



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA QUÍMICA E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS  
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN METALURGIA Y MATERIALES  
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA METALURGIA

“EFECTO DE AMBIENTES CORROSIVOS EN LAS  
PROPIEDADES DE TENSIÓN UNIAXIAL Y  
FRACTURA POR IMPACTO CHARPY, DE  
ACERO ESTRUCTURAL BAJO CONTENIDO DE

TESIS  
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA  
METALÚRGICA  
PRESENTA

Ing. Victor Camargo Romero

ASESOR:  
Dr. Jorge Luis González Velázquez



MEXICO D.F., ENERO DE 2011.



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

SIP-14

*ACTA DE REVISIÓN DE TESIS*

En la Ciudad de México, D. F., siendo las 14:00 horas del día 5 del mes de Enero del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIQUIE para examinar la tesis titulada:

"EFECTO DE AMBIENTES CORROSIVOS EN LAS PROPIEDADES DE TENSIÓN UNIAxIAL Y FRACTURA POR IMPACTO CHARPY, DE ACERO ESTRUCTURAL BAJO CONTENIDO DE CARBONO"

Presentada por el alumno:

**CAMARGO**  
Apellido paterno

**ROMERO**  
Apellido materno

**VICTOR**  
Nombre(s)

Con registro: 

A	0	8	0	4	6	9
---	---	---	---	---	---	---

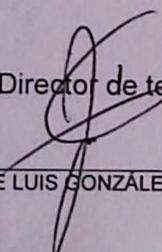
aspirante de:

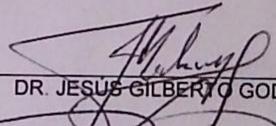
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA METALÚRGICA

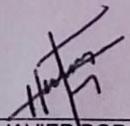
Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

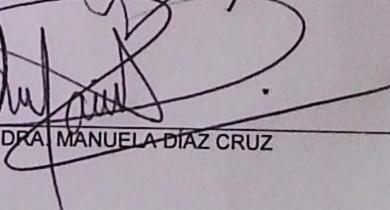
LA COMISIÓN REVISORA

Director de tesis

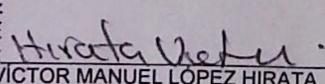
  
DR. JORGE LUIS GONZÁLEZ VELÁZQUEZ

  
DR. JESÚS GILBERTO GODÍNEZ SALCEDO

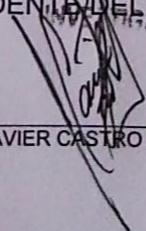
  
DR. HÉCTOR JAVIER DORANTES ROSALES

  
DRA. MANUELA DÍAZ CRUZ

  
DR. DIEGO ISRAEL RIVAS LÓPEZ

  
DR. VÍCTOR MANUEL LÓPEZ HIRATA

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

  
DR. JOSÉ JAVIER CASTRO ARELLANO



ESCUELA SUPERIOR DE  
INGENIERIA QUIMICA E  
INDUSTRIAS EXTRACCIONAS  
SECCION DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E  
INVESTIGACION



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de México, D.F el día 12 del mes de Enero del año 2010, el que suscribe **VICTOR CAMARGO ROMERO ALUMNO** del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERA METALÚRGICA** con número de registro **A080469**, adscrito a la **SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN- E.S.I.Q.I.E.**, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de **DR. JORGE LUIS GONZÁLEZ VELÁZQUEZ** y cede los derechos del trabajo intitulado **“EFECTO DE AMBIENTES CORROSIVOS EN LAS PROPIEDADES DE TENSIÓN UNIAXIAL Y FRACTURA POR IMPACTO CHARPY, DE ACERO ESTRUCTURAL BAJO CONTENIDO DE CARBONO”** al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **noar58.00@gmail.com**. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Victor Camargo Romero

Nombre y firma

## Resumen.

En este trabajo se presenta un estudio del efecto de las soluciones: NS-4 (pH = 8.10), Salmuera (pH = 4.50), Solución acida 1N (pH = 0.76), Solución  $K_{xy}$  (pH = 4.36),  $H_2O$  (pH = 7.10) y ambiente, en el comportamiento mecánico para un acero AISI 1018. Para conocer el efecto del medio en las propiedades mecánicas se maquinaron probetas de tensión en base a la norma ASTM E8 M-04 y probetas de impacto Charpy en base a la norma ASTM E23. Las pruebas de tensión fueron realizadas a temperatura ambiente mediante una maquina universal servo hidráulica con una velocidad de 0.05 mm/min, la probeta de tensión estuvo sujeta al medio desde el comienzo de la prueba hasta la terminación de la misma. Para las pruebas de tensión se empleo un tiempo proporcional a la duración de la prueba de tensión para tener inmersas las probetas para después impactarlas mediante un péndulo charpy. La caracterización fractográfica fue realizada mediante técnicas de estereoscopio y microscopia electrónico de barrido para cada uno de los medios en las pruebas de tensión e impacto donde se determino la morfología de la fractura así como otros aspectos encontrados en las muestras analizadas para cada uno de los medios Siendo los medios ácidos los que tuvieron mayor efecto en las propiedades de porcentaje de alargamiento y porcentaje de reducción de área, de igual modo las pruebas realizadas para este medio presentaron agrietamientos observados a simple vista. La mayoría de las probetas presentaron un tipo de copa astillada y fibrosa a escala macroscópica, siendo diferente en el medio acido donde presento una copa con zonas frágiles y grietas. Con respecto a las pruebas realizadas mediante impacto charpy se encontró un efecto menor que en lo analizado en pruebas de tensión, pero como se expresa en los resultados de esta tesis se encontró un efecto por parte de cada medio en las pruebas realizadas. En consecuencia se postula que este trabajo demuestra el efecto que tiene un medio acuoso en las propiedades mecánicas de un acero bajo contenido de carbono, lo cual se demuestra con la caracterización que se realiza en este trabajo.

## Abstract.

This paper presents a study of the effect of solutions: NS-4 (pH = 8.10), brine (pH = 4.50), 1N acid solution (pH = 0.76), KXY solution (pH = 4.36), H<sub>2</sub>O (pH = 7.10) and environment on the mechanical behavior for AISI 1018 steel. To determine the effect of the environment on the mechanical properties of tension test specimens are plotted based on the ASTM E8 M-04 and Charpy impact specimens according to ASTM E23. Stress tests were using a servo hydraulic universal machine with a speed of 0.05 mm / min, the tension specimen was subjected to the environment from the start of the race until the end of it. For the stress tests we used a time proportional to the duration of the stress test for the specimens to be immersed after Charpy impact by a pendulum. The characterization was done by fractographic techniques stereoscope and scanning electron microscopy for each of the media in the tensile and impact tests which determine the morphology of the fracture as well as other aspects found in the samples analyzed for each of the media As an acidic medium, which had greater effect on the properties of percentage elongation and percentage reduction in area, just as the tests for this medium showed cracks observed with the naked eye. Most of the specimens showed a type of fibrous and splintered a macroscopic scale, being different in the acidic medium where she presented a drink with fragile areas and cracks. With regard to the Charpy impact tests using a smaller effect was found in the analysis in stress testing, but as expressed in the results of this study found an effect of each medium in the tests. Therefore it is postulated that this work demonstrates the effect of an aqueous medium on mechanical properties of low carbon steel, which is demonstrated with the characterization that is made in this work.



# Índice.

## Contenido

Resumen.....	4
Abstract.....	5
Índice.....	7
Introducción.....	13
I. Antecedentes teóricos.....	14
1.1 Ensayo de tensión.....	14
1.2 Ensayo de impacto Charpy .....	16
Ensayes de impacto.....	17
Información que proporciona el ensaye .....	18
1.3 Fractura ambiental.....	20
1.4 Agrietamiento por Corrosión – Esfuerzo (ACE).....	21
II. Desarrollo experimental.....	24
2.1. Diagrama experimental.....	24
2.2. Caracterización metalúrgica.....	25
2.3. Ensayo de tensión de acero AISI 1018 en aire y ambientes.....	26
2.4. Ensayo de impacto charpy de acero 1018 en aire y ambientes.....	28
2.7. Examen fractográfico macroscópico.....	30
2.8. Examen fractográfico microscópico.....	30
III. Resultados.....	32
3.1. Caracterización metalúrgica.....	32
3.1.1 Estudio metalográfico.....	32
3.1.2 Análisis químico.....	33
3.1.3 Pruebas de dureza.....	33

3.2	Pruebas de tensión, ambiente y medios.....	34
3.2.1	Caracterización metalográfica de copas cono. ....	36
3.3	Pruebas de impacto Charpy, ambiente y medios. ....	40
3.3.1	Caracterización metalográfica charpy.....	41
3.4.	Examen fractográfico macroscópico.....	45
3.4.1	Examen fractográfico macro tensión.....	45
3.4.2	Examen fractográfico macro charpy.....	48
3.5.	Examen fractográfico microscópico.....	52
4.5.3	Examen fractográfico micro tensión.....	52
IV.	Análisis de resultados.....	56
4.1.	Análisis de las propiedades mecánicas de tensión en medios.....	56
4.2.	Análisis de las propiedades de impacto charpy en medios.....	58
4.3.	Análisis fractográfico fracturas tensión.....	58
4.4.	Análisis fractográfico de fracturas impacto charpy.....	59
V.	Conclusiones.....	60
	Referencias.....	61

FIGURA 1. A) ESQUEMA DE UNA MAQUINA HIDRÁULICA, PARA REALIZAR PRUEBAS DE TENSIÓN A MATERIALES. B) EJEMPLO DE UNA CURVA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN, DONDE SE MUESTRA EL COMPORTAMIENTO DE UNA MUESTRA METÁLICA AL SER SOMETIDA EN TENSIÓN.	14
FIGURA 2. GRAFICO DE ESFUERZO VS DEFORMACIÓN [4]	15
FIGURA 3. PÉNDULO DE IMPACTO CHARPY. GEOMETRÍA Y DIMENSIONES DE LAS DIFERENTES PROBETAS CHARPY. [6]	19
FIGURA 4. PATRÓN DE COMPARACIÓN DE ASTM E23 QUE MUESTRA LA ESTIMACIÓN DEL PORCENTAJE DE FRACTURA DÚCTIL. [6]	19
FIGURA 5. FACTORES QUE PROMUEVEN LA FRACTURA AMBIENTAL.	20
FIGURA 6. MECANISMO GENERAL DEL ACE.	22
FIGURA 7. <i>METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL ESTUDIO.</i>	24
FIGURA 8. EQUIPO Y SISTEMA EMPLEADO PARA LA REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS EN TENSIÓN. A) VISTA GENERAL DE MAQUINA UNIVERSAL SHIMADZU. B) MODELO DE PRUEBA PARA MEDIO ACUOSO “CD2” EN OPERACIÓN, C) HIDRÓMETRO Y MEDIDOR DE PH EN UNA PRUEBA NORMAL CON UN MEDIO Y D) VISTA INTERNA DEL ELECTRODO MIDIENDO EL PH EN UNA PRUEBA CON SOLUCIÓN ASTM G5 SOLUCIÓN ACIDA 1N.	28
FIGURA 9. PÉNDULO CHARPY EMPLEADO DURANTE PRUEBAS DE IMPACTO.	29
FIGURA 10. VISTA GENERAL DE SEIS PROBETAS DE IMPACTO CHARPY EN LOS DIVERSOS MEDIOS ACUOSOS AL COMIENZO DE HABER SIDO SUMERGIDAS PARA SU IMPACTO.	29
FIGURA 11. ACERCAMIENTO A DETALLE DEL COMPORTAMIENTO DEL MEDIO ACUOSO SOBRE LA PROBETA DE IMPACTO CHARPY A UNOS MINUTOS DE HABER SIDO SUMERGIDA PARA SU ENSAYO EN IMPACTO.	30
FIGURA 12. TIPO Y FORMA DE LAS INCLUSIONES NO METÁLICAS DEL ACERO. TIPO D SERIE FINA. MICROSCOPIO METALOGRAFICO, 10X, CAMPO CLARO SIN ATAQUE. A) 1018 REDONDO SECCIÓN LONGITUDINAL, B) 1015 CUADRADO SECCIÓN LONGITUDINAL.	32
FIGURA 13. IMÁGENES DE MICROESTRUCTURA A) 1018 REDONDO LONGITUDINAL Y B) 1018 CUADRADO LONGITUDINAL, CONSISTENTE EN UNA MATRIZ FERRITICA CON COLONIAS DE PERLITA LAMINAR. MICROSCOPIO METALOGRAFICO CAMPO CLARO, ATAQUE CON NITAL 3%, 50X.	33
FIGURA 14. METALOGRAFÍAS DE SECCIÓN TRANSVERSAL DE FRACTURA COPA Y CONO DE PROBETAS DE TENSIÓN, ORDENAS SEGÚN EL PH AL CUAL ESTUVIERON SOMETIDAS. EMPEZANDO CON AMBIENTE HASTA SOLUCIÓN ACIDA.	37

FIGURA 15. METALOGRAFÍA DE PERFIL LONGITUDINAL DE COPA CONO DE PRUEBA EN AMBIENTE. MICROSCOPIO ÓPTICO CAMPO CLARO, 5X Y 10X, NITAL 3.	37
FIGURA 16. METALOGRAFÍA DE PERFIL LONGITUDINAL DE COPA CONO DE PRUEBA EN NS4 MICROSCOPIO ÓPTICO CAMPO CLARO, 5X Y 10X , NITAL 3.	38
FIGURA 17. METALOGRAFÍA DE PERFIL LONGITUDINAL DE COPA CONO DE PRUEBA EN H <sub>2</sub> O. MICROSCOPIO ÓPTICO CAMPO CLARO, 5X, 20X, NITAL 3.	38
FIGURA 18. METALOGRAFÍA DE PERFIL LONGITUDINAL DE COPA CONO DE PRUEBA EN MEDIO SALMUERA. MICROSCOPIO ÓPTICO CAMPO CLARO, 5X Y 20X, NITAL 3.	39
FIGURA 19. METALOGRAFÍA DE PERFIL LONGITUDINAL DE COPA CONO DE PRUEBA EN MEDIO SOLUCIÓN K MICROSCOPIO ÓPTICO CAMPO CLARO, 5X Y 20X, NITAL 3.	39
FIGURA 20. METALOGRAFÍA DE PERFIL LONGITUDINAL DE COPA CONO DE PRUEBA EN MEDIO SOLUCIÓN ACIDA MICROSCOPIO ÓPTICO CAMPO CLARO, 5X Y 10X, ATAQUE MEDIANTE NITAL 3.	40
FIGURA 21. METALOGRAFÍA DE PERFIL LONGITUDINAL DE COPA CONO DE PRUEBA EN MEDIO SOLUCIÓN ACIDA MICROSCOPIO ÓPTICO CAMPO CLARO, 50X, NITAL 3.	40
FIGURA 22. COMPARACIÓN ESQUEMÁTICA DEL TIPO DE FRACTURA CON RESPECTO AL MEDIO Y SU PH	41
FIGURA 23. METALOGRAFÍA DE PERFIL LONGITUDINAL DE PROBETA DE IMPACTO EN MEDIO AMBIENTE MICROSCOPIO ÓPTICO CAMPO CLARO, 5 X Y 20X, NITAL 3.	42
FIGURA 24. METALOGRAFÍA DE PERFIL LONGITUDINAL DE PROBETA DE IMPACTO EN MEDIO NS4 MICROSCOPIO ÓPTICO CAMPO CLARO, 5 X, 10X Y 20X, NITAL 3.	42
FIGURA 25. METALOGRAFÍA DE PERFIL LONGITUDINAL DE PROBETA DE IMPACTO EN MEDIO H2O MICROSCOPIO ÓPTICO CAMPO CLARO, 5 X Y 20X, NITAL 3.	43
FIGURA 26. METALOGRAFÍA DE PERFIL LONGITUDINAL DE PROBETA DE IMPACTO EN MEDIO H2O MICROSCOPIO ÓPTICO CAMPO CLARO, 5 X Y 20X, ATAQUE MEDIANTE NITAL 3.	43
FIGURA 27. METALOGRAFÍA DE PERFIL LONGITUDINAL DE PROBETA DE IMPACTO EN MEDIO K MICROSCOPIO ÓPTICO CAMPO CLARO, 5 X, 20X, NITAL 3.	44
FIGURA 28. METALOGRAFÍA DE PERFIL LONGITUDINAL DE PROBETA DE IMPACTO EN MEDIO ACIDO MICROSCOPIO ÓPTICO CAMPO CLARO, 20X, NITAL 3.	44
FIGURA 29. FOTOGRAFÍA MACRO DE PROBETA EN MEDIO AMBIENTE ASÍ COMO ACERCAMIENTO MEDIANTE ESTEREOSCOPIO.	45
FIGURA 30. FOTOGRAFÍA MACRO DE PROBETA EN MEDIO NS-4 ASÍ COMO ACERCAMIENTO MEDIANTE ESTEREOSCOPIO.	45
FIGURA 31. FOTOGRAFÍA MACRO DE PROBETA EN MEDIO AMBIENTE H <sub>2</sub> O <sub>CEPROMIM</sub> ASÍ COMO ACERCAMIENTO MEDIANTE ESTEREOSCOPIO.	46
FIGURA 32. FOTOGRAFÍA MACRO DE PROBETA EN MEDIO SALMUERA ASÍ COMO ACERCAMIENTO MEDIANTE ESTEREOSCOPIO.	46

FIGURA 33. FOTOGRAFÍA MACRO DE PROBETA EN MEDIO SOLUCIÓN K ASÍ COMO ACERCAMIENTO MEDIANTE ESTEREOSCOPIO.	47
FIGURA 34. FOTOGRAFÍA MACRO DE PROBETA EN MEDIO ACIDO ASÍ COMO ACERCAMIENTO MEDIANTE ESTEREOSCOPIO.	48
FIGURA 35. FOTOGRAFÍA MACRO DE PROBETA EN MEDIO AMBIENTE ASÍ COMO ACERCAMIENTO MEDIANTE ESTEREOSCOPIO.	48
FIGURA 36. FOTOGRAFÍA MACRO DE PROBETA EN MEDIO AMBIENTE ASÍ COMO ACERCAMIENTO MEDIANTE ESTEREOSCOPIO.	49
FIGURA 37. FOTOGRAFÍA MACRO DE PROBETA EN MEDIO H <sub>2</sub> O ASÍ COMO ACERCAMIENTO MEDIANTE ESTEREOSCOPIO.	49
FIGURA 38. FOTOGRAFÍA MACRO DE PROBETA EN MEDIO SALMUERA ASÍ COMO ACERCAMIENTO MEDIANTE ESTEREOSCOPIO.	50
FIGURA 39. FOTOGRAFÍA MACRO DE PROBETA EN MEDIO SOLUCIÓN K ASÍ COMO ACERCAMIENTO MEDIANTE ESTEREOSCOPIO.	50
FIGURA 40. FOTOGRAFÍA MACRO DE PROBETA EN MEDIO ACIDO ASÍ COMO ACERCAMIENTO MEDIANTE ESTEREOSCOPIO.	51
FIGURA 41. FOTOGRAFÍAS MEDIANTE MEB A UNA MAGNIFICACIÓN DE 10 Y 1500 AUMENTOS	52
FIGURA 42. FOTOGRAFÍAS MEDIANTE MEB A UNA MAGNIFICACIÓN DE 10 Y 1500 AUMENTOS	52
FIGURA 43. FOTOGRAFÍAS MEDIANTE MEB A UNA MAGNIFICACIÓN DE 10 Y 1500 AUMENTOS.	53
FIGURA 44. FOTOGRAFÍAS MEDIANTE MEB A UNA MAGNIFICACIÓN DE 10 Y 1500 AUMENTOS.	54
FIGURA 45. FOTOGRAFÍAS MEDIANTE MEB A UNA MAGNIFICACIÓN DE 10 Y 1500 AUMENTOS.	54
FIGURA 46. FOTOGRAFÍAS MEDIANTE MEB A UNA MAGNIFICACIÓN DE 10 Y 1500 AUMENTOS.	55

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DE LAS FRACTURAS FRÁGIL Y DÚCTIL.	17
TABLA 2. MECANISMO DE AGRIETAMIENTO.	22
TABLA 3. COMPOSICIÓN DE LOS MEDIOS EMPLEADOS.	27
TABLA 4. PARÁMETROS ESTEREOLÓGICOS DE LA MICROESTRUCTURA.	32
TABLA 5. RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO EN % PESO.	33
TABLA 6. VALORES DE DUREZA ROCKWELL EN ESCALA B.	33
TABLA 7. PROPIEDADES DE TENSIÓN UNIAXIAL, AMBIENTE.	34
TABLA 8. PROPIEDADES MECÁNICAS DE ENSAYOS EN TENSIÓN EN MEDIOS ACUOSOS.	35
TABLA 9. ORDEN DE SOLUCIÓN DE ACUERDO AL PH, TENSIÓN	36
TABLA 10. RESULTADOS DE IMPACTO CHARPY, AMBIENTE	40
TABLA 11. RESULTADOS DE IMPACTO CHARPY, AMBIENTE	41
TABLA 12. ORDEN DE SOLUCIÓN DE ACUERDO AL PH, CHARPY	41
TABLA 13. PROPIEDADES MECÁNICAS DE ENSAYOS EN TENSIÓN EN MEDIOS ACUOSOS.	56
TABLA 14. RESULTADOS DE IMPACTO CHARPY, AMBIENTE	58

## Introducción.

La gran mayoría de los equipos, componentes, maquinas y partes metálicas son utilizados en ambientes corrosivos. Normalmente, en el diseño se considera que la corrosión provocará la pérdida de masa y en combinación con esfuerzos puede generar agrietamientos.

El estudio de la corrosión y las fuentes de agrietamiento asociados a ella son objeto de extensos estudios y por lo general los ingenieros asumen que las propiedades llamadas “Monotónicas”, como el límite de cedencia, la resistencia máxima, la ductilidad y la energía de impacto charpy, no son afectadas directamente por el ambiente, de manera que tanto en el diseño, como en la evaluación de aptitud para servicio, se consideran propiedades de tensión y energía de impacto charpy determinadas en aire de laboratorio y el efecto de la exposición al ambiente corrosivo, únicamente se toma en cuenta para la predicción de VR cuando se presentan fenómenos de fractura asistida por el ambiente como el SCC o la corrosión –fatiga.

Sin embargo, en algunos análisis de fallas realizados por el Grupo de Análisis de Integridad de Ductos (GAID) del Instituto Politécnico Nacional, se ha observado que la carga o esfuerzo de falla calculado es mayor que el observado en el componente fallado, lo que sugiere que aún con tiempos de exposición breves (Minutos o pocas horas) las propiedades monotónicas son afectadas por el ambiente.

Los resultados son interpretados en comparación con los datos obtenidos a las pruebas en aire de laboratorio y en función de los efectos en la superficie y la superficie de fractura.

Por lo anteriormente descrito, en esta tesis, se realizó una experimentación con el fin de evaluar el efecto en las propiedades de tensión y energía de impacto charpy de un acero de uso estructura (AISI 1018) expuesto a ambientes corrosivos.

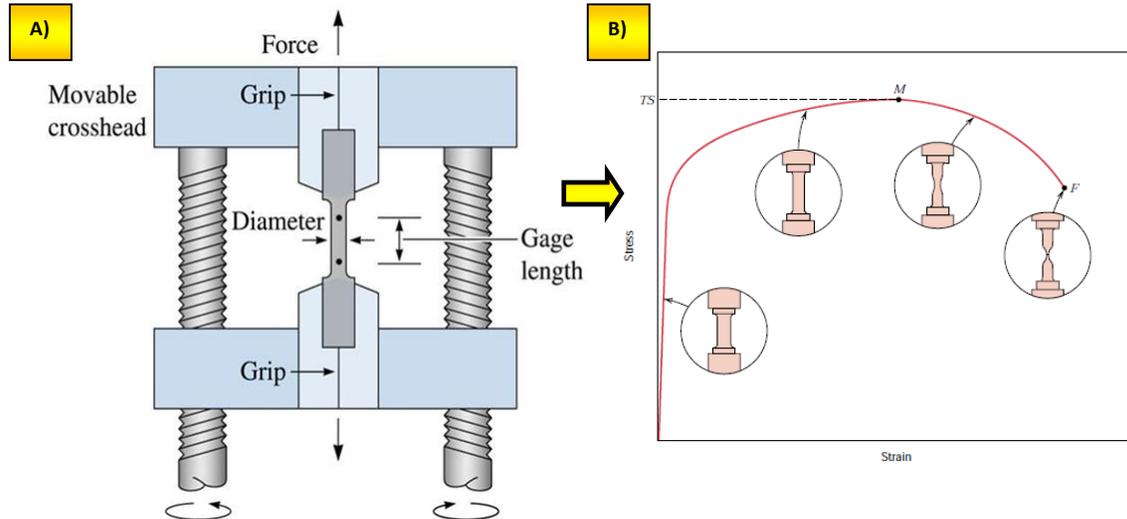
Para esto se realizaron ensayos de tensión y pruebas de impacto charpy, en probetas expuestas a los siguientes medios: Salmuera, Solución NS – 4, Solución “K<sub>xy</sub>”, Solución acida ASTM y Agua. Como parte del estudio se hizo la evaluación fractográfica de las superficies de fractura de las probetas de impacto charpy y probetas de tensión ensayadas en los diferentes medios, mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido

## I. Antecedentes teóricos.

### 1.1 Ensayo de tensión.

El ensayo de tensión es la prueba física comúnmente empleada para evaluar las propiedades mecánicas más importantes en los materiales. Mediante este ensayo podemos obtener información acerca de la plasticidad, resistencia mecánica y fractura de todo tipo de materiales que presentan cierto grado de ductilidad [1].

Una probeta de dimensiones preestablecidas [2] se somete a una carga uniaxial uniforme que se incrementa gradualmente Figura 1. Simultáneamente, la carga aplicada y el desplazamiento ó alargamiento producido en la probeta son graficados mediante el software de una PC.



**Figura 1.** A) Esquema de una maquina hidráulica, para realizar pruebas de tensión a materiales. B) Ejemplo de una curva Esfuerzo vs Deformación, donde se muestra el comportamiento de una muestra metálica al ser sometida en tensión.

A partir de la Curva de Carga vs Desplazamiento se construye una gráfica Esfuerzo Ingenieril vs Deformación Ingenieril (Esfuerzo Nominal vs Deformación Nominal), Figura 2 [3].

El esfuerzo nominal ó ingenieril se define como la relación que existe entre la carga aplicada y el área transversal inicial:

$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$

Ecuación 1

Donde:

- $\sigma$  = Esfuerzo ingenieril o nominal (Kgf/mm<sup>2</sup> ó N/mm<sup>2</sup>, MPa).
- $P$  = Carga aplicada (Kgf).

- $A_0$  = Área de la sección transversal ( $\text{mm}^2$ ).

La deformación nominal ó ingenieril está dada por el incremento relativo de la longitud que sufre la probeta:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_i - l_0}{l_0}$$

Ecuación 2

Donde:

- $\varepsilon$  = Deformación ingenieril (mm/mm).
- $l_0$  = Longitud de calibración (Inicial, mm).
- $l_i$  = Longitud instantánea (Final, mm).

La Reducción de Área está dada reducción en el área transversal original, que sufre la probeta:

$$RA = \frac{A_0 - A_F}{A_0}$$

Ecuación 3

Donde:

- $RA$  = Reducción de Área ( $\text{mm}^2/\text{mm}^2$ ).
- $A_0$  = Área Inicial Calculada ( $\text{mm}^2$ ).
- $A_i$  = Área Final Calculada ( $\text{mm}^2$ ).

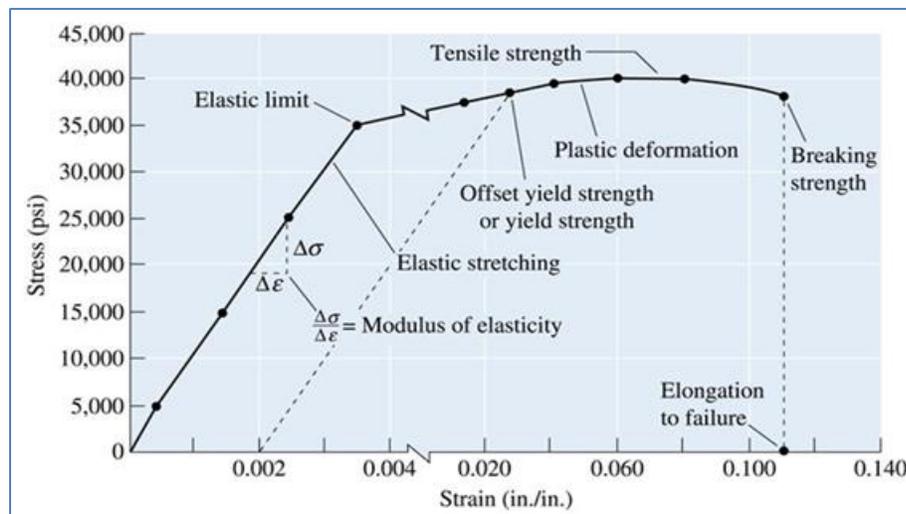


Figura 2. Grafico de Esfuerzo vs Deformación [4]

Parámetros que proporciona la curva Esfuerzo vs Deformación Ingenieriles (Figura 2), [5]

1. **Límite Elástico ( $S_0$  ó  $\sigma_0$ ).** Parámetro que proporciona información sobre las propiedades de cedencia. Es una medida de la magnitud del esfuerzo uniaxial que se puede aplicar a un material sin producirle deformación permanente. También se le conoce como límite de cedencia.

2. **Resistencia Máxima a la Tensión ( $S_{Max}$  ó  $UTS$ ).** Esfuerzo máximo nominal al que puede someterse un material en tensión uniaxial sin producir en él deformación plástica localizada (Constricción).
3. **Esfuerzo de Ruptura ( $S_{Rup}$  ó  $\sigma_{Rup}$ ).** Esfuerzo nominal al que fractura un material.
4. **Modulo de Young (E).** Es la pendiente de la región elástica de la curva; es una medida de la rigidez del material.
5. **Deformación Elástica ( $e_o$ ).** Es la máxima deformación que puede sufrir un cuerpo sin variar permanentemente sus dimensiones originales.
6. **Deformación Uniforme ( $e_u$ ).** Deformación plástica que puede sufrir un cuerpo sin variar permanentemente sus dimensiones originales.
7. **Alargamiento Final.** Es el porcentaje de alargamiento que presenta una probeta después del ensayo. Es una medida de la ductilidad de un material.
8. **Reducción de Área.** Es el porcentaje de reducción en el área transversal original. Es una medida de la ductilidad.
9. **Modulo de Resiliencia.** Se define como el área bajo la curva de la región de deformación elástica. Es una medida de la capacidad para absorber energía durante la deformación elástica.
10. **Modulo de Tenacidad.** Se define como el área bajo la curva de la región de deformación elástica. Es una medida de la capacidad para absorber energía durante la deformación elástica.
11. **Aspecto y Morfología de la Fractura.** Proporciona información general acerca de características del comportamiento de fractura en tensión.

## 1.2 Ensayo de impacto Charpy .

En épocas recientes el descubrimiento de nuevos procesos tecnológicos ha impulsado el desarrollo de materiales que deben resistir condiciones de operación severas (sobre todo de temperatura, esfuerzo, velocidad de aplicación de carga y nivel de concentración de esfuerzos). Este desarrollo ha sido posible gracias a la implementación de teorías y métodos de prueba que permiten la evaluación del comportamiento mecánico de los materiales, [5]

Durante la segunda guerra mundial una gran parte de los buques y tanques de guerra del bloque aliado se fracturaban al ser sometidos a las bajas temperaturas del mar del Norte y las Estepas Siberianas. Debido a esto surgió la necesidad de evaluar el comportamiento dúctil/frágil de

materiales bajo aplicación de cargas dinámicas y a diferentes temperaturas, ya que muchos metales se fracturaban de manera frágil al aplicarles esfuerzos muchos menores al esfuerzo de cedencia

El modo de fractura puede clasificarse primeramente en dos tipos: dúctil y frágil, cada uno de ellos posee características particulares. En general, se procura evitar que los materiales fallen de manera frágil, ya que dicho modo de falla generalmente se da en una manera catastrófica. En la tabla 1 se muestran las características generales.

**Tabla 1. Características de las fracturas frágil y dúctil.**

Característica	Fractura dúctil	Fractura frágil
Modo cristalográfico	Corte	Clivaje
Apariencia de fractura	Fibrosa	Granular
Deformación de fractura	Dúctil	Frágil
Reflexión de la luz	Opaca	Brillosa
Macro deformación	Elevada	Casi nula
Micro deformación	Elevada	Casi nula
Velocidad de propagación	Lenta	Rápida

El modo de fractura de los materiales dependerá de la interacción de tres factores principales:

- a. Estado de esfuerzos
- b. Velocidad de aplicación de carga
- c. Temperatura

**Ensayes de fractura.** Actualmente se cuenta con una gran variedad de métodos de prueba que permiten evaluar el comportamiento de fractura de los materiales. En general podemos clasificarlos en:

- a. Ensayes de Impacto.
- b. Ensayes de Resistencia a la fractura.

### Ensayes de impacto

Los ensayos de impacto más populares son los ensayos Charpy e Izod, que son pruebas de flexión por impacto. Ambos son similares y la diferencia entre ellos radica en la geometría y en la manera en que se sujeta la probeta.

Consiste en medir la energía absorbida por una probeta ranurada, de dimensiones preestablecidas, que es golpeada con un martillo oscilante de masa conocida [6].

El martillo o péndulo pierde energía por fricción en los cojinetes sobre los que gira, la oposición del aire frente al péndulo, por fricción de la muestra al momento de fracturarse, por disipación de

energía térmica durante la fractura, etc. Mediante la medición de la energía potencial inicial y final, del péndulo y considerando las pérdidas mencionadas, podemos estimar la energía absorbida por la muestra durante el proceso de fractura.

Los ensayos de impacto están caracterizados en las normas ASTM. La especificación que regula tanto al método Charpy como al Izod es la E23 [6]. Algunas de las características más importantes son:

**Dimensiones y tipo de probeta.** En la figura 3A se aprecian los tres tipos de probeta Charpy que existen y sus dimensiones. La probeta más empleada es la de ranura en “V” a 45°. En la fig. 3B se muestran la colocación de la probeta en el yunque de prueba y las dimensiones que éste debe cumplir.

**Muesca ó Ranura.** Las dimensiones más críticas de una probeta son las de la ranura, ya que funciona como un concentrador de esfuerzos.

Al existir una variación en el radio de la base de la entalla y/o el ángulo de la misma se varía la magnitud de concentración del esfuerzo aplicado durante el choque; con esto se provoca una gran variación de resultados en ensayos realizados en las mismas condiciones de temperatura y material.

**Temperatura de prueba.** Cuando se desea estimar la energía absorbida a una temperatura dada ó determinar el comportamiento de un metal sobre un rango de temperaturas, las principales condiciones que deben cumplirse para realizar un ensayo estándar son:

La probeta deberá estar sumergida en un baño isotérmico con una variación de +0, - 1.5 °C de la temperatura de ensayo, por lo menos durante 5 minutos, y a una distancia mínima de una pulgada del nivel del líquido y del fondo del recipiente. El tiempo del que se dispone para extraer la probeta, colocarla y fracturarla es de 5 segundos máximo. Debido al tipo de sujeción de probeta para el ensayo Izod no es posible realizar pruebas a temperaturas diferentes a la ambiente.

#### Información que proporciona el ensayo

1. **Energía de impacto absorbida.** Denominada CV ó resiliencia<sup>1</sup>. Es la energía empleada en el proceso de fractura. Se puede expresar en N – m, Joules, Kgf – m ó lbf – pie. Este parámetro se lee directamente en la carátula de la máquina de impacto. Es importante señalar que la energía medida mediante este ensayo es una energía relativa y por lo tanto no puede emplearse en cálculos de diseño.
2. **Apariencia de fractura.** La apariencia de la fractura es una estimación del comportamiento dúctil/frágil de los metales. Se determina evaluando las proporciones de cada tipo de

fractura que presenta la probeta ensayada (Figura 4). En ASTM E23 se emplea un patrón de comparación para estimar las cantidades de fractura dúctil, la cual se localizará al centro de la fractura.

3. **Ductilidad.** Se evalúa midiendo la contracción que sufre la probeta en la base de la ranura

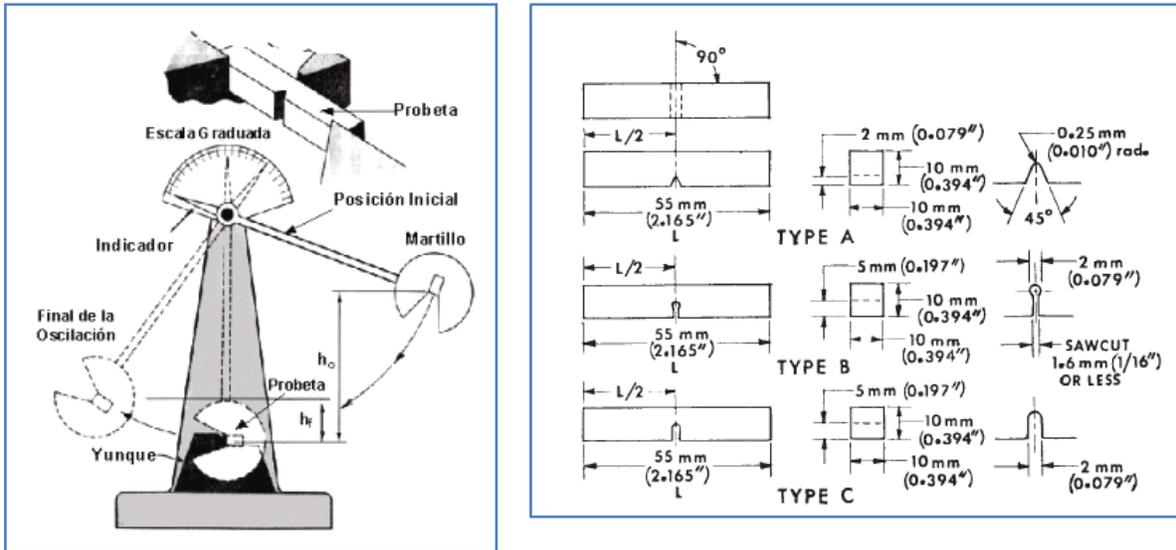


Figura 3. Péndulo de impacto Charpy. Geometría y dimensiones de las diferentes probetas Charpy. [6]

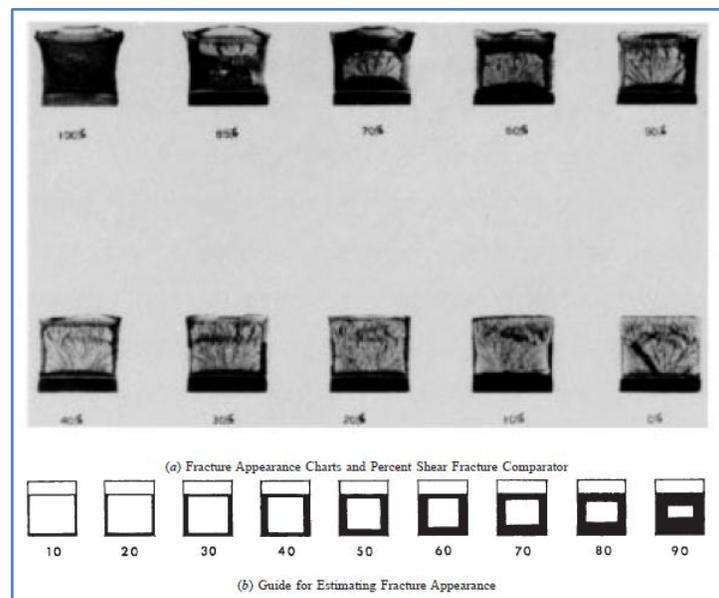


Figura 4. Patrón de comparación de ASTM E23 que muestra la estimación del porcentaje de fractura dúctil. [6]

### 1.3 Fractura ambiental.

Un término introducido recientemente en fractura es la “FRACTURA AMBIENTAL” ó “FRACTURA ASISTIDA POR EL AMBIENTE”, la cual se puede definir como una fractura lenta o estable que ocurre por la acción combinada de cargas y el ambiente. En términos simples, podemos decir que un componente fractura después de algún tiempo de exposición a un ambiente moderadamente agresivo cuando está sometido a cargas moderadas, que de otra manera no causarían la falla por sí mismos, tendremos un caso de fractura ambiental [7]

Existen una gran variedad de casos de fractura ambiental tanto en la industria como en la vida cotidiana; un ejemplo es el agrietamiento de las mangueras de plástico enrolladas, cuando son abandonadas durante algún tiempo en un jardín a la intemperie. En este caso la agresividad del ambiente proviene de la radiación solar y la humedad y los esfuerzos son producidos por la flexión de la manguera.

En general, la fractura ambiental resulta de la interacción de tres factores que se ilustran en la siguiente figura 5

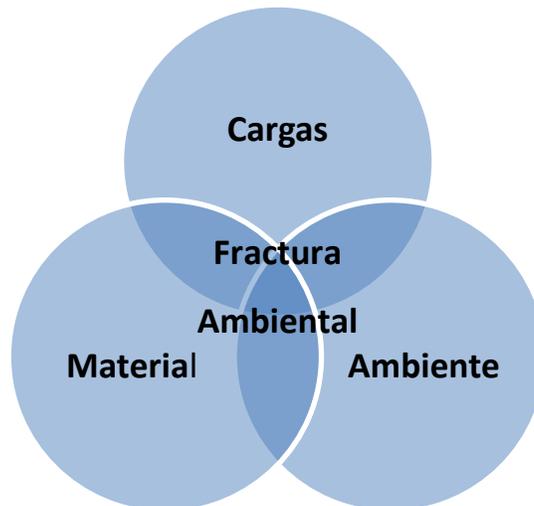


Figura 5. Factores que promueven la fractura ambiental.

Sin embargo, la mera coexistencia de una combinación CARGA – AMBIENTE – MATERIAL, no es suficiente para que la fractura ambiental ocurra, cada factor, individualmente debe satisfacer los siguientes requisitos:

- **Material.** Debe ser susceptible a la acción agresiva del ambiente, en el sentido de que el medio debe producir una forma de daño estructural o microestructural que a su vez conduzca a una disminución de propiedades mecánicas, a la pérdida de masa o a la generación de discontinuidades o grietas.

- **Ambiente.** Debe ser moderadamente agresivo. Esto es porque si el ambiente es demasiado agresivo, el daño producido es muy rápido y la falla ocurre por corrosión, que no implica la propagación estable de una grieta. La agresividad del ambiente debe ser tal que produzca un efecto significativo pero por si solo no sea suficiente para llevar a la falla.
- **Cargas.** Deben ser lo suficientemente altas para proveer el trabajo necesario para la abertura y propagación de grietas. Generalmente las cargas deben generar esfuerzos por arriba de un valor límite, para que la grieta se propague. Este valor límite es establecido experimentalmente.

Debe quedar claro que la eliminación de cualquiera de las tres condiciones arriba descritas detiene el proceso de fractura ambiental.

Las principales formas de fractura ambiental son:

1. Agrietamiento por corrosión y esfuerzos.
2. Agrietamiento por termofluencia.
3. Agrietamiento inducido por hidrógeno.
4. Fractura asistida por radiación.

El agrietamiento por corrosión y esfuerzos (Stress Corrosión Cracking, en ingles), es la forma de fractura ambiental que ocurre más frecuentemente y por lo mismo es la más estudiada. Las otras tres formas de fractura ambiental, frecuentemente son tratadas de manera separada en los textos de fractura.

#### 1.4 Agrietamiento por Corrosión – Esfuerzo (ACE)

El agrietamiento por corrosión y esfuerzos (ACE) es una forma de fractura estable o retardada que ocurre por la interacción sinérgica de un ambiente corrosivo, un material susceptible y un esfuerzo suficientemente alto que provocan la propagación de una grieta. Al igual que la fatiga, el ACE provoca la extensión de una grieta hasta su tamaño crítico, provocando una fractura. [8]

El fenómeno de ACE es más general de lo que se piensa y se puede decir que cualquier componente estructural que presente grietas o fractura después de haber estado sujeto un tiempo a la acción de un esfuerzo, ha sido víctima del ACE.

Desde el punto de vista fractográfico, en el ACE no existe una diferencia clara entre la etapa de iniciación y la de propagación de grietas, sino que las diferencias observadas en superficies de

fractura, a medida que la grieta avanza se deben mas al incremento del esfuerzo y la deformación en la punta de la grieta que a la transición de una etapa a otra. [8]

En ACE se pueden distinguir 2 formas generales de agrietamiento:

1. **Controlado por el ambiente:** predominancia de los mecanismos de disolución con presencia de gruesas capas de productos de corrosión sobre la superficie de fractura y evidencias de picaduras y ataque selectivo en la superficie de fractura limpia.
2. **Controlado por esfuerzos:** predominancia de formas frágiles de la fractura, como son facetas y patrones de río y existencia de películas delgadas de productos de corrosión.

Dada la gran variedad de combinaciones ambiente – material – propiedades que se pueden presentar, no existe un mecanismo único de propagación de grietas por **ACE**. La siguiente figura 8 muestra un modelo general del **ACE**.

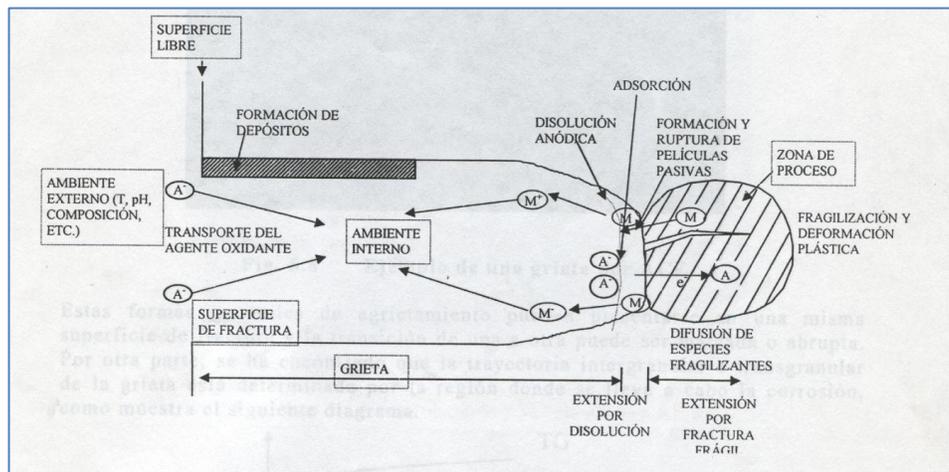


Figura 6. Mecanismo general del ACE.

Las grietas por ACE generalmente son iniciadas en picaduras de corrosión, aunque también es común que inicien en concentradores de esfuerzos. En ambos casos, la extensión de las grietas en su etapa de iniciación suele ser muy corta, por lo que el mecanismo de propagación estable es rápidamente establecido.

Tabla 2. Mecanismo de agrietamiento.

Etapa	Mecanismo	Características fractográficas
I	Formación y ruptura de películas pasivas, fragilización de la zona de proceso. Extensión por clivaje.	Áspera con facetas, estrías frágiles y pseudoclivaje.
II	Disolución de la punta de la grieta. Deformación plástica altamente localizada.	Trayectoria tortuosa transgranular. Depósitos de corrosión gruesos. Fractura con apariencia de lodo seco.
III	Modos de fractura estáticos. Las características fractográficas son modificadas por el ambiente, por ejemplo disminución del tamaño de microhueco.	Clivaje o microhuecos, residuos de corrosión.

Por otra parte en lo que respecta a los **aspectos microestructurales**, el efecto de la microestructura en el ACE, es el más complejo de todos los mecanismos de fractura, ya que por la alta localización del proceso de agrietamiento, éste es muy sensible a los cambios locales de la microestructura, que afectan la estabilidad de las películas pasivas, modifican el potencial de equilibrio en la punta de la grieta y afectan la distribución local de esfuerzos,

Entre los aspectos microestructurales más importantes se tienen los siguientes:

1. Tipo, tamaño y distribución de segundas fases.
2. Tamaño de grano.
3. Densidad de dislocaciones y deformación en frío.
4. Modos de deslizamiento.
5. Segregación, micro y macro.
6. Contenido de inclusiones.

## II. Desarrollo experimental.

### 2.1. Diagrama experimental.

La metodología que se desarrollo para el estudio es descrita en la siguiente figura 9:

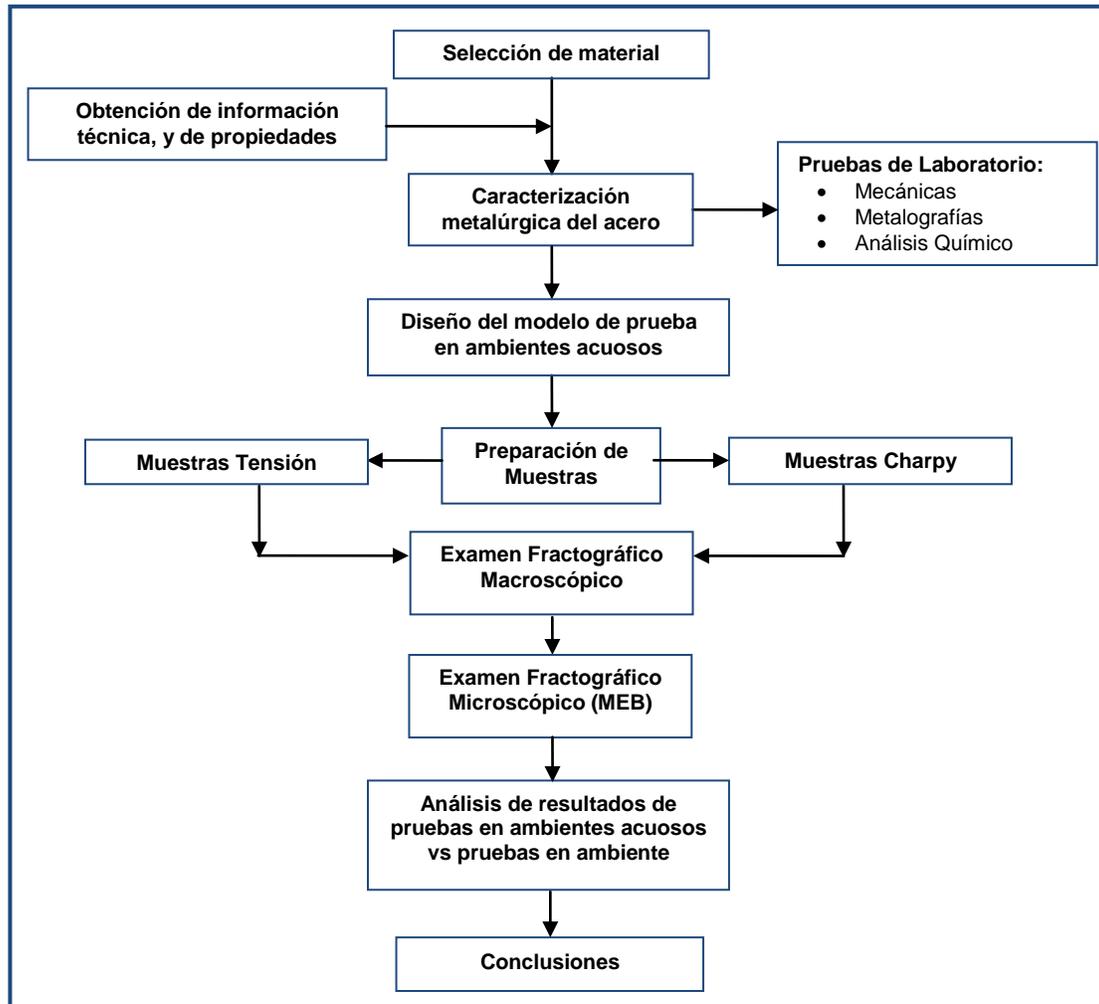


Figura 7. Metodología seguida en el estudio.

**Selección de material.** Debido a la factibilidad, disponibilidad y costo se decidió emplear un acero bajo carbono AISI 1018. Para las probetas de tensión fue empleado un acero de forma barra redonda de 19.90 mm de diámetro y para la realización de probetas de impacto Charpy fue empleado barra cuadrada de 11.10 mm por lado.

**Información técnica** del acero AISI 1018, fue proporcionada de tablas de aceros bajo carbono [8] y de la norma ASTM A108 [9].

## 2.2. Caracterización metalúrgica.

Se realizaron cortes de las barras redonda y cuadrada, para la obtención de preformas, que hicieron posible la preparación de muestras adecuadas, para realizar las siguientes pruebas:

**Metalografías:** Primero se prepararon metalografías de las secciones longitudinal y transversal de las muestras 1018 Redondo y 1018 Cuadrado, las probetas se prepararon por desbaste y pulido hasta lograr el acabado a espejo necesario para su observación por medio de microscopía óptica, para esto fue necesario encapsular las muestras para realizar con mayor facilidad el desbaste, pulido y ataque de muestras para obtener micrografías en un Microscopio Óptico Metalográfico. En base a la norma ASTM E-3 [11] y ASTM E1122 [12]. Se obtuvieron resultados de porcentaje de fases, así como de porcentaje de inclusiones del material. Para revelar la microestructura, las muestras se atacaron químicamente utilizando el reactivo Nital 3 y se observaron en el microscopio metalográfico con la técnica de campo claro.

Para el caso caracterización metalográfica de ensayos fue realizado en base a las muestras obtenidas de ensayos de tensión para cada ambiente empleado en este trabajo fueron seleccionadas una probeta que presentara las características más representativas por cada medio. Se procedió a cortar la copa y cono de la probeta de tensión mediante segueta manual primero de la sección transversal, una vez obtenido la copa y cono esta fue cortada por la mitad para ser montada en baquelita y así realizar la metalografía correspondiente para cada copa y cono en cada medio.

**Análisis Químico:** Para obtener una comparación, conforme a norma, de los elementos presentes en el acero fue necesario obtener rebaba de cada uno de las barras de acero, para obtener su composición química por medio de la técnica de espectrometría. Se analizaron los contenidos de carbono (C), azufre (S), silicio (Si), manganeso (Mn) fósforo y (P). Se incluye la composición química de la especificación AISI 1018

**Mecánicas:**

**Dureza HRB:** Determinación de dureza Rockwell B de acuerdo al procedimiento especificado en la norma ASTM E 18 [10]. Las condiciones de prueba fueron: Identador de bola de 1/16" de tungsteno, precarga de 10 Kg y una carga total de 100 Kg.

### 2.3. Ensayo de tensión de acero AISI 1018 en aire y ambientes

Se realizaron pruebas de tensión, de acuerdo con el procedimiento específico de la norma ASTM E-8M, empleando una máquina electromecánica equipada con extensómetro eléctrico y controlado con un software de aplicación, para obtener las propiedades mecánicas del material.

**Diseño de modelo para medios acuosos tensión.** Para el caso de la prueba en tensión primero se tomo como base el estado del arte antes consultado [13] para seleccionar a que medios estarían inmersas las probetas de tensión (Tabla 3, composición de medios empleados), segundo el desarrollo del modelo que tuvo como objetivo soportar el medio acuoso durante una prueba normal de tensión fue desarrollado en base a cuatro diseños previos que se emplearon para realizar este tipo de pruebas al comienzo de este trabajo, siendo el más exitoso y económico el modelo presentado en la figura 18, modelo el cual contuviera para el caso de las pruebas de tensión los diversos medios acuosos mediante se realizaba la prueba de tensión. La dimensión de la probeta de tensión empleada para esto fue tomada de la norma ASTM E8 M 04-

En este punto se presentan los resultados obtenidos para las pruebas realizadas al acero 1018 redondo. Las muestras fueron sometidas a cada unas de las siguientes soluciones (Tabla 3): 1) Salmuera NACE ID 196, 2) ASTM G5 Solución acida 1N 3) NS-4 4) Solución " $K_{x1}$ " y 5) Solución " $H_2O$ ", cada prueba fue realizada para 3 probetas de tensión redonda de dimensión estándar en base a la norma ASTM E8 M-04, empleando la menor velocidad de tracción provista por la maquina universal marca Shimadzu provista para las pruebas, siendo esta de 0.05mm/min, dándonos un tiempo estimado por prueba de 6 horas de ensayo.

Las pruebas fueron realizadas a temperatura ambiente, además de que el medio acuoso empleado para cada prueba fue vertido sobre el dispositivo de prueba una vez que la probeta estaba montada en la maquina universal (Figura 18), es decir las probetas de tensión empleadas para esta prueba nunca estuvieron sometidas al medio acuoso antes de ser ensayadas. Como parte de monitoreo de la prueba se empleo un medidor de pH el cual además permitía monitorear la temperatura dentro del sistema, también se empleo un multímetro con termopar en la primera fase de los experimentos realizados para medir la temperatura dentro del sistema. También en una segunda fase de experimentación y hasta

final de la experimentación se conto con un higrómetro con reloj hora medición de temperatura el cual puede medir la humedad de 20-90 %. Por otra parte las probetas empleadas para este tipo de ensayo fueron medidas antes de ser acopladas al dispositivo de prueba, como si fuera una probeta estándar, es decir, fue previamente medida después de haber sido entregada del maquinado para ver si pasaba las dimensiones mínimas para una probeta redonda estándar ASTM E8-M. Una vez realizada la primera verificación de medidas estándar (Hombros, largo de espécimen, rebabas, etc.) para ser considerada una probeta optima para ensayo fue medida en diámetro (Mínimo 12.50 mm +/- 0.20 mm) y longitud inicial (50.00 mm +/- 0.10 mm).

Cuarto las probetas una vez medidas y marcadas para su ensayo y control de prueba fueron colocadas dentro del dispositivo de prueba del medio acuoso el consto de un sistema de vasos de plástico transparente con tapa (Dispositivo 4, apéndice), donde la probeta de tensión estándar fue acoplada mediante Plastilina epóxica (PLASTI LOKA®).

De las pruebas realizadas para cada unas los medios acuosos mencionados fueron obtenidos los siguientes parámetros: 1) Esfuerzo de cedencia del material ( $\sigma_0$ ), Esfuerzo máximo a la tracción ( $\sigma_{m\acute{a}x}$  o UTS), endurecimiento por deformación ( $\sigma_{m\acute{a}x}/\sigma_0$ ), deformación en el punto de cedencia ( $\epsilon_0$ ), deformación en el punto máximo a la tracción ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ), deformación final ( $\epsilon_f$ ), y reducción de área (RA) para condición de ambiente ensayado.

Tabla 3. Composición de los medios empleados.

<b>Salmuera NACE ID 196 (Para un litro de Agua)</b>	
<b>CaCl<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O</b>	4.477 gramos
<b>MgCl 6H<sub>2</sub>O</b>	2.061 gramos
<b>NaCl</b>	106.57 gramos
<b>pH</b>	
<b>ASTM G5 Solución acida 1N(Para un litro de Agua)</b>	
<b>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 98%</b>	27.8 ml
<b>H<sub>2</sub>O Destilada</b>	Aforo
<b>pH</b>	0.46
<b>NS-4 (Para un litro de Agua)</b>	
<b>KCl</b>	0.122 gramos
<b>MgSO4</b>	0.131 gramos
<b>CaCl2</b>	0.181 gramos
<b>NaHCO3</b>	0.483 gramos
<b>H<sub>2</sub>O Destilada</b>	1 litro
<b>pH</b>	8.10
<b>Solución "K<sub>x1</sub>" (Para un litro de Agua)</b>	
<b>SO4 (ppm)</b>	16.84 (Mínimo)

Cl (ppm)	289.50 (Máximo)
pH	4.35
<b>Solución "H<sub>2</sub>O"</b>	
H <sub>2</sub> O Llave	1 litro
pH	7.6



**Figura 8.** Equipo y sistema empleado para la realización de las pruebas en tensión. A) Vista general de maquina Universal Shimadzu. B) Modelo de prueba para medio acuoso "CD2" en operación, C) Hidrómetro y medidor de pH en una prueba normal con un medio y D) Vista interna del electrodo midiendo el pH en una prueba con solución ASTM G5 Solución acida 1N.

#### 2.4. Ensayo de impacto charpy de acero 1018 en aire y ambientes

Pruebas de impacto Charpy en ambientes acuosos En este apartado se presentan los resultados obtenidos para las pruebas realizadas al acero 1018 cuadrado, cuando las muestras fueron sometidas a cada unas de las siguientes soluciones (Tabla3): 1) Salmuera NACE ID 196, 2) ASTM G5 Solución acida 1N 3) NS-4 4) Solución "K<sub>x1</sub>" y 5) Solución "H<sub>2</sub>O", cada prueba fue realizada para 3 probetas de impacto

charpy de medidas estándar en base a la norma ASTM E23, empleando un péndulo charpy para su ensaye. Las probetas de tipo charpy fueron sumergidas al medio acuoso antes de la prueba de impacto por un tiempo aproximado de 6 horas, similar al tiempo que una probeta de tensión sometida a medio acuoso fracturada. Las pruebas al igual que las pruebas realizadas en tensión uniaxial fueron hechas a temperatura ambiente y con el apoyo de un medidor de pH y hidrómetro para monitorear algún cambio en la temperatura del medio o en su pH en el tiempo que las probetas de impacto estuvieron sumergidas.

Como se puede apreciar en la figura 12 y 13 se pueden apreciar las probetas de impacto sumergidas antes de ser impactadas por el péndulo charpy figura 11. Cabe destacar que se emplearon los contrapesos provistos por la máquina de impacto charpy para ensayar cada una de las probetas.



Figura 9. Péndulo charpy empleado durante pruebas de impacto.

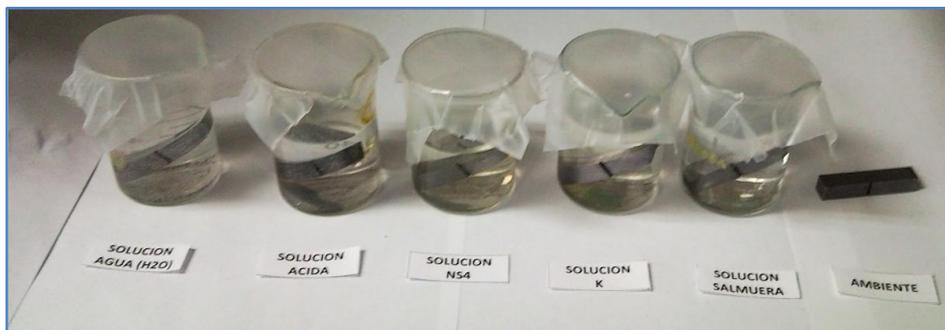


Figura 10. Vista general de seis probetas de impacto charpy en los diversos medios acuosos al comienzo de haber sido sumergidas para su impacto.



Figura 11. Acercamiento a detalle del comportamiento del medio acuoso sobre la probeta de impacto charpy a unos minutos de haber sido sumergida para su ensayo en impacto.

### 2.7. Examen fractográfico macroscópico.

Se realizó para cada una de las muestras ensayadas en tensión e impacto en medios acuosos como en medio ambiente, la caracterización fractográfica con apoyo de un estereoscopio, marca Olympus con el apoyo de una cámara digital.

### 2.8. Examen fractográfico microscópico.

**Examen fractográfico macro. Examen fractográfico micro.** Se realizó para cada una de las muestras ensayadas en tensión en medios acuosos como en medio ambiente, la caracterización fractográfica con apoyo de un microscopio de barrido (MEB). Se realizaron toma de imágenes mediante un microscopio de barrido marca JEOL modelo 6300 para cada una de las muestras realizadas en medios acuosos, siendo empleado un voltaje de aceleración de 20kV para todas las muestras, la distancia de trabajo vario dependiendo la altura de la muestra y el nivel de aumentos empleados.

### **Resultados.**

En este apartado se engloban todos y cada uno de los resultados obtenidos de las pruebas mecánicas, metalografías, análisis químico, y examen fractográfico macroscópico y microscópico.

***Análisis de Resultados.***

En base a los resultados obtenidos de las pruebas hechas al acero AISI 1018 en medios acuosos y medio ambiente para pruebas de impacto y tensión se realizó una comparación de las propiedades mecánicas y de análisis fractográfico, para analizar si existía un cambio tanto en la morfología de la fractura como en las propiedades mecánicas del material en un medio

***Conclusiones.***

Se realizó una conclusión en base al análisis de los resultados obtenidos, y a la comparación de la información investigada para este trabajo.

### III. Resultados

#### 3.1. Caracterización metalúrgica.

##### 3.1.1 Estudio metalográfico.

La figura 12 muestra el aspecto de las inclusiones no metálicas presentes en el acero de la muestra 1018 Redondo y 1018 Cuadrado, las cuales se encuentran constituidas por óxidos globulares tipo D, serie fina.

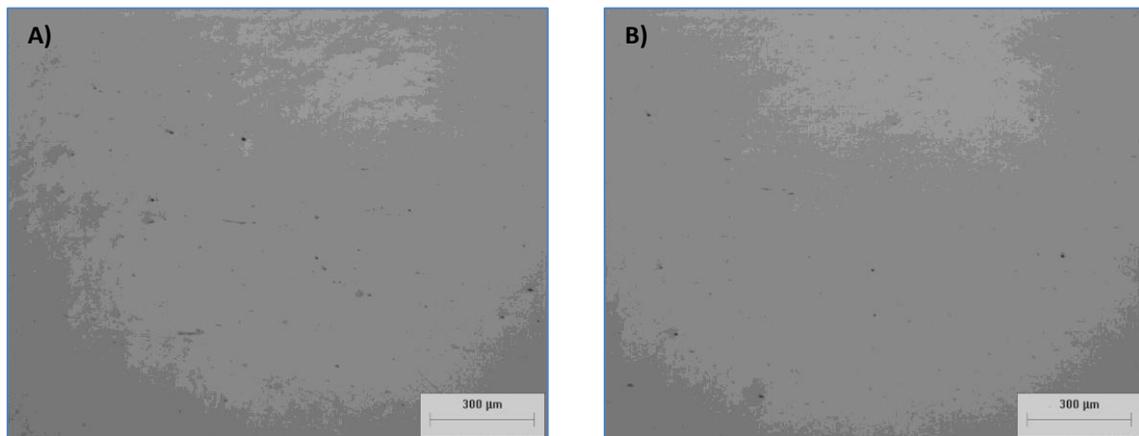
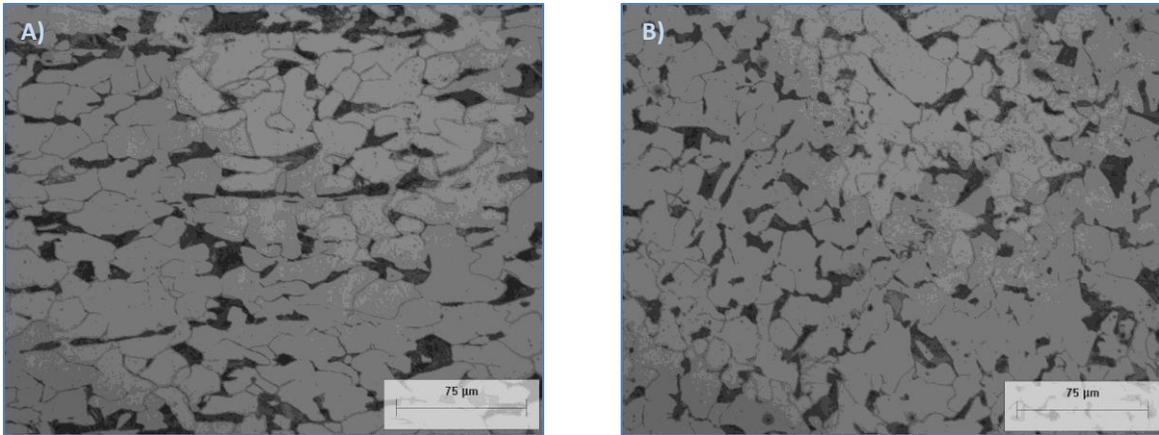


Figura 12. Tipo y forma de las inclusiones no metálicas del acero. Tipo D serie fina. Microscopio metalográfico, 10X, campo claro sin ataque. A) 1018 Redondo sección longitudinal, B) 1018 Cuadrado sección longitudinal.

La figura 13 muestra la microestructura de las muestras, la cual se encuentra constituida por una matriz ferrítica con colonias de perlita laminar. La condición de tratamiento térmico corresponde a un normalizado. Como parte del estudio metalográfico se realizó una cuantificación de los parámetros estereológicos de la microestructura, cuyos resultados se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Parámetros estereológicos de la microestructura.

Muestra	Dirección	Fración Volumen de inclusión	Tipo de inclusión	Ferrita %	Perlita %	Tamaño de grano ASTM
1018 Redondo	LS	0.24	D	84.19	15.80	8.0
1018 Cuadrado	LS	0.21	D	85.23	14.76	8.0



**Figura 13.** Imágenes de microestructura A) 1018 Redondo longitudinal y B) 1018 Cuadrado longitudinal, consistente en una matriz ferrítica con colonias de perlita laminar. Microscopio metalográfico campo claro, ataque con Nital 3%, 50X.

### 3.1.2 Análisis químico

Se analizaron los contenidos de carbono (C), azufre (S), silicio (Si), manganeso (Mn) fósforo y (P) por la técnica de espectrometría de absorción atómica. Los resultados se presentan en la Tabla 5. Se incluye la composición química de la especificación AISI 1018

**Tabla 5.** Resultados de análisis químico en % peso.

Muestra	C	Mn	P	S	Si
<b>1018 Redondo</b>	0.1907	0.67	0.023	0.0059	0.25
<b>1018 Cuadrado</b>	0.1749	0.68	0.030	0.02793	0.17
<b>AISI 1018</b>	0.14 – 0.20	0.60 - 0.90	0.030 Máx.	0.035 Máx.	-

### 3.1.3 Pruebas de dureza.

Las pruebas de dureza se realizaron de acuerdo con los lineamientos descritos en la norma ASTM E 18. Los resultados se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 6.** Valores de dureza Rockwell en escala B.

Muestra	No. de Identaciones	Valor medio	Valor mínimo	Valor máximo	Desvest	Incertidumbre
<b>1018 Redondo</b>	10	94.34	93.00	95.20	0.97	±1.95
<b>1018 Cuadrado</b>	10	95.16	94.00	96.40	0.86	±1.95

AISI 1018	-	88	-	-	-	-
-----------	---	----	---	---	---	---

### 3.2 Pruebas de tensión, ambiente y medios.

En este apartado los resultados globales de las pruebas hechas en y 1) Salmuera NACE ID 196, 2) ASTM G5 Solución acida 1N 3) NS-4 4) Solución “K<sub>x1</sub>” y 5) Solución “H<sub>2</sub>O” y 6) Ambiente

Tabla 7. Propiedades de tensión uniaxial, Ambiente.

Especificación del material	AISI 1018 Redondo	AISI 1018
<b>Esfuerzo de cedencia promedio</b>	696 [MPa], 100746 [PSI]	530.00 [MPa] 76718 [PSI] min
<b>Esfuerzo Ultimo a la Tensión (UTS) promedio</b>	719 [MPa], 104075[PSI]	625.00[MPa] 90469 [PSI] min
<b>% de elongación</b>	15.0	12.00 min
<b>% de Reducción de Área</b>	36.20	35.00 min
<b><math>\sigma_y</math>/UTS</b>	0.85	-

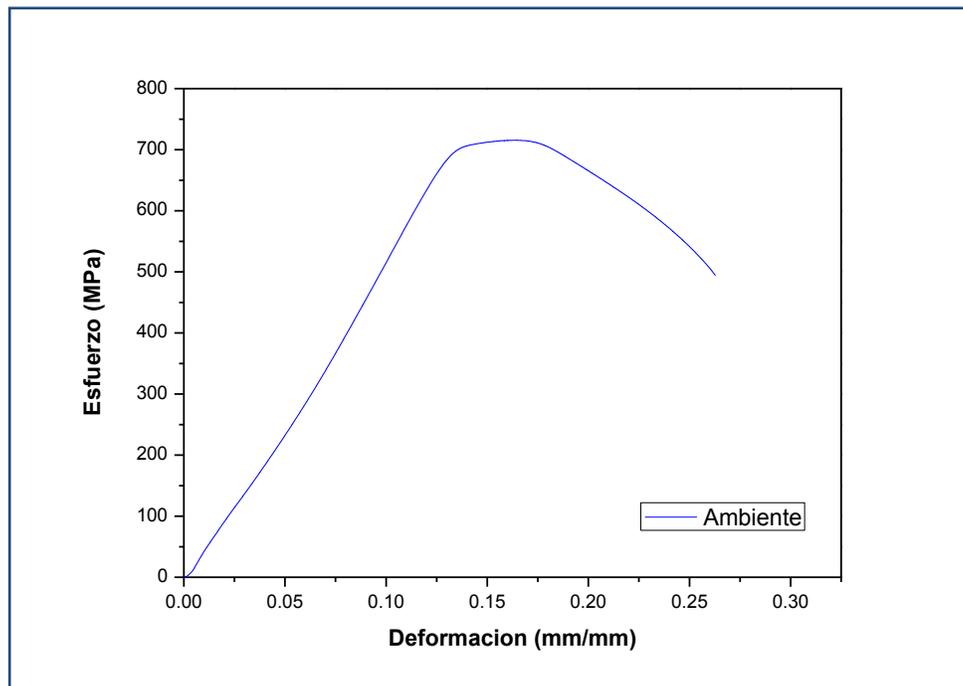


Gráfico 1. Curva Esfuerzo vs Deformación Ingenieril, 1018 Redondo, ambiente.

En la tabla 8 se engloban los resultados de las soluciones, en el grafico numero 2 podemos apreciar el grafico correspondiente para estos datos. En el grafico 3 se engloban los gráficos de todos los medios.

Tabla 8. Propiedades mecánicas de ensayos en tensión en medios acuosos.

Medio acuoso ensayado	Salmuera NACE ID 196	ASTM G5 Solución acida 1N	NS-4	Solución "K <sub>x1</sub> "	Solución "H <sub>2</sub> O CEPROMIM
Esfuerzo de cedencia promedio	660	660	660	690	680
Esfuerzo Ultimo a la Tensión (UTS) promedio	670	680	690	705	700
% de Elongación	10.20	4.80	7.00	11.20	11.20
% de Reducción de Área	47.00	15.10	52.10	48.50	50.10

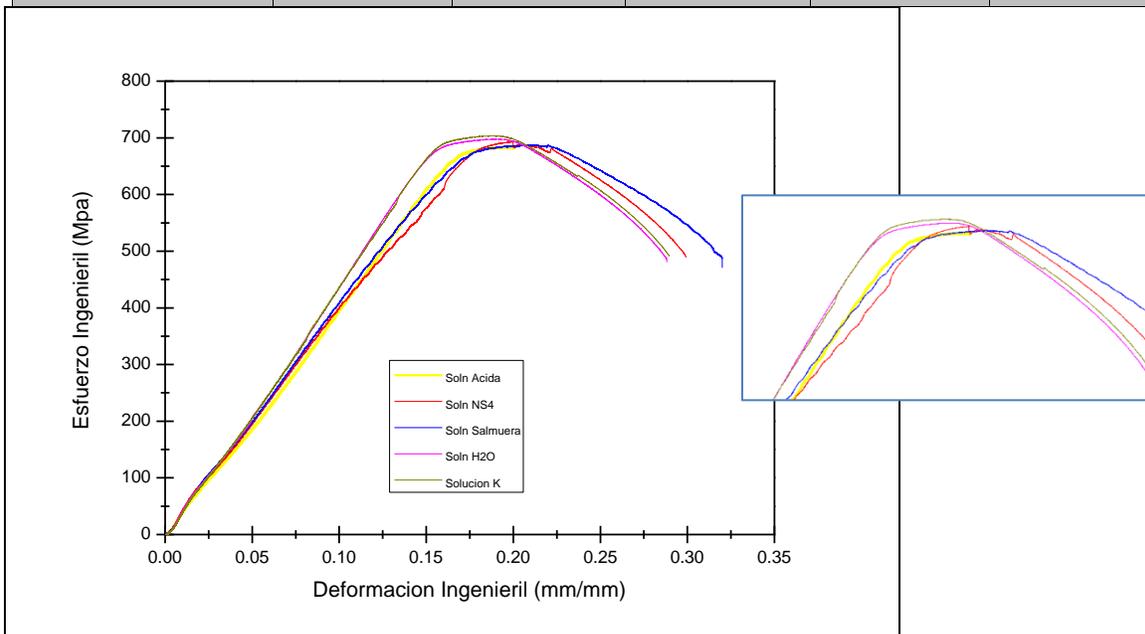
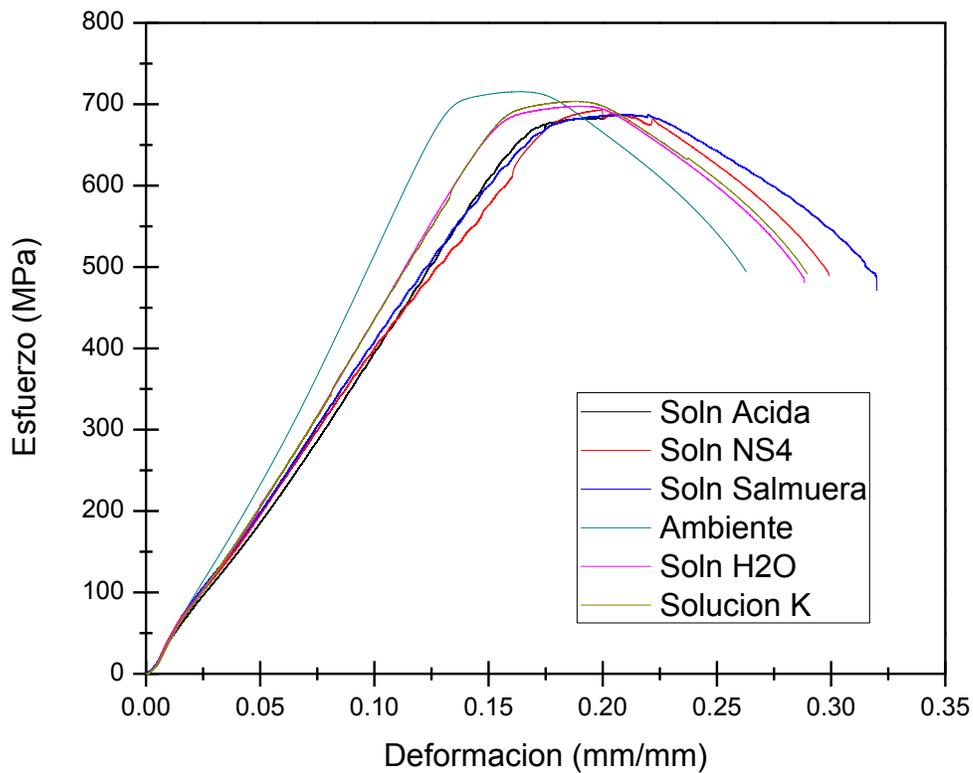


Gráfico 2. Curvas esfuerzo vs deformación ingenieril de las pruebas en medios acuosos corrosivos. Acercamiento al máximo esfuerzo de cada prueba.



**Grafico 3.** Curvas esfuerzo vs deformación ingenieril de las pruebas en medios acuosos corrosivos y ambiente. Acercamiento al máximo esfuerzo de cada prueba.

### 3.2.1 Caracterización metalográfica de copas cono.

Resultados obtenidos de las copa cono de las muestras de tensión. Figura 16 representaciones grafica del tipo de copa cono obtenido para cada medio en el ensayo de tensión.

**Tabla 9.** Orden de solución de acuerdo al pH, tensión

Muestra						
Ambiente	Ambiente	NS-4	H <sub>2</sub> O <sub>CEPROMIM</sub>	Salmuera	Solución K	Solución acida 1N
pH	-	8.10	7.50	4.5	4.35	<b>0.72</b>

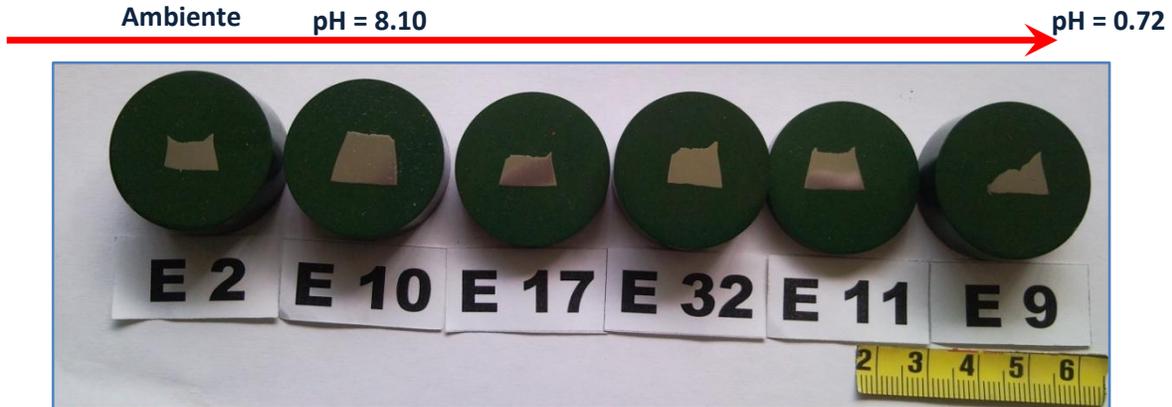


Figura 14. Metalografías de sección transversal de fractura copa y cono de probetas de tensión, ordenas según el pH al cual estuvieron sometidas. Empezando con Ambiente hasta solución acida.

Primero para muestra E2 (Ambiente) figura 17 podemos apreciar una superficie metalográfica que presenta una deformación normal de granos equiaxiales, se observa de una manera grafica el rompimiento de labio de corte de la muestra, no se encuentra la presencia de grietas o picaduras en el borde de la copa y borde del material. La deformación en el grano es normal para una probeta del tipo dúctil.

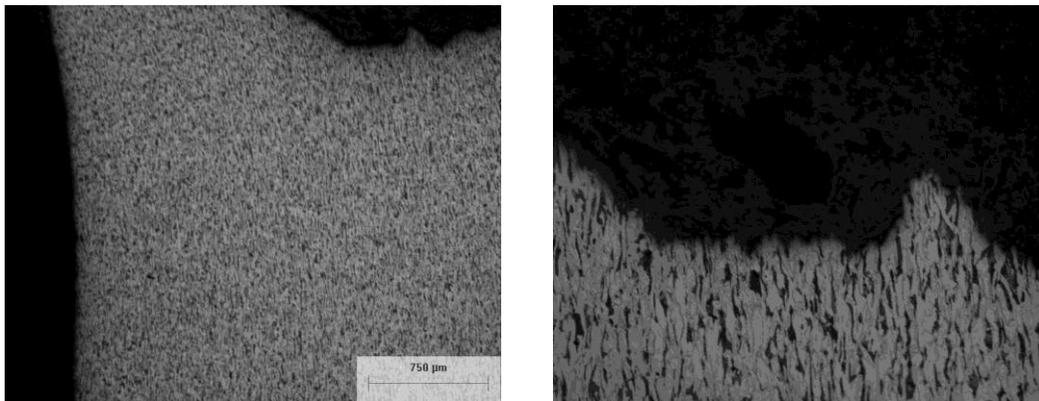


Figura 15. Metalografía de perfil longitudinal de copa cono de prueba en ambiente. Microscopio óptico campo claro, 5Xy 10X, Nital 3.

Segundo para muestra E10 (NS-4) figura 18, presenta una fractura de igual de la forma copa y cono, pero la ductilidad presente en los granos es menor a lo encontrado en las muestra ensaya en medio ambiente, se observa un grano menos deformado, y la copa cono del material es menor. Se puede observar en la superficie de desgarre material una menor ductilidad del material a lo observado en ambiente, no fue observado grietas o picaduras en la superficie del metalografica del material

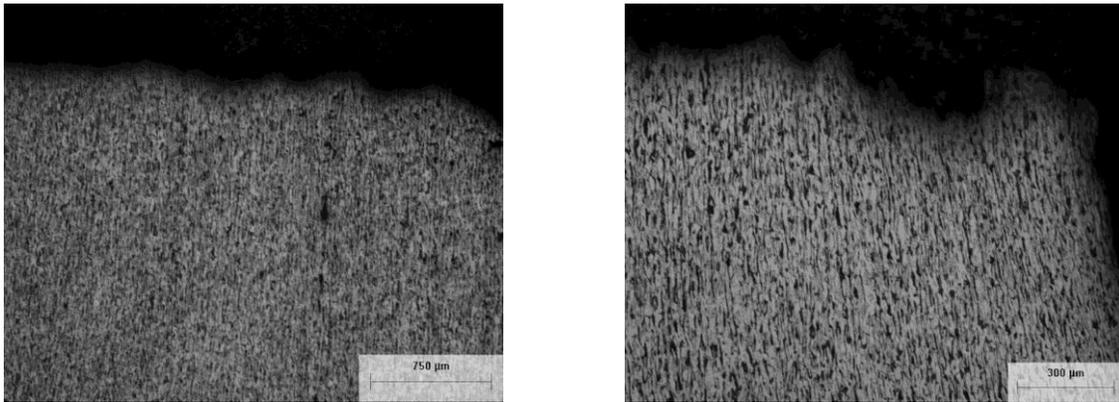


Figura 16. Metalografía de perfil longitudinal de copa cono de prueba en NS4 Microscopio óptico campo claro, 5X y 10X , Nital 3.

Tercero para muestra E12 (H2OCEPROMIN) figura 19, en estas metalografías se presenta lo encontrado para este medio donde podemos observar a simple vista que la muestra no presenta grietas o picaduras aparentes, se observa menor deformación en el grano que lo encontrado en medio ambiente, al encontrarse menor alargamiento y deformación dentro de los granos observados en la muestra metalográfica.

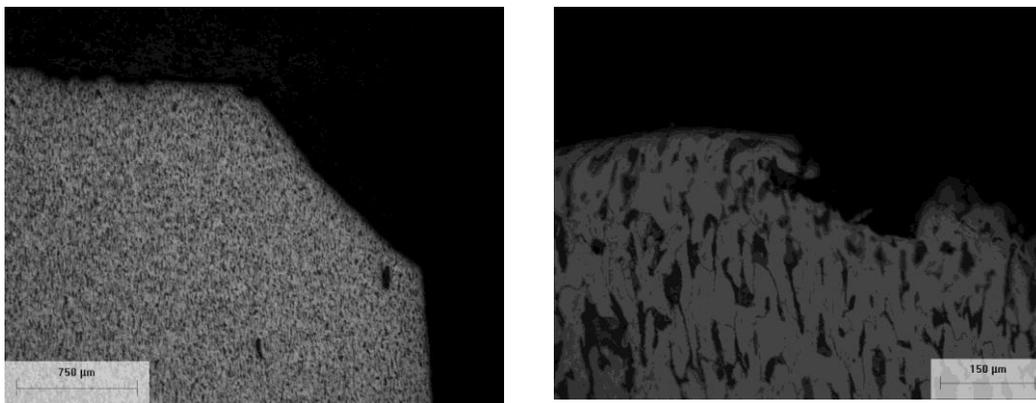


Figura 17. Metalografía de perfil longitudinal de copa cono de prueba en H<sub>2</sub>O. Microscopio óptico campo claro, 5X, 20X, Nital 3.

Cuarto para muestra E 32 (Salmuera) figura 20, podemos observar la copa cono del material, donde se observa a primera vista una fractura copa muy similar a lo encontrado en la pruebas en ambiente, no se encuentra grietas ni picaduras aparentes, se observa mayor deformación en el grano de la muestra

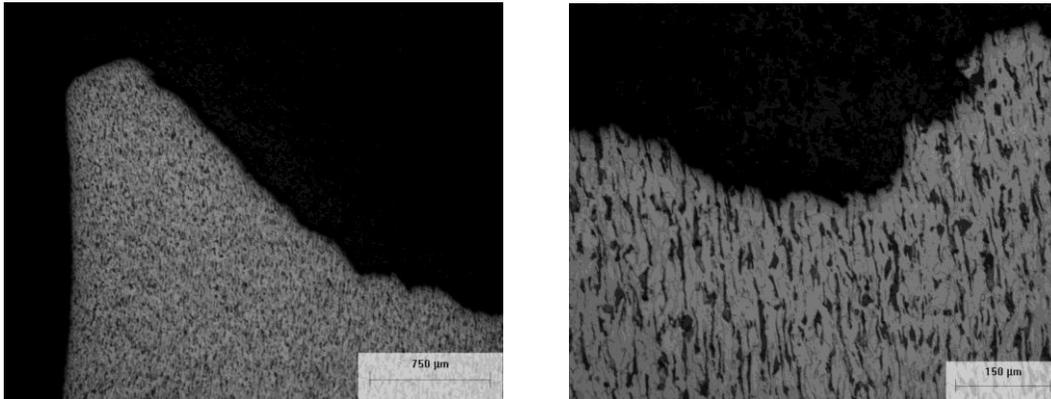


Figura 18. Metalografía de perfil longitudinal de copa cono de prueba en medio salmuera. Microscopio óptico campo claro, 5X y 20x, Nital 3.

Quinto para muestra E11 (Solución K) Figura 21, en la muestra no se observan grietas en su superficie externa al ser observadas a aumentos de 5X, pero en el centro se distinguen cierto agrietamiento del material, se puede observar a aumentos mayores de 20X que existen grietas en el borde interno de la fractura copa cono, en una zona donde se observa una gran deformación del grano del material.

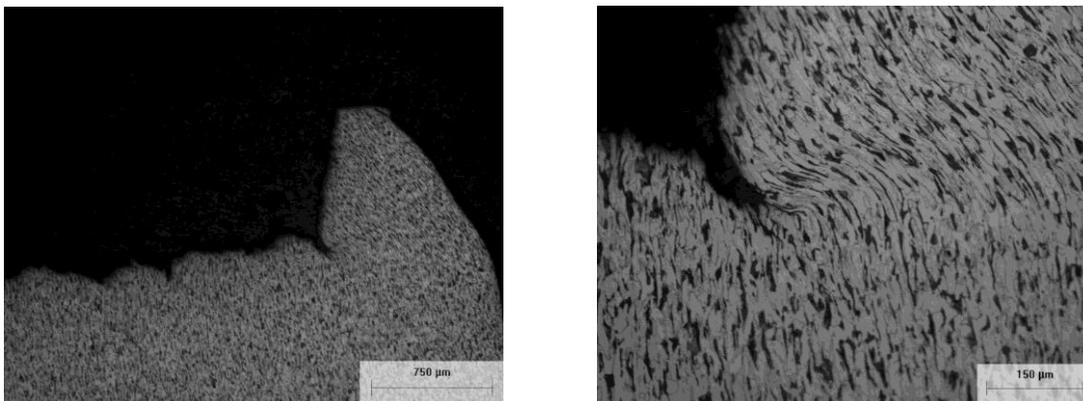


Figura 19. Metalografía de perfil longitudinal de copa cono de prueba en medio solución k Microscopio óptico campo claro, 5X y 20x, Nital 3.

Sexto para muestra E9 (Solución acida) Figura 22 y 23, para la muestra metalográfica realizada para el medio acido se pudo encontrar a bajos aumentos la presencia de grietas en la superficie externa de la copa cono del material, así mismo se observa en el centro de la fractura una menor deformación de grano, en los acercamientos realizados a las grietas encontrados en la superficie externa del material se observan un comportamiento intergranular de las grietas, de igual modo

se puede observar que existe corrosión en el borde externo de la grieta, es decir, en el comienzo de las grietas presentadas existe una disolución de material, lo cual puede ser observado en la figura 23

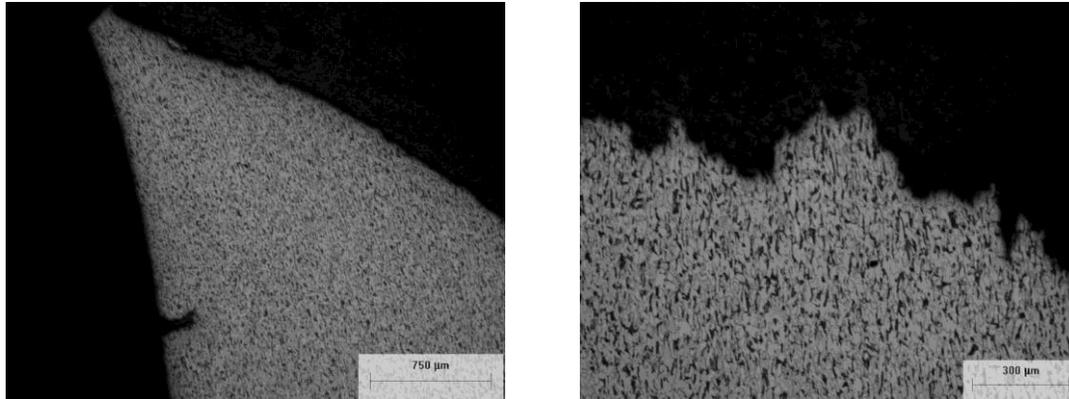


Figura 20. Metalografía de perfil longitudinal de copa cono de prueba en medio solución acida Microscopio óptico campo claro, 5X y 10X, ataque mediante Nital 3.

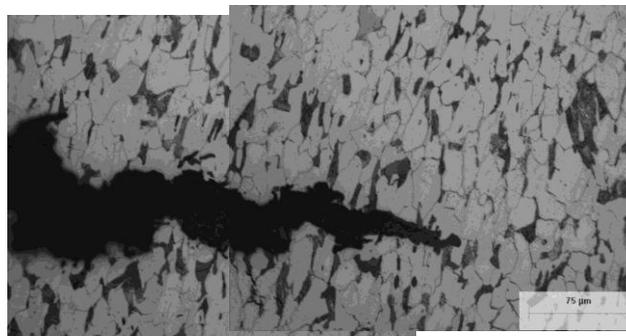


Figura 21. Metalografía de perfil longitudinal de copa cono de prueba en medio solución acida Microscopio óptico campo claro, 50X, Nital 3.

### 3.3 Pruebas de impacto Charpy, ambiente y medios.

Se realizaron pruebas de impacto, de acuerdo con el procedimiento específico de la norma ASTM E-23 -06, empleando un péndulo charpy con contrapesos.

Tabla 10. Resultados de Impacto Charpy, Ambiente

Identificaciones de la muestra	1018 Cuadrado
Ancho (mm)	8.70
Espesor (mm)	10.14
Área de ligamento (mm <sup>2</sup> )	88.21
Temperatura (°C)	25 °C (298.15)
Valor promedio de energía en (Kg – m)	7.2

Los resultados obtenidos de las pruebas de impacto charpy expuestos para cada ambiente en la tabla 10.

Tabla 11. Resultados de Impacto Charpy, Ambiente

Medio acuoso ensayado	Salmuera NACE ID 196	ASTM G5 Solución acida 1N	NS-4	Solución "K <sub>X1</sub> "	Solución "H <sub>2</sub> O CEPROMIM
Ancho (mm)	8.78	8.55	8.79	8.79	8.71
Espesor (mm)	10.00	10.00	10.05	10.15	10.08
Área de ligamento (mm <sup>2</sup> )	87.80	85.50	88.33	89.21	87.79
Temperatura (°C)	25 °C (298.15)	25 °C (298.15)	25 °C (298.15)	25 °C (298.15)	25 °C (298.15)
Valor promedio de energía en (Kg – m)	8.2	7.2	10.8	9.3	12.60

### 3.3.1 Caracterización metalográfica charpy.

De igual modo a las pruebas metalográficas realizadas a las copa cono de tensión se realizaron metalografías de la sección transversal de las fracturas de tensión, en la figura 24 se puede observar una comparación esquemática del tipo de fractura con respecto al medio y su pH. De igual modo en la tabla 11 se engloban los datos de pH de las muestras

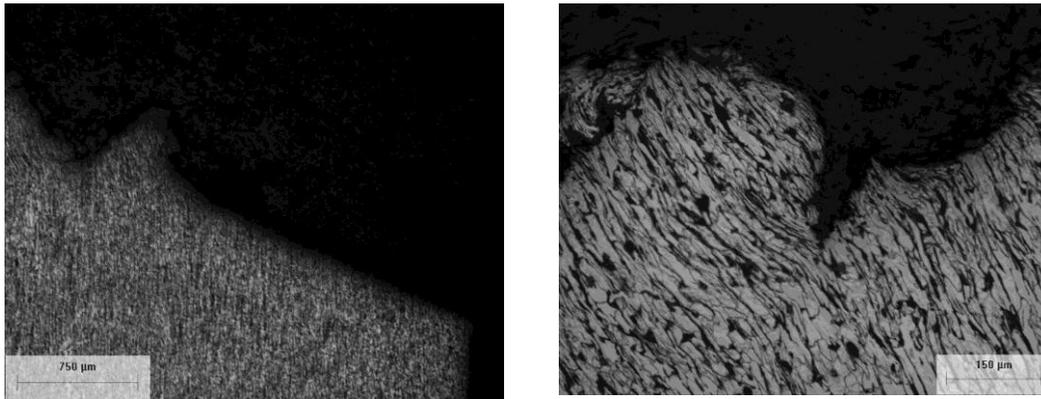
Tabla 12. Orden de solución de acuerdo al pH, Charpy

Muestra	C2	C26	C23	C25	C30	C21
Ambiente	Ambiente	NS-4	H <sub>2</sub> O <sub>CEPROMIM</sub>	Salmuera	Solución K	Solución acida 1N
pH	-	8.10	7.50	4.5	4.35	0.72



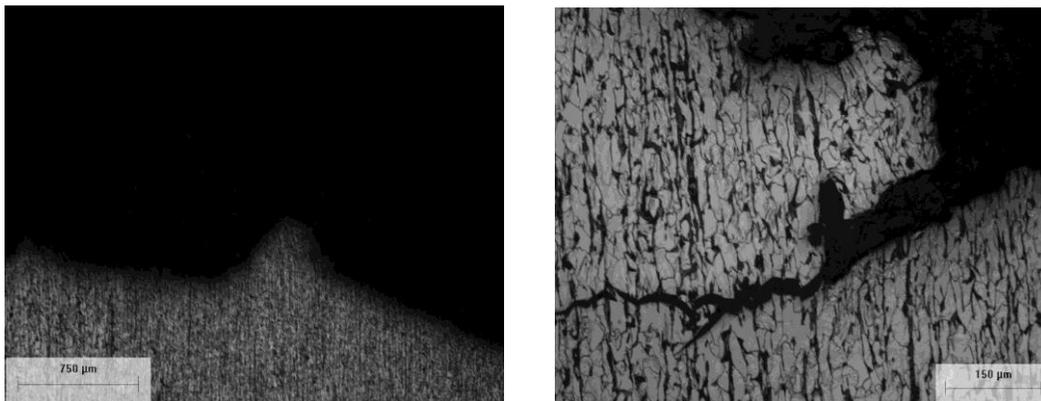
Figura 22. Comparación esquemática del tipo de fractura con respecto al medio y su pH

Con respecto a la metalografía en ambiente de sección se puede observar una deformación del grano del material debido a la energía de impacto, no es apreciado un agrietamiento aparente en la superficie del borde de fractura. Figura 25



**Figura 23.** Metalografía de perfil longitudinal de probeta de impacto en medio ambiente Microscopio óptico campo claro, 5 X y 20X, Nital 3.

En lo que respecta al medio NS4, es posible observar a aumentos de 10X, agrietamiento de la superficie de fractura, el cual al ser observado a aumentos de 20X es posible observar que es un agrietamiento intergranular. Figura 26



**Figura 24.** Metalografía de perfil longitudinal de probeta de impacto en medio NS4 Microscopio óptico campo claro, 5 X, 10X y 20X, Nital 3.

En lo que respecta a las metalografías en medio H<sub>2</sub>O, no se observa un daño aparente de la microestructura del material, la microestructura es semejante a lo obtenido en medio ambiente, pero presenta mínima deformación de los granos equiaxiales de la fractura.

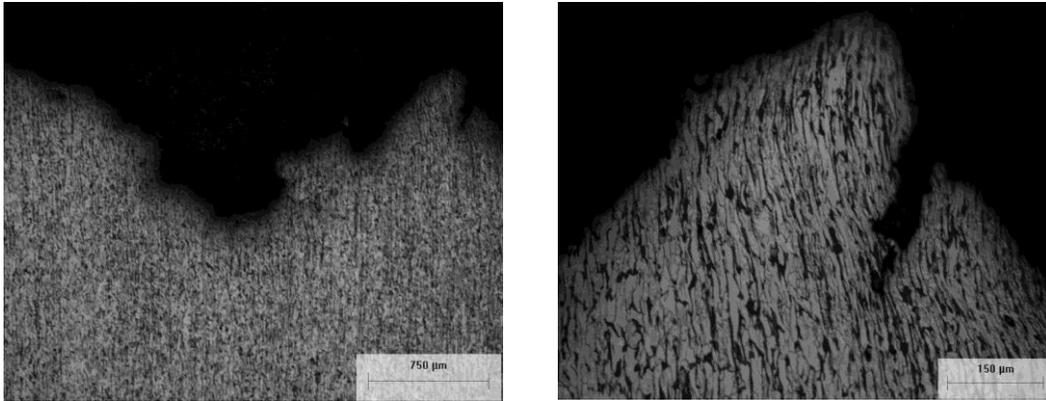


Figura 25. Metalografía de perfil longitudinal de probeta de impacto en medio H<sub>2</sub>O Microscopio óptico campo claro, 5 X y 20X, Nital 3.

En lo que respecta al medio salmuera es posible observar a primera vista que no existe un daño de la microestructura del material, pero al ser observada la microestructura a mayores aumentos existen zonas con pequeñas grietas en los bordes de la fractura, pequeñas grietas en la superficie de uno de los picos a aumentos mayores de 10X. Figura 28

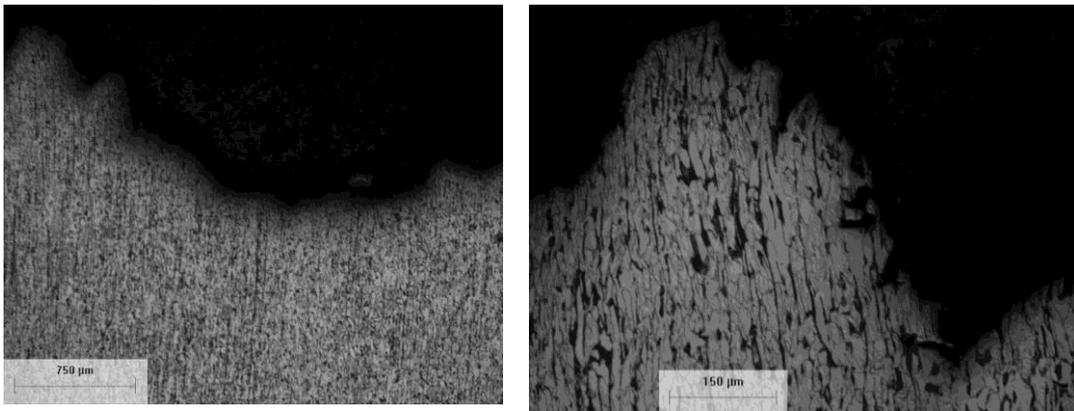
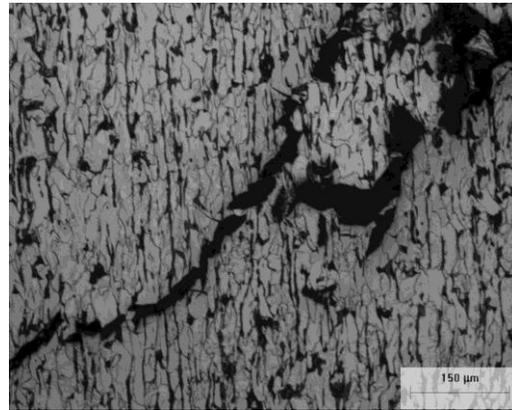
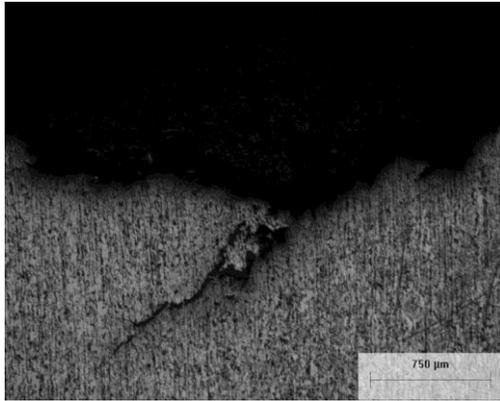


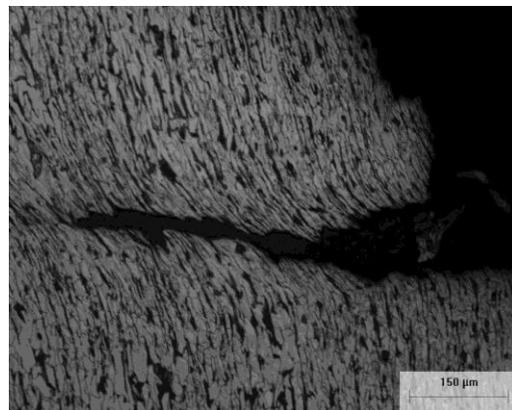
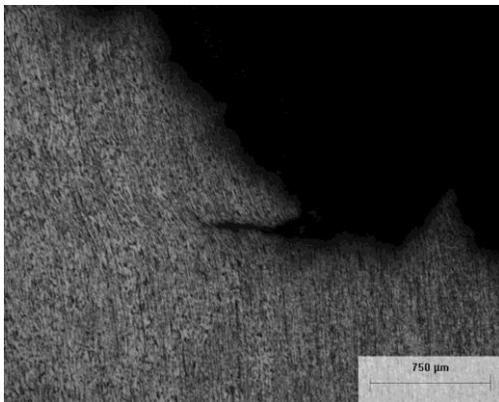
Figura 26. Metalografía de perfil longitudinal de probeta de impacto en medio H<sub>2</sub>O Microscopio óptico campo claro, 5 X y 20X, ataque mediante Nital 3.

Solución K presenta en la metalografía preparada agrietamiento de la microestructura, el cual no es visible en las pruebas realizadas a medio ambiente. Figura 29. El agrietamiento es del tipo intergranular. No se observa una gran deformación de los granos equiaxiales de la muestra



**Figura 27.** Metalografía de perfil longitudinal de probeta de impacto en medio k Microscopio óptico campo claro, 5 X, 20X, Nital 3.

El medio más ácido presento un agrietamiento en el plano longitudinal de la fractura, el cual es observado en la figura 30 de este estudio.



**Figura 28.** Metalografía de perfil longitudinal de probeta de impacto en medio ácido Microscopio óptico campo claro, 20X, Nital 3.

### 3.4. Examen fractográfico macroscópico.

#### 3.4.1 Examen fractográfico macro tensión.

##### Probeta tensión ambiente.

En esta imagen presentada se observa una copa del tipo imperfecta, donde ha simple vista no presenta oxidación o algún daño aparente en la imagen macro, la fractura es de un tono grisáceo opaco y se aprecia fibrosidad dentro de la fractura, característico de una fractura dúctil normal para un acero. En los acercamientos mediante estereoscopio podemos observar pequeños huecos, así como la rugosidad dentro de la fractura. Figura31

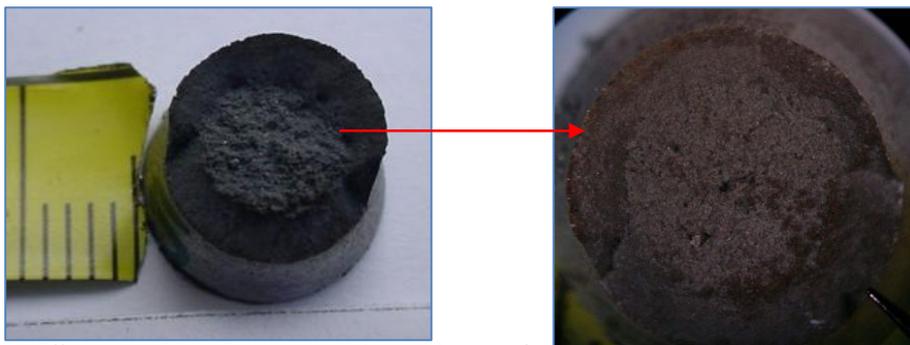


Figura 29. Fotografía macro de probeta en medio ambiente así como acercamiento mediante estereoscopio.

##### Probeta tensión NS-4.

Las muestras realizadas en medio acuoso NS-4 presento una fractura del tipo copa media como es observado en la figura 32, donde podemos observar un tono grisáceo opaco y fibroso característico de una fractura dúctil, en base al acercamiento mediante estereoscopio se puede observar a magro detalle fibrosidad en el centro de la probeta.

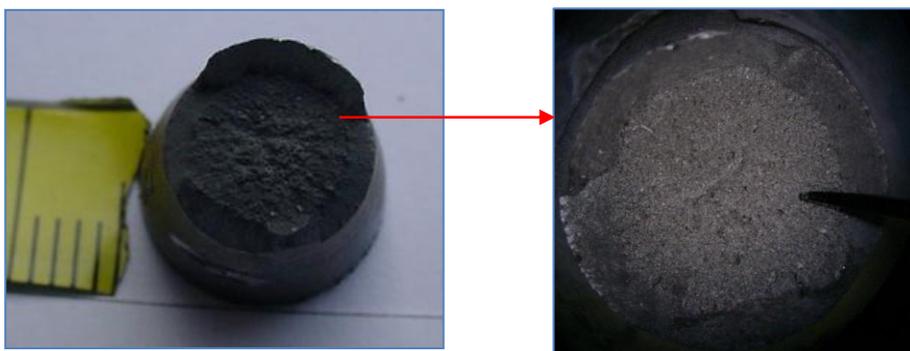


Figura 30. Fotografía macro de probeta en medio NS-4 así como acercamiento mediante estereoscopio.

### Probeta tensión $H_2O_{CEPROMIM}$

Con respecto a las probetas en medio acuoso  $H_2O_{CEPROMIM}$  podemos observar a simple vista una copa cono del tipo imperfecta, donde observamos el característico grisáceo opaco de una muestra con ductilidad así como fibrosidad en el centro de la probeta, pero haciendo una observación mediante estereoscopio podemos apreciar una menor fibrosidad que la vista en ambiente.

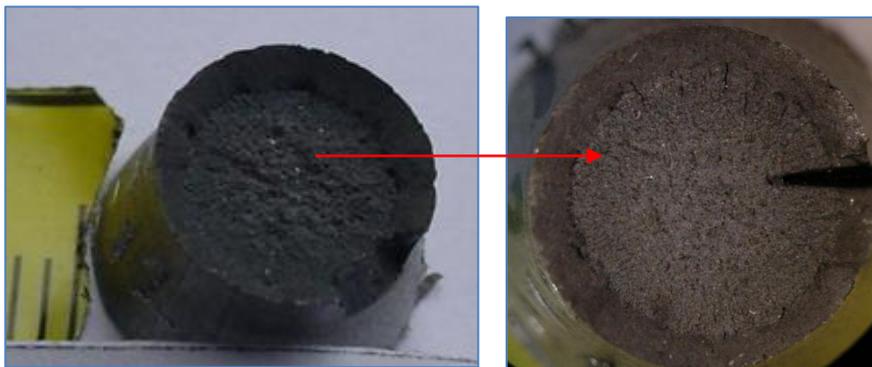


Figura 31. Fotografía macro de probeta en medio ambiente  $H_2O_{CEPROMIM}$  así como acercamiento mediante estereoscopio.

### Probeta tensión Salmuera.

Estas muestras presentaron una fractura del tipo copa media, con un tono grisáceo y amarillo ocre en la fractura a simple vista. Con respecto a la observación en estereoscopio podemos apreciar el tono amarillo ocre y café dentro de los bordes e interior de la fractura, de igual modo podemos observar pequeños huecos dentro de la rugosidad de la fractura interna. Figura 34.

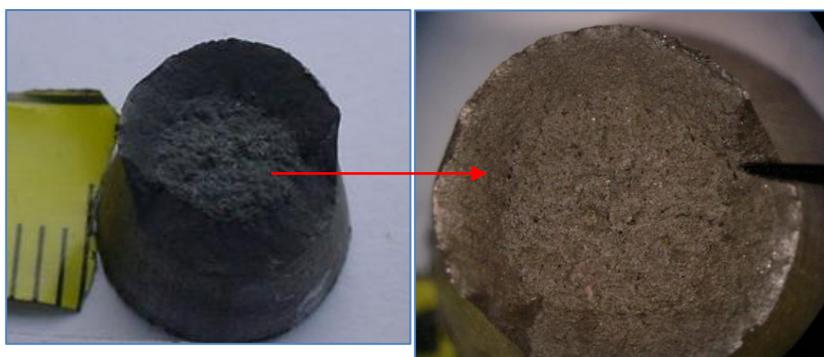


Figura 32. Fotografía macro de probeta en medio salmuera así como acercamiento mediante estereoscopio.

### Probeta tensión Solución K.

Con respecto a la solución K es más notorio a simple vista, en la fotografía macro tomada que existe una ligera capa de óxido de tono amarillo ocre y café tanto en el interior de la probeta como en los bordes de esta. Presenta una fractura del tipo copa media, se observan huecos dentro de la

rugosidad del centro de la fractura y el tono grisáceo de la fractura no está marcado como en fracturas anteriores en los demás medios. Figura 35.

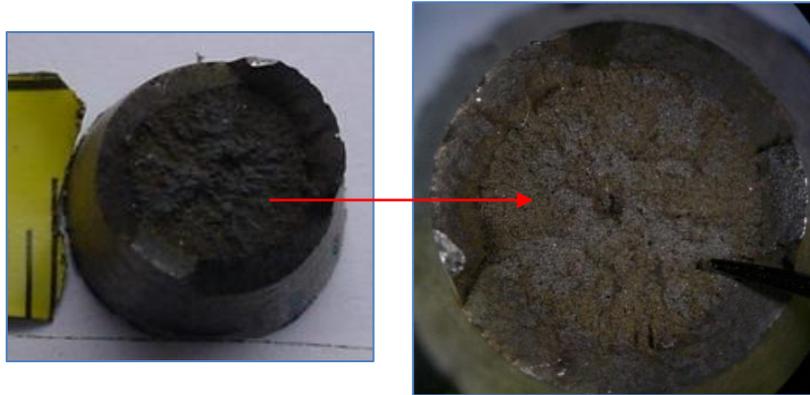


Figura 33. Fotografía macro de probeta en medio solución k así como acercamiento mediante estereoscopio.

#### **Probeta tensión solución acida.**

En lo que respecta a las fracturas obtenidas durante el ensayo de tracción para un medio acuoso ácido encontramos una fractura totalmente diferente a lo esperado en un material dúctil como se puede observar en la figura 36. Siendo una fractura que presenta brillo así como cero o nula ductilidad del material a simple vista, presenta grietas en la superficie externa de la probeta, también se puede observar que la superficie externa de la probeta presenta un tono café oscuro con tonos amarillo ocre, el creó de la fractura igual presenta tonalidades café y amarillo ocre. Al realizar los acercamientos con estereoscopio podemos apreciar el brillo presente en la superficie de la fractura así como grietas y escalonamientos dentro de una fractura que se esperaba presentara una fractura del tipo copa cono. Figura 36

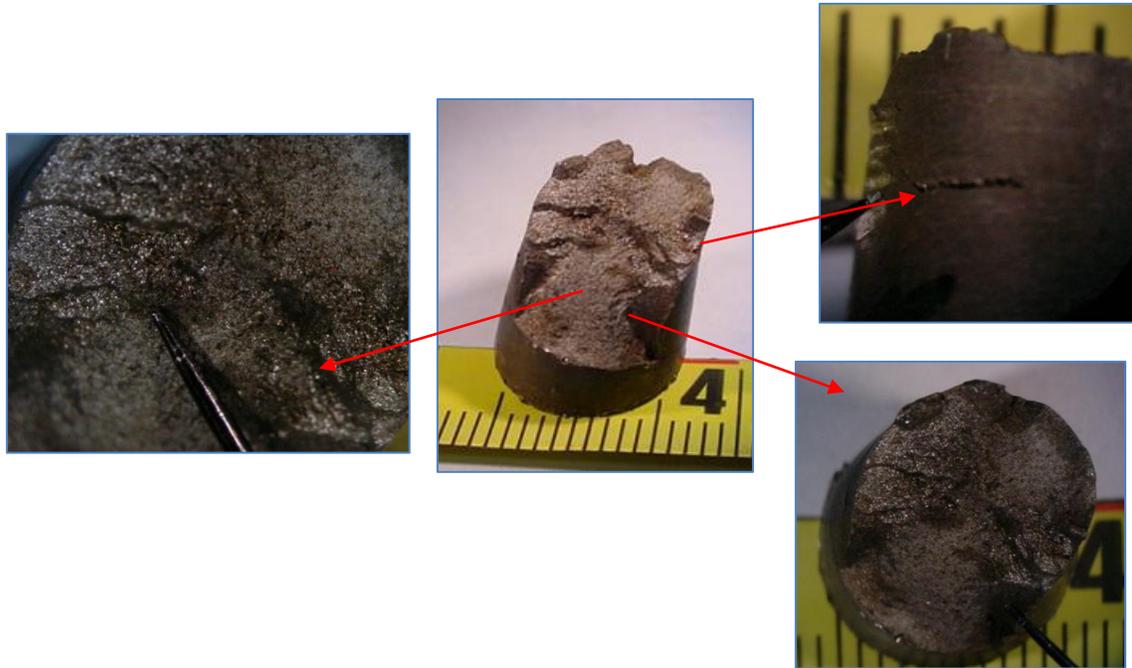


Figura 34. Fotografía macro de probeta en medio ácido así como acercamiento mediante estereoscopio.

### 3.4.2 Examen fractográfico macro charpy.

#### Probeta charpy ambiente.

En lo que respecta a las pruebas realizadas en impacto charpy en los diversos medios donde con los que fueron realizadas de tensión. Primero para la probeta de impacto charpy en ambiente, podemos observar una fractura normal, es decir, presenta las tres zonas que se encuentran en una probeta estándar de impacto charpy. Primero una zona dúctil, segundo una zona frágil y tercero una zona dúctil dentro de la fractura para medio ambiente.

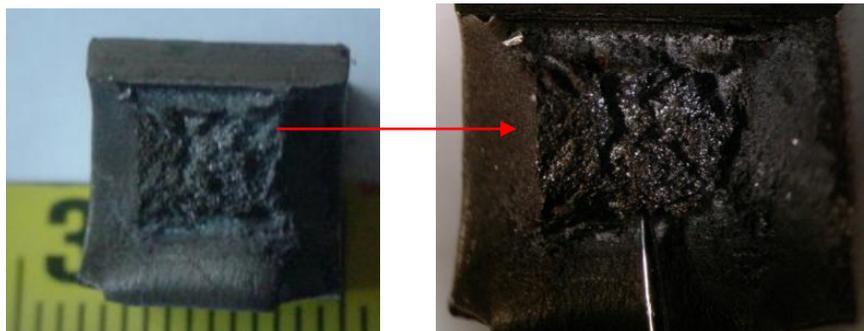


Figura 35. Fotografía macro de probeta en medio ambiente así como acercamiento mediante estereoscopio.

### Probeta charpy NS-4

La probeta de impacto en un medio acuoso NS-4 no presento mucha diferencia a la probeta en medio ambiente presentando de igual modo tres zonas dentro de la fractura, dúctil, frágil y de nuevo dúctil, pero si presenta al realizar un acercamiento con estereoscopio zonas con tonos amarillo ocre y café dentro de la fractura de esta probeta mostrada.

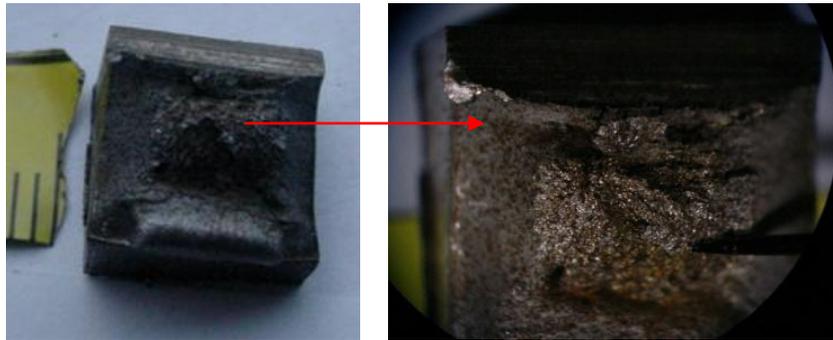


Figura 36. Fotografía macro de probeta en medio ambiente así como acercamiento mediante estereoscopio.

### Probeta charpy H<sub>2</sub>O

Con respecto a lo observado en la fractura para este medio acuoso se puede de igual modo observar las tres zonas características o presentes dentro de una prueba de impacto charpy. Pero al ser observada mediante estereoscopio podemos apreciar una mayor zona ductil dentro de la probeta al observar zonas brillosas y granulosas dentro de la fractura del espécimen, de igual modo se hace presente una tonalidad amarillo ocre con tonos café rojizo dentro del centro de la fractura como sus bordes.

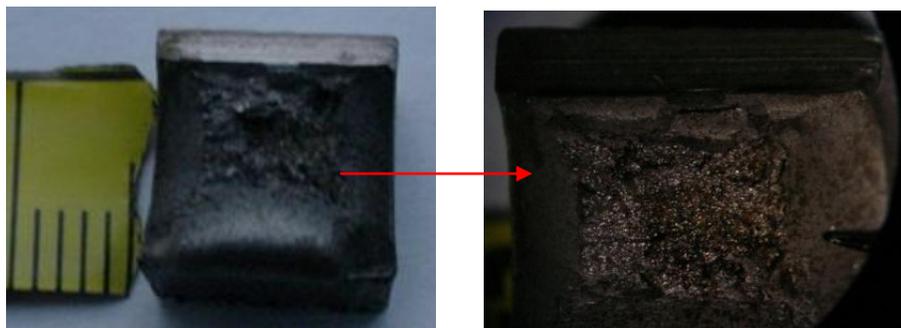


Figura 37. Fotografía macro de probeta en medio H<sub>2</sub>O así como acercamiento mediante estereoscopio.

### **Probeta charpy Salmuera.**

Las probetas en salmuera presentan una mayor rugosidad a simple vista, presentan las tres zonas características, pero en las imágenes tomadas mediante estereoscopio se observan zonas con agrietamientos, el brillo característico de la zona frágil del material es opacado por una película densa de óxido de tono rojizo ocre.

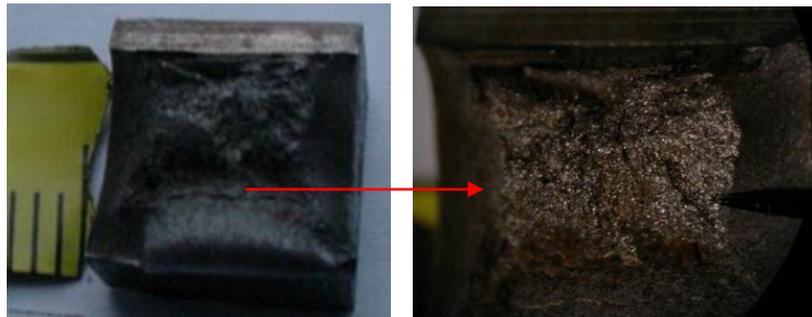


Figura 38. Fotografía macro de probeta en medio salmuera así como acercamiento mediante estereoscopio.

### **Probeta charpy Solución K.**

La solución K es muy diferente a las otras muestras observadas al presentar mayor capa de óxido de tono rojizo ocre y café, la entalla presenta picaduras, el brillo de la zona central de la fractura es totalmente nulo debido a la capa de óxido que lo cubre, no se observa la ductilidad mostrada en las anteriores muestras al inicio de la fractura (Zona de entalla). Por otro lado el centro de la fractura muestra escalonamiento.

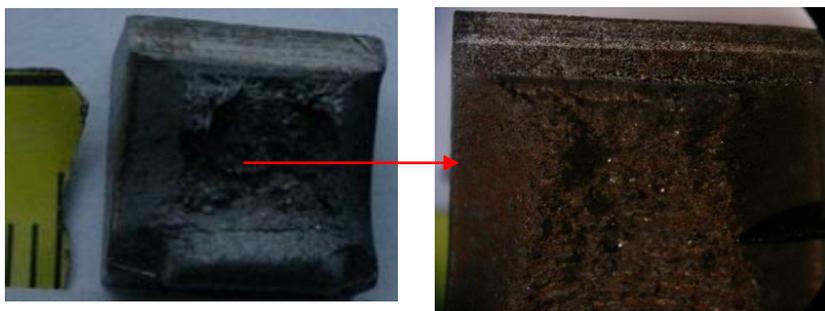
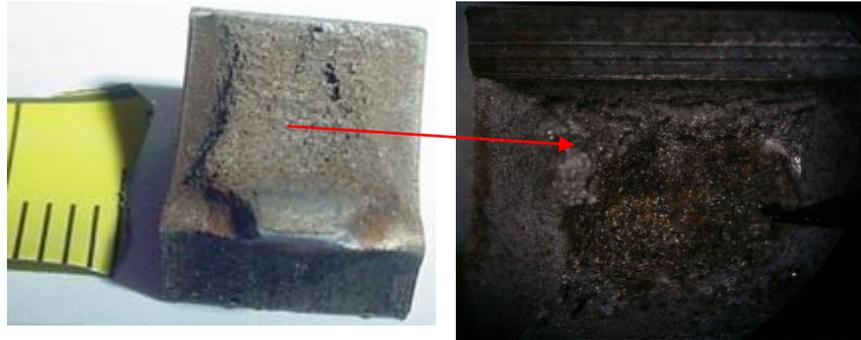


Figura 39. Fotografía macro de probeta en medio solución K así como acercamiento mediante estereoscopio.

### **Probeta charpy solución acida.**

Para esta solución se observa una fractura muy opaca que tuvo que ser iluminada con luz artificial extra para poder ser observada con mayor detalle de la fractura, debido a que presenta una fractura en tonalidad café oscuro muy fuerte. El óxido presente en esta probeta está fuertemente arraigado a la superficie de la muestra ensayada siendo incluso su retiro mediante el

baño ultrasónico. A simple vista la fractura es su imagen macro muestra un escalonamiento en el centro de la fractura presenta, no se observa la primer zona dúctil presente en la zona de la entalla de la fractura de la probeta. Al realizar un acercamiento mediante estereoscopio se observa un centro con una fuerte película de oxido producto de medio acuoso al que estuvo sumergido la probeta.



**Figura 40.** Fotografía macro de probeta en medio ácido así como acercamiento mediante estereoscopio.

### 3.5. Examen fractográfico microscópico.

#### 4.5.3 Examen fractográfico micro tensión.

##### Probeta tensión ambiente.

Para la muestra en medio ambiente, se puede observar en su vista macro una fractura copa como normal para un material dúctil, donde se muestra fibrosidad en el centro, al realizar acercamientos primero al centro de la probeta podemos apreciar zonas con micro huecos característicos de una fractura frágil común. En la imagen del borde de la probeta se observa el desgarramiento característico de un material dúctil sujeto a un esfuerzo uniaxial de tensión.

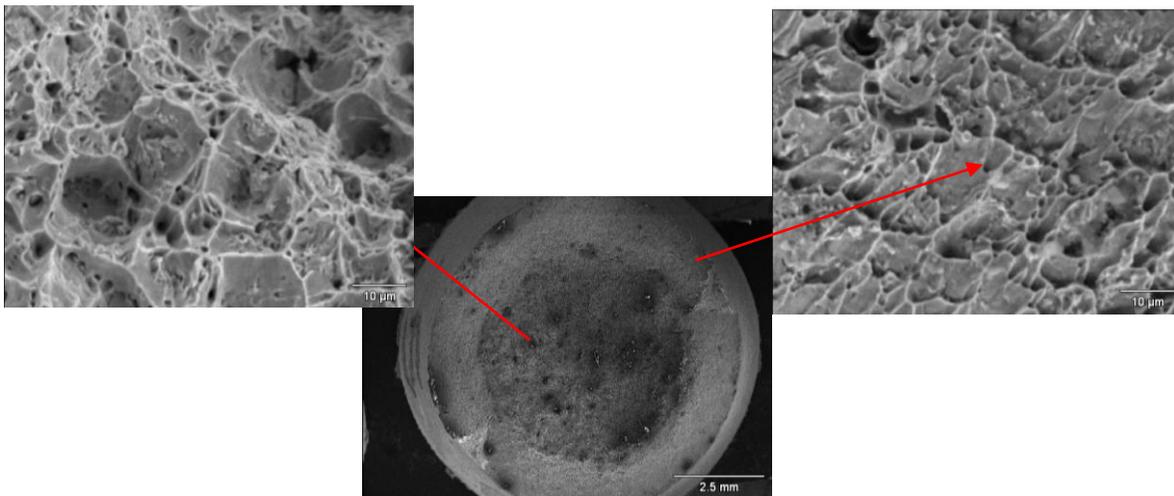


Figura 41. Fotografías mediante MEB a una magnificación de 10 y 1500 aumentos

##### Probeta tensión NS-4

La probeta sumergida en un medio NS-4 presenta en el centro una fractura similar a la encontrada en el material en medio ambiente con micro huecos característicos de la ductilidad del material, pero en la orilla de esta probeta presenta una fractura diferente a lo encontrado en la probeta a medio ambiente.

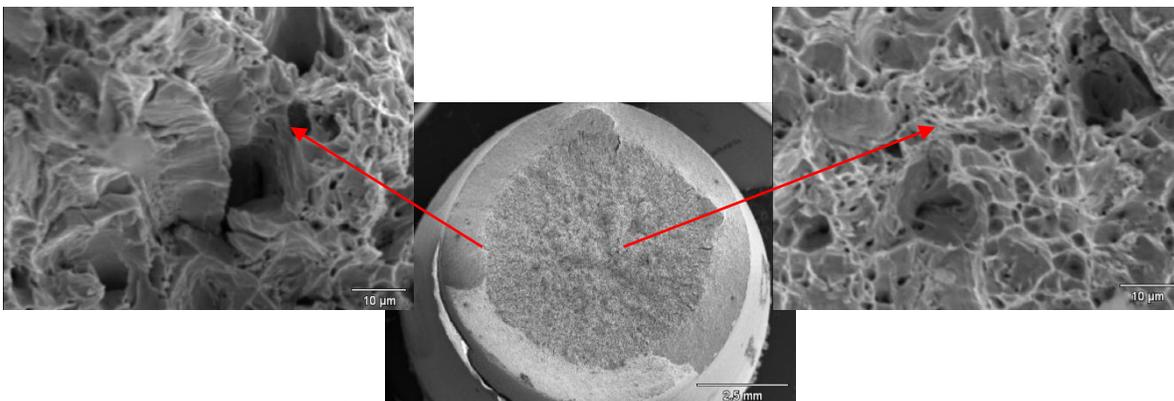


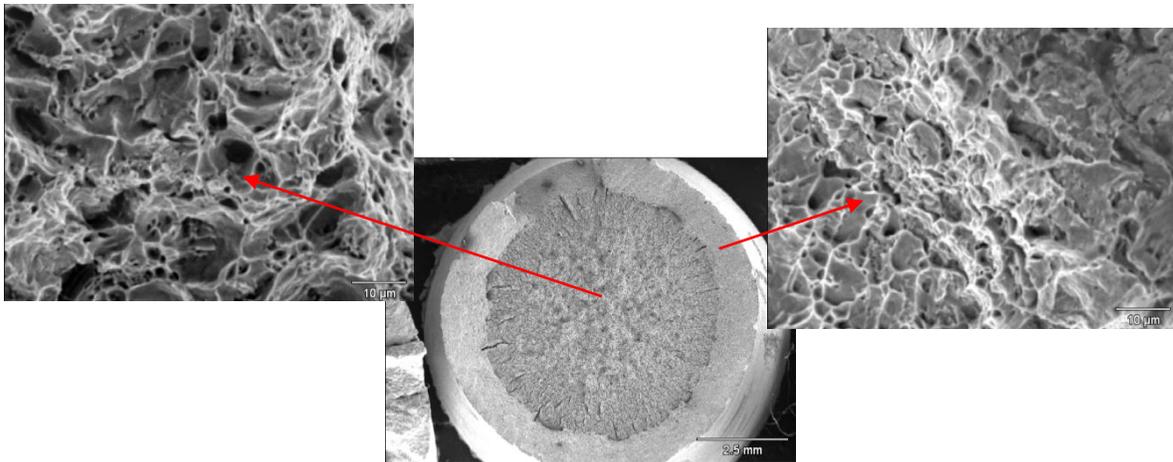
Figura 42. Fotografías mediante MEB a una magnificación de 10 y 1500 aumentos

Se encontró en el borde la pérdida de la ductilidad del material, al no encontrarse el mismo tipo de micro huecos y desgarramiento en la orilla del material encontrado en un medio ambiente. Se observa la formación de cavidades dentro de esta zona de la fractura no presentes en la fractura en medio ambiente.

#### **Probeta tensión H<sub>2</sub>O<sub>CEPROMIM</sub>**

Esta probeta mostro la formación de cavidades dentro de los micro huecos característicos de una fractura dúctil normal, estos huecos pueden ser apreciados como zonas oscuras dentro de la imagen tomada para el centro de la probeta.

Segundo con lo que respecta al borde se observa cierta ductilidad, pero en el borde derecho de la foto se observan residuos de corrosión a los que estuvo sujeto el material



**Figura 43.** Fotografías mediante MEB a una magnificación de 10 y 1500 aumentos.

#### **Probeta tensión Salmuera.**

En lo que respecta a las muestras en salmuera se observa un centro con menor cantidad de micros huecos, se observa productos de corrosión en los micro huecos presentes, así mismo se observan ligeras picaduras dentro del centro de la probeta.

En lo que respecta a la orilla de la probeta de tensión en este medio se puede observar ductilidad pero en menor cantidad de lo observado en medio ambiente al no observarse tanto desgarramiento en esta zona de la copa cono del material, de igual modo se observa la formación de pequeña picaduras dentro de los micros huecos característicos.

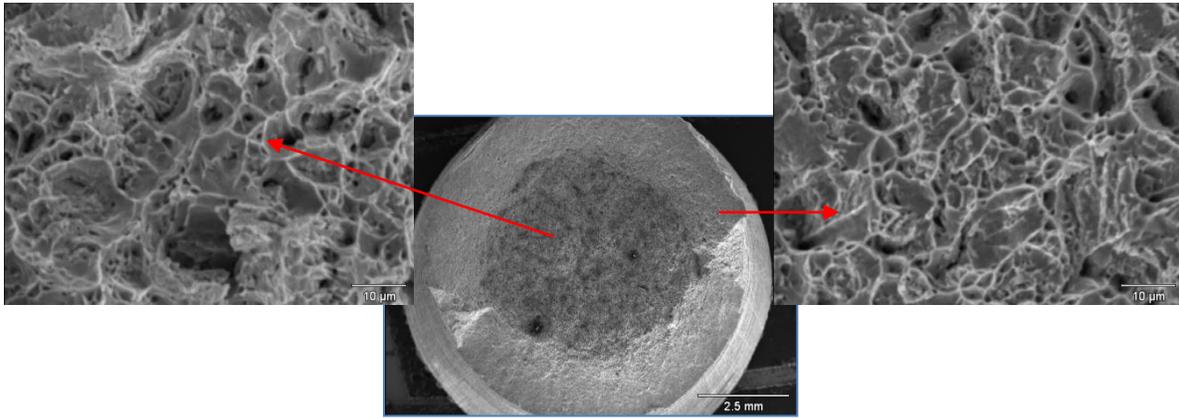


Figura 44. Fotografías mediante MEB a una magnificación de 10 y 1500 aumentos.

#### **Probeta tensión Solución K.**

La solución K, presentó un comportamiento totalmente diferente en el centro de la probeta al mostrar clivajes, los cuales no se observaron en medio ambiente, dentro de los clivajes encontrados en el centro de la muestra se observan pequeñas picaduras. El borde presentó un comportamiento diferente al presentar cierto grado de ductilidad pero opacado por la formación de cavidades y huecos producto del medio acuoso.

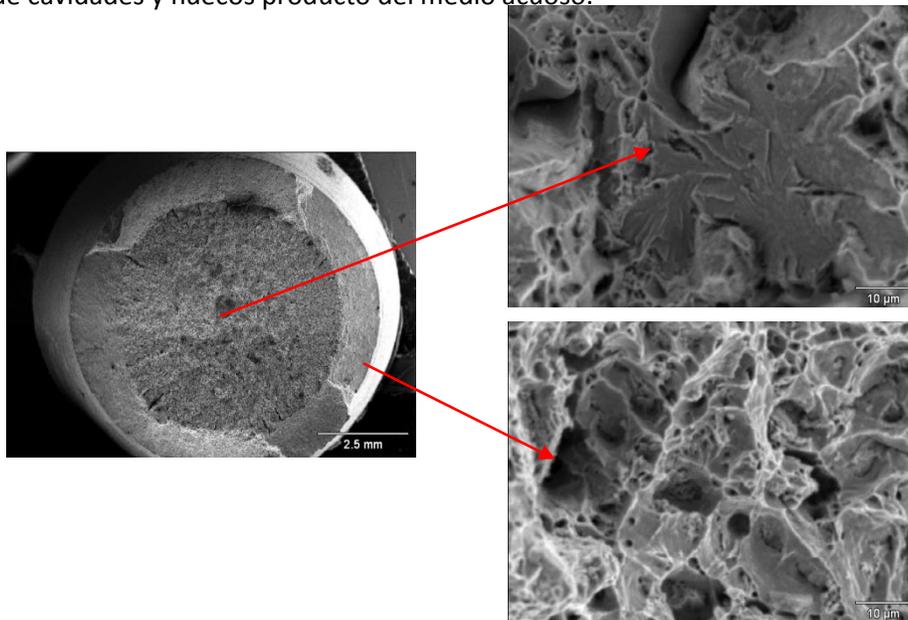


Figura 45. Fotografías mediante MEB a una magnificación de 10 y 1500 aumentos.

**Probeta tensión solución acida.**

En lo que respecta al medio acido el centro de esta muestra presento totalmente un comportamiento frágil al mostrar clivajes, los cuales que existe una fragilidad del material en esta zona. El borde de igual modo presento un comportamiento diferente al presentar productos de corrosión en una zona que se espera que tenga desgarramiento del material. En esta imagen se observa que el material presento la disolución de material por parte del medio acuoso al que estuvo sujeto.

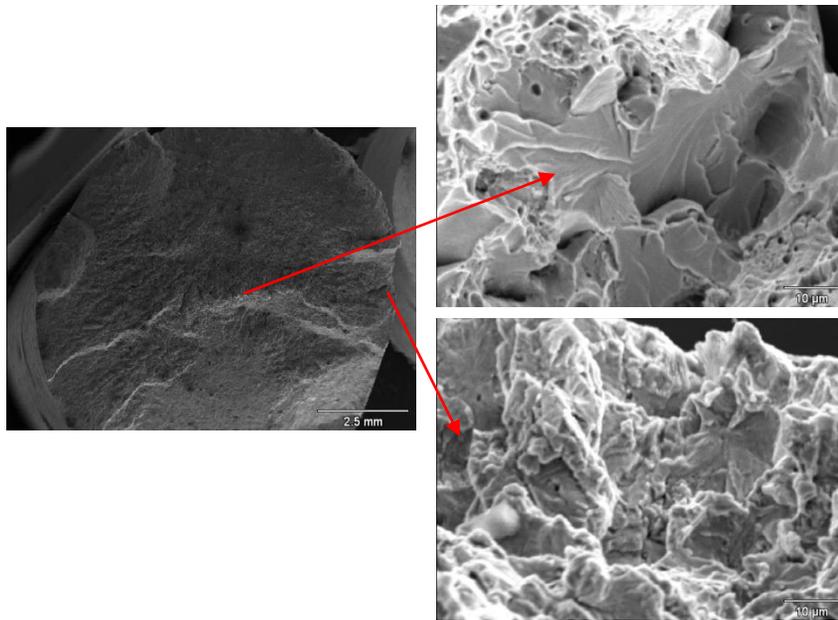


Figura 46. Fotografías mediante MEB a una magnificación de 10 y 1500 aumentos.

## IV. Análisis de resultados.

### 4.1. Análisis de las propiedades mecánicas de tensión en medios.

En lo que respecta a las pruebas de tensión en medios, podemos observar en la tabla 12 los resultados globales de los ensayos de tensión realizados donde podemos observar un decremento en las propiedades de esfuerzo de cedencia para cada uno de los ambientes provocados contra los resultados globales obtenidos para medio ambiente, con un decremento mayor en la solución salmuera y solución NS-4.

Con respecto al UTS del material en todos y cada uno de los ambientes ensayos existe un decremento con respecto a la máxima resistencia contra las pruebas realizadas únicamente en ambiente, siendo mayor el decremento para la solución salmuera NACE.

Con respecto al porcentaje de elongación del material se encuentre del mismo modo un decremento en las propiedades de elongación del material con respecto al ensayo en ambiente, siendo drástica la disminución de alargamiento en medio ácido 1N, siendo este de 4.80 contra 15 de elongación en ambiente, existe un decremento significativo de esta propiedad.

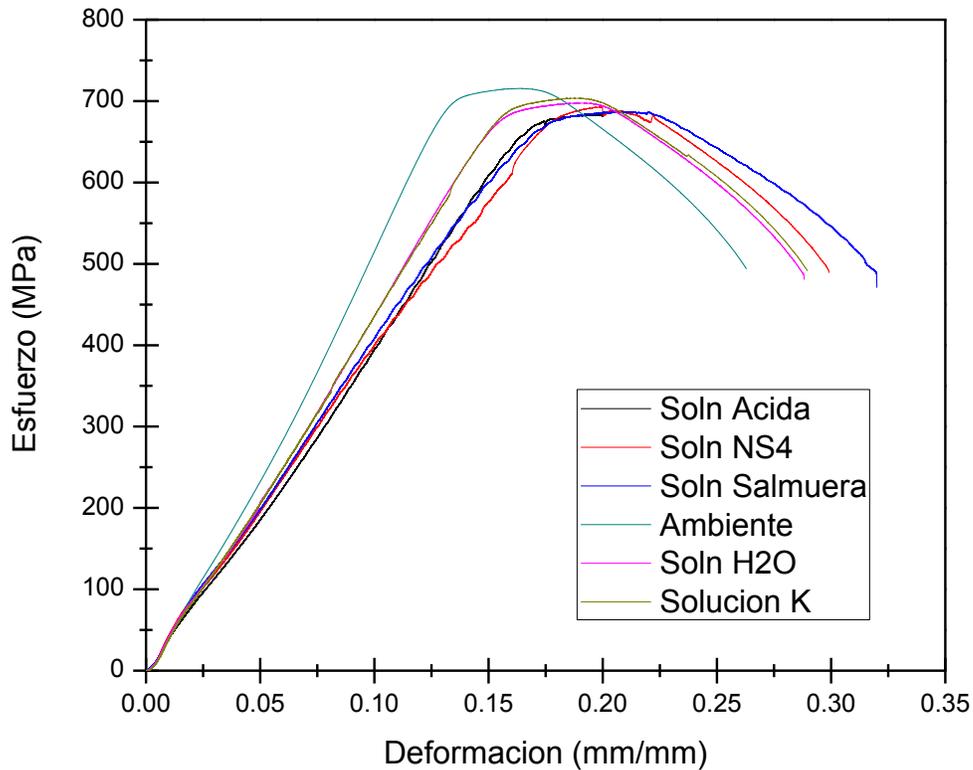
Con respecto al porcentaje de reducción de área existe un aumento en cada uno de los medios en su reducción de área, pero encontrando una reducción decreciente en solución ácida abrupta del 15.10 por ciento con respecto a las pruebas en ambiente que es de 36.20 por ciento.

Tabla 13. Propiedades mecánicas de ensayos en tensión en medios acuosos.

Medio acuoso ensayado	Salmuera NACE ID 196	ASTM G5 Solución ácida 1N	NS-4	Solución "K <sub>x1</sub> "	Solución "H <sub>2</sub> O CEPROMIM	Ambiente
Esfuerzo de cedencia promedio	660	660	660	690	680	696
Esfuerzo Último a la Tensión (UTS) promedio	687.050	695.315	692.921	705	697.744	719
% de Elongación	10.20	4.80	7.00	11.20	11.20	15.00
% de Reducción de Área	47.00	15.10	52.10	48.50	50.10	36.20
$\sigma_y$ /UTS	0.99	0.96	0.96	0.98	0.97	

Gráficamente podemos observar lo reportado en la tabla 7, de este modo podemos observar que si existe un efecto de cada uno de los medios ensayados contra el material AISI 1018, siendo más

abrupto el daño para el medio ácido sobre el material al disminuir abruptamente la deformación del material en este medio.



**Gráfico 4.** Curvas esfuerzo vs deformación ingenieril de las pruebas en medios acuosos corrosivos y ambiente. Acercamiento al máximo esfuerzo de cada prueba.

De igual modo en los perfiles metalográficos mostrados observamos un efecto sistemático en el tipo de copa y cono presente para la fractura de cada medio, siendo en el medio ácido 1 N, donde se pierde la copa cono del material, así mismo la presencia de grietas superficiales es el resultado del efecto del medio sobre el material.

También fue posible observar agrietamiento en el medio ácido K, pero dentro de la copa cono, siendo una grieta secundaria menor a lo encontrado en medio ácido 1N.

## 4.2. Análisis de las propiedades de impacto charpy en medios.

Con respecto a los resultados de impacto podemos observar

Los resultados obtenidos de las pruebas de impacto charpy expuestos para cada ambiente en la tabla 13, donde de lo expuesto en esta tabla podemos analizar, que existe un aumento en la energía de impacto para cada medio siendo la solución acida la única que no presenta variación contra las pruebas de ambiente, la solución H<sub>2</sub>O, siendo la que presenta mayor aumento de energía de impacto con respecto al ambiente

Con respecto a los perfiles metalográficos presentados podemos observar que en cada una de las imágenes presentadas para cada medio se tienen características distintas del rompimiento de la fractura, siendo la muestra en H<sub>2</sub>O la que presenta mínima deformación de granos equiaxiales.

La solución salmuera, K y acida presentaron agrietamiento siendo el mayor agrietamiento presentado para la solución k, y menor el agrietamiento para la solución salmuera.

Tabla 14. Resultados de Impacto Charpy, Ambiente

Medio acuoso ensayado	Salmuera NACE ID 196	ASTM G5 Solución acida 1N	NS-4	Solución "K <sub>x1</sub> "	Solución H <sub>2</sub> O	Ambiente
Ancho (mm)	8.78	8.55	8.79	8.79	8.71	8.70
Espesor (mm)	10.00	10.00	10.05	10.15	10.08	10.14
Área de ligamento (mm <sup>2</sup> )	87.80	85.50	88.33	89.21	87.79	88.21
Temperatura (°C)	25 °C (298.15)	25 °C (298.15)	25 °C (298.15)	25 °C (298.15)	25 °C (298.15)	25 °C (298.15)
Valor promedio de energía en (Kg - m)	8.2	7.2	10.8	9.3	12.60	7.2

## 4.3. Análisis fractográfico fracturas tensión.

Con respecto a lo observado primero mediante estereoscopio podemos decir que existe un efecto a simple vista del tipo de fractura final presentado en las pruebas de tensión del medio acido 1N, esto al presentar agrietamiento y agrietamiento secundario de la superficie de la muestra,

coloración amarillo ocre y café sobre la superficie interna de la fractura así como en la superficie de las muestras ensayadas. Presentando en inspección visual tonalidades brillosas y escalonadas en el tipo de fractura presentada.

Para cada uno de los demás medios observados mediante la técnica de estereoscopio se observó tonalidad amarillo ocre y tonos rojizos en la superficie de fractura, siendo la solución k la que presenta pequeños huecos más profundos no observados en las copas como de los demás medios.

En lo que respecta al análisis fractográfico microscópico mediante MEB de cada una de las muestras, se puede analizar que en las muestras con medios ácidos presentes durante su ensayo presentaron zonas con clivaje, siendo más abruptos y presentes en toda la superficie de la muestra para los medio ácido 1N, donde para este medio se tuvo la presencia de clivaje, agrietamiento y agrietamiento secundario en la superficie interna y centro de la muestra. También se observa la presencia de corrosión del material al observarse la pérdida de metal en la superficie externa de las grietas.

En la solución k fue posible observar clivajes en ciertas zonas centrales de la muestra, así como la pérdida de dimples en la superficie de la copa como del material.

En los medios acuosos H<sub>2</sub>O, NS4 y Salmuera, fue posible observar picaduras de tamaño pequeño dentro de los microhuecos característicos de una fractura dúctil de un acero.

#### **4.4. Análisis fractográfico de fracturas impacto charpy**

En lo que respecta a lo observado mediante estereoscopio de las pruebas de impacto, se puede analizar lo siguiente: Primero los medios ácidos presentaron una fractura a simple vista totalmente oxidada con tonalidades amarillo y rojo ocre, existe al ser observadas mediante estereoscopio las probetas en ácido 1N, una gruesa capa de óxido el cual cubre la fractura generando la dificultad de ser observada con gran detalle mediante esta técnica.

Se puede recalcar que las soluciones ácidas presentaron pequeñas picaduras en la zona de entalla de la probeta de impacto en las cuales se observó la acumulación de óxido.

Cada una de las muestras observadas en estereoscopio presentó las tres zonas características de una fractura generada por prueba de impacto, una primera zona dúctil al comienzo de la entalla, una zona frágil al centro de la muestra y una zona dúctil al final de la probeta impactada.

## V. Conclusiones.

Después de las pruebas y estudios metalúrgicos realizados a los resultados obtenidos de la experimentación de este trabajo podemos concluir lo siguiente:

1. Con respecto a las muestras ensayadas en tensión existe un efecto de agrietamiento y fragilidad por parte de los medios ácidos empleados en este trabajo siendo el daño mas abrupto el presentado en el medio ácido 1N, el cual genera agrietamiento intergranular, debido a la evolución de hidrogeno presente por parte de este medio.
2. Los medios ácidos generan clivajes en el centro de las muestras acidas.
3. Los microhuecos generados durante un ensaye normal de tensión, en presencia de un medio acuoso ácido , son zonas donde se propicia el agrietamiento en medios ácidos, siendo también estas zonas lugares donde existe la interacción del medio con el material, lo cual genera de igual modo la corrosión y perdida de material en los comienzos de grieta del material.
4. La reducción de área y alargamiento del material en medios ácidos decrece siendo mayor su decremento en soluciones de 0.76 pH, la disminución de estas propiedades se ve asociado a la presencia de zonas con clivaje característico de un material frágil, haciendo que en las pruebas ensayadas se obtuviera una ruptura del material súbita y abrupta.
5. En pruebas de impacto charpy se observa un cambio en la energía de las pruebas realizadas, debido al tipo de medio empleados, los cuales generan un efecto de perdida estas propiedades.

## Referencias.

1. **Terán Méndez Gerardo**, Tesis: “Efecto del ambiente en la distribución de esfuerzos y resistencia a la fractura de tubo de acero con agrietamiento radial”, México, IPN p.p.71 (2008).
2. **Barbra L. Gabriel**, SEM: A User`s Manual for Materials Science, EUA, ASM ,p.p. 198 ISBN: 0-87170-202-9, (1985).
3. **González Velázquez Jorge L.**, Metalurgia mecánica, México, LIMUSA, p.p. 245
4. **González Velázquez Jorge L.**, Mecánica de fractura, Segunda Edición, México, LIMUSA, p.p. 186, ISBN: 968-18-6130-2, (2004).
5. **Shackelford James F.**, Ciencias de Materiales para Ingenieros, Tercera Edición, México, Pearson Educación, p.p. 794, ISBN: 0-02-409751-9, (1995).
6. **McEvily Aj.**, Metal Failures: Mechanisms, Analysis, Prevention, EUA, A Wiley-Interscience Publication, p.p. 324, ISBN: 0-471-41436-0, (2001).
7. **Dieter Jr.**, Mechanical Metallurgy, EUA, McGraw-Hill, p.p. 615, (1961).
8. **Sindey H. Avner**, Introducción a la Metalurgia Física, España, McGraw-Hill, p.p. 559, (1994).
9. **Askeland Donald R.**, Ciencia e Ingeniería de los Materiales, Tercera Edición, México, International Thomson Editores, p.p. 790, ISBN 968-7529-36-9, (1998).
10. Michael Baker Jr., Inc, “POS TT08-Stress Corrosion Cracking Study” September 2004, p.p. 15-21.
11. Ginzle R. K. & Kanters, W. A., “Pipeline corrosion and Cracking and the Associated Calibration Considerations for Same Side Sizing Applications”, [www.eclipsescientific.com](http://www.eclipsescientific.com) .
12. B. A. Harle and J.A. Beavers, “Low-pH Stress Corrosion crack propagation in APIX-65 Line Pipe Steels”, Corrosion Engineering- Vol. 49, No 10, 1993, p.p. 861
13. API Standard 1160, “Managing System Integrity for Hazardous Liquids Pipeline”, 2001p.p. 44 y 45
14. F.P. Ford, “Quantitative prediction of Environmentally Assisted Cracking”. Corrosion Science Section, Vol. 52, No. 5. 1966, p.p. 378
15. Russell H. Jones, “Stress-corrosion cracking” The materials Information Society, ASM International, 1999, p.p. 1-3
16. National Energy Board, Report of the Inquiry, “Stress Corrosion Cracking on Canadian Oil and Gas Pipelines”; 1996, p.p. 7, 10, 15, 17, 20, 41, 44 y 48.

17. J.J. González, "PDVSA study suggests neutral pH soils not an SCC contributor" PDVSA Intervep S.A. [www.pipe-line.com/archive/archive/00-06/00-06\\_PFVS-gonzalez.htm](http://www.pipe-line.com/archive/archive/00-06/00-06_PFVS-gonzalez.htm)
18. Jeffrey T. Bulger, "The Effect of Microstructure on Near-Neutral-pH SCC", University of Alberta, 2000, p.p. 3, 61, 66 y 69
19. Weize Yu, "Stress Corrosion Cracking Behavior of Pipelines Steels in Near-Neutral pH Solutions", University of Calgary, 1997, p.p. 1, 31-34, 36-38, 41 y 42.
20. B.N Leis and J. Eiber, "Stress-Corrosion Cracking On Gas-Transmission Pipeline: History, Causes, and Mitigation", First International Business Conference on Onshore Pipelines, Berlin, 1997, p.p.7
21. C. Garcia, F. Matìn, P. De Tiedra, S. Alonso, and M.L. Aparicio, "Stress Corrosion Cracking Behavior of Cold-Worked and Sensitized Type 304 Stainless Steel Using the Slow Strain Rate Test", Corrosion Science Section, Vol. 58, No. 10, 2002, p.p. 849