	3	4	5	6	PROM
26.2	26.7	26.7	25.4	24.8	25.8	25.93
Dato proporcionado por proveedor						26.00
Duroméetro Rockwell C, medido en laboratorio						
Condición de llegada						

6.4 Metalografía del acero inoxidable UNS S41425

Mediante la técnica metalográfica, se pudo identificar la microestructura interna de la aleación, comparándola con la proporcionada por el proveedor, la foto de la figura 41, nos muestran los resultados de dicho análisis, inciso a) microestructura de condición de llegada proporcionada por el proveedor de la superaleación y b) microestructura obtenida en el laboratorio. De acuerdo con las microestructuras, se observa en ambos casos que está compuesta por una forma alargada o agujas de martensita revenida, embebida en granos equiaxiales, corroborándose una misma microestructura en la superaleación.

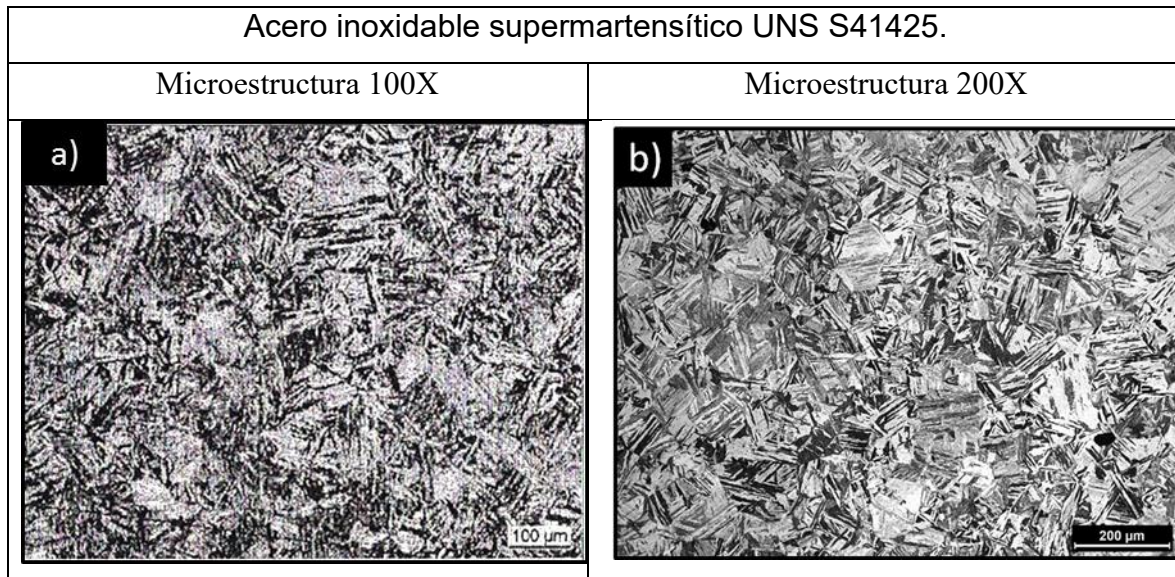


Figura 41. Metalografía proporcionada por proveedor y la obtenida en el laboratorio

6.5 Resistencia del concreto a la compresión de las tres relaciones agua/cemento, 0.45, 0.55 y 0.65

Para determinar la resistencia del concreto en las tres relaciones agua/cemento, 0.45, 0.55 y 0.65, se colaron dos especímenes para cada una de las relaciones, se les aplicó un periodo de 28 días del proceso de curado, utilizando una cámara de humedad al 100% de HR, además de un cabeceado con azufre, para verificar su resistencia mecánica a la compresión figura 42, estas pruebas fueron realizadas en los laboratorios de propiedades mecánicas de la Universidad Autónoma de Chihuahua, (UACH), desarrolladas dentro de la actividad de su tesis de ingeniería del Ing. Oscar Anchondo, quien estuvo participando dentro de este proyecto de investigación.



Figura 42. Cilindros de concretos cabeceados con azufre.

(Laboratorio Universidad Autónoma de Chihuahua, Laboratorio de Materiales)

La tabla 16, presenta un condesado de los resultados obtenidos de las pruebas de compresión, en los cilindros de concreto, adicionalmente se muestra en la gráfica 34, el comportamiento de la resistencia a la compresión del concreto en función de la relación agua cemento de acuerdo con Putzmeister, donde se puede denotar los valores esperados en diferentes relaciones agua cemento

Tabla 16. Resultados de las pruebas de compresión de los cilindros.

(Laboratorio Universidad Autónoma de Chihuahua, Laboratorio de Materiales)

Resistencia mecánica (kg/cm ²)				
Relación a/c	E 1	E 2	PROM	ESPERADO (ASTM C39/C39M)
0.45	328.2	294.2	311.2	300
0.55	241.3	235.1	238.2	233
0.65	164.1	159.6	161.85	180

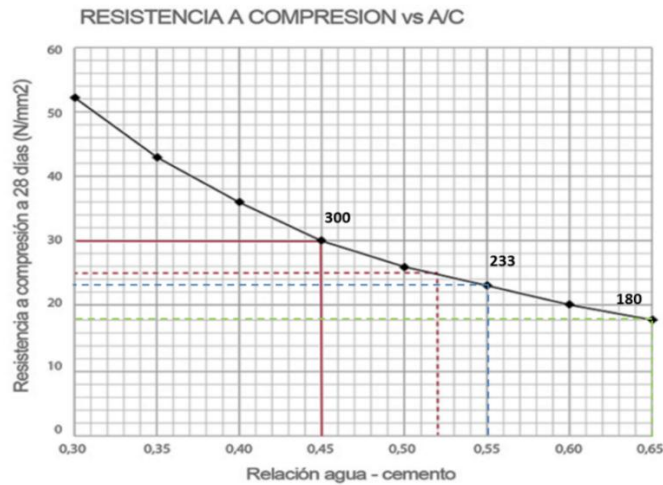


Figura 43. Resistencia a la compresión del concreto en función de la relación agua cemento. <https://bestsupportunderground.com/relacion-agua-cemento/>

De acuerdo con los resultados de la tabla 16, los especímenes de concreto mostraron una resistencia superior a la esperada para su relación agua cemento, sin embargo, dichos valores no presentan una desviación de la resistencia esperada mayor al 7%. La ASTM C39/C39M – 15a marca una desviación máxima para los cilindros de 100X200mm de 9%.

La resistencia promedio del azufre utilizado para cabecear los cilindros fue de 35.5Mpa (362kg/cm²), por lo que el material cumple con las especificaciones establecidas en la tabla 16 de la norma ASTM C39/C39M – 15a.

Las pruebas mecánicas en el concreto fueron utilizadas para verificar que las propiedades mecánicas de los especímenes en el laboratorio

correspondieran con aquellas presentes en las estructuras de concreto reforzado, con lo anterior se demuestra que el concreto fabricado y utilizado durante la experimentación tiene una correspondencia física con su homólogo en la industria.

6.6 Potencial de corrosión

La medición del potencial de corrosión E_{corr} , se determina mediante un multímetro de alta impedancia, foto 44, lo cual permite medir la diferencia energética del elemento metálico con el posible contacto con el electrolito utilizado como solución de prueba, decir flujo de corriente que se presenta al momento de la oxidación en el ando u elemento de prueba con respecto al electrolito.

Los Potenciales de corrosión se llevan a cabo conforme lo marca la norma ASTM C876 estas mediciones se llevan a cabo con un electrodo de referencia de cobre sulfato de cobre. Esta medición nos indica cuál es su tendencia hacia la corrosión.

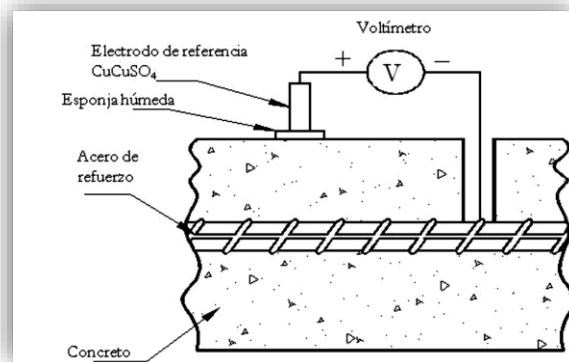


Figura 44. Esquema general para realizar la medición de potenciales de corrosión.



Las figuras 45 y 46, muestran las gráficas con el comportamiento de los resultados del potencial de corrosión de los dos sistemas propuestos a las tres relaciones agua cemento utilizadas, 0.45, 0.55 y 0.65, tanto para el acero al carbono como para el acero inoxidable supermartensítico UNS 41425.

La interpretación de los potenciales de corrosión se realiza con base a la norma ASTM C-876 u organismos internacionales como el DURAR [ASTM C876 – 22a, *Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.*], donde se indica los criterios de los potenciales referenciados a un electrodo de cobre sulfato de cobre (CSE).

De acuerdo con los criterios descritos, podemos denotar que el sistema-acero concreto correspondiente al **acero al carbono 1018 y el acero inoxidable supermartensítico UNS S41425**, embebido en una solución de cloruro de sodio al 5%, para las tres relaciones agua cemento, 0.45, 0.55 y 0.65 mostraron los siguientes comportamientos:

6.6.1 Acero al carbono AISI 1018

Zona con potenciales más positivos que -200mV Vs CSE

En un inicio de la exposición, los potenciales de corrosión se mantuvieron más positivos a partir del valor del potencial de -200mV durante un tiempo aproximado a 7.5 meses, este comportamiento inicial cuando los especímenes se encuentran en la zona de un 10% de corrosión, se puede atribuir a la protección que la alcalinidad del



concreto proporciona al elemento metálico, es decir, los constituyentes del cemento principalmente el óxido de calcio (CaO) y la humedad presente forman una película de protección en el elemento metálico, debido al alto valor de pH (entre 10 y 12). Sin embargo de acuerdo a lo observado en la gráfica, el primer potencial que se hace más negativo a partir de -200mV , correspondió al de la relación a/c de 0.65 a un tiempo de exposición de aproximadamente 4.26 meses, precedido del 0.55 con un tiempo aproximado de 7.02 meses y finalmente el de 0.45 a un tiempo de 7.36 meses, la diferencia en los tiempos, se atribuye al contenido de agua en las tres relaciones agua-cemento, a mayor relación agua-cemento el tiempo para pasar a la zona de incertidumbre de corrosión disminuye.

Zona en el rango de -200mV a -350mV Vs CSE

El comportamiento dentro de la zona de incertidumbre de corrosión, en cada una de las tres relaciones a/c 0.65, 0.55 y 0.42, como se puede apreciar en la gráfica 45, fue de 6.19, 7.42 y 11.05 meses respectivamente, manteniendo la misma tendencia mostrada en la zona del 10% de probabilidad de corrosión, a mayor contenido de humedad se alcanzan valores de potencial más negativos con mayor rapidez y en un menor tiempo.

Zona con potenciales más negativos que -300mV Vs CSE

Una vez alcanzado el valor límite de esta zona, el cual corresponde a -350mV , la tendencia mostrada desde el inicio de la exposición se mantiene, alcanzado valores de potencial para las tres relaciones a/c 0.65, 0.55 y 0.45 de -743mV , -574.0mV y -438.0mV respectivamente,

posteriormente se presenta una recuperación de la tendencia hacia potenciales más positivos en las relaciones a/c de 0.45 y 0.55, valores que tienden a permanecer prácticamente constantes, sin embargo permanecen dentro de la zona de 90% de probabilidad de corrosión, finalizando con valores más negativos la relación a/c 0.55 de la relación 0.45 con valores de -461.0mV y -438.0mV, mientras que la relación a/c correspondiente 0.65 no presenta una recuperación significativa, finalizando con un valor del potencial de -677.0mV.

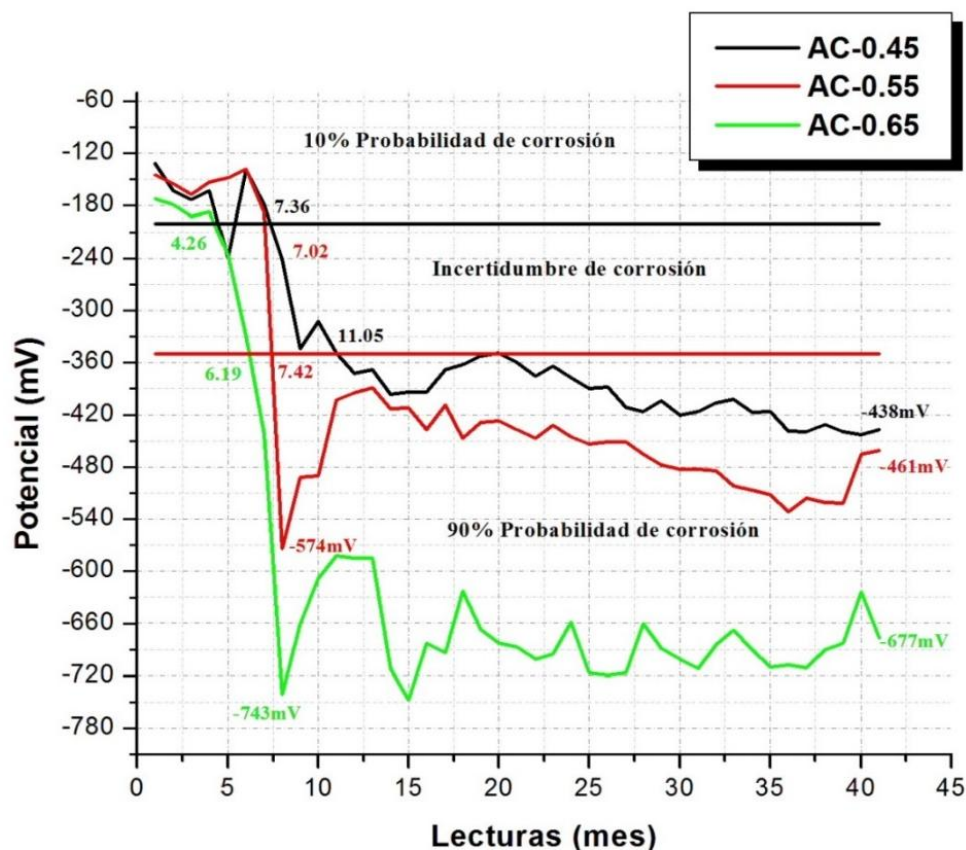


Figura 45. Comportamiento del acero al carbono durante todo el periodo de exposición.



6.6.2 Acero inoxidable supermartensítico UNS S41425

Zona con potenciales más positivos que -200mV Vs CSE

En esta zona, prácticamente no fueron alcanzados los potenciales de corrosión de las tres relaciones a/c, 0.65, 0.55 y 0.45. Sin embargo, en un lapso del periodo de exposición de 23-31 meses los valores estuvieron fluctuando alrededor del límite del potencial de -200mV.

Zona en el rango de -200mV a -350mV Vs CSE

En un inicio de la exposición, los potenciales de corrosión iniciaron dentro la zona de incertidumbre de corrosión, fluctuando en el límite superior de los -350mV, durante un tiempo aproximado a 4.44 meses, este comportamiento inicial cuando los especímenes se encuentran en el inicio de la exposición, comenzaron en la zona de incertidumbre de corrosión, se puede atribuir al alto potencial o fem de oxidación del cromo, por lo que podemos mencionar que es el inicio de dicha oxidación y el inicio de la formación de una película de pasivación formado por este elemento.

Zona con potenciales más negativos que -300mV Vs CSE

Por otro lado, de acuerdo a lo observado en la gráfica, una vez alcanzado el límite inferior de -350mV de la zona de 90% de probabilidad de corrosión, se observa que la relación a/c de 0.65 alcanza valores de -638mV, precedido de la relación de a/c de 0.55 con un valor de -582mV y finalmente la relación a/c de 0.45 con un valor de



-426mV, la diferencia de estos valores, se atribuye al contenido de agua en las tres relaciones agua-cemento, a mayor relación agua-cemento mayores valores de potenciales negativos son alcanzados. Una vez alcanzados los potenciales mencionados, los tres especímenes muestran una recuperación a potenciales más positivos hasta alcanzar la zona de incertidumbre de corrosión entre los 7.0 y 9 meses de exposición, posteriormente se vuelve a presentar una nueva tendencia potenciales más negativos hasta alcanzar nuevamente la zona del 90% de probabilidad de corrosión entre los 12 y 12.7 meses de exposición. Entre los meses 13.5 y 15 meses, se vuelve a mostrar un regreso de las tres relaciones a potenciales más positivos muy cercano a el límite de la zona de un 10% de probabilidad de corrosión, esta tendencia se puede mencionar que tiene un comportamiento prácticamente constante con valores muy cercanos en los tres casos, finalizando con valores de -213mV, -199mV y -196mV (0.65, 0.55 y 0.45) e inclusive mostrando nuevamente una tendencia hacia valore más positivos en los tres casos. El comportamiento descrito anteriormente, es indicativo de que, en el material metálico, en este caso el acero inoxidable supermartensítico, se presentó un fenómeno fisicoquímico que está mostrando una menor probabilidad de corrosión, originado por la formación de una película de pasivación característica de los aceros inoxidables.

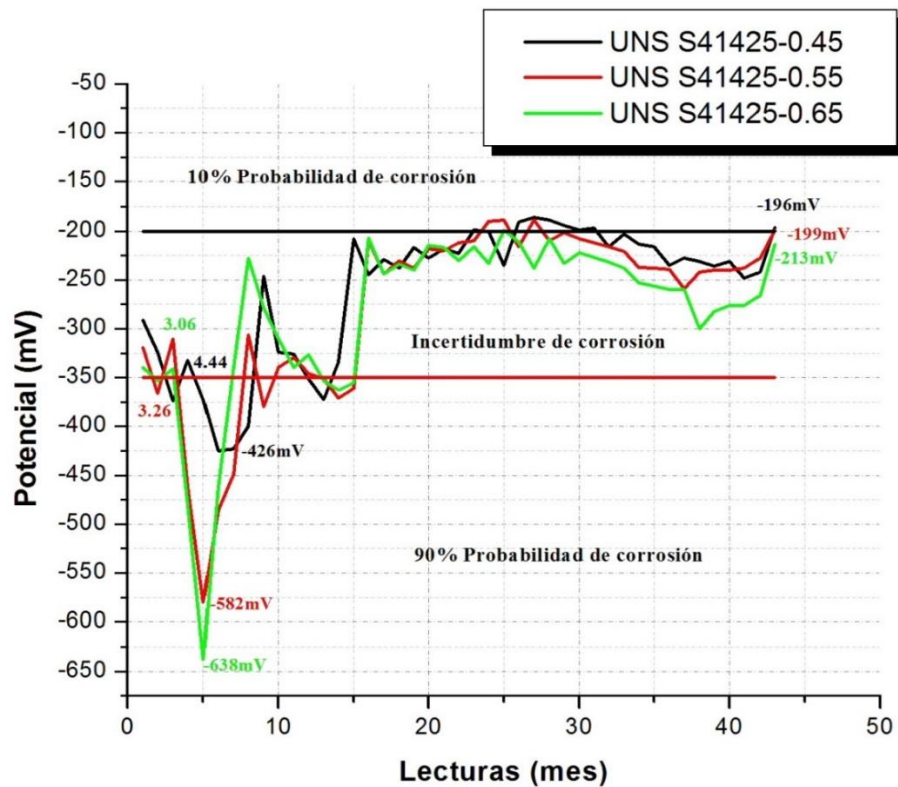


Figura 46. Comportamiento del acero inoxidable supermartensítico UNS S41425 durante todo el periodo de exposición

6.7 Cinética de corrosión en los medios de experimentación propuestos, salina y soluciones poros.

Los resultados obtenidos para cada una de las técnicas propuestas en los diferentes sistemas de experimentación, probetas con las tres relaciones agua cemento embebidas (0.45, 0.55 y 0.65) inmersas en el medio salino al 5% de NaCl, solución poro con dos contenidos de NaCl (3% y 5%) y las pruebas en solución salina al 5% de NaCl con dos valores de pH a 6.5 y 12, se presentan a continuación:

6.7.1 Probetas con las tres relaciones agua cemento embebidas (0.45, 0.55 y 0.65) inmersas en NaCl 5%.

En las figuras 47 y 48, se presentan las gráficas de los resultados de las curvas cíclicas de polarización, para las probetas con los aceros AISI 1018 y el supermartensítico UNS S41425, en las condiciones iniciales de la exposición. Se puede denotar, que el potencial de corrosión E_{corr} , para ambos elementos metálicos, se encontró en valores alrededor de -500mV. Por otro lado, se puede observar que el acero AISI 1018, presenta una zona de pasivación muy bien definida que presentan estos materiales en las condiciones físico-químicas que le brinda el concreto, señalado por el círculo azul en la gráfica, mientras que el acero inoxidable supermartensítico UNS S41425, también presenta esta zona de pasivación inicial, pero de forma adicional se denota una segunda zona de pasivación, que de acuerdo con la revisión de literatura es debido una segunda reacción química de la oxidación del níquel, para posteriormente volver a pasar a una zona activa. En cuanto a la formación de la histéresis, en todos los casos y en los dos elementos metálicos, el regreso de la curva es por la parte izquierda con la correspondiente disminución de la corriente y a potenciales de corrosión más positivos cercanos a los 500mV, evidenciando la no formación de corrosión localizada.

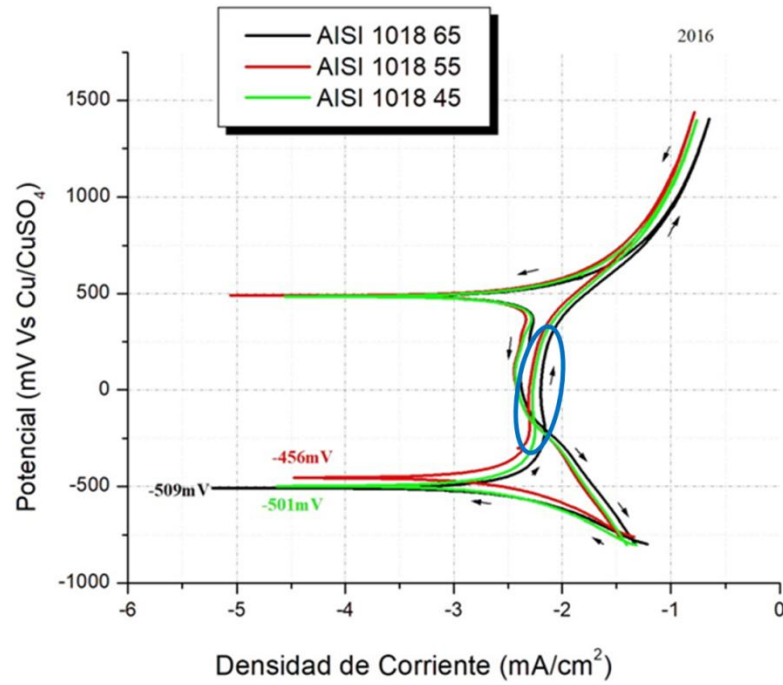


Figura 47. Comportamiento del acero AISI 1018 en el primer año de exposición

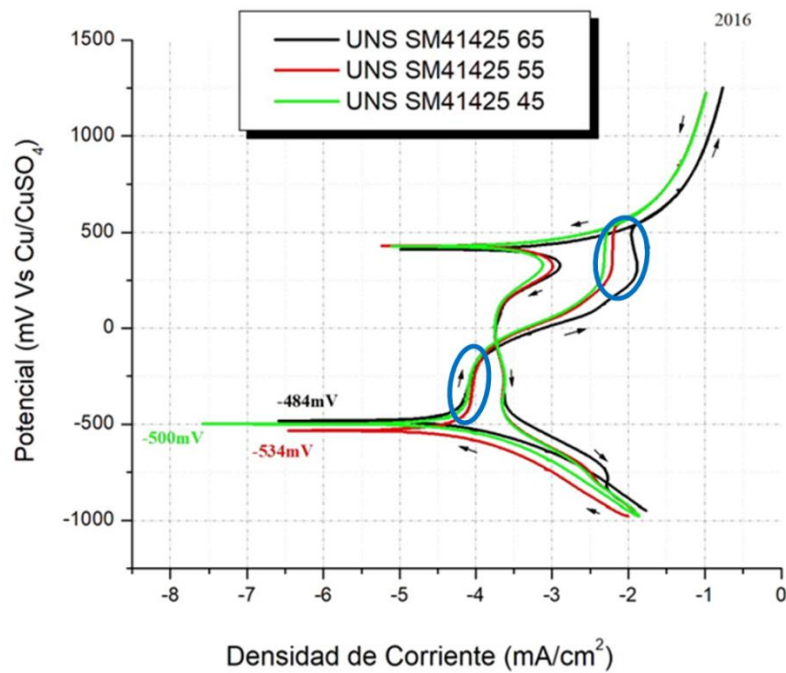


Figura 48. Comportamiento del acero UNS S 41425 en el primer año de exposición.



En las figuras 49 y 50, se presentan las gráficas de los resultados de las curvas cíclicas de polarización, para las probetas con los aceros AISI 1018 y el supermartensítico UNS S41425, en una condición intermedia (2017), en donde el acero 1018 muestra valores más negativos del potencial de corrosión con respecto al inicio de la exposición, para las tres relaciones agua-cemento 45, 55 y 65, de -639mV, -720mV y -594mV respectivamente, se puede observar que aún presenta la estado activo-pasivo desplazándose ligeramente más a la derecha conforme al aumento de la relación agua-cemento, notándose ligeramente un regreso por la parte derecha de la curva correspondiente a la relación a/c de 0.65, indicando posibles sitios de corrosión localizada.

Mientras que el acero inoxidable supermartensítico, el comportamiento del potencial de corrosión, para la relación agua-cemento de 0.45, el valor se mantiene muy similar al inicio de la exposición muy cercano a los -500mV, mientras que para las relaciones a/c de 0.55 y 0.65 estos valores se hacen más negativos, de -557mV y -668mV, sin embargo, el estado activo-pasivo se sigue presentando en sus dos formas mostradas desde el inicio de la exposición.

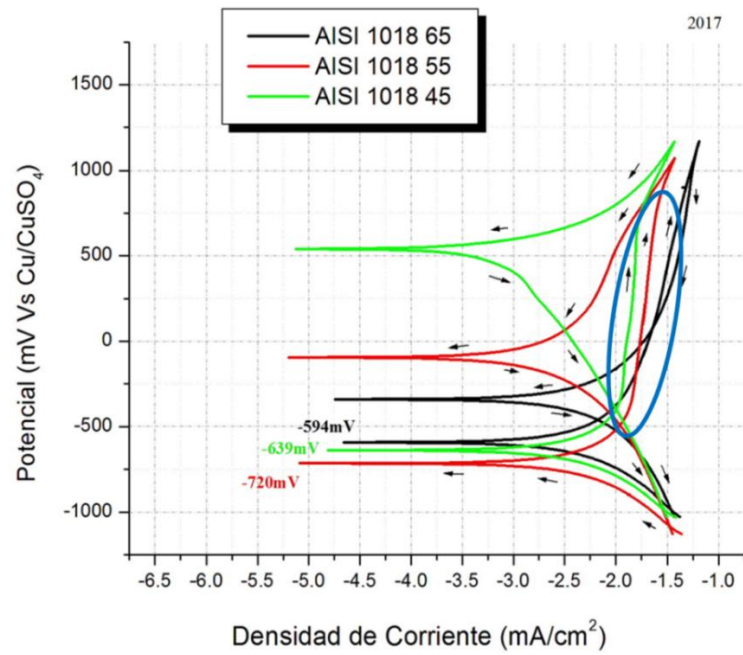


Figura 49. Comportamiento del acero AISI 1018 en el segundo año de exposición.

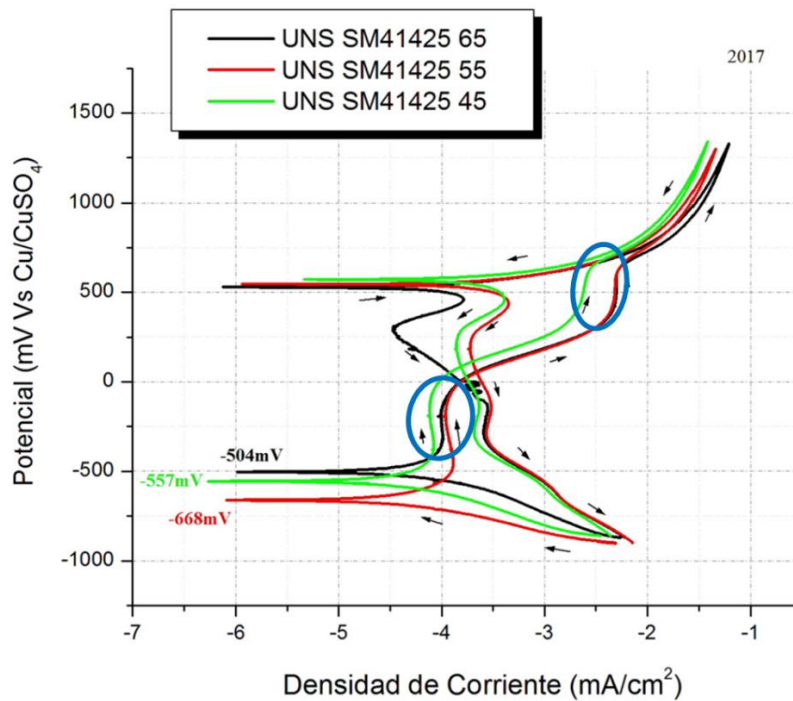


Figura 50. Comportamiento del acero SM S41425 en el segundo año de exposición.



En las figuras 51 y 52, se presentan las gráficas de los resultados de las curvas cíclicas de polarización, para las probetas con los aceros AISI 1018 y el supermartensítico UNS S41425, en una condición intermedia (2018), en donde el acero AISI 1018 continua hacía valores más negativos del potencial de corrosión con respecto al inicio de la exposición, para las tres relaciones agua-cemento 45, 55 y 65, de -508mV, -735mV y -872mV respectivamente, observándose en las gráficas un corrimiento hacia la derecha, siendo mayor de acuerdo al

contenido de la relación agua-cemento, es decir la relación a/c de 0.65 es la muestra con mayor desplazamiento, seguida de la relación a/c de 0.55 y finalmente la de 0.45, lo cual, de acuerdo a este comportamiento, este corrimiento es proporcional a una mayor demanda de corriente y por la tanto, un mayor deterioro en el elemento metálico, otro punto importante, es el comportamiento mostrado de las tres relaciones agua-cemento, ya no muestran un estado activo-pasivo, es decir, se observa un comportamiento de corrosión generalizada muy intensa en los tres casos, sin embargo el regreso de la curva en los tres relaciones es por la parte de adentro o izquierda de la curva, evidenciando que tenemos únicamente corrosión generalizada en los elementos metálicos.

Mientras que el acero inoxidable supermartensítico, el comportamiento del potencial de corrosión, para las tres relaciones agua-cemento, es con tendencia a valores ligeramente más positivos, fluctuando con valores de -479 a -506mV, es importante señalar que el comportamiento de las tres curvas es muy cercano en las tres relaciones agua-cemento, es decir, el contenido de agua para este elemento metálico, no tiene mucha influencia en la cinética de corrosión, haciéndose nuevamente muy notorio e importante, la presencia de los dos estados activo-pasivos mostrados desde el inicio de la exposición.

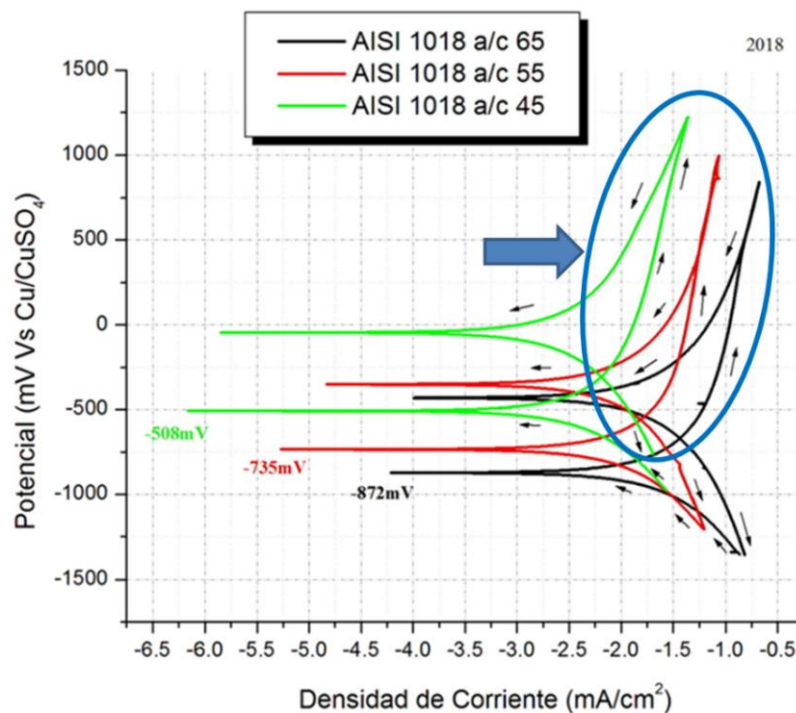


Figura 51. Comportamiento del acero AISI 1018 en el tercer año de exposición.

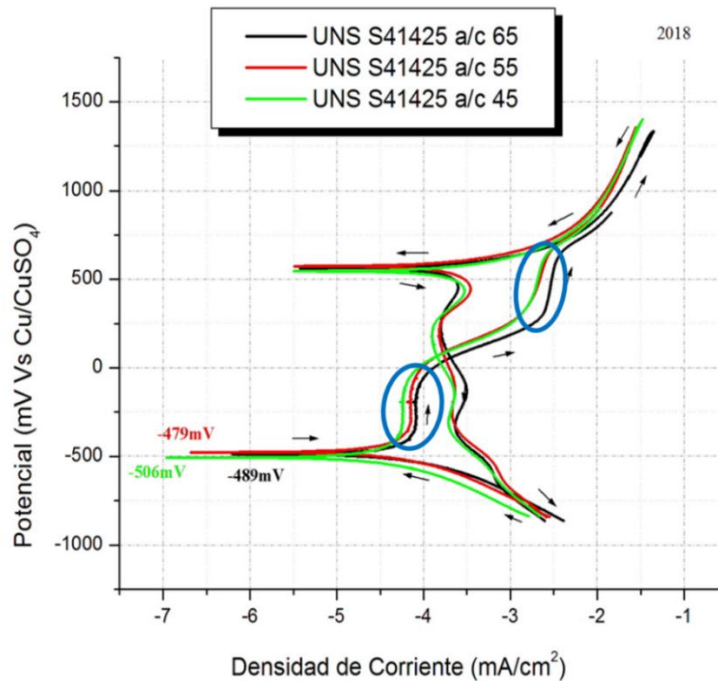


Figura 52. Comportamiento del acero UNS S 41425 en el tercer año de exposición.

En las figuras 53 y 54, se presentan las gráficas de los resultados de las curvas cíclicas de polarización, para las probetas con los aceros AISI 1018 y el supermartensítico UNS S41425, en las condiciones finales de la exposición.

Podemos observar que el acero AISI 1018, muestra los potenciales de corrosión para cada relación a/c 45, 55 y 65, de -515mV, -624mV y -642mV respectivamente, mostrando también un corrimiento de ambas relaciones a/c hacia la derecha de la curva, señalado por los círculo y flecha azules, es decir, un aumento en la intensidad de corriente, la cual va en incremento conforme aumenta esta relación, evidenciando que



para el acero AISI 1018, si es muy importante considerar el aumento de los contenidos de agua en estas mezclas del concreto, por lado, también es observable que en los tres casos, no se vuelve a presentar un comportamiento activo-pasivo, las tres curvas muestran que el elemento metálico se encuentra en un sistema activo de corrosión, el cual, se incrementa con el aumento de la relación a/c.

El acero inoxidable supermartensítico, al finalizar el tiempo de exposición, el comportamiento mostrado del potencial de corrosión, para las tres relación agua-cemento, continua con la tendencia a valores más positivos, fluctuando con valores para las tres relaciones a/c, 0.45, 0.55 y 0.65 de -394mV, -413mV y -481mV, es importante señalar que el comportamiento de las tres curvas es muy cercano en las tres relaciones agua-cemento, más sin embargo se puede notar un ligero desplazamiento hacia la derecha de la curva de la relación a/c de 0.65, sin embargo, no se pierde los dos estado de activación-pasivación mostrados desde un inicio de la exposición en ninguna de las tres relaciones a/c., es decir, el contenido de agua para este elemento metálico, no tiene mucha influencia en la cinética de corrosión.

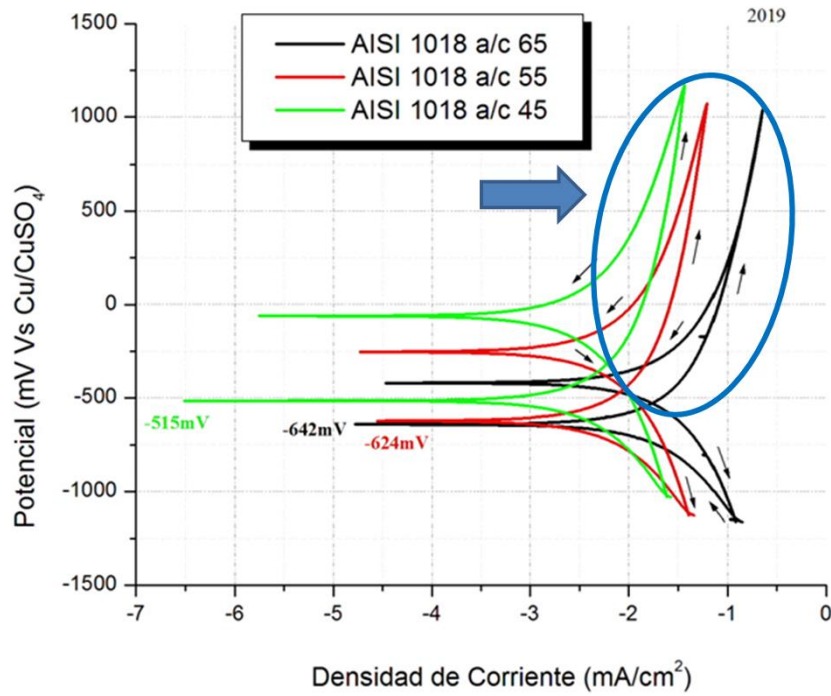


Figura 53. Comportamiento del acero AISI 1018 al finalizar la exposición.

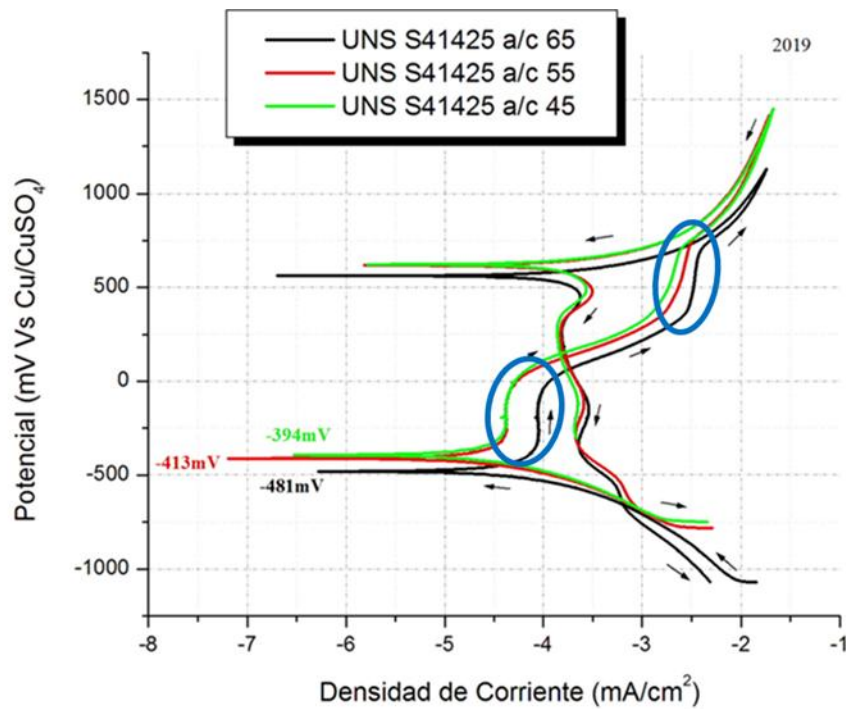


Figura 54. Comportamiento del acero UNS S41425 al finalizar la exposición.



En la tabla 17, se muestran los condensados de las pruebas de electroquímicas utilizadas en las probetas durante el tiempo de exposición, para el elemento metálico convencional acero AISI 1018.

Se puede observar que en año 2016, la velocidad de corrosión promedio, se mantuvo en el orden de 10^{-2} mm/año en las tres relaciones agua cemento 0,45, 0.55 y 0.65, con valores de 0.0120756, 0.0119891 y 0.01833365 respectivamente.

En año 2017, la velocidad de corrosión promedio, se mantuvo en el orden de 10^{-3} , en mm/año en las dos primeras relaciones agua cemento 0,45, 0.55 de 0.0088131 0.0088061 respectivamente y para la relación de 0.65 fue de 0.0513924, este último valor, nos está denotando un ligero aumento en la cinética de corrosión, lo cual, se atribuye al aumento de la relación agua-cemento.

Para los años 2018 y 2019, la velocidad de corrosión promedio, se mantuvo en el orden de 10^{-2} mm/año en las tres relaciones agua cemento 0,45, 0.55 y 0.65, en el año 2018 se muestran los valores de 0.01093005, 0.0212915 y 0.05354475 y para el año 2019 tenemos los valores de 0.0193545, 0.0274084 y 0.07795105, respectivamente, se puede notar que conforme aumenta el contenido de agua en la relación agua cemento, la velocidad de corrosión se van incrementando.

Tabla 17. Condensado de resultados de las técnicas electroquímicas del acero AISI 1818.

AISI 1018					
Tiempo	a/c	Vcorr		Icorr	LPR
Año	%	(mils/yr)	(mm/year)	(mA/cm ²)	(Ohm.cm ²)
1	45	0.47541	1.2076E-02	1.0419E-03	8118
	55	0.47201	1.1989E-02	1.0344E-03	8945
	65	0.72179	1.8334E-02	1.5819E-03	5906
2	45	0.34697	8.8131E-03	6.9500E-04	34371
	55	0.34669	8.8061E-03	8.8061E-03	35454
	65	2.02330	5.1392E-02	4.0530E-03	5518
3	45	0.43031	1.0930E-02	8.6195E-04	28827
	55	0.83824	2.1292E-02	1.5477E-03	20943
	65	2.10800	5.3545E-02	4.2228E-03	5515
4	45	0.76198	1.9355E-02	1.6699E-03	39498
	55	1.07900	2.7408E-02	2.3648E-03	22610
	65	3.06890	7.7951E-02	6.7257E-03	9654

En la tabla 18, se muestran los condensados de las pruebas de electroquímicas utilizadas en las probetas durante el tiempo de exposición, para el elemento metálico convencional acero SM UNS S41425.

Tabla 18. Condensado de resultados de las técnicas electroquímicas del acero SM UNS S41425

SM UNS S41425					
Tiempo	a/c	Vcorr		Icorr	LPR
Año	%	(mils/yr)	(mm/year)	(mA/cm ²)	(Ohm.cm ²)
1	45	0.008333	2.1170E-04	1.8850E-05	12884
	55	0.008966	2.2775E-04	2.0280E-05	12230
	65	0.010883	2.7645E-04	2.4620E-05	7474
2	45	0.007406	1.8810E-04	1.6750E-05	52692
	55	0.008257	2.0975E-04	1.8680E-05	52101
	65	0.010919	2.7735E-04	2.4695E-05	40845
3	45	0.006355	1.6145E-04	1.4375E-05	69499
	55	0.008959	2.2755E-04	2.0265E-05	68683
	65	0.012424	3.1560E-04	2.8100E-05	67600
4	45	0.007406	1.8810E-04	1.6750E-05	52692
	55	0.008257	2.0975E-04	1.8680E-05	52101
	65	0.010919	2.7735E-04	2.4695E-05	40845

Se puede observar que, para la superaleación, durante los cuatro años de exposición en la solución salina, 2016, 2017, 2018 y 2019 la velocidad de corrosión promedio prácticamente se mantuvo en el orden de 10^{-4} mm/año en las tres relaciones agua cemento 0,45, 0.55 y 0.65, detectándose nuevamente un muy ligero incremento de la velocidad de corrosión, sin llegar a cambiar en una orden de magnitud con el



aumento de la relación agua-cemento. Estos resultados del acero inoxidable SM UNS S41425 al ser comparados con los del otro elemento metálico acero AISI 1018, muestran una disminución notable en la velocidad de corrosión del orden de 10^{-2} mm/año.

6.8 Estados de pasivación-activación-transpasivación y los parámetros electroquímicos correspondientes

A continuación, se describen los resultados de ambos elementos metálicos en cada una de las concentraciones en la solución salina.

6.8.1 Acero AISI 1018, solución poro con tres contenidos de NaCl (1%, 3% y 5%)

Las figuras 55 a la 57, muestran el comportamiento del Acero AISI 1018, en la solución poro con los tres contenidos de porcentaje de NaCl, 1%, 3% y 5%, así como una evidencia fotográfica visual de la superficie de la muestra del electrodo electroquímico al finalizar las pruebas.

Acero AISI 1018, en solución poro

La grafica de la figura 55, muestra muy bien definidas las diferentes regiones activo-pasivas, así como el regreso de la curva durante le barrido impuesto en la experimentación, la gráfica nos muestra una región activa entre los potencial -911 y -458mV, originado un tamaño de

rango de 453mV, una región de pasivación entre los potenciales -458 y 377mV con una tamaño de rango de 835mV, así mismo, el regreso de la curva por el lado izquierdo, no muestra susceptibilidad a la formación de picaduras, lo anterior, se denota en la superficie de muestra, donde se puede observar un ligero oscurecimiento de la superficie, debido a la pasivación sufrida durante la prueba, además de que no se observan la presencia de picaduras.

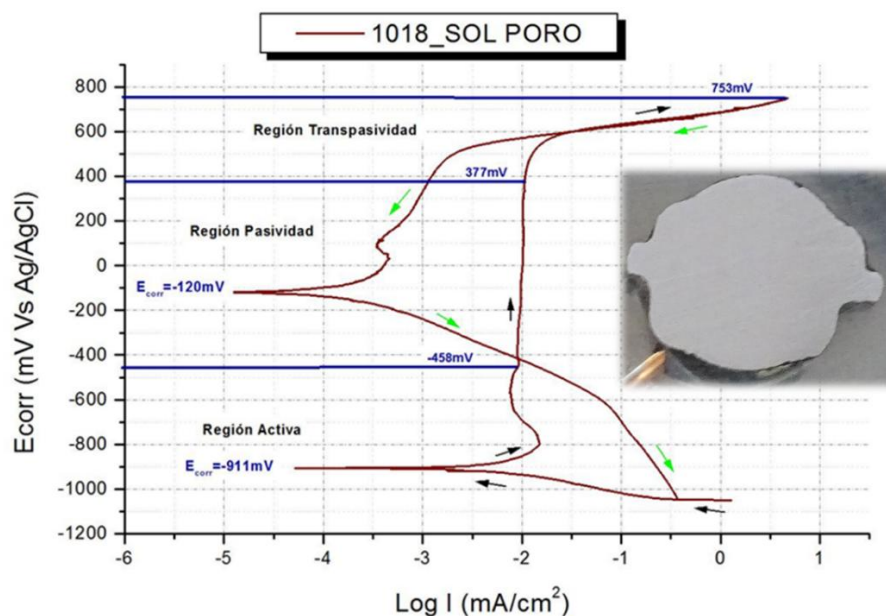


Figura 55. Comportamiento del acero AISI 1018 expuesto en la solución poro.

Acero AISI 1018, en solución poro con 1% de NaCl

La figura 56, muestra en la gráfica una región activa entre los potencial -931 y -449mV, originado un tamaño de rango de 482mV, una región de pasivación entre los potenciales -449 y 427mV con una tamaño de rango de 876mV, así mismo, el regreso de la curva por el lado izquierdo, no muestra susceptibilidad a la formación de picaduras, lo anterior, se

denota en la superficie de muestra, donde se puede observar un ligero oscurecimiento de la superficie, debido a la pasivación sufrida durante la prueba, además de que no se observan la presencia de picaduras, por lo anterior descrito, la adición del 1% de NaCl, no muestra influencia en los comportamiento activo-pasivo, así como la no susceptibilidad a la formación de picaduras, es un comportamiento muy parecido al mostrado con la solución poro.

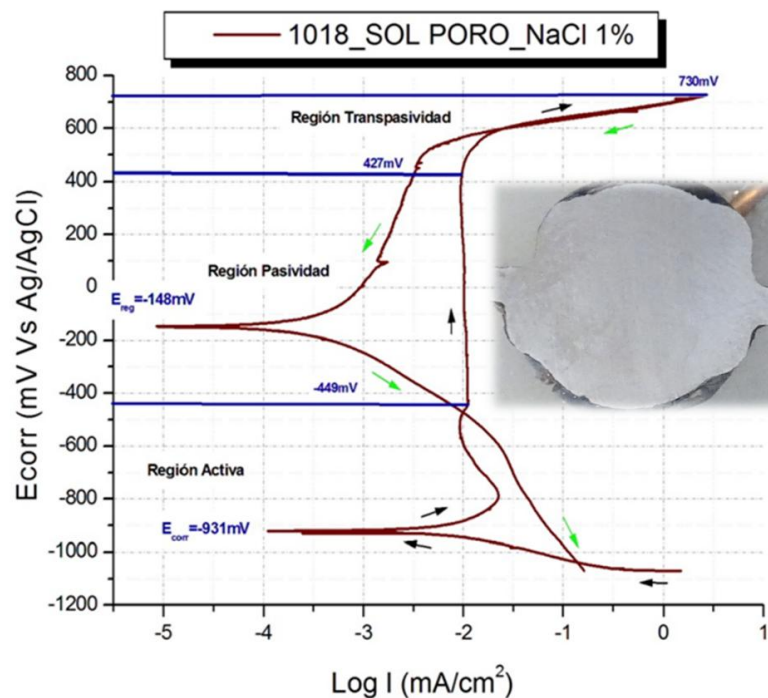


Figura 56. Acero AISI 1018 expuesto en la solución poro con NaCl 1%.

Acero AISI 1018, en solución poro con 3% de NaCl

La figura 57, muestra en la gráfica una región activa entre los potencial -657 y -460mV, originado un tamaño de rango de 1117mV, una región de pasivación entre los potenciales -460 y 402mV con una tamaño de rango de 862mV, denotándose que el rango de la región activa es mayor

con una ligera disminución del región de pasivación con respecto a los dos casos anteriores, además, el regreso de la curva es por el lado derecho, mostrando susceptibilidad a la formación de picaduras, lo anterior, se denota en la superficie de muestra, donde se puede observar la presencia de picaduras, desarrollado durante la prueba, por lo anterior descrito, la adición del 3% de NaCl, muestra influencia en los comportamiento activo-pasivo, así como la susceptibilidad a la formación de picaduras.

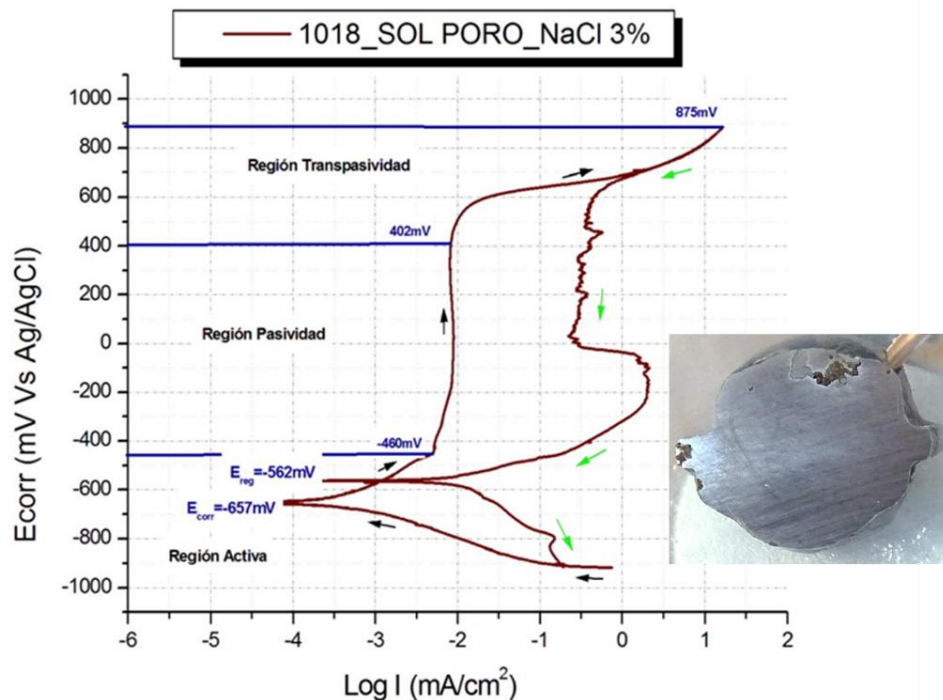


Figura 57. Acero AISI 1018 expuesto en la solución poro con NaCl 3%.

Acero AISI 1018, en solución poro con 5% de NaCl

La figura 58, muestra en la gráfica una región activa entre los potencial -876 y -556mV, originado un tamaño de rango de 1432mV, una región

de pasivación entre los potenciales -463 y 375mV con un tamaño de rango de 832mV, como era de esperarse, de acuerdo al comportamiento observado en los tres casos predecesores, el rango de la región activa sigue incrementándose y una disminución de la región de pasivación con respecto a los casos anteriores, además, el regreso de la curva vuelve nuevamente por el lado derecho de una manera más pronunciada, mostrando más susceptibilidad a la formación de picaduras, lo anterior, se denota en la superficie de muestra, donde se puede observar la presencia de picaduras, desarrollado durante la prueba, por lo anterior descrito, la adición del 3% de NaCl, muestra influencia en los comportamiento activo-pasivo, así como la susceptibilidad a la formación de picaduras.

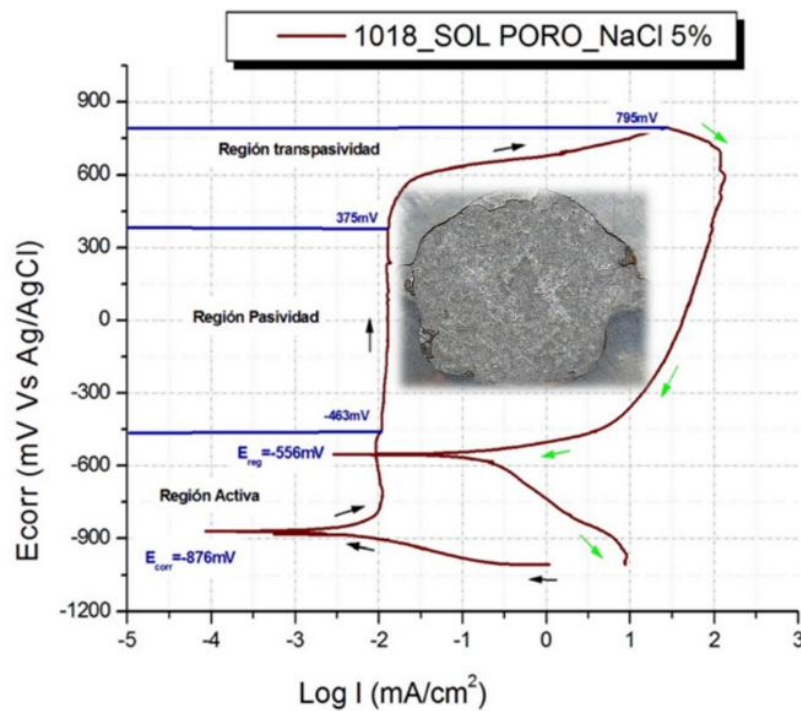


Figura 58. Acero AISI 1018 expuesto en la solución poro con NaCl 5%.

6.8.2 SM41425 solución poro con contenidos NaCl (1%, 3% y 5%)

Las figuras 59 a la 62, muestran el comportamiento del Acero Inoxidable SM S41425, en la solución poro con los tres contenidos de porcentaje de NaCl, 1%, 3% y 5%, así como una evidencia fotográfica visual de la superficie de la muestra del electrodo electroquímico al finalizar las pruebas.

Acero SM UNS S41425, en solución poro

La figura 59, muestra en la gráfica el comportamiento del acero inoxidable SM UNS S41425 expuesto en solución poro, donde a diferencia del acero al carbono 1018, muestra dos regiones de pasividad y dos regiones de transpasividad, una región activa entre los potencial -436 y -311mV, originado un tamaño de rango de 747mV, la primer región de pasivación entre los potenciales -311 y -65mV con un tamaño de rango de 376mV, la segunda región de pasivación entre los potenciales 243 y 505mV con un tamaño de rango de 262mV, el regreso de la curva es por el lado izquierdo, no mostrando susceptibilidad a la formación de picaduras, lo anterior, se denota en la superficie de muestra, donde se puede observar que no hay existencia de picaduras desarrolladas durante la prueba, por lo anterior descrito, el comportamiento mostrado, con la presencia de dos regiones de pasividad, se le atribuye a la presencia del Cromo y el Níquel en el acero

inoxidable supermartensítico, es decir, cada uno contribuye a la formación en los rangos descritos de dichas películas de oxidación o pasivación, que le brindan una doble autoprotección.

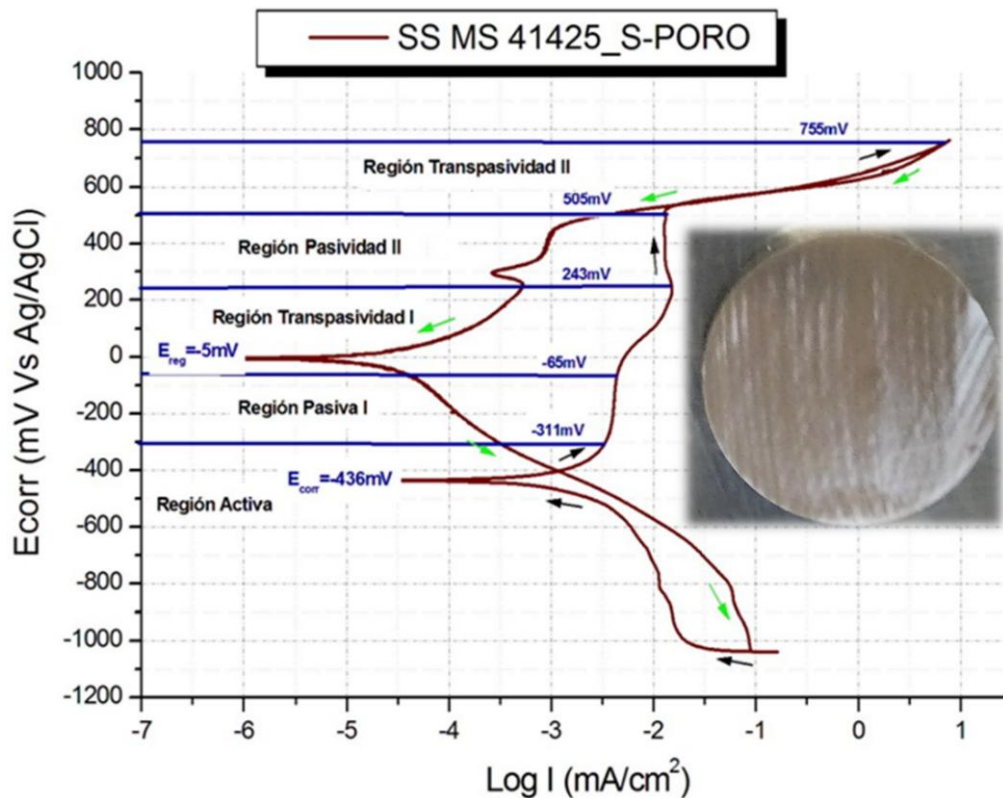


Figura 59. Acero SM UNS S41425 expuesto en la solución poro.

Acero SM UNS S41425, en solución poro con 1% NaCl

La figura 60, muestra en la gráfica el comportamiento del acero inoxidable SM UNS S41425 expuesto en la solución poro con la adición de 1% de NaCl, donde podemos observar, que en este caso únicamente se presenta una región activa entre los potenciales -428 y 183mV,

originado un tamaño de rango de 611mV y una región de pasivación entre los potenciales 183 y 528mV con un tamaño de rango de 345mV, el regreso de la curva nuevamente es por el lado izquierdo, no mostrando susceptibilidad a la formación de picaduras.

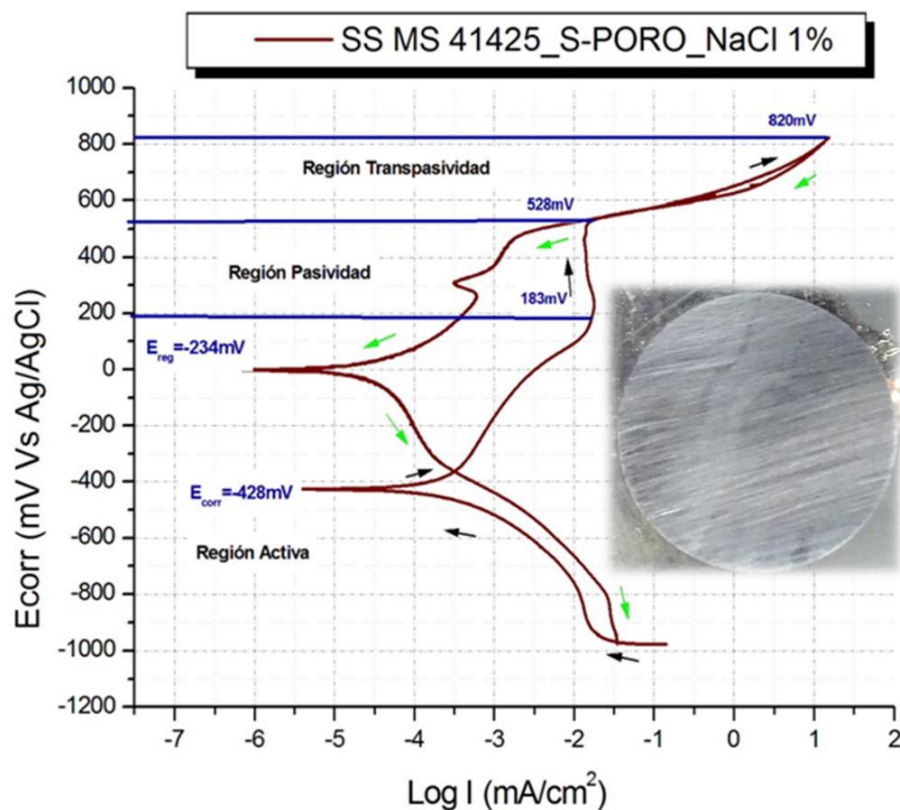


Figura 60. Acero SM UNS S41425 expuesto en la solución poro con NaCl 1%.



Acero SM UNS S41425, en solución poro con 3% NaCl

La figura 61, muestra en la gráfica el comportamiento del acero inoxidable SM UNS S41425 expuesto en solución poro con la adición de un 3% de NaCl, donde se vuelven a presentar las dos regiones de pasividad y dos regiones de transpasividad, una región activa entre los potencial -600 y -421mV originado un tamaño de rango de 179mV, una primer región de pasividad entre los potenciales -421 y -128mV, con un rango de 293mV, la primer región transpasiva entre los potenciales -128 a 192mV con un rango de 320mV, una segunda repasivación entre los potenciales 192 y 593mV con un rango de 331mV, posterior a un segunda transpasividad dentro de los potenciales 523 y 638mV con un rango de 115mV, de igual forma que los dos casos anteriores, el regreso de la curva es por la parte izquierda, no mostrando susceptibilidad a la formación de picaduras, lo anterior, se denota en la superficie de la muestra, donde se puede observar únicamente manchado, sin embargo no hay existencia de picaduras desarrolladas durante la prueba, por lo anterior descrito, el comportamiento mostrado, se vuelve a atribuir a la presencia de las dos regiones de pasividad, como antes se mencionó, originados por presencia y contribución de los elementos de aleación, Cromo y el Níquel.

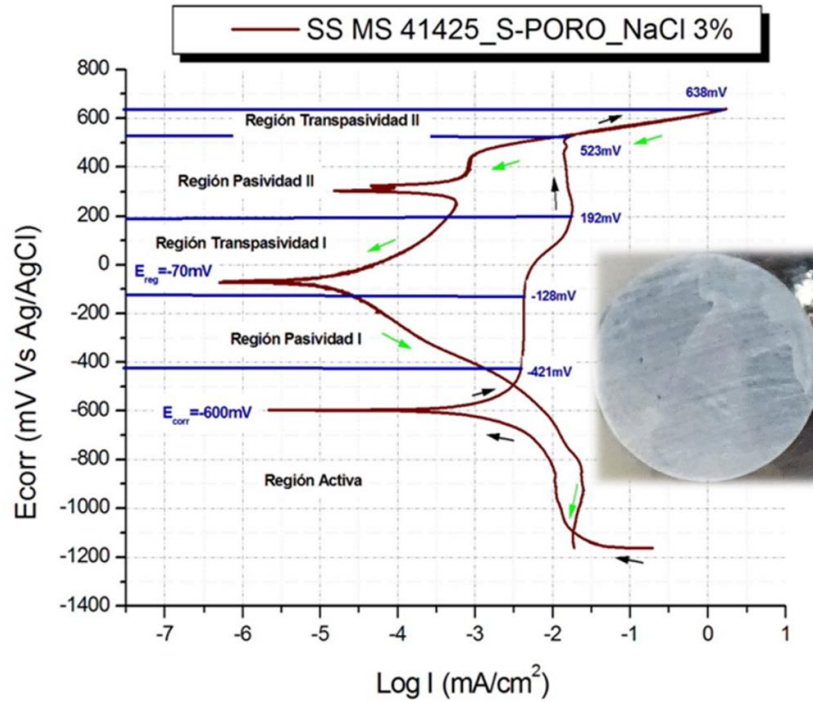


Figura 61. Acero SM UNS S41425 expuesto en la solución poro con NaCl 3%.

Acero SM UNS S41425, en solución poro con 5% NaCl

La figura 62, muestra en la gráfica el comportamiento del acero inoxidable SM UNS S41425 expuesto en solución poro con la adición de un 5% de NaCl, donde tenemos un comportamiento muy similar al del 3% de NaCl, se vuelven a presentar las dos regiones de pasividad y dos regiones de transpasividad, una región activa entre los potencial -614 y -431mV originado un tamaño de rango de 183mV, una primer región de pasividad entre los potenciales -431 y -153mV, con un rango de 278mV, la primer región transpasiva entre los potenciales -153 a

193mV con un rango de 346mV, una segunda repasivación entre los potenciales 193 y 518mV con un rango de 325mV, posterior a un segunda transpasividad dentro de los potenciales 518 y 627mV con un rango de 109mV, de igual forma que los tres casos anteriores, el regreso de la curva es por la parte izquierda, no mostrando susceptibilidad a la formación de picaduras, lo anterior, se denota en la superficie de la muestra, donde se puede observar únicamente un mucho mayor manchado, sin embargo, no hay existencia de picaduras desarrolladas durante la prueba, el comportamiento mostrado es prácticamente el mismo que el mostrado con el 3% de NaCl, indicando que no hay influencia significativa con el incremento del contenido del Cloruro de Sodio.

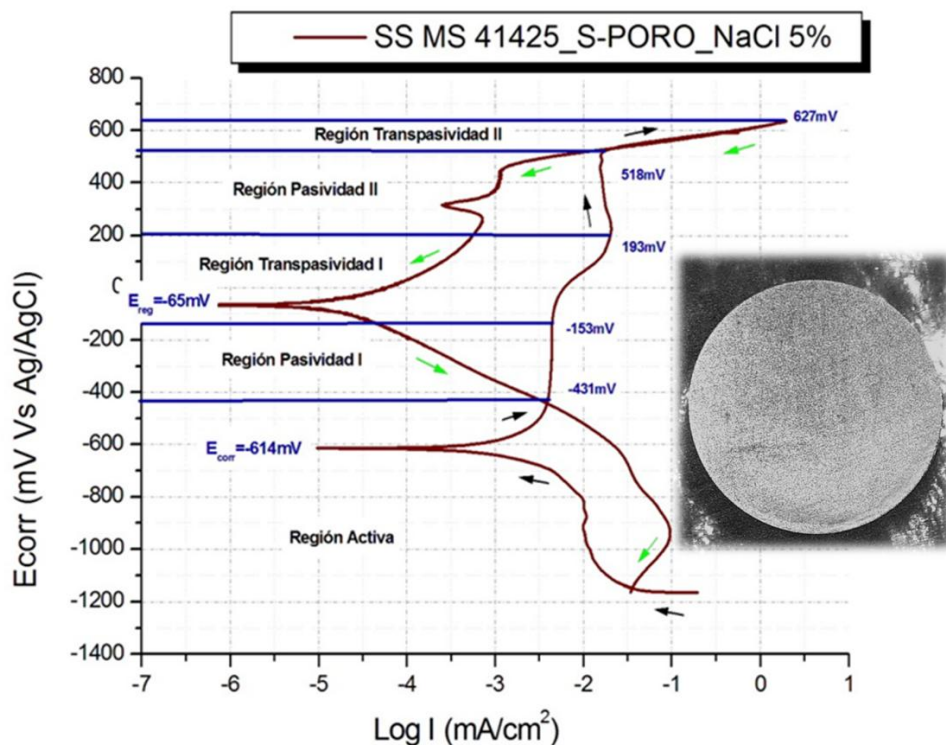


Figura 62. Acero SM UNS S41425 expuesto en la solución poro con NaCl 5%.

6.8.3 Solución salina 5% de NaCl con dos valores de pH a 6.5 y 12

Las figuras 56 a la 63, muestran el comportamiento de ambos elementos metálicos, tanto del acero al carbono AISI 1018 como el del Acero Inoxidable SM S41425, en la solución al 5% de NaCl a dos diferentes pH 6.5 y 12, se presentan resultados para cada uno de los elementos metálicos en particular, además de un comparativo del mismo elemento metálico, así como un comparativo entre los dos elementos metálicos ensayados, en el medio salino con los diferentes pH propuestos.

Ac. AISI 1018, Solución salina 5% de NaCl con pH a 6.5

La gráfica de la foto 63, nos muestra el comportamiento del acero AISI 1018 expuesto en la solución NaCl al 5% a un pH de 6.5, donde se puede observar un potencial de corrosión E_{corr} de -745mV, y una región totalmente activa desde -475mV hasta el potencial de regreso de 657mV, en un tamaño de 1132mV, sin presentar zonas de pasivación y el regreso de la curva, (histéresis) es prácticamente por donde mismo, lo cual significa muy poca o casi nula la susceptibilidad al picado., lo anterior se puede atribuir a una corrosión generalizada en la muestra.

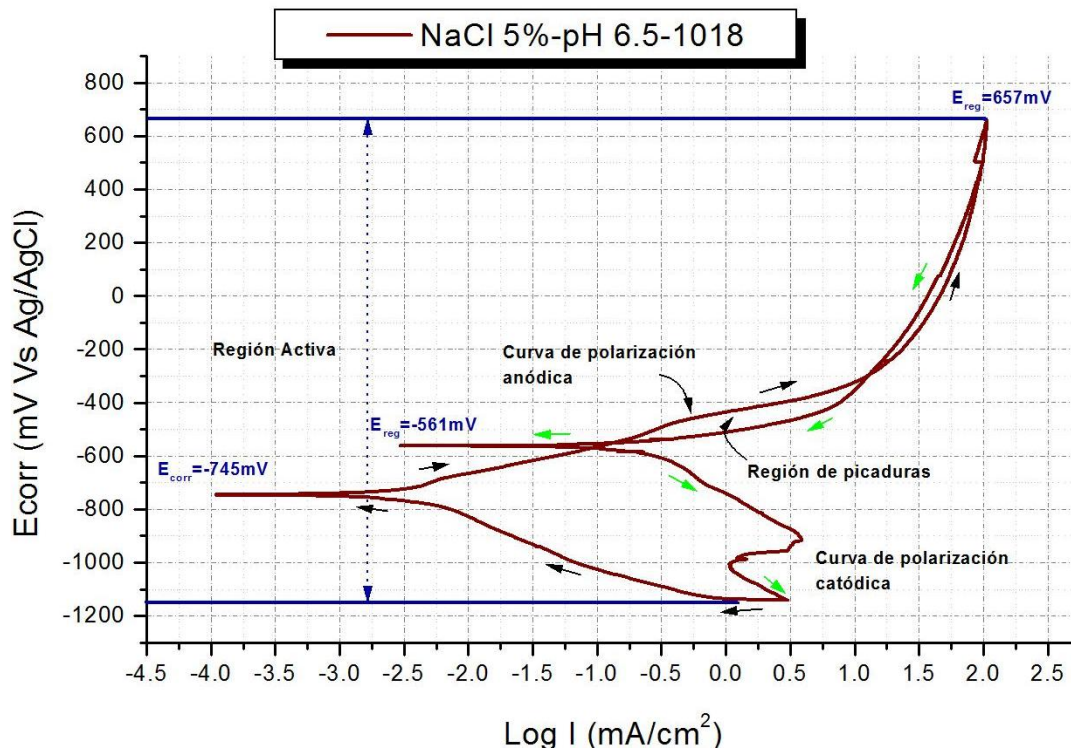


Figura 63. Acero AISI 1018 expuesto en la solución de NaCl 5% y a pH 6.5.

Ac. AISI 1018, Solución salina 5% de NaCl con pH a 12

La gráfica de la foto 64, nos muestra el comportamiento del acero AISI 1018 expuesto en la solución NaCl al 5% a un pH de 12, donde se puede observar un potencial de corrosión E_{corr} de -545mV, y una región activa desde -545 a -499mV con un tamaño de 46mV, en este caso si hay una zona de pasivación desde -499 a -322mV con un tamaño de 177mV, y el regreso de la curva, (histéresis) en un inicio es prácticamente por donde mismo, pero aproximadamente en el potencial -20mV se separa por el lado derecho, evidenciando susceptibilidad al picado. El comportamiento mostrado en estas condiciones, son bastante conocidas, debido al pH 12, el acero AISI 1018, tiende en un inicio a

formar una película de pasivación, sin embargo, la presencia de los cloruros tienden a romper la pasivación formada y originar picaduras.

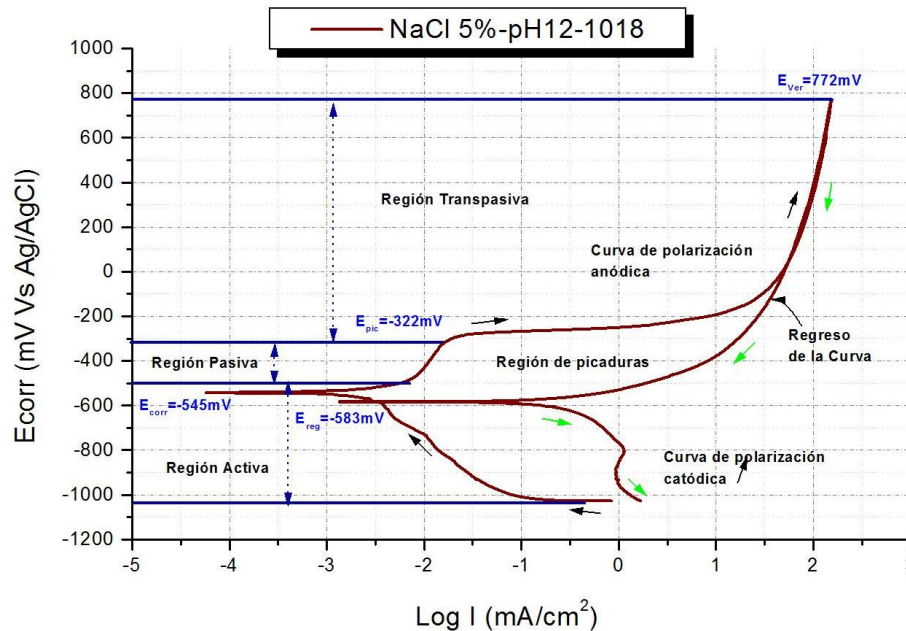


Figura 64. Acero AISI 1018 expuesto en la solución de NaCl 5% y a pH 12.

Ac. AISI 1018, Solución salina 5% de NaCl con pH de 6.5 y 12

La gráfica de la foto 65, nos muestra el comportamiento del acero AISI 1018 expuesto en la solución NaCl al 5% a los dos pH de 6.5 y 12, donde se puede observar que el potencial de corrosión E_{corr} con un pH de 6.5 es más negativo -745mV al compararlo con el pH de 12 de -345mV indicando una mayor probabilidad de corrosión para el pH de 6.5, también se puede observar que el primer caso no tenemos la formación de una zona de pasivación, únicamente la formación de una región activa, mientras que con un pH de 12 si tenemos un zona de pasividad (circulo azul), además de un ligero desplazamiento de la curva de un pH 6.5 (color negro) hacia la derecha con respecto a la curva de

pH de 12 (curva roja), lo cual denota, una mayor demanda corriente, es decir mayor oxidación.

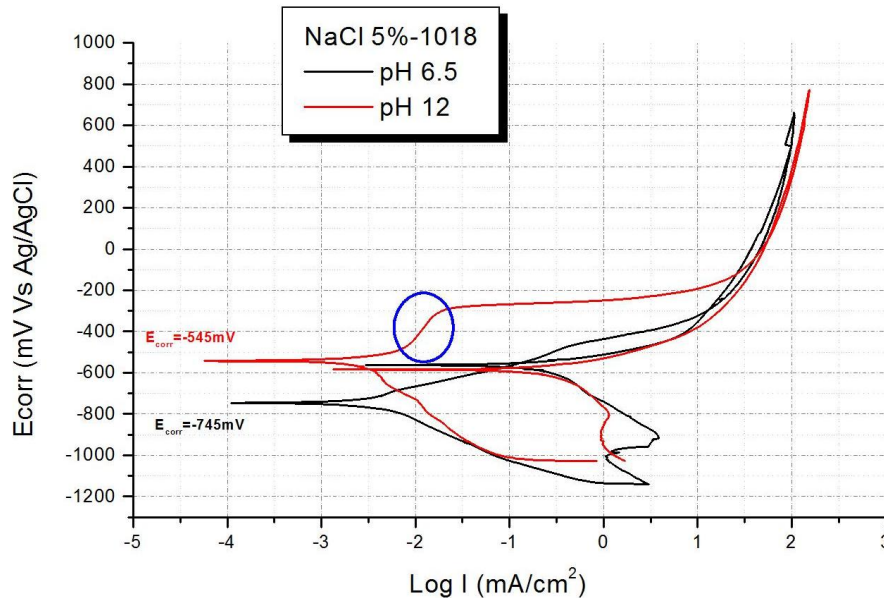


Figura 65. Acero AISI 1018 expuesto en la solución de NaCl 5% a pH de 6.5 y 12.

SM UNS S41425, Solución salina 5% de NaCl con pH a 6.5

La gráfica de la foto 66, nos muestra el comportamiento del acero SM UNS S 41425 1018 expuesto en la solución NaCl al 5% a un pH de 6.5, donde se puede observar un potencial de corrosión E_{corr} de -302mV, y una región activa desde -302 a -205mV con un tamaño de 97mV, con una zona de pasivación desde -205 a 15mV con un tamaño de 220mV, y el regreso de la curva, (histéresis) es por el lado derecho, evidenciando susceptibilidad al picado. El comportamiento mostrado en estas condiciones, aunque si se forma una región de pasividad, evidenciando la formación de una película de pasivación, el regreso de

la histéresis por el lado derecho nos indica que si es susceptible a la corrosión por picadura.

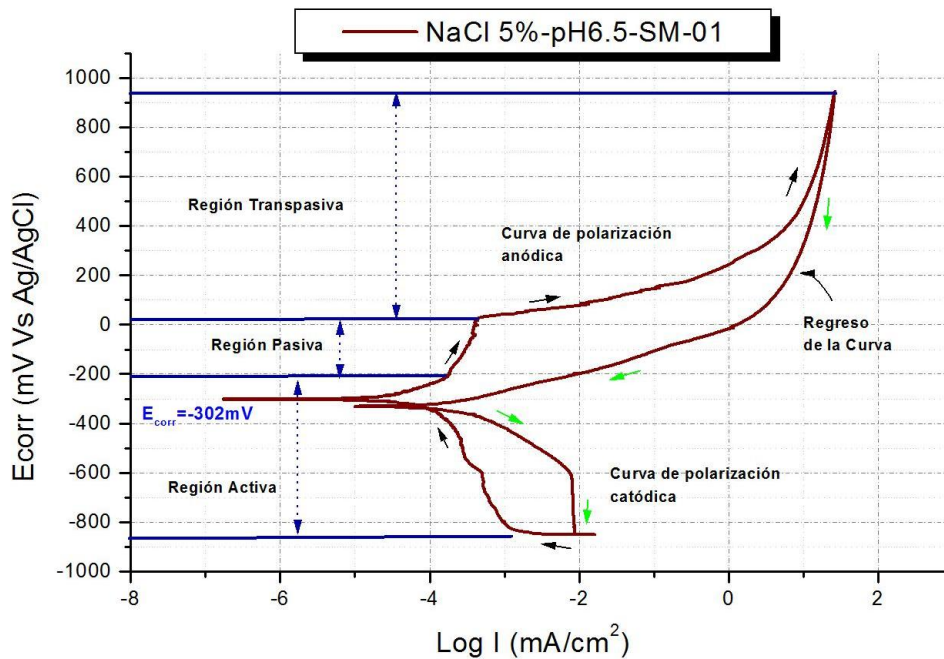


Figura 66. Acero SM UNS S41425 expuesto la solución de NaCl 5% y a pH 6.5.

SM UNS S41425, Solución salina 5% de NaCl con pH a 12

La gráfica de la foto 67, nos muestra el comportamiento del acero SM UNS S 41425 1018 expuesto en la solución NaCl al 5% a un pH de 12, donde se puede observar un potencial de corrosión E_{corr} de -347mV, y una región activa desde -347 a -205mV con un tamaño de 97mV, con una zona de pasivación desde -205 a 15mV con un tamaño de 220mV, y el regreso de la curva, (histéresis) es por el lado derecho, evidenciando susceptibilidad al picado. El comportamiento mostrado en estas condiciones, aunque si se forma una región de pasividad, evidenciando la formación de una película de pasivación, el regreso de

la histéresis por el lado derecho nos indica que si es susceptible a la corrosión por picadura.

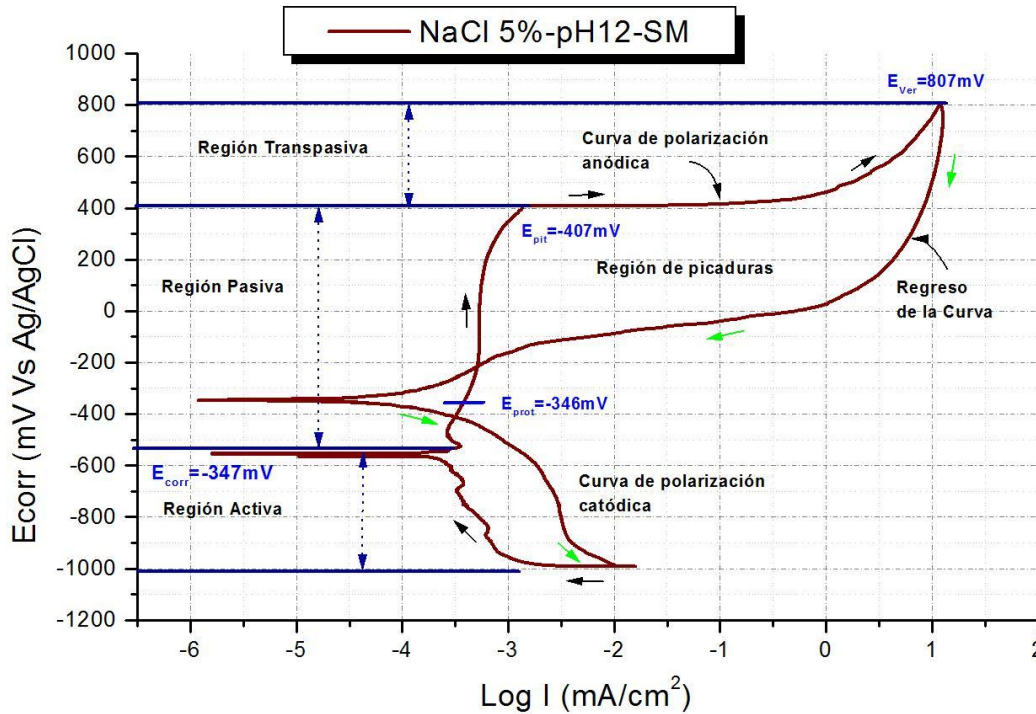


Figura 67. Acero SM UNS S41425 expuesto en la solución de NaCl 5% y a pH 12.

SM UNS S41425, Solución salina 5% de NaCl con pH 6.5 y 12

La gráfica de la foto 68, nos muestra el comportamiento del acero SM UNS S 41425 expuesto en la solución NaCl al 5% a un pH 6.5 y 12, en esta comparación, se puede apreciar graficas o tendencias muy similares, una menor región de pasivación con pH de 6.5, gráfica color negro, con respecto al pH de 12, gráfica color rojo con mayor región de pasividad, sin embargo los dos regresos de las curvas o histéresis son por el lado derecho, evidenciando en ambos casos susceptibilidad a las picaduras.

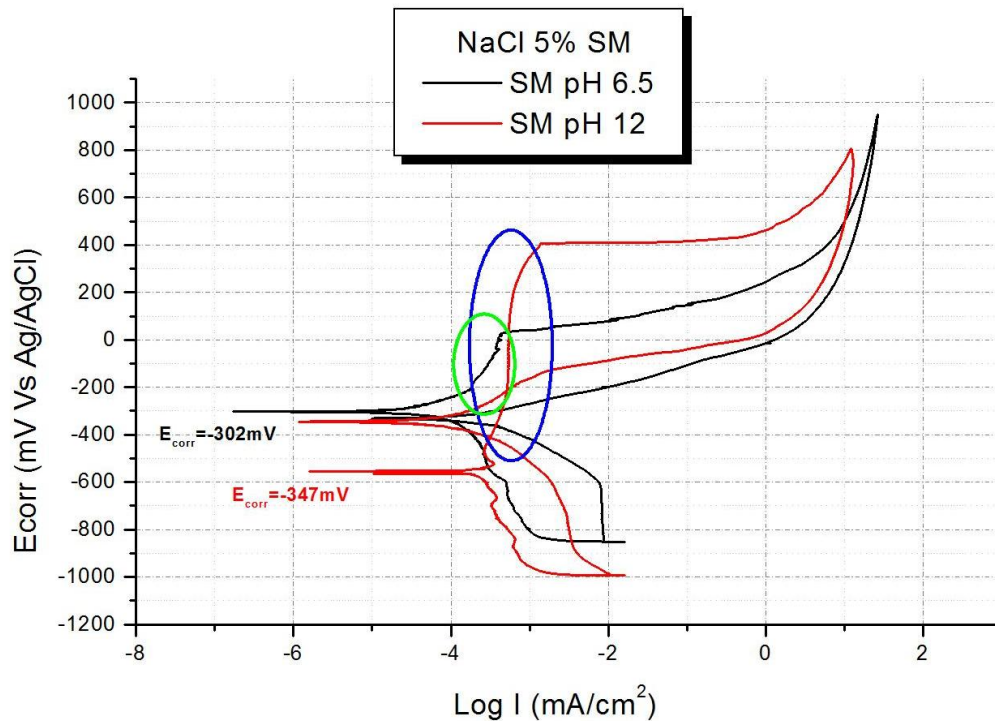


Figura 68. UNS S41425 expuesto en la solución de NaCl 5% a pH de 6.5 y 12.

SM UNS S41425 y AISI 1018, Solución salina 5% de NaCl con pH 6.5

La gráfica de la foto 69, nos muestra el comportamiento del acero SM UNS S 41425 y el AISI 1018 expuesto en la solución NaCl al 5% a un pH 6.5, en este comparación, resulta muy evidente las diferencias mostradas en cada uno de los elementos metálicos, se puede apreciar un E_{corr} de -745mV para el acero al carbono (grafica color rojo), mientras que para el supermartensítico tenemos un E_{corr} de -302mV (grafica color negro), el acero 1018, no muestra una región de pasivación, únicamente una corrosión muy intensa generalizada sin susceptibilidad a las picaduras, mientras que el supermartensítico si mostró un región de

pasivación pero el regreso de la curva para este acero fue por la parte derecha mostrando susceptibilidad al picado.

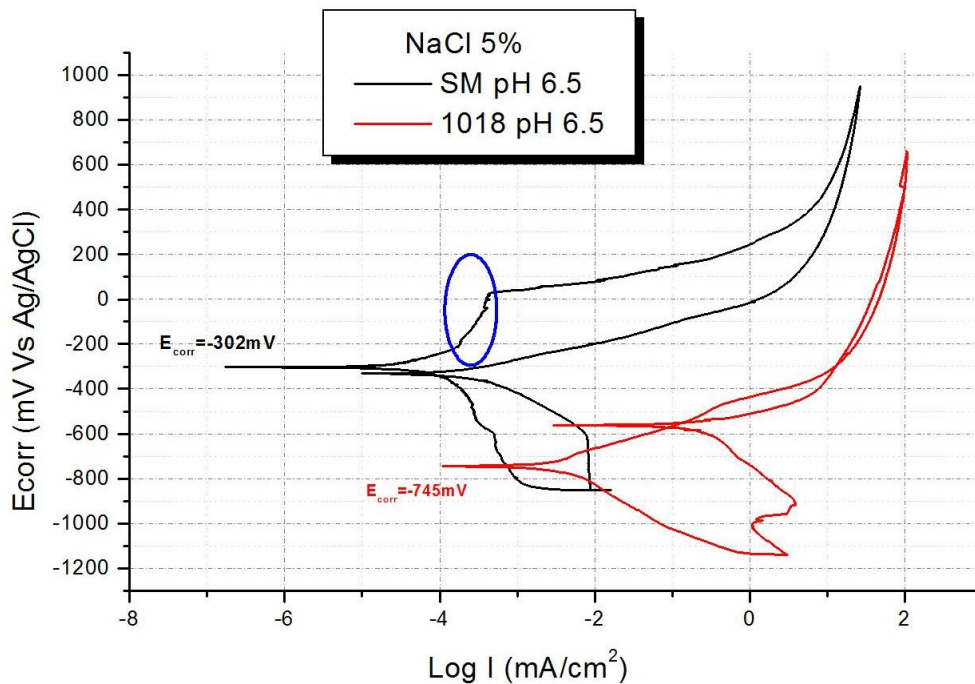


Figura 69. Ambos aceros expuestos en la solución de NaCl 5% a pH de 6.5.

SM UNS S41425 y AISI 1018, Solución salina 5% de NaCl con pH 6.5

La gráfica de la foto 70, nos muestra el comportamiento del acero SM UNS S 41425 y el AISI 1018 expuesto en la solución NaCl al 5% a un pH 12, en esta comparación, también resulta más evidente las diferencias mostradas en cada uno de los elementos metálicos, se puede apreciar un E_{corr} de -545mV para el acero al carbono (gráfica color rojo), mientras que para el supermartensítico tenemos un E_{corr} de -346mV (gráfica color negro), en este caso los dos elementos metálicos muestran una región de pasivación, de igual forma muestran el regreso de la curva por el lado derecho mostrando susceptibilidad al picado, así

mismo, un potencial más negativo como es el caso del acero AISI 1018, muestra más probabilidad de corrosión y el desplazamiento de la curva hacia la derecha, denota una intensidad de corrosión mayor y por lo tanto mayor disolución del elemento metálico.

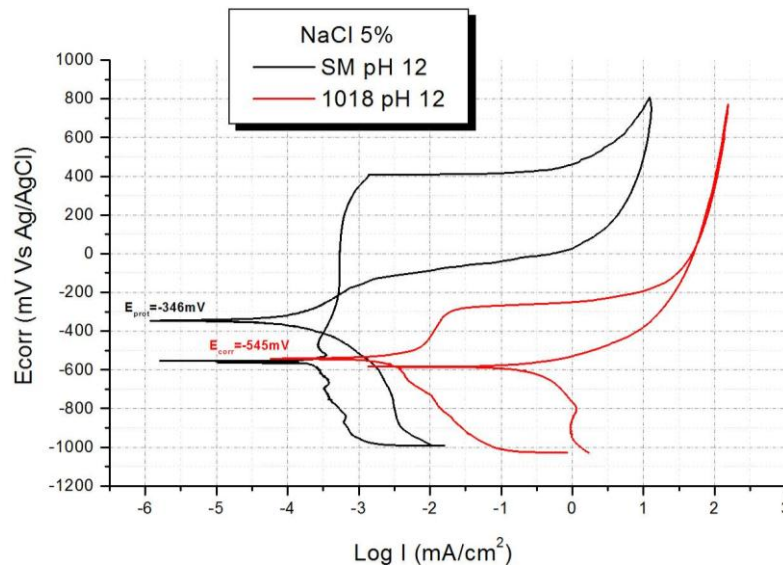


Figura 70. Ambos aceros expuestos en la solución de NaCl 5% a pH de 12.

6.9 Condiciones finales de los elementos metálicos.

A través de un registro fotográfico realizado después de rompimiento de los especímenes al finalizar el tiempo de experimentación, se muestran las fotografías de los elementos metálicos, acero al carbono AISI 1018 y el supermartesítico UNS S41425, en cada una de las relaciones agua/cemento, 0.45%, 0.55% y 0.65% expuestos en la solución salina al 5% de cloruro de sodio, en las fotos de XX a XX, se muestran cada



uno de los elementos metálicos utilizados de forma independiente y la foto 61, muestra un comparativo de ambos en las diferentes relaciones a/c utilizadas.

Para el caso de acero convencional 1018, se puede denotar una diferencia significativa en el aumento de la presencia de productos de corrosión rojo o herrumbre en correspondencia al aumento en la relación agua-cemento, mientras que para acero inoxidable supermartensítico UNS S41425, no se mostraron evidencias de productos de corrosión rojiza o herrumbre visual superficial en ninguna de las tres relaciones a/c utilizadas, concordando correctamente con los resultados de las técnicas electroquímicas obtenidas bajo las condiciones de propuestas en este estudio

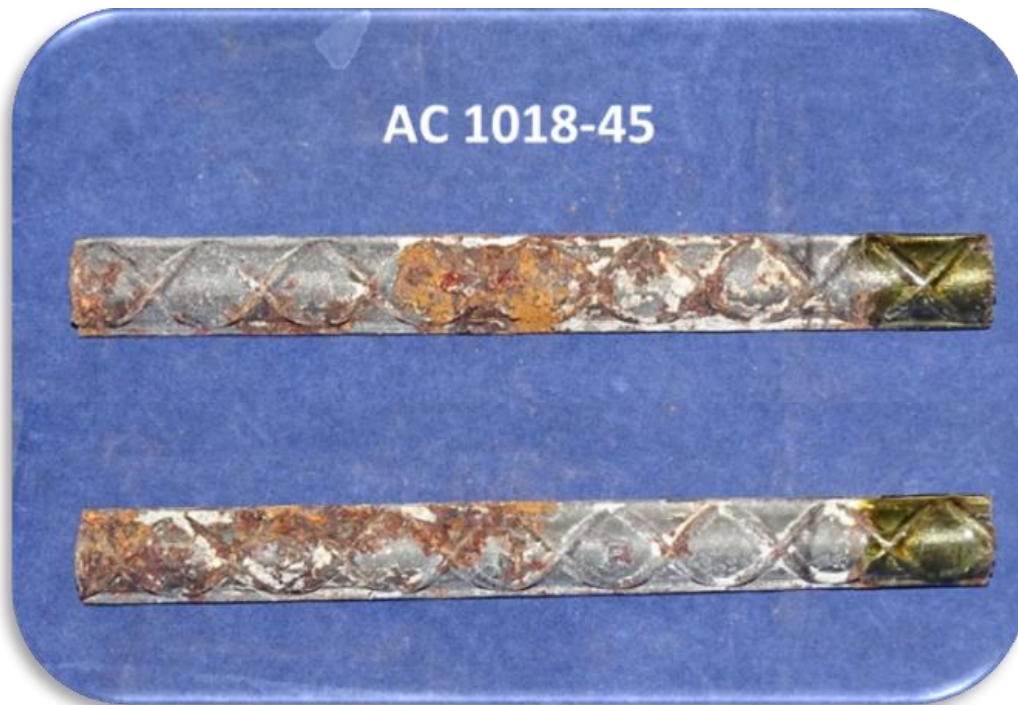


Figura 72. Condiciones finales del acero AISI 1018, relación a/c 0.45.



Figura 73. Condiciones finales del acero AISI 1018, relación a/c 0.55.



Figura 74. Condiciones finales del acero AISI 1018, relación a/c 0.65.



Figura 75. Condiciones finales del acero UNS 41425, relación a/c 0.45.



Figura 76. Condiciones finales del acero UNS 41425, relación a/c 0.55.



Figura 77. Condiciones finales del acero UNS 41425, relación a/c 0.65.



Figura 78. Comparativo de los dos elementos metálicos utilizados

6.10 Morfologías y espectros obtenidos después de la experimentación mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).

En las figuras 79 a 84, se muestran los espectros y las fotomicrografías de algunas zonas seleccionadas para su análisis respectivo para el caso de las probetas con acero al carbono AISI 1018 expuestos en la

salmuera al 5% de NaCl en las tres relaciones agua-cemento 0.45, 0.55 y 0.65, al ser extraídos de la masa del concreto al finalizar el tiempo de exposición, mediante Análisis Dispersivo de Rayos X (EDX) por Microscopía Electrónica de Barrido, (MEB).

En las figuras 79 y 80 observamos en los espectros y fotomicrografías de las probetas con relación agua-cemento 0.45 del acero AISI 1018, los contenidos de Oxígeno entre 27.5 y 33.81%wt, Cloro 7.36 y 4.8%wt y muy poco Calcio 0.45%wt en el primer sitio, con cantidades remanentes de hierro de 64.47 y 61.39%wt, las fotomicrografías muestran una morfología con productos de corrosión con daño severo.

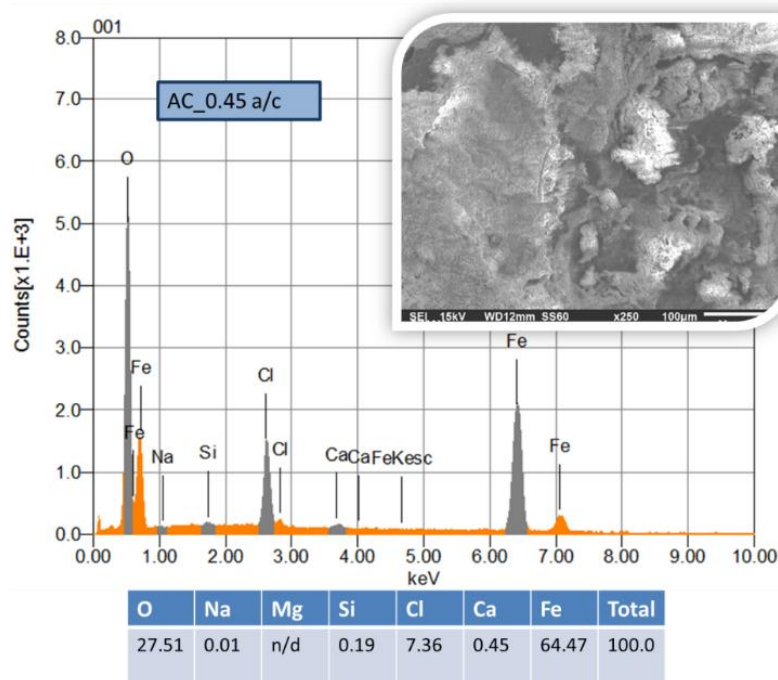


Figura 79. Espectro DRX y Morfología de superficie del AISI 1018, con a/c 0.45

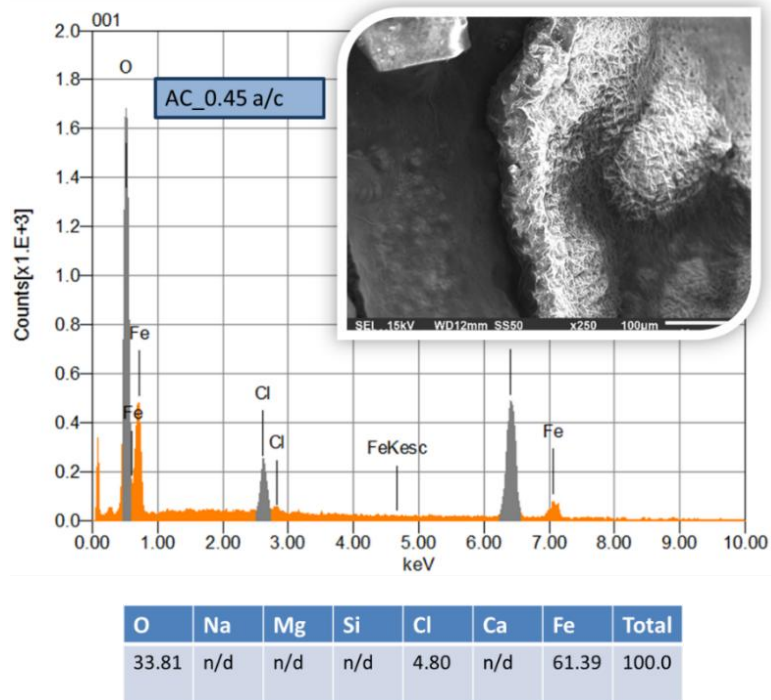


Figura 80. Espectro DRX y Morfología de superficie del AISI 1018, con a/c 0.45

En las figuras 81 y 82 observamos en los espectros y fotomicrografías de las probetas con relación agua-cemento 0.55 del acero AISI 1018, los contenidos de Oxígeno entre 31.87 y 18.01%wt, Cloro 16.62 y 15.06%wt y no se detecta Calcio, con cantidades remanentes de fierro de 51.51 y 66.93%wt, el valor de remanente de fierro detectado en el primer valor, nos está indicando una disminución de su contenido, atribuido a una mayor formación de productos de corrosión con la presencia de humedad y el cloro, las fotomicrografías muestran una morfología con productos de corrosión con bastante daño e uniforme en todo el sitio analizado para el primer caso, en el segundo caso, aunque se observan partículas aisladas, probablemente formados por Cloro, también se puede observar un intenso daño en toda el sitio.

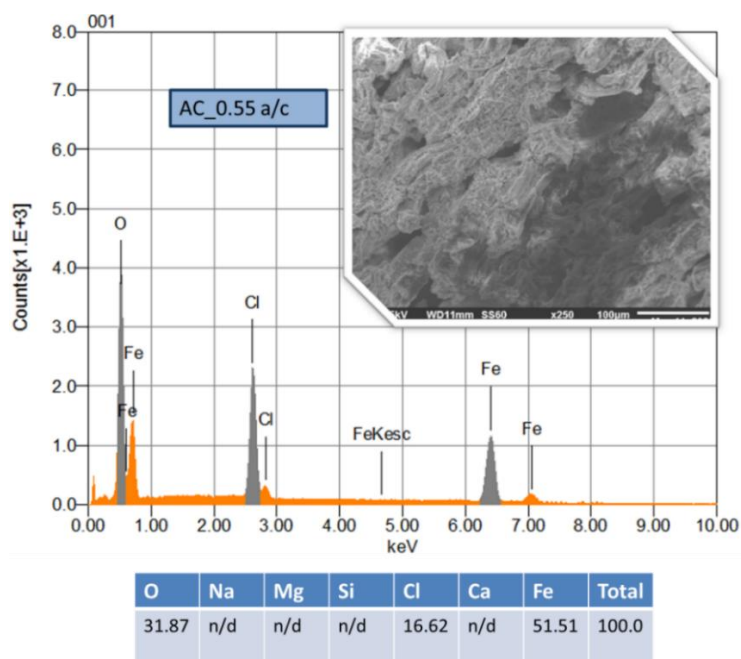


Figura 81. Espectro DRX y Morfología de superficie del AISI 1018, con a/c 0.55

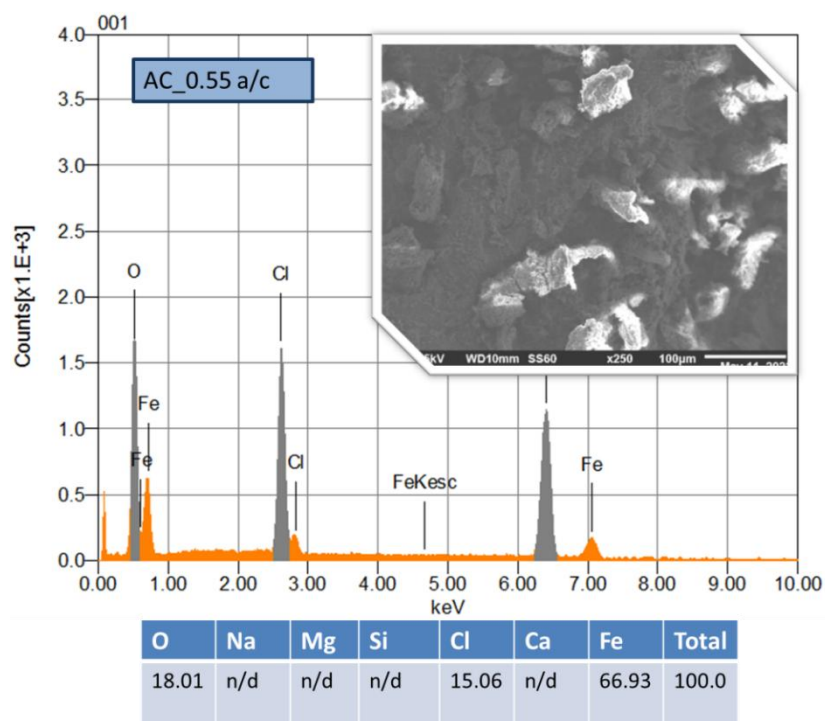


Figura 82. Espectro DRX y Morfología de superficie del AISI 1018, con a/c 0.55

En las figuras 83 y 84 observamos en los espectros y fotomicrografías de las probetas con relación agua-cemento 0.65 del acero AISI 1018, los contenidos de Oxígeno entre 36.76 y 30.70%wt, Cloro 15.06 y 2.35%wt y se detecta Calcio en el segundo sitio 7.52%wt, con cantidades remanentes de hierro de 48.48 y 55.82%wt, los valores de remanente de hierro detectados principalmente en el primer valor, nos está indicando una disminución de su contenido, atribuido a una mayor formación de productos de corrosión con la presencia de humedad y el cloro, las fotomicrografías muestran una morfología con productos de corrosión con intenso daño severo e uniforme en los dos sitios analizados, lo anterior, se debe al aumento en la humedad, debido a la relación agua-cemento de 0.65 utilizada.

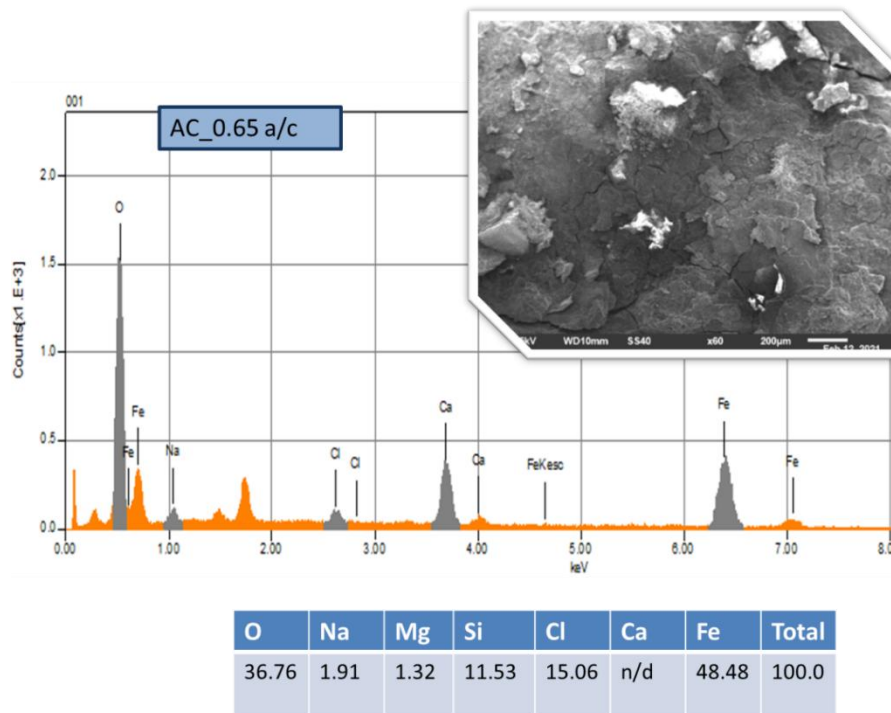


Figura 83. Espectro DRX y Morfología de superficie del AISI 1018, con a/c 0.65

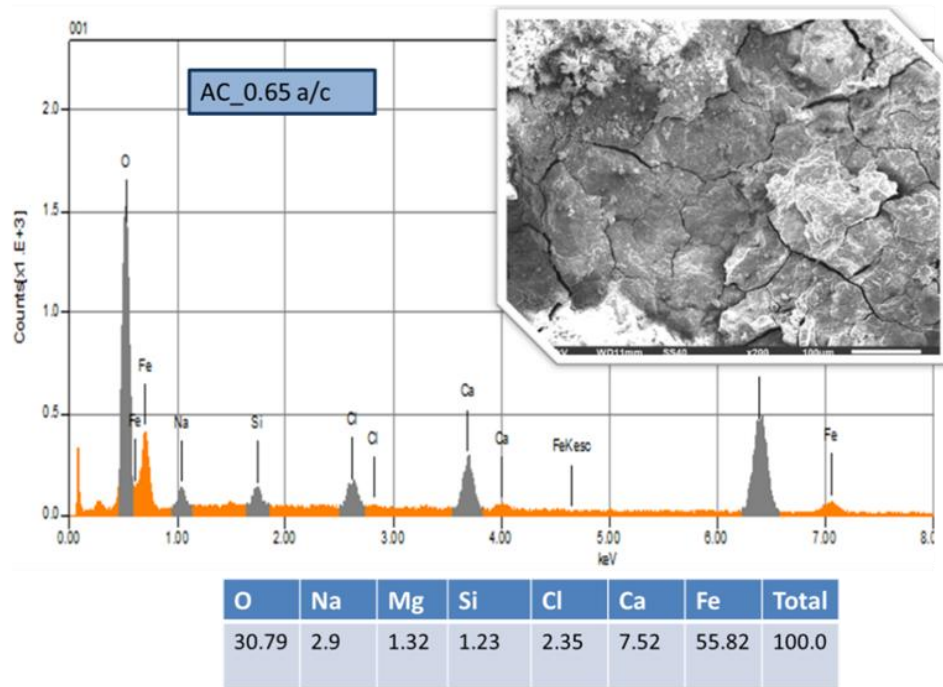


Figura 84. Espectro DRX y Morfología de superficie del AISI 1018, con a/c 0.65.

En la figura 85 se muestra el espectro y fotomicrografía de la probeta con relación agua-cemento 0.45 del acero SM UNS S41425, se presenta un análisis general, en donde se detectan contenidos de Oxígeno 9.04wt, Cloro 0.75wt, Calcio 5.38wt y Fierro 61.36%wt, además de la presencia de elementos constituyentes de la aleación, principalmente Cromo Níquel y Molibdeno, en donde se puede observar en la micrografía, que no tenemos productos de corrosión o herrumbre, prácticamente una oxidación debida a la presencia del Oxígeno, Cromo y Níquel, debido a la formación de pasividad en la superficie del elemento metálico.

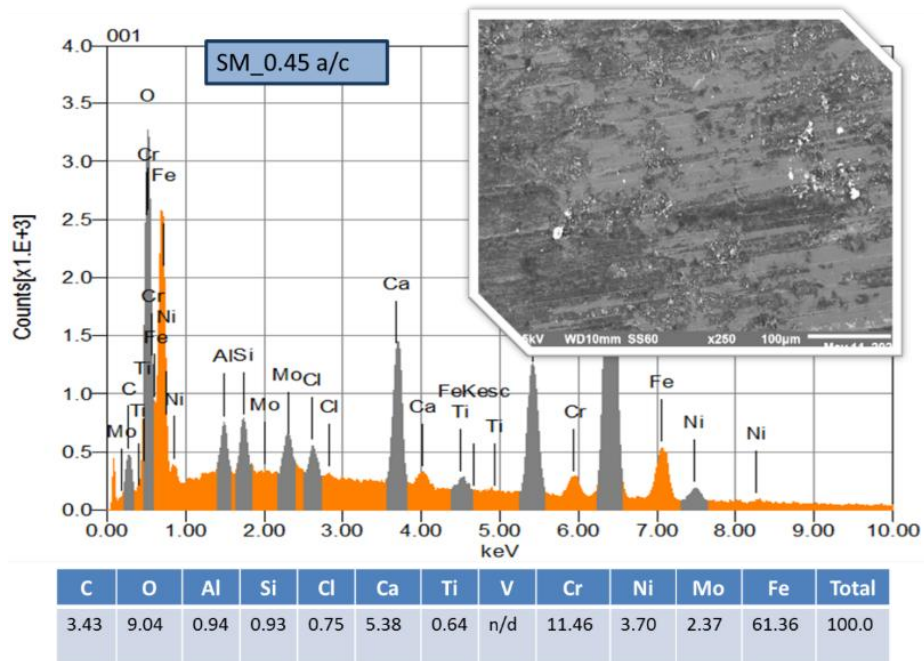


Figura 85. Espectro DRX y Morfología de superficie del UNS S41425, con a/c 0.45.

En las figuras 86 a 88 se muestran los espectros y fotomicrografías de las probetas con relación agua-cemento 0.45 del acero SM UNS S41425, en análisis localizados en tres sitios, para poder determinar con más precisión que elementos presentes se tienen en estos sitios, para el caso de la figura 86, se tienen los datos del espectro 001, círculo rojo en un área gris-oscuro, donde no se aprecian productos de corrosión, se detectaron los contenidos de Oxígeno 5.73%wt, Cloro 0.59%wt, Calcio 2.59%wt y Hierro 68.38%wt, además de la presencia de elementos Constituyentes de la aleación, principalmente Cromo 12.48%wt y Níquel 4.56, los valores observados son muy similares a los de la composición de la superaleación, pero debido a la presencia del oxígeno y calcio, existe una zona de pasivación, la cual,

es verificada mediante el comportamiento electroquímico, por lo que se puede asegurar que contamos con una película de pasivación en su morfología.

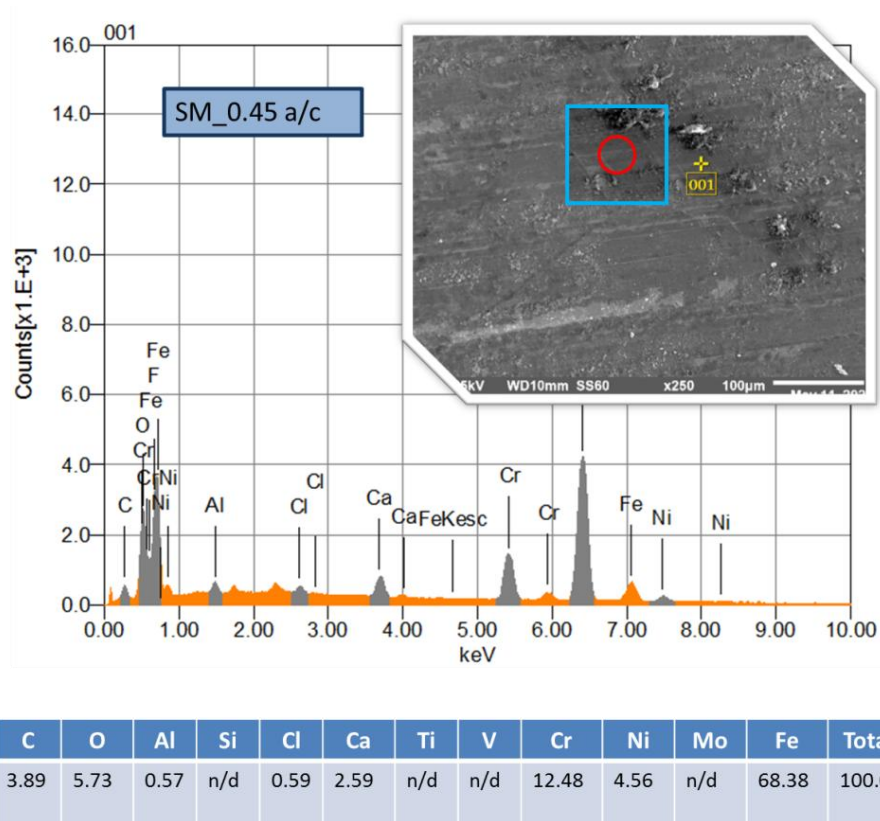


Figura 86. Espectro DRX y Morfología de superficie del UNS S41425, con a/c 0.45.

La figura 87, se tienen los datos del espectro 002, círculo rojo en un área de una partícula, donde se detectaron únicamente los contenidos de Carbono 51.83%wt Oxígeno 29.5%wt, principalmente, es una partícula formada por Oxígeno y Carbono.

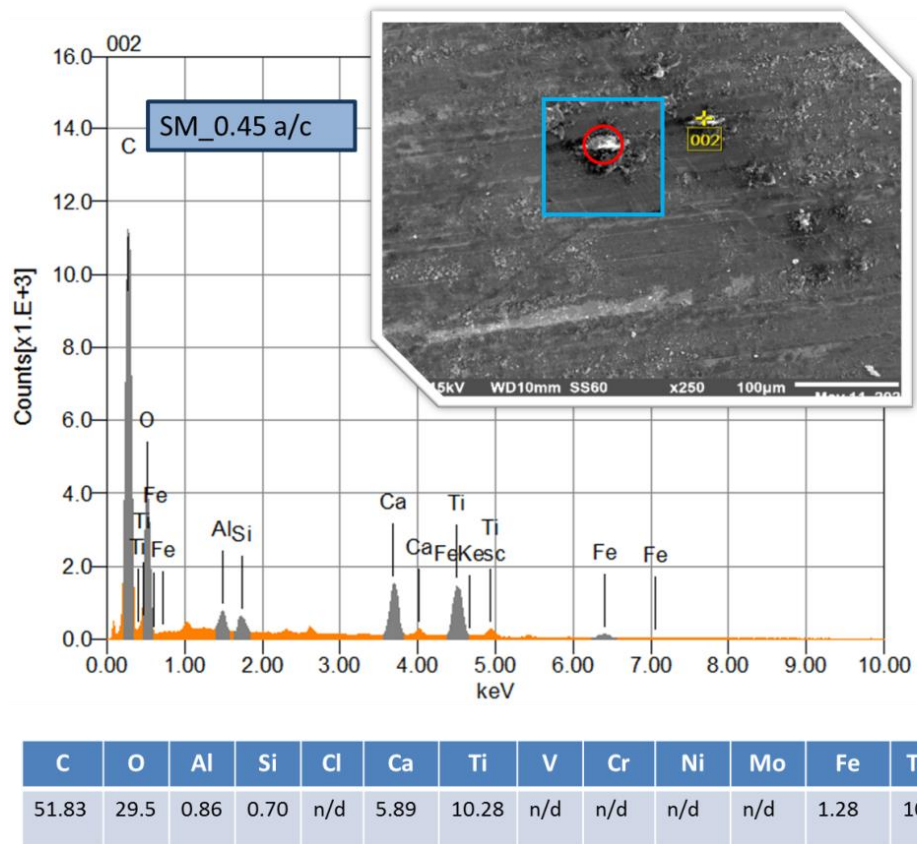


Figura 87. Espectro DRX y Morfología de superficie del UNS S41425, con a/c 0.45.

La figura 88, se tienen los datos del espectro 001, círculo rojo en un área semigris, donde no se aprecian productos de corrosión, se detectaron los contenidos de Oxígeno 1.51%wt y Cloro 0.01%wt, y Hierro 76.33%wt, además de la presencia de elementos Constituyentes de la aleación, principalmente Cromo 13.82wt y Níquel 5.02, los valores estos valores cos confirman una zona sin problemas de corrosión, debido a que prácticamente son la composición química de SM UNS S41425.

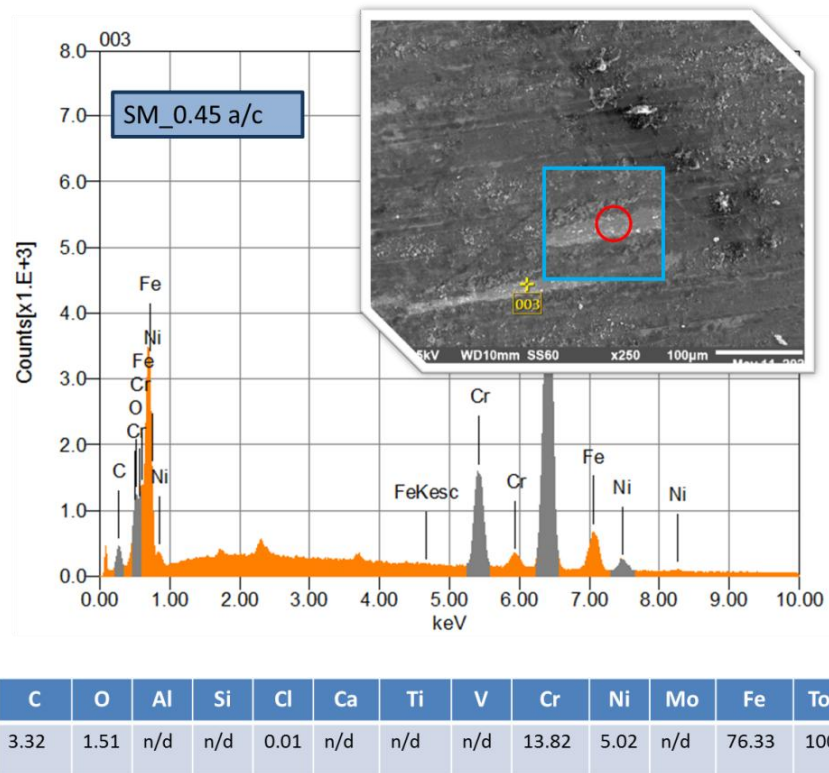


Figura 88. Espectro DRX y Morfología de superficie del UNS S41425, con a/c 0.45.

En la figura 89 se muestra el espectro y fotomicrografía de la probeta con relación agua-cemento 0.55 del acero SM UNS S41425, se presenta un análisis general, en donde se detectan contenidos de Oxígeno 8.78wt, Cloro 0.84wt, Calcio 5.16wt y Hierro 64.02%wt, además de la presencia de elementos constituyentes de la aleación, principalmente Cromo 12.2wt y Níquel 3.82%wt, en donde se puede observar en la micrografía, que no tenemos productos de corrosión o herrumbre, prácticamente una oxidación debida a la presencia del Oxígeno, Cromo y Níquel, debido a la formación de pasividad en la superficie del elemento metálico.

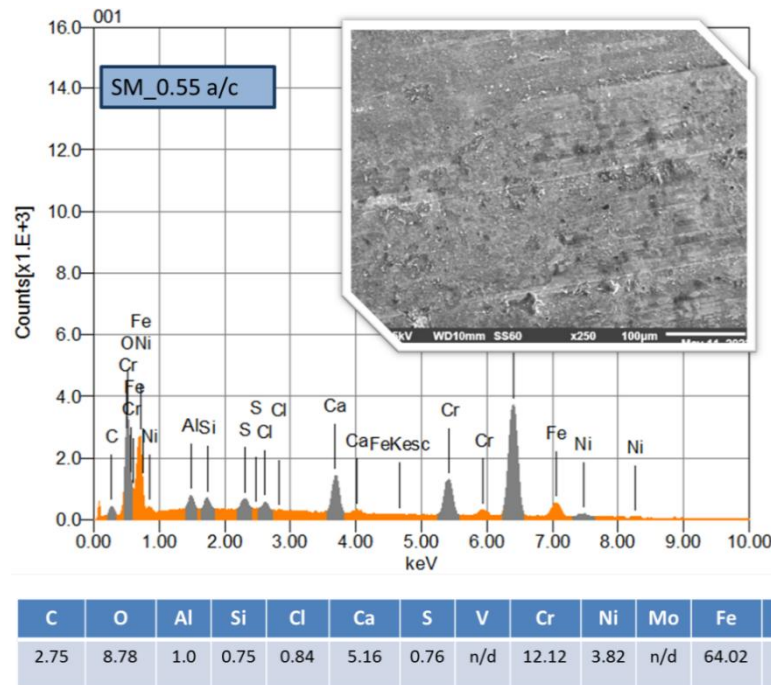


Figura 89. Espectro DRX y Morfología de superficie del UNS S41425, con a/c 0.55.

En las figuras 90 a 93 se muestran los espectros y fotomicrografías de las probetas con relación agua-cemento 0.55 del acero SM UNS S41425, en análisis localizados en tres sitios, para poder determinar con más precisión que elementos presentes se tienen en estos sitios, para el caso de la figura 90, se tienen los datos del espectro 001, círculo rojo partícula, donde no se aprecian productos de corrosión, se detectaron los contenidos de Oxígeno 3.89%wt, Calcio 2.21%wt y Hierro 74.0%wt, además de la presencia de elementos Constituyentes de la aleación, principalmente Cromo 13.69%wt y Níquel 4.17, los valores observados son muy similares a los de la composición de la superaleación, pero

debido a la presencia del oxígeno y calcio, esta partícula forma esta formada por una pequeña oxidación de calcio.

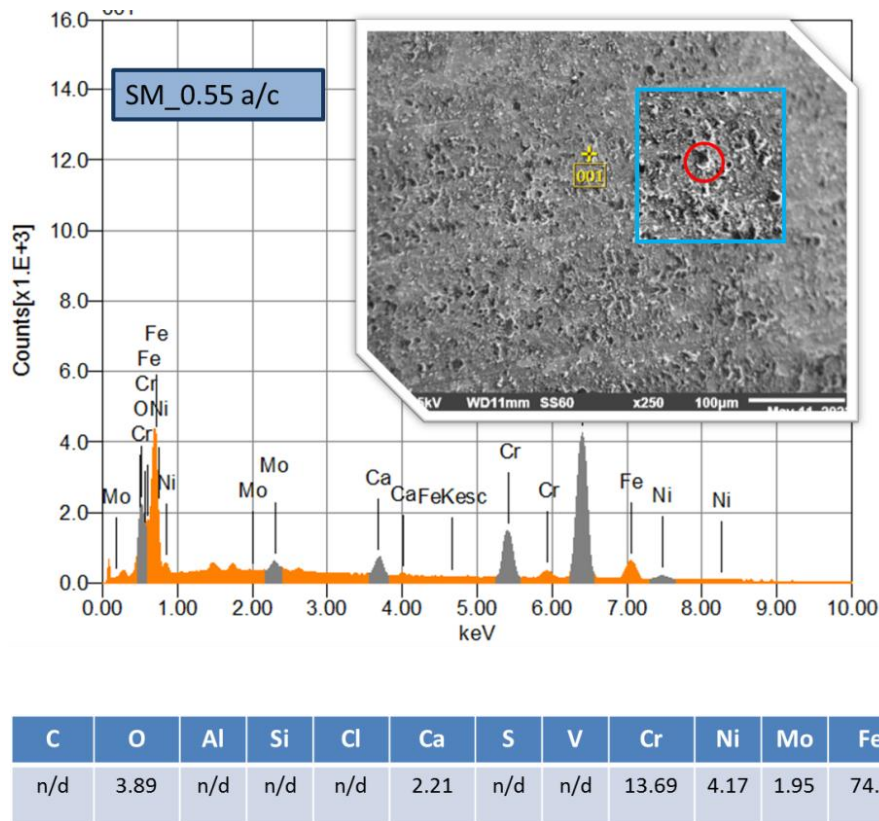


Figura 90. Espectro DRX y Morfología de superficie del UNS S41425, con a/c 0.55.

La figura 91, se tienen los datos del espectro 002, círculo rojo en otra partícula, donde no se aprecian productos de corrosión, se detectaron los contenidos de Oxígeno 37.08%wt, Aluminio 7.08%wt, Cloro 4.17%wt, Calcio 21.34%wt y Fierro 24.95%wt, y únicamente se detecta Cromo 5.38%wt esta partícula está formada por óxidos de aluminio y calcio y la presencia de Cloro.

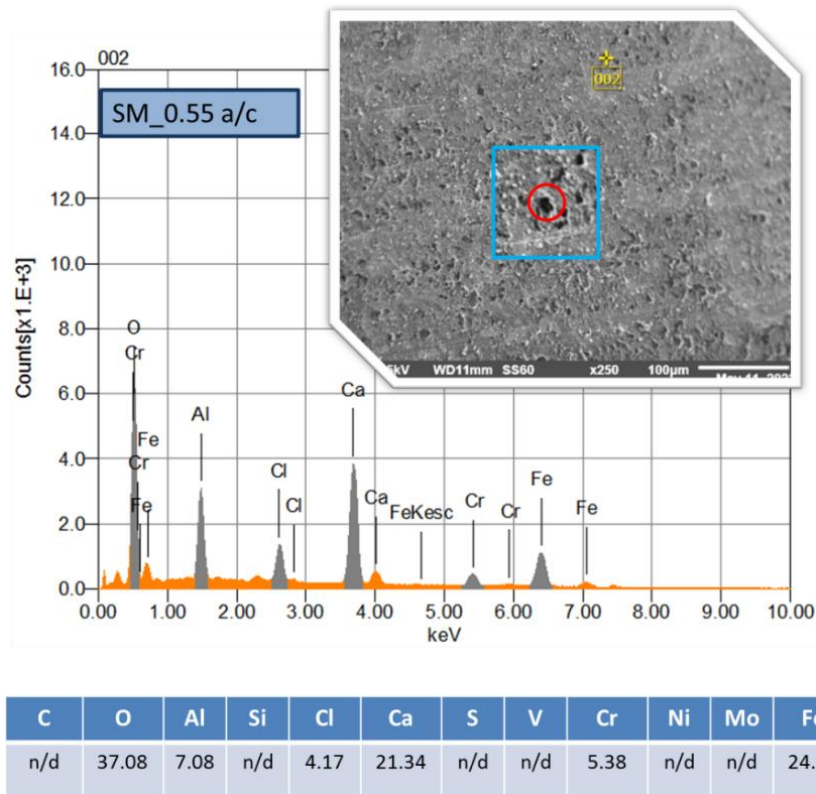


Figura 91. Espectro DRX y Morfología de superficie del UNS S41425, con a/c 0.55.

La figura 92, se tienen los datos del espectro 002, círculo rojo en zona gris, donde nuevamente no se aprecian productos de corrosión, se detectaron los contenidos de Oxígeno 4.76%wt, Calcio 2.77%wt y Hierro 70.18%wt, además se detectan los elementos de aleación Cromo 12.58%wt, Níquel 4.60%wt y Molibdeno 1.73%wt. Evidenciando que esta zona está compuesta prácticamente por la composición del SM UNS S41425, y una pequeña oxidación, atribuida a la formación de la película de pasivación.

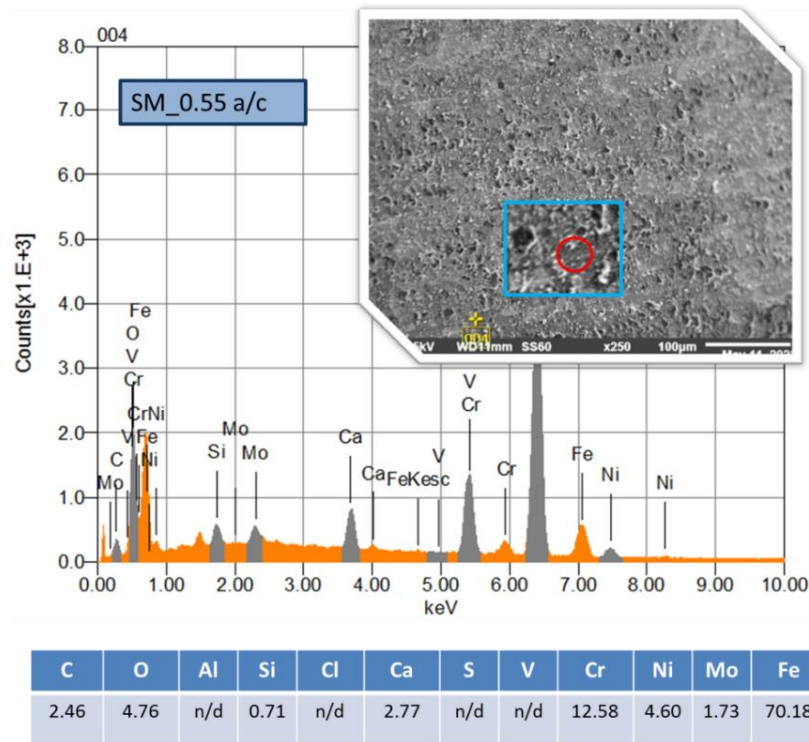


Figura 92. Espectro DRX y Morfología de superficie del UNS S41425, con a/c 0.55.

En la figura 94 se muestra el espectro y fotomicrografía de la probeta con relación agua-cemento 0.65 del acero SM UNS S41425, se presenta un análisis general, en donde se detectan contenidos de Oxígeno 19.44wt, Cloro 2.41wt, Calcio 13.24wt y Fierro 51.77%wt, además de la presencia de elementos constituyentes de la aleación, principalmente Cromo 10.15wt y Níquel 3.18%wt, en donde se puede observar en la micrografía, que no tenemos productos de corrosión o herrumbre, prácticamente una oxidación debida a la presencia del Oxígeno, Cromo y Níquel, en un poco de mayor intensidad debido a la relación agua-cemento de 0.65, originando la formación de pasividad en la superficie del elemento metálico hasta finalizar la experimentación.

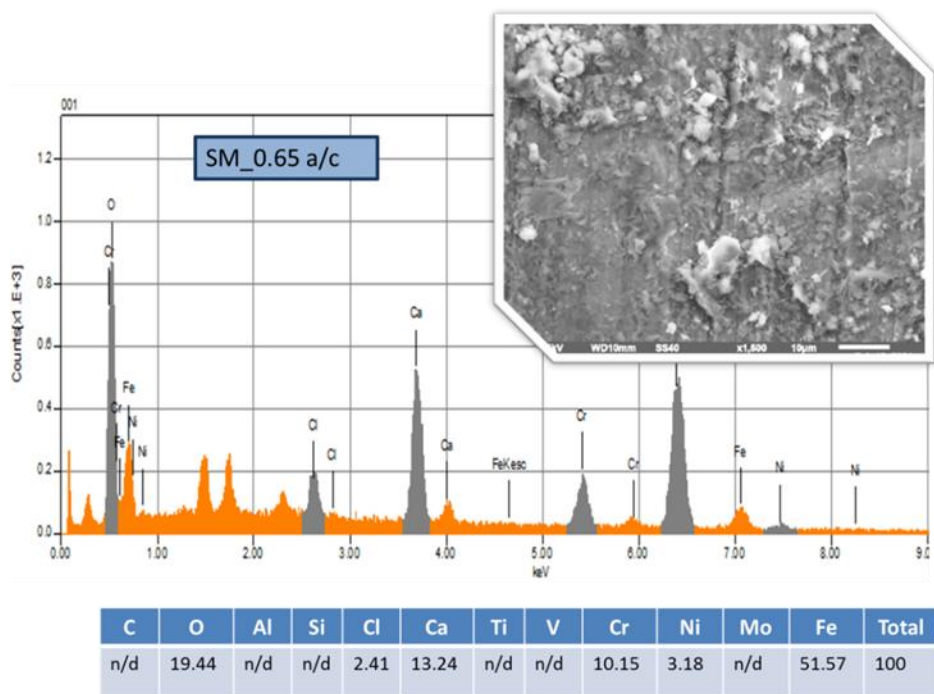


Figura 93. Espectro DRX y Morfología de superficie del UNS S41425, con a/c 0.65.

CAPITULO VII.

CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

De acuerdo con la caracterización metalúrgica desarrollada, composición química, propiedades mecánicas, dureza y su microestructura, se corroboró y verificó que la superaleación utilizada, efectivamente corresponde a un acero inoxidable supermartensítico UNS S41425.

A través de los resultados del análisis de las propiedades mecánicas del acero inoxidable supermartensítico UNS S 41425 desarrollados dentro de la experimentación, se determinó que el acero supermartensítico, presenta mejores propiedades mecánicas que los aceros estructurales grado 60 y 80.

En los niveles del potencial de corrosión mostrados en ambos elementos metálicos, el acero AISI 1018 mostró una mayor probabilidad termodinámica de sufrir corrosión, con una mayor tendencia a la corrosión con el incremento de la relación agua-cemento, mientras que el acero inoxidable supermartensítico UNS S41425, mostro un potencial casi constante entre las interfases de un 10% de corrosión e incertidumbre de la corrosión, en las tres relaciones agua-cemento, de acuerdo a la norma ASTM ASTM C876 – 22^a.



El acero inoxidable supermartensítico UNS S4125, presentó una cinética de corrosión de dos a tres órdenes de magnitud menor que la mostrada por el acero AISI 1018, en las probetas utilizando las tres relaciones agua cemento de 0.45, 0.55 y 0.65, en la solución de Cloruro de Sodio al 5%, en condiciones de laboratorio.

El acero inoxidable supermartensítico UNS S41425, mostró un comportamiento muy bien definido de los estados activo-pasivo-transpasivo, indicando su capacidad fisicoquímica de la formación de una película de pasivación en su superficie, mostrando considerablemente su resistencia a la corrosión superior al mostrado por el acero AISI 1018, en la solución salina conteniendo un 5% de cloruro de sodio.

Los elementos analizados en cada uno de los elementos metálicos, mediante Difracción de Rayos X, EDX, por Microscopia Electrónica de Barrido, MEB, se identificaron los productos de oxidación y corrosión, el acero al carbono AISI 1018, en sus tres relación agua-cemento 0.45, 0.55 y 0,65 mostró la presencia de herrumbre, la cual se ve incrementada conforme aumenta el contenido de humedad, por otro lado, el acero inoxidable SM UNS S41425, se identificaron óxidos, los cuales son atribuidos a la formación de la película de pasivación que este elemento metálico forma debido a sus elementos de aleación, principalmente por el Cromo y Níquel, estos resultados corresponden a las probetas acero-concreto embebidas en la solución de NaCl al 5%.



Con los resultados obtenidos en todas las técnicas metodológicas experimentales llevada a cabo, se puede atribuir un mejor comportamiento de resistencia a la corrosión del acero inoxidable supermartensítico UNS S41425 al ser comparado con el acero AISI 1018, de tal forma que se puede concluir que este elemento metálico puede ser un excelente candidato de sustitución en el sistema acero-concreto.



Recomendaciones para trabajos posteriores:

- Analizar la influencia de tratamientos térmicos de revenido en la corrosión y propiedades mecánicas del acero inoxidable supermartensítico.
- Tomando como base el acero inoxidable supermartensítico actual, modificar su composición adicionando un poco más de Cr y Mo para estudiar su respuesta electroquímica.
- Evaluar el efecto de soluciones poro a base de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ como blanco, y contaminadas con diferentes concentraciones de cloruros.
- Utilizar la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) para conocer de manera más objetiva, el mecanismo de corrosión en la varilla de refuerzo de acero inoxidable supermartensítico.
- Analizar mediante técnicas avanzadas de análisis superficial como Espectroscopia de Electrones Auger (AES) y Espectroscopia Fotoelectrónica de Rayos X (XPS), la composición química de la película de óxido del acero inoxidable antes y después de exposición a un electrolito corrosivo.



Referencias Bibliográficas

- [1]. [Maria Graciela Fratelli, Diseño estructural armado, pag. 9, 1998.]
- [2]. [B. Elsener / Corrosion Science 47 (2005) 3019–3033.]
- [3]. [L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, R. Polder, Corrosion of Steel in Concrete- Prevention, Diagnosis, Repair, Wiley VCH, 2004.]
- [4]. [Carlos Alberto H. C., 2004. “Aplicación de la técnica de espectroscopia de impedancia en el estudio del comportamiento electroquímico del sistema acero-concreto bajo inmersión parcial aireada”. Tesis. Bucaramanga Co. Universidad Industrial de Santander. 22 p.]
- [5]. [F. Presuel-Moreno; J.R. Scully; S.R. Sharp. 2010. Literature Review of Commercially Available Alloys That Have Potential as Low-Cost, Corrosion-Resistant Concrete Reinforcement. Corrosion 66(8):1-13.]
- [6]. [M.A.Islam, B.P. Bergsma, C.M. Hansson. 2013. Chloride-Induced Corrosion Behavior of Stainless Steel and Carbon Steel Reinforcing Bars in Sound and Cracked Concrete, CORROSION ENGINEERING SECTION, CORROSION. 69(3). NACE International.]
- [7]. [Frost, A. (2005). ‘The material world’, New Civil Engineer, Concrete Engineering Supplement, p 24.]
- [8]. [Transportation Research Board (1991). Highway Deicing: Comparing Salt and Calcium Magnesium Acetate, Special Report 235, National Research Council, Washington, DC.]



- [9]. [Koch, G.H., Brogers, P.H., Thompson, N., Virmani, Y.P. and Payer, J.H. (2002). Corrosion Cost and Preventive Strategies in the United States, FHWA Report; FHWA-RD-01-156, Federal Highway Administration, Washington, DC.]
- [10]. [Wallbank, E.J. (1989). The Performance of Concrete in Bridges: A Survey of 200 Highway Bridges, HMSO, London.]
- [11]. [Rasheeduzzafar, H.S., Dakhil, F.H., Bader, M.A. and Khan, M.N. (1992). 'Performance of corrosion resisting steel in chloride-bearing concrete', ACI Materials Journal, 89(5): 439-448.]
- [12]. [Simon, P. (2004). Improved Current Distribution due to a Unique Anode Mesh Placement in a Steel Reinforced Concrete Parking Garage Slab CP System. NACE Corrosion 2004. Paper No. 04345.]
- [13]. [Corrosion of Steel in Concrete 2nd Edition, John P. Broomfield Second edition published 2007 by Taylor & Francis 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon OX14 4RN.]
- [14]. [Carlos Alberto. H. C. Op. cit.]
- [15]. [David De León, Juan Carlos Honorato, TIEMPO ESTIMADO PARA MANTENIMIENTO DE UN PUENTE DE CONCRETO REFORZADO EXPUESTO A CORROSIÓN EN EL VALLE DE TOLUCA APLICANDO CRITERIOS PROBABILISTAS, Concreto y Cemento, Investigación y Desarrollo, Vol 6 Num 2, pp 80-96, Enero-Julio 2015.]
- [16]. [Corrosion of Steel in Concrete, Understanding, investigation and repair, John P. Broomfield, 2nd Edition.]
- [17]. [<https://jaur.com.mx/producto/concreto/>]



- [18]. [Hansson, Carolyn M. Concrete: The advanced Industrial Material of The 21st Century. Metallurgical and materials Transactions A. Vol. 26 A. 1995.]
- [19]. [Kosmatka, S. H. y Panarese W.C. Diseño y Control de Mezclas de Concreto. IMCYC. ISBN 968-464-074-9. México. 1992.]
- [20]. [Kosmatka, S. H. y Panarese W.C. Diseño y Control de Mezclas de Concreto. IMCYC. ISBN 968-464-074-9. México. 1992.]
- [21]. [IEEE/ASTM SI 10 Rules for Conversion and Rounding]
- [22]. [Broomfield J. P. Op. cit.]
- [23]. [Simon, P. Op. cit.]
- [24]. [Gummow, R.A., Wakelin, R.G. and Segall, S.M. (1998). AC Corrosion – A New Challenge to Pipeline Integrity. NACE Corrosion 98. Paper No. 566.]
- [25]. [J.A. GONZALEZ FERNANDEZ, “teoría y Práctica de la Lucha Contra la Corrosión”. Madrid 1984. Pag. 183.]
- [26]. [O’Reilly, V.A.:” La durabilidad del concreto. La relación con la compacidad y la Porosidad de Este”. Editorial Micons. Cuba. 1994.]
- [27]. [Biczok, I.: “La Corrosión del Concreto y su Protección”. Editorial URMO. Bilbao, España. 1981.]
- [28]. [O. Trónconis. “Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado”. Manual Durar, Red temática del CYTED ISBN 980-296-541-3 (1977).
- [29]. Idem, Pág. 30.



[30]. [Andrade, C. Y otros.: “Manual de Inspección de Obras Dañadas por Corrosión de Armaduras”. Madrid España. 1987.]

[31]. [Tronconis O. Op cit.].

[32]. [Tronconis O. Op cit.].

[33]. [Grover, G.J., Vennesland, o: “Electrical Resistivity of Concrete and the Oceans”. 9th. Annual off-shore Technology Conference Houston, USA. 1997, pp. 581.]

[34]. [López, W., González, J.A., Andrade, C. “Influence of Temperature on the Service Life of Rebar”. Cement and Concrete Research. Vol. 23. 1993. Pp 1130-1140.]

[35]. [Galvele, J.R.: “A Stress Corrosion Cracking Mechanism based on Surface Mobility”. Corrosion Science. Vol. 27 No. 1. pp. 1-33.]

[36]. [Taylor H.F.W. (1978) La química de los cementos, Tomo 1, Ediciones Urmo, Bilbao.].

[37]. [John P. Broomfield. 2006 “Corrosion of Steel in Concrete, Understanding, investigation and repair”. London and New York: Taylor & Francis. 277 p.]

[38]. [R. Winston Revie and Herbert H. Uhlig. “CORROSION AND CORROSION CONTROL An Introduction to Corrosion Science and Engineering”. USA: A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, © 2008. 490p.]



- [39]. [Bamforth. P.B.: “Factors Influencing Chloride Ingress into Marine Structures”. Paper presented at Economic and Durable Construction Through Excellence. Dundee, 1993].
- [40]. [Gani M (1997) Cement and concrete, Chapman and Hall, Londres.].
- [41]. [Duffó G.S., Farina S.B. (2016) La corrosión de estructuras de hormigón armado. Principios básicos, monitoreo y prevención. Editorial. Académica Española, Berlín.].
- [42]. [CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGIA DEL CONCRETO. v. 1 (2011). Felipe de J. García Rodríguez, México: Corrosión del Acero del Refuerzo. Mensual]
- [43]. [JOAN BONE, (2020). “Corrosión en el hormigón armado”. JB ENGINEERING]
- [44]. [Galvele J.R., Duffó G.S. (2006) Degradación de Materiales- Corrosión. Editorial Baudino, Buenos Aires.].
- [45]. [GUSTAVO S. DUFFÓ y SILVIA B. FARINA. “CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO”. CIENCIA E INVESTIGACIÓN - TOMO 69 N° 4 - 2019.]
- [46]. [[https://material-properties.org/es/que-es-la-pasivacion-de metales-definicion/](https://material-properties.org/es/que-es-la-pasivacion-de-metales-definicion/)]
- [47]. [Departamento de Energía de EE. UU., Ciencia de Materiales. DOE Fundamentals Handbook, Volumen 1 y 2. Enero de 1993.]
- [48]. [DOE Idem, pág. 12.]



[49]. [Callister, David G. Rethwisch. Ciencia e Ingeniería de Materiales: Introducción 9ª Edición, Wiley; 9a edición (4 de diciembre de 2013), ISBN-13: 978-1118324578.]

[50]. [Eberhart, Mark (2003). Por qué se rompen las cosas: comprender el mundo a través de la forma en que se desmorona. Armonía. ISBN 978-1-4000-4760-4.]

[51]. [Gaskell, David R. (1995). Introducción a la Termodinámica de Materiales (4ª ed). Taylor y Francis Publishing. ISBN 978-1-56032-992-3.]

[52]. [González-Viñas, W. y Mancini, HL (2004). Introducción a la ciencia de los materiales. Prensa de la Universidad de Princeton. ISBN 978-0-691-07097-1.]

[53]. [Ashby, Michael; Hugh Shercliff; David Cebon (2007). Materiales: ingeniería, ciencia, procesamiento y diseño (1ª ed.). Butterworth-Heinemann. ISBN 978-0-7506-8391-3.]

[54]. [JR Lamarsh, AJ Baratta, Introducción a la ingeniería nuclear, 3d ed., Prentice-Hall, 2001, ISBN: 0-201-82498-1.]

[55]. [<https://www.kloecknermetals.com/es/blog/galvanizing-steel-why-it-matters-and-how-it-protects-performance/#:~:text=Por%20eso%20el%20galvanizado%20del,%C3%BAtil%2C%20incluso%20en%20entornos%20exigentes.2025>]

[56]. [“CORROSION AND CORROSION CONTROL An Introduction to Corrosion Science and Engineering”. USA: A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, © 2008. 490p.]



- [57]. [F. M. Lea, "The Chemistry of Cement and Concrete", Edward Arnold Ltd. London (1970)]
- [58]. [P. Longuet, L. Burgleu, A. Zelwer, Rev. Des Mat. De Construction et des Travaux Publics 676, 35 (1973)]
- [59]. [Zhang, Y, P. A. (2015). Passivation and Corrosion Behavior of Carbon Steel in Simulated Concrete Pore Solution under Tensile and Compressive Stresses. American Society of Civil Engineers. Journal of Materials in Civil Engineering, 1-8.]
- [60]. [Li, L. &. (1999). Effect of chloride concentration on the pitting and repassivation potentials of reinforcing steel in alkaline solutions. NACE. Corrosion 99.]
- [61]. [Moreno, M., M. W. (2004). Corrosion of reinforcing steel in simulated concrete pore solutions: Effect of carbonation and chloride content. Corrosion Science 46, 2681-2699.]
- [62]. [Chin, W. Joannie, N. T. (1999). Sorption and Diffusion of Water, Salt Water, and Concrete Pore Solution in Composite Matrices. Journal of Applied Polymer Science, Vol 71., 483-492.]
- [63]. [Ghods, P., I. O. (2009). The effect of concrete pore solution composition on the quality of passive oxide films on black Steel reinforcement. Cement & Concrete. Composite 31, 2-11.]
- [64]. [Goñi, S., A. C. (1990). Syntetic Concrete Pore Sokution Chemistry and Rebar Corrosion Rate in the Presence of Chrorides. Cement and Concrete Research Vol. 20., 525-539.]



- [65]. [J. Tritthart. "Pore solution of concrete: The equilibrium of bound and free chloride". (2009). WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.]
- [66]. [<https://panelyacanalados.com/acero/acero-corrugado/varilla/>.]
- [67]. [Manning, D.G., Escalante, E. and Whiting, D. (1982). Panel Report – Galvanized Rebar as a Long-Term Protective System. FHWA-DTFH61-82-300-30041-2/3.]
- [68]. [Andrade, C., Hoist, J.D., Nürnberger, N., Whiteley, J.J. and Woodman, N. (1995). Protection Systems for Reinforcement, Prepared by Task Group VII/8 of Permanent Commission, VII CEB.]
- [69]. [Yeomans (ed.) (2004). Galvanized Steel Reinforcement in Concrete. Publ. Elsevier, Oxford, UK.]
- [70]. [Miller, J. (1995). Personal Communication.]
- [71]. [Pianca, F. (2001). Assessment of Stainless-Steel Clad Reinforcement for Ministry Use. TRB Presentation. Protection Systems for Reinforcement, Prepared by Task Group VII/8 of Permanent Commission VII CEB.]
- [72]. [Miller, J. (1995). Personal Communication.]
- [73]. [Concrete Society (1998). Guidance on the Use of Stainless Steel Reinforcement.]
- [74]. [Nürnberger, U. (1996). Stainless Steel in Concrete – State of the Art Report.]
- [75]. [Internet website: <https://431357273/ACEROS-INOXIDABLES>.]



[76]. [(Internet website: <https://276765276-ACEROS-INOXIDABLES>.)]

[77]. [SOITU. La producción mundial de acero inoxidable cae un 26,7% en el primer semestre. 22 de septiembre de 2009. [http://www.soitu.es/soitu/2009/09/22/info/1253622944_514292.html, 15 de septiembre de 2009.]

[78]. ACERIND S. C. Historia. 18 de noviembre de 2006. <http://www.inoxidable.com/historia.htm>, 15 de septiembre de 2009.]

[79]. [Hurley, M.F. Corrosion Initiation and Propagation Behavior of Corrosion Resistant Concrete Reinforcing Materials. Doctoral dissertation. University of Virginia, Material Science and Engineering, Charlottesville, 2007.]

[80]. [Hartt, W.H., Powers, R.G., Leroux, V., and Lysogorski, D.K Critical Literature Review of High-Performance Corrosion Reinforcements in Concrete Bridge Applications. FHWARD-04-093. Federal Highway Administration, Turner-Fairbank Highway Research Center, McLean, Va., 2004.]

[81]. [Scully, J.R., and Hurley, M.F. Investigation of the Corrosion Propagation Characteristics of New Metallic Reinforcing Bars. VTRC 07-CR9. Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, 2007.]

[82]. [Hartt, W.H., Lysogorski, D.K., and Leroux, V. Characterization of Corrosion Resistant Reinforcement by Accelerated Testing. In Concrete Bridge Conference. Portland Cement Association, Reno, Nev., 2004.]

[83]. [Hartt, W.H., Powers, R.G., Lysogorski, D.K., Leroux, V., and Virmani, Y.P. Corrosion Resistant Alloys for Reinforced Concrete.



FHWA-HRT-07-039. Federal Highway Administration, Turner-Fairbank Highway Research Center, McLean, Va., 2007.]

[84]. [Bertolini, L., Bolzoni, F., Pastore, T., and Pedferri, P. Behaviour of Stainless Steel in Simulated Concrete Pore Solution. British Corrosion Journal, Vol. 31, No. 3, 1996, pp. 218-222.]

[85]. [Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., and Polder, R. Corrosion of Steel in Concrete. Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2004.]

[86]. [CLAVERO, J.M. Apunts de Materials Metal·lics. EUETB, 2005.]

[87]. [Budai S.A. <https://www.budai.com.ar/influencia-de-los-elementos-de-aleacion-en-el-acero-inoxidable/>.]

[88]. [American Society for Metals, Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. ASM Metal Handbook, 10th Edition, Vol. 1, 1993, pp 2014.]

[89]. [HEDSTRÖM, P. Deformation induced martensitic transformation of metastable stainless steel AISI 301. Lulea University, 2007.]

[90]. [Leffler B. Stainless steels and their properties 1996, Avesta Sheffield AB Research Foundation: Stockholm.]

[91]. [ASM. Op. cit.]

[92]. [Stainless Steels for Design Engineers Michael F. McGuire, p 137-146 DOI: 10.1361/ssde2008p137.]

[93]. [ASM Specialty Handbook, Stainless Steels, edited by J.R. Davis, ASM International, 1994.]



- [94]. [Budai S.A. [https://www.budai.com.ar/influencia-de-los-elementos-de-aleacion-en-el-acero-inoxidable/.](https://www.budai.com.ar/influencia-de-los-elementos-de-aleacion-en-el-acero-inoxidable/)]
- [95]. [De Vedia Luis, De Rissone Mabel Ramini, Surian Estela, Svoboda Hernán, Zappa Sebastian. (2009). Corrosión Dulce en Soldaduras de Aceros Inoxidables Supermartensíticos. XXXV CONSOLDA – Congreso Nacional de Soldagem.]
- [96]. Grassi V., Trabanelli G., Zucchi F., (2000). Stress corrosion cracking of 13 % Cr martensitic steels in sodium chloride solutions in the presence of thiosulphate.]
- [97]. [ASM. Op. cit.]
- [98]. [<https://es.scribd.com/presentation/403048956/ACEROS-INOXIDABLES.>]
- [99]. (ASM, [1994]).
- [100]. [SMALLMAN R.E., (2007). Physical Metallurgy and Advanced Materials, 7th Edition. Boston: ELSEVIER.]
- [101]. [Budai S.A. [https://www.budai.com.ar/influencia-de-los-elementos-de-aleacion-en-el-acero-inoxidable/.](https://www.budai.com.ar/influencia-de-los-elementos-de-aleacion-en-el-acero-inoxidable/)]
- [102]. [G. Di Caprio, M Forés, T Puig - 1999 - Inoxcenter, SA.]
- [103]. [Di Caprio, G. Op. cit]
- [104]. [American Society for Metals, Heat Treating. ASM Metal Handbook, 9th Edition, Vol. 4, 1991, pp 1682-1694.]
- [105]. [ING. SERGIO G. LAUFGANG. ACEROS INOXIDABLES. TERMO SOLDEX S.A.]



- [106]. Li, C.Q., Melchers, R.E., Lawanwisut, W. Magazine of Concrete Research; Vol. 57,2005, p557.]
- [107]. [Miguel Baltazar, Facundo Almeraya, Demetrio Nieves, Adán Borunda, Erick Maldonado , Arturo Ortiz. Corrosión del acero inoxidable 304 como refuerzo en concreto expuesto a cloruros y sulfatos Scientia Et Technica 2007, XIII (36)]
- [108]. [ASM International, STAINLESS STEELS FOR DESIGN ENGINEERS, Materials Park, Ohio 44073-0002, Copyright © 2008.]
- [109]. [C.M. Abreu et al. / Electrochimica Acta 47 (2002) 2271-2279]
- [110]. [Qian, S.; 2006.]
- [111]. [AUTOR: EDUARDO MEDINA SÁNCHEZ, 2012, “EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO, ESTRUCTURAL Y FRENTE A LA CORROSIÓN, DE UNA NUEVA ARMADURA DE ACERO INOXIDABLE DÚPLEX BAJO EN NÍQUEL” Tesis, Madrid, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, E U A T M. pag 194.]
- [112]. [Gedge, G.; Embarcadero de Progreso, Yucatán (México) 2003.]
- [113]. [ECCA (2011). The Basics of Corrosion. Technical Paper. Obtenido desde:<http://www.prepaintedmetal.eu/repository/Annina/Basic%20of%20corrosion%20021211.pdf>.]
- [114]. [Almeraya C.F. Tesis Doctoral. CIMAV, S.C.-DMIE. Chihuahua, Mexico. 1998.]



- [115]. [S. Esmailzadeha, M. Aliofkhazraeia and H. Sarlakb. 2017. Interpretation of Cyclic Potentiodynamic Polarization Test Results for Study of Corrosion Behavior of Metals: A Review.]
- [116]. [ASTM C876-91, reapproved 1999) Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.]
- [117]. [Ibídem]
- [118]. [ASTM G102 (2010) Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements.]
- [119]. [ASTM G5-94 (2004) Standard reference test method for making potentiostatic and potentiodynamic anodic polarization measurement.]
- [120]. [ASTM G59-97 (2009) Standard test method for conducting potentiodynamic polarization resistance measurements.]
- [121]. [Botana Pedemonte Javier, et al. 2002.]
- [122]. [Goodhew, Humphreys et al. 2001.]
- [123]. J.M. Albella, A.M. Cintas, T. Miranda, J.M. Serratos, Introducción a la ciencia de Materiales, “Técnicas de preparación y Caracterización”, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, MADRID 1993.]



Recomendaciones para trabajos posteriores:

- Analizar la influencia de tratamientos térmicos de revenido en la corrosión y propiedades mecánicas del acero inoxidable supermartensítico.
- Tomando como base el acero inoxidable supermartensítico actual, modificar su composición adicionando un poco más de Cr y Mo para estudiar su respuesta electroquímica.
- Evaluar el efecto de soluciones poro a base de Ca(OH)_2 como blanco, y contaminadas con diferentes concentraciones de cloruros.
- Utilizar la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) para conocer de manera más objetiva, el mecanismo de corrosión en la varilla de refuerzo de acero inoxidable supermartensítico.
- Analizar mediante técnicas avanzadas de análisis superficial como Espectroscopia de Electrones Auger (AES) y Espectroscopia Fotoelectrónica de Rayos X (XPS), la composición química de la película de óxido del acero inoxidable antes y después de exposición a un electrolito corrosivo.

