

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGRIETAMIENTO
EN PRUEBAS ACELERADAS DE CORROSIÓN BAJO
ESFUERZOS DE ACERO INOXIDABLE 304”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA

BEATRÍZ CASTILLO MÁRQUEZ

DIRIGIDA POR

M.C. JORGE TERÁN GUILLÉN

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, 2006.

**DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**

No. Adq. H-71155

No. Título _____

Clas. TS 620.11223

C352 e



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGRIETAMIENTO
EN PRUEBAS ACELERADAS DE CORROSIÓN BAJO
ESFUERZOS DE ACERO INOXIDABLE 304”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

PRESENTA

**BEATRÍZ CASTILLO MÁRQUEZ
DIRIGIDA POR**

M.C. JORGE TERÁN GUILLÉN

SINODALES

**M.C. JORGE TERÁN GUILLÉN
DIRECTOR**

**Q.M. SALVADOR ALVARADO BALLEZA
SINODAL**

**Q.M. RAFAEL FRÍAS RUÍZ
SINODAL**

**Q. M. ÁNGEL F. PÉREZ MARTÍNEZ
SINODAL**

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme haber llegado hasta aquí y darme las fuerzas necesarias para lograr cada una de las metas que me he propuesto.

A toda mi familia: papas, hermano, cuñada, sobrina, tíos, primos, abuelitos... Gracias por todos sus consejos, apoyo, cariño y amor.

A mis amigos: de carrera, de Tapachula, de Querétaro y en fin a todos aquellos que me permitieron formar parte de sus vidas y con los cuales he compartido momentos importantes, he aprendido muchas cosas de cada uno de ustedes.

Al grupo de las Paty's y a sus familias por aceptarme y brindarme su amistad incondicional.

A todos los maestros, gracias por todos los conocimientos proporcionados y en especial a mis sinodales: Q.M Salvador Alvarado Balleza, Q.M. Rafael Frías Ruíz y al Q.M. Ángel F. Pérez Martínez.

Al IMT por permitirme desarrollar mi proyecto de tesis en sus instalaciones pero un especial reconocimiento al M.C. Jorge Terán Guillén por toda su paciencia y transmitirme sus conocimientos; al M.C. J. Trinidad Pérez Quiroz por apoyarme en todo momento con el proyecto; a todo el equipo de dinámica vehicular: Dr. Manuel de J. Fabela Gallegos, M.C. David Vázquez, Vega y al M.C. J. Ricardo Hernández Jiménez por todo su apoyo, consejos comentarios y sugerencias para la realización de la tesis. A la Dr. Angélica del Valle Moreno y al Dr. Andrés Torres Acosta por todos sus comentarios y sugerencias.

Tal vez se me olvide nombrar a muchas personas pero gracias a todas aquellas que han formado parte de mi vida y que ayudaron para cumplir cada uno de mis sueños y metas.

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE CUADROS	iv
INDICE DE FIGURAS	v
RESUMEN	
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES	3
II.1 Aceros inoxidables	3
II.1.1 Tipos de acero y elementos aleantes	3
II.1.2 Propiedades de los aceros inoxidables austeníticos	7
II.1.2.1 Trabajado Mecánico	7
II.1.2.2 Características Mecánicas	7
II.1.2.3 Problemas que presentan	7
II.2 Corrosión	8
II.2.1 Generalidades sobre corrosión	8
II.2.2 Corrosión en concreto	8
II.2.3 Diagramas de Pourbaix	10
II.2.4 Tipos de corrosión	13
II.2.5 Métodos para prevenir la corrosión	18
II.3 Mecánica de fractura	18
II.3.1 Generalidades sobre Mecánica de Fractura	18
II.3.2 Criterio de Energía	20
II.3.3 Factor de Intensidad de Esfuerzos (K)	21
II.3.4 Efecto del conformado mecánico en la fractura	22
II.4 Corrosión bajo esfuerzos	24
II.4.1 Definición del K_{ISCC}	24

II.4.2 Modelos de Agrietamiento	24
II.4.3 Efecto de las inclusiones en la fractura por corrosión bajo esfuerzos	25
III. HIPÓTESIS	27
IV. OBJETIVOS	28
V. METODOLOGÍA	29
V.1 Materiales	29
V.2 Métodos	31
V.3 Diseño experimental	32
V.3.1 Caracterización metalográfica	33
V.3.2 Pruebas de tensión	33
V.3.3 Pruebas de corrosión bajo esfuerzo	38
V.3.3.1 Diseño de mordazas	38
V.3.3.2 Celda de carga	39
V.3.3.3 Pruebas Electroquímicas	41
V.3.3.4 Pruebas de K_{ISCC}	42
V.3.3.4.1 Diseño y preagrietamiento de probetas compactas de tensión	44
V.3.3.5 Montar prueba	46
VI. RESULTADOS	53
VI.1 Caracterización metalográfica	53
VI.2 Pruebas de tensión	53
VI.3 Pruebas de corrosión bajo esfuerzo	55
VI.3.1 Calibración de celda	55
VI.3.2 Pruebas electroquímicas	56
VI.3.3 Pruebas de corrosión bajo esfuerzos	60
VII. DISCUSIÓN	67
VIII. CONCLUSIONES	69
IX. BIBLIOGRAFÍA	70
X. ANEXOS	73

X.1 Reconocimientos	73
X.1.1 Carta de aceptación para el congreso: XIV Internacional Materials Congreso Research 2005	73
X.1.2 Resumen de presentación en el congreso XIV Internacional Materials Congreso Research 2005	74
X.1.3 Reconocimiento por participar en el congreso	75
X.1.4 Trabajo en extenso publicado en la Universidad Autónoma de Campeche	76
X.1.5 Carta de aceptación para el XXVII Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales	88
X.1.6 Resumen presentado para el XXVII Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales	89
X.1.7 Reconocimiento por haber participado en la sesión de póster y asistencia al congreso	91

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Composición química teórica de los aceros inoxidables (% en peso)	4
2. Características metalúrgicas de los aceros inoxidables	5
3. Propiedades mecánicas de los aceros inoxidables	6
4. Condiciones a las que se expuso la probeta	51
5. Condiciones iniciales de las probetas	51
6. Composición química del acero inoxidable 304 (% en peso)	53
7. Resultados de las propiedades mecánicas en tensión en aire del acero inoxidable utilizado	55
8. Resultados obtenidos en los cuatro ambientes	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Diagrama de Pourbaix	11
2. Diagrama de Pourbaix del Fe-Cr-H ₂ O a 25°C	12
3. Formas de Corrosión	13
4. Corrosión Uniforme	15
5. Corrosión por Picaduras	15
6. Corrosión en Espacios Confinados	16
7. Corrosión Bajo Esfuerzos	17
8. Corrosión Galvánica	18
9. Modos de carga en un material agrietado	21
10. Campo de esfuerzos, sistema de coordenadas alrededor de una grieta	22
11. Dirección de las probetas de mecánica de fractura y de tensión	23
12. Reacciones que se llevan a cabo en la punta de la grieta	25
13. Representación esquemática de la iniciación y propagación de la corrosión por picadura en las inclusiones de MnS	26
14. Máquina Instron	31
15. Diagrama de flujo del diseño experimental	32
16. Dibujo de las dimensiones de la probeta de tensión	34
17. Prueba de tensión llevada a cabo en la máquina Instron	35
18. Diagrama de esfuerzo-deformación para determinar el esfuerzo de cedencia por el método del 0,2%	36
19. Esquema típico de esfuerzo-deformación de un ensayo de tensión	37
20. Diseño de las mordazas para las pruebas de corrosión aceleradas	38
21. Celda de carga y extensómetros	39
22. Puente de Wheatstone completo	40
23. Indicador de deformaciones	41
24. Dibujo del diseño de las probetas de mecánica de fractura (compactas de tensión)	44

25. Calibración del extensómetro	46
26. Medición de la abertura inicial de la probeta	47
27. Bujes que sirvieron de aislantes entre la probeta y las mordazas	48
28. Esquema del dispositivo de corrosión: celda de corrosión y celda de carga	49
29. Fotografía de la prueba de corrosión	50
30. Probeta al momento de ser marcada por fatiga y romperse totalmente	52
31. Fotomicrografía tomada a 50x del acero inoxidable 304, atacada con gliceregia	53
32. Datos experimentales de las propiedades mecánicas en la dirección transversal y longitudinal obtenidos en la máquina servohidráulica Instron	54
33. Gráfica obtenida de la calibración de la celda de carga	56
34. Extrapolación de Tafel. Gráfica comparativa de los 4 ambientes	57
35. Pruebas de extrapolación de Tafel del acero inoxidable 304	58
36. Fotomicrografía tomada a 5x, de las pruebas de Extrapolación de Tafel, medio: agua de mar + acero inoxidable 304	58
37. Fotomicrografía tomada a 5x, de las pruebas de Extrapolación de Tafel, medio: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 1M+ NaCl, 50:50 y acero inoxidable 304	59
38. Fotomicrografía tomada a 10x, de las pruebas de Extrapolación de Tafel, medio: agua de mar + $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 1M, 50:50 y acero inoxidable 304	59
39. Probeta TK5 totalmente fracturada (medio: agua de mar con $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 50:50)	60
40. Probeta TK1 totalmente fracturada (medio: agua de mar)	61
41. Probeta TK2 totalmente fracturada (medio: agua de mar)	61
42. Probeta LK1 totalmente fracturada, (medio: agua de mar)	62
43. Probeta LK3 totalmente fracturada (medio: agua de mar con $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 50:50)	63

44. Probeta LK4 totalmente fracturada (medio: agua de mar)	63
45. Gráfica comparativa de las tres probetas longitudinales a diferentes medios y cargas iniciales de prueba	64
46. Gráfica comparativa de las tres probetas transversales a diferentes medios y cargas iniciales de prueba	65
47. Gráfica comparativa de las dos probetas expuestas al medio agua de mar + $\text{Ca}(\text{OH})_2$	65
48. Gráfica comparativa de las cuatro probetas expuestas al medio agua de mar	66

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue evaluar la susceptibilidad al agrietamiento del acero inoxidable 304 en una solución alcalina contaminada de cloruros ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ y agua de mar; 50:50) y agua de mar, mediante la determinación del factor de intensidad de esfuerzos umbral (K_{ISCC}). Las probetas compactas de tensión se preagrietaron por fatiga y se colocaron en un dispositivo que consiste de una celda de corrosión y una celda de carga, las pruebas se realizaron a temperatura ambiente y en los ambientes anteriormente mencionados, a dos niveles de sobrepotencial anódico y tres tiempos de exposición en el medio. Las probetas orientadas en la dirección longitudinal fueron sometidas a altas cargas (20 kN equivalente a un $K_I = 55 \text{ MPa m}^{1/2}$) y las probetas orientadas en la dirección transversal a bajas cargas (13 kN equivalente a un $K_I = 35 \text{ MPa m}^{1/2}$). Para estimar el sobrepotencial anódico se realizaron las pruebas de extrapolación de Tafel en las soluciones de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ + agua de mar; 50:50, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ + NaCl; 50:50, agua de mar. De los resultados obtenidos se observa que es mayor la velocidad de corrosión en agua de mar que en el medio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ + agua de mar. Por otro lado, las pruebas realizadas en las probetas preagrietadas de compactas de tensión sometidas a cargas y sobrepotencial anódico no presentan ninguna propagación de grieta con el factor de intensidad de esfuerzos aplicado. De esto se concluye, que el acero inoxidable 304 no es susceptible al agrietamiento por corrosión y esfuerzos en estas condiciones de prueba.

I. INTRODUCCIÓN

Las estructuras de concreto reforzado expuestas a ambientes marino e industrial presentan cambios en sus propiedades fisicoquímicas y en su resistencia residual, tanto el concreto como el material de refuerzo, produciendo así una disminución en la vida útil para la cual fueron diseñadas. El material que se utiliza como refuerzo es el acero al carbón, estableciéndose en principio un equilibrio termodinámico, donde no existe corrosión, debido a la pasivación del hierro en medio alcalino. Sin embargo, la porosidad del concreto presenta un camino para la introducción de agentes que ocasionan la corrosión del acero.

La capa de óxido formada sobre la superficie del acero embebido en concreto ayuda a pasivarlo y el fenómeno de corrosión no se presenta, la capa pasiva del acero se ve afectada cuando en el ambiente se presentan iones cloruro, la cual genera productos de corrosión que ocupan más volumen ocasionando fisuras, grietas, sangrado y desprendimiento del concreto.

Por otro lado, en ambientes urbano-industriales la presencia de gases como el dióxido de carbono (CO_2) y el dióxido de azufre (SO_2) afectan el comportamiento del concreto disminuyendo la alcalinidad de éste y como consecuencia, degradando la capa pasiva del acero.

Es importante el estudio de los aceros inoxidable, ya que estos aceros se están empleando actualmente para reforzar estructuras de concreto en ambientes marinos. En México existe una construcción que utiliza acero inoxidable; se trata del muelle Progreso ubicado en el estado de Yucatán. El muelle tiene 60 años de construido y está en perfecto estado, mientras que la ampliación construida hace 30 años se encuentra en un estado de deterioro tal que ha sido clausurada. Sólo la primera etapa fue construida de concreto reforzado con acero inoxidable y la segunda etapa es de acero al carbón.

El K_{Isc} es el factor de intensidad de esfuerzos umbral o límite que permite conocer si la grieta crecerá o no en un material agrietado en un medio determinado. Se obtiene de la interacción del medio con los esfuerzos presentes en una grieta.

Este estudio permite evaluar la susceptibilidad al agrietamiento del acero inoxidable 304 en diferentes medios y cargas, en pruebas aceleradas de corrosión bajo esfuerzos utilizando probetas de mecánica de fractura, así como desarrollar una metodología que permita evaluar la corrosión bajo esfuerzos en distintos materiales y a diferentes condiciones de prueba.

II. ANTECEDENTES

II.1. Aceros inoxidables.

II.1.1. Tipos de acero y elementos aleantes.

El acero inoxidable tiene una amplia variedad de usos tales como: herramientas, calderas, equipos para la industria química, petroquímica, automovilística, alimenticia y farmacéutica, etc., debido a su elevada resistencia a la corrosión. La susceptibilidad de estos aceros, a la corrosión bajo esfuerzos, depende de su composición química, microestructura, tratamiento térmico y conformado mecánico.

Los aceros inoxidables se clasifican en cinco grupos:

- ❖ Martensítico
- ❖ Austenítico
- ❖ Ferrítico
- ❖ Dúplex
- ❖ Endurecidos por precipitación

Esta clasificación se hace con base en su estructura cristalina. Cada grupo posee diversas propiedades mecánicas y diferentes resistencias a la corrosión. Estos aceros son susceptibles a la corrosión bajo esfuerzos en diferentes ambientes: marino, industrial y agua a altas temperaturas. En general, los aceros inoxidables son susceptibles al ataque por corrosión localizada (ASM Handbook, 1998).

El acero seleccionado para estudiar en este trabajo es un acero inoxidable austenítico, en el cual los principales elementos de aleación son el cromo (Cr) y níquel (Ni), el primero es el elemento estructural para la capa protectora de hidróxido de cromo (Cr(OH)_3) y en presencia de Ni y molibdeno (Mo) forma una compleja capa de óxidos adherentes que le dan mayor resistencia a la corrosión. Además, el níquel proporciona una estructura austenítica estable a temperatura ambiente, ver Cuadro 1, (Fernández, 2001).

Cuadro 1. Composición química teórica de los aceros inoxidable (% en peso), (ASM Handbook,1998).

Tipo	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S
Austenítico							
301	0,15	2,00	1,00	16,0-18,0	6,0-8,0	0,045	0,03
304	0,08	2,00	1,00	18,0-20,0	8,0-10,5	0,045	0,03
304L	0,03	2,00	1,00	18,0-20,0	8,0-12,0	0,045	0,03
308	0,08	2,00	1,00	19,0-21,0	10,0-12,0	0,045	0,03
316	0,08	2,00	1,00	16,0-18,0	10,0-14,0	0,045	0,03
Ferrítico							
405	0,08	1,00	1,00	11,5-14,5		0,04	0,03
409	0,08	1,00	1,00	10,5-1,75	0,5	0,045	0,045
430	0,12	1,00	1,00	16-18		0,04	0,03
434	0,12	1,00	1,00	16-18		0,04	0,03
442	0,20	1,00	1,00	18-23		0,04	0,03
Martensítico							
403	0,15	1,00	0,50	11,5-13,0		0,04	0,03
410	0,15	1,00	1,00	11,5-13,0		0,04	0,03
420	0,15 min	1,00	1,00	12,0-14,0		0,04	0,03
422	0,20-0,25	1,00	0,75	11,0-13,0	0,5-1,0	0,025	0,025
431	0,20	1,00	1,00	15,0-17,0	1,25-2,50	0,04	0,03
Endurecidos por precipitación *							
15-5PH	0,07	1,00	1,00	14,0-15,5	3,5-5,5	0,04	0,03
17-4PH	0,07	1,00	1,00	15,5-17,5	3,0-5,0	0,04	0,03
Custom 455	0,05	0,50	0,50	11,0-12,5	7,5-9,5	0,04	0,03
17-7PH	0,09	1,00	1,00	16,0-18,0	6,5-7,75	0,04	0,03
A-286	0,04	1,30	0,40	15,0	26,0		

* 15-5PH,17-4PH y el Custom 455 son del tipo martensítico endurecidos por precipitación; 17-7PH es semiaustenítico endurecido por precipitación; y el A-286 es un tipo austenítico endurecido por precipitación.

Cuadro 2. Características metalúrgicas de los aceros inoxidables
(www.nickelinstitute.com).

Tipos de aceros inoxidables	Propiedades
Austenítico	No es magnético. No es endurecible por tratamiento térmico. Una sola fase desde 0 K hasta el punto de fusión. Forma cristalográfica: cúbico centrado en la cara. Muy fácil de soldar.
Ferrítico	Magnético. No es endurecible por tratamiento térmico. Forma cristalográfica: cúbico centrado en el cuerpo. Con contenidos bajos de carbono es fácilmente soldable.
Dúplex	Magnético. No es endurecible por tratamiento térmico. Contiene ambas fases, austenita y ferrita. Fácil de soldar.
Martensítico	Magnético. Tratado térmicamente para obtener altos niveles de dureza. Forma cristalográfica: tetragonal distorsionada. Duro e imposible de soldar.
Endurecido por precipitación	Magnético. Forma cristalográfica: martensítico con microprecipitados. Tratado térmicamente alcanza altos niveles de resistencia a la tensión. Puede soldarse.

Cuadro 3. Propiedades mecánicas de los aceros inoxidables (www.nickelinstitute.com).

Aleación	Número UNS	Esfuerzo último (psi)	Esfuerzo de cedencia (psi)	Elongación, % mínimo	Módulo de Elasticidad	Dureza típica
Acero Inoxidable Austenítico						
Tipo 304	S30400	75 000	30 000	35	29 000 000	80 RB
Tipo 304L	S30403	70 000	25 000	35	29 000 000	75 RB
Tipo 316	S31600	75 000	30 000	30	28 000 000	80 RB
Tipo 316L	S31603	70 000	25 000	35	28 000 000	80 RB
AL-6XN	N08367	112 000	53 000	50	27 000 000	90 RB
Acero Inoxidable Ferrítico						
Tipo 430	S43000	60 000	30 000	20	29 000 000	85 RB
Tipo 439	S43035	60 000	30 000	20	29 000 000	90 RB
Tipo 409	S40900	55 000	30 000	20	29 000 000	85 RB
SEA-CURE	S44660	90 000	75 000	25	31 000 000	95 RB
Acero Inoxidable Dúplex						
Aleación 2205	S31803	90 000	65 000	25	29 000 000	30 RC
7Mo PLUS	S32950	90 000	70 000	20	29 000 000	30 RC
Aleación 255	S32550	110 000	80 000	15	30 500 000	32 RC
Acero Inoxidable Martensítico						
Tipo 410	S41000	190 000	150 000	15	29 000 000	41 RC
Tipo 420	S42000	240 000	200 000	5	29 000 000	55 RC
Tipo 440C	S44050	280 000	270 000	2	29 000 000	60 RC
Aceros Inoxidables Endurecidos por Precipitación						
17-7 PH	S17700	210 000	190 000	5	32 500 000	48 RC
17-4 PH	S17400	190 000	170 000	8	28 500 000	45 RC
Custom 455	S45500	230 000	220 000	10	29 000 000	48 RC

II.1.2. Propiedades de los aceros inoxidable austeníticos

II.1.2.1. Trabajado Mecánico

Los aceros inoxidable austeníticos no se endurecen por tratamiento térmico, generalmente son endurecidos por trabajo en frío; no son magnéticos en la condición de recocido y se vuelven ligeramente magnéticos con el trabajo en frío y poseen una excelente soldabilidad (ASM Handbook, 1998).

II.1.2.2. Características Mecánicas

Los aceros inoxidable austeníticos presentan un bajo esfuerzo de cedencia y una excelente tenacidad. Son muy resistentes al impacto, tienen una buena ductilidad y una resistencia a la termofluencia "creep" a altas temperaturas. Ver Cuadros 2 y 3 (ASM Handbook, 1998).

II.1.2.3 Problemas que presentan

Como se mencionó anteriormente los aceros inoxidable austeníticos son susceptibles a: presentar corrosión intergranular, a la corrosión bajo esfuerzos en ambientes marinos o industriales. Estos problemas de corrosión y fallas por corrosión se asocian a una mala aplicación del conformado mecánico o a una técnica de fabricación inadecuada.

La precipitación de carburos en los límites de grano favorece la susceptibilidad a la corrosión intergranular y a otros tipos de corrosión (sensibilización) que ocurre cuando estos aceros son tratados por un período de tiempo en un rango de temperaturas de 425 a 870 °C, para evitar este problema se reduce la cantidad de carbono en el acero.

También el calor generado por la soldadura puede causar precipitación de carburos y la formación de fases intermetálicas, aumentando de esta manera la susceptibilidad a la corrosión. Este fenómeno ocurre frecuentemente en la zona afectada por el calor y se puede corregir realizando un recocido después de aplicar la soldadura (ASM Handbook, 1998).

II.2. Corrosión

II.2.1. Generalidades sobre corrosión

La corrosión es el deterioro o alteración fisicoquímica de las propiedades de un material, provocadas por la acción del ambiente. Para que la corrosión se lleve a cabo se necesita la formación de una celda electroquímica dentro del sistema (Ávila y col., 2002).

El ánodo es donde se da la corrosión (disolución) y ahí se liberan electrones por el paso del metal en forma de iones al electrolito. En el ánodo se llevan a cabo reacciones de oxidación. En el cátodo los electrones producidos en el ánodo se combinan con determinados iones presentes en el electrolito (Ávila y col., 2002).

II.2.2. Corrosión en concreto

El concreto es una mezcla de materiales, como: cemento, agua, agregados finos, agregados gruesos, materiales cementantes y aditivos químicos. El concreto se presenta como un agregado mineral disperso en una matriz de cemento endurecida, en la cual se crean pequeños poros de gel (pequeños poros entre la pasta), causados por la evaporación excesiva del agua y por la creación de poros capilares (poros más grandes entre las partículas de gel), generados por la relación agua/cemento. El concreto proporciona las condiciones de protección al acero de refuerzo mediante una elevada alcalinidad ($\text{pH} = 12$ a 13) y una resistividad eléctrica entre $50-70 \times 10^3 \Omega\text{cm}$ (Vadillo, 2004).

Las propiedades físicas del concreto cambian, si se afectan la densidad y la permeabilidad del concreto ya que éstos cambian la velocidad de difusión del ión cloruro hacia el acero. Cuando se tienen bajas relaciones agua/cemento y un elevado contenido de cemento, se incrementa la densidad del concreto por lo que se vuelve más protector. Si el concreto es muy poroso, estas porosidades pueden ser ocupadas por gases o líquidos y el fenómeno de corrosión se presenta con mayor facilidad (Pérez, 2001).

El concreto en sí, tiene una gran resistencia a la compresión y muy pequeña a los esfuerzos de tensión, pero con el acero de refuerzo se obtiene un mejor

comportamiento mecánico, pero a la vez la corrosión del acero de refuerzo es la causa principal del deterioro de dichas estructuras, siendo uno de los problemas más importantes para el mantenimiento de la integridad de las obras civiles en los países (Vadillo, 2004).

Como se menciona anteriormente dicha corrosión se previene con la formación de una película pasivante, pero cuando las condiciones cambian y el concreto se altera, esto es cuando penetran sustancias agresivas, ocurre un desequilibrio en el sistema concreto-metal, el pH cambia provocando la ruptura de la capa pasiva del acero iniciando así la corrosión, por lo que existe una disminución de la sección del acero y el concreto se fisura debido a las presiones que ejercen los productos de corrosión (óxidos) y la adherencia armadura-concreto disminuye o desaparece (Millano, 2004).

Están reportados dos mecanismos para que la corrosión pueda iniciarse y mantenerse:

- 1) Reducción de la alcalinidad por lixiviación de las sustancias alcalinas con agua o neutralización parcial con dióxido de carbono u otro agente ácido.
- 2) Por la acción electroquímica que involucra al ión cloruro en presencia de oxígeno.

Está reportado que sin la presencia de oxígeno y humedad en el concreto la corrosión termodinámicamente no es posible. El manual de la Red Durar reporta que para que exista la corrosión se necesitan las siguientes condiciones:

- Un pH < 8 y la presencia de oxígeno y agua.
- Un pH > 8 y la presencia de oxígeno, agua y cloruros.

Para que no se presente la corrosión necesitamos las siguientes condiciones:

- Mantener fuera del concreto reforzado alguna de las siguientes opciones: oxígeno, agua, cloruros, CO₂ y SO₂.
- Colocar al concreto reforzado: iones hidróxilos, potencial negativo sobre el acero, iones ferrosos o inhibidores (Durar, 2000).

II.2.3. Diagramas de Pourbaix

Los equilibrios de las reacciones posibles entre el agua y el metal proporcionan una idea de la tendencia a formar óxidos o hidróxidos que tiene el metal bajo condiciones de potencial y pH. El investigador belga Marcel Pourbaix obtuvo los equilibrios y los representó gráficamente como función del potencial y del pH. Los equilibrios entre el metal y el agua a 25°C se representan por líneas que dependen del potencial, del pH o ambos, delimitando zonas termodinámicamente estables en donde el metal existe en alguna de sus formas (disuelto, como óxido, hidróxido, metal, etc.) (Del Valle y col., 2001).

El diagrama de Pourbaix contiene tres regiones, como se muestra en la Figura 1, las cuales se clasifican según el comportamiento del metal en un medio dado: pasividad, corrosión e inmunidad. La zona de pasividad es cuando el metal posee películas oxidadas o de hidróxido sobre su superficie que inhiben la corrosión. En la zona de corrosión, el metal se disuelve activamente, siendo los productos de corrosión solubles. En la zona de inmunidad, el metal se encuentra preservado y estable bajo ciertas condiciones muy especiales de potencial y pH (Ávila y col., 2003).

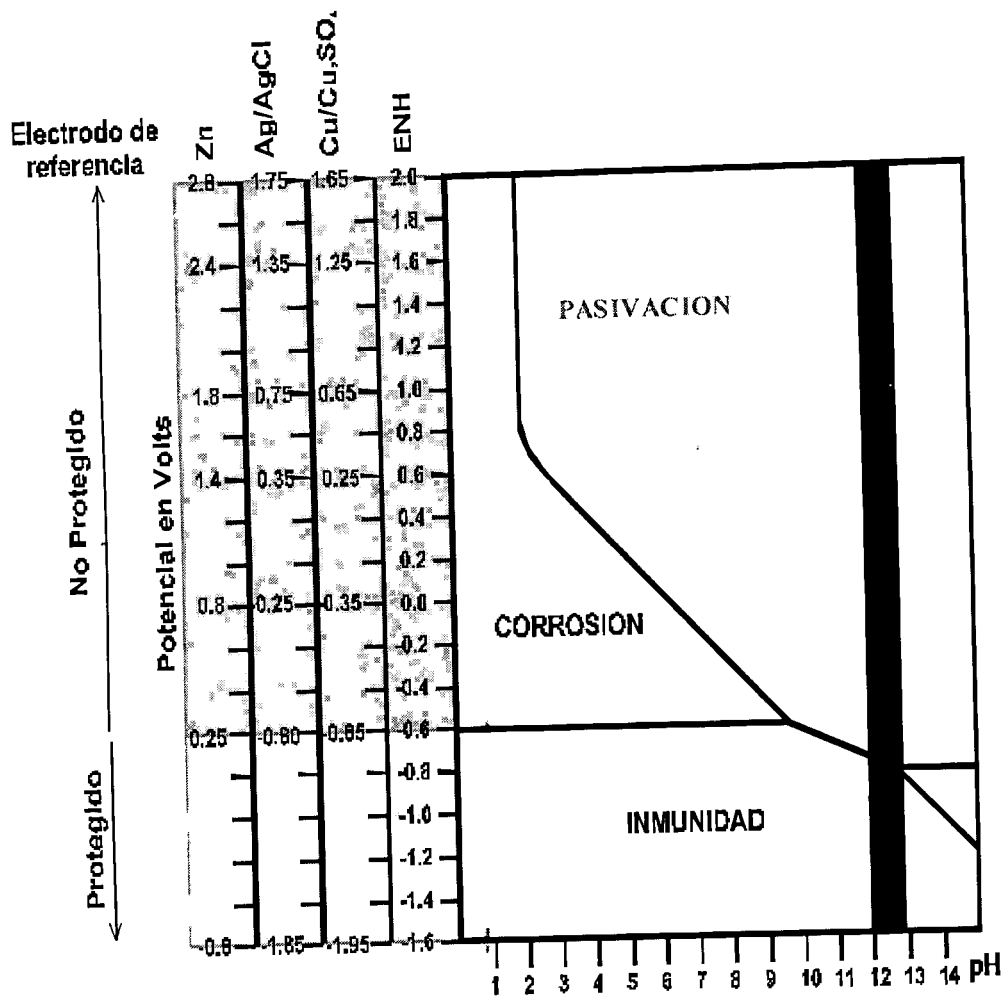


Figura 1. Diagrama de Pourbaix (Pérez, 2001).

En la Figura 2 se muestra el diagrama de Pourbaix del Fe-Cr-H₂O, en la zona de pH 12-13 unas, líneas verticales representan la zona donde termodinámicamente no es posible que se presente la corrosión del metal en concreto, como sería el caso del acero inoxidable en Ca(OH)₂.

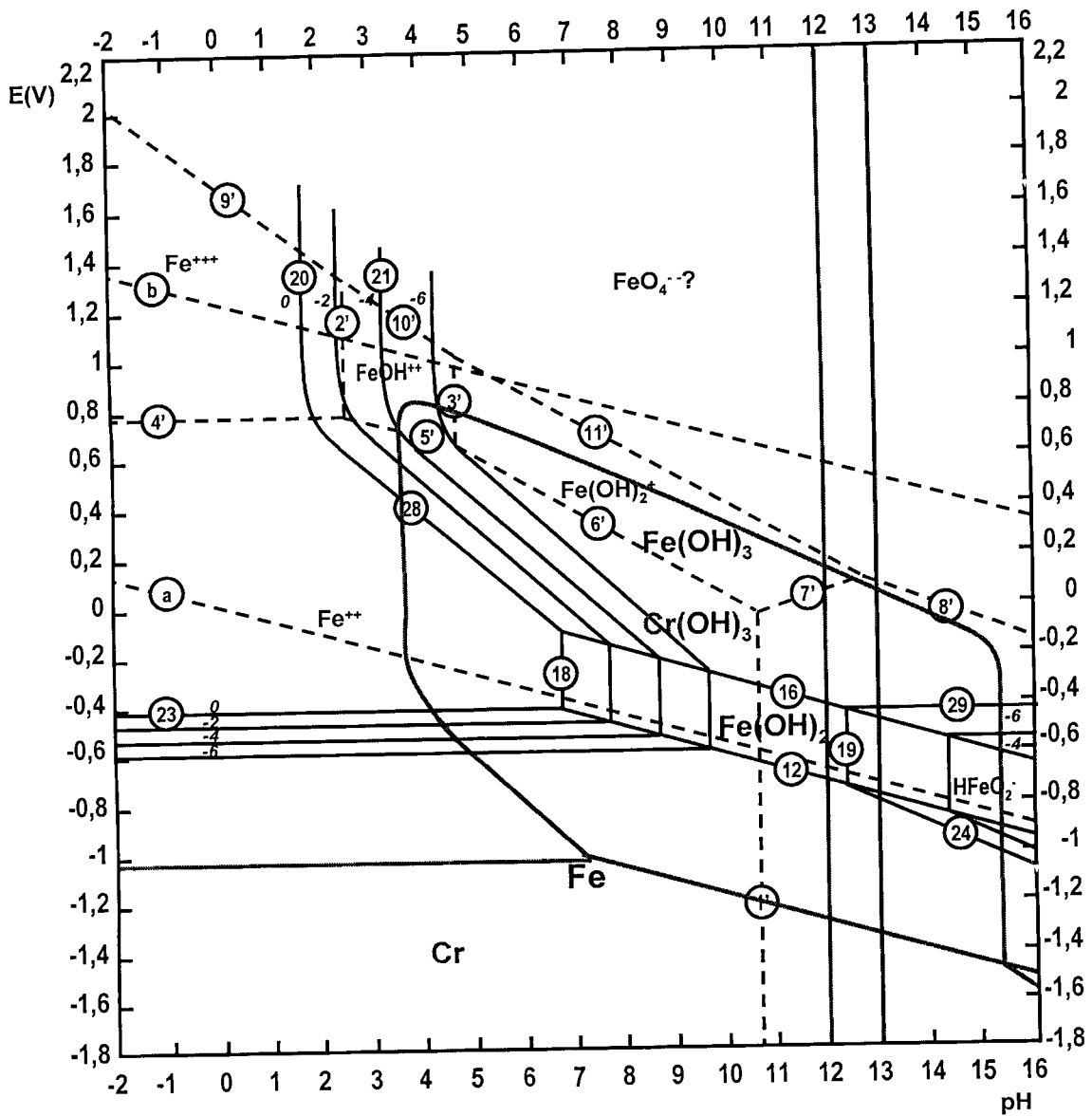


Figura 2. Diagrama de Pourbaix del Fe-Cr-H₂O a 25°C (Pourbaix, 1996).

II.2.4. Tipos de corrosión.

En el caso de acero embebido en concreto, los diferentes tipos de corrosión que pueden presentarse son, Figura 3:

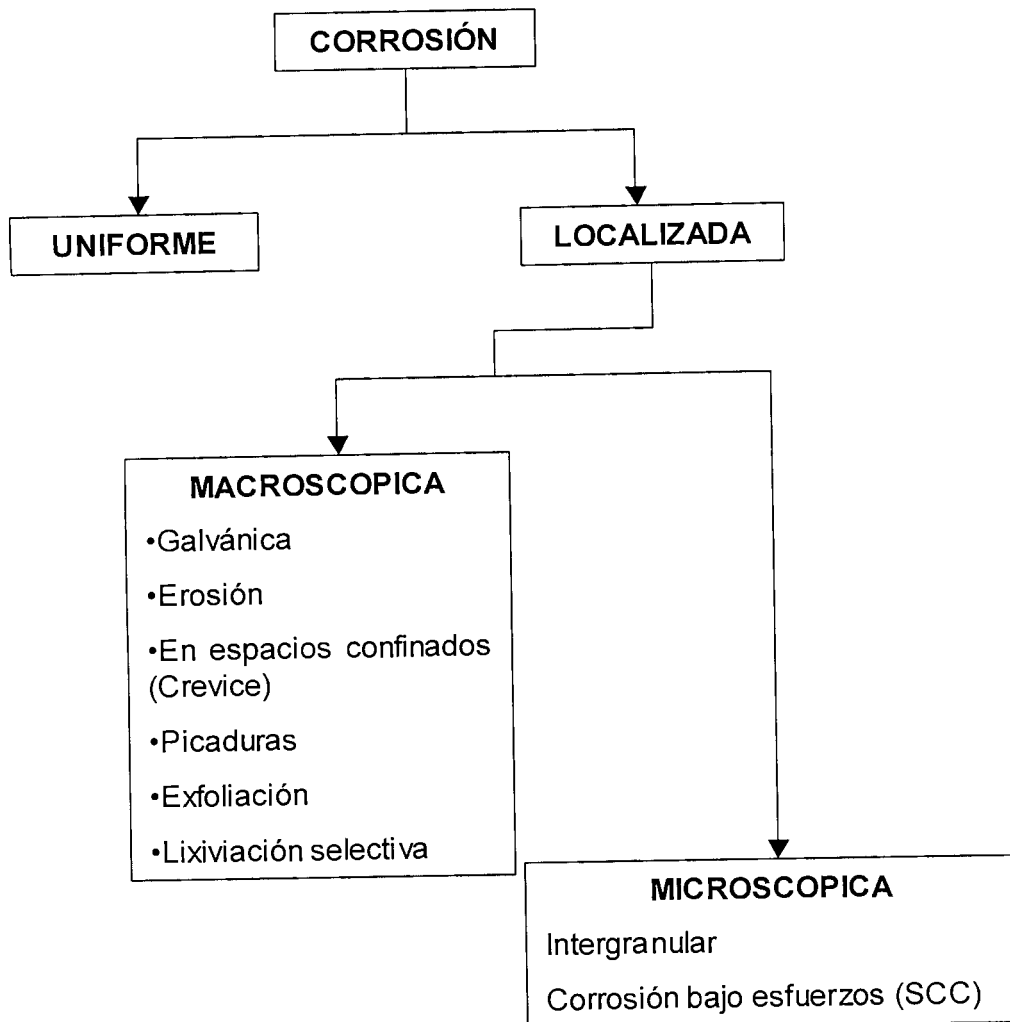


Figura 3. Diferentes formas de Corrosión (Henthorne, 1972).

- a. Corrosión Uniforme/Generalizada.
- b. Corrosión Localizada.
 - b.1. Corrosión por Picaduras.
 - b.2. Corrosión en Espacios Confinados (Crevice).
 - b.3. Corrosión bajo esfuerzos.
 - b.4. Corrosión por corrientes de interferencia (Parásitas).

b.5. Corrosión Galvánica.

a. Corrosión Uniforme/Generalizada.

La corrosión uniforme es el ataque más común, resultado de una pérdida generalizada de la película pasiva, por el efecto de la carbonatación del concreto y/o la presencia de iones cloruro, Figura 4 (Durar, 2000).

Clasificación de la corrosión uniforme

En términos generales, la corrosión uniforme se puede clasificar de acuerdo a las condiciones específicas del ataque ambiental o electroquímico. Por ejemplo, el adelgazamiento uniforme puede atribuirse a diferentes condiciones como:

- Corrosión atmosférica.
- Corrosión fase acuosa.
- Corrosión galvánica.
- Corrosión por corrientes parásitas.
- Corrosión biológica (es una forma de ataque causado por microorganismos que se puede manifestar como corrosión uniforme, formando óxidos débiles o catódicos, o también puede generar una forma localizada de ataque).
- Corrosión en sales fundidas y corrosión por metal líquido.
- Corrosión a altas temperaturas por gases, las condiciones para este tipo de corrosión no se restringen a adelgazamiento uniforme.

La selección de un metal con una resistencia adecuada al medio en el cual se utiliza, la aplicación de pinturas y otros tipos de recubrimientos protectores; son dos métodos comúnmente usados para controlar la corrosión uniforme. Otra opción es la modificación del medio, el cambio en la composición del ambiente, su concentración, pH, temperatura o por la adición de un inhibidor.



Figura 4. Corrosión uniforme (www.materialsengineer.com).

b. Corrosión Localizada.

b.1. Corrosión por Picaduras.

Estas picaduras se forman por la disolución localizada de la película pasiva que generalmente es el resultado del ingreso de iones cloruro al concreto, ya sea por el medio o porque fueron incorporados al concreto. Durante el fenómeno de corrosión se forma una celda donde existe un área pasiva intacta, cátodo, en la cuál se reduce el oxígeno y una pequeña área donde se ha perdido la película, ánodo, en la cuál ocurre la disolución del acero. Las picaduras formadas son autocatalíticas, ya que generan las condiciones necesarias y suficientes para su continuo crecimiento. Se ha reportado que en el ánodo se produce ácido, debido a que los iones cloruro favorecen la hidrólisis del Fe en agua para formar H^+ y Cl^- libre, provocando que disminuya el pH y los iones cloruro permanezcan en el medio para seguir interviniendo en el proceso de corrosión, Figura 5, (Durar, 2000).

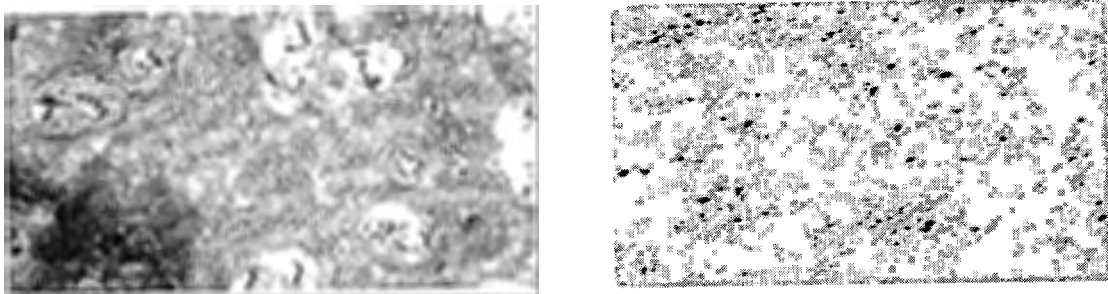


Figura 5. Corrosión por picaduras (www.materialsengineer.com).

b.2. Corrosión en Espacios Confinados (Crevice).

Este tipo de corrosión ocurre cuando en la superficie del metal existe un espacio lo suficientemente protegido que no permite el acceso continuo de oxígeno a esa zona, creándose celdas diferenciales de oxígeno que inducen la corrosión del refuerzo. Una de las posibles causas de este fenómeno es por la inyección de grietas (estructurales o de corrosión) con resina epóxica, donde el medio ha llegado al material de refuerzo, siendo esta zona donde se presenta la corrosión por la falta de oxígeno. Otra posible causa es la corrosión del acero de refuerzo con recubrimiento, esto ocurre cuando la adhesión entre el recubrimiento y el acero se ha deteriorado y hay presencia de iones cloruro en el concreto, este fenómeno aumenta, debido a que el pH dentro de este espacio confinado disminuye y la corrosión se acelera generando un proceso autocatalítico, Figura 6 (Durar, 2000).

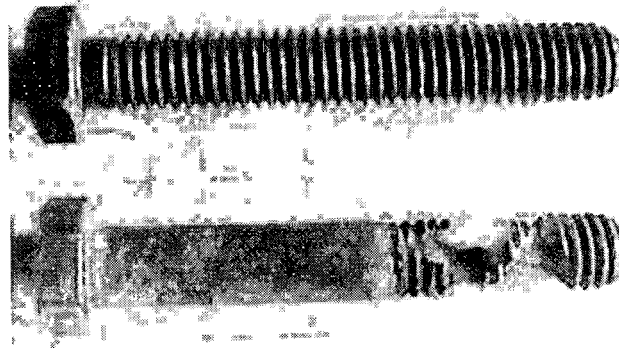


Figura 6. Corrosión en espacios confinados (www.corrosion-doctors.org).

b.3. Corrosión bajo esfuerzos.

Este fenómeno ocurre conjuntamente por los esfuerzos de tensión sobre el acero y un medio agresivo. Se presenta por la mala calidad del concreto, un mal llenado, o la presencia de determinados iones. Este daño es catastrófico porque se asocia con la pérdida de ductilidad y la fractura de la estructura. Figura 7.

Más adelante se profundiza en el tema (Durar, 2000).

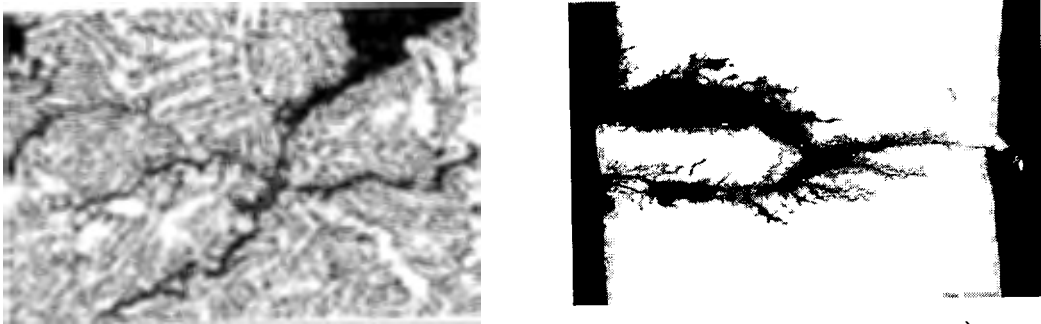


Figura 7. Corrosión bajo esfuerzos (www.materialsengineer.com).

b.4. Corrosión por corrientes de interferencia (Parásitas).

Las corrientes de interferencia se definen como las corrientes que fluyen en una estructura y que no forman parte del circuito eléctrico/celda electroquímica específica. Para que esto ocurra debe existir un intercambio de corriente entre una estructura metálica y un medio electrolítico. Si el acero se encuentra pasivado en el concreto o contaminado con cloruros, esta corriente no produce la corrosión del refuerzo, ya que lo mantiene pasivo o lo lleva a la zona de inmunidad. Si el concreto contiene cloruros, la corrosión del refuerzo se acelera drásticamente por el efecto de estas corrientes (Durar, 2000).

b.5. Corrosión Galvánica.

La corrosión galvánica o bimetálica, se da cuando existen dos metales diferentes en el medio electrolítico, como se observa en la Figura 8. En el caso del concreto reforzado, se da cuando en alguna zona se daña o no se forma la capa pasiva. Esta zona actúa como un ánodo ante el resto del material, donde permanece la pasivación, el cual actúa como cátodo. También se puede presentar cuando el refuerzo se encuentra en contacto con otros conductores más nobles. Generalmente, se asocia al funcionamiento de una macrocelda (Durar, 2000).

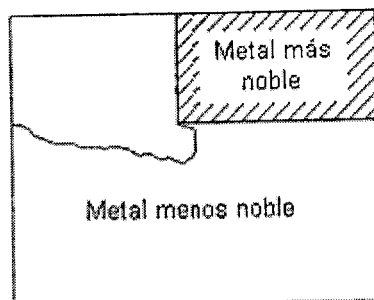


Figura 8. Corrosión galvánica (www.fisicanet.com.ar).

II.2.5 Métodos para prevenir la corrosión

Existen diferentes formas de prevenir el fenómeno de la corrosión en el acero, (Poblano, 2000):

- Protección catódica.
- Recubrimientos.
- Inhibidores.
- Selección de material para el concreto y el acero.

II.3. Mecánica de fractura

II.3.1. Generalidades sobre Mecánica de Fractura.

La fractura se define como la separación de un sólido por la acción de esfuerzos que provocan la formación de nuevas superficies. El proceso de fractura se puede dividir en tres etapas que son, (González, 1998):

- I. Iniciación o nucleación de grietas.
- II. Propagación de grietas.
- III. Separación final

Según la cantidad de deformación plástica previa a la fractura se clasifica en: dúctil y frágil. La fractura dúctil se identifica cuando existe previa deformación plástica, y frágil si existe poca o nula deformación antes de la fractura. El tipo de fractura depende del tipo de material, modo de carga y las condiciones del medio.

La falla que presenta una fractura dúctil es de tipo copa-cono, que se asocia con la formación de un cuello en una probeta de tensión. La fractura frágil se da por la rápida propagación de una grieta con la mínima absorción de energía y deformación plástica. La mayoría de las fracturas frágiles son transgranulares.

Las fracturas por la trayectoria de la grieta se clasifican en, (González, 1998):

- Intergranular (IG). La propagación de la grieta sigue los límites de grano.
- Transgranular (TG). La propagación de la grieta ocurre a través de los granos.

La mecánica de fractura es una herramienta que permite estimar de manera cuantitativa las propiedades en la fractura de los materiales con base en la composición química, microestructura, tamaño de defecto, estado de esfuerzos y ambiente expuesto. Así como predecir cuantitativamente la integridad de los componentes y estructuras de servicio. También estudia las relaciones cuantitativas entre los esfuerzos que provocan la fractura y las condiciones estructurales del cuerpo, tales como:

1. Propiedades mecánicas.
2. Geometría y dimensiones.
3. Estado de esfuerzos.
4. Tipo, orientación y tamaño de grietas.
5. Tipo de fractura.

La importancia del estudio de la fractura, radica en que con base en ella pueden diseñarse materiales más resistentes, puede determinarse el límite de tolerancia de grietas en estructuras y predecir su vida útil cuando ésta es determinada por la rapidez de crecimiento de las grietas (González, 1998).

II.3.2. Criterio de Energía

En 1920, Griffith reportó que la fractura es un proceso de transferencia de energía proveniente de la energía potencial almacenada por el cuerpo y que a su vez es producto de las cargas aplicadas, en otras palabras la grieta se propagará cuando la rapidez de liberación de energía elástica sea igual a la rapidez de creación de energía de superficie al crecer la grieta. Matemáticamente este criterio establece que si el cambio de energía con respecto a un crecimiento de grieta es cero, la energía suministrada y gastada están en equilibrio. El crecimiento de la grieta puede representarse por la siguiente expresión:

$$\frac{d\Delta U}{dC} = 0 \quad (1)$$

Este criterio está limitado, ya que no permite evaluar la energía de superficie de una fractura por lo que Irwin (1950) replanteó este criterio y propuso que la rapidez de liberación de energía de un cuerpo agrietado es igual a la resistencia a la fractura, esto es que la propagación de grieta sea espontánea.

La energía disponible del cuerpo agrietado bajo carga proviene de:

- El trabajo que realizan las tensiones sobre el cuerpo.
- La energía elástica almacenada en el cuerpo deformado.

Con base en esto en 1956, Irwin introdujo el concepto de liberación de energía (G), que es la cantidad de energía disponible durante la propagación de la grieta y se expresa como:

$$G = - \left(\frac{dU}{da} \right) \quad (2)$$

La fórmula 2 representa la energía que se libera en la propagación de la grieta a partir de la energía almacenada (González, 2004).

II. 3.3. Factor de Intensidad de Esfuerzos (K)

Para la mecánica de fractura lineal elástica existen tres modos básicos de desplazamiento al aplicar una carga, ver Figura 9. En la mayoría de los casos se presenta en el modo I pero también puede presentarse una combinación del modo II y III.

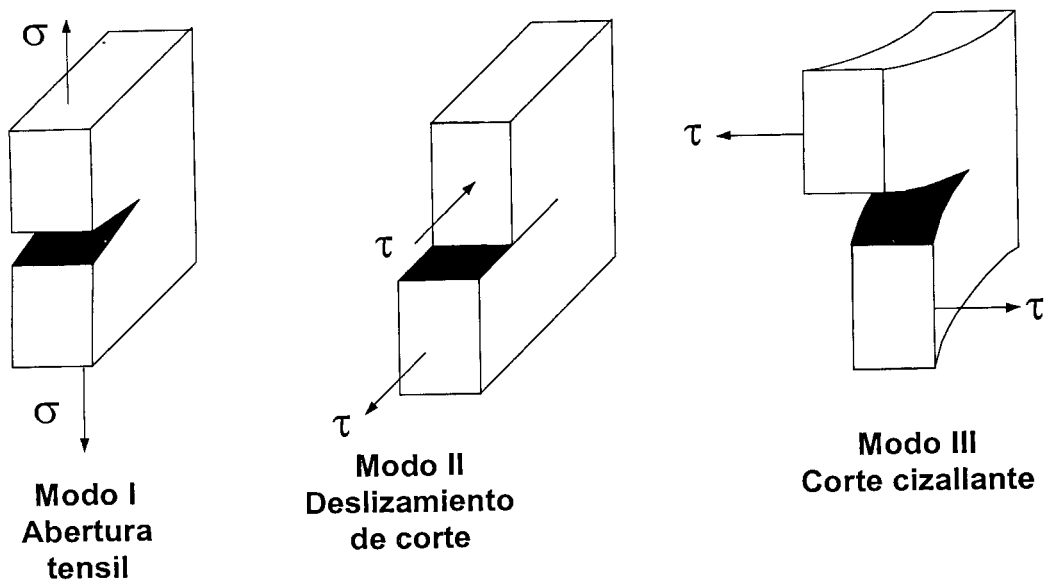


Figura 9. Modos de carga en un material agrietado (Anderson, 1991).

El factor de intensidad de esfuerzos es un parámetro que permite determinar el estado de esfuerzos en la punta de la grieta. Con este factor se obtiene el campo de esfuerzos de cada material, ver Figura 10, con lo cual se conoce su comportamiento en un medio, geometría, temperatura dada y con una deformación elástica. Las unidades comunes del factor de intensidad de esfuerzos (K) son $\text{MPa}(\text{m})^{1/2}$ (González, 2004).

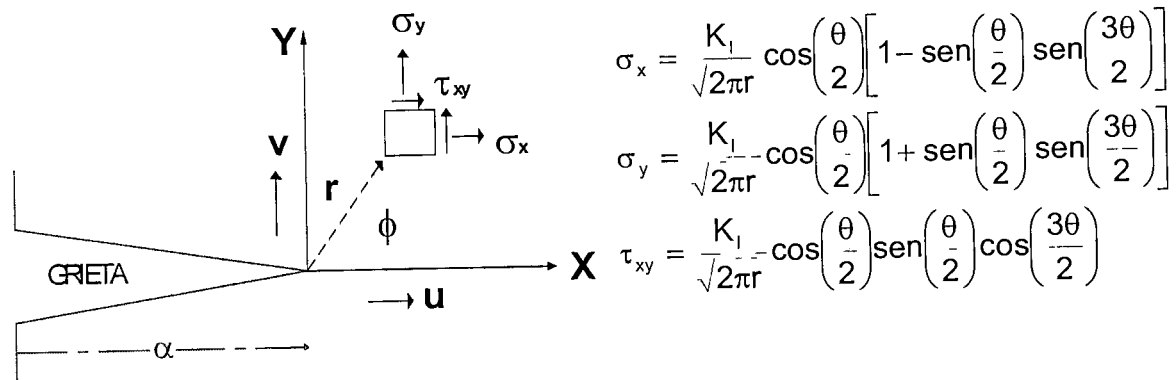


Figura 10. Campo de esfuerzos, sistema de coordenadas alrededor de una grieta (Anderson, 1991)

Al quedar definido el campo de esfuerzos se puede predecir el comportamiento de dos grietas diferentes, en materiales diferentes con cargas diferentes pero con el mismo valor de K, ya que será idéntico por tener el mismo campo de esfuerzos, sólo hay que considerar que deben tener el mismo desplazamiento y la deformación sea de tipo elástica (González, 2004).

II.3.4. Efecto del conformado mecánico en la fractura

Es frecuente encontrar que las propiedades mecánicas de productos metálicos trabajados, no son las mismas en todas las direcciones. La variación de las propiedades mecánicas con respecto a la orientación se llama anisotropía. Dos tipos de anisotropía son encontrados en metales: textura de deformación o anisotropía cristalográfica y textura mecánica, la primera resulta de la orientación preferente del grano debido a una deformación plástica severa. La segunda es debido a la alineación preferente de discontinuidades, tales como inclusiones, huecos, segregaciones y partículas de segunda fase en la dirección principal del trabajado mecánico. La dirección principal del trabajado se define como la dirección longitudinal, esto es, el eje más largo de una barra o la dirección de laminado en una lamina o placa. Las otras dos direcciones deben ser consideradas; la dirección transversal y la dirección corta. La dirección transversal es perpendicular a las direcciones longitudinal y corta. La dirección corta es la dimensión mínima del

producto, que es el espesor, ver Figura 11. Se ha encontrado que la resistencia a la fractura de un componente forjado puede ser mejorada considerablemente cuando las líneas de flujo por el forjado son orientadas paralelas a la trayectoria al esfuerzo mayor y normal a la trayectoria de una grieta potencial. En general, la tenacidad a la fractura es mayor en la dirección transversal, intermedia en la dirección longitudinal y menor en la dirección corta (Hertzberg, 1996). Así mismo, en la Figura 11 se representa el muestreo de las probetas de mecánica de fractura y de las pruebas de tensión, donde se observa que para un análisis se toman en cuenta las propiedades en direcciones contrarias, en otras palabras para analizar la probeta de mecánica de fractura en la dirección longitudinal se toman las propiedades mecánicas de la probeta de tensión en la dirección transversal y viceversa, la nomenclatura de las probetas nos indica la dirección de laminación (primera letra) y el crecimiento de grieta (segunda letra), (Broek, 1984).

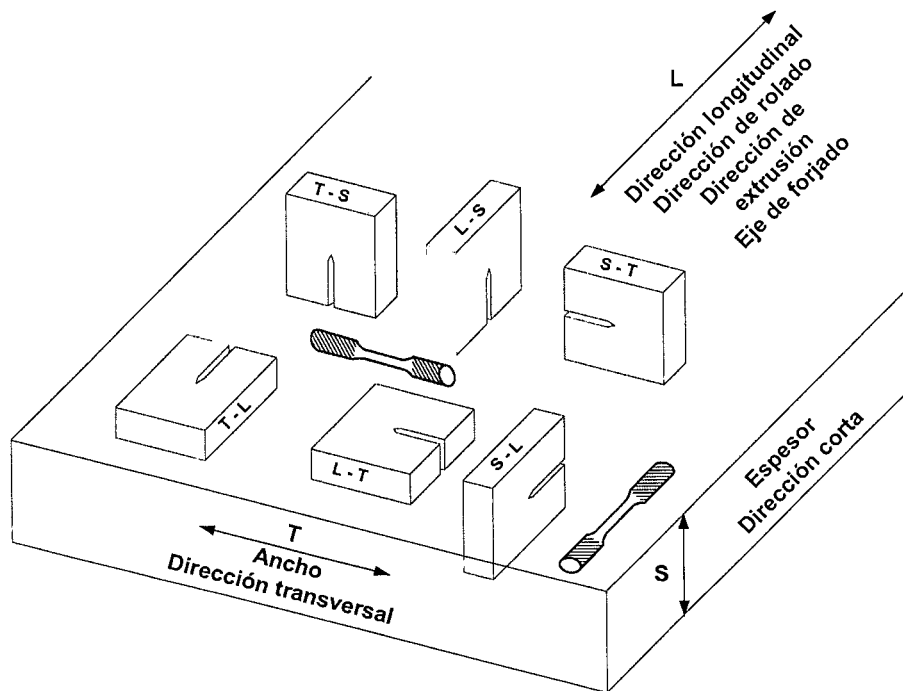


Figura 11. Dirección de las probetas de mecánica de fractura y de tensión (ASTM E399-05, 2005).

II.4. Corrosión bajo esfuerzos

II.4.1. Definición del K_{ISCC}

Un caso particular del efecto del medio sobre las estructuras es el tipo de falla conocido como corrosión bajo esfuerzos (SCC, por sus siglas en inglés), que se define como la interacción del ambiente y los esfuerzos de tensión presentes en una grieta para que esta se propague. El parámetro que permite conocer si en un material agrietado la grieta crecerá o no en un medio determinado es el factor de intensidad de esfuerzos umbral o límite (K_{ISCC}) (Anderson, 1991).

II.4.2. Modelos de agrietamiento para corrosión bajo esfuerzos

En la corrosión bajo esfuerzos, los mecanismos que explican la propagación de grieta se dividen en dos tipos: mecanismo anódico y mecanismo catódico. En el primer tipo la grieta crece debido a la remoción y disolución del material que se encuentra en la punta de la grieta. Esta disolución se debe a que los esfuerzos en la punta de la grieta rompen la película pasiva que protege el metal y acelera el proceso de disolución. El mecanismo catódico se debe principalmente a la fragilización por hidrógeno, que se debe a la absorción y difusión del hidrógeno en la punta de la grieta. En la Figura 12 se observan las reacciones que ocurren en la punta de la grieta (Jones, 1999).

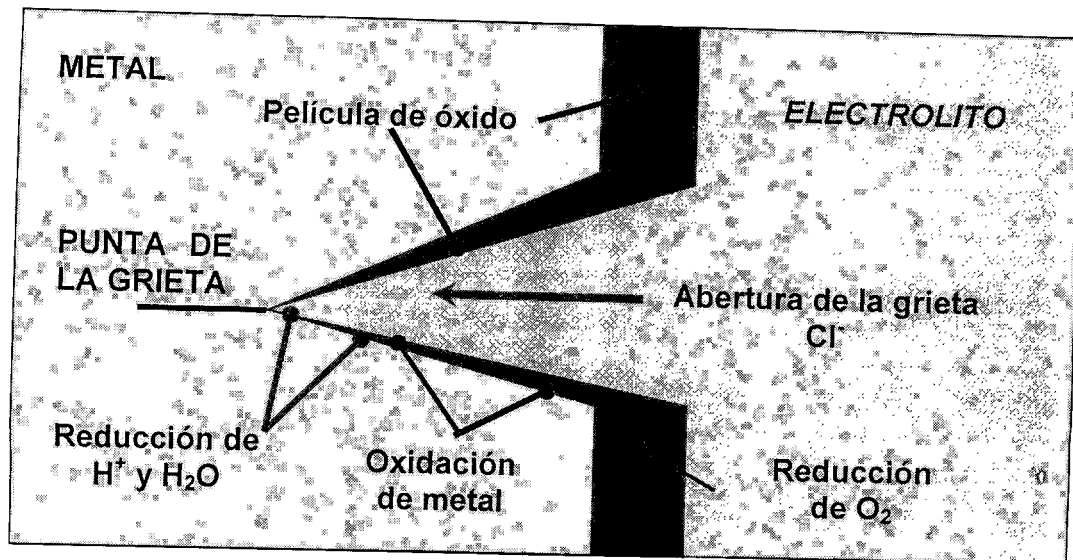


Figura 12. Reacciones que se llevan a cabo en la punta de la grieta (Aaltonen, 2002).

II.4.3. Efecto de las inclusiones en la fractura por corrosión bajo esfuerzos.

El proceso de fractura dúctil: iniciación, crecimiento y coalescencia de los micro huecos ocurren en las partículas de segunda fase (inclusiones), estas partículas juegan un papel importante en los procesos de fractura. Debido a que, si el material tiene muchas inclusiones el proceso de fractura se inicia ahí y es llevado a cabo a menores esfuerzos (Broek, 1984).

Otro de los efectos que provocan las inclusiones de sulfuro de manganeso (MnS) es en la formación de corrosión por picaduras, presentándose este tipo de corrosión en la interfase matriz-inclusión de MnS del acero. De esta manera la corrosión bajo esfuerzos puede iniciarse por medio de las picaduras que se forman durante la exposición del material al ambiente, debido a las inclusiones o al rompimiento de la película protectora. Electroquímicamente las picaduras se forman cuando se excede el potencial de picadura. Se ha visto que el potencial de corrosión bajo esfuerzos y el potencial de picadura son idénticos para aceros en soluciones de nitrito. En la Figura 13 se muestra una representación esquemática de la iniciación

y la propagación de la corrosión por picadura en las inclusiones de sulfuro de manganeso (Jones, 1999).

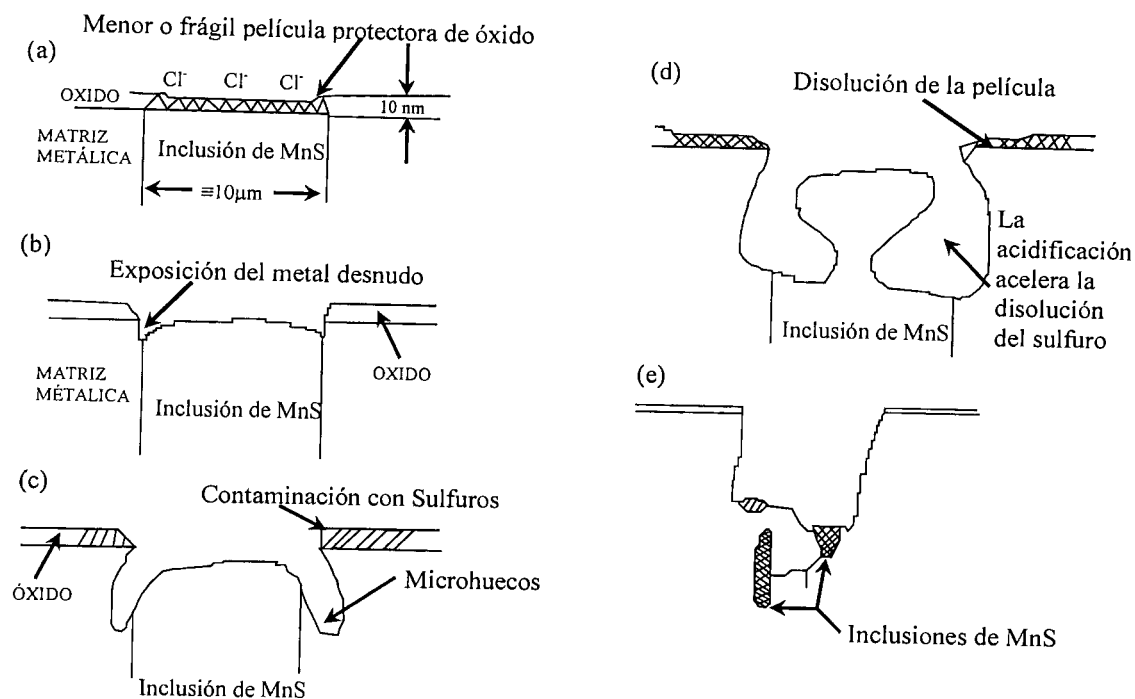


Figura 13. Representación esquemática de la iniciación y propagación de la corrosión por picadura en las inclusiones de MnS. (a) La disolución de la película sobre la inclusión promovida por: (1) la acción galvánica entre la película protectora de óxido a una baja conductividad y el óxido sobre la inclusión y (2) la adsorción preferencial de los iones cloruro. Ambos, el óxido débil y la inclusión son anódicas a la matriz metálica. (b) Disolución de las inclusiones de sulfuro. (c) Propagación por el ataque localizado. El metal desnudo llega a ser anódico a una menor conductividad de las inclusiones de MnS. (d) La acidificación por hidrólisis en la región tapada estimula la disolución de sulfuros y la propagación del ataque por picadura. (e) Propagación de las macro-picaduras (Mills, 2002).

III. HIPÓTESIS

Las pruebas de corrosión aceleradas dan resultados comparables a los resultados de las pruebas de corrosión a largo plazo.

Las propiedades de mecánica de fractura dependen del conformado mecánico y, por lo tanto, los valores mas pequeños de K_{ISCC} se obtienen en la dirección longitudinal que en la dirección transversal.

IV. OBJETIVOS

GENERAL

El objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología que permita conocer el efecto del medio corrosivo (agua de mar natural y agua de mar natural con Ca(OH)_2 , 50:50) en el agrietamiento del acero inoxidable 304 en pruebas aceleradas de corrosión bajo esfuerzos. Este efecto se evaluará conociendo la facilidad con que se agrieta la probeta a un factor de intensidad de esfuerzo determinado.

ESPECIFICOS

- Caracterizar el material, propiedades metalúrgicas y mecánicas.
Este objetivo permitirá conocer la microestructura y tratamiento térmico del material de llegada. Así como, el esfuerzo de fluencia y resistencia última.
- Diseñar las probetas de tensión y compactas de tensión.
Para poder realizar una prueba de mecánica de fractura es necesario conocer las condiciones de la prueba (procedimiento) y el tipo de probeta a utilizar.
- Diseñar y armar la celda de corrosión y los dispositivos de prueba.
Este dispositivo permitirá aplicar la fuerza a la probeta preagrietada por fatiga a desplazamiento constante y a su vez instrumentar la corriente para acelerar el proceso de agrietamiento bajo tensión. En esta celda se conocerá la fuerza aplicada por medio de extensómetros, se obtendrá una curva de calibración que permitirá conocer la relación entre la deformación obtenida por los extensómetros y la fuerza aplicada.
- Realizar pruebas para determinar el medio que simule el ambiente concreto-metal y conocer sus parámetros de prueba.
La velocidad de corrosión se estimará por medio de pruebas electroquímicas en los medios seleccionados. Estas pruebas indicarán el voltaje que se debe de aplicar en las probetas de mecánica de fractura para que inicie la corrosión y promueva el agrietamiento en cada medio.

V. METODOLOGIA

V.1. Materiales.

A continuación se muestra la lista de los materiales y equipos utilizados para la realización de este trabajo:

- Placa de acero inoxidable 304L, con 1/2 pulgadas de espesor.
- Agua de mar natural.
- Agua destilada.
- Ácido clorhídrico, HCl
- Glicerina
- Ácido nítrico, HNO₃
- Hidróxido de calcio, Ca(OH)₂
- Cloroformo, CHCl₃.
- Bujes de plástico nylamid.
- Barniz de uñas.
- Plastilina.
- Pintura de aceite.
- Acrílico para la fabricación de la celda.
- Cera de Campeche.
- Máquina servohidráulica Instron de 500 kN con celdas intercambiables de 10 y 100 kN. La máquina consta de tres partes:
 - Consola, donde la máquina se puede programar, y se pueden controlar las funciones que la máquina esta realizando.
 - Un marco de carga, en el cual se coloca la probeta a ensayar y consta de: cabezal, celdas de carga, mordazas y módulo de control.
 - Bomba de aceite, Figura 14.
- Analizador de Imágenes, Image Pro.
- Microscopio Metalográfico de platina invertida, modelo PMG3.
- Microscopio Estereoscopio, marca Olympus.
- Durómetro HOYTOM (escalas Rockwel C, A, Brinell y Vickers con identador de cono de diamante de 120° e identador de bola de 2,5 mm).

- Montadora hidráulica, modelo Hidropress, marca Jean Wirtz.
- Pulidora de mesa de disco doble, modelo TG 250, marca Jean Wirtz.
- Cortadora manual de disco sumergible marca Jean Wirtz.
- Extensómetros para pruebas de tensión y de mecánica de fractura, marca Instron.
- Vernier digital de seis pulgadas de longitud, marca Mitutoyo
- Galgas extensométricas.
- Potenciostato ACM.
- Electrodo de referencia saturado de calomel ($\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2$).
- Dos multímetros.
- Fuente de Poder Hewlett Packard de 0-60 V y 0-15 A.
- Indicador de deformaciones Modelo PB 3500.
- Contraelectrodo: una aguja.

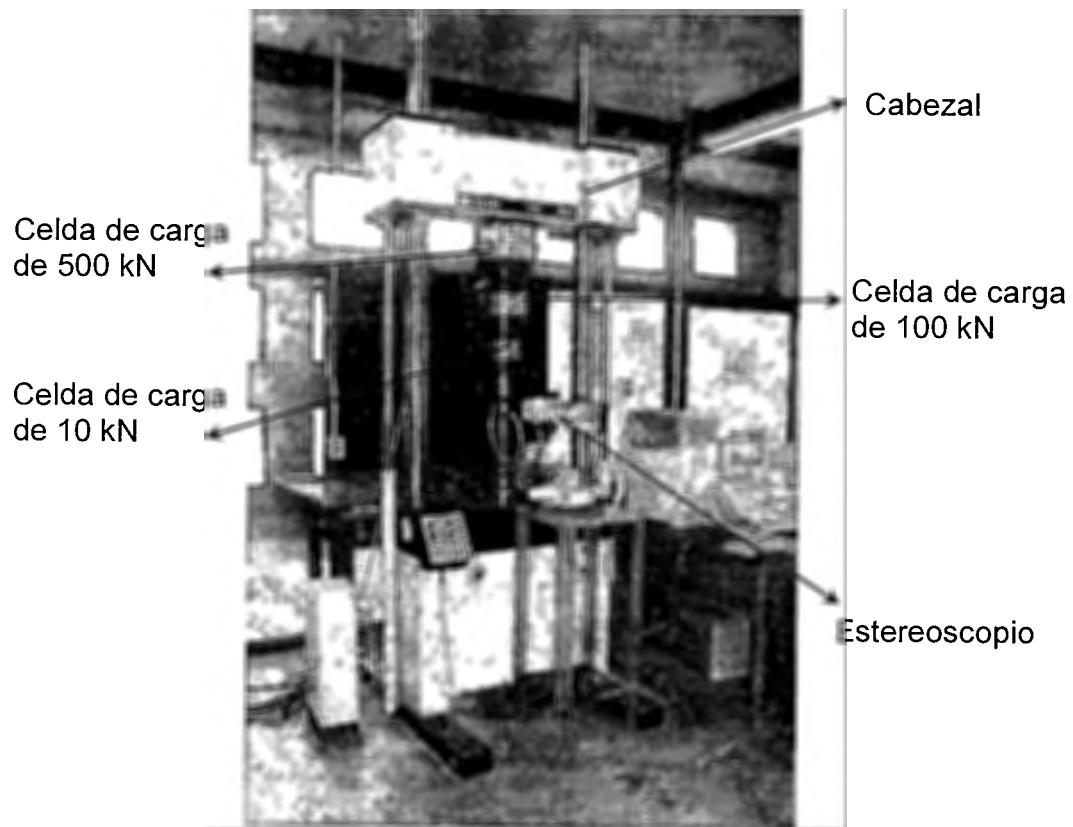


Figura 14. Máquina Instron ubicada en las instalaciones del Instituto Mexicano del Transporte.

V.2. Métodos.

Para realizar las pruebas de tensión y caracterizar el material para conocer sus propiedades mecánicas se utilizó la norma ASTM E 8M-00, conforme a esta norma se diseñaron las probetas de tensión en ambas direcciones; transversal y longitudinalmente.

Con base en la norma ASTM E 399-05 se diseñaron las probetas de mecánica de fractura en las direcciones transversal y longitudinal; también se diseñaron las mordazas conforme a esta norma.

Se realizaron pruebas aceleradas de corrosión bajo esfuerzos (SCC) con base en la norma ASTM E 1681-99. el valor de K_{ISCC} se determina cuando la velocidad de crecimiento de grieta sea equivalente a la velocidad de crecimiento de grieta de 10 000 horas en pruebas de corrosión a largo plazo.

V.3. Diseño experimental.

En la Figura 15 se muestra el desarrollo experimental planteado para la realización de este experimento, más adelante se explica con detalle cada paso a realizar.

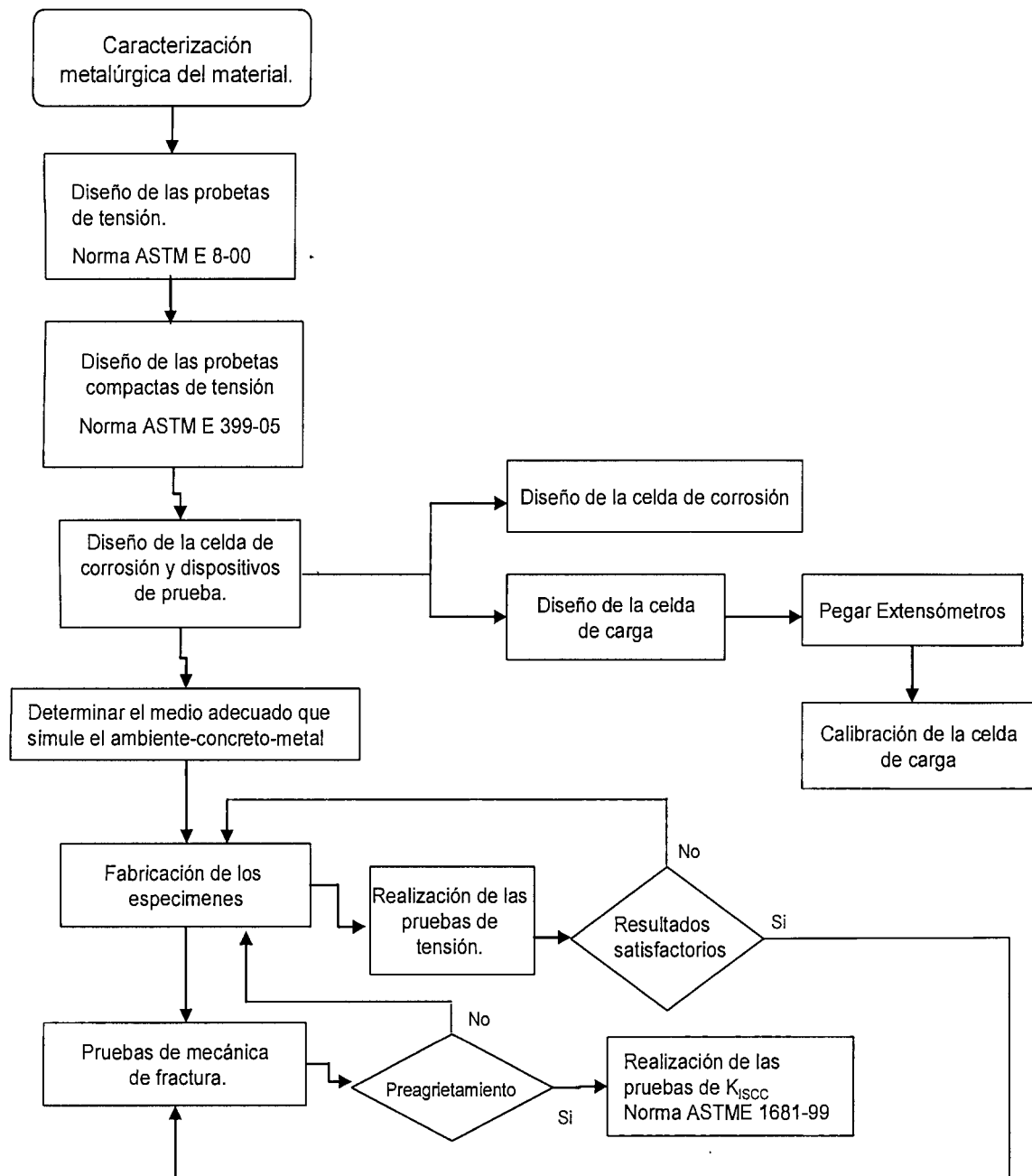


Figura 15. Diagrama de Flujo del diseño experimental a desarrollar.

V.3.1. Caracterización metalográfica.

Se realizó la caracterización del acero inoxidable para conocer sus propiedades metalúrgicas de acuerdo a las normas NMX-B-079-1977 (preparación metalográfica) y NMX-B-326-1968 (composición química de los aceros inoxidables). La caracterización del material consistió en: análisis metalográfico, composición química y medición de dureza, para esta última se tomó una muestra de acero inoxidable, se montó en baquelita a una presión de 90 bar durante 15 minutos en una montadora hidráulica, se desbastó y se midió dureza Brinell con el durómetro Hoytom, se realizaron cuatro mediciones.

Para realizar la caracterización metalográfica, se atacó la muestra de acero inoxidable con gliceregia, preparada con 3 mL de HCl, 1 mL de HNO₃ y 2 mL de glicerina.

V.3.2. Pruebas de tensión.

Las probetas de tensión se diseñaron, como lo muestra la Figura 16, con base en la norma ASTM E 8M-00, las dimensiones están dadas en milímetros. Se diseñaron cinco probetas en la dirección longitudinal y cinco en dirección transversal. Las pruebas de tensión también se realizaron de acuerdo a la norma ASTM E 8M-00 a una velocidad de carga de 7 MPa/s y en una máquina Instron 8503, dicha norma marca un intervalo de velocidad de aplicación de esfuerzos de 1,15 a 11,5 MPa/s.

Se calculó el área de la probeta de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$A = \frac{\pi}{4}(D)^2 \quad (3)$$

donde:

A = área de la probeta de tensión, en milímetros.

D = diámetro de la probeta, en milímetros.

La fuerza aplicada se calculó con la siguiente fórmula:

$$F = V_{\sigma} \times A \times t \quad (4)$$

donde:

F = fuerza aplicada en la máquina Instron, en Kgf/s

V_{σ} = velocidad de carga, en MPa/s

t = tiempo, en segundos

En la Figura 17 se muestra cómo fue montada la probeta para la realización de las pruebas, la longitud calibrada fue de cinco veces el diámetro de la probeta, se marcó esta longitud con un marcador, se colocó el extensómetro en la zona calibrada para medir cuánto se alarga. Se diseñaron dispositivos para sostener la probeta en las mordazas y llevar a cabo la prueba, como se ve en la Figura 17.

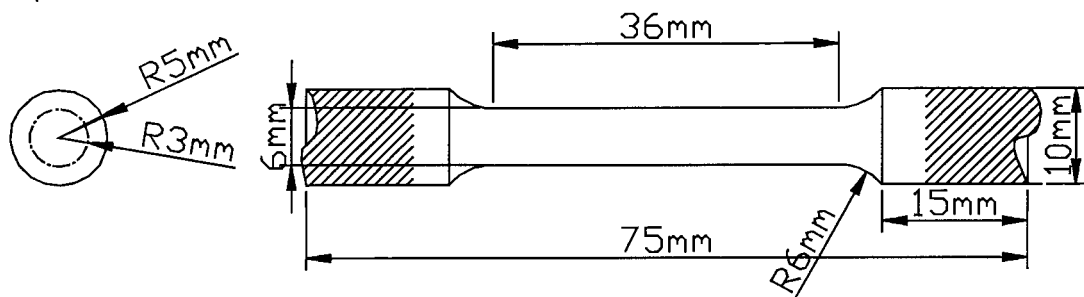


Figura 16. Dibujo de las dimensiones de la probeta de tensión.

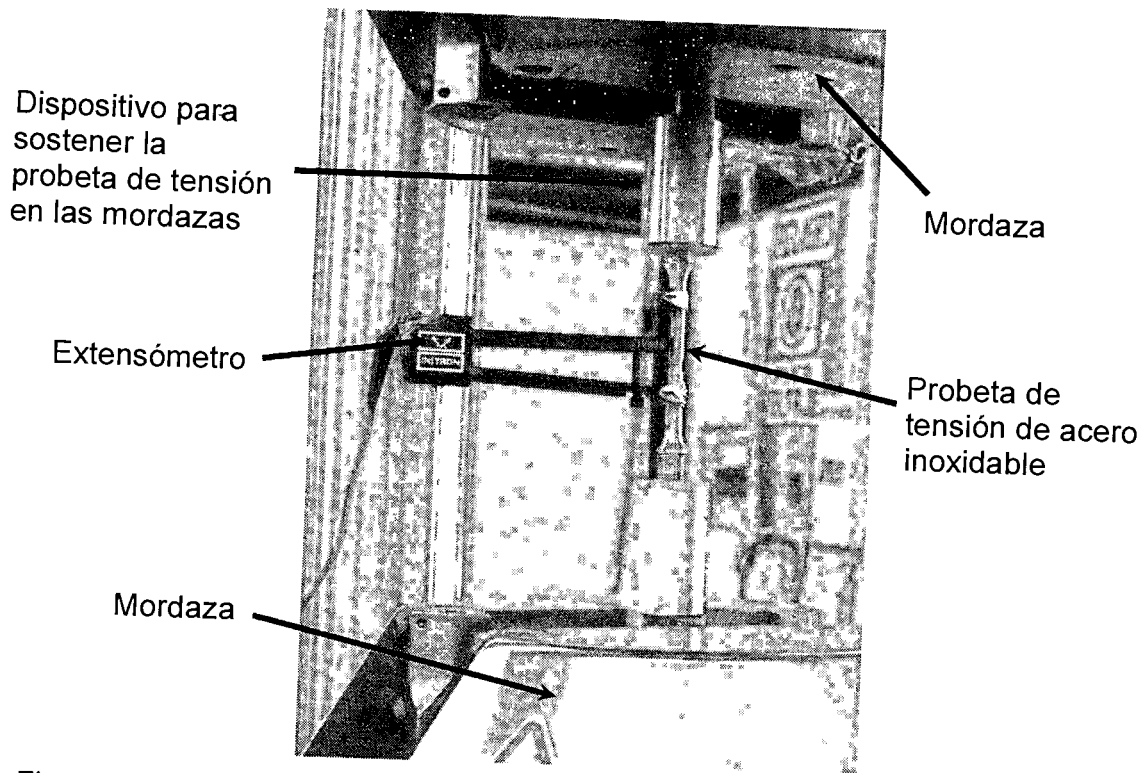


Figura 17. Prueba de tensión llevada a cabo en la máquina Instron (Fotografía tomada por el autor).

Para medir el alargamiento de la probeta se utilizó el extensómetro, el desplazamiento del extensómetro se midió en milímetros (mm). Con los datos proporcionados por la máquina, de las pruebas de tensión, se obtuvo la curva ingenieril esfuerzo (σ) contra deformación (ϵ). Posteriormente con el método paralelo se obtuvo el punto de cedencia (σ_0) y posteriormente se calculó el esfuerzo último (σ_u) y el módulo de Young (E).

Para calcular el punto de cedencia de la curva esfuerzo-deformación se utilizó el criterio del 0,2% también conocido como "offset", de acuerdo a la norma ASTM E 8M-00. Se determinó, el punto de cedencia, con la intersección de una línea recta paralela a la línea elástica, que sale de una deformación de 0,2%, es decir tiene que haber un desplazamiento de 0,002 en la deformación. En la Figura 18, se

marca un punto m igual al 0,2%, se dibuja una línea mn paralela a OA y se localiza r , que es la intersección de mn con la gráfica de esfuerzo-deformación y ese es el punto de cedencia (σ_0), el punto R es el esfuerzo último (σ_u).

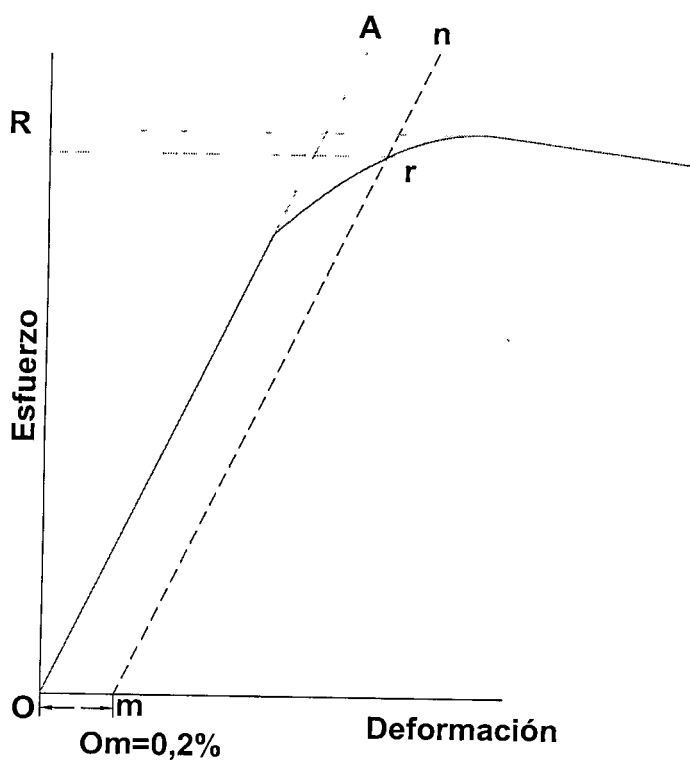


Figura 18. Diagrama de esfuerzo-deformación para determinar el esfuerzo de cedencia por el método del 0,2% (ASTM E 8M-00, 2000).

De las gráficas obtenidas de las pruebas de tensión se obtuvieron los datos mostrados en la Figura 19.

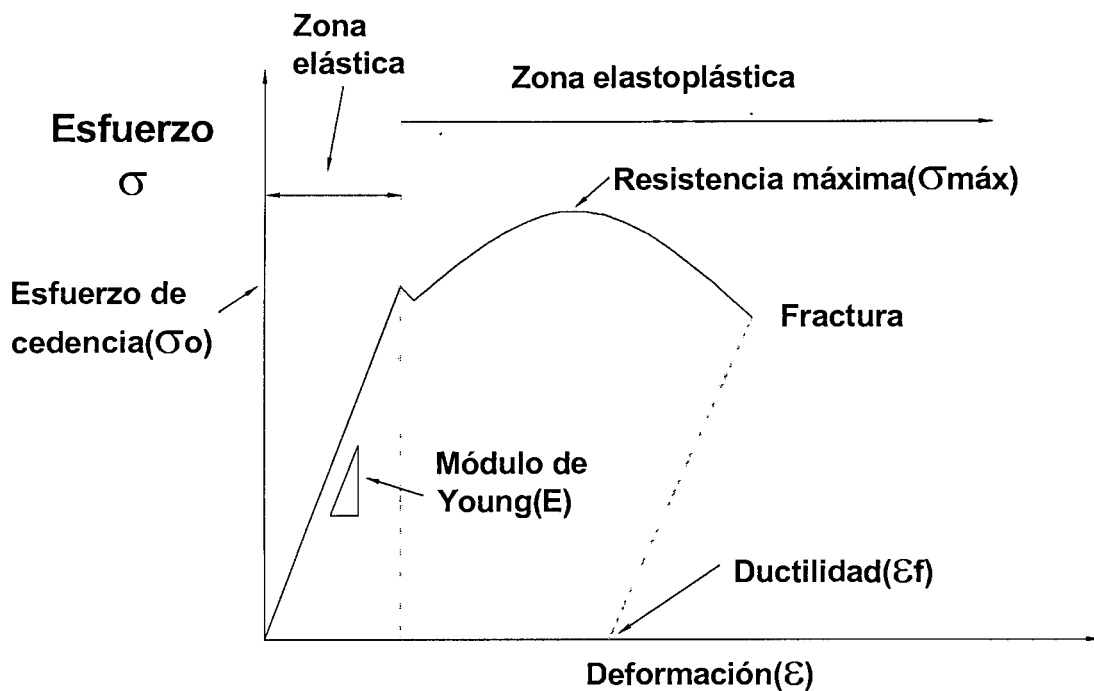


Figura 19. Esquema típico de esfuerzo-deformación de un ensayo de tensión (González, 2004)

El porcentaje de elongación de las probetas se midió de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\% e = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100 \quad (5)$$

Donde:

% e = Porcentaje de elongación.

Lf = Longitud final de la probeta, después de concluida la prueba.

Lo = Longitud inicial de la probeta.

Se midió la reducción de área de las probetas con el analizador de imágenes y el microscopio estereoscópico, tanto de la copa como del cono, de esta manera se calculó el porcentaje de reducción de área que tiene el material. Se realizaron siete mediciones de diámetros tanto de la copa como del cono y el promedio de estas

mediciones se utilizó para calcular el porcentaje de reducción de área de acuerdo a la formula:

$$\% \text{ de Reducción de área} : \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100 \quad (6)$$

donde:

A_o = Área inicial

A_f = Área final

V.3.3. Pruebas de corrosión bajo esfuerzo.

V.3.3.1. Diseño de mordazas.

Se diseñaron las mordazas para colocar las probetas de mecánica de fractura y realizar las pruebas aceleradas de corrosión bajo esfuerzos. Con base en la norma ASTM E 399-05. En la Figura 20 se muestran las dimensiones y el diseño de las mordazas.

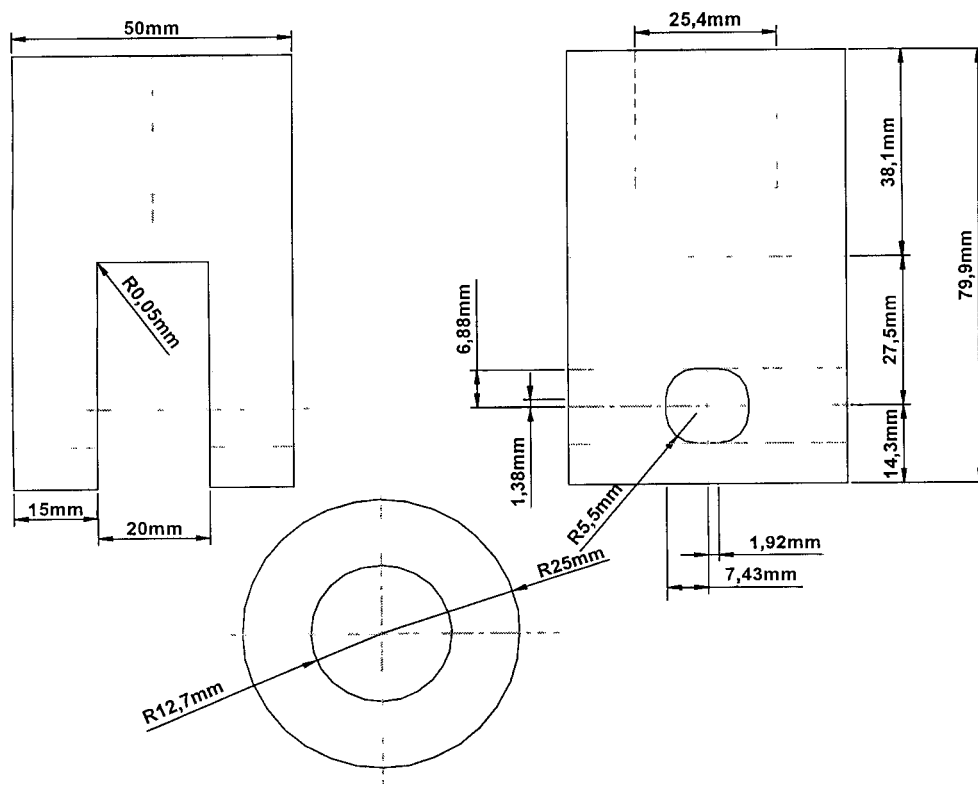


Figura 20. Diseño de las mordazas para las pruebas de corrosión aceleradas.

V.3.3.2. Celda de carga.

El experimento incluyó el diseño de una celda de carga, instrumentada con extensómetros de 120 ohms. Los extensómetros adheridos al material de acero actúan como transductores, ya que transforman una variación de una magnitud mecánica experimentada en el material, en una variación de una magnitud eléctrica, ya que un extensómetro es una resistencia eléctrica la cual es alimentada con un voltaje de excitación constante de 2,5 volts. La celda fue utilizada en las pruebas aceleradas de corrosión bajo esfuerzos, se calibró en la máquina Instron. La calibración consistió en aplicar una carga conocida y registrar la deformación unitaria producida en el material, de manera tal, que al colocar la celda de carga entre las mordazas y posteriormente someterla a tensión da información directa de la fuerza que esta siendo aplicada.

En la Figura 21 se observa la celda de carga instrumentada con cuatro extensómetros para formar un circuito eléctrico conocido como puente de Wheatstone completo, se decidió utilizar la configuración de cuatro extensómetros para tener una mayor sensibilidad y un mejor comportamiento cuando se presentan variaciones en la temperatura.

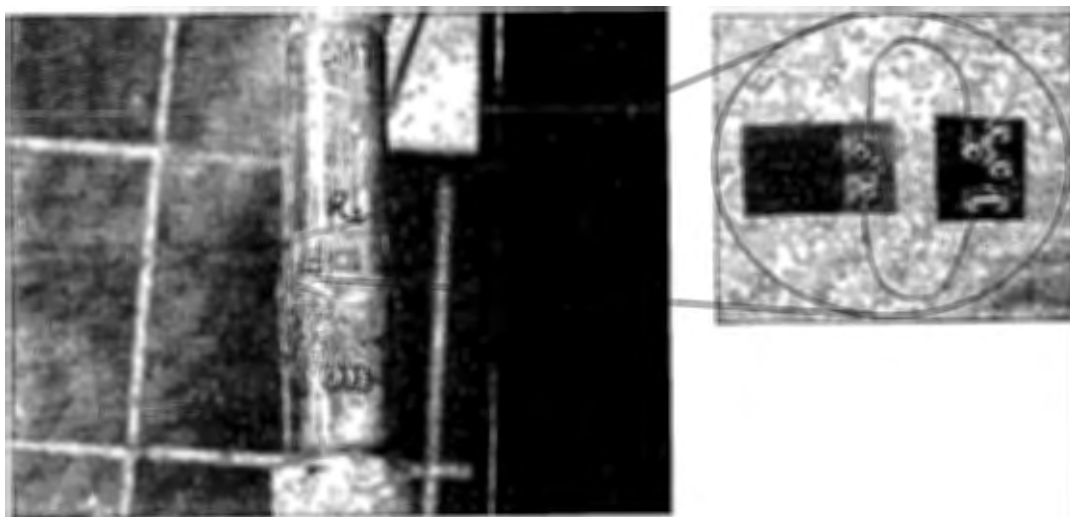


Figura 21. Celda de carga y extensómetros (fotografía tomada por el autor).

En la Figura 22 se muestra el diagrama eléctrico del puente completo de Wheatstone que fue utilizado en la celda de carga, este consta de cuatro extensómetros activos que son alimentados con un voltaje de excitación E_e , cuando se presenta un cambio en la resistencia de uno o varios de los extensómetros S es posible medir la variación del voltaje en E_s .

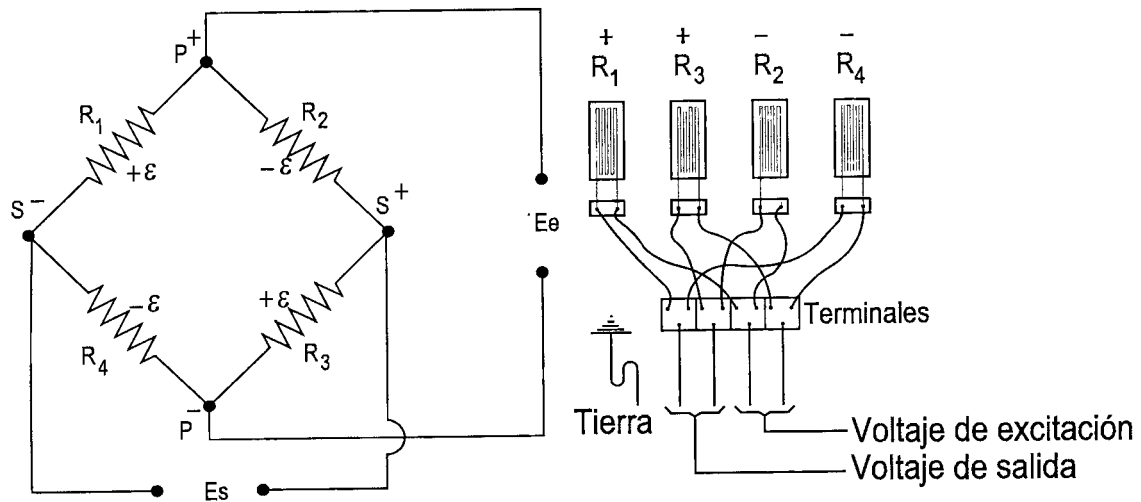


Figura 22 Puente de Wheatstone completo (Hannah, 1992).

Una vez colocada la celda de carga entre el espécimen de prueba, ésta se tensa manualmente y se procede a realizar un balanceo eléctrico a cero mediante un indicador de deformaciones ver Figura 23, para posteriormente tensar la probeta con una llave mecánica hasta lograr aplicar las cargas de 13 y 20,8 kN.

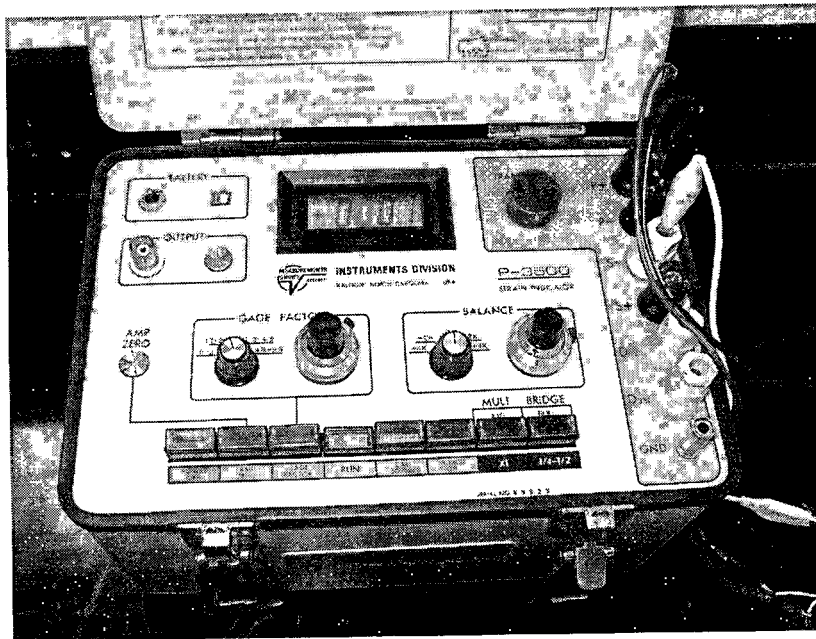


Figura 23. Indicador de deformaciones empleado, tomada en las instalaciones del Instituto Mexicano del Transporte.

V.3.3.3. Pruebas Electroquímicas.

Se realizaron pruebas electroquímicas (Tafel), con el Potenciostato ACM, en los cuatro medios de interés ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ 1M + agua de mar, 50:50, NaCl + $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 1M, 50:50, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 1M y agua de mar): Las pruebas requieren del uso de una celda de acrílico, de 6,1 x 11,5 x 6,1 cm, que tiene un orificio de 1 cm de diámetro por donde la muestra de acero inoxidable se expuso al medio corrosivo, de esta manera se determinó el medio más corrosivo y el potencial de picadura al cual se presentó el crecimiento de la picadura y la corrosión en la grieta avance.

Antes de colocar la muestra en la celda de acrílico se desbastó y pulió a espejo para apreciar claramente la corrosión, cabe destacar que a esta prueba no se le aplicó carga, sólo fue una prueba de corrosión acelerada. En esta prueba se utilizó un electrodo de referencia de Calomel para determinar el potencial de picadura y un contra electrodo de grafito, además del acero inoxidable.

V.3.3.4. Pruebas de K_{ISCC}

Esta prueba se basa en la norma ASTM E 1681-99. "Standard Test Method for Determining Threshold Stress Intensity Factor for Environment-Assisted Cracking of Metallic Materials".

El objetivo de esta norma es determinar el factor de intensidad de esfuerzos en un ambiente acuoso o agresivo para materiales metálicos sometidos a carga constante, con probetas preagrietadas por fatiga y de suficiente espesor.

La norma recomienda utilizar probetas compactas de mecánica de fractura, preagrietadas, y el diseño de estas se basa en otras normas como la ASTM E 399-05. Según la norma, la probeta se debe colocar en un dispositivo que contenga una celda la cual debe tener un electrolito que simule un ambiente agresivo, la zona de la pregrieta debe estar en contacto con el ambiente y las probetas estarán sometidas a carga o desplazamiento constante. Las probetas se sostendrán con unas mordazas en los extremos a un soporte rígido, en un extremo de la probeta, se aplicará la carga. Para este trabajo se propuso una modificación, estas pruebas fueron aceleradas, suministrando corriente a la probeta a ensayar. De acuerdo a la norma se formará una celda electroquímica, que requiere un electrodo auxiliar (puede ser grafito), un electrodo de referencia y un electrodo de trabajo, esta celda se empleo para ajustar el potencial deseado en la prueba, se deberá tener cuidado con los productos de corrosión ya que podrían interferir con los resultados por eso se recomienda limpiar constantemente la celda. La prueba se realizó hasta que ocurrió la fractura o se observó el crecimiento de grieta subcrítico en la muestra o por un período de tiempo pre-establecido, como lo indica la norma ASTM 1681-99:

Material	Tiempo
Aceros($\sigma_y < 1\ 200$ MPa)	10 000 horas
Aceros ($\sigma_y > 1\ 200$ MPa)	5 000 horas
Aleaciones de aluminio	10 000 horas
Aleaciones de titanio	1 000 horas

Aunque la duración de la prueba dependerá también de que tan agresivo es el ambiente en el que se realice.

Los parámetros del ambiente son importantes en las pruebas de K_{EAC} o K_{IEAC} ; por lo tanto, se requiere un monitoreo cuidadoso para controlar la solución. La temperatura, pH, conductividad, contenido de oxígeno disuelto, y potencial del electrodo, estas son las variables que pueden afectar los procesos de crecimiento de grieta. Para las pruebas que incluyen soluciones de cloruro de sodio, se recomienda reemplazar la solución de prueba semanalmente. Puede ser necesario proporcionar un sistema de circulación para asegurar un nivel constante de aireación en la solución.

Para que los resultados sean válidos, de acuerdo a este método de prueba, se requiere que la muestra sea elástica en comportamiento y que uno o más de los siguientes criterios sean satisfechos: se requiere que B , a_0 y $W-a_0$ sean igual o mayor a $2,5 (K_{IEAC}/\sigma_{YS})^2$. Para las mediciones de K_{EAC} , se requiere que $W-a_0$ sea igual o mayor a $(4/\pi)(K_{IEAC}/\sigma_{YS})^2$. Para las muestras compactas, se recomienda que la longitud de la grieta (longitud total desde la muesca maquinada a la pregrieta por fatiga) sea entre $0,45$ y $0,55 W$.

Los resultados obtenidos permiten calcular el factor de intensidad de esfuerzos límite (K) mediante la fórmula:

$$K = \left[\frac{P}{B\sqrt{W}} \right] \times f\left(\frac{a_0}{W}\right) \quad (7)$$

donde:

$$f\left(\frac{a_0}{W}\right) = \frac{\left(2 + \frac{a_0}{W}\right)}{\left(1 - \frac{a_0}{W}\right)^{3/2}} \left[0,886 + 4,64\left(\frac{a_0}{W}\right) - 13,32\left(\frac{a_0}{W}\right)^2 + 14,72\left(\frac{a_0}{W}\right)^3 - 5,6\left(\frac{a_0}{W}\right)^4 \right] \quad (8)$$

a_0 = tamaño de grieta inicial,

W = ancho de la muestra,

P = carga,

B = espesor de la muestra,

$f\left(\frac{a_0}{W}\right)$ = factor de forma

Esta expresión es para un valor de K válido de a_0/W de $0,2$ a 1

V.3.3.4.1. Diseño y preagrietamiento de probetas compactas de tensión.

Se diseñaron las probetas de mecánica de fractura del tipo compactas de tensión (CT), de acuerdo a la norma E 399-05. En la Figura 24 se muestran las dimensiones de dichas probetas. Se hicieron cinco en la dirección longitudinal y cinco en la dirección transversal, las probetas se identificaron con LK#, esto indica que es una probeta longitudinal para realizar una prueba de K y el # indicaba el número de la probeta y TK#, indicando que es una probeta transversal para realizar una prueba K y con el número respectivo. Se realizaron las probetas en ambas direcciones para observar el efecto que tiene el conformado mecánico. Originalmente la longitud de la muesca era de 19,25 mm, 3 de las probetas tuvieron una muesca de esa longitud, pero se les hizo una modificación a las probetas restantes quedando de 26,5 mm de longitud de muesca que es como se muestra en la Figura 24.

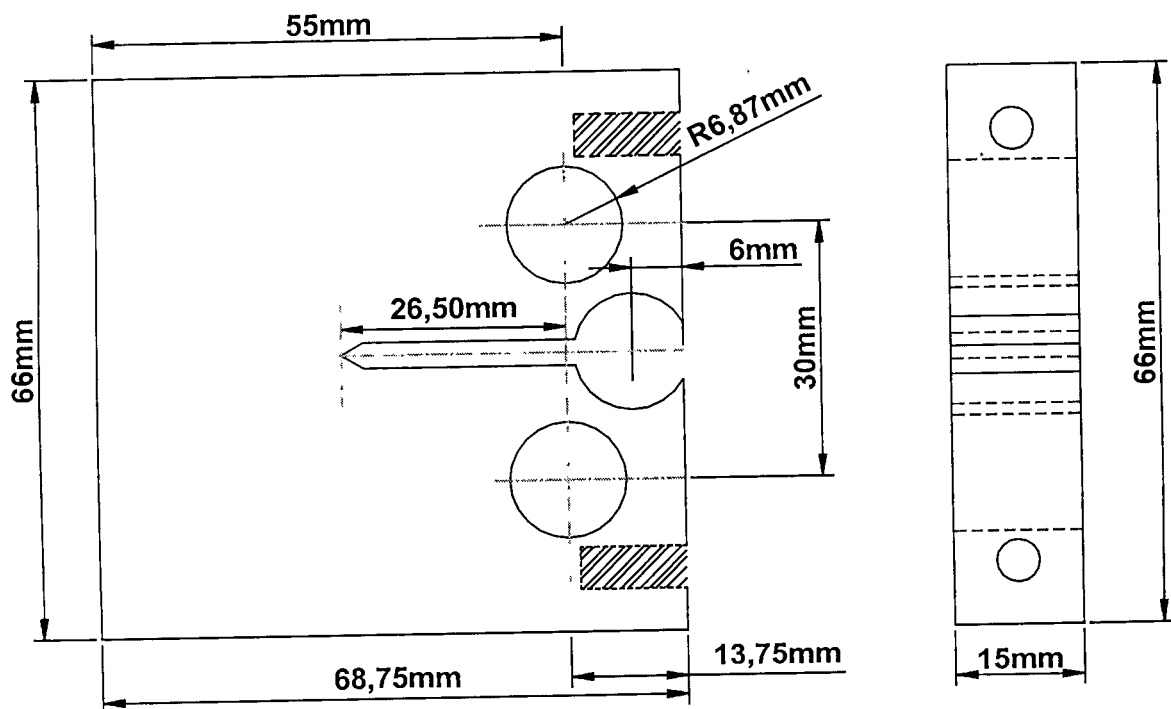


Figura 24. Dibujo del diseño de las probetas de mecánica de fractura (compactas de tensión).

Las probetas se preagrietaron hasta que la relación $a/W = 0,5$ en la máquina Instron a un ΔK constante de $20 \text{ MPa m}^{1/2}$. El extensómetro se calibró a una abertura de 10 mm y posteriormente se montó la probeta, se ingresaron los siguientes datos al programa da/dN que fue el utilizado para preagrietar: espesor de la probeta (B), ancho de la probeta (W) y extensión de la grieta inicial (a_0) que en este caso correspondió al tamaño de la muesca inicial, a la vez se ingresó el módulo de Young obtenido en las pruebas de tensión, la pregrieta se realizó a K constante que fue de $20 \text{ MPa(m)}^{1/2}$, se utilizó un valor de relación de cargas, R, de 0,1, que es el valor óptimo para el preagrietamiento. El valor de la pregrieta debe de estar en el intervalo de $0,45 \leq a/W \leq 0,70$, utilizando el valor promedio que es $a = 0,55W$, aproximadamente 3 mm de pregrieta.

Es importante aplicar una precarga antes de preagrietar para evitar una sobrecarga en el material y que la punta de la grieta se deformara plásticamente, en otras palabras que se achate. También es importante calcular la carga máxima y mínima que soporta el material para ingresarlos al programa como límites. Los cálculos de la carga máxima se realizaron con el despeje de ΔP en la formula 7, con los datos de la probeta iniciales.

Una vez calculado el ΔP , se calculó la carga máxima (P_{\max}) que se aplicó a la probeta durante el preagrietamiento, así como la carga mínima (P_{\min}) cuyas fórmulas se presentaran a continuación:

$$P_{\max} = \frac{\Delta P}{1-R} \quad (9)$$

Donde R es la relación de cargas, en nuestro caso 0,1

$$P_{\min} = RP_{\max} \quad (10)$$

Posteriormente se calculó la precarga:

$$\text{Precarga} = \frac{P_{\max} + P_{\min}}{2} \quad (11)$$

Se activaron los límites de carga, máxima y mínima, y los del extensómetro, como medidas de seguridad para la máquina y la probeta, una vez activados estos límites se aplicó la precarga y se pasó a control de carga y se ejecuto el programa para preagrietar por fatiga. Este procedimiento se aplicó de acuerdo a la teoría de la

mecánica de fractura, en la que se parte del supuesto que el material ya tiene un defecto.

V.3.3.5. Montar prueba.

Una vez preagrietadas las probetas se colocaron en la celda de corrosión, de 29,8 x 16,2 x 17,7 cm, con un dispositivo de carga, el cual contenía deformímetros (strain gauges) para medir la carga. Se les aplicó fuerza a las probetas preagrietadas hasta un valor de $55 \text{ MPa m}^{1/2}$ manteniendo el desplazamiento de la abertura de la grieta constante para que el valor de K disminuyera cuando la grieta se propagara. Al aplicarle la fuerza se midió la abertura de la probeta en la máquina Instron con la ayuda del extensómetro para medir la abertura, se calibró el extensómetro a una distancia de 10mm con el vernier, ver Figura 25 y posteriormente se colocó el extensómetro en la abertura de la probeta para determinar la abertura inicial sin carga y posteriormente con carga, ver Figura 26.

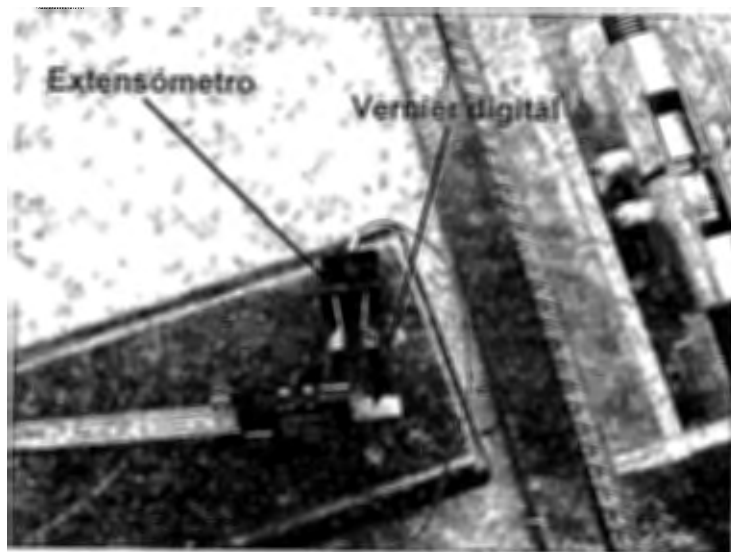


Figura 25. Calibración del extensómetro (Fotografía tomada por el autor).

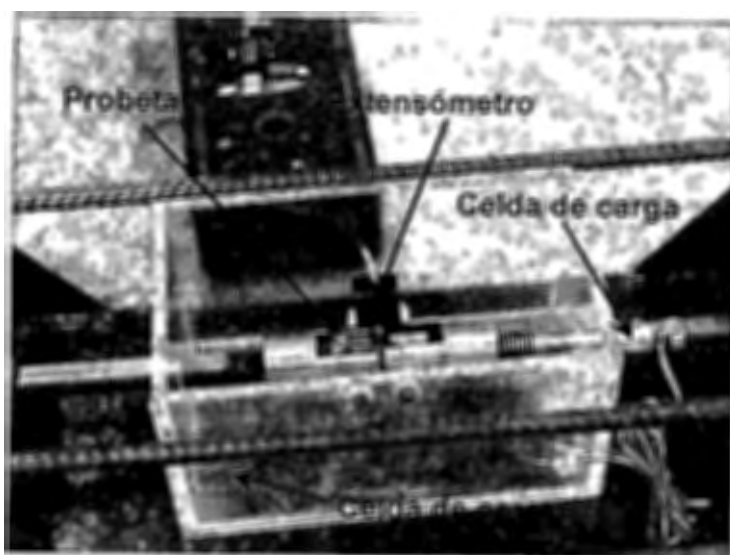


Figura 26. Medición de la abertura inicial de la probeta (Fotografía tomada por el autor).

Las probetas fueron aisladas con cera, sólo se mantuvo al descubierto la parte de la muesca y de la grieta con la finalidad de facilitar la corrosión en dicha zona, se evitó que se perdiera voltaje en el sistema por medio de bujes de nylamid que protegían a los pernos (que sostenían a la probeta con la mordaza) y de esta manera la probeta quedó totalmente aislada ya que no toca otra superficie metálica. Ver Figura 27.

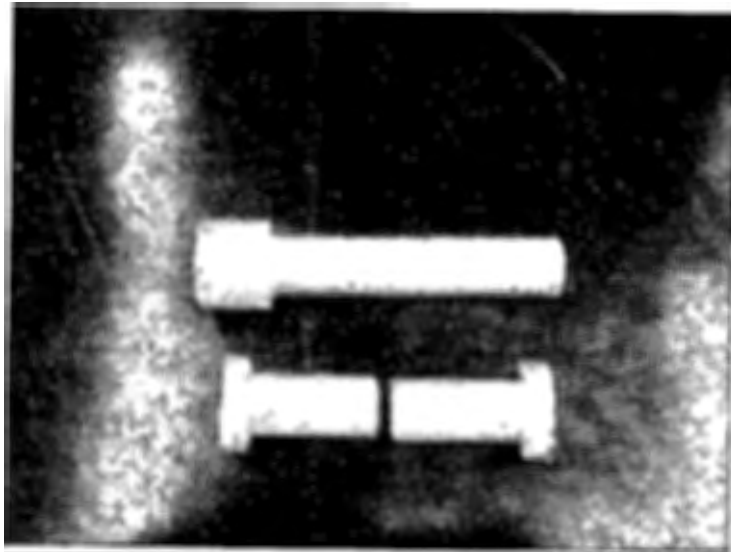


Figura 27. Bujes que sirvieron de aislantes entre la probeta y las mordazas
(Fotografía tomada por el autor).

El proceso de la corrosión se aceleró con la aplicación de corriente a la probeta por medio de una fuente de poder. Se utilizó un electrodo de referencia saturado de calomel, el contraelectrodo fue una aguja que barnizada casi por completo, exceptuando la punta para que solo ahí se generara el campo eléctrico que permitió el avance de la grieta. La carga se midió por medio de los deformímetros (strain gauges) y el indicador de deformaciones permitió monitorear la disminución de las microdeformaciones en toda la prueba. El agua se cambió cada semana para evitar que los productos de corrosión afectaran el proceso y se la aplicaba aire a la prueba. Figura 28 y 29.

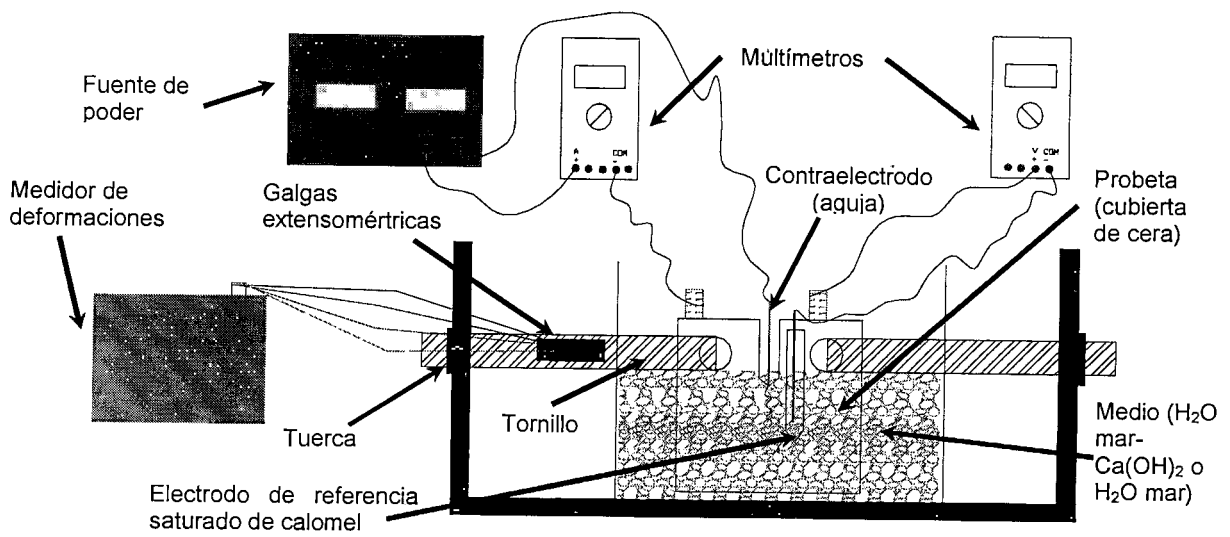


Figura 28. Esquema del dispositivo de corrosión: celda de corrosión y celda de carga (Diseño dibujado por el autor).

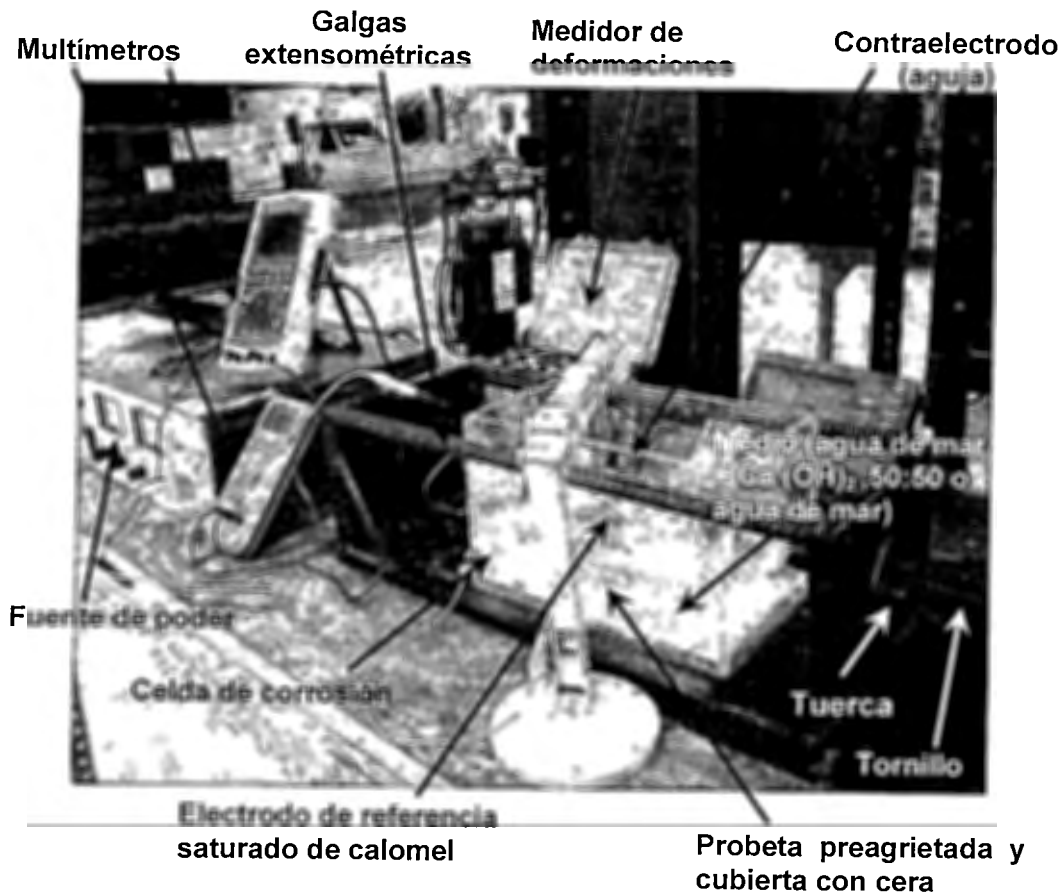


Figura 29. Prueba de corrosión. Fotografía tomada por el autor en las instalaciones del Instituto Mexicano del Transporte.

Las condiciones de exposición de las probetas se encuentran en la Tabla 4, se emplearon tres probetas en la dirección longitudinal (LK#) y tres probetas en la dirección transversal (TK#). Tres probetas se preagrietaron con un $\Delta a = 8,4$ mm aproximadamente y tres probetas se preagrietaron a un $\Delta a = 2,30$ mm con el objeto de ver si la distancia de la aguja a la punta de la grieta tenía un efecto en la corrosión. Cabe aclarar que el K_I y a_i para el avance de la grieta se mantuvo constante en todas las probetas, ver Tabla 5.

Tabla 4. Condiciones a las que se expuso la probeta.

Probeta	Medio	pH	Potencial (mV)	Tiempo (h)	Carga (kN)	K_I (MPa(m) ^{1/2})
TK5	Ca(OH) ₂ +H ₂ O _{mar}	12	400	168	13	34,96
TK1	H ₂ O _{mar}	7	-100	345	13	34,96
TK2	H ₂ O _{mar}	7	-100	500	13	34,96
LK1	Ca(OH) ₂ +H ₂ O _{mar}	12	400	168	20,8	55,21
LK3	H ₂ O _{mar}	7	-100	345	20,8	55,21
LK4	H ₂ O _{mar}	7	-100	500	20,8	55,21

Tabla 5. Condiciones iniciales de las probetas.

Probeta	a_i (mm)	Δa (mm)
TK5	27,45	8,19
TK1	28,4	2,30
TK2	28,19	1,84
LK1	27,00	7,75
LK3	27,66	8,39
LK4	28,4	2,22

Donde: a_i = muesca + pregrieta
 Δa = pregrieta

Una vez concluido el tiempo de exposición, se retiró el líquido y se volvió a medir la abertura de cada probeta en la máquina Instron con la ayuda del extensómetro (sin descargar y desmontar la probeta). Se desmontaron, lavaron y limpiaron bien las probetas para quitarle todos los productos de corrosión y posteriormente se secaron. Posteriormente se volvieron a colocar en la máquina Instron para marcarlas por fatiga antes de fracturarlas totalmente con una $r = 0,5$ y un ΔK

constante de $20 \text{ MPa m}^{1/2}$. Estas marcas se hicieron para delimitar la zona de corrosión con la de pregrieta. Se marcaron aproximadamente de 8 a 10 mm y luego se rompieron totalmente, con una rampa simple a una velocidad de 0,5 mm/s. En la Figura 30 se aprecia la zona plástica en la punta de la grieta al momento de marcar la probeta por fatiga, después de realizada la prueba de corrosión bajo esfuerzos.

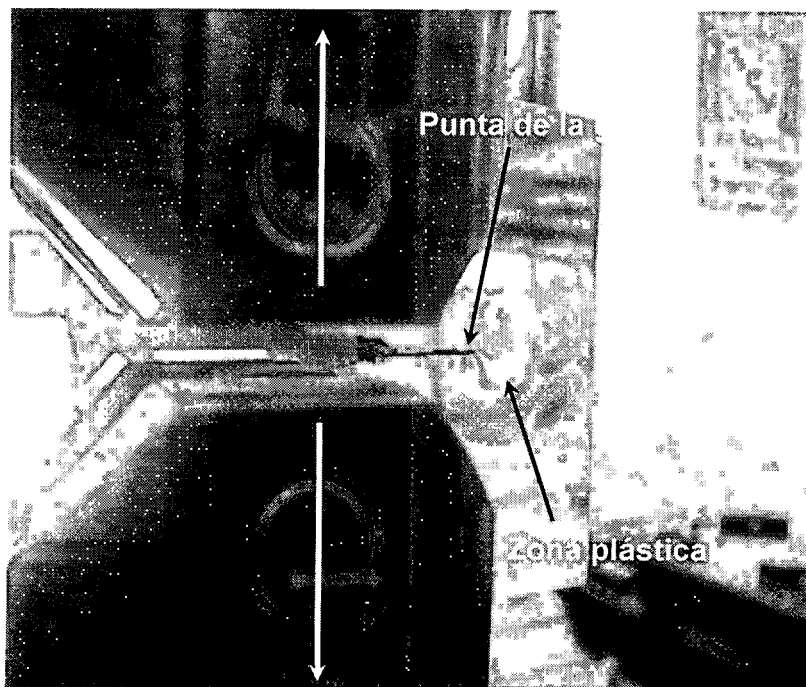


Figura 30. Probeta al momento de ser marcada por fatiga y romperse totalmente (Fotografía tomada por el autor).

VI. RESULTADOS

VI.1. Caracterización metalográfica.

En la Tabla 6 se muestra la composición química del acero, puede observarse que el contenido de carbono es bajo, característico de un acero 304L. El análisis del acero se realizó por ICP (plasma acoplado) y el análisis de C y S, se hizo en un equipo de marca Leco. La Figura 31 muestra la fotomicrografía de la microestructura austenítica de dicho acero atacado con gliceregia.

Tabla 6. Composición química del acero inoxidable 304 (% en peso).

Si	Mo	Cr	Mn	Fe	Ni	C	S
0,375	1,08	17,84	1,41	67,65	11,64	0,0284	0,0009

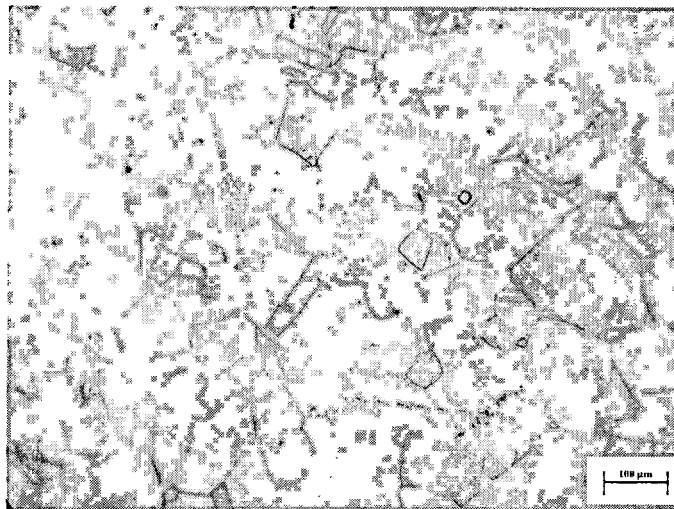


Figura 31. Fotomicrografía tomada a 50x del acero inoxidable 304, atacada con gliceregia (foto tomada por el autor).

VI.2. Pruebas de tensión.

La Figura 32 muestra una gráfica de la curva de deformación contra esfuerzos obtenida de las pruebas de tensión, donde al comparar los resultados experimentales con los reportados en la literatura, se encuentra que hay una

variación en la determinación del esfuerzo de fluencia del 27% y de 2% con respecto a la resistencia última. La Tabla 7 indica que las propiedades mecánicas varían de acuerdo a la orientación de la muestra tomada de la placa con respecto al conformado mecánico, esto es, en la dirección transversal se tiene una mayor resistencia mecánica que en la dirección longitudinal.

Comparación de las Curvas Ingenieril Transversal-Longitudinal

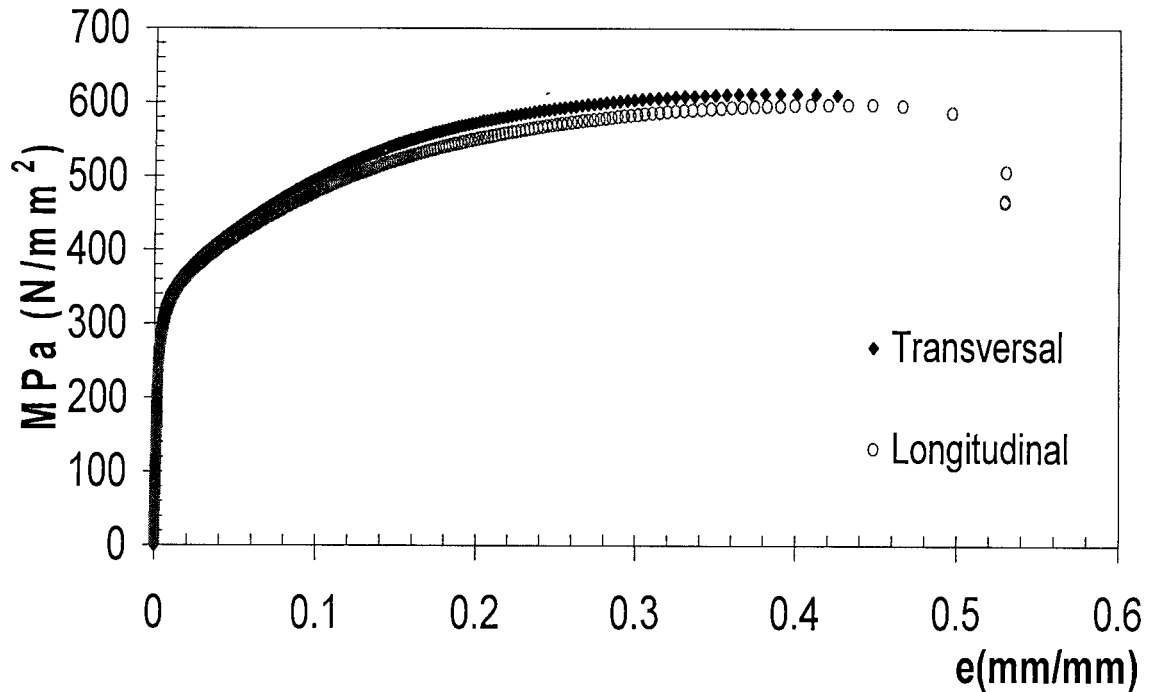


Figura 32. Datos experimentales de las propiedades mecánicas en la dirección transversal y longitudinal obtenidos en la máquina servohidráulica Instron.

Tabla 7. Resultados de las propiedades mecánicas en tensión en aire del acero inoxidable utilizado.

Probeta	E(MPa)	σ_o (MPa)	σ_u (MPa)	%e	Reducción de área	Dureza (HRB)
Longitudinal	184415,6667	276,286	592,064	49,428	74,985	82,7
Transversal		281,287	609,838	47,196	74,043	

VI.3. Pruebas de corrosión bajo esfuerzo.

VI.3.1. Calibración de celda.

En la Figura 33 se presenta la gráfica de la celda de carga calibrada, los datos se obtuvieron de una serie de carga y descarga en la máquina Instron a una velocidad de 0,5 kN/s, de esta manera se observa cuánta carga se está aplicando a partir de las microdeformaciones, ya que el aparato con el que se midió la carga da la lectura en microdeformaciones y solo se necesita multiplicar esas microdeformaciones por 0,026 y se obtiene la carga aplicada, para calcular el valor de K se ocupó la siguiente formula:

$$K = \frac{P}{B\sqrt{W}} f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (12)$$

Donde:

K = Factor de intensidad de esfuerzos (MPa \sqrt{m}),

P = Carga aplicada (N),

B = Espesor de la probeta (m),

W = Ancho de la probeta (m)

$f(a/w)$ = Factor de forma, a es la grieta final (tamaño de la muesca más la pregrieta) y W es el ancho de la probeta y se calcula:

$$f\left(\frac{a}{w}\right) = \frac{2 + \left(\frac{a}{w}\right)}{\left(1 - \frac{a}{w}\right)^{3/2}} \left[0,886 + 4,64\left(\frac{a}{w}\right) - 13,32\left(\frac{a}{w}\right)^2 + 14,72\left(\frac{a}{w}\right)^3 - 5,6\left(\frac{a}{w}\right)^4 \right]$$

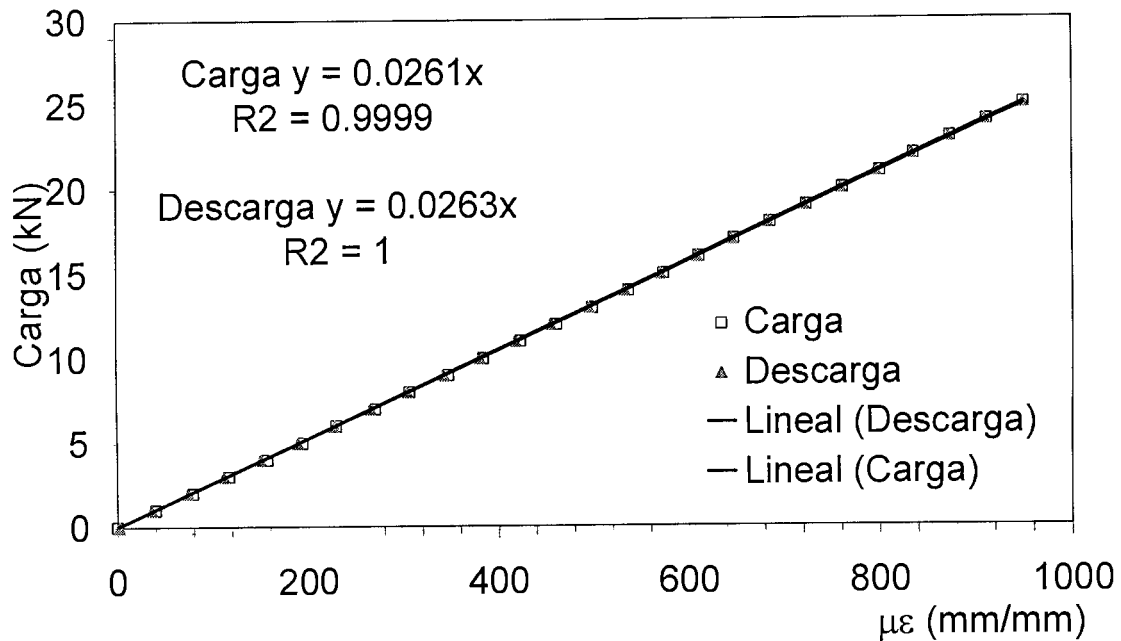


Figura 33. Gráfica obtenida de la calibración de la celda de carga.

VI.3.2. Pruebas electroquímicas.

La Figura 34 corresponde a la gráfica comparativa de las pruebas de Extrapolación de Tafel. A partir de la gráfica se calcularon tanto el efecto que tienen los diferentes medios sobre la velocidad de corrosión (V_{CORR}) como la intensidad de corriente (i_{CORR}), ver Tabla 8. Se encontró que V_{CORR} es más alta en el medio que contiene acero inoxidable y agua de mar que en el medio de acero inoxidable más $Ca(OH)_2$. En otras palabras, el contenido y diferentes tipos de sal tienen un efecto significativo en la velocidad de corrosión del acero inoxidable 304L.

Tabla 8. Resultados obtenidos en los cuatro ambientes.

Medio	i_{corr}	V_{corr}
SS + Ca(OH) ₂	0,375 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	4,32 $\mu\text{m}/\text{año}$
SS + Ca(OH) ₂ + NaCl	0,625 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	7,2 $\mu\text{m}/\text{año}$
SS + Ca(OH) ₂ + Agua de mar	1,4186 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	16,34 $\mu\text{m}/\text{año}$
SS + Agua de mar	4,275 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	49,25 $\mu\text{m}/\text{año}$

Nota: SS = Acero inoxidable
 Ca(OH)₂ = Hidróxido de calcio
 NaCl = Cloruro de sodio

**Comparación de SS + Ca(OH)₂; SS + Ca(OH)₂ + NaCl;
 SS + Ca(OH)₂ + H₂O mar y SS + H₂O mar.**

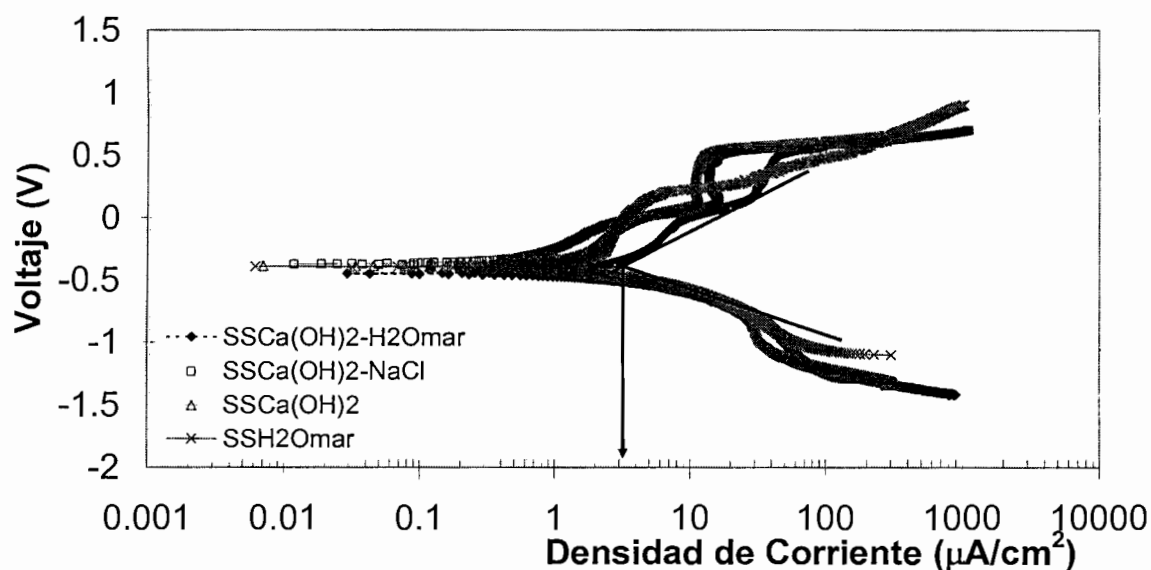


Figura 34. Extrapolación de Tafel. Gráfica comparativa de los 4 ambientes.

En la Figura 35 se ve la fotografía de las pruebas de Extrapolación de Tafel, se muestra como se montó la prueba. En las Figuras 36, 37 y 38, se puede apreciar la velocidad de corrosión que presentaba la muestra en los diferentes medios, así

como se observa en la Tabla 8 y la Figura 34, el medio que presentaba más corrosión era el que tenía solo agua de mar, siendo el acero inoxidable más susceptible a corroerse por picadura.



Figura 35. Pruebas de extrapolación de Tafel del acero inoxidable 304.

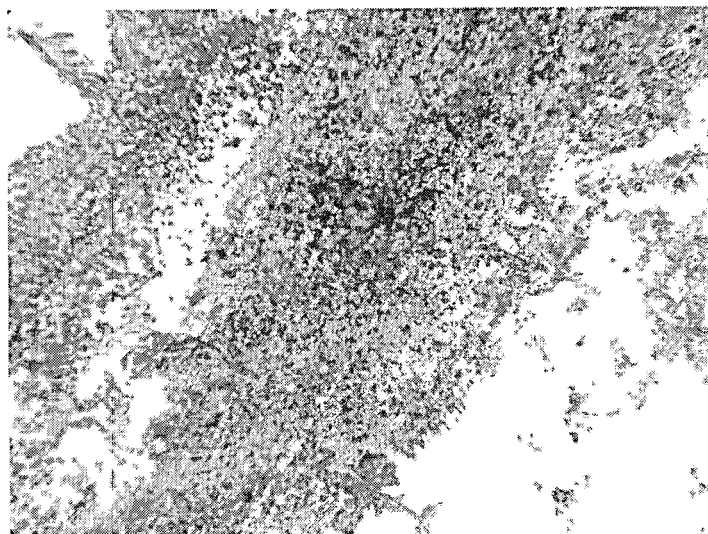


Figura 36. Fotomicrografía tomada a 5 x, de las pruebas de Extrapolación de Tafel, medio: agua de mar + acero inoxidable 304.

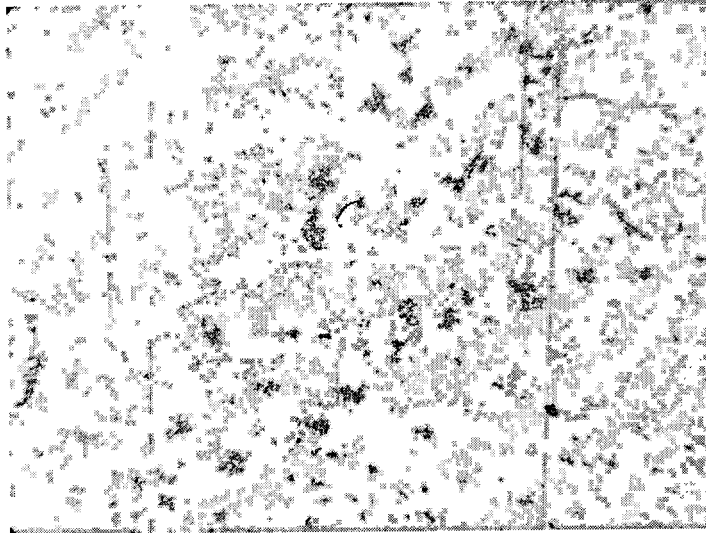


Figura 37. Fotomicrografía tomada a 5 x, de las pruebas de Extrapolación de Tafel, medio: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 1M+ NaCl,50:50 y acero inoxidable 304.

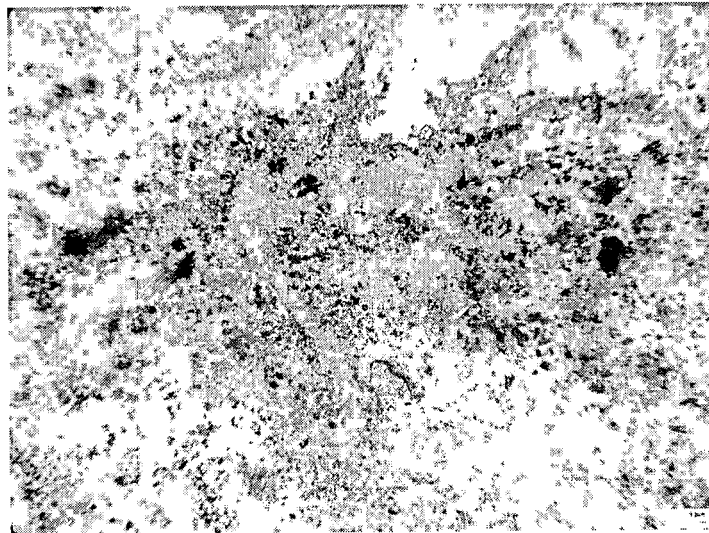


Figura 38. Fotomicrografía tomada a 10 x, de las pruebas de Extrapolación de Tafel, medio: agua de mar + $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 1M, 50:50 y acero inoxidable 304.

VI.3.3. Pruebas de corrosión bajo esfuerzos.

De acuerdo a las condiciones de prueba (Tabla 4), la Figura 39 muestra la fractografía obtenida de las diferentes zonas de la probeta compacta de tensión después de la prueba de corrosión bajo esfuerzo. Se observa una ligera zona de corrosión al inicio del preagrietamiento en la muesca. Sin embargo, en la punta de la grieta no muestra corrosión alguna, lo que indica la nula susceptibilidad del acero en este medio, con el valor de K_I de $34 \text{ MPa m}^{1/2}$ y con un tiempo de 168 horas.

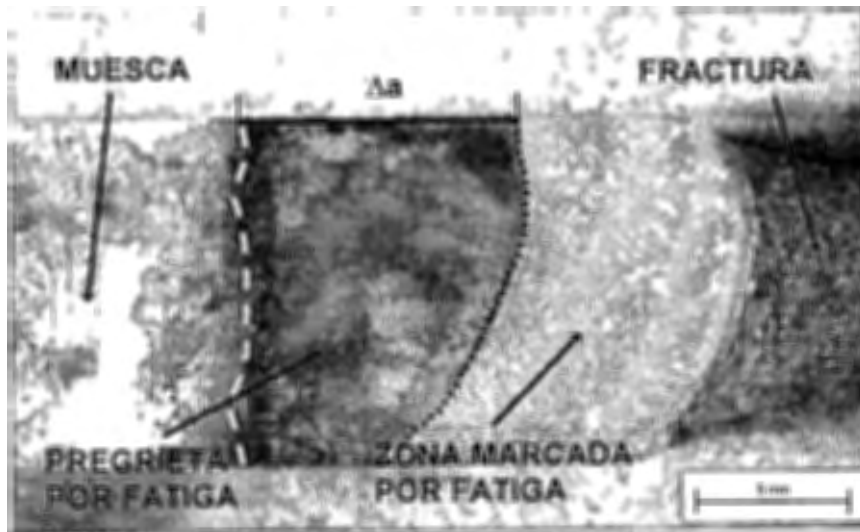


Figura 39. Probeta TK5 totalmente fracturada (medio: agua de mar con Ca(OH)_2 , 50:50).

La Figura 40 muestra la fractografía obtenida de las diferentes zonas de la probeta, después de terminada la prueba de corrosión bajo esfuerzos, como lo muestra la fotografía no se aprecia avance por corrosión bajo esfuerzos.



Figura 40. Probeta TK1 totalmente fracturada (medio: agua de mar), Fotografía tomada por el autor.

La Figura 41 muestra la probeta ya fracturada y se observa que tampoco hay corrosión bajo esfuerzos ya que no se ve ningún avance de grieta, porque en la zona de pregrieta no se aprecia la corrosión.



Figura 41. Probeta TK2 totalmente fracturada (medio: agua de mar), Fotografía tomada por el autor.

La Figura 42 muestra la fractografía obtenida de la probeta LK1 después de la prueba de corrosión bajo esfuerzos, como se puede observar en la fotografía no hay avance de grieta mediante estas condiciones de prueba. La probeta presentó corrosión por picadura en las caras laterales pero no se observó un crecimiento de grieta.

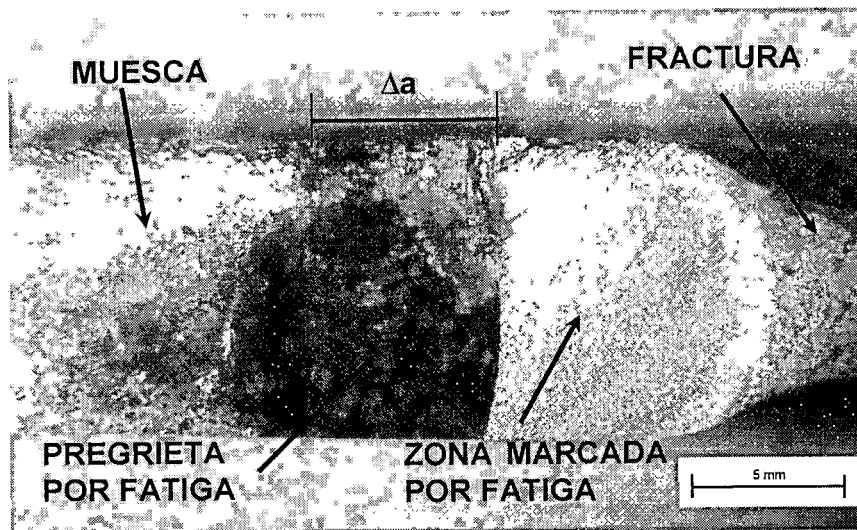


Figura 42. Probeta LK1 totalmente fracturada, (medio: agua de mar con $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 50:50).

La Figura 43 muestra la fractografía obtenida de la probeta después de la prueba de corrosión bajo esfuerzos. Como se aprecia en la Figura 43, en la punta de la pregrieta se hizo una perforación donde se introdujo la aguja, para acercar más la punta de la aguja con la punta de la pregrieta, esta modificación solo se hizo con esta probeta. Solo se aprecia la corrosión en la muesca pero al igual que la probeta anterior no presentó avance de grieta por corrosión bajo esfuerzos, en estas condiciones de prueba con un valor de K_I de $55 \text{ MPa m}^{1/2}$ y un tiempo de exposición en el medio de 345 horas.

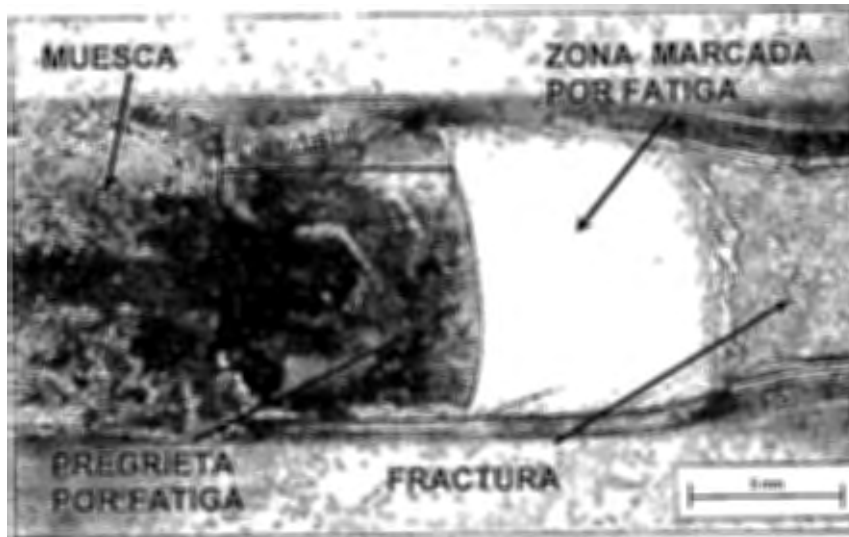


Figura 43. Probeta LK3 totalmente fracturada (medio: agua de mar).

La Figura 44 muestra la fractografía de la probeta LK4 totalmente fracturada, esta probeta ya cuenta con la modificación de que la muesca es más larga y el preagrietamiento es menor, pero aún así no se observa avance de grieta por corrosión bajo esfuerzos.



Figura 44. Probeta LK4 totalmente fracturada (medio: agua de mar).

A continuación se presentan las gráficas obtenidas de estas pruebas, en la Figura 45 se muestra la gráfica con los resultados obtenidos de las 3 probetas longitudinales, en la Figura 46 se muestra la gráfica con los resultados obtenidos de las 3 probetas transversales, la Figura 47 muestra la gráfica comparativa de las probetas que estuvieron expuestas en el medio de agua de mar con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (transversal y longitudinal) y la Figura 48 muestra la gráfica comparativa de las probetas que estuvieron expuestas en el medio de agua de mar (transversales y longitudinales).

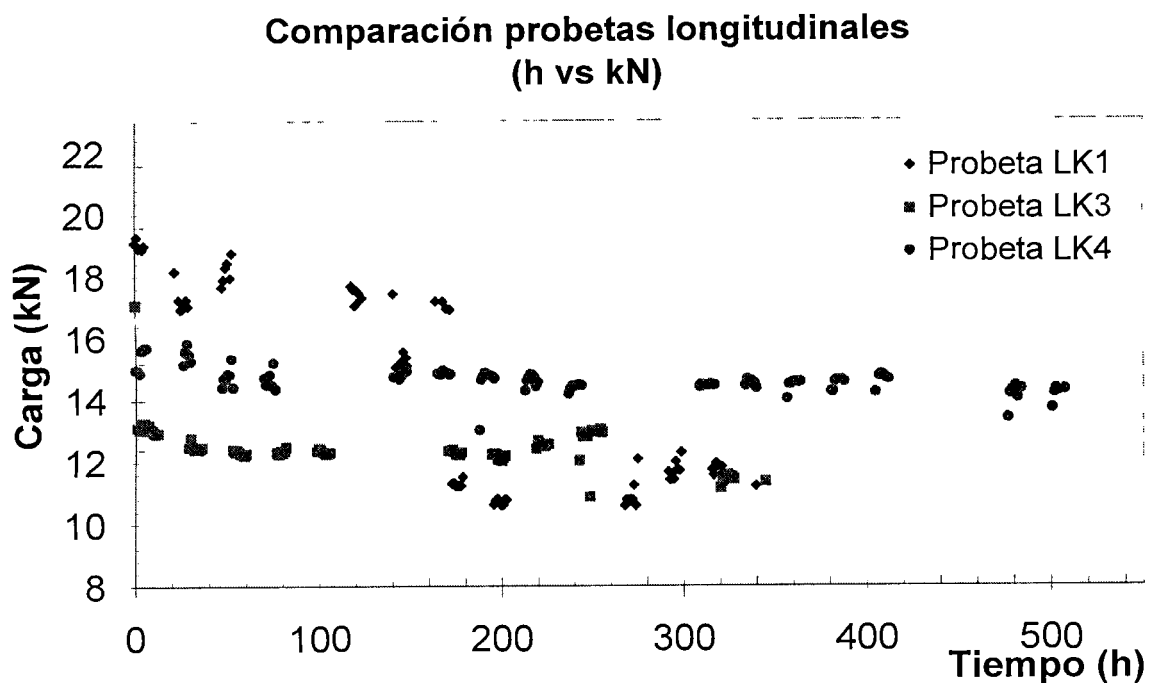


Figura 45. Gráfica comparativa de las tres probetas longitudinales a diferentes medios y cargas iniciales de prueba.

**Comparación probetas transversales
(h vs kN)**

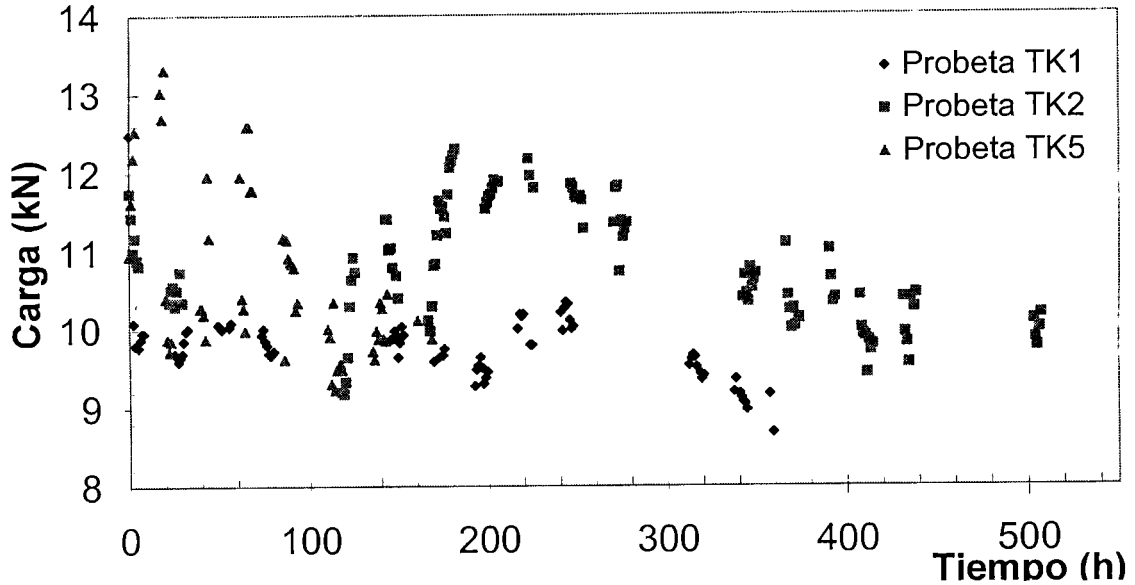


Figura 46. Gráfica comparativa de las tres probetas transversales a diferentes medios y cargas iniciales de prueba.

**Comparación probetas TK5 y LK1
(Medio: H₂O mar + Ca(OH)₂)**

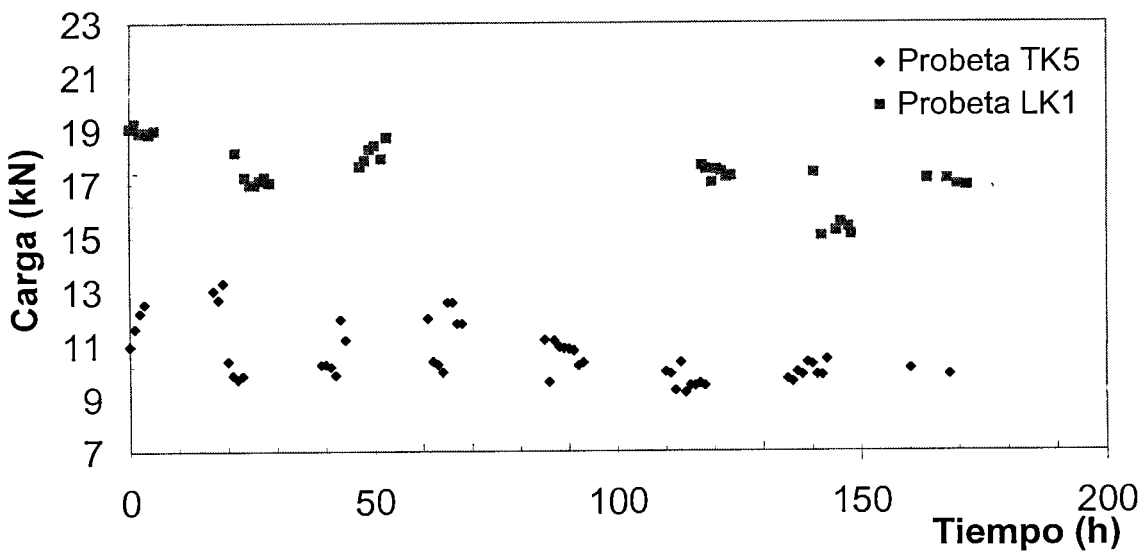


Figura 47. Gráfica comparativa de las dos probetas expuestas al medio agua de mar + Ca(OH)₂, 50:50.

Comparación de probetas Longitudinales y Transversales (Medio:H₂O mar)

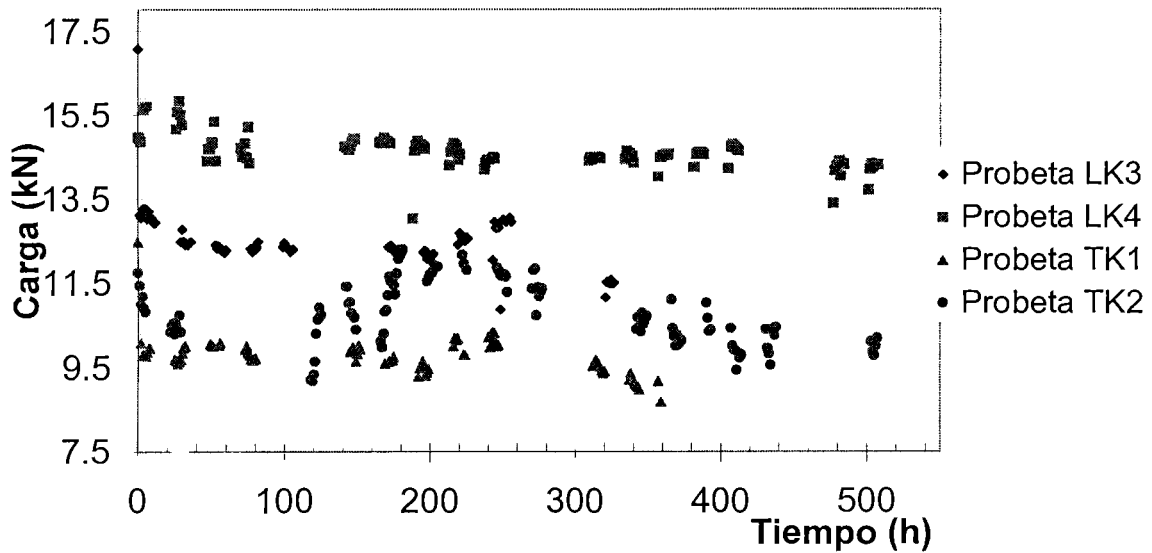


Figura 48. Gráfica comparativa de las cuatro probetas expuestas al medio agua de mar.

En las cuatro gráficas se representa la carga aplicada contra el tiempo de exposición de las probetas en el medio, las cuatro gráficas tienen un comportamiento similar porque va disminuyendo la carga conforme va pasando el tiempo.

VII. DISCUSIÓN.

De las pruebas de tensión se observa que el punto de fluencia y resistencia última son 1,8 y 3% respectivamente más altos en la dirección transversal que en la dirección longitudinal. Estas diferencias se atribuyen principalmente a la orientación de las inclusiones de sulfuro de manganeso debido al conformado mecánico.

Las pruebas electroquímicas muestran que el medio más agresivo es el medio en agua de mar pues su velocidad de corrosión es 91% más alta con respecto al medio hidróxido de calcio y 67% más alta que la del medio hidróxido de calcio más agua de mar. Indicando con esto que es más susceptible a corroerse el acero inoxidable 304 en el medio de agua de mar que en el de agua de mar más hidróxido de calcio. También se observa que el mecanismo principal de corrosión del acero inoxidable es por picadura, iniciando principalmente en las inclusiones de sulfuro de manganeso como afirma la teoría clásica de este tipo de corrosión. Cabe aclarar que en estas pruebas no se aplica carga en las probetas utilizadas.

Las pruebas electroquímicas realizadas por Tafel muestran que la menor velocidad de corrosión se da en el medio de hidróxido de calcio con respecto al agua de mar sola. Probablemente esto se da debido a que el pH tiene una influencia en la disolución de la capa pasiva de óxido presente en el acero inoxidable. En otras palabras, es más fácil disolver la capa pasiva en pH casi neutro (agua de mar) que en medios de pH de 12.

De los resultados anteriores se seleccionaron 2 medios: uno que simulara la relación concreto-metal (hidróxido de calcio + agua de mar, 50:50) y el otro cuando el acero ya se encuentra en contacto directo con el medio (agua de mar). Para seleccionar el sobrepotencial anódico que se les aplicó a las probetas se escogió el potencial de picadura en los medios seleccionados obtenido de las pruebas de extrapolación de Tafel. Esto es porque el potencial de picadura favorece el rompimiento de la capa pasiva de óxido en el acero inoxidable y por lo tanto se espera que la grieta en las probetas de mecánica de fractura avance por picadura. Cabe aclarar que esta capa pasiva es afectada por las inclusiones de sulfuro de manganeso y los límites de grano.

Las pruebas aceleradas por corrosión bajo esfuerzo muestran corrosión en la superficie de la muesca y en la pregrieta, pero la grieta no avanzó por corrosión bajo esfuerzos como se esperaba. Probablemente, la humedad del medio, el aire y la corriente que pasaba a través de la aguja favoreció la corrosión superficial en esos lugares, a pesar de que en la punta de la grieta estaba la aguja sumergida en el medio pasando corriente (contraelectrodo) y la probeta sometida a tensión.

Se esperaba que al modificar la longitud del preagrietamiento influiría sobre la corrosión bajo esfuerzo al acercar más la punta de la aguja con la punta de la grieta, pues permitiría un avance de grieta por corrosión. Sin embargo, tampoco se presentó este fenómeno. Estas características de las pruebas se observaron en los diferentes medios, corrientes y cargas aplicadas. Lo que indica la poca susceptibilidad de las probetas fabricadas con acero inoxidable a la corrosión bajo esfuerzo en estas condiciones de prueba.

Por otro lado, se observaron variaciones en las mediciones de las microdeformaciones por el efecto de la temperatura, las cuales se considero que no afectaban a la prueba porque los cambios de temperaturas no eran tan drásticos y porque la longitud de la abertura de la grieta medida con el extensómetro, después de realizar los ensayos, no presentaba cambios respecto a la inicial.

VIII. CONCLUSIONES.

Se desarrolló una metodología para realizar pruebas aceleradas en distintos medios y cargas con el objeto de evaluar la susceptibilidad al agrietamiento mediante el conocimiento del K_{ISCC} .

Se utilizaron las condiciones más extremas de ambiente y carga para la propagación del avance de grieta por corrosión en las pruebas realizadas al acero inoxidable 304.

Se demostró que el acero inoxidable no es susceptible a la corrosión bajo esfuerzos en las condiciones de pruebas efectuadas. Por lo que la hipótesis planteada con relación a los resultados comparables entre pruebas aceleradas con las de largo plazo no fue corroborada.

La hipótesis del efecto del conformado mecánico sobre las propiedades de mecánica de fractura tampoco pudo ser corroborada. Sin embargo, las pruebas de tensión demuestran un efecto del conformado mecánico en las propiedades en tensión, lo cual indicaría también un efecto en las propiedades de mecánica de fractura (K_{ISCC}).

IX. BIBLIOGRAFÍA

- Aaltonen P., Bojinov M. and col. 2002.** Facts and views on the role of anionic impurities, crack tip chemistry and oxide films in environmentally assisted cracking. Espoo. VTT Tiedotteita- Research Notes 2148: 7-51 + app. 15p.
- Anderson T.L. 1991.** Fracture Mechanics. Fundamentals and Applications. 1st. ed., CRC Press, USA: 37-107.
- ASM HANDBOOK.1998.** Corrosion. 9nd. ed., ASM INTERNATIONAL, USA: Vol. 13: 17-49, 61-189, 231-233, 239-241, 316-317, 377-379, 547-565, 893-925, 1299-1310.
- ASM HANDBOOK.1998.** Fatigue and Fracture. 9na. ed., ASM INTERNATIONAL, USA: Vol. 19: 42-60, 371-506, 712-768, 980-1000.
- ASTM E 8M-00. 2000.** Tension Testing of Metallic Materials [Metric], Standard Test Method for Measurement. USA: 1-22.
- ASTM E 399-05. 2005.** Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, Standard Test Method for Measurement. USA: 488-512.
- ASTM E 647-93. 1993.** Fatigue Crack Growth Rates, Standard Test Method for Measurement. USA: 648-668.
- ASTM E 1681-99. 2000.** Determining Threshold Stress Intensity Factor for Environment-Assisted Cracking of Metallic Materials, Standard Test Method. USA: 1-11.
- Ávila J. y Genescá J. 2002.** Más allá de la Herrumbre I. 3ra. ed., Fondo de Cultura Económica, México: 9-15, 25-38, 42-53, 61-67, 86-108.
- Ávila J.y Genescá J. 2003.** Más allá de la Herrumbre II. La lucha contra la corrosión. 3ra. ed., Fondo de Cultura Económica, México: 27-51, 68-77, 93-97.
- Broek D. 1984.** Elementary Engineering Fracture Mechanics. 3rd. ed., Martinus Nijhoff Publisher, Netherlands: 297-301.
- Carrión F.J., Hernández J. y col. 1999.** Estudios de Corrosión en Puentes de Concreto Pre-Esforzado. Instituto Mexicano del Transporte: Publicación Técnica No. 122, México: 1-2, 6-14.

- Del Valle A., Pérez T. y col. 2001.** El Fenómeno de la Corrosión en Estructuras de Concreto Reforzado. Instituto Mexicano del Transporte: Publicación Técnica No. 182, México: 1-7, 10-16.
- Dietzel W. 1995.** Guidelines for fracture mechanics SCC testing, Project Characterization of Susceptibility of Metallic Materials to Environmentally Assisted Cracking. GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH: Final report: 1-160.
- Durar. 2000.** Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. 3ra. ed., Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. 18-27, 31-37.
- Fernández M. 2001.** Corrosión del acero inoxidable 304 por efecto de la concentración de cloruros en soluciones alcalinas. Maracaibo, Venezuela. La Universidad del Zulia. Tesis para obtener el título de ingeniera química:30-69.
- Gibala R. and Hehemann R.F. 1984.** Hydrogen Embrittlement and Stress Corrosion Cracking. 1st. ed. ASM International, Materials Park, Ohio 44073., USA: 181-248.
- González J.L. 1998.** Apuntes de Metalurgia Mecánica. Edición del autor. 115-127.
- González J.L. 2004.** Mecánica de Fractura. 2da. ed. Limusa. México: 21-29.
- Hannah R.L. and Reed S.E. 1992.** Strain Gage Users' Handbook. 1st. ed. Elsevier Science Publishers LTD, Society for Experimental Mechanics, Inc. Great Britain. 3-4, 12-34.
- Henthorne M. 1972.** Fundamentals of Corrosion. Corrosion Causes and Control. Carpenter Specialty Alloys. McGraw-Hill. USA: 1-6.
- Hertzberg W. Richard. 1996.** Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials. John Wiley & Sons, Inc. USA.
- Jones R. 1999.** Stress-Corrosion Cracking. Materials Performance and Evaluation. 1st. ed. ASM International, Materials Park, Ohio 44073-0002. USA: 1-39, 91-129, 363-415.
- Millano V. 2004.** Estabilidad de la película pasiva de los aceros inoxidables austeníticos 304 y 316 en concreto carbonatado o contaminado con cloruros. La Universidad del Zulia. Tesis para obtener el grado académico de magíster scientiarum en corrosión. Venezuela: 18-20, 26-46.

- Mills T., Sharp P.K. and col. 2002.** The Incorporation of Pitting Corrosion Damage into F-111 Fatigue Life Modelling. DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory. Australia: pp. 5-8.
- Moreno E., Torres A. y col. 2004.** Construcción del Muelle de Progreso. Ingeniería 8 Vol. 1: 61-66.
- Pérez J.T. 2001.** Seguimiento por medio de la Técnica de Impedancia Electroquímica de la Protección Catódica del acero de Refuerzo en Concreto Modificado por un Agente Humectante. México, D.F. Universidad Autónoma de México. Tesis para obtener el grado de maestro en ciencias químicas:1-28.
- Poblano C.A. 2000.** Sistemas de Protección contra la Corrosión en puentes. Investigaciones recientes. Instituto Mexicano del Transporte: Publicación Técnica No. 158. México: 1-7.
- Pourbaix M. 1996.** Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions. Pergamon Press Ltd. USA: 262-263, 312-313.
- Sánchez E.E., Villalobos T.C. 2003.** Comportamiento de los aceros inoxidables 304 y 316 en concreto contaminado con cloruros. La Universidad del Zulia. Tesis para obtener el título de ingeniero químico. Venezuela: 24-57.
- Schra L. 1996.** The Influence of Testing Parameters on Stress Corrosion Crack Growth in the high Strength Aluminium Alloy 7010-T651. National Aerospace Laboratory NLR TP 96710. Amsterdam, The Netherlands: 1-31.
- Vadillo M.C. 2004.** Seguimiento del proceso de la corrosión del acero de refuerzo en pilotes de concreto. Universidad Autónoma de México. Tesis para obtener el grado de maestra en ingeniería. México: 1-3.
- www.corrosion-doctors.org/Localized/Crevise.htm.
- www.fisicanet.com.ar/quimica/q3ap01/apq3_20c_Corrosion.html.
- www.materialsengineer.com/CA-corrosion.htm.
- www.nickelinstitute.com/index.cfm/ci_id/13112/la_id/1.htm

X. ANEXOS.

X.1. Reconocimientos.

X.1.1. Carta de aceptación para el congreso: XIV International Materials Congress Research 2005.



Cuernavaca, Ayres, June 24, 2005

Dear Mr. Jorge Terán Guillén

I am pleased to communicate you that your work

"Evaluación de la susceptibilidad al agrietamiento del acero inoxidable 304 en pruebas aceleradas de corrosión bajo esfuerzo."

was accepted to be presented in the NACE Mexico Symposium on Corrosion Control Science and Engineering. This Symposium is being held by International Materials Research Congress 2005.

Yours truly,

D. Alejandro Martínez Gómez
Symposium Chairman

INIME, P.O. Box 1000, Cuernavaca, 50000, Mexico
Tel: 5225 3 4400000 - Fax: 5225 3 4400000
www.inime.org

Tel: 52 55 56 2 77 42 • Fax: 52 55 56 22 77 46
5251 277 31 89 5
Fax: 52 55 56 22 77 20 • 52 56 77 17 34 80

X.1.2. Resumen presentado en dicho congreso, en el Symposium de corrosión y metalurgia.



NACE

Symposium 19
NACE Corrosion and Metallurgy

Temple en agua estática, templado y después revenido, y el acero como condición de llegada. Las pruebas se llevaron a cabo en las diferentes soluciones a 50°C. Los resultados indican que el acero en todas las condiciones en la solución 0.005M NaHCO₃ adquiere pasivación y la mayor densidad de corriente de pasividad (I_{pass}) la presenta el acero templado seguido por el acero atomizado y por el acero revenido y en la condición de llegada respectivamente. Por otra parte la adición de cloruros y sulfatos a la solución 0.005M de bicarbonato de sodio, propicia que el acero en todas las condiciones en las pruebas a E_{corr} no se pasive, presentando únicamente disolución anódica continua en el acero. El mecanismo de corrosión para el acero en todas las condiciones se discute en términos de la microestructura disolución anódica y ruptura de la película protectora.

S19-P5

EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGRIETAMIENTO DEL ACERO INOXIDABLE 304 EN PRUEBAS ACELERADAS DE CORROSIÓN BAJO ESFUERZO.

Jorge Terán Guillén¹, Beatriz Castillo Márquez¹, José Trinidad Pérez Quiroz¹, Andrés Torres Acosta¹, Salvador Alvarado Balleza².

¹Instituto Mexicano del Transporte, Apartado Postal 1098, 76000 Querétaro, Qro. E-mail: jteran@imt.mx ²Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las Campanas s/n., 76000, Querétaro, Qro.

Una de las dificultades que surgen al determinar el factor de intensidad de esfuerzos límite (K_{ISCC}) es el tiempo que se necesita para estimarlo en un medio determinado, pues según la norma ASTM 1681 se requieren 10 000 h de tiempo de permanencia para aceros de baja resistencia, que aproximadamente representa una velocidad de propagación de grietas en ambientes corrosivos de 1×10^{-8} mm/s. Actualmente, los aceros inoxidable se utilizan en la construcción de estructuras en ambientes marinos debido a su resistencia a la corrosión. De ahí el interés de conocer el comportamiento de este material en condiciones de corrosión bajo esfuerzos.

En este trabajo se determinó el valor del K_{ISCC} utilizando probetas de mecánica fractura (compactas de tensión), el ensayo se realizó a desplazamiento constante, con la salvedad de que las pruebas se aceleraron aplicando una corriente anódica. Estas probetas se preagrietaron por fatiga y se colocaron en un dispositivo, donde las probetas estuvieron sujetas a tensión, y al mismo tiempo, sumergidas en el medio alcalino, el cual simula el ambiente concreto-metal. Este medio se determinó realizando pruebas aceleradas de corrosión como: resistencia a la polarización y extrapolación de Tafel, para conocer la velocidad de corrosión y la corriente anódica que garantizaba el rompimiento de la película de óxido de cromo. Los sistemas utilizados fueron los siguientes:

- Agua de mar- Ca(OH)₂
- NaCl-Ca(OH)₂
- Ca(OH)₂

Se presentan los resultados comparativos de los ensayos de tensión y del K_{ISCC} en las distintas orientaciones de laminación, asimismo, demostrando la validez de los resultados obtenidos en pruebas aceleradas con respecto a lo reportado en la literatura.

XIV International Materials Research Congress 2005

International Union of Materials Research Societies

National Association of Corrosion Engineers:
NACE International Section Mexico

The Organizing Committee
Acknowledges the Participation of

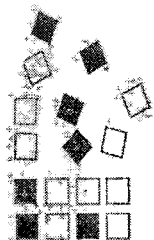
Beatriz Castillo Márquez

As

"PARTICIPANT"

Cancún, Quintana Roo, México 21-25 August, 2005


Dr. Pedro Hugo Hernández Tejada
General Chairman of the Congress
I. M. R. C. 2005



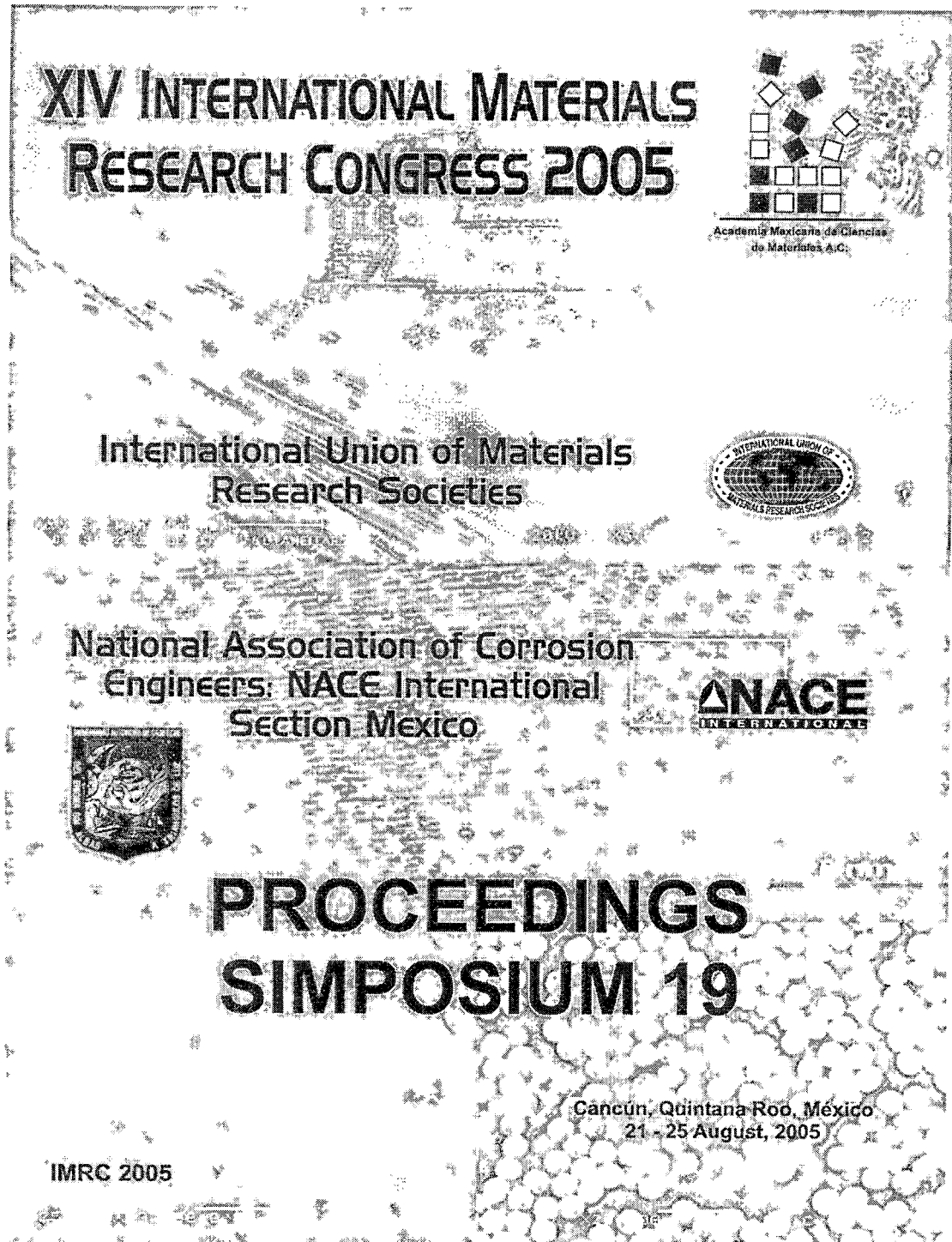
ASOCIACIÓN MEXICANA DE CIENCIA
DE MATERIALES, A. C.



NACE
INTERNATIONAL SOCIETY
OF CORROSION ENGINEERS
THE CORROSION SOCIETY

X.1.3. Reconocimiento por participar en el congreso

X.1.4. Trabajo en extenso publicado en la Universidad Autónoma de Campeche



**XIV INTERNATIONAL MATERIALS RESEARCH
CONGRESS 2005,
SIMPOSIUM 19**

**JORGE A. GONZÁLEZ-SÁNCHEZ Y TEZOMOC PÉREZ LÓPEZ
EDITORES**

**XIV INTERNATIONAL MATERIALS RESEARCH CONGRESS 2005,
SIMPOSIUM 19**

González-Sánchez, J.A. y T. Pérez López (Eds) (2005) XIV International Materials Research Congress 2005. Simposium 19. Universidad Autónoma de Campeche. 96 p. ISBN 968-5722-43-9

© Universidad Autónoma de Campeche
Programa de Corrosión del Golfo de México
Av. Agustín Melgar s/n, C.P. 24030, Col. Buenavista,
Campeche, Campeche, Mexico

ISBN 968-5722-43-9

CONTENIDO

CORROSIÓN ASISTIDA POR ESFUERZO DEL ACERO INOXIDABLE 17-4 PH, EMPLEANDO DIFERENTES VELOCIDADES DE DEFORMACIÓN C. López, C. Gaona, A. Borunda, F. Almeraya, A. Martínez.	1
INFLUENCIA DEL DISEÑO ARQUITECTÓNICO EN LA DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN P. Castro-Borges	9
INFLUENCIA DE LA ACCIÓN DEL MEDIO AMBIENTE EN LA CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO F. Almeraya, M. Rodríguez, V. M. Orozco, A. Borunda, A. Torres, D. Lardizabal, C. Gaona y A. Martínez	15
INCREMENTO DE LA EFICIENCIA DE ÁNODOS DE SACRIFICIO BASE MAGNESIO MEDIANTE TRATAMIENTOS TERMICOS. B. Morales-Badillo, J. Pérez, J. Terán, A. Torres, J. A. Deolarte	25
ANÁLISIS DE FALLA POR CORROSIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR DE LA PLANTA DE CLORADOS III DEL CPQ PAJARITOS G. Zavala, M. Hernández, R. García, M. Martínez, L. Mon	31
EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGRIETAMIENTO EN PRUEBAS ACFLERADAS DE CORROSIÓN BAJO ESFUERZO DE ACERO INOXIDABLE 304. J. Terán, B. Castillo, J. Pérez, A. Torres, S. Alvarado	41
ANÁLISIS DE LA INTENSIDAD DE ESFUERZOS EN PICADURAS SUJETAS A MODO MIXTO DE CARGA N. Acuña, J. González-Sánchez, G. Kú-Basulto y L. Domínguez	49
CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO EMBEBIDO EN CONCRETO EXPUESTO EN AMBIENTE MARINO-TROPICAL EN LA CIUDAD DE CAMPECHE. M. Sosa, L. Dzib, T. Pérez, J. González-Sánchez, C. López.	59
CORROSIVIDAD ATMOSFERICA INDOOR DE METALES UTILIZADOS EN COMPONENTES ELECTRO-ELECTRÓNICOS EN CLIMA TROPICAL HÚMEDO L. Dzib, J. González-Sánchez, T. Pérez, L. Veleza, M. Sosa.	69
PROTECCIÓN CATÓDICA DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO MEDIANTE CORRIENTE IMPRESA Y ROCÍADO TÉRMICO DE ZINC M. Sosa, T. Pérez, J. González-Sánchez, J. Pérez	79
ESTUDIO DE LA DEGRADACIÓN POR CORROSIÓN DE UN ANCLA DEL SIGLO 19 RECUPERADA DEL MAR DEL GOLFO DE MÉXICO J. González-Sánchez, F. Bernés, T. Pérez, P. Bartolo, H. Barbal, J. Reyes.	89



Terán, L. B. Castillo, J. T. Pérez, A. Torres, S. Alvarado (2005) Evaluación de la susceptibilidad al agrietamiento en pruebas aceleradas de corrosión bajo esfuerzo de acero inoxidable 304, p. 41-48. En: J.A. González-Sánchez y Tezozomoc Pérez López (Eds.) XIV International Materials Research Congress 2005. Simposium 19, 96 p. ISBN 968-5722-43-9

EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGRIETAMIENTO EN PRUEBAS ACELERADAS DE CORROSIÓN BAJO ESFUERZO DE ACERO INOXIDABLE 304

J. TERÁN¹, B. CASTILLO¹, J. T. PÉREZ¹, A. TORRES¹, S. ALVARADO²

¹INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE, KM 12 CARR. QUERÉTARO-GUADALUPE, SAN ANTONIO, QRO, MÉXICO.

²UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO, CERRO DE LAS CAMPANAS S. N., 76000, QRO.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es evaluar la susceptibilidad al agrietamiento del acero inoxidable 304 en medio alcalino mediante la determinación del factor de intensidad de esfuerzos umbral (K_{ISCC}). Probetas compactas preagrietadas por fatiga se sometieron a tensión en un dispositivo al que se adaptó una celda de corrosión. Se aplicó a la probeta una carga de 13 kN y simultáneamente un sobrepotencial anódico de 400 mV en el medio que simula al concreto. Para estimar la corriente anódica en el medio de interés se realizó la prueba electroquímica extrapolación de Tafel, de tal forma, que garantice el rompimiento de la película pasiva y promueva el agrietamiento en la probeta. Los resultados obtenidos indican que no se presenta agrietamiento a un factor de intensidad de esfuerzos de $32 \text{ MPa m}^{1/2}$. De esto se concluye que el material no es susceptible al agrietamiento por corrosión y esfuerzo en este medio.

Palabras clave: Factor de intensidad de esfuerzos umbral, corrosión, extrapolación de Tafel, corriente anódica.

ABSTRACT

The objective of this investigation is to evaluate the stress corrosion cracking susceptibility of a type 304 stainless steel in chloride-containing alkaline solution by determining the stress intensity threshold (K_{ISCC}) of this metal. Compact type specimens were pre-cracked by fatigue and then placed in a custom made dual stress-corrosion cell at room temperature. Each specimen was subjected to a tension load of 13 kN and simultaneously an anodic overpotential of 400 mV was applied to the specimen. To guarantee the chromium passive film break down and the crack nucleation, Tafel tests were previously performed and the amount of anodic current density was estimated. The results obtained from the tests it was found no crack formation and/or propagation at stress intensity values below $32 \text{ MPa m}^{1/2}$. Therefore, it was concluded that there is no crack susceptibility for type 304 stainless steel in a chloride-contaminated alkaline solution at room temperature.

Keywords: Stress intensity threshold, corrosion, fatigue, Tafel extrapolation, anodic current.

INTRODUCCIÓN

Las estructuras de concreto reforzado expuestas a un ambiente marino e industrial presentan cambios en sus propiedades fisicoquímicas y resistencia residual, tanto el concreto como el material de refuerzo, produciendo así una disminución en la vida útil para la cual fueron diseñadas. El material que se utiliza como refuerzo es el acero, estableciendo en principio un equilibrio termodinámico, donde no existe corrosión, debido a la pasivación del hierro en medio alcalino. Pero la porosidad del concreto presenta un camino para la introducción de iones que ocasionan la corrosión en el acero, dependiendo del medio al cual este expuesto'.

La capa formada sobre la superficie del acero embebido en concreto ayuda a pasivarlo y el fenómeno de corrosión no se presenta, la capa pasiva del acero se ve afectada por la presencia de iones cloruro en el ambiente, lo cual promueve la corrosión del acero generando productos de corrosión que ocupan más volumen ocasionando fisuras, grietas, sangrado y desprendimiento del concreto .

Por otro lado en ambientes urbano-industrial la presencia de gases como el CO_2 y el SO_2 afectarán el comportamiento del concreto disminuyendo la alcalinidad de este y como consecuencia degradando la capa pasiva del acero'.

La importancia de estudiar los aceros inoxidable, es que son aceros que se están utilizando actualmente para reforzar el concreto en estructuras en ambientes marinos. En México contamos con la primera construcción con esa tecnología: se trata del muelle Progreso ubicado en el estado de Yucatán. El muelle fue construido en dos etapas, la primera tiene 60 años y está en perfecto estado, mientras la construida hace 30 años está en un estado de deterioro tal que ha sido clausurada para su uso. Solo la primera etapa fue construida de concreto reforzado con acero inoxidable, ver figuras 1, 2 y 3; la segunda etapa es de acero al carbono^{2,3,4}.

Un caso particular del efecto del medio sobre las estructuras es el tipo de falla conocido como corrosión bajo esfuerzos o agrietamiento por corrosión y esfuerzos (SCC, por sus siglas en inglés), que se define como la interacción del ambiente y los esfuerzos de tensión presentes en una grieta para que esta se propague. El parametro que nos permite conocer si en un material agrietado la grieta crecerá o no en un medio determinado, es decir, es susceptible al agrietamiento, es el factor de intensidad de esfuerzos umbral o limite (K_{ISCC})⁵.

Una de las dificultades que surgen al determinar el factor de intensidad de esfuerzos limite (K_{ISCC}) es el tiempo que se necesita para estimarlo en un medio determinado, pues según la norma ASTM 1681

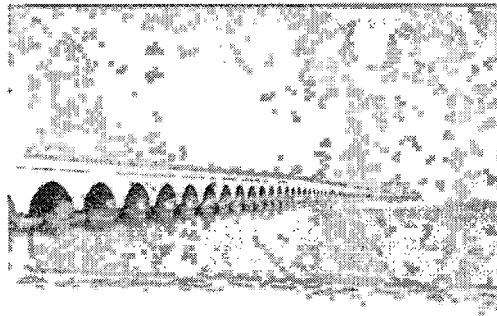


Figura 1. Fotografía tomada del Muelle Progreso.

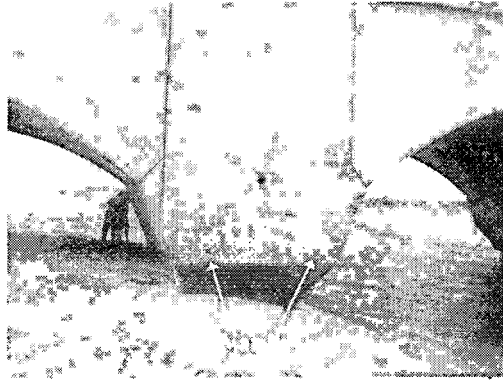


Figura 2. Fotografía de uno de los arcos del muelle donde se ubica las varillas de acero inoxidable.

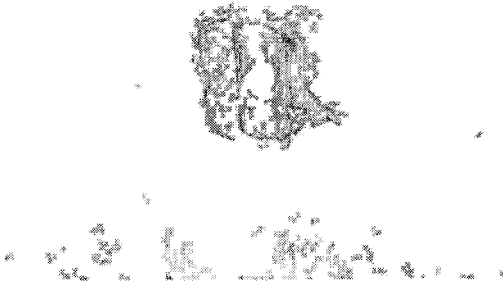


Figura 3. Fotografía de una parte de la varilla, se observa que se encuentra corroída

se requieren 10 000 h de tiempo de permanencia para aceros de baja resistencia, que aproximadamente representa una velocidad de propagación de grietas en ambientes corrosivos de 1×10^{-8} mm/s².

OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología de ensayos acelerados de corrosión bajo esfuerzos que nos permita obtener un valor de K_{ISCC} del acero inoxidable 304 en un ambiente de $Ca(OH)_2$ y agua de mar, simulando de esta manera el medio concreto-metal.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se realizó la caracterización del material mediante análisis metalográfico, composición química, prueba electroquímica (Tafel) en el medio de interés ($Ca(OH)_2$ y agua de mar natural, 50: 50, $NaCl-Ca(OH)_2$, $Ca(OH)_2$) y pruebas de tensión. Estas últimas se realizaron de acuerdo a la norma ASTM E-8 a una velocidad de carga de 7 MPa/s y en una máquina Instron 8503 de 500KN de capacidad, con celdas de

carga intercambiables de 100 y 10 KN. Para realizar las pruebas de evaluación de la susceptibilidad al agrietamiento, se utilizaron probetas de mecánica de fractura del tipo de compacta de tensión (CT), las cuales se preagrietaron hasta $a/W = 0.5$ en la máquina Instron a un ΔK constante de $20 \text{ MPa m}^{1/2}$. Después de preagrietadas las probetas se colocaron en una celda de corrosión con un dispositivo de carga, el cual tiene deformímetros (strain gages) para medir la carga. Se les aplico fuerza a las probetas preagrietadas hasta un valor de K de $32 \text{ MPa m}^{1/2}$ manteniendo el desplazamiento de la abertura de la grieta constante para que el valor de K disminuyera cuando la grieta se propague. La probeta preagrietada se mantuvo en el medio de interés (Ca(OH)_2 y agua de mar natural, (relación 50:50) durante 168 horas y aplicándole un potencial de 400 mV para romper la capa pasiva de óxido de cromo. Ver figuras 4 y 5.

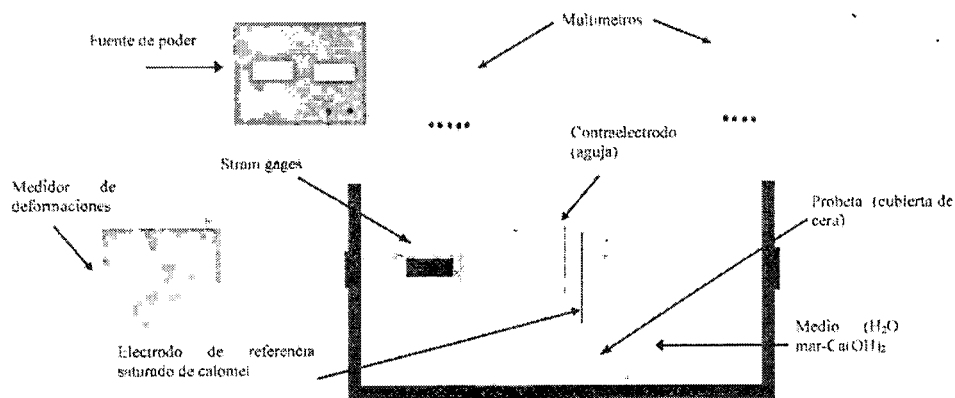


Figura 4. Esquema del dispositivo de corrosión; celda de corrosión y celda de carga.



Figura 5. Fotografía de la prueba de corrosión.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 1 se observa la composición química del acero, se observa que el contenido de carbono es bajo característico de un acero 304L. En la figura 6 se tiene la fotomicrografía de la metalografía de la muestra del acero inoxidable atacada con gliceregía, donde presenta una microestructura austenítica de dicho acero.

Si	Mo	Cr	Mn	Fe	Ni	C	S
0,375	1,08	17,84	1,41	67,65	11,64	0,0284	0,0009

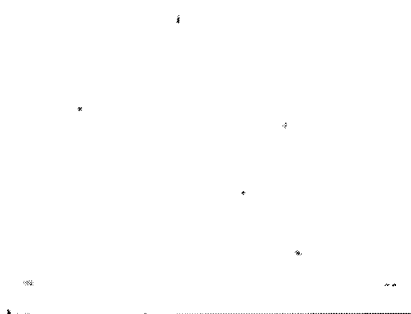


Figura 6. Fotomicrografía tomada a 50x del acero inoxidable 304.

La figura 7 muestra una gráfica de la curva deformación contra esfuerzos obtenida de las pruebas de tensión, donde al comparar los resultados experimentales con los reportados en la literatura¹¹, se encuentra que hay una variación en la determinación del esfuerzo de fluencia del 27% y de 2% con respecto a la resistencia última. La tabla 2 indica que las propiedades mecánicas varían de acuerdo a la orientación de la muestra tomada de la placa con respecto al conformado mecánico, es decir, en la dirección transversal se tiene una mayor resistencia mecánica que en la dirección longitudinal.

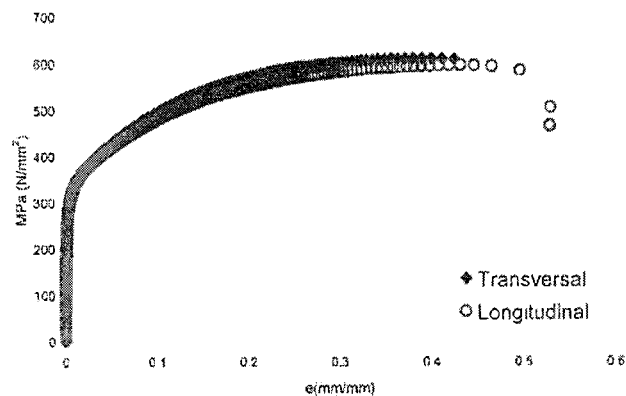


Figura 7. Datos experimentales de las propiedades mecánicas en la dirección transversal y longitudinal obtenidos en la máquina servohidráulica Instron.

Tabla 2. Propiedades mecánicas en aire del acero inoxidable utilizado.						
Probeta	E(MPa)	σ_0 (MPa)	σ_u (MPa)	%e	Reducción de área	Dureza (HRB)
Longitudinal	184415,6667	276,286	592,064	49,428	74,985	82,7
Transversal		281,287	609,838	47,196	74,043	

Uno de los problemas que se presentan en la determinación del K_{ISCC} es el tiempo para estimar su valor, pues se requiere alrededor de 10,000 horas sumergir el acero inoxidable en el medio de interés. Por otro lado, un estudio realizado en probetas de flexión en U han reportado que no presentan agrietamiento en un intervalo de pH de 6 a 10.

La figura 8 muestra la fractografía obtenida de las diferentes zonas de la probeta compacta de tensión después de la prueba de corrosión bajo esfuerzo. Se observa una ligera zona de corrosión en la punta de la grieta que indica la poca susceptibilidad del acero en el medio seleccionado, con el valor de K de 32 MPa $m^{1/2}$ y con un tiempo de 168 horas.

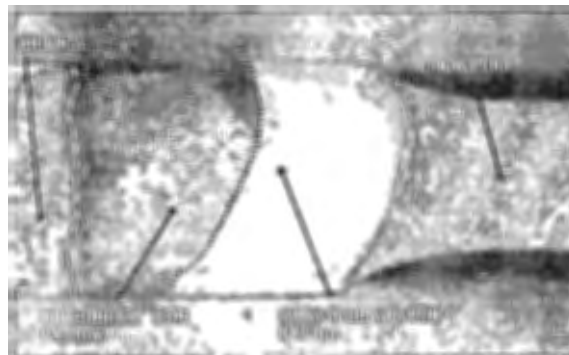


Figura 8. Fotografía de la probeta totalmente fracturada.

Otros estudios encuentran que la corrosión del acero inoxidable embebido en concreto es mínima¹⁶

Sin embargo, en pruebas realizadas en ambientes de cloruros¹⁷ a temperaturas de 100 °C muestran que las probetas de mecánica de fractura se agrietan a un valor de K_{ISCC} de 8-20 MPa $m^{1/2}$.

El interés de este estudio es realizar pruebas de corrosión bajo esfuerzo simulando el ambiente concreto metal en probeta preagrietadas por fatiga. El experimento se realiza a corriente anódica y desplazamiento constante para que cuando la grieta crezca el factor de intensidad de esfuerzos disminuya. Al haber una variación en el factor de intensidad de esfuerzos nos indicará la susceptibilidad al agrietamiento en dicho medio.

En la figura 9 se tiene la gráfica comparativa de las pruebas de Extrapolación de Tafel. A partir de la gráfica se puede calcular el efecto que tiene los diferentes medios sobre la velocidad de corrosión (V_{CORR}) y la intensidad de corriente (i_{CORR}), ver Tabla 3. Se encontró que V_{CORR} es más alta en el medio que contiene acero inoxidable, $Ca(OH)_2$ y agua de mar que del medio de acero inoxidable y $Ca(OH)_2$. En otras palabras, el contenido y tipos de cloruros tienen un efecto significativo en la velocidad de corrosión del acero inoxidable 304L.

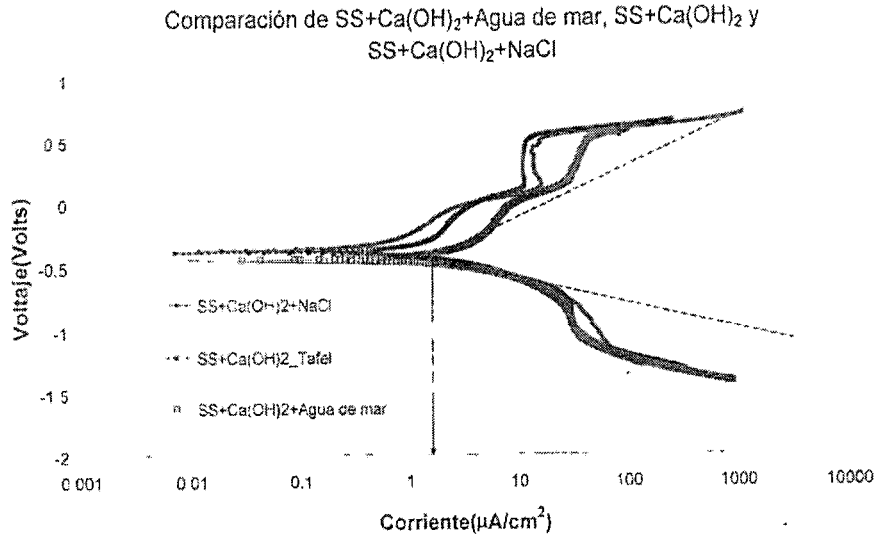


Figura 9. Extrapolación de Tafel. Gráfica comparativa de los 3 ambientes.

Tabla 3. Resultados obtenidos en los tres ambientes.		
Medio	i_{corr}	v_{corr}
SS + Ca(OH) ₂	0.375 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	4,32 $\mu\text{m}/\text{año}$
SS Ca(OH) ₂ NaCl	0.625 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	7,2 $\mu\text{m}/\text{año}$
SS + Ca(OH) ₂ agua de mar	1.4186 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	16,34 $\mu\text{m}/\text{año}$

Nota: SS Acero Inoxidable

CONCLUSIONES

A partir de la caracterización se identificó que el material era un acero inoxidable austenítico 304L por su composición química (contenido de carbono), metalografía y dureza.

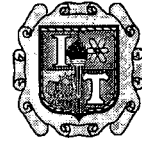
En las pruebas de tensión se observa el efecto que tiene el conformado mecánico sobre la orientación donde fueron tomadas las muestras. Los resultados muestran que la dirección transversal tiene una mayor resistencia que en la dirección longitudinal, pero esta última tiene una reducción de área mayor, lo que indica que el material es más dúctil en esa dirección de laminación. Esto se explica por la orientación de las inclusiones en el material.

Los resultados obtenidos en las pruebas de Extrapolación de Tafel nos muestran que el medio que estamos utilizando en la prueba es el más agresivo, ya que tiene una velocidad de corrosión de más del 300% con respecto al medio que solo contiene Ca(OH)₂. Con esta velocidad de corrosión se esperaría que la probeta presentara corrosión bajo esfuerzos, debido a que los aceros inoxidables son susceptibles a la corrosión por picaduras en ambientes de cloruros. Los resultados muestran que el acero inoxidable 304L utilizado en este experimento no es susceptible a la corrosión bajo esfuerzos en las condiciones de prueba realizadas (carga, pH, medio corrosivo, voltaje y tiempo expuesto). En ese tiempo el acero presentó una leve corrosión lo cual no fue significativo para que avanzara la grieta y, por lo tanto, disminuyera el valor de K.

REFERENCIAS

1. ASM HANDBOOK, Corrosion, 9na. edic., ASM INTERNATIONAL, Estados Unidos de America, Vol 13 (1998); pp.17-49, 61-189, 231-233, 239-241, 316-317, 377-379, 547-565, 893-925, 1299-1310
2. Moreno E., Torres A. y Castro P., Construcción del Muelle de Progreso, Ingeniería 8, J (2004); pp.61-66.
3. Torres A., Castro P., Moreno E., y et. al. El Muelle de Progreso, Yucatán: ejemplo de estructura durable, Ingeniería Civil Órgano oficial del Colegio de Ingenieros Civiles de Mexico 433 (2005) pp 30-36.
4. Knudsen A., Jensen F.M., Klinghoffer O. y Skovsgaard L., Cost-effective Enhancement of Durability of Concrete Structures by Intelligent Use of Stainless Steel Reinforcement, Conference on Corrosions and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures. (1998); pp 1-15.
5. Aminox, Pier in Progreso, Mexico, Inspection Report Evaluation of the Stainless Steel Reinforcement. (1999); pp 1.-62.
6. Dietzel W., Guidelines for fracture mechanics SCC testing, Project Characterization of Susceptibility of Metallic Materials to Environmentally Assisted Cracking, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH (1995); pp.1-160.
7. Jones R., Stress-Corrosion Cracking, Materials Performance and Evaluation, 1na. edic., 5ta. Reimpresión, ASM Internacional, Materials Park, Ohio 44073-0002, USA (1999), pp.1-39, 91-129, 363-415.
8. ASTM E 1681-9, Determining Threshold Stress Intensity Factor for Environment Assisted Cracking of Metallic Materials, Standard Test Method (2000); pp.1-11.
9. ASM HANDBOOK, Fatigue and Fracture, 9na. edic., ASM INTERNATIONAL, Estados Unidos de América, Vol 19 (1996), p 714.
10. Flint G. N. y Cox R.N., The resistance of stainless steel partly embedded in concrete to corrosion by seawater, Magazine of Concrete Research 40,142 (1988); pp13-27.

X.1.5. Carta de aceptación para el XXVII Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales.



XXVII Congreso
Internacional de Metalurgia y Materiales

ASUNTO: Resultado de Evaluación

28 de Septiembre 2005

Por este conducto estamos enviando los resultados de la evaluación de su trabajo **"EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGRIETAMIENTO DEL ACERO INOXIDABLE 304 EN PRUEBAS ACELERADAS DE CORROSION BAJO ESFUERZO"**

Presentado por: "Beatriz Castillo Márquez, Jorge Terán Guillén, José Trinidad Pérez Quiroz, Andrés Torres Acosta, Salvador Alvarado Balleza"

El resultado es **"APROBADO"** para ser presentado en la sección de **CARTELES**.

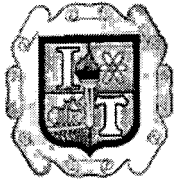
Para su presentación se dispondrá de un espacio de 80 x 120 cm. y el comité organizador proporcionará los materiales necesarios para el montaje de los carteles.

Sin más por el momento queda de usted.

Atentamente

Dr. Eduardo Valdés Covarrubias
Coordinador Técnico

X.1.6. Resumen presentado para el congreso de Metalurgia y Materiales del Instituto Tecnológico de Saltillo.



INSTITUTO TECNOLÓGICO
de saltillo



CARTEL 6

**EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGRIETAMIENTO
DEL ACERO INOXIDABLE 304 EN PRUEBAS ACCELERADAS DE
CORROSION BAJO ESFUERZO**

B. Castillo M.¹, J. Terán G.¹, J. T. Pérez Q.¹, A. Torres A.¹ S. Alvarado B.²

¹INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE
²UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

SALTILLO, COAHUILA 9, 10 Y 11 DE NOVIEMBRE DEL 2005.

EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGRIETAMIENTO DEL ACERO INOXIDABLE 304 EN PRUEBAS ACELERADAS DE CORROSION BAJO ESFUERZO

Beatriz Castillo Márquez¹, Jorge Terán Guillén¹, José Trinidad Pérez Quiroz¹,
Andrés Torres Acosta¹ Salvador Alvarado Balleza²

¹Instituto Mexicano del Transporte
Apartado Postal 1098
76000 Querétaro, Qro.
E-mail: bcastillo@imt.mx

²Universidad Autónoma de Querétaro
Cerro de las Campanas s/n.
76000. Querétaro, Qro

RESUMEN

Una de las dificultades que surgen al determinar el factor de intensidad de esfuerzos límite (K_{ISCC}) es el tiempo que se necesita para estimarlo en un medio determinado, pues según la norma ASTM 1681 se requieren 10 000 h de tiempo de permanencia para aceros de baja resistencia, que aproximadamente representa una velocidad de propagación de grietas en ambientes corrosivos de 1×10^{-8} mm/s. Actualmente, los aceros inoxidable se utilizan en la construcción de estructuras en ambientes marinos debido a su resistencia a la corrosión. De ahí el interés de conocer el comportamiento de este material en condiciones de corrosión bajo esfuerzos.


En este trabajo se determinó el valor del K_{ISCC} utilizando probetas de mecánica fractura (compactas de tensión), el ensayo se realizó a desplazamiento constante, con la salvedad de que las pruebas se aceleraron aplicando una corriente anódica. Estas probetas se preagrietaron por fatiga y se colocaron en un dispositivo, donde las probetas estuvieron sujetas a tensión, y al mismo tiempo, sumergidas en el medio alcalino, el cual simula el ambiente concreto-metal. Este medio se determinó realizando pruebas aceleradas de corrosión como: resistencia a la polarización y extrapolación de Tafel, para conocer la velocidad de corrosión y la corriente anódica que garantizaba el rompimiento de la película de óxido de cromo. Los sistemas utilizados fueron los siguientes:

- a) Agua de mar- $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- b) NaCl - $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- c) $\text{Ca}(\text{OH})_2$


Se presentan los resultados comparativos de los ensayos de tensión y del K_{ISCC} en las distintas orientaciones de laminación, asimismo, demostrando la validez de los resultados obtenidos en pruebas aceleradas con respecto a lo reportado en la literatura.

X.1.7. Reconocimiento por haber participado en la sesión de póster y asistencia al congreso.

Prueba de F
3



SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN
PÚBLICA



INSTITUTO TECNOLÓGICO de saltillo
Gobierno del Estado de Coahuila

Otorgan el presente

Reconocimiento

A:

Beatriz Castillo Márquez

Por su participación en la
sección de carteles en el

27 CONGRESO INTERNACIONAL DE METALURGIA Y MATERIALES

Celebrado en este Instituto Tecnológico
los días 9, 10 y 11 de Noviembre.

Satillo, Coahuila, Noviembre de 2005

Ing. Jesús Contreras Guroía
DIRECTOR