



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



ESTUDIO DE LA TENACIDAD DE IMPACTO DEL ACERO DÚPLEX 2507 SOMETIDO A CORROSIÓN PREVIA POR PARTE DE UNA SOLUCIÓN DE ÁCIDO OXÁLICO AL 10% SEGÚN LA NORMA ASTM A262-02A.

Tutor académico:

Ing. Laura Sáenz

Autores:

Jiménez Estraño, Antonio José.

Vidoza Guillén, Jorge Alejandro.

Naguanagua, 15 de noviembre de 2010



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Estudio de la tenacidad de impacto del acero dúplex 2507
sometido a corrosión previa por parte de una solución de ácido
oxálico al 10% según la norma ASTM A262-02a.

*Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de Carabobo para
optar al título de Ingeniero Mecánico*

Tutor académico:
Ing. Laura Sáenz

Autores:
Jiménez Estraño, Antonio José.
Vidoza Guillén, Jorge Alejandro.

Naguanagua, 15 de noviembre de 2010



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Quienes suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para examinar la Tesis de Pregrado titulada "*Estudio de la tenacidad de impacto del acero dúplex 2507 sometido a corrosión previa por parte de una solución de ácido oxálico al 10% según la norma ASTM A262-02a*", presentada por los bachilleres: **Antonio J. Jiménez E.**, **Jorge A. Vidoza G.**, portadores de la Cédula de Identidad N°: 19.011.617 y 18.619.646, respectivamente; hacemos constar que hemos revisado y aprobado el mencionado trabajo.

Prof. Tutor, *Ing. Laura Sáenz*
Presidente del jurado

Prof. Jurado 1, *Ing.*
Eleazar Díaz

Prof. Jurado 2, *Ing.*
Oswaldo Urbano

En Nagueanagua a los 15 días del mes de noviembre de 2010

Agradecimientos

Queremos expresar, nuestro más sincero agradecimiento en primer lugar, a Dios por alimentar nuestra fé, y otorgarnos valor a lo largo del camino recorrido, a todas las personas que hicieron posible alcanzar esta meta, como lo son los integrantes de nuestras familias y amigos por ser la base de nuestra enseñanza, y brindarnos su apoyo incondicional, a las empresas que nos ayudaron a llevar a cabo este trabajo como son; Sandvik de Venezuela Sandven C.A., Cincatesa C.A., Instituto de Ingeniería y a la Universidad de Carabobo. Igualmente queremos agradecer a nuestra tutora, la Profesora Laura Sáenz, por sus consejos, guiatara y sugerencias oportunas durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

Resumen

Se realizó la evaluación de la tenacidad de impacto al acero Dúplex 2507 con exposición a ácido oxálico basándose en la norma ASTM 262-02a. Entre los rubros donde más es aplicado el acero dúplex se encuentran; la manufactura, la petroquímica, la marina, entre otras. El ácido oxálico es un ácido orgánico fuerte que se puede encontrar en ciertas plantas y alimentos vegetales, uno de sus principales usos es el de la limpieza y remoción de impurezas para el afinado de metales, entre ellos los aceros bifásicos. A propósito de estudiar la interacción entre el ácido y el metal, se aplicaron los ensayos mecánicos de tracción, impacto tipo Charpy, dureza Rockwell, y microdureza Vickers luego de haber aplicado un tratamiento térmico de normalizado y de haber expuesto las muestras del acero al medio corrosivo de ácido oxálico a 10% de concentración, durante un periodo aproximado de 2 (dos) minutos, variando la diferencia de potencial del medio entre 6 (seis), 8 (ocho) y 10 (diez) voltios.

Se determinó que la tenacidad al impacto y resistencia del material viene afectada por la exposición al incrementar la diferencia de potencial del medio, en el comportamiento de las variables más sensibles, la energía absorbida al impacto (EAI) y la microdureza Vickers, por su parte los esfuerzos de fluencia y la dureza Rockwell en la superficie se mantuvieron constantes en las condiciones planteadas. Se observó una fluctuación en la microdureza de las fases del acero y EAI, indicando la formación de carburos de cromo que afectan la dureza general y la tenacidad del material. Se aplicaron observaciones de macroscopía, microscopía óptica y MEB, estableciendo que las fracturas analizadas son de tipo mixto, adicionalmente en la microestructura se visualizan gran cantidad de carburos, lo que permite concluir que los cambios que se generaron dentro del proceso son debidos en parte al proceso de sensibilización aplicado.

Índice general

Índice general	i
Índice de figuras	iv
Índice de tablas	vii
CAPÍTULO 1	
Introducción	1
1.1 Situación problemática	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 <i>Objetivo General</i>	3
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	3
1.3 Justificación	4
1.4 Alcance	5
1.5 Limitaciones	6
CAPITULO 2	
Bases Teóricas	9
2.1 Antecedentes	9
2.2 Bases teóricas	12
2.2.1 <i>Aleaciones ferrosas</i>	12
2.2.2 <i>Aceros Inoxidables</i>	13
2.2.3 <i>Propiedades Mecánicas</i>	15
2.2.4 <i>Ensayos Mecánicos</i>	16
2.2.5 <i>Temperatura de Transición Dúctil-Frágil</i>	18
2.2.6 <i>Tratamientos Térmicos</i>	19
2.2.7 <i>Corrosión</i>	19
2.2.8 <i>Resistencia a la corrosión</i>	20

- ii *Estudio de la tenacidad de impacto del acero dúplex 2507 sometido a corrosión previa por parte de una solución de ácido oxálico al 10% según la norma ASTM 202-02A*

2.2.9	<i>Corrosión Intergranular</i>	21
2.2.10	<i>Corrosión por picaduras</i>	24
2.2.11	<i>Compuestos intermetálicos de aceros Dúplex</i>	25
CAPÍTULO 3	Marco Metodológico	29
3.1	Nivel de la Investigación	29
3.2	Diseño de la Investigación	30
3.3	Población y Muestra	30
3.4	Técnicas e Instrumentos de recolección de datos	30
3.5	Técnica de procesamiento de datos	31
3.6	Etapas de la metodología	32
3.6.1	<i>Adquisición del material a estudiar</i>	33
3.6.2	<i>Caracterización del material en estudio</i>	33
3.6.3	<i>Mecanizado y preparación de las muestras</i>	34
3.6.4	<i>Exposición al medio y corrosión de las muestras</i>	38
3.6.5	<i>Aplicación de ensayos mecánicos</i>	49
3.6.5.1	<i>Ensayo de tracción</i>	49
3.6.5.2	<i>Ensayo de Impacto</i>	55
3.6.6	<i>Estudio Metalográfico</i>	59
3.6.7	<i>Procedimiento para ensayos de dureza y microdureza</i>	59
3.6.7.1	<i>Microdureza Vickers</i>	59
3.6.7.2	<i>Dureza Rockwell</i>	61
CAPÍTULO 4	Resultados Obtenidos	65
4.1	Estudios Preliminares	65
4.2	Ensayos Mecánicos	67
4.2.1	<i>Ensayo de Tracción</i>	67
4.2.1.1	<i>Curvas Esfuerzo – Deformación (A)</i>	69
4.2.1.2	<i>Curvas Esfuerzo – Deformación (B)</i>	71
4.2.1.3	<i>Curvas Esfuerzo – Deformación (C)</i>	73
4.2.1.4	<i>Análisis de Ductilidad</i>	74
4.2.2	<i>Ensayo de Impacto Charpy</i>	76
4.2.3	<i>Ensayos de Dureza</i>	81
4.2.3.1	<i>Microdureza Vickers</i>	81
4.2.3.2	<i>Dureza Rockwell</i>	83
4.3	Corrosión o Exposición al Acido	84
4.3.1	<i>Estado final de las muestras</i>	84
4.3.2	<i>Pesaje final de las muestras</i>	89
4.4	Microscopías	91
4.4.1	<i>Microscopía Óptica</i>	91
4.4.1.1	<i>Muestras expuestas a ácido con 6V</i>	91
4.4.1.2	<i>Muestras expuestas a ácido con 8V</i>	94
4.4.1.3	<i>Muestras expuestas a ácido con 10V</i>	97

4.4.2 Observación de Fracturas	102
4.4.3 Microscopía Electrónica de Barrido	103
4.5 Discusión de Resultados	117
4.5.1 Comparación de resultados en Tracción	117
4.5.2 Comparación de resultados en Impacto	119
4.5.3 Comparación de resultados en Dureza	122
4.5.4 Relación entre ensayos mecánicos	124
 CAPÍTULO 5	
Conclusiones y Recomendaciones	125
5.1 Conclusiones	125
5.2 Recomendaciones	127
 Referencias bibliográficas	129
Anexos	131

Índice de Figuras

CAPÍTULO 1 Introducción

CAPITULO 2 Bases Teóricas

Figura 2.1 Corrosión por Picadura	24
--	----

CAPITULO 3 Marco Metodológico

Figura 3.1 Etapas de la Metodología	32
Figura 3.2 Probeta de ensayo de Tracción	35
Figura 3.3 Probeta de ensayo de Impacto (Charpy)	35
Figura 3.4 Probeta de ensayo de Tracción y Charpy	36
Figura 3.5 Equipo de ataque electrolítico	39
Figura 3.6 Campana para escape de gases y Microscopio	41
Figura 3.7 Solución de acido oxálico y Amperímetro	41
Figura 3.8 Horno para tratamientos y Balanza	42
Figura 3.9 Configuración del horno	44
Figura 3.10 Muestras luego de la sensibilización	44
Figura 3.11 Banco de pulido utilizado	45
Figura 3.12 Probetas preparadas para la exposición	45
Figura 3.13 Montaje y configuración del equipo	47

Figura 3.14	Muestra de tracción al momento de la exposición	48
Figura 3.15	Muestra Charpy al momento de la exposición	48
Figura 3.16	Prensa para ensayos de tracción	50
Figura 3.17	Ensayo de tracción en proceso	51
Figura 3.18	Método “offset”	53
Figura 3.19	Péndulo de Impacto usado en los ensayos	56
Figura 3.20	Posicionamiento de la muestra en el péndulo	57
Figura 3.21	Máquina de Corte	58
Figura 3.22	Microdurómetro Vickers	60
Figura 3.23	Durómetro Rockwell	62

CAPITULO 4 Resultados Obtenidos

Figura 4.1	Microestructura de acero dúplex original	66
Figura 4.2	Curvas de Tracción para varios aceros	67
Figura 4.3	Curvas de Tracción para acero SAF 2507	68
Figura 4.4	Curva de tracción, Condición A (6V)	69
Figura 4.5	Curva de tracción, Condición B (8V)	71
Figura 4.6	Curva de tracción, Condición C (10V)	73
Figura 4.7	Probetas tipo Charpy de control	76
Figura 4.8	Probeta tipo Charpy expuesta al ácido a 6V	84
Figura 4.9	Probeta tipo Charpy expuesta al ácido a 8V	85
Figura 4.10	Probeta tipo Charpy expuesta al ácido a 10V	86
Figura 4.11	Comparación de probetas Charpy	87
Figura 4.12	Muestras de tracción expuestas al ácido	88
Figura 4.13	Muestra representativa, condición A (6V) 100x	91
Figura 4.14	Muestra representativa, condición A (6V) 200x	92
Figura 4.15	Muestra representativa, condición A (6V) 400x	92
Figura 4.16	Muestra representativa, condición A (6V) 1000x	93
Figura 4.17	Muestra representativa, condición B (8V) 100x	94
Figura 4.18	Muestra representativa, condición B (8V) 200x	95
Figura 4.19	Muestra representativa, condición B (8V) 400x	95
Figura 4.20	Muestra representativa, condición B (8V) 1000x	96
Figura 4.21	Muestra representativa, condición C (10V) 100x	97
Figura 4.22	Muestra representativa, condición C (10V) 200x	98
Figura 4.23	Muestra representativa, condición C (10V) 400x	98
Figura 4.24	Muestra representativa, condición C (10V) 1000x	99
Figura 4.25	Imagen superficial, Probeta A6	101
Figura 4.26	Imagen superficial, Probeta B6	101
Figura 4.27	Fractura típica de muestra ensayada a tracción	102
Figura 4.28	Fractura típica de muestra ensayada a impacto	102
Figura 4.29	Superficie de fractura A3, a 388x	104
Figura 4.30	Superficie de fractura A3, a 775x	104
Figura 4.31	Superficie de fractura A3, a 2000x	105
Figura 4.32	Superficie de fractura B3, a 388x	105

Figura 4.33	Superficie de fractura B3, a 775x	106
Figura 4.34	Superficie de fractura B3, a 2000x	106
Figura 4.35	Superficie de fractura C5, a 388x	107
Figura 4.36	Superficie de fractura C5, a 775x	107
Figura 4.37	Superficie de fractura C5, a 2000x	108
Figura 4.38	Borde de fractura de C5, a 388x	109
Figura 4.39	Superficie de fractura A6, a 388x	110
Figura 4.40	Superficie de fractura A6, a 775x	110
Figura 4.41	Superficie de fractura A6, a 2000x	111
Figura 4.42	Superficie de fractura B6, a 388x	111
Figura 4.43	Superficie de fractura B6, a 775x	112
Figura 4.44	Superficie de fractura B6, a 2000x	112
Figura 4.45	Superficie de fractura C7, a 388x	113
Figura 4.46	Superficie de fractura C7, a 775x	113
Figura 4.47	Superficie de fractura C7, a 2000x	114
Figura 4.48	Borde de Fractura	115
Figura 4.49	Gráfico comparativo entre esfuerzos	117
Figura 4.50	Gráfico comparativo de ductilidad	118
Figura 4.51	Comparación de EAI	120
Figura 4.52	Comparación de K_{ID}	121
Figura 4.53	Comparación de Microdureza	122
Figura 4.54	Comparación de Dureza	123

Índice de tablas

CAPÍTULO 3	Marco Metodológico	29
	Tabla 3.1 Composición química acero inoxidable dúplex SAF 2507 (% Peso)	33
	Tabla 3.2 Nomenclatura de las muestras	37
CAPÍTULO 4	Resultados Obtenidos	65
	Tabla 4.1 Composición química acero inoxidable dúplex SAF 2507 (% Peso)	65
	Tabla 4.2 Datos de ensayo de Tracción en condiciones originales	68
	Tabla 4.3 Dimensiones iniciales de Probetas de Tracción	68
	Tabla 4.4 Resultados comparativos de Ensayos de Tracción para la condición A	70
	Tabla 4.5 Resultados comparativos de Ensayos de Tracción para la condición B	72
	Tabla 4.6 Resultados comparativos de Ensayos de Tracción para la condición C	74
	Tabla 4.7 Resumen de Promedios %RA obtenidos	75
	Tabla 4.8 Resumen de Promedios %e obtenidos	75
	Tabla 4.9 Datos de ensayos Charpy de Control	76
	Tabla 4.10 Resultados numéricos para Ensayo Charpy, Condición A	77
	Tabla 4.11 Resultados numéricos para Ensayo Charpy, Condición B	78
	Tabla 4.12 Resultados numéricos para Ensayo Charpy, Condición C	78

Tabla 4.13	Cálculo del factor K_{ID}	79
Tabla 4.14	Factor K_{ID} para diferentes condiciones	80
Tabla 4.15	Microdureza Vickers para condición Sens.	81
Tabla 4.16	Microdureza Vickers para condición A (6V)	82
Tabla 4.17	Microdureza Vickers para condición B (8V)	82
Tabla 4.18	Microdureza Vickers para condición C (10V)	82
Tabla 4.19	Resultados Dureza Rockwell C	83
Tabla 4.20	Dureza Rockwell C para diferentes cond.	83
Tabla 4.21	Estadística de cambio de pesaje de muestras, medidas en gramos	89

CAPÍTULO 1

Introducción

El campo de la ingeniería se encuentra en constante actualización, dicho proceso requiere investigación continua que de paso a nuevos métodos y técnicas para mejorar la calidad de vida y de procesos de diversa índole. Para la creación de dispositivos o maquinas que cumplan con este fin es necesario generar diferentes indagaciones que maximicen y optimicen su funcionamiento, en base a mecanismos ya realizados o mecanismos completamente innovadores. Las exigencias de estos aparatos es cada vez mayor en función de su utilidad, es por ello que la búsqueda y prueba de materiales aptos para su construcción deviene un factor importante en todos los ámbitos de la ingeniería. Es allí entonces, donde entra el presente trabajo de investigación, donde se averiguan y sondean las características de un acero de última generación sometido a condiciones de corrosión reguladas, las propiedades del mismo se verán afectadas y dicho cambio será objeto de estudio del trabajo a realizar.

1.1 Situación problemática

Como es bien sabido, el acero es uno de los materiales utilizados con mayor frecuencia en el campo de la ingeniería, lo cual implica una gran diversidad y versatilidad respecto a su uso, es por ello que se hace necesaria

la innovación e investigación constante en fin de mejorar el comportamiento de dicho material a diferentes solicitudes mecánicas.

Un diseño adecuado debe prevenir todo tipo de inconvenientes referentes a la situación del material, el ambiente y campo de esfuerzos bajo el que se encuentre sometido.

Uno de los problemas principales que presenta el acero inoxidable es precisamente la pérdida de la capa protectora generada por el cromo incluido en su composición química. A pesar de mejorar considerablemente la resistencia y durabilidad del acero algunas condiciones ambientales podrían deteriorar las propiedades externas de la capa protectora dejando el material descubierto a la atmósfera de una manera agresiva y propenso a la corrosión o pérdida de material debido a la afinidad que existe entre el hierro componente del acero y el oxígeno presente en el aire.

Existen en diversos campos de la tecnología, ambientes o lugares en los cuales se exponen materiales a distintas sustancias capaces de afectar de manera crítica su comportamiento y reacción ante esfuerzos de diferente índole; ya sean de impacto, cíclicos, de tensión entre otros, entre estas sustancias se encuentra el ácido oxálico, en cuya presencia por períodos prolongados podría afectar la capa pasivadora característica de los aceros inoxidables dúplex.

El ácido oxálico se usa comúnmente como limpiador y como medio de remoción de agentes o capas corrosivas en ciertos metales y minerales, sin embargo, exposiciones prolongadas al mismo y a concentraciones más elevadas son causa de una corrosión extensa en los aceros inoxidables dúplex, sobre todo cuando se compara con otros ácidos tales como el fórmico o el acético.

Por otra parte se tiene que, por su resistencia a la corrosión debida a su estructura bifásica, el acero inoxidable dúplex es utilizado ampliamente en la industria química donde se manejan toda clase de sustancias con propiedades corrosivas en medio o alto grado. También es utilizado en industrias relativas al aceite e industrias marítimas donde las condiciones son altamente propensas al desgaste de los materiales que se ven involucrados. En todas estas industrias antes mencionadas es posible encontrar ácidos tales como el oxálico presente y por tanto se debe tener en cuenta la resistencia, tenacidad y desempeño del acero a la hora de estar en un ambiente sometido a corrosión por este ácido.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Estudiar la tenacidad de impacto del acero dúplex 2507 sometido a corrosión previa por parte de una solución de ácido oxálico al 10% según la norma ASTM 262-02a.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar el material a investigar (acero inoxidable dúplex SAF 2507) mediante la realización de ensayos adecuados; a pesar de que éstas sean proporcionadas al momento de la adquisición del mismo deben ser verificadas.
- Construir del recinto necesario para someter las probetas al ambiente corrosivo en ácido oxálico.

- Evaluar las propiedades de impacto y tenacidad del acero inoxidable dúplex SAF 2507 mediante la aplicación de un ensayo de Charpy según la norma ASTM E23, una vez realizado el proceso de corrosión.
- Evaluar las propiedades mecánicas y la microdureza del acero inoxidable dúplex SAF 2507 mediante un ensayo de tracción según la norma ASTM E8 y un ensayo Vickers según la norma ASTM E92 una vez realizado el proceso de corrosión, para obtener propiedades de comparación.
- Evaluar el ataque intergranular resultado de los períodos de desgaste a causa de la corrosión por la solución de ácido oxálico.

1.3 Justificación

La calidad y complejidad de los diseños mecánicos e ingenieriles vienen de la mano de los avances existentes en ciencia y tecnología. Desde hace años se han sustituido centenares de materiales por otros más innovadores con propiedades superiores y respuestas más eficaces.

Los aceros inoxidables austenítico-ferríticos o dúplex son aceros de última generación, superan en tenacidad y resistencia a la corrosión (entre otras características) a los aceros al carbono e incluso a los aceros inoxidables monofásicos. Cabe destacar que al ser materiales recientemente incorporados a diversos campos, su costo y localización pueden ser factores decisivos a tomar en cuenta en el inicio o desarrollo de un proyecto. Es por ello que una selección correcta forma parte de un sustento sólido para nuevos diseños.

Estos materiales poseen una gama de usos bastante amplia, por lo que se toman para su estudio ciertas características específicas del ambiente o situación química en la cual se pueda estar trabajando. El ácido oxálico forma

parte de la composición de abundantes productos alimenticios, y podría estar en contacto constante con estos materiales. El análisis de la conducta relativa a la tenacidad del acero dúplex 2507 frente ataques de ácido oxálico en periodos de tiempo variables, es un caso particular de la investigación completa que implica el estudio completo de los aceros dúplex.

La evaluación del comportamiento de dichos aceros y en especial el acero 2507, en ambientes exigentes similares a los que se podrían encontrar en empresas de rubros variados; tales como el de alimentación, o medicamentos, forma parte de la contribución al conocimiento profundo de los aceros dúplex, dando facilidades a futuras investigaciones y ampliando el rango de características en la selección de materiales para la fabricación o desarrollo de líneas de producción, artefactos, estructuras, entre otros.

1.4 Alcance

Los experimentos se aplicaran a un acero dúplex 2507, estos constaran específicamente de la realización de los ensayos de tracción, dureza e impacto tipo Charpy. Las muestras serán expuestas a ácido oxálico según la norma ASTM 262-02a. Se evaluara la tenacidad al impacto para verificar el aumento de la fragilidad en el acero sometido a corrosión.

Los parámetros que se utilizaran para los ensayos de las probetas son:

- Solución con una concentración de 10% de ácido oxálico, según la norma ASTM correspondiente, es posible realizar pruebas con persulfato de amonio en las mismas condiciones si el primer reactivo no otorga los resultados deseados.
- Los tiempos de exposición vienen igualmente definidos según la norma específica, estos son de; 1,5 o 2 minutos dependiendo del grado de

ataque de la muestra. Luego de ello tendrán lugar los diferentes ensayos pautados (Impacto, Tracción, y Dureza).

- Se necesitan según las normas tres (3) probetas por cada condición para el ensayo de tracción, y cinco (5) probetas para la realización del ensayo de impacto tipo Charpy.
- Todos los ensayos serán realizados a temperatura ambiente, correspondiente a aquella predominante en el laboratorio donde se realicen los ensayos.

1.5 Limitaciones

- Adquirir el material suficiente para los ensayos y pruebas, se conoce que el acero dúplex es un metal difícil de conseguir debido a su alto costo y poca disponibilidad en el país, debido a la escasez de importaciones que existe actualmente.
- Obtener los recursos económicos necesarios para realizar el mecanizado de las probetas requeridas para los ensayos de impacto y tracción.
- Construir un recipiente o artefacto que asemeje las condiciones deseadas, en el cual se contenga el ácido oxálico y sea posible realizar repeticiones de los experimentos variando tiempos de exposición.
- Disponer del laboratorio o lugar donde se encuentren todos los instrumentos o máquinas necesarios para llevar a cabo los ensayos requeridos; y disponer de dicho lugar el tiempo suficiente para la realización adecuada y continua del proceso de corrosión.

- La manipulación y obtención del ácido oxálico, son conocidas las consecuencias que acarrearán el contacto con este ácido, por lo cual se debe mantener cierta precaución en su empleo.
- Accidentes de trabajo y/o impedimentos físicos que pudiesen afectar la práctica de los investigadores.

- 8 *Estudio de la tenacidad de impacto del acero dúplex 2507 sometido a corrosión previa por parte de una solución de ácido oxálico al 10% según la norma ASTM 202-02A*

CAPÍTULO 2

Bases Teóricas

En fin de realizar una investigación concisa, que genere aportes al campo científico es preciso indagar sobre estudios anteriores y generar bases solidas para el desempeño de la misma. Las investigaciones previas y la teoría revisada forman el basamento necesario para llevar a cabo el presente trabajo, y permiten a su vez que esté acorde con la línea de investigación que se viene aplicando a diversos aceros de última generación. Se revisan trabajos de investigación en acero dúplex en diferentes medios, sometidos a corrosión y tratamientos térmicos para conocer características adicionales sobre el mismo, además de ello se verifican los estudios en los que se aplica el ácido oxálico y estudios relacionados a aceros de generaciones precedentes tales como aceros inoxidables austeníticos. Aunado a ello se revisan los conceptos afines, para finalmente definir las bases teóricas de la investigación

2.1 Antecedentes

En investigaciones durante el siglo XX, se crea el acero inoxidable, un acero altamente resistente al desgaste, sin embargo aún más recientemente se ha descubierto una nueva aleación denominada acero inoxidable bifásico o

dúplex, el cual presenta alta resistencia a la corrosión en comparación con los aceros inoxidable monofásicos. En los últimos años se han realizado varios estudios de los aceros inoxidable dúplex, sobre todo como parte de una soldadura para evaluar sus propiedades mecánicas y resistivas.

Más aún relativo a nuestro ámbito investigativo, se han realizado estudios de los factores metalúrgicos relevantes en ensayos de tenacidad e impacto en un acero dúplex 2105, los profesores Yang Zhuo-Yue, Su Jie, y Wang Ya-ming, (2009) en cuyo estudio se pretende visualizar la fragilización que dicho acero experimenta durante un enfriamiento lento en un rango de 400 y 600 °C y luego una soldadura, procedimiento muy habitual, para lo cual se realizó una serie de aumentos y disminuciones de temperaturas y reposos a los especímenes o probetas, proceso es conocido como envejecimiento, para luego efectuar un ensayo de impacto utilizando el método Charpy y así determinar la energía de impacto absorbida por el acero.

Se concluye que; efectivamente existe una fragilización en la estructura de la aleación cuando se envejece a 550 °C, sin embargo ésta es disminuida cuando la aleación posee una cantidad adicionada de titanio y aluminio residual, poseyendo el acero una modesta tenacidad. Para el caso de envejecimiento a 475 °C se tiene que a pesar de la adición de titanio, sigue existiendo relativamente alta fragilidad en la aleación. También se obtuvo que para una gran cantidad de titanio, se ve reducido el aluminio y también la fase austenítica del acero, por lo que se vuelve algo inestable y es incapaz de resistir la formación de grietas, lo cual evidentemente causa fragilidad en el acero.

Entre las publicaciones previas, se consiguen correlaciones entre las características que se pretenden estudiar en la investigación. L. Sánchez y F. Gutiérrez-Solana en *“Correlación entre la resistencia al impacto y tenacidad a*

la fractura en aceros dúplex inoxidables envejecidos” (2002) hacen un estudio similar aplicado al envejecimiento en lugar de corrosión.

Básicamente, en esta indagación se determinó como variaban o cambiaban las propiedades entre ellas en un acero dúplex luego del tratamiento mencionado. En la totalidad de los casos se concluyó que mientras más largo sería el proceso de envejecimiento, más agudas serían las repercusiones del mismo. El contenido ferrítico se eleva al mismo tiempo que aumentan los periodos de exposición y temperatura de envejecimiento, resultando en una fragilización ineludible del acero estudiado. Además de ello, las curvas de transición se vieron alteradas, al cambiar los niveles de energía y la temperatura de transición desplazándose hacia temperaturas más elevadas cuando se incrementan los niveles de envejecimiento.

Uno de los resultados más satisfactorios por parte de los investigadores fue la correlación lineal existente entre el comportamiento a la fractura y la resistencia al impacto de estos aceros, reflejado en una recta de pendiente constante sin importar la cantidad de ferrita que contuviese el acero. Teóricamente es posible diferenciar dos zonas de comportamiento, una de conducta muy frágil con una única correlación y otra cuya correlación depende de la cantidad de ferrita, ambas pendientes son similares. Alcanzando resultados bastante aproximados a aquellos obtenidos en el laboratorio, con ciertos errores que se atribuyen a la no uniformidad del material.

El estudio del comportamiento de aceros en ácido oxálico ha sido también estudiado por los investigadores Isao Sekine, Chie Okano y Makoto Yuasa en diversas publicaciones, donde los experimentos son realizados a versiones ferríticas del acero dúplex. Se evalúan allí las características respecto al peso en cada caso, examinando especímenes expuestos al medio correspondiente cargado de ácido oxálico mediante la formación de complejos químicos de cromo, hierro y oxígeno que se desprendían de estas muestras.

El enfoque de la investigación se encuentra en la producción de complejos de oxalatos en la solución de ácido oxálico, esto fue confirmado y plasmado en las conclusiones gracias a la aplicación de diversos factores teóricos referentes a la química de corrosión que implican dichos procesos. Se determinó que los complejos se formaban fácilmente en exposiciones alargadas y a altas temperaturas, así como la disolución del cromo y hierro del acero en estos periodos, otro factor que destaca entre los resultados es el incremento de la velocidad de corrosión en muestras con alto contenido en cromo debido a la facilidad que este posee de disolverse en ácido oxálico, llevando consigo la formación de iones de hierro que provocan la pérdida de peso ya mencionada.

2.2 Bases teóricas

En todo tipo de trabajo de investigación es necesario tener un conocimiento previo acerca de ciertos parámetros y características del objeto de estudio, así como también disponer de información exhaustiva y sistemática que refleje los basamentos con los cuales el investigador se guía. Por esta razón surge la necesidad de contar con un apoyo como es un marco teórico. En el presente capítulo se desarrollan las ideas teóricas que se disponen.

2.2.1 Aleaciones Ferrosas (U.S. Department of Energy, 1993)

Una aleación es una mezcla de dos o más materiales en donde al menos uno es un metal. En las aleaciones se pueden encontrar microestructuras consistentes de soluciones sólidas, donde los átomos son introducidos por sustitución o en los intersticios. Las aleaciones tienen muchas propiedades útiles en ingeniería siendo las aleaciones de hierro casi 90 por ciento de la producción mundial de metales. Cuando son a base de hierro se denominan aleaciones ferrosas y cuando se basan en otros metales se llaman

aleaciones no ferrosas. Las aleaciones de hierro y carbono que contienen desde una cantidad muy pequeña de carbono (casi 0.03 por ciento) hasta 1.2 por ciento de carbono casi, de 0.25 a 1.00 por ciento de manganeso y cantidades menores de otros elementos reciben el nombre de aceros al carbono simples.

Las fases presentes en las aleaciones de hierro y carbono enfriadas muy lentamente a diversas temperaturas y con diferentes composiciones de hierro hasta llegar a 6.67 por ciento de carbono se muestran en el diagrama de fases Fe-Fe₃C. Las fases básicas son: ferrita (α y δ), austenita y cementita.

Ferrita (α). Esta fase es una solución sólida intersticial de carbono en una estructura cristalina BCC. El carbono es sólo ligeramente soluble en ferrita α y alcanza una solubilidad de sólidos máxima de 0.02 por ciento a 723°C. La solubilidad del carbono en ferrita α disminuye a 0.005.

Austenita (γ). La solución sólida intersticial del carbono en hierro y se conoce con el nombre de austenita. La austenita tiene una estructura cristalina FCC y una solubilidad sólida mucho más alta para el carbono que la ferrita α . La solubilidad sólida del carbono en la austenita alcanza un máximo de 2.08 por ciento a 1 148°C y disminuye a 0.8 por ciento a 723°C.

2.2.2 Aceros Inoxidables (Smith et al, 2004)

Los aceros inoxidables se eligen como materiales de ingeniería principalmente por su excelente resistencia a la corrosión en muchos ambientes. La resistencia de los aceros inoxidables a la corrosión se debe a su alto contenido de cromo, siendo necesario por lo menos 12 por ciento de cromo (Cr) en el acero. Aunque para producir el óxido protector, el acero inoxidable tiene que estar expuesto a agentes oxidantes.

En general existen cuatro tipos principales de aceros inoxidables: ferrítico, martensítico, austenítico y endurecido por precipitación. Sin embargo se han creado un tipo de acero más novedoso que posee dos matrices y se han denominado dúplex, es decir son martensíticos – ferríticos y austeníticos – ferríticos. A continuación se describen los principales.

a) Aceros Inoxidables Austeníticos (Smith et al, 2004)

Los aceros inoxidables austeníticos son en esencia aleaciones ternarias de hierro-cromo-níquel que contienen entre 16 y 25 por ciento de Cr y de 7 a 20 por ciento de Ni. Estas aleaciones se llaman austeníticas porque su estructura sigue siendo de ese tipo en todas las temperaturas normales del tratamiento térmico. La presencia del níquel permite que dicha estructura se mantenga a la temperatura ambiente. Tienen alta moldeabilidad. Estos aceros tienen normalmente mayor resistencia a la corrosión que los de tipo ferrítico y martensítico porque los carburos pueden conservarse en solución sólida mediante el enfriamiento rápido a partir de altas temperaturas, sin embargo en ciertas condiciones pueden volverse susceptibles a la corrosión intergranular.

b) Aceros Inoxidables Dúplex (Sandvik C.A., 2009)

Los aceros inoxidables dúplex son una familia de aceros inoxidables con una microestructura de dos fases ferrita-austenita, en cada una de las cuales el contenido de cromo es superior al 13%. Los aceros inoxidables dúplex modernos suelen tener en su microestructura una cantidad de austenita de aproximadamente 45-65% que se observa de manera incrustada como islas en una matriz de 35-55% de ferrita. Estos aceros se caracterizan por interesante combinación de alta resistencia, alta dureza y una excelente resistencia a la corrosión. Se utilizan en muchas aplicaciones marinas y petroquímicas.

SAF 2507 es un acero inoxidable dúplex de alta aleación. Debido a su resistencia a la corrosión es conocido como súper dúplex. Este acero es utilizado principalmente para servicio en condiciones muy corrosivas o cuando se necesita una combinación de resistencia mecánica y resistencia a la corrosión.

2.2.3 Propiedades Mecánicas

a) Módulo de elasticidad (Smith et al, 2004)

En general, los metales y aleaciones muestran una relación lineal entre la tensión aplicada y la deformación producida en la región elástica del diagrama convencional que se describe por la ley de Hooke..

b) Límite Elástico (Smith et al, 2004)

El límite elástico es un valor muy importante para el diseño estructural en ingeniería, pues es el nivel de tensión al que un metal o aleación muestran una deformación plástica significativa.

c) Resistencia a la tracción (Askeland, 1996)

Es la máxima tensión que se alcanza en la curva tensión-deformación. Si la probeta desarrolla un decrecimiento localizado de la sección transversal (comúnmente denominada estricción).

d) Dureza (Kalpakjian et al, 2008)

La dureza es una propiedad común; proporciona una indicación general de la resistencia del material al rayado y al desgaste.

e) Tenacidad (Smith et al, 2004)

La tenacidad es una medida de la cantidad de energía que un material puede absorber antes de fracturarse. Esta propiedad es de importancia en la

ingeniería cuando se considera la capacidad que tiene un material para soportar un impacto sin que se produzca la fractura. Uno de los métodos más simples de medida de la tenacidad es la prueba de impacto.

2.2.4 Ensayos Mecánicos

Los ensayos son pruebas normalizadas que se utilizan para evaluar las propiedades mecánicas de resistencia y ductilidad, y así saber si el material es apto para la aplicación que se requiere. Algunos ensayos mecánicos son.

a) Ensayo de Tracción (Smith et al, 2004)

El ensayo de tracción se utiliza para evaluar la resistencia de metales y aleaciones. En este ensayo, una muestra de metal se estira a velocidad constante hasta la fractura, que se produce en un tiempo relativamente corto. La fuerza que actúa sobre la muestra se dibuja en el registrador mientras que la deformación es generada por un extensómetro. También en estos ensayos se pueden obtener valores de carga y alargamiento por lo que requeriría la conversión.

Los ensayos de tracción proporcionan información sobre la fuerza y la ductilidad de los materiales sometidos a tensiones de tracción uniaxial. Esta información puede ser útil en las comparaciones de los materiales, de desarrollo de aleaciones, control de calidad y el diseño en determinadas circunstancias. También, los resultados de las pruebas de tensión de las muestras maquinadas a dimensiones normalizadas de las porciones seleccionadas de una parte o material pueden no representar totalmente la resistencia y ductilidad del producto final o de su totalidad en el comportamiento en servicio diferentes ambientes. Estos métodos de ensayo se consideran satisfactorios para pruebas de aceptación de envíos comerciales. Los métodos de ensayo han sido ampliamente utilizados en el comercio para este fin (ASTM E8 M - 04).

b) Ensayo de Impacto (Kalpakjian et al, 2008)

En muchas operaciones de manufactura, así como durante la vida útil de los componentes, los materiales se someten a impacto o carga dinámica, por ejemplo, en operaciones de trabajo de metales de alta velocidad, como cabeceado para la fabricación de pernos y el forjado por golpe. Una prueba de impacto típica consiste en colocar un espécimen con una muesca en una máquina de impacto y romperlo con un péndulo oscilante.

En el ensayo de Charpy, el espécimen se soporta en ambos extremos, en el ensayo Izod, se soporta en un extremo como una viga en voladizo. La energía disipada al romper el espécimen se puede obtener a partir de la cantidad de oscilación del péndulo; esta energía es la tenacidad al impacto del material. A diferencia de las conversiones de los ensayos de dureza, aún no es posible establecer relaciones cuantitativas entre los ensayos Charpy e Izod.

Las pruebas de impacto son útiles particularmente para determinar la *temperatura de transición* dúctil-frágil de los materiales. En general, los materiales con una alta resistencia al impacto también tienen resistencia y ductilidades altas, y por lo tanto, alta tenacidad. La sensibilidad a los defectos superficiales (sensibilidad a las muescas) es importante, ya que disminuye de modo significativo la tenacidad al impacto, sobre todo en los metales tratados térmicamente y en las cerámicas y los vidrios.

c) Ensayo de Dureza (Smith et al, 2004)

La dureza de un metal se mide forzando la indentación de un penetrador en la superficie del metal. El penetrador, que normalmente es una bola, pirámide o cono, está fabricado con un material mucho más duro que el material a ensayar. Por ejemplo, el material empleado en estos penetradores suele ser acero templado, carburo de tungsteno o diamante. En la mayoría de los ensayos de dureza normalizados se aplica lentamente una carga

conocida, que presiona el penetrador contra la superficie del metal a ensayar y perpendicularmente a ésta. Después de producir la indentación, se retira el penetrador. Se calcula o se lee en un dial un número empírico de dureza basado en el área del corte transversal de la huella producida o en su profundidad.

2.2.5 Temperatura de Transición Dúctil-Frágil (Smith et al, 2004)

Como se mencionó anteriormente, en determinadas condiciones se observa un cambio marcado en la resistencia a la fractura de algunos metales que están en uso, esto es, la transición de dúctil a frágil. Las bajas temperaturas, la aplicación de un gran esfuerzo y velocidades de carga rápida pueden causar que un material dúctil se comporte de manera frágil; sin embargo, usualmente, la temperatura se selecciona como la variable que representa esta transición mientras que la velocidad de carga y la velocidad de aplicación del esfuerzo se mantienen constantes. El aparato de la prueba de impacto mencionado en la sección anterior puede emplearse para determinar el intervalo de temperatura para la transición en los materiales de su comportamiento dúctil a frágil.

La temperatura de la probeta de Charpy puede fijarse empleando unidades para horno y para refrigeración. Aunque algunos metales muestran una temperatura dúctil-frágil (TDF) diferente, para muchos, esta transición ocurre a lo largo de un intervalo de temperaturas.

La transición de dúctil a frágil es un importante elemento a tomar en cuenta en la selección de materiales para componentes que funcionan en ambientes fríos. Por ejemplo, los barcos que navegan en aguas frías y las plataformas mar adentro que se localizan en los mares árticos, las cuales son en especial susceptibles a la TDF. Para tales aplicaciones, los materiales seleccionados deberían tener una temperatura de TDF que sea considerablemente menor que la temperatura de operación o de servicio.

2.2.6 Tratamientos Térmicos (Smith et al, 2004)

Cuando se tiene un acero y este es sometido a un proceso de calentamiento o enfriamiento bajo condiciones específicas estamos en presencia de un tratamiento térmico. Éstos son utilizados para obtener distintas combinaciones de propiedades de los aceros resultantes. Existen muchos tratamientos térmicos que se pueden aplicar a los aceros y algunos de ellos se describen a continuación.

a) Recocido y Normalizado

En el recocido completo, los aceros se calientan y se les mantiene el tiempo necesario a la temperatura alta y después se enfrían lentamente hasta alcanzar la temperatura ambiente, todo esto se efectúa usualmente en el horno en el que fueron calentados. El recocido de proceso, al que a menudo se hace referencia como un relajamiento de esfuerzos interiores, ablanda parcialmente los aceros bajos en carbono trabajados en frío, porque relaja los esfuerzos internos provocados por el trabajo en frío. Por otro lado la normalización es un tratamiento calórico en el que el acero se calienta y después se enfría en aire en reposo. Los propósitos de la normalización varían y algunos de ellos son: refinar la estructura del grano, incrementar la solidez del acero (en comparación con el acero recocido), y reducir la segregación de los componentes en operaciones de fundición o forjado, y conseguir así una estructura más uniforme.

2.2.7 Corrosión (Kalpakjian et al, 2008)

Todos los metales, cerámicos y plásticos están sujetos a formas de corrosión. La propia palabra corrosión se refiere usualmente al deterioro de los metales y los cerámicos, en tanto que fenómenos similares en los plásticos suelen denominarse degradación. La corrosión no sólo lleva al deterioro de la superficie de los componentes y estructuras (puentes y

embarcaciones), sino que también reduce su resistencia e integridad estructural.

2.2.8 Resistencia a la corrosión (Kalpakjian et al, 2008)

La resistencia a la corrosión es un aspecto importante en la selección de materiales para las industrias química, alimentaria y del petróleo, así como en las operaciones de manufactura. Además de las posibles reacciones químicas de los elementos y compuestos presentes, causan inquietud la oxidación del medio ambiente y la corrosión de los componentes de las estructuras, sobre todo a temperaturas elevadas, y en automóviles y otros vehículos de transporte.

La resistencia a la corrosión depende de la composición del material y del medio ambiente en particular. Los medios corrosivos pueden ser productos químicos (ácidos, álcalis y sales), el entorno (oxígeno, humedad, contaminación y lluvia ácida) y el agua dulce o salada). En general, los metales no ferrosos, los aceros inoxidable y los materiales no metálicos tienen una alta resistencia a la corrosión, en tanto que los aceros y los hierros fundidos suelen tener una resistencia pobre y deben protegerse mediante diversos recubrimientos y tratamientos superficiales.

La corrosión puede ocurrir en toda una superficie o ser *localizada*: lo que se llama picadura. (La picadura es un término que también se aplica al desgaste por fatiga o a la falla de los engranes o en el forjado). La corrosión también puede ocurrir a lo largo de los límites de grano de los metales, como la corrosión íntergranular, y en la interfaz de uniones atornilladas o remachadas como la corrosión por grietas o fisuras.

Dos metales diferentes pueden formar una celda galvánica (llamada así en honor de L. Galvani, 1737-1798) —esto es, dos electrodos en un electrolito, dentro de un ambiente corrosivo, incluyendo humedad—, y

provocar corrosión galvánica. Las aleaciones de dos fases son más susceptibles a la corrosión galvánica (debido a la separación física de los dos metales involucrados) que las aleaciones de una sola fase o los metales puros; el resultado es que el tratamiento térmico puede tener una influencia significativa en la resistencia a la corrosión.

No sólo las reacciones químicas deben considerarse productoras de efectos adversos. Los procesos de maquinado avanzado, como el maquinado químico y electroquímico, se basan de hecho en reacciones controladas. Estos procesos pueden retirar material mediante la acción química, de manera semejante al ataque químico de muestras metalúrgicas. La utilidad de cierto nivel de oxidación se muestra en la resistencia a la corrosión del aluminio, el titanio y el acero inoxidable. El aluminio desarrolla una película de óxido duro de aluminio (Al_2O_3) delgada (a veces de unas cuantas capas atómicas), fuerte y adherente, que protege mejor la superficie de la corrosión ambiental. El titanio desarrolla una película de óxido de titanio (TiO_2). Un fenómeno similar ocurre en los aceros inoxidables, los cuales (debido al cromo presente en la aleación) desarrollan una película protectora sobre su superficie. A estos procesos se les conoce como pasivación. Cuando se raya la película protectora y se expone la superficie que se encuentra debajo, comienza a formarse una nueva película de óxido.

2.2.9 Corrosión Intergranular (ASM International, 2003)

La corrosión intergranular (CIG) es el ataque preferencial de cualquiera de los límites de grano o áreas inmediatamente adyacentes a estos en un material expuesto a un ambiente corrosivo, pero con poca corrosión de los granos por sí mismos. La corrosión intergranular es también conocida como ataque intergranular (AIG). Ataque de fin de grano, caída de grano, y "edulcoración" son términos que se utilizan a veces para describir la CIG. En algunos materiales, la corrosión avanza lateralmente a lo largo de planos

paralelos a las superficies de laminado, conocida como exfoliación, y generalmente se produce a lo largo de los límites de grano, de ahí, por lo tanto corrosión intergranular. Un aspecto de capas es una manifestación común de la exfoliación (también conocida como capa de corrosión), como resultado de la intromisión de productos voluminosos de corrosión que hacen abrir el material, por ejemplo, en aleaciones de aluminio.

La mayoría de las aleaciones son susceptibles a la IGA cuando son expuestos a entornos específicos, esto se debe a que los límites de grano son ideales para la precipitación y la segregación, que los hacen química y físicamente diferentes de los granos como tal. El ataque intergranular se define como la disolución selectiva de los límites de grano o de regiones cercanas sin ataque apreciable de los mismos granos, esto se debe a diferencias de potencial entre las regiones de frontera de grano y cualquier precipitado, fase intermetálica o impurezas existentes. El mecanismo real y el grado de ataque son diferentes para cada sistema de aleación.

Precipitados que se forman como resultado de la exposición de los metales a temperaturas elevadas (por ejemplo, durante producción, fabricación, tratamiento térmico, y soldadura) a menudo se nuclean y crecen preferentemente en los límites de grano. Si estos precipitados son ricos en elementos de la aleación que son esenciales para la resistencia a la corrosión, las regiones adyacentes al límite de grano sufren déficit de estos elementos. El metal es, pues, sensibilizado y es susceptible a AIG en uno o más ambientes corrosivos específicos. Por ejemplo, en los aceros inoxidables austeníticos como el tipo 304, el ataque intergranular a menudo se asocia específicamente con la precipitación de carburos ricos en cromo (Cr_{23}C_6) en los límites de grano en la zona afectada por el calor. La precipitación de dichos carburos se suele denominar sensibilización. Cuando se forman precipitados ricos en cromo, las áreas circundantes se agotan en cromo. En consecuencia, las áreas deficientes son más susceptibles a la corrosión en

entornos específicos que las regiones externas de los límites de grano. Otro ejemplo de la segregación del límite de grano es la formación de fase sigma, que da lugar a un componente rico en Cr-Mo dentro de los límites de grano en y aleaciones que contienen ambos elementos. La fase sigma generalmente es más difícil de visualizar en la microestructura que los carburos de Cromo.

Las impurezas que segregan en los límites de grano puede promover la acción galvánica en un ambiente corrosivo por servir ya sea como sitios ánodo o cátodo. Por ejemplo, en la serie 2000, las aleaciones de aluminio, la banda cobre-deficiente (anódica) en ambos lados de la frontera de grano se disuelve mientras que el límite de grano es catódico debido a los precipitados CuAl_2 . Por el contrario, en la serie 5000 las aleaciones de aluminio, los precipitados intermetálicos como Mg_2Al_3 (anódicos) son atacados cuando forman una fase continua en el límite de grano. Durante la exposición a soluciones de cloruro, la pareja galvánica formada entre estos precipitados y la matriz de la aleación puede conducir a un ataque intergranular grave. La susceptibilidad real al ataque intergranular y el grado de corrosión dependen del ambiente corrosivo y en la extensión de la precipitación intergranular, que es función de la composición de la aleación, la fabricación, y los parámetros de tratamiento térmico.

Los aceros inoxidables austeníticos y ferríticos, así como la mayoría de las aleaciones de base níquel, se suministran generalmente tratados térmicamente de manera tal que éstos se encuentren libres de precipitados de carburos que son perjudiciales para la resistencia a la corrosión. Sin embargo, estas aleaciones son susceptibles a la sensibilización proveniente de soldaduras, tratamientos térmicos inadecuados, y servicio en el rango de la temperatura de sensibilización. Las pruebas de corrosión para evaluar la susceptibilidad de una aleación de AIG son generalmente clasificadas como; simulación de servicio o ensayos acelerados. Las pruebas de laboratorio originales para detectar AIG fueron exposiciones simuladas de servicio, estas

fueron utilizadas por primera vez en 1926, cuando fue detectada AIG en un acero inoxidable austenítico en un ácido de sulfato de cobre y ácido sulfúrico ($\text{CuSO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$). Con los años, ensayos acelerados específicos se han desarrollado y estandarizado para la evaluación de la susceptibilidad de varias aleaciones de IGA. Por ejemplo, la norma ASTM A 262 contiene seis prácticas para la detección de la susceptibilidad a la CIG en los aceros inoxidables austeníticos

2.2.10 Corrosión por Picaduras (ASM International, 2003)

Muchas aleaciones de ingeniería tales como son; los aceros inoxidables y las aleaciones de aluminio, son útiles por películas pasivas, que son delgadas (a escala nanométrica) capas de óxido que se forman naturalmente en la superficie del metal y logran en gran medida reducir la tasa de corrosión de las aleaciones. Estas películas pasivas, sin embargo, a menudo son susceptibles a la ruptura localizada, dando lugar a la disolución acelerada del metal subyacente. Si el ataque se inicia en una superficie abierta se denomina corrosión por picadura, en un sitio interno se llama corrosión por grietas. Estas formas de corrosión localizada estrechamente relacionadas pueden conducir a insuficiencia acelerada de los componentes estructurales por perforación o al actuar como un sitio de iniciación de grietas.

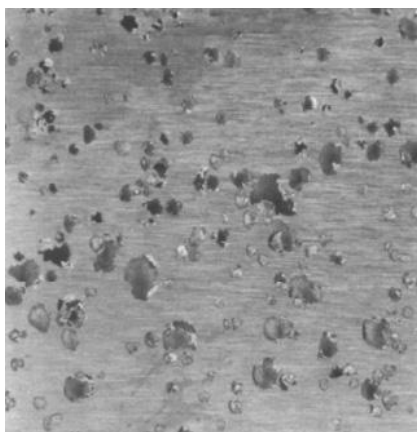


Figura 2.1 Corrosión por Picadura

Cabe señalar que, mientras que la disolución localizada en el desglose de una otra manera de la protección de la película pasiva, es el tipo más frecuente e importante de corrosión por picadura en la tecnología, agujeros u hoyos se pueden formar en virtud de otras condiciones también. Por ejemplo, las picaduras pueden ocurrir durante la disolución activa si determinadas regiones de la muestra son más susceptibles y se disuelven más rápido que el resto de la superficie, esta sección se concentra en los más conocidos y ampliamente estudiado fenómeno de la corrosión por picadura de metales pasivos.

La corrosión por picadura se ve influida por múltiples y variados parámetros, incluyendo; el medio ambiente, la composición del metal, temperatura potencial, y estado de la superficie. Los parámetros más importantes del medio ambiente incluyen, la concentración iónica agresiva, el pH y la concentración de inhibidor. Entre otros aspectos fenomenológicos de corrosión se pueden mencionar; la naturaleza estocástica de los procesos y las etapas de ataque localizado, incluyendo la ruptura de la película pasiva, el ataque metaestable, el crecimiento estable, y tal vez una eventual detención.

2.2.11 Compuestos Intermetálicos de Aceros Dúplex (Rodríguez et al, 2003)

La composición química de los aceros inoxidables dúplex condiciona qué tipo de procesos de envejecimiento pueden sufrir cuando se les aplica un tratamiento térmico, ya que la microestructura del material viene determinada por su composición química. Los procesos de envejecimiento generalmente conllevan un endurecimiento y una fragilización del material en un amplio intervalo de temperaturas y tiempos de exposición, por la precipitación de una serie de fases minoritarias y la formación de intermetálicos, en las intercaras mayoritariamente.

A continuación se describen con detalle las fases más importantes.

Fase Sigma (σ). Es la fase secundaria más importante debido a su elevada proporción respecto al resto de las fases secundarias que pueden formarse y, de ahí, su eventual influencia en las propiedades del material. Aparece como consecuencia de la permanencia más o menos prolongada a temperaturas que van desde unos 725 K hasta los 1250 K. Su composición general es FeM, donde M podría ser alguno de los aleantes del acero como cromo, molibdeno, níquel, manganeso o cobre. Molibdeno y, en menor grado, cromo, silicio y níquel, presentes en la ferrita, actúan como promotores de esta fase. Se ha comprobado que, entre 925 y 1245 K, la temperatura de generación de esta fase no afecta a su composición química. La nucleación de la fase sigma está especialmente favorecida en aquellas zonas donde ha tenido lugar la transformación de fase delta hasta gamma, que siempre va acompañada de la migración de los elementos aleantes de la matriz enriqueciéndose las interfases en elementos promotores de la fase σ . Estos puntos de posible nucleación son los carburos $M_{23}C_6$, presentes en los límites de grano α/γ de alta energía, y las intercara δ/γ , que favorece la formación de σ debido a la microestructura cristalina que presentan.

Fase Chi (χ). Aunque menos conocida que la fase σ , la fase intermetálica Chi precipita en determinados aceros inoxidable dúplex (6) cuando son sometidos a tratamientos térmicos de 6 a 10 horas, entre 975-1175 K. Su nucleación frecuentemente tiene lugar en la interfase ferrita / austenita (7) y crece en la matriz delta. La fase χ , como la σ , es frágil y quebradiza, por lo que, su presencia es indeseable. El efecto que provoca esta fase sobre las propiedades del material es difícil de cuantificar, debido a que suele coexistir con la fase σ y su proporción respecto a ésta es muy baja.

Carburo tipo M7C3. Este tipo de precipitado suele observarse sobre todo en dúplex con alto contenido en carbono, por ello este precipitado tiene menor importancia en los aceros inoxidable dúplex actuales, debido al relativo menor contenido en carbono que suelen presentar. Habitualmente

precipitan en la interfase α/γ , entre (8) 1225 y 1325 K. Esta fase no tiene porque afectar a las propiedades mecánicas del material, si tiene lugar de una forma dispersa y poco abundante.

Carburo tipo $M_{23}C_6$. Precipita en el entorno de 1000 a 1200 K, aproximadamente. Su precipitación es muy rápida, requiriendo menos de un minuto para formarse a 1075 K. Se sitúa predominantemente en los límites de grano y en menor proporción dentro de los granos de ferrita o austenita. Estos precipitados son considerados por algunos autores como puntos de nucleación de σ (7).

Nitruros de cromo Cr_2N y CrN . El aumento del uso de nitrógeno como elemento aleante, ha permitido detectar la precipitación de nitruros de cromo del tipo Cr_2N en el intervalo de temperaturas de 975- 1175 K en los aceros inoxidables dúplex. El nitrógeno está implicado en la formación de diferentes fases secundarias, ya que, al aumentar la temperatura, incrementa la solubilidad de éste en la ferrita, y al disminuir rápidamente la temperatura esta ferrita queda sobresaturada de nitrógeno, lo que provoca la precipitación (9) intergranular de Cr_2N .

Austenita secundaria, γ_2 . Su formación tiene lugar mediante la descomposición de la ferrita inicial en austenita. A través de este procedimiento de transformación llega a disminuir hasta un 70 % el contenido de ferrita inicial. La fase γ_2 puede formarse con relativa facilidad al aplicarle al material diferentes tratamientos térmicos ya que los mecanismos de formación pueden ser muy diversos, el intervalo de temperaturas en que suele aparecer esta fase es de 925 K a 1175 K. Se diferencian hasta tres mecanismos (10) a través de los cuales puede precipitar la austenita a partir de la ferrita delta.

Fase alfa prima (α'). Esta fase aparece entre 575-800 K. Su formación está asociada a la aparición previa de Cr_2N . La descomposición a baja temperatura de la ferrita de un acero inoxidable dúplex da como resultado su

transformación en una fase rica en cromo y demás elementos aleantes presentes en el material, denominada alfa prima (α') y otra fase α enriquecida en hierro.

CAPÍTULO 3

Marco Metodológico

En el apartado próximo se definen las técnicas y métodos necesarios para ejecutar la investigación y cumplir con los objetivos fijados previamente, dichas técnicas son establecidas dependiendo del tipo de investigación que se realiza. El método científico guía esta selección, en fin de aclarar y generar fácilmente respuestas a la situación problemática que se presenta, además de ello permite organizar y definir las etapas a cumplir a lo largo de la investigación así como proporciona un vasto conocimiento sobre el tema de estudio.

3.1 Nivel de la investigación

Los niveles de estudio que se aplican a la investigación se refieren al grado de profundidad con el cual se aborda un fenómeno u objeto de estudio, para el desarrollo, conclusión y recomendaciones de la situación planteada son toma una investigación de tipo explicativa, en la cual se concentra en indagar acerca de los motivos de la sucesión del fenómeno a tratar y como se conectan sus características o factores. La razón principal de esta trata de “encontrar las relaciones de causa y efecto que se dan entre los hechos a objeto de conocerlos con mayor profundidad” (Córdova, 2007).

En lo referido al estudio experimental se quiere especificar las propiedades y características del conjunto que es sometido a los diferentes análisis planteados, para así describir las situaciones, eventos y hechos que se puedan presentar, posteriormente establecer cómo es y cuál es el comportamiento de dicho conjunto y establecer su causa. Además se realiza un enfoque de estudio correlacionado, que permite establecer relaciones entre dos o más variables referidas al mismo conjunto.

3.2 Diseño de la investigación

Las estrategias que se emplean para proporcionar respuestas referidas a las interrogantes de la situación planteada son la investigación documental y la experimental. La primera incluye consultas bibliográficas, información en páginas Web y trabajos de investigación previamente realizados con relación pertinente. A su vez, la investigación experimental se refiere a los ensayos a realizar simulando el fenómeno que se desea observar, para así concluir acerca de la medición de las variables en estudio.

3.3 Población y Muestra

La población para la cual son válidas las conclusiones referentes al presente trabajo de investigación está constituida por muestras o probetas fabricadas con acero inoxidable dúplex SAF 2507. Se dispone veintitrés (23) probetas para el estudio de tres condiciones diferentes.

3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Los diversos métodos referentes a la recolección de datos dependen en mayor medida del tipo de investigación a desarrollar, gran parte de la

información aportada por diversos medios es tanto numérica, como visual por lo que se aplican las normas apropiadas para cada contenido. En el caso particular de la investigación presente, la adquisición o pesquisas de información se llevan a cabo por medio de técnicas o procedimientos variados como lo es la observación directa y data de los ensayos impacto (Charpy) y ensayo de tracción, análisis documental de los resultados obtenidos en evaluación de la microscopia óptica y electrónica, espectroscopia por difracción de energía de rayos X y dureza Vickers.

Esta información es recopilada en gráficos, tablas, fotografías y formatos preestablecidos según la norma ASTM G1 para los parámetros de corrosión y las normas ASTM E8, ASTM E23, ASTM E92 para los demás ensayos.

Relativo a los instrumentos a utilizar para la recolección de datos, se cuenta con; máquinas diversas en donde se realizan los ensayos de corrosión y los ensayos de propiedades mecánicas, en ellas se puede conseguir o no la presencia de recolectores de data electrónicos dependiendo de la prueba correspondiente, se dispone de tablas de recolección de datos, equipos audiovisuales, medidores de diversa índole, entre otros. Dichas técnicas e instrumentos serán detalladas en apartados posteriores.

3.5 Técnica de procesamiento de datos

Al obtener de manera precisa y total los datos necesarios adecuados a las necesidades del proyecto de investigación, estos serán ordenados, y concretados en tablas, gráficos e imágenes donde se indica su proveniencia, función, y otros datos importantes individuales de cada resultado, en fin de facilitar su procesamiento.

El procesamiento y análisis de estos viene establecido de acuerdo a las normas ya mencionadas referidas a cada ensayo o prueba realizada ASTM A262-02a para las pruebas de corrosión, ASTM E23, ASTM E8 y ASTM E92 para las pruebas que traten sobre características de resistencia mecánica. Dichas normas recomiendan parámetros y guías; tanto matemáticas que incluyen cálculos y cómputos, como prácticas que tratan sobre la comparación de imágenes, entre otros, todo ello en fin de alcanzar resultados finales genéricos que puedan ser comparados con otros ensayos similares y sirvan para el estudio y comparación de los datos obtenidos

3.6 Etapas de la metodología

En la figura mostrada a continuación se esquematizan los pasos necesarios para llevar a cabo el proceso de investigación.

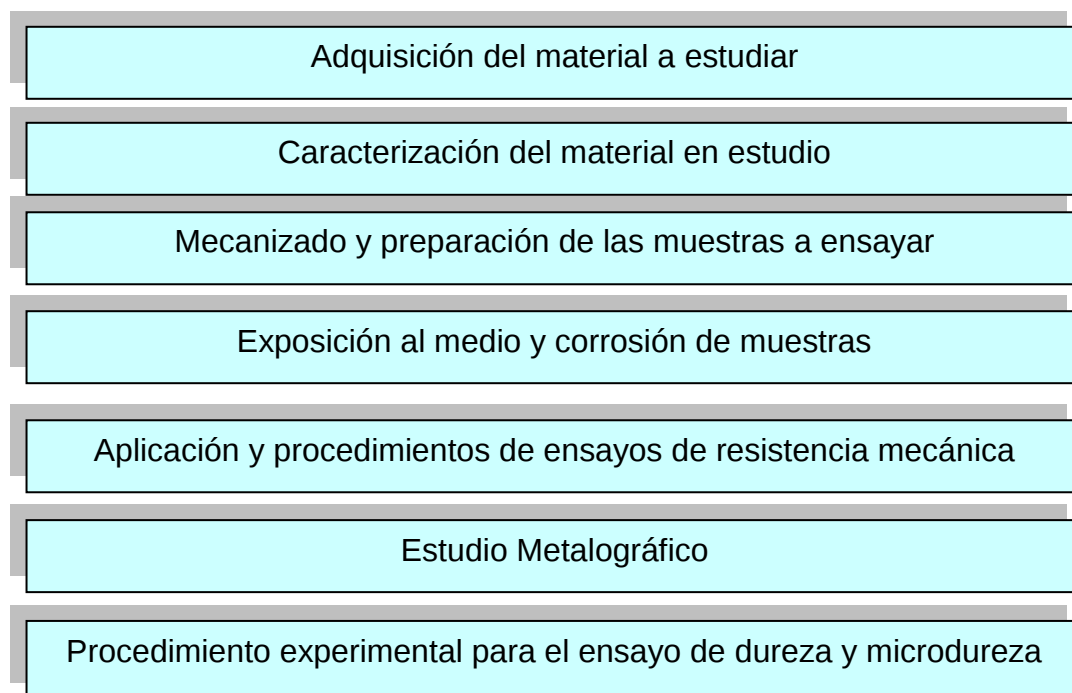


Figura 3.1 Etapas de la metodología.

3.6.1 Adquisición del material a estudiar

El acero dúplex 2507 fue otorgado por la empresa SANDVIK de Venezuela, Sanven Steel C.A. de Venezuela, y presenta las siguientes dimensiones: una (1) barra cilíndrica de diámetro 30 mm y longitud de 1 m. El material fue entregado con la cédula y certificación correspondientes.

3.6.2 Caracterización del material en estudio

La caracterización del material se refiere al conocimiento exhaustivo de sus propiedades, yendo desde lo más elemental; como es su composición hasta variables más complejas tal como es su comportamiento bajo condiciones de esfuerzo, tratamientos térmicos y corrosión. Las características o propiedades esenciales del material se encuentran dentro de un compendio de catálogos avalados por el fabricante SANDVIK de Venezuela, Sanven Steel C.A. Con estas características básicas se realizaron las comparaciones y se tomaron como referencia para analizar los resultados de los diversos experimentos llevados a cabo. Adicionalmente se realizaron algunas pruebas para lograr una completa caracterización sin dar margen a errores; tales como visualización de la microestructura y los ensayos posibles para la cantidad de material disponible.

a) Composición del material utilizado

El inoxidable dúplex SAF 2507 suministrado por la empresa, viene certificado por el fabricante con una composición química que se muestra en la tabla siguiente.

Tabla 3.1 Composición química acero inoxidable dúplex SAF 2507 (% Peso)

Nombre Comercial	Standard UNS	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Cu (%)
SAF 2507	S32750	0.014	0.33	0.77	0.017	0.0006	25.15	6.96	3.91	0.11

Igualmente en los anexos se puede observar el certificado de origen del material.

3.6.3 Mecanizado y preparación de las muestras a ensayar

A propósito de realizar los estudios convenientes fue necesario modificar la forma del material inicial proporcionado, se precisó fabricar probetas para ensayos con las cuales se pudieron aplicar los experimentos adecuados, para ello se delegó el mecanizado a la empresa Cincatesa C.A.

El material fue mecanizado mediante cizallas a causa de sus fuertes propiedades, otros procesos como corte por chorro o electroerosión por hilo no son adecuados para la forma inicial cilíndrica.

Para la barra cilíndrica con dimensiones de 1 m de largo y 30 mm de diámetro se propuso una disposición de corte en la cual el material se aprovecha al máximo sin obtener mayor desperdicio, consiguiendo un total de quince (15) probetas para ensayo de impacto Charpy y ocho (8) probetas para ensayo de tracción; en suma se obtuvieron veintitrés (23) muestras.

Para las observaciones que se realizaron en la microscopia fueron empleadas las muestras de tracción e impacto debido a la cantidad disponible de acero Dúplex, igualmente los ensayos de dureza fueron aplicados a muestras ya fracturadas de los experimentos anteriores.

Se debe tener en cuenta que las probetas de tracción e impacto son de tipo subsize por la razón mencionada en el apartado anterior. La forma y dimensiones de las probetas serán posteriormente especificadas mediante gráficos, estas medidas vienen designadas según las normas de tracción e impacto correspondientes. Las muestras a ensayar deben presentar las dimensiones sugeridas por norma de tracción (ASTM E8) e impacto (ASTM E23), deben ser preparadas como se señala a continuación.

Para las de tracción se tiene:

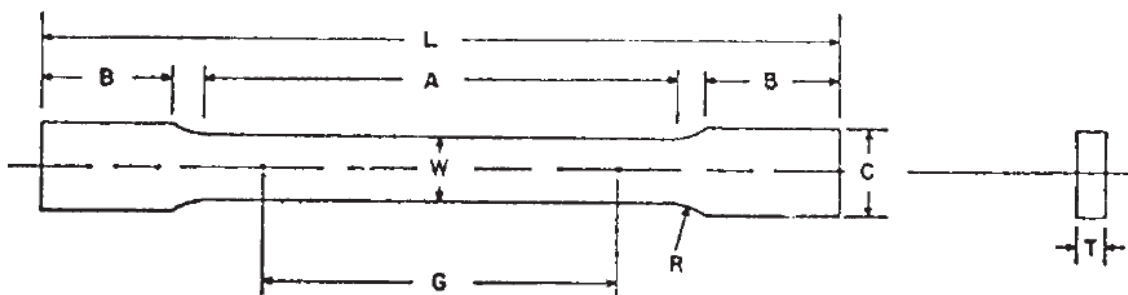


Figura 3.2 Probeta del ensayo de tracción.

De donde:

G = Distancia entre las marcas = 25.0 ± 0.1 mm

W = Ancho de la zona reducida = 6.0 ± 0.1 mm

T = Espesor de la probeta = 6 mm

R = Radio del filete = 6 mm

L = Longitud total de la probeta = 100 mm

A = Longitud de la zona reducida = 32 mm

B = Longitud de la zona de agarre = 30 mm

C = Ancho de la zona de agarre = 10 mm

Para las de impacto se tiene:

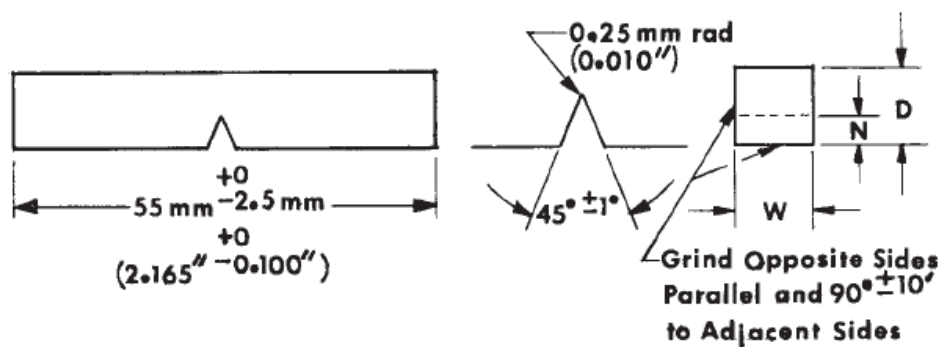


Figura 3.3 Probeta del ensayo de impacto (Charpy).

De donde:

D = Espesor de la probeta = 10 mm

W = Ancho de la probeta = 7.5 mm

N = Altura del entalle en "V" = 2 mm

El periodo de fabricación de las probetas fue de alrededor un mes. Una vez entregadas las probetas se dispone a realizar el plan a fin de aplicar las exposiciones y ensayos correspondientes. En primer lugar, es conveniente examinar las muestras para verificar las dimensiones establecidas ya que, si las medidas están fuera de las tolerancias propuestas, los resultados que proveerá la muestra imperfecta no estarán estandarizados o no coincidirán con otros datos. Igualmente se debe comprobar el acabado superficial que presentan las muestras, para evitar un trabajo forzoso de lijado que podría modificar las propiedades de las probetas. El resultado final del mecanizado se muestra en la Figura 3.4.



Figura 3.4 Probeta de ensayo de Tracción (Izquierda), Probeta de ensayo Charpy Derecha)

En fin de ejecutar los ensayos de manera organizada y evitar confusiones debido a la gran cantidad de probetas se aplica una nomenclatura para identificar cada muestra según su tipo de ensayo y condición de corrosión. La identificación de las probetas se esquematiza en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Nomenclatura de las muestras.

<i>Especificación del Ensayo de Corrosión</i>	<i>Identificación o Nomenclatura</i>	<i>Especificación del Ensayo de Mecánico</i>	<i>Identificación o Nomenclatura</i>
Ácido Oxálico a 6V *	A	Ensayo de Impacto Charpy	1
			2
			3
			4
		Ensayo de Tracción	5
			6
Ácido Oxálico a 8V **	B	Ensayo de Impacto Charpy	1
			2
			3
			4
			5
		Ensayo de Tracción	6
			7
			8
Ácido Oxálico a 10V ***	C	Ensayo de Impacto Charpy	1
			2
			3
			4
			5
		Ensayo de Tracción	6
			7
			8

* Probetas sometidas a una diferencia de potencial de 6 Voltios.

** Probetas sometidas a una diferencia de potencial de 8 Voltios.

*** Probetas sometidas a una diferencia de potencial de 10 Voltios.

3.6.4 Exposición al medio y Corrosión de Muestras

En los párrafos siguientes se explica detalladamente las instrucciones, pasos y elementos necesarios para llevar a cabo el proceso de exposición al químico, que provocara en las muestras un proceso de corrosión.

Como es sabido la exposición se realizará por medio de ácido oxálico, éste es un ácido orgánico relativamente fuerte, se aplica una diferencia de potencial para acelerar los procesos de corrosión en las superficies de las muestras en vez de exponer durante un tiempo prolongado sin ayuda del paso de corriente.

3.6.4.1 Selección del ensayo para preparar el ataque corrosivo

De manera recurrente se ha mencionado que la metodología a aplicar para simular la corrosión del material estudiado es determinada por la norma ASTM correspondiente, sin embargo debido a la novedad que tiene este acero en cuanto su aplicación más extensa, no existe aún una norma que se aplique específicamente a este tipo de material, por tanto fue necesario encontrar una norma aplicada a aceros con una composición similar o con aleantes parecidos. Allí es donde entra la norma ASTM A262-02^a.

De forma más concreta se puede mencionar que; en la norma existen prácticas designadas por letras desde la letra A hasta la F (con excepción de la D), donde la práctica de apertura o practica A es aquella concerniente al ataque corrosivo intergranular con ácido oxálico, en ella se determinan todas las características necesarias para efectuar el proceso. El ensayo se aplicó dentro de un recinto tal como lo menciona la norma ASTM, no fue necesario construir un recipiente nuevo ya que dentro del laboratorio se contaba con uno de suficiente capacidad como para albergar los componentes precisos para llevar a cabo la exposición al ácido

3.6.4.2 Obtención de los reactivos químicos

El reactivo aplicado para la realización de la exposición al químico fue ácido oxálico. El ácido oxálico se encuentra en su forma sólida a manera de cristales los cuales están disponibles en el Laboratorio de Materiales y procesos de fabricación.

a) Materiales y equipos a utilizar

El equipo principal a utilizar está constituido por un ensamblaje de accesorios, es denominado celda de ataque electrolítico o *Etcher* de marca *ElectroMet*® 4, ubicado dentro del Laboratorio de Materiales. Entre los componentes del mismo se encuentra el recinto necesario para contener las muestras durante la exposición por lo que no será necesario construir un envase adicional como se planteaba anteriormente. Se puede observar en la figura 3.4, los componentes más importantes se listan seguidamente.



Figura 3.5 Equipo de Ataque Electrolítico, Fuente de poder (Izquierda) y Celda de Ataque (Derecha)

- *Fuente de corriente directa: (ElectroMet ® 4 Power Source)* Funciona como una batería, un generador o cualquier elemento capaz de proveer alrededor de un voltaje de 15 V y una intensidad de corriente de 20 A.
- *Electrodos de la celda de ensayo: (ElectroMet ® 4 Etching Cell)* La pieza que se ensaya es el ánodo y la pieza que la sostiene comporta como cátodo.
- *Resistencia variable:* Necesaria en el desarrollo del proceso. (Esta forma parte de los elementos principales)
- *Cátodo:* Es una pieza cilíndrica de acero inoxidable que se utiliza en el ataque.
- *Pinza eléctricamente conductora:* Utilizada para sostener la pieza que será atacada mediante el ácido.

Dentro del desarrollo de la exposición y sensibilización se utilizan otros elementos de igual importancia, ellos son listados a continuación.

- *Campana:* Ubicada en el Laboratorio de Materiales, permite el escape de gases tóxicos que se puedan generar durante el proceso de corrosión o limpieza.
- *Microscopio metalúrgico:* Se utiliza para la final observación de microestructura del material, debe tener al menos un rango de 0 – 1000X. Marca Union.
- *Amperímetro Portátil:* Utilizado para realizar la medición de la intensidad de corriente en el proceso. Debe tener un rango aproximado de al menos 0 – 30 A
- *Electrolito:* El electrolito seleccionado para la exposición al medio, es ácido oxálico a 10% de concentración.
- *Horno Metalúrgico:* Es un horno eléctrico con el cual se aplican diversos tratamientos térmicos a metales y otros elementos. Marca Thermolyne.

- *Balanza Electrónica:* Artefacto utilizado para medir peso de muestras pequeñas de manera precisa. Marca *Denver Instrument*.



Figura 3.6 Campana para escape de Gases (Izquierda) y Microscopio Metalúrgico (Derecha)



Figura 3.7 Solución de Acido Oxálico (Izquierda) y Amperímetro Portátil (Derecha)



Figura 3.8 Horno para Tratamientos Térmicos (Derecha) y Balanza Electrónica (Izquierda)

b) Procedimiento experimental

1. Sensibilización de las probetas: En primer lugar se debe aplicar un normalizado, o sensibilización indicado por la norma ASTM donde se busca generar en la probeta condiciones críticas debido a la precipitación de carbono en la composición interna del acero, haciéndolo más susceptible a ataques químicos y a la formación de carburos.

El tratamiento térmico de las muestras se realiza por medio un horno eléctrico especializado, según la norma ASTM A262-02a es viable aplicar una sensibilización a una temperatura entre 650 a 675 °C durante un periodo de una (1) hora. La configuración anterior se aconseja para aceros inoxidable que tienen un nivel mínimo de carbono y grados estabilizados, sin embargo la norma no establece parámetros para aceros de tipo dúplex, observando la

gráfica TTT de algunos aceros dúplex se denota que la mayor concentración de carbono, producida en la fase sigma (σ), se origina aproximadamente a los 700 °C.

Las instrucciones necesarias para aplicar la sensibilización a las muestras se lista a continuación:

- Se posicionan las muestras dentro del horno, y se verifica que no existe demasiada proximidad entre las mismas para evitar que se adhieran, igualmente es necesario que se encuentren alejadas de las partes internas del horno ya que podrían ocasionar un malfuncionamiento del mismo.
- Debido a las características funcionales del horno es necesario esperar al menos una hora para que las resistencias del artefacto logren la temperatura correspondiente.
- Al finalizar la colocación de la totalidad de las probetas se cierra el horno con la seguridad adecuada y se establece la temperatura a la cual se realizara el tratamiento.
- Una vez terminado el periodo establecido en una hora de tratamiento se procede a extraer las probetas del horno mediante una pinza, evitando el contacto entre las mismas y colocándolas sobre una superficie regular.
- Se inician los procedimientos posteriores cuando las probetas hayan alcanzado la temperatura ambiental, el transcurso de este tiempo depende de las condiciones del laboratorio.



Figura 3.9 Configuración del Horno para realizar la sensibilización



Figura 3.10 Muestras luego de la sensibilización

2. Preparación metalográfica de las probetas: La norma específica que la superficie debe ser pulida para los ensayos de corrosión. Las escamas de la superficie deben ser removidas mediante un papel de lija de entre 80 y 120 sin incrementar mucho la temperatura de dicha superficie y luego pulir mediante papeles más finos. Sin embargo también la operación de pulido puede ser llevada a cabo tomando en cuenta que los rayones no necesitan ser removidos, solo se desea retirar las impurezas que el material pueda tener.



Figura 3.11 Banco de pulido utilizado

Fue necesario aplicar este procedimiento al conjunto entero de probetas, evitando esfuerzos mayores o desiguales entre las mismas para así lograr similitud entre los resultados y contrastar los datos obtenidos de los diversos periodos o grupos de análisis. Las probetas se prepararon en fin de emparejar o nivelar la superficie a experimentar y así verificar una exposición uniforme en el ensayo seleccionado. Es importante destacar que el objetivo principal de este punto fue remover todos los defectos más notorios que puedan presentar las muestras, tal como son; rebabas, cortes, desigualdades, etc. Todo ello a fin de crear estandarización e uniformidad tanto en los resultados como en las probetas, estableciendo propiedades iniciales idénticas para cada condición.



Figura 3.12 Probetas preparadas para la exposición

3. Preparación de la solución: La preparación de la solución se realizó luego de la sensibilización, garantizando así la concentración deseada. Según

la norma ASTM A262-02a, en el apartado de la Prueba A, se señala que para obtener la solución de ácido oxálico al 10% deseada se debe disponer de 100 mg de ácido oxálico en cristales ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), y 900 ml de agua destilada, inicialmente se añade gradualmente el agua a los cristales, se agita o mezcla la solución hasta que los cristales se encuentren totalmente diluidos y se haya obtenido una cantidad de 1000 ml de solución.

4. Limpieza y pesaje de las muestras antes de la exposición: A propósito de garantizar un ataque uniforme fue necesario limpiar las muestras antes de ser corroídas. Las probetas fueron lavadas con agua y luego se les aplicó acetona para detener el proceso de oxidación, retirando todas las sobras o residuos de los procesos de desbaste y tratamiento.

Luego de ello se continuó a pesar las muestras, registrando los valores para cada una de ellas. El pesaje antes y después se aplicó para verificar si existió pérdida de material durante el período de exposición al medio corrosivo, como apoyo en el estudio del cambio de la tenacidad del material. Las pérdidas de peso en este tipo de experimentos suelen ser tenues, por ello se valió de una balanza electrónica de alta precisión para efectuar el pesaje.

5. Ensayo de corrosión: Luego de haber cumplido con todas las preparaciones anteriores se continuó a aplicar la corrosión a las muestras. Para evitar incidentes fue debido conocer y estudiar el funcionamiento del equipo o celda de ataque, así como la toxicidad del reactivo utilizado.

La exposición no fue aplicada dentro de la campana ubicada en el Laboratorio de Materiales, debido a que el gas que libera el ácido no es nocivo en exceso y basta con utilizar un tapaboca. Las instrucciones seguidas para ejecutar el ensayo de corrosión se mencionan seguidamente::

- Se prepara el dispositivo para realizar la exposición a una (1) probeta. Colocando los elementos constitutivos tal como señala el manual, el

montaje incluye el ánodo, la pieza, el tanque y el panel principal. Al posicionar todos los accesorios correctamente y ubicarlos en un sitio adecuado, se añade la solución preparada.

- Seguidamente se aplica la configuración correcta en el panel de control del artefacto para luego aumentar el voltaje del circuito formado. Para ello se calcula la superficie de la probeta y se ajusta el valor de la diferencia de potencial de acuerdo a dicho parámetro en fin de observar su desempeño frente a la exposición. Se sometieron a 6, 8 y 10 voltios.
- Al alcanzar el voltaje y amperaje adecuado se inició el periodo de ataque, cuidando que la temperatura no aumentara a un valor mayor de 50 °C y evitando la formación de elementos indeseables en el cátodo que aumentarían la resistencia del circuito.
- Se retiraron la muestra tras cumplir su periodo de exposición correspondiente y se introdujeron inmediatamente en agua caliente y luego en acetona o alcohol para evitar la cristalización del ácido oxálico.
- Seguidamente se pesaron cada una de las muestras y se registraron los valores. Se limpiaron utilizando algodón, esto con la finalidad de obtener una limpieza y desengrase profundo.

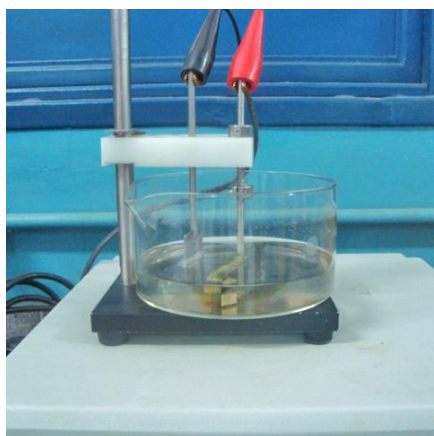


Figura 3.13 Montaje de la Muestra y Configuración del Equipo



Figura 3.14 Muestra de tracción al momento de la exposición



Figura 3.15 Muestra de Impacto al momento de la exposición

6. *Observación de la microestructura:* Utilizando el microscopio metalúrgico se detallaron las microestructuras del acero, con la finalidad de observar el grado de agresividad del ácido y los cambios del mismo al final del proceso, para ello se colocaron a un aumento de 100, 200, 400 y 1000 X.

c) Determinación de variables

Básicamente en el ensayo de corrosión de las muestras no se hace ahínco en las variables cuantificables. En esta etapa se determina la pérdida

de peso de las probetas para tener una comparación del grado de corrosión que experimenta la probeta al ser sometida al ácido. De la misma manera se recopilan todas las observaciones hechas en la microscopia, en fin de realizar comparaciones y establecer criterios.

3.6.5 Aplicación y procedimientos de ensayos de resistencia mecánica

3.6.5.1 Ensayo de tracción

La finalidad de este ensayo fue evaluar el comportamiento del material en sus diferentes condiciones a fuerza de tensión uniaxial. Para este estudio se utilizaron tres (3) probetas para dos condiciones de voltaje y dos (2) probetas para una de las condiciones, totalizando la cantidad de ocho (8). Se utilizó una velocidad baja de tracción para mantener el equilibrio en toda la sección transversal.

a) Materiales y equipos a utilizar

- *Prensa para Ensayos:* Para la realización de este ensayo se utilizó una máquina universal, controlada por computadora. Dicha máquina tiene las especificaciones según la norma E4. Marca *Galdabini*. Ubicada en el laboratorio de Materiales. Los siguientes elementos forman parte de la prensa.
- *Dispositivos de agarre:* Se deben utilizar los correctos dispositivos de agarre para asegurar una buena transmisión de la fuerza aplicada por la máquina a la probeta. Para el caso de las probetas en estudio se usaron mordazas hidráulicas.
- *Instrumentos de medición:* Se utilizó un Vernier para la medición de las dimensiones lineales. Marca *Scala*.
- *Extensómetro:* Se requiere de un extensómetro para medir el alargamiento que se produce en la probeta durante el ensayo. El extensómetro forma parte de la prensa para ensayos.



Figura 3.16 Prensa para ensayos de tracción

b) Procedimiento

1. *Preparar la máquina de ensayo:* Por tener período de inactividad, se calentó el compresor hasta la temperatura normal de operación.

2. *Determinar el área de sección transversal de la probeta:* Se midieron las dimensiones que conforman la sección transversal de la probeta en el centro del área reducida.

3. *Marcado de los límites:* El marcado se realizó mediante el uso de tinta y ya fue indicado en la figura 3.1.

4. *Puesta a cero de la máquina de ensayos:* Se colocó en cero de manera que para esa indicación no actúan fuerzas sobre la probeta.

5. *Ajuste de la probeta:* Se ajustó en la máquina la probeta mediante las mordazas limitándose solo a las áreas designadas para ello.

6. *Establecer la velocidad del ensayo:* Como antes se había mencionado la velocidad del ensayo debía ser lenta para que la fuerza aplicada en la

probeta sea lo más uniformemente posible. La velocidad de ensayo se estableció en 2mm/min.

7. *Remoción de la probeta:* Al finalizar el ensayo se removió la probeta y se midió la nueva distancia entre las marcas; para lograr esto se juntaron las partes de las probetas y se aplicó una fuerza para que encajaran entre sí, luego se midió la longitud, así como el área de sección transversal final en el área de menor sección transversal y por último se separaron nuevamente.



Figura 3.17 Ensayo de Tracción en proceso

c) Determinación de variables

Al realizar el ensayo de tracción a estas probetas, se suministraron los gráficos de Carga vs. Alargamiento y a partir de ellas se construyeron las gráficas Esfuerzo vs. Deformación.

Para calcular el esfuerzo a partir de la carga, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad \textbf{Ecuación 3.1}$$

De donde:

σ = Esfuerzo de ingeniería (MPa)

F = Fuerza uniaxial aplicada a la probeta (N)

A_0 = Área original de la sección transversal de la probeta (mm²)

A su vez, para calcular la deformación a partir del alargamiento, se utiliza la siguiente ecuación:

$$e = \frac{l_f - l_0}{l_0} \quad \textbf{Ecuación 3.2}$$

De donde:

e = Deformación de ingeniería (mm/mm)

l_f = Longitud final entre las marcas de calibración de la probeta (mm)

l_0 = Longitud inicial entre las marcas de calibración de la probeta (mm)

De la gráfica Esfuerzo vs. Deformación se obtuvieron una serie de propiedades mecánicas importantes para entender el comportamiento del material, entre ellas podemos encontrar: esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo, porcentaje de elongación y porcentaje de reducción de área.

Esfuerzo de fluencia

Debido a que no hay punto definido en la curva de Esfuerzo vs. Deformación donde acabe la deformación elástica y se presente la deformación plástica se eligió el método del “offset” tomando la distancia más común, que es de 0,2% de deformación plástica.

El procedimiento a seguir es dibujar una línea paralela a la parte elástica (lineal) de la gráfica definida como OA y luego trazar una paralela a ella a un 0,2% de la deformación total, entonces el punto donde esta línea se intercepta con la parte superior de la gráfica, nos indica el esfuerzo de fluencia del material. Este procedimiento se muestra en la figura siguiente.

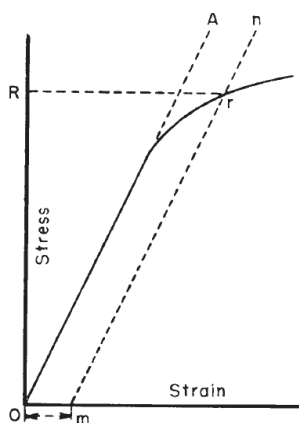


Figura 3.18 Método “offset”

Esfuerzo máximo

Para calcular el esfuerzo máximo se divide la fuerza máxima obtenida entre el área de sección transversal inicial, de la siguiente manera:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A_o} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

De donde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$ = Esfuerzo máximo (MPa)

$F_{m\acute{a}x}$ = Fuerza uniaxial máxima aplicada a la probeta en la tracción (N)

A_o = Área original de la sección transversal de la probeta (mm²)

Esfuerzo de ruptura

Para calcular el esfuerzo de ruptura se divide la fuerza de ruptura obtenida entre el área de sección transversal inicial, de la siguiente manera:

$$\sigma_{rup} = \frac{F_{rup}}{A_o} \quad \text{Ecuación 3.4}$$

De donde:

σ_{rup} = Esfuerzo de ruptura (MPa)

F_{rup} = Fuerza uniaxial máxima aplicada a la probeta en la tracción (N)

A_o = Área original de la sección transversal de la probeta (mm^2)

Porcentaje de elongación

La cantidad de elongación que presenta una muestra bajo tensión durante un ensayo proporciona un valor de la ductilidad de un metal, y la ecuación para su cálculo es la siguiente:

$$\%_{elong} = \frac{l_f - l_o}{l_o} * 100\% \quad \textbf{Ecuación 3.5}$$

De donde:

$\%_{elong}$ = Porcentaje de elongación (%)

l_f = Longitud final entre las marcas de calibración de la probeta (mm)

l_o = Longitud inicial entre las marcas de calibración de la probeta (mm)

Adicionalmente se coloca por separado las distancias inicial y final obtenida en el ensayo.

Porcentaje de reducción de área

La ductilidad de un metal o aleación también se puede representar mediante el porcentaje de reducción en área, el cual para calcularlo se utiliza la siguiente ecuación:

$$\%_{RA} = \frac{A_o - A_f}{A_o} * 100\% \quad \textbf{Ecuación 3.6}$$

De donde:

$\%_{RA}$ = Porcentaje de reducción de área (%)

A_f = Área final de la sección transversal de la probeta (mm^2)

A_o = Área inicial de la sección transversal de la probeta (mm^2)

3.6.5.2 Ensayo de impacto

La finalidad de este ensayo fue evaluar el comportamiento del material para una condición de esfuerzo repentino multiaxial, también denominado de impacto. Para este estudio se utilizaron cinco (5) probetas tipo Charpy con entalle en "V" para dos de las condiciones de exposición al ácido, la condición restante poseyó solo cuatro (4) probeta, en total se suma la cantidad de catorce (14) probetas.

a) Materiales y equipos a utilizar

- *Péndulo de Impacto*: Para la realización de este ensayo se utiliza un péndulo de construcción rígida con martillo intercambiable ubicado en el Laboratorio de Materiales y Ensayos de Ingeniería Civil. Dicha máquina debe tener las especificaciones según el anexo A1 de la norma E23. Marca *Frank*.



Figura 3.19 Péndulo de Impacto tipo Charpy utilizado en los Ensayos, Péndulo en Reposo (izquierda) y en posición de Ensayo (Derecha).

b) Procedimiento

1. Preparar la máquina de ensayo: Se realizó un chequeo de rutina antes de realizar los ensayos. Este chequeo consiste en una inspección visual para daños de la máquina y se levantó el péndulo y se dejó caer revisando que la máquina indique cero (0) de energía.

2. Determinación de la temperatura de ensayo: Siendo la temperatura un factor muy determinante en el resultado de los ensayos de impacto se debe elegir la adecuada. En este caso se eligió una temperatura ambiente se toma como 20 ± 5 °C.

3. Posicionamiento de la probeta: Se centró bien la pieza que se colocó entre los sostenedores, cuidando de que el entalle de cada probeta estuviera de cara contraria al péndulo, centrada y coincida con dicho péndulo. Este paso es importante debido a que las probetas luego de que fueran ensayadas podían rebotar contra el péndulo nuevamente ocasionando errores en la medición.

4. Impacto de la probeta: Se subió el péndulo hasta la posición indicada por la máquina y se deja caer suavemente sin provocar vibración alguna. En los casos de que la probeta no se rompía completamente se cuidó de que no fuera impactada una segunda vez, deteniendo al péndulo por completo.

5. Remoción de la probeta: Al finalizar el ensayo se retiró la probeta.

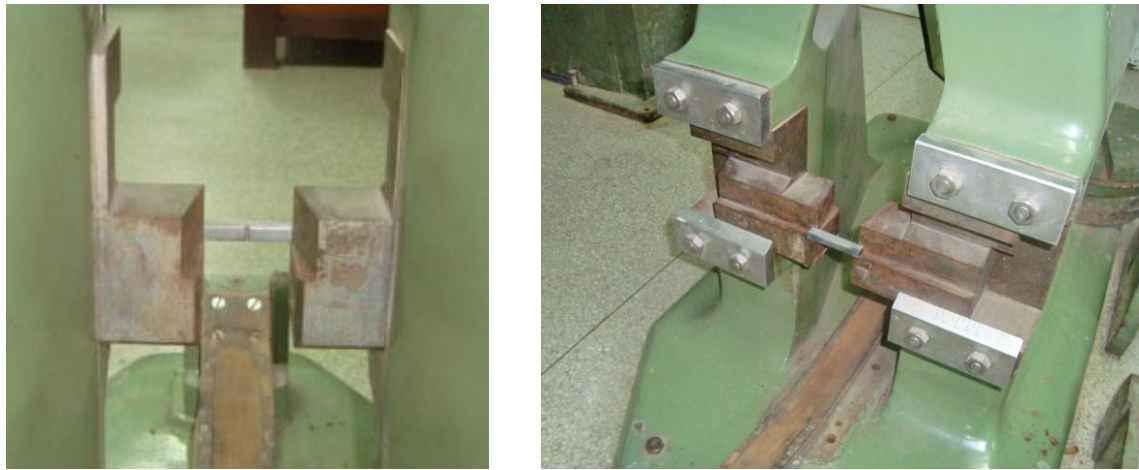


Figura 3.20 Posicionamiento de la muestra en el Péndulo Vista Frontal (Izquierda) y Posterior (Derecha)

c) Determinación de variables

Energía absorbida por impacto

Una vez realizado cada impacto, en la máquina se registran valores de la energía que se absorbe durante el ensayo. Estos datos son suministrados en unidades de sistema internacional (Kg·m) o en unidades inglesas (Lb·pie) dependiendo del equipo utilizado.

Factor de intensidad de esfuerzo crítico

El cálculo experimental del factor de intensidad de esfuerzo crítico (K_{IC}) es costoso, razón por la cual se han desarrollado relaciones empíricas entre el K_{IC} y los valores obtenidos de ensayos mecánicos de menor complejidad. Rolfe, Novak y Barson plantean la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_y}\right)^2 = \left(\frac{5}{\sigma_y}\right)\left(EAI - \frac{20}{\sigma_y}\right) \quad \text{Ecuación 3.7}$$

De donde:

K_{IC} = Factor de intensidad de esfuerzo crítico ($\text{ksi} \cdot (\text{pulg})^{1/2}$)

σ_y = Esfuerzo de fluencia (ksi)

EAI = Energía absorbida por impacto ($\text{Lb} \cdot \text{pie}$)

Estudio de la fractura

Luego de realizar los ensayos de tracción e impacto Charpy, se realiza una microscopía óptica a la superficie de fractura para identificar si la fractura es dúctil o frágil. Posteriormente mediante la utilización de la microscopía electrónica de barrido (MEB) se obtienen fotomicrografías que permiten ver si la fractura es dúctil, donde se verán hoyuelos de gran tamaño o si la fractura es frágil, donde se podrán identificar facetas de clivaje y la presencia de grietas primarias y secundarias.

Luego de realizar los ensayos de tracción e impacto Charpy, se realizó inspección macroscópica a la superficie de fractura para identificar si la fractura es dúctil o frágil y posteriormente se realizó una microscopía electrónica de barrido (MEB). Para observar las probetas en el MEB se cortaron una de las mitades resultantes de los ensayos mecánicos utilizando una cortadora metalográfica que se muestra a continuación



Figura 3.21 Máquina de Corte por disco de Diamante

3.6.6 Estudio Metalográfico

3.6.6.1 Microscopía óptica y electrónica de barrido

Para este caso se espera identificar las matrices austenítica y ferrítica, y la posible formación de precipitados. Esta observación se realiza con un microscopio óptico. Posteriormente para una mejor observación se realiza una microscopía electrónica de barrido (MEB), este ensayo se realiza con un microscopio electrónico.

3.6.7 Procedimiento experimental para los ensayos de Dureza y Microdureza.

3.6.7.1 Microdureza Vickers

Las probetas que se utilizan para el ensayo de microdureza son las mismas empleadas en el estudio metalográfico, es decir, el total de tres (3) probetas. Este ensayo consiste en determinar la resistencia a la penetración local de cada una de las fases presentes en el acero en estudio, esto es, para distinguir la fase ferrítica y la fase austenítica.

a) Materiales y equipos a utilizar

- *Durómetro Vickers*: consiste en una máquina de prueba que apoya la muestra y permite que el penetrador y el modelo que se pone en contacto gradual y suavemente con una fuerza determinada. Marca *Buehler*. Ubicado en el laboratorio de Materiales.
- *Penetrador*: El penetrador será un diamante pulido piramidal, en punta, de base cuadrada con ángulos de la cara de $136^{\circ} \pm 30'$. Las cuatro caras del penetrador será igual a la inclinación del eje de la indentación y se encuentran en una punta aguda.
- *Microscopio de medida*: Las divisiones de la escala micrométrica del microscopio de medición o de otro dispositivo de medición está

construido de manera que la longitud de las diagonales de la impresión en la superficie de un bien acabadas muestras.



Figura 3.22 Microdurómetro Vickers

b) Procedimiento

1. *Determinación de la fuerza del ensayo:* las fuerzas de ensayo de prueba puede estar entre 1 kgf y 120 kgf. Aunque las pruebas de materiales homogéneos indican que el número de dureza Vickers es casi independiente de la fuerza de ensayo, esta condición no se presenta en los casos en que existe un gradiente de la dureza de la superficie de la muestra al interior de la muestra. Se determinó que la fuerza a utilizar sería de 25 kgf

2. *Aplicación de la fuerza:* La máquina de ensayos automáticamente aplica la fuerza durante el tiempo indicado (que en este caso fue de 5 segundos) sin golpes o vibraciones. El método Vickers expresa la dureza del material en términos de la presión originada bajo el indentador en kilogramos por milímetro cuadrado. Para cada probeta se registraron cinco (5) valores en

cada fase presente por cada condición y posteriormente se promediaron los valores obtenidos.

3. *Espaciamiento entre las penetraciones*: El centro de la impresión no estuvo cerca de cualquiera de los bordes de la muestra de ensayo o de otra impresión de una distancia igual a dos veces y media la longitud de la diagonal de dicha impresión.

4. *Medición de las diagonales*: Se midieron las dos diagonales de la impresión y se utilizó su valor medio como base para el cálculo del número de dureza Vickers.

c) Determinación de variables

Dureza Vickers

Para determinar la dureza Vickers a partir de las diagonales medidas se utiliza la siguiente ecuación:

$$VHN = \frac{1.8544 P}{d_1^2} \quad \text{Ecuación 3.8}$$

De donde:

VHN = Dureza Vickers (Kg/mm²)

P = Carga aplicada (Kg)

d₁ = Promedio de las diagonales (mm)

3.6.7.2 Dureza Rockwell

Se realizó además un ensayo de dureza Rockwell adicional para afianzar los resultados obtenidos con los demás ensayos realizados previamente.

Las probetas utilizadas para el ensayo de dureza son las mismas empleadas en el ensayo de tracción, es decir, un total de tres (3) probetas. En este ensayo consiste se determinó la resistencia a la penetración del acero independientemente de la fase, esto fue para determinar la dureza superficial y compararla con la condición original. Por el tipo de material, siendo éste un acero de alta dureza se eligió la práctica de Rockwell C.

a) Materiales y equipos a utilizar

- *Durómetro Rockwell:* consiste en una máquina de prueba que apoya la muestra y permite que el penetrador y el modelo que se pone en contacto gradual y suavemente con una fuerza determinada. Marca *Buehler*. Ubicado en el laboratorio de Materiales.
- *Penetrador:* Por realizarse un ensayo de Rockwell C, el penetrador fue un cono de diamante de 120° con punta aguda.



Figura 3.23 Durómetro Rockwell

b) Procedimiento

1. *Determinación de los parámetros del ensayo:* primeramente se determinó la fuerza a aplicar del ensayo; por ser un ensayo de Rockwell C, la norma estipula la fuerza a utilizar, por tanto se tomó una pre carga de 10 kgf con una carga de 150 kgf. Luego se tomó la temperatura del ensayo, pues es un factor determinante en la dureza, sin embargo es la temperatura ambiente.

2. *Aplicación de la fuerza:* Luego de haber colocado la probeta firmemente en la máquina de ensayos, se aplicó la precarga de 10kgf, y luego se subió la carga hasta llegar a los 150 kgf establecidos con anterioridad cuidando que no hubiera choque ni vibraciones que variaran los resultados. Luego de pasados 3 segundos, se eliminó la fuerza principal, manteniendo la precarga.

3. *Espaciamiento entre las penetraciones:* El centro de la impresión no estuvo cerca de cualquiera de los bordes de la muestra de ensayo o de otra impresión de una distancia igual a tres veces la longitud del diámetro de dicha impresión.

c) Determinación de variables

Dureza Rockwell

La dureza Rockwell se deriva de la diferencia de los diámetros de la penetración realizada y fue indicado directamente por la máquina de ensayo.

CAPÍTULO 4

Resultados Obtenidos

Luego de ejecutar todos los experimentos pertinentes es posible organizar el conjunto de resultados conseguidos a fin de establecer comparaciones sobre los estados iniciales y finales de las muestras. Los tipos de resultados obtenidos son variados, ya que constan de un compendio de pruebas que apoyan el estudio de tenacidad del acero dúplex 2507 luego de haber sido sometido a corrosión con ácido oxálico.

4.1 Estudios Preliminares

Se reporta la composición inicial del material debido a que es preciso aplicar comparaciones en fin de verificar los cambios o alteraciones en la misma. En la tabla 4.1 se especifican el contenido porcentual de cada elemento químico, la composición química afecta el comportamiento del acero.

Tabla 4.1 Composición química acero inoxidable dúplex SAF 2507 (% Peso)

Fuente: SANDVIK Venezuela.

<i>Nombre Comercial</i>	<i>Standard UNS</i>	<i>C (%)</i>	<i>Si (%)</i>	<i>Mn (%)</i>	<i>P (%)</i>	<i>S (%)</i>	<i>Cr (%)</i>	<i>Ni (%)</i>	<i>Mo (%)</i>	<i>Cu (%)</i>
SAF 2507	S32750	0,014	0,33	0,77	0,017	0,0006	25,15	6,96	3,91	0,11

Antes de aplicar todos los procedimientos mencionados es necesario comprobar la procedencia del material, a pesar de que éste se encuentra certificado y avalado por la empresa fabricante, por ello se realizan algunas pruebas de constatación al acero, entre ellas se menciona, la comparación entre la microestructura del material otorgado y las características microestructurales observadas en la bibliografía.

Una de las probetas fabricadas para el ensayo de impacto Charpy fue apartada del conjunto y utilizada para control de características. Se aplicó una preparación metalográfica a la misma en fin de corroborar la microestructura presente.

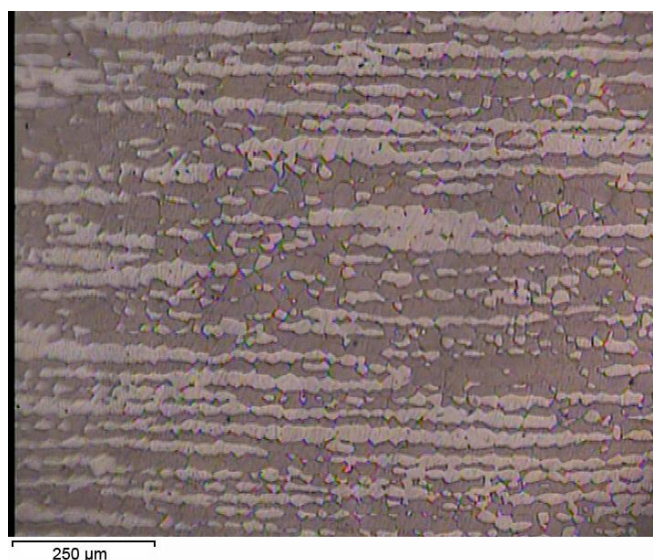


Figura 4.1 Microestructura de Acero Dúplex original

Como se denota en la figura 4.1, existen dos fases en el acero de estudio, la ferrita posee una estructura atómica menos densa (BCC) en contraste con la Austenita (FCC) por lo que se observa que la Austenita sobresale sobre una matriz ferrítica, se señala en la teoría que la fase que debe ser mas atacada es la ferrita para mantener las propiedades resistentes de la austenita.

4.2 Ensayos Mecánicos

4.2.1 Ensayo de Tracción

Antes de aplicar las pruebas referentes al ensayo de tracción y discutir los resultados obtenidos es necesario contar con datos previos que los complementen. Específicamente se refiere a curvas o tablas que identifiquen el comportamiento del material inicial, sin estar sometido a ninguna prueba anterior.

En las figuras 4.2 y 4.3 se reportan curvas del acero SAF 2507 obtenidas de fuentes variadas. En la figura 4.2 se cuenta con las curvas de producto sustraídas de los catálogos proporcionados por el proveedor del material.

La figura 4.3 y la tabla 4.2 corresponden con un conjunto de pruebas estudiadas en trabajos anteriores que registran igualmente condiciones originales tanto curvas como datos numéricos. Se destaca que estas pruebas no fueron aplicadas por cuenta propia debido a la escasez de material de estudio, el resto de tablas y gráficos fueron realizados en el presente estudio.

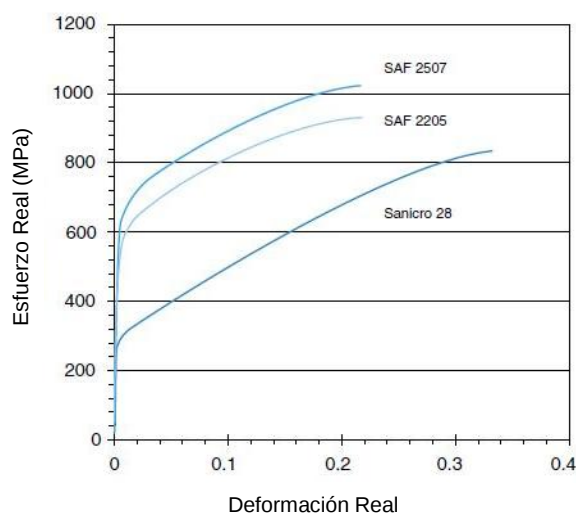


Figura 4.2 Curvas Esfuerzo Real – Deformación Real para diferentes aceros. Fuente: SANDVIK Venezuela.

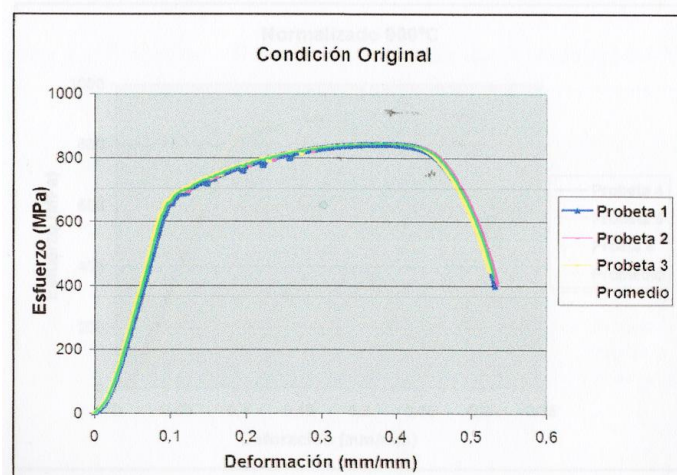


Figura 4.3 Curvas de tracción para acero SAF 2507. Fuente: CORONA, Abraham, TINEO, Zuleika. Trabajo de Grado.

Tabla 4.2 Datos de ensayo de Tracción en condiciones originales. Fuente: CORONA, Abraham, TINEO, Zuleika. Trabajo de Grado.

<i>Condición Original</i>	<i>Esfuerzo de Fluencia (MPa)</i>	<i>Esfuerzo Máximo (MPa)</i>	<i>Esfuerzo de Ruptura (MPa)</i>
<i>Promedio</i>	616	844	413

En los ensayos de tracción aplicados a las probetas expuestas al ácido del presente estudio, se consigue directamente una serie de datos que corresponden con la carga y el alargamiento a cada instante del experimento mediante un software y una computadora anexos al equipo. Realizando los cálculos pertinentes se obtiene de cada una de las probetas, la curva Esfuerzo – Deformación Ingenieril, para ello es importante recordar el siguiente cálculo típico:

Tabla 4.3 Dimensiones iniciales de Probetas de Tracción

<i>Sección Transversal</i>			<i>Longitud Calibrada (mm)</i>
<i>Ancho (mm)</i>	<i>Largo (mm)</i>	<i>Área (mm²)</i>	
6	6	36	25

De la Ecuación 3.2
$$\sigma = \frac{F}{A_o} = \frac{F}{36 \text{ mm}^2}$$

De la Ecuación 3.3
$$e = \frac{l_f - l_o}{l_o} = \frac{\Delta l}{25 \text{ mm}}$$

Procesando los datos mostrados anteriormente se desarrollan las curvas mostradas en los próximos apartes, clasificándolas según su condición de ensayo.

4.2.1.1 Curvas Esfuerzo – Deformación para condición A (6V)

En esta sección se muestran las curvas Esfuerzo – Deformación para las probetas A5, y A6, expuestas al ácido con una diferencia de potencial de 6V, adicionalmente, se utiliza la recta “offset” necesaria para el cálculo del esfuerzo de fluencia correspondiente.

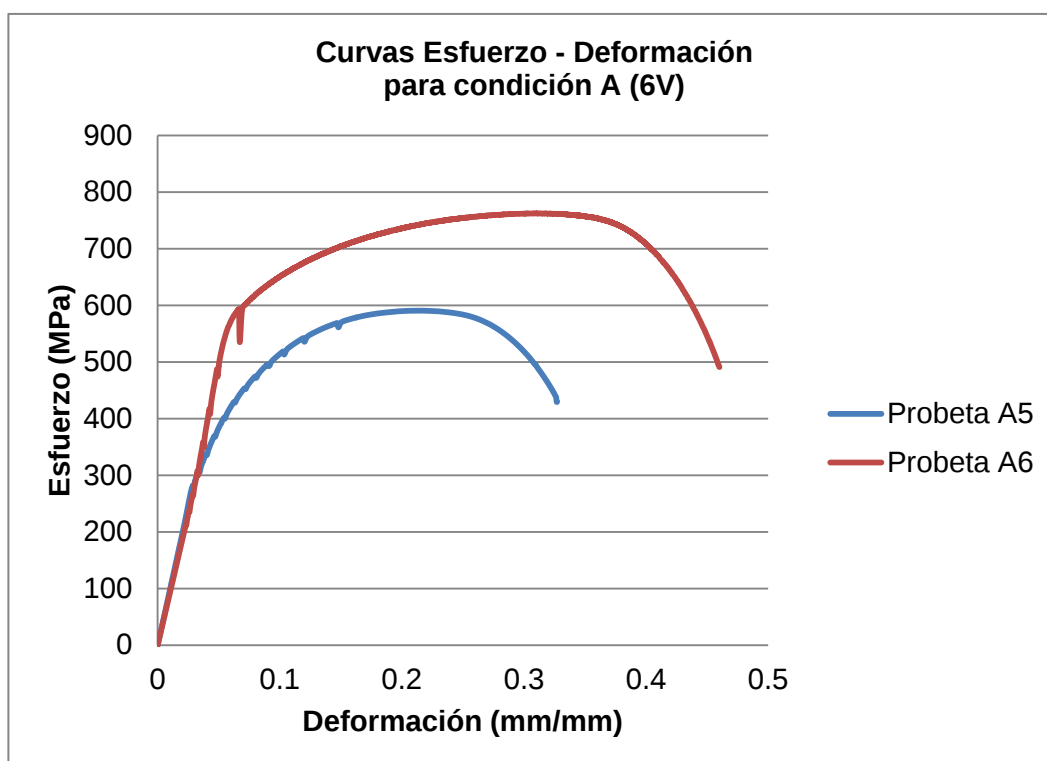


Figura 4.4 Curvas de ensayo de tracción para muestras de condición A (6V)

De las gráficas anteriores se sustrae el esfuerzo de fluencia para cada muestra, señalado en la Tabla 4.4. Al observar la curva de la muestra A5 resaltan características ajenas al comportamiento usual de la totalidad de curvas estudiadas, adicionado a que el valor de esfuerzo de fluencia no se asemeja con el de la condición original, y habiéndose sometido a una exposición tan leve, no es coherente que tenga un valor tan bajo. Las causas de estas variaciones son fortuitas, y es probable que debido a la diferencia entre las condiciones de ensayo (tiempo entre ensayos, exposiciones intermitentes, anisotropía del material, entre otras) se hayan generado estas singularidades. Por la causa expuesta anteriormente se datan en la tabla 4.5 dos esfuerzos promedio donde se excluye en uno de ellos el resultado determinado por la probeta A5, en fin de poseer valores más sólidos y comparables con las condiciones restantes. Una situación similar a la presentada con el valor de fluencia de la probeta A5 se genera en el valor de estricción a la rotura de la misma muestra.

Tabla 4.4 Resultados Comparativos de Ensayos de Tracción para la condición A

<i>Muestras expuestas al ácido a 6V</i>				
<i>Probeta Ensayada</i>	<i>A5</i>	<i>A6</i>	<i>Esfuerzo Promedio</i>	<i>Desviación Estándar</i>
<i>Esfuerzo de Fluencia a 2% (MPa) incluyendo A5</i>	349,694	592,916	471,305	171,984
<i>Esfuerzo de Fluencia a 2% (MPa) excluyendo A5</i>	-	592,916	592,916	-
<i>Esfuerzo Máximo (MPa)</i>	-	762,250	762,250	-

4.2.1.2 Curvas Esfuerzo – Deformación para condición B (8V)

En este aparte se muestran las curvas Esfuerzo – Deformación para las probetas B6, B7 y B8, atacadas con una diferencia de potencial de 8V, adicionalmente, se utiliza la recta “offset” necesaria para el cálculo del esfuerzo de fluencia correspondiente.

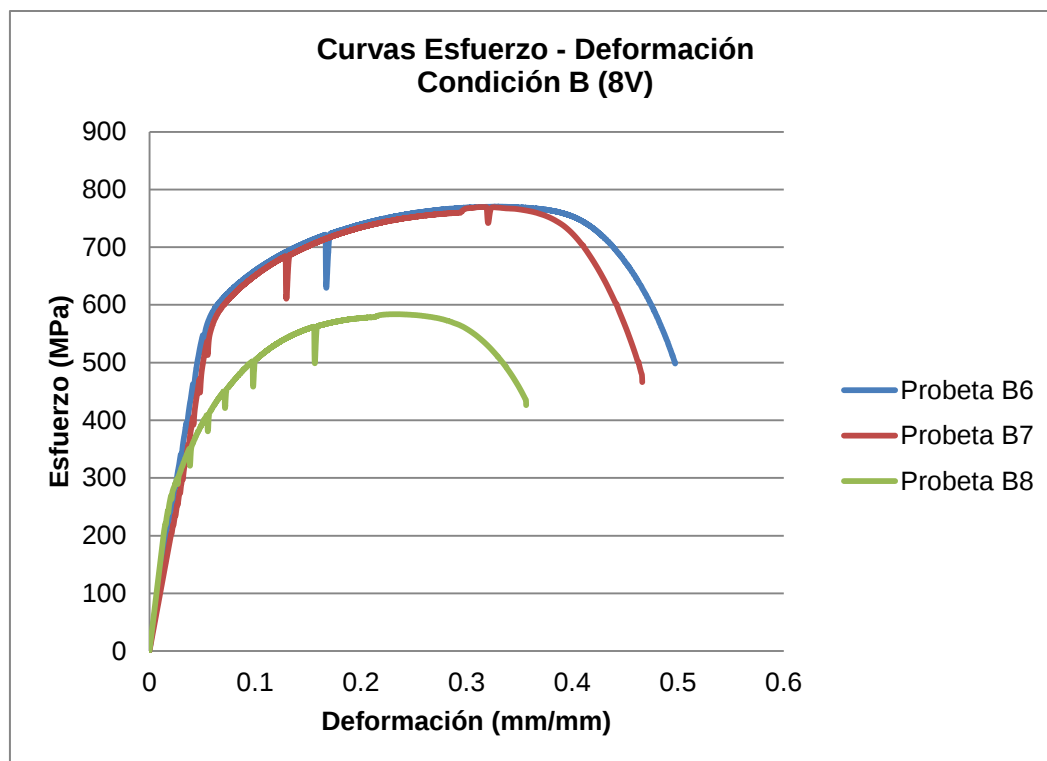


Figura 4.5 Curvas de ensayo de tracción para muestras de condición B (8V)

Para la condición B, se cuenta con un total de tres (3) muestras para su estudio, una de ellas (B8) mostró un comportamiento semejante a la probeta (A5) aislados de las características generales observadas a lo largo de los experimentos, los datos obtenidos son señalados, mas no son tomados en cuenta dentro de los promedios por las razones de coherencia expuestas anteriormente. Los resultados de los esfuerzos de fluencia se datan en la tabla 4.5. Es importante destacar que existe un incremento en los esfuerzos de

alrededor del 1% y se podría estrechar si se utilizasen mas muestras para cada condición ya que se poseería una mayor cantidad de datos.

Tabla 4.5 Resultados Comparativos de Ensayos de Tracción para la condición B

<i>Muestras atacadas a 8V</i>					
<i>Probeta Ensayada</i>	<i>B6</i>	<i>B7</i>	<i>B8</i>	<i>Esfuerzo Promedio</i>	<i>Desviación Estándar</i>
<i>Esfuerzo de Fluencia a 2% (MPa) incluyendo B8</i>	603,361	593,833	300,694	499,296	172,060
<i>Esfuerzo de Fluencia a 2% (MPa) excluyendo B8</i>	603,361	593,833	-	598,597	6,737
<i>Esfuerzo Máximo (MPa)</i>	770,306	769,528	-	769,917	0,550

4.2.1.3 Curvas Esfuerzo – Deformación para condición C (10V)

En esta sección se muestran las curvas Esfuerzo – Deformación para las probetas C6, C7 y C8, atacadas con una diferencia de potencial de 10V, adicionalmente, se utiliza la recta “offset” necesaria para el cálculo del esfuerzo de fluencia correspondiente. Para la condición C, todas las curvas presentaron datos satisfactorios (figura 4.6), relacionados con las gráficas estables de las demás condiciones y comportamiento teórico esperado. En este caso se cuenta con una mayor cantidad de datos, y siendo la condición más severa se espera un estudio más minucioso de la misma.

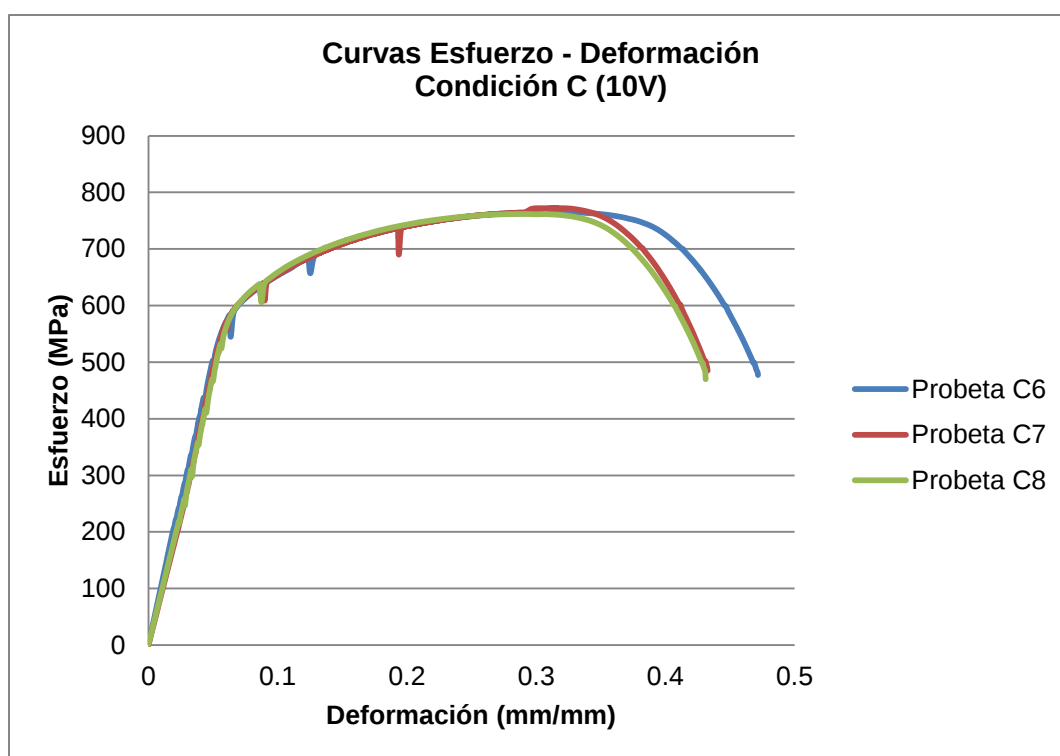


Figura 4.6 Curvas de ensayo de tracción para muestras de condición C (10V)

Para la presente condición se registran los datos obtenidos en la tabla 4.6 señalando los esfuerzos de fluencia y esfuerzos máximos. De las

muestras estudiadas, las correspondientes con la condición C proyectaron un valor de esfuerzo de fluencia promedio, determinado en la tabla 4.6, más elevado con respecto a la condición anterior en aproximadamente 1% mayor, siendo estas diferencias entre los valores de las condiciones no significativas.

Tabla 4.6 Resultados Comparativos de Ensayos de Tracción para la condición C

Muestras atacadas a 10V					
Probeta Ensayada	C6	C7	C8	Esfuerzo Promedio	Desviación Estándar
Esfuerzo de Fluencia a 2% (MPa)	605,500	600,611	610,166	605,426	4,778
Esfuerzo Máximo (MPa)	765,500	772,639	761,722	766,620	5,544

4.2.1.4 Análisis de Ductilidad del material

Para establecer criterios acerca de los cambios en las propiedades del material es necesario poseer indicadores que los fundamenten. La ductilidad de un material viene estrechamente vinculada con la elongación y la estricción, en fin de comparar las tres condiciones se genera el gráfico 4.13, donde las curvas representan el gradiente de estos factores según la condición aplicada.

$$\%_{elong} = \frac{l_f - l_o}{l_o} * 100\% \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Donde:

$\%_{elong}$ = Porcentaje de elongación (%)

l_f = Longitud final entre las marcas de calibración de la probeta (mm)

l_o = Longitud inicial entre las marcas de calibración de la probeta (mm)

$$\%_{RA} = \frac{A_o - A_f}{A_o} * 100\% \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Donde:

$\%_{RA}$ = Porcentaje de reducción de área (%)

A_f = Área final de la sección transversal de la probeta (mm^2)

A_0 = Área inicial de la sección transversal de la probeta (mm^2)

Tabla 4.7 Resumen de Promedios de %RA obtenidos

Condición	Probeta	A_0 Promedio (mm^2)	A_f (mm^2)	%RA	%RA Promedio
A (6V)	5	35,990	18,48	-	64,99
	6		12,60	64,99	
B (8V)	6		12,96	63,99	62,49
	7		14,04	60,99	
	8		16,00	-	
C (10V)	6		13,68	61,99	60,61
	7		15,20	57,77	
	8		13,65	62,07	

Tabla 4.8 Resumen de Promedios de %e obtenidos

Condición	Probeta	L_0 (mm)	L_f (mm)	%e	%e Promedio
A (6V)	5	25	33,70	-	47,40
	6		36,85	47,40	
B (8V)	6		36,70	46,80	47,80
	7		37,20	48,80	
	8		34,70	-	
C (10V)	6		37,05	48,20	46,07
	7		36,35	45,40	
	8		36,15	44,60	

Los valores iniciales de reducción de área (%RA) y elongación (%e) son extraídos del trabajo de investigación de CORONA, Abraham, TINEO, Zuleika, son 76,87% y 53,87% respectivamente.

4.2.2 Ensayo de Impacto Charpy

En adición a los ensayos aplicados a las probetas expuestas al ácido, se ejecutan ensayos adicionales que sirven de control y base para la comparación entre los valores obtenidos luego de la exposición al químico.

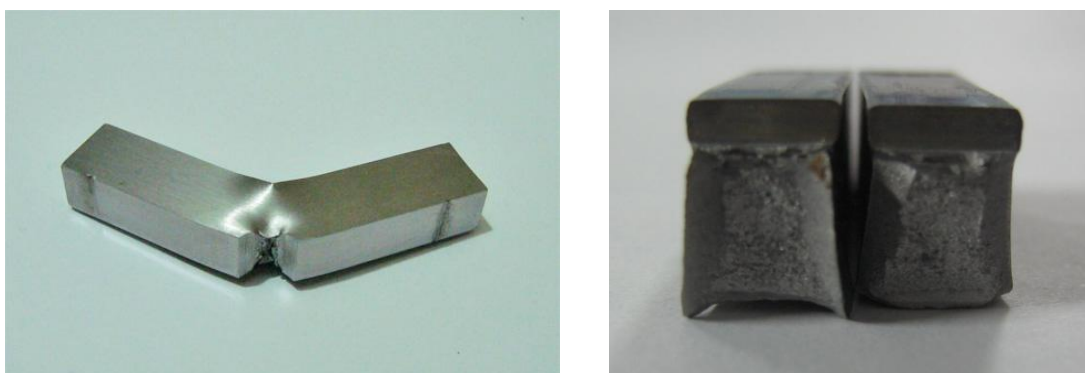


Figura 4.7 Probeta tipo Charpy de control, Sin tratamiento térmico (Izquierda) y tratada térmicamente (Derecha)

En la figura 4.14 izquierda se observa la fractura parcial de la probeta. La muestra se vio afectada por el impacto sin embargo la potencia del martillo instalado no logró romperla completamente, se verifica así la gran ductilidad del material en su condición original. Los resultados numéricos de la prueba de control se muestran a continuación.

Tabla 4.9 Datos de ensayos Charpy de Control

<i>Muestra de Control</i>	<i>EAI (Kpm)</i>	<i>EAI (J)</i>	<i>Corte en Fractura (%)</i>
<i>Sin Tratar Térmicamente</i>	14,9	146,02	-
<i>Tratada Térmicamente *</i>	7,1	69,58	80

Las EAI obtenidas anteriormente se utilizarán a modo comparativo con los resultados futuros de las probetas estudiadas afectadas por el ácido oxálico en sus diferentes condiciones.

* Para esta condición solo se aplicó el ensayo a una probeta, por lo que es solo un valor aproximado que posee una alta incertidumbre, y no se encuentra normado, por ello no se tomará en cuenta para futuros análisis.

Se observa la diferencia entre ambos resultados obtenidos, estos se utilizan de referencia y se analizan posteriormente junto a los demás valores de las muestras expuestas a ácido. Para el primer resultado sugiere que la energía absorbida al impacto es mayor a la máxima que proporciona el péndulo disponible, lo cual concuerda con los datos obtenidos en la teoría, sin embargo se observa que realizar la sensibilización el valor disminuye.

Cuando se finalizan las exposiciones correspondientes para todas las muestras a estudiar se procede a aplicar el ensayo Charpy. El ensayo se realiza en el Laboratorio de Materiales y Ensayos de Ingeniería Civil, cuya temperatura (alrededor de 24°C) no fue variable y no forma parte del estudio.

Como se menciona anteriormente es importante tomar en cuenta los resultados obtenidos de los ensayos aplicados a probetas de Control sin ser afectadas por la exposición al ácido, ya que mediante las mismas se juzgarán los valores que se adquieran de las muestras atacadas. En las tablas 4.10 a 4.12 se exponen los resultados de los ensayos aplicados, comparando las energías absorbidas en el impacto de las probetas para cada condición.

Tabla 4.10 Resultados numéricos para Ensayo Charpy, Condición A

Muestras atacadas a 6V						
Probeta Ensayada	A1	A2	A3	A4	Tenacidad Promedio	Desviación Estándar
Tenacidad al Impacto (Kpm)	13,500	13,000	12,900	11,000	12,600	1,098
Tenacidad al Impacto (J)	132,300	127,400	126,420	107,800	123,480	10,765
Tenacidad al Impacto (J) *	-	-	-	107,800	107,800	-

Tabla 4.11 Resultados numéricos para Ensayo Charpy, Condición B

Muestras atacadas a 8V							
Probeta Ensayada	B1	B2	B3	B4	B5	Tenacidad Promedio	Desviación Estándar
Tenacidad al Impacto (Kpm)	12,800	12,200	10,600	9,200	12,490	11.458	1.521
Tenacidad al Impacto (J)	125,440	119,560	103,880	90,160	122,402	112,288	14.904
Tenacidad al Impacto (J) *	-	-	103,880	90,160	-	97.020	9.702

Tabla 4.12 Resultados numéricos para Ensayo Charpy, Condición C

Muestras atacadas a 10V							
Probeta Ensayada	C1	C2	C3	C4	C5	Tenacida d Promedio	Desviación Estándar
Tenacidad al Impacto (Kpm)	13.300	7.200	7.800	14.200	9.200	10.340	3.212
Tenacidad al Impacto (J)	130.340	70.560	76.440	139.160	90.160	101.332	31.479
Tenacidad al Impacto (J)*	-	70.560	76.440	-	90.160	79.053	10.058

* Es preciso destacar que, dentro de la norma que indica todas las especificaciones para el ensayo de impacto tipo Charpy, se menciona que; los valores obtenidos de energía absorbida al impacto que exceden un 80% de la capacidad de la máquina se deben tomar de manera aproximada debido a que no son datos plenamente confiables. Por ello se añade una fila de Tenacidad al Impacto donde no se toman para el cálculo promedio todos aquellos valores que sobrepasan 12 Kpm o 117,6 J (correspondiente con el 80% de la capacidad, 15 Kpm).

En adición los datos derivados directamente del ensayo, se determinan un factor importante dentro del análisis de la tenacidad; la tenacidad de fractura (K_{ID}). La ecuación aplicada en fin de calcular este factor es mencionada en el Capítulo 3, y corresponden con la ecuación 3.7. Esta ecuación es conocida como correlación de Novak – Barsom.

La fórmula aplicada se cita a continuación:

$$\left(\frac{K_{ID}}{\sigma_y}\right)^2 = \left(\frac{5}{\sigma_y}\right)\left(EAI - \frac{\sigma_y}{20}\right) \quad \textbf{Ecuación 3.7}$$

Donde:

K_{ID} = Factor de intensidad de esfuerzo crítico ($\text{ksi} \cdot (\text{pulg})^{1/2}$)

σ_y = Esfuerzo de fluencia (ksi)

EAI = Energía absorbida por impacto (Lb·pie)

Tabla 4.13 Cálculo de factor K_{ID}

<i>Muestra</i>	<i>EAI (lbf.pie)</i>	<i>S_y (ksi)</i>	<i>K_{ID} [ksi (pulg)^{1/2}]</i>	<i>K_{ID} Promedio</i>	<i>Desviación Estándar</i>
A1	-	85.995	-	179.829	-
A2	-		-		
A3	-		-		
A4	79.510		179.829		
B1	-	86.819	-	170.697	9.099
B2	-		-		
B3	76.619		177.131		
B4	66.499		164.264		
B5	-		-		
C1	-	87.810	-	153.620	10.477
C2	52.043		144.644		
C3	56.380		151.083		
C4	-		-		
C5	66.499		165.132		

Junto con los valores de la condición original se genera la tabla siguiente donde se muestran los resultados promedios para K_{ID} , como se

aclara anteriormente no se toman los valores donde el porcentaje exceda el 80% de la capacidad de la máquina, igualmente no se registra la condición sensibilizada ya que no se aplicaron ensayos de tracción para determinar S_y por escasez de muestras, este dato es necesario para el cálculo de la tenacidad K_{ID} .

Tabla 4.14 Factor K_{ID} para diferentes condiciones

Condición	$K_{ID} [ksi (pulg)^{1/2}]$	Desviación Estándar
Original	223.700	-
A (6V)	179.829	-
B (8V)	170.697	9.099
C (10V)	153.620	10.477

* Fuente: SAENZ L. et al, Rev. Fac. Ing. UCV v.22 n.3 Caracas 2007.

4.2.3 Ensayos de Dureza

4.2.3.1 Microdureza Vickers

Al tratarse de una exposición en donde el fin es tratar al material superficialmente, se realizaron las pruebas de dureza a la superficie de la probeta y a su vez también se evaluaron las durezas de la fase austenítica y ferrítica presentes individualmente mediante el ensayo de microdureza Vickers, también a nivel superficial. Para el ensayo de dureza Rockwell se utilizó el ensayo de Rockwell C, ya que éste es aplicado generalmente para aceros tratados térmicamente. Estos ensayos arrojaron los resultados que se muestran en las tablas 4.14 a 4.17.

Se tiene que la dureza de las fases del acero dúplex 2507 son de 175 HV para la ferrita y 215 HV para la austenita, (SAENZ, L. et al, 2003). Además se tiene que los valores de la microdureza del material sensibilizado se obtuvieron por medición de la misma a cada fase de manera superficial, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 4.15 Microdureza Vickers para condición sensibilizada

Microdureza Vickers Sens.		
Indentación	Ferrita	Austenita
1	226,70	228,30
2	245,20	245,20
3	258,20	274,30
4	268,10	272,20
5	248,40	292,00
Promedio (HV)	249,32	262,40
Desviación Estándar	15,50	25,35

Tabla 4.16 Microdureza Vickers para condición A (6V)

Microdureza Vickers (6V)		
Indentación	Ferrita	Austenita
1	234,06	290,83
2	240,34	301,89
3	270,15	297,09
4	251,24	279,64
5	236,09	305,67
Promedio (HV)	246,38	295,02
Desviación Estándar	14,85	10,23

Tabla 4.17 Microdureza Vickers para condición B (8V)

Microdureza Vickers (8V)		
Indentación	Ferrita	Austenita
1	213,09	321,94
2	262,08	301,51
3	250,65	280,76
4	248,82	311,48
5	223,57	278,59
Promedio (HV)	239,64	298,86
Desviación Estándar	20,45	18,96

Tabla 4.18 Microdureza Vickers para condición C (10V)

Microdureza Vickers (10V)		
Indentación	Ferrita	Austenita
1	256,27	285,18
2	233,19	278,59
3	258,19	280,76
4	250,65	245,21
5	274,32	280,76
Promedio (HV)	254,52	274,10
Desviación Estándar	14,82	16,33

4.2.3.2 Dureza Rockwell

El estudio de dureza Rockwell que se presenta a continuación se toma para evaluar la dureza de la sección externa de la muestra expuesta directamente al ácido oxálico. Se recuerda que la carga utilizada para la medición de la dureza Rockwell C es de 150 Kg.

Tabla 4.19 Resultados Dureza Rockwell C

Dureza Rockwell (HRC)				
Indentación	Condición			
	Original	A (6V)	B (8V)	C (10)
1	18,70	14,40	19,00	16,50
2	19,20	19,90	17,40	19,40
3	21,40	20,20	20,00	20,70
4	19,70	18,50	19,20	19,50
5	17,50	20,20	18,20	20,20
Promedio (HRC)	19,30	18,64	18,76	19,26
Desviación Estándar	1,43	2,47	0,99	1,63

Tabla 4.20 Dureza Rockwell C para diferentes condiciones

Condición	Dureza (HR)	Desviación Estándar
Original	19,30	1,43
A (6V)	18,64	2,47
B (8V)	18,76	0,99
C (10V)	19,26	1,63

4.3 Corrosión o Exposición al ácido

4.3.1 Estado de las muestras luego de la exposición.

Se aplican un conjunto de observaciones durante la etapa de exposición al químico, detallando el proceso como tal hasta el producto de la corrosión obtenida en las muestras. Durante la exposición ocurre una pérdida de material moderada, de partes superficiales de la muestra se desprenden pequeñas partículas en forma de polvo tanto en las zonas en contacto con el cátodo como en zonas alejadas del mismo. El área pulida cambia su aspecto, opacándose lentamente y haciendo notorios defectos superficiales de la muestra, el reactivo se contamina en cada exposición debido a la liberación de partículas de oxido remanentes en las muestras, por lo que es pertinente sustituirlo de manera recurrente.

En primer lugar, se visualiza el estado de todas las probetas ensayadas, éstas se examinan macroscópicamente, y se identifica cada uno de los elementos o características que puedan haber aparecido en las mismas. Es importante destacar las diferencias visibles que se hayan generado entre las muestras de las tres condiciones. A continuación se reportan un compendio de imágenes que datan el estado final de las muestras.

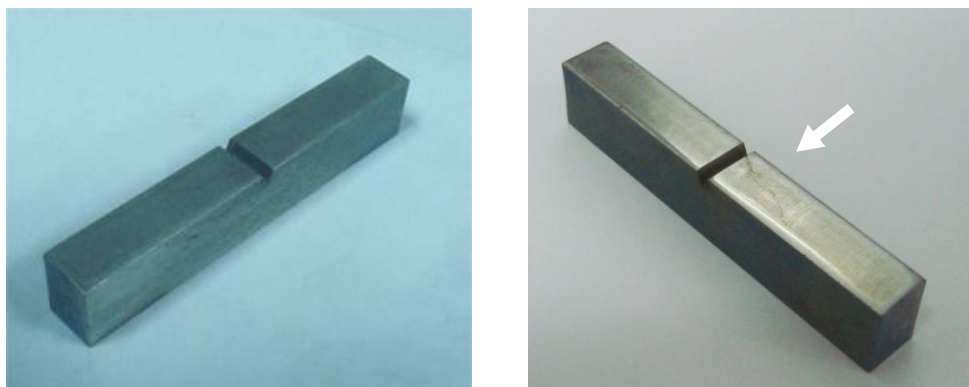


Figura 4.8 Probeta tipo Charpy expuesta al ácido a 6V, condición A, (Derecha e Izquierda)

La Figura 4.8 se detallan varios ángulos de probetas expuestas al químico a 6V, correspondiente con la condición menos severa, se visualiza como ciertas capas de oxido remanentes del tratamiento térmico fueron degradadas, así como la superficie superior se vio oscurecida por el ataque. Todas las probetas de esta condición presentaron características externas similares, tal como se ve en las imágenes, los bordes (inferior y superior) de la superficie en contacto con el circuito, se opacaron con mayor profundidad.

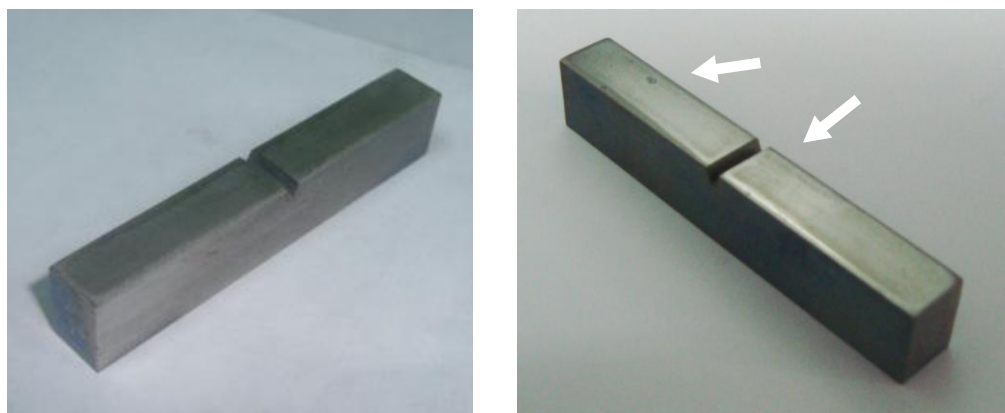


Figura 4.9 Probeta tipo Charpy expuesta al ácido atacada a 8V, condición B, (Derecha e Izquierda)

En la Figura 4.9 se encuentran las probetas de impacto tipo Charpy expuestas al medio según la condición B (8V), estas muestras poseen características intermedias entre las tres condiciones, no obstante existen algunas probetas particulares que en una visión macroscópica tienden hacia la exposición excesiva o hacia el déficit de esta, en general presentan rasgos más acentuados que las muestras de la condición anterior. Las capas de oxido azulado retenidas en los planos ajenos al cátodo caen fácilmente mediante la limpieza con algodón, dejando al descubierto una superficie similar a las condiciones iniciales del material.

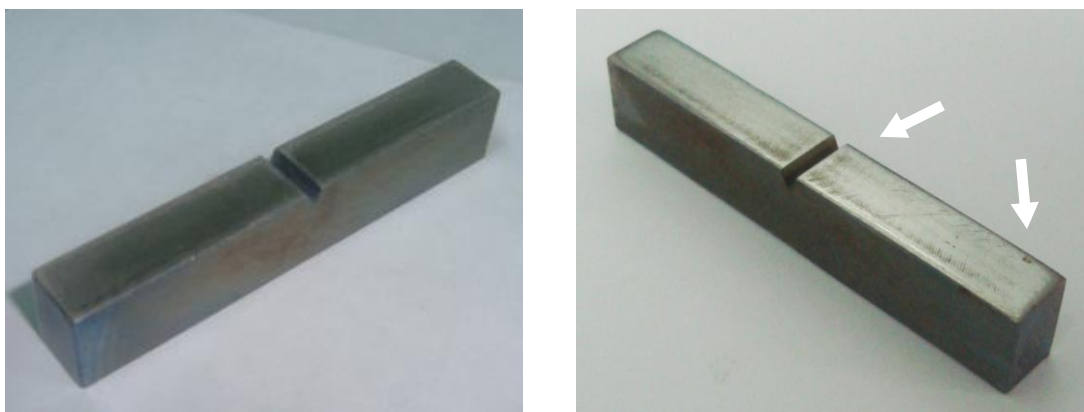


Figura 4.10 Probeta tipo Charpy expuesta al ácido a 10V, condición C, (Derecha e Izquierda)

En las muestras que se detallan en la Figura 4.10, se puede ver la superficie generada luego de la exposición, las zonas que bordean el plano de ataque son las más afectadas así como las más cercanas a la paleta catódica. Este conjunto de probetas recibió la exposición a condiciones más severas, y ello se constata por medio su estado final, ya que se encuentran opacadas por completo la zona pulida inicialmente, dejando rastros de óxidos o suciedad en el mismo plano.

Las imperfecciones que persistieron luego de la preparación de la superficie parecen ser los lugares de concentración de corrosión, como se observa en la figura ciertas líneas cercanas a la muesca y en el borde de la superficie fueron resaltadas.

En los planos adyacentes adicional a la caída de capas de óxido provenientes del tratamiento, ocurre un mayor deterioro que en las condiciones anteriores, así como áreas sombreadas o con tonalidades diferentes.

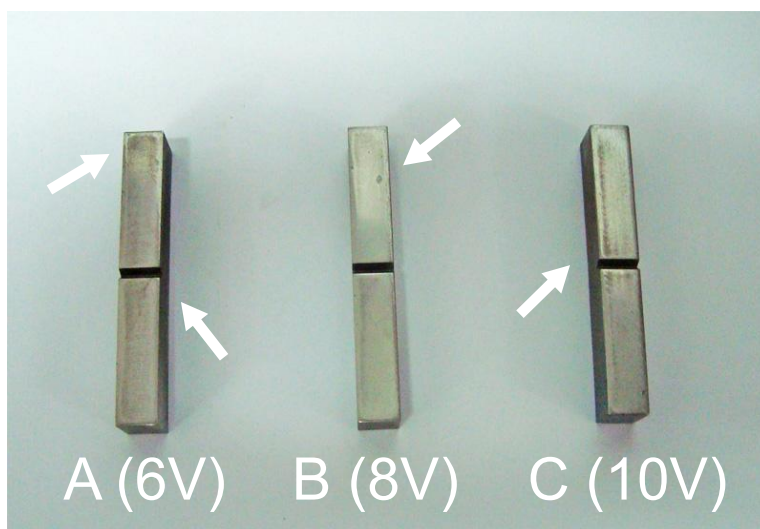


Figura 4.11 Comparación de probetas Charpy expuesta al ácido A, B y C de Izquierda a Derecha.

Para una mejor comparación de las muestras se tiene la Figura 4.11, donde se encuentran alineadas de izquierda a derecha las probetas de tipo Charpy para las condiciones A, B y C respectivamente.

Dentro de los rasgos generales se aprecia la pérdida del brillo o lustre inicial, obtenido en la preparación de la superficie, así como la aparición de manchas o zonas oscuras en casi la totalidad de la zona atacada, haciendo mayor efecto en las imperfecciones que no fueron removidas en la preparación debido a su forma o profundidad.

En la figura 4.11 se observa como la probeta mas a la derecha C posee mayor deterioro que las restantes, las probetas A y B se encuentran totalmente opacas, algunas rayas y hoyuelos son destacados por medio de la exposición.

Estas características se resaltan con el aumento de la diferencia de potencial, lo que genera la diferencia entre las condiciones exteriores

macroscópicas de las muestras, sin embargo no existe la generación a aparición de elementos visibles nuevos entre condiciones.

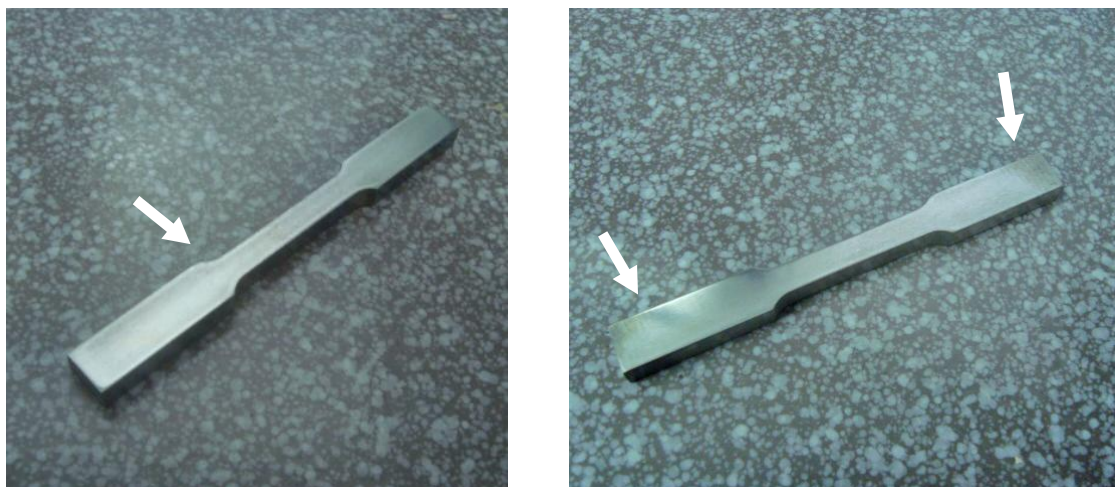


Figura 4.12 Muestras de Tracción expuestas al ácido (Izquierda y Derecha)

Los resultados son similares para las probetas de tracción, se generan las mismas características para las condiciones correspondientes, adicionando elementos particulares en estas muestras, posiblemente debido a su tamaño; las zonas mayores atacadas son aquellas cercanas a la paleta que hace de cátodo debido al sentido de la corriente y de intercambio de material. Se forman ciertas sombras y zonas de oscurecimiento alrededor de los bordes como se observa en la figura 4.12 Izquierda, así como una mayor concentración en el centro y extremos de la probeta, posiblemente por ser zonas vulnerables de menor grosor y con bordes pronunciados.

De la misma manera como ocurre con las probetas tipo Charpy, el detrimento de la superficie se incrementa con la corriente o voltaje aplicados en el ensayo, las diferencias son notorias mas no drásticas.

4.3.2 Pesaje de las muestras luego del ataque

Luego de aplicar el ataque químico se realiza un segundo y final pesaje, los resultados diferenciales y porcentuales se calculan y se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4.21 Estadística de cambio en pesaje de muestras, medidas en gramos

<i>Identificación de la Muestra</i>	<i>Peso Inicial de la Muestra</i>	<i>Peso Final de la Muestra</i>	<i>Pérdida de Peso</i>	<i>Pérdida de Peso Porcentual</i>	<i>Pérdida de Peso Promedio</i>	<i>Desviación Estándar</i>
A1	31,7498	31,6630	0,0868	0,2734	0,0581	0,0199
A2	31,6549	31,6121	0,0428	0,1352		
A3	31,6709	31,6182	0,0527	0,1664		
A4	31,5125	31,4796	0,0329	0,1044		
A5	39,5871	39,5133	0,0738	0,1864		
A6	39,7383	39,6784	0,0599	0,1507		
B1	31,7330	31,6840	0,0490	0,1544	0,0555	0,0072
B2	31,7543	31,7078	0,0465	0,1464		
B3	31,7139	31,6510	0,0629	0,1983		
B4	31,6087	31,5570	0,0517	0,1636		
B5	31,3769	31,3240	0,0529	0,1686		
B6	40,1110	40,0465	0,0645	0,1606		
B7	39,5493	39,4968	0,0525	0,1321		
B8	38,9836	38,9193	0,0643	0,1614		
C1	31,7984	31,7469	0,0515	0,1620	0,0785	0,0364
C2	31,6679	31,6097	0,0582	0,1838		
C3	31,8177	31,7506	0,0671	0,2109		
C4	31,6900	31,6327	0,0573	0,1808		
C5	31,7140	31,6635	0,0505	0,1592		
C6	40,1505	39,9982	0,1523	0,3797		
C7	39,7561	39,6799	0,0762	0,1927		
C8	39,8498	39,7349	0,1149	0,2947		

En general se registran pérdidas de peso mínimas, siendo alrededor del 0,2% para todas las muestras ensayadas, a pesar de ello no representan valores significativos como para abordar una corrosión severa, y más aún, se infiere que la pérdida de material se relaciona con la caída de ciertas capas de óxido y suciedad adheridas a las probetas. Igualmente se vincula el esparcimiento de partículas en forma de polvo durante la exposición, a la pérdida de peso registrada en las muestras.

4.4 Microscopías

4.4.1 Microscopía Óptica

Al exponer las probetas, se devela la microestructura del material afectada en cierta medida por el medio corrosivo. La microscopia se aplica a todas las probetas observando las diferencias e igualdades entre las mismas, así como los cambios que ocurren en los granos a medida que se aumenta la agresividad de la exposición. A continuación se muestran las microestructuras más representativas de cada condición.

4.4.1.1 Muestras expuestas al ácido a 6V durante 2 minutos (Condición A)

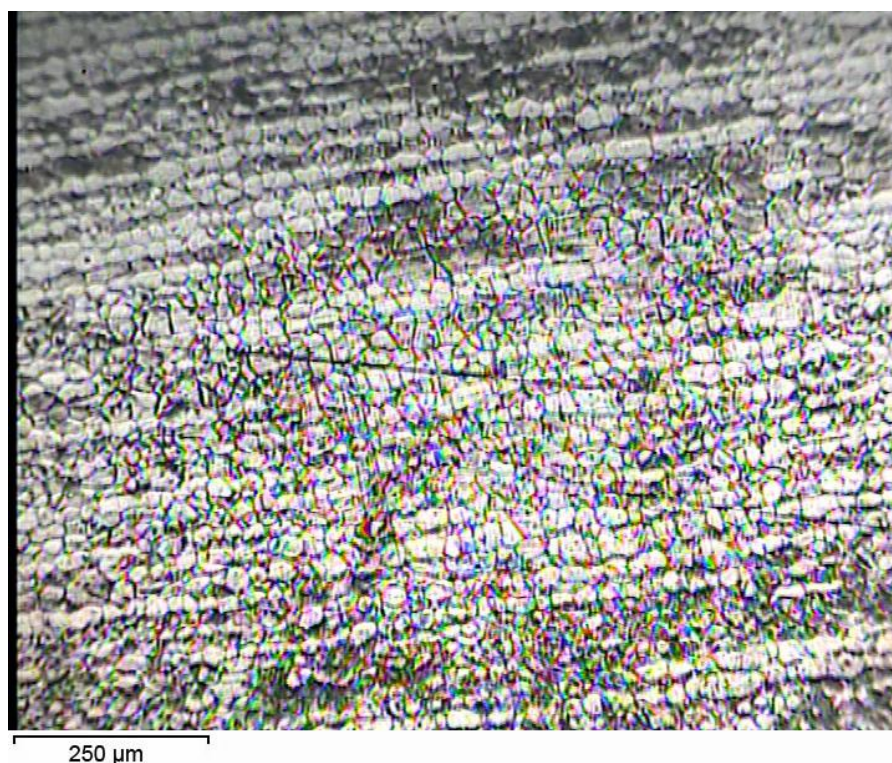


Figura 4.13 Muestra representativa de la condición A, aumento de 100x

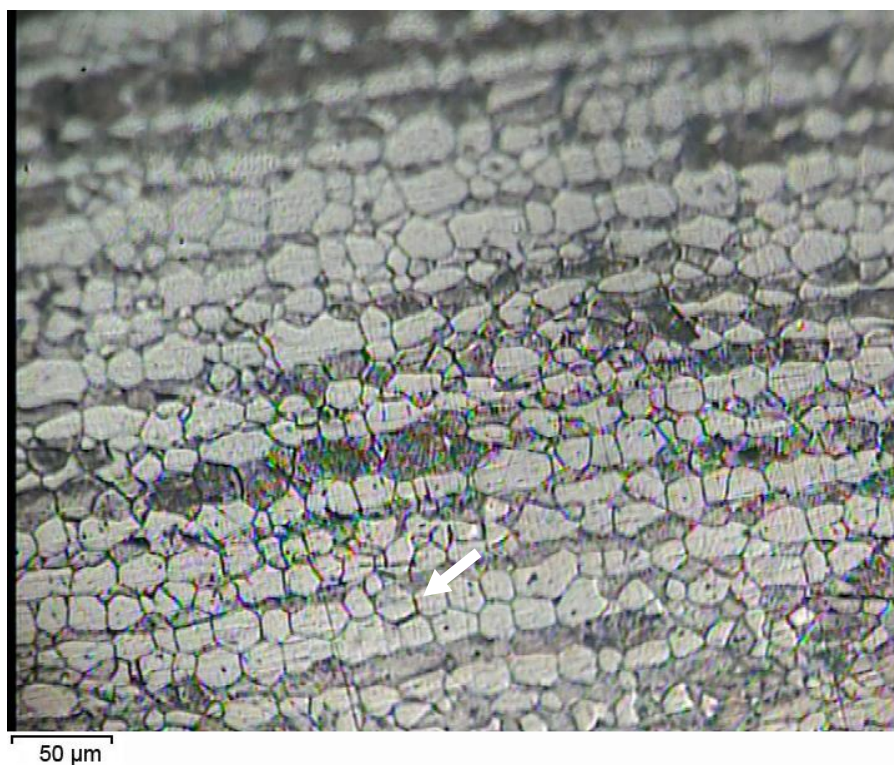


Figura 4.14 Muestra representativa de la condición A, aumento de 200x

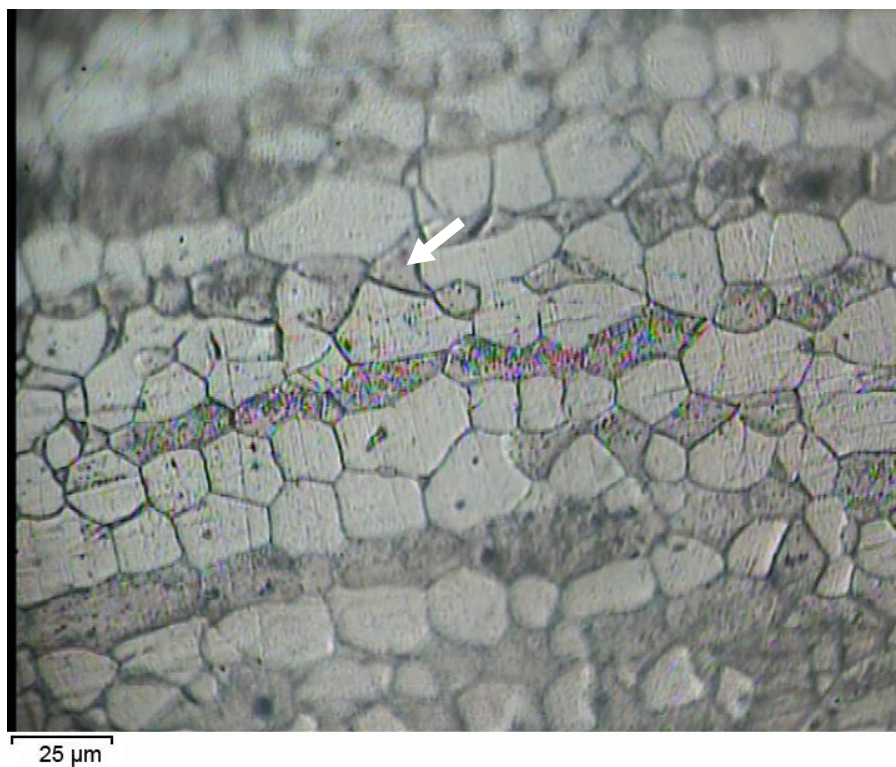


Figura 4.15 Muestra representativa de la condición A, aumento de 400x

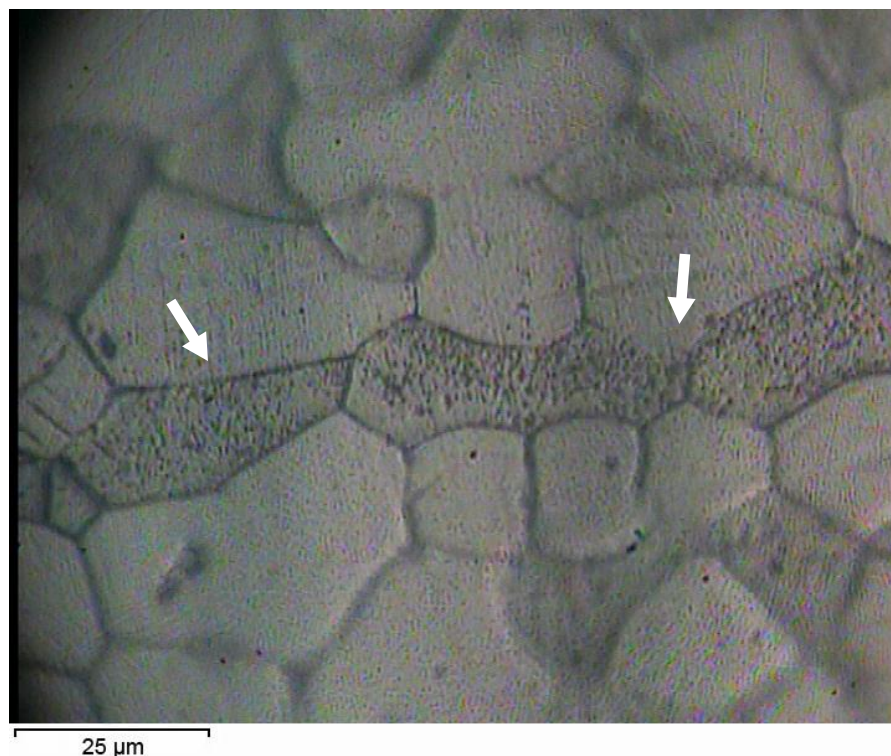


Figura 4.16 Muestra representativa de la condición A, aumento de 1000x

Las muestras expuestas al medio con la menor intensidad de corriente recibieron un ataque mínimo, a pesar de que los granos se observan de una manera definida existe una gran cantidad de carburos que se precipitaron alrededor de toda la superficie sobretodo en la fase ferrítica.

Al incrementar el aumento del lente se observa una diferencia entre la tonalidad de los granos, indicando la estructura bifásica, igualmente existe en gran cantidad la formación de carburos que generan manchas alrededor del material. Sin embargo no se observan daños mayores en la microestructura y se sospecha que los defectos existentes son inherentes al material inicial o a los procesos llevados a cabo anterior a la observación.

Los granos se diferencian claramente así como las fases presentes, se consiguen ciertas irregularidades en el material, entre ellas límites bien definidos que podrían generar imperfecciones dentro de la microestructura granítica.

Para el mayor aumento disponible en el microscopio, se corroboran las opiniones emitidas anteriormente, los límites de grano no sufrieron un daño significativo, y solo es posible observar algunos defectos aislados. Otra característica destacable de la imagen es la notable diferencia entre la austenita y la ferrita.

4.4.1.2 Muestras expuestas al ácido a 8V durante 2 minutos (Condición B)

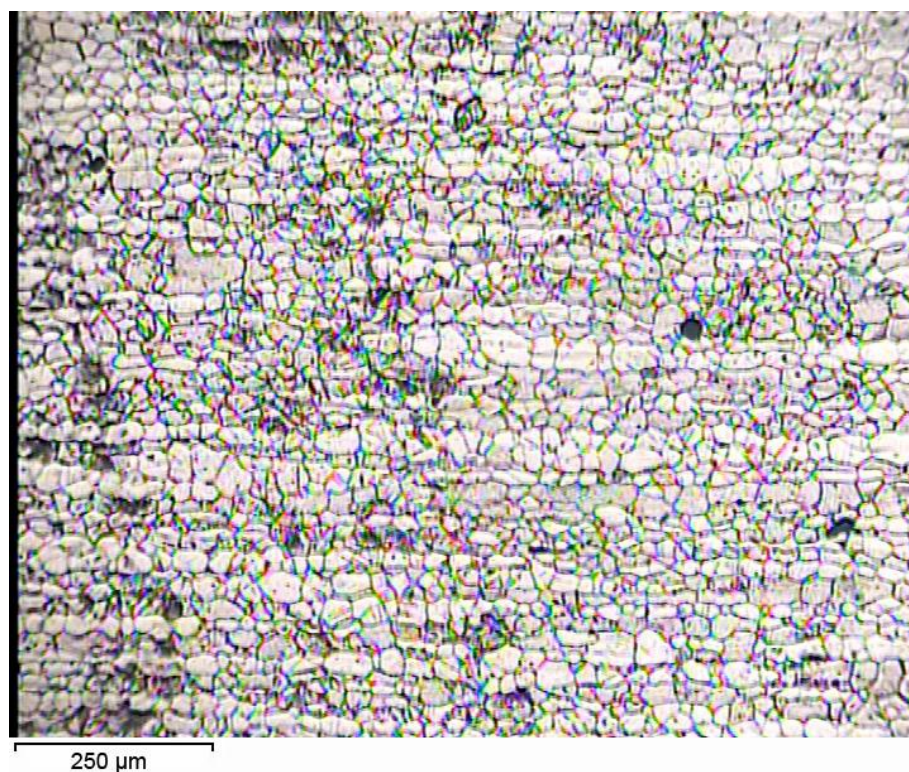


Figura 4.17 Muestra representativa de la condición B, aumento de 100x

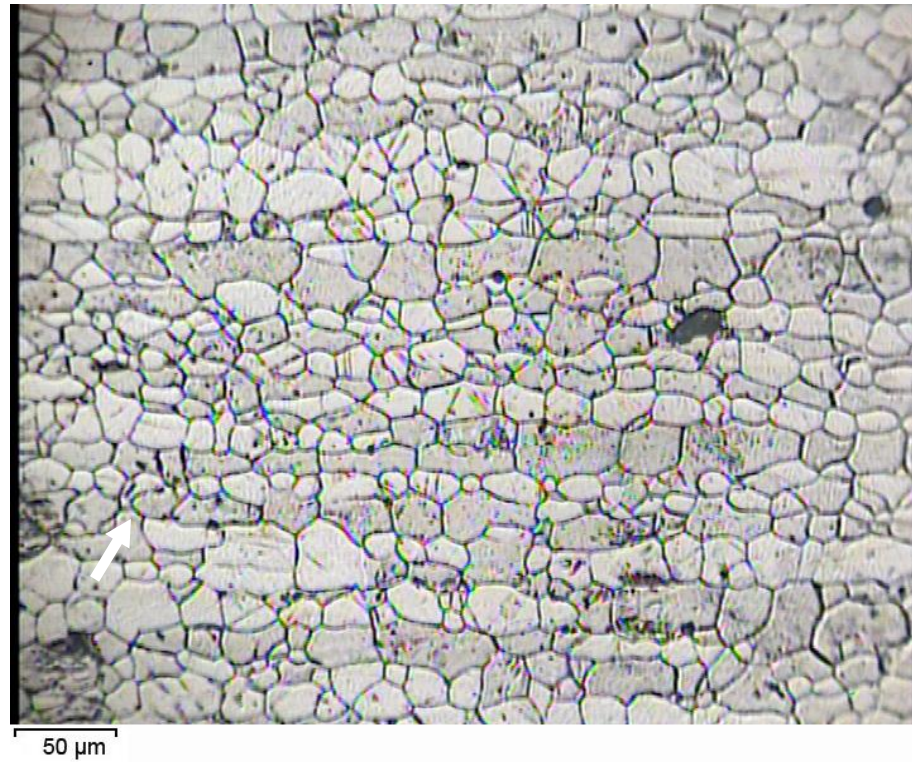


Figura 4.18 Muestra representativa de la condición B, aumento de 200x

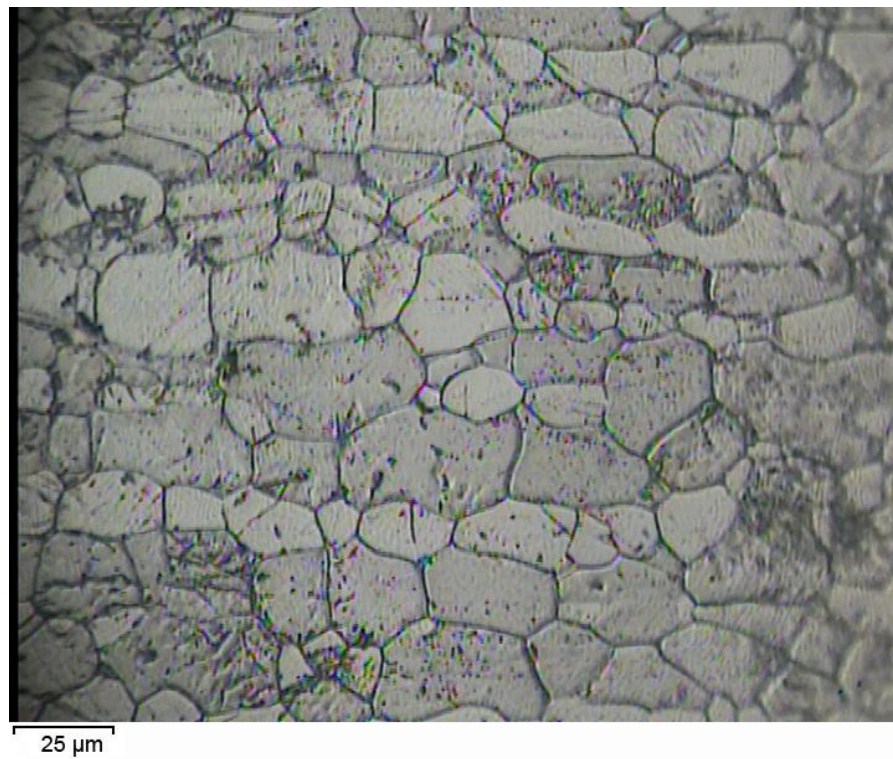


Figura 4.19 Muestra representativa de la condición B, aumento de 400x



Figura 4.20 Muestra representativa de la condición B, aumento de 1000x

En general, para las muestras expuestas a 8V se tiene un mayor deterioro superficial macroscópico, sin embargo al observar las estructuras en el microscopio se develan los granos de una manera clara, con zonas ennegrecidas.

Similar a lo ocurrido en la condición anterior, las fases se distinguen debido a la tonalidad y es posible hallar defectos aislados como bordes de grano afectados y maclas. Es viable que algunos de estos defectos se hayan acentuado en la exposición al ácido.

En la vista a 400x no se detallan mayores defectos, la ferrita o grano grisáceo se encuentra más afectada que la austenita, igualmente se observan defectos generales del material y un alto nivel de partículas adheridas a las

zonas más oscuras, posiblemente restos de sucios y óxidos que se generaron durante la exposición.

El aumento más cercano revela granos más afectados que otros, como se menciona anteriormente, sin embargo se evidencia una leve corrosión intergranular.

4.4.1.2 Muestras expuestas al ácido a 10V durante 2 minutos (Condición C)

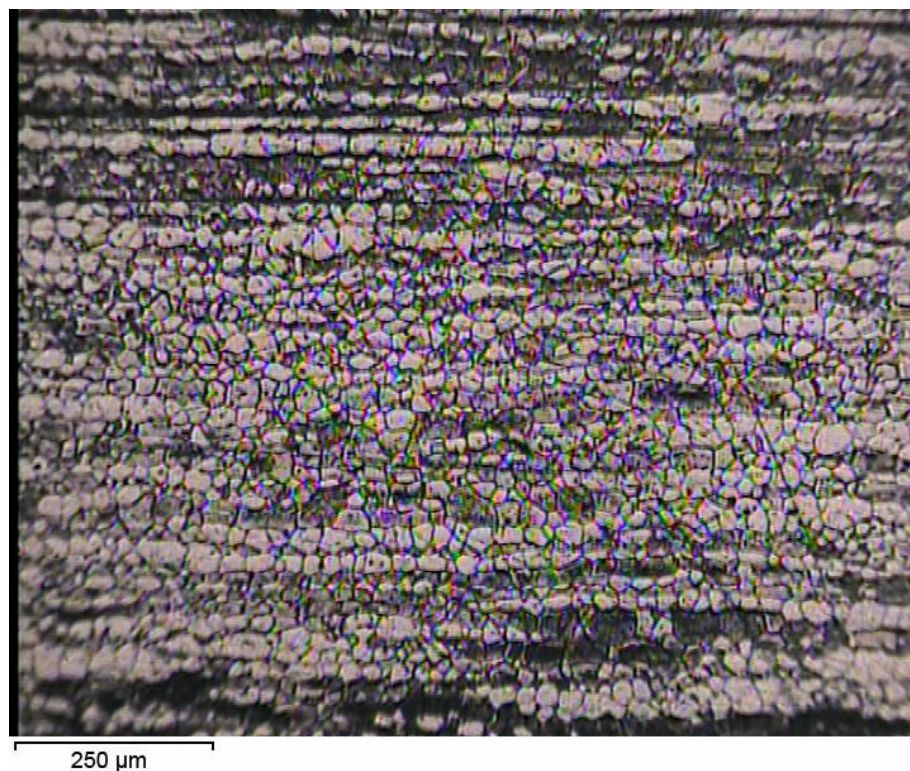


Figura 4.21 Muestra representativa de la condición C, aumento de 100x

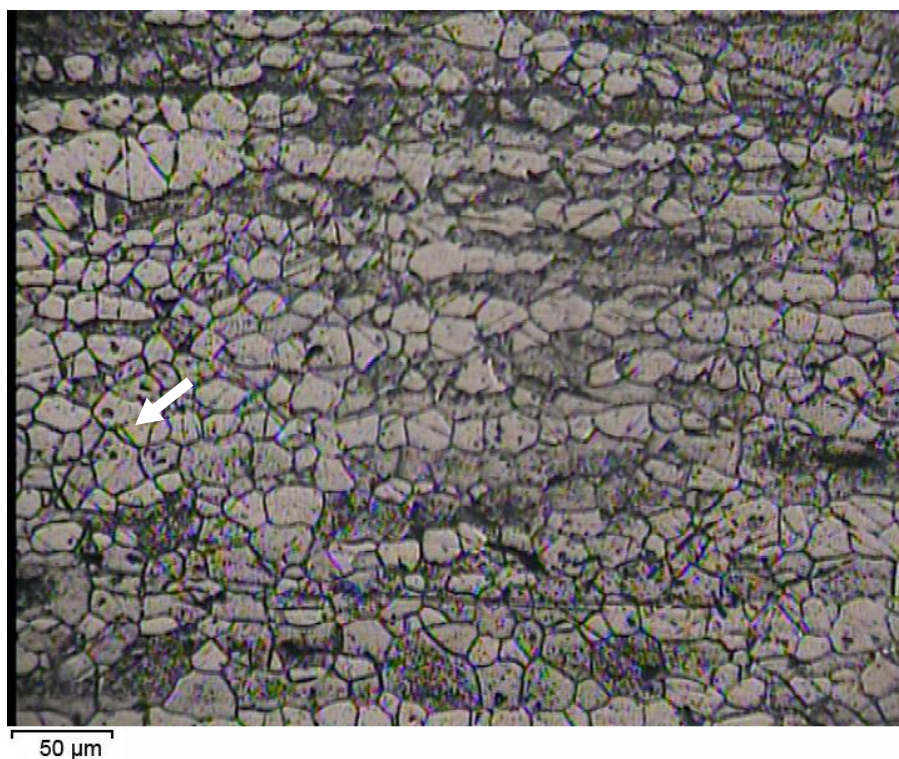


Figura 4.22 Muestra representativa de la condición C, aumento de 200x

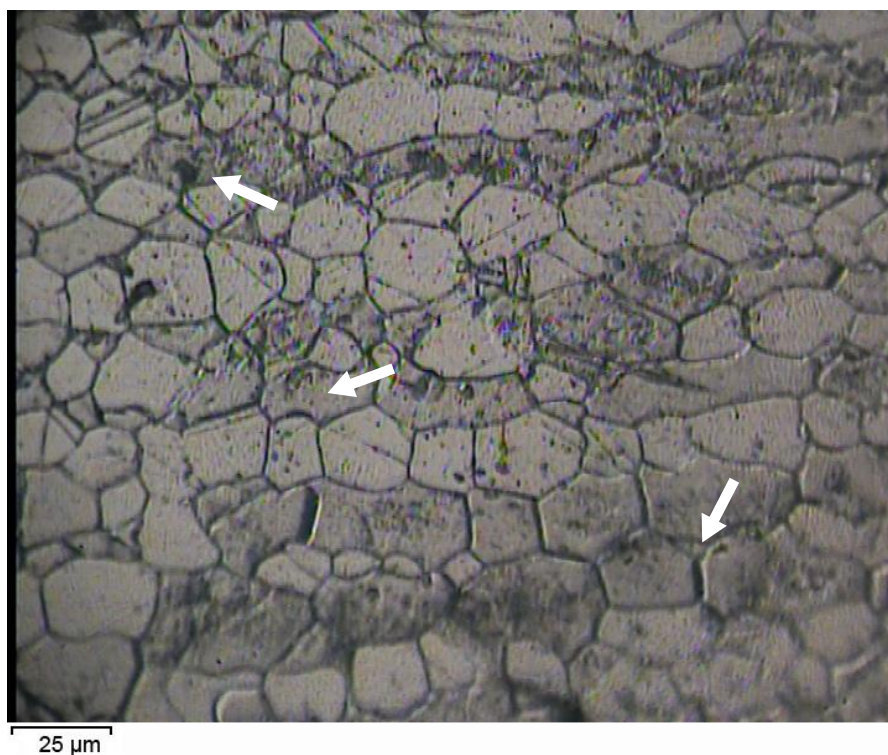


Figura 4.23 Muestra representativa de la condición C, aumento de 400x

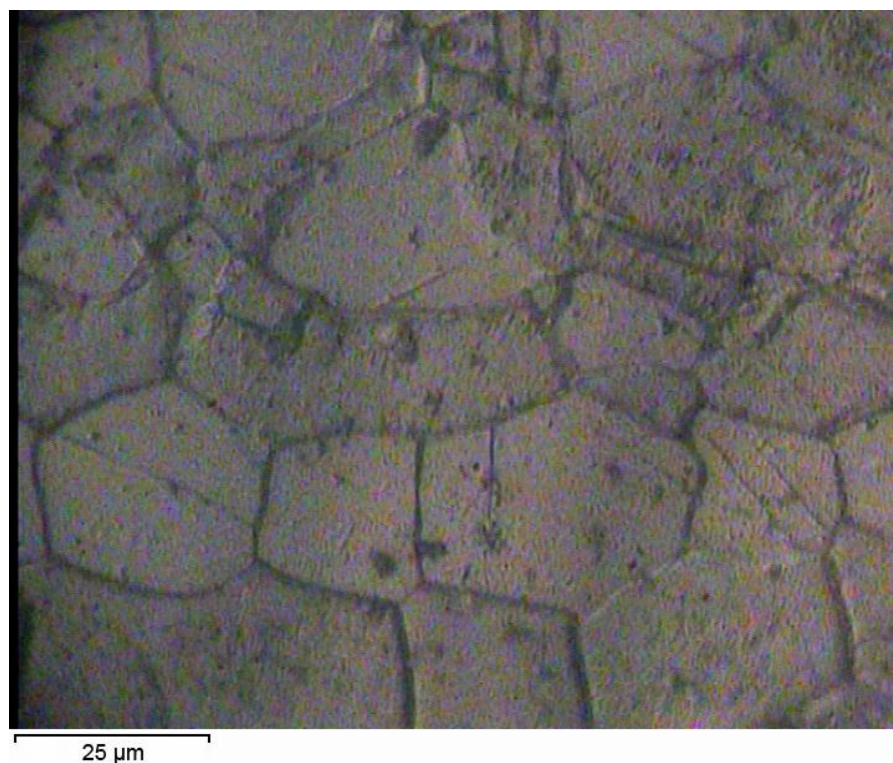


Figura 4.24 Muestra representativa de la condición C, aumento de 1000x

Las condiciones generales o representativas de las muestras expuestas con una diferencia de potencial de 10V, muestran una microestructura afectada con zonas sobre-expuestas oscurecidas, en algunas de las muestras se intensificaron en cierta medida los defectos como rayas u hoyuelos propios del material inicial.

En la figura anterior se denotan los bordes de grano bastante marcados, así como algunos bordes separados formando concentradores, sin embargo, estos no llegan a formar grietas características de materiales corroídos. Algunas maclas u otros defectos se acentúan y generan irregularidades dentro de la matriz del material.

Lo que se observa en la Figura 4.23 es el aumento de 400x de la condición C, algunos bordes de grano se encuentran marcados y levemente separados. Se presentan defectos del material tenuemente acentuados por la

exposición al ácido, como lo son las maclas. A grandes rasgos se puede decir que es una de las estructuras más afectadas.

El aumento mayor en la muestra revela la naturaleza de los defectos observados, existen bastantes irregularidades en la visualización, mas no se destaca ninguna grieta o elemento que pudiese afectar de manera drástica la resistencia del material, no se observó una corrosión o susceptibilidad intergranular severa, sino pequeñas singularidades reservadas a ciertas zonas de la muestra.

Tomas superficiales adicionales tomadas con MEB

Adicionalmente a las imágenes de fractografía, se desea analizar con más minuciosidad y exactitud algunas de las superficies afectadas en las muestras de tracción, algunas características observadas en las microscopias ópticas no otorgaban detalles específicos acerca de la naturaleza de ciertos defectos.

Por ello, se tomaron algunas imágenes de la superficie de las probetas señaladas, se visualizan defectos importantes aislados que comprenden bordes de grano bastante definidos que parecieran abrirse alrededor de las fronteras, esto lo observamos en la imagen 4.26 hacia el fondo. En la imagen 4.25 se observa como un conjunto de bordes de grano parecieran ampliarse a lo largo de una misma sección, debido a la formación y acumulación de carburos. Esto indica la acumulación de defectos que podría resultar en futuras grietas dentro del material si se aplican esfuerzos considerables. Cabe destacar que estos defectos son aislados y no forman parte predominante del material.

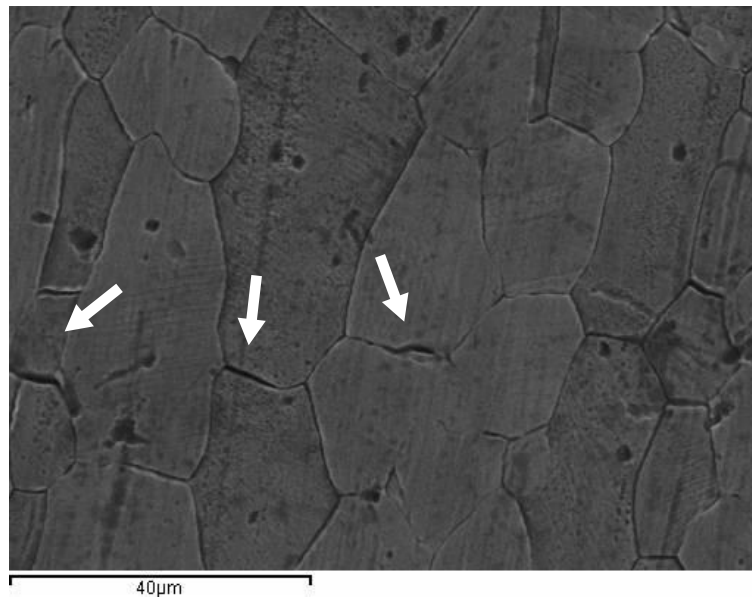


Figura 4.25 Imágenes superficiales adicionales tomadas mediante MEB, Probeta A6

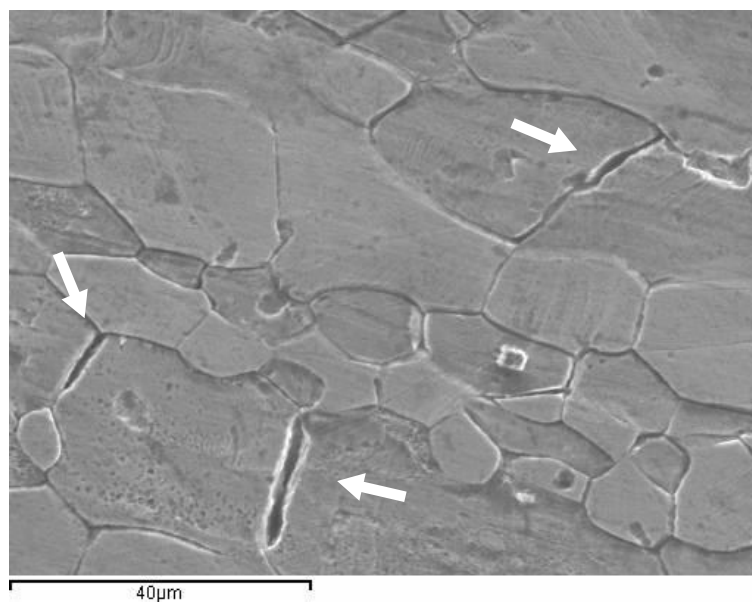


Figura 4.26 Imágenes superficiales adicionales tomadas mediante MEB, Probeta B6

4.4.2 Observación de Fracturas

En las figuras 4.27 y 4.28 se tienen las fracturas tipo de las muestras ensayadas a tracción y a impacto tipo Charpy respectivamente. En la fractura de la muestra de tracción es evidente el tipo Copa – Cono, una de las secciones es sobresaliente y calza junto a la sección contraria más profunda, los análisis más rigurosos de la fractura se aplican mediante el ensayo MEB, donde se verifica la naturaleza de la misma.



Figura 4.27 Fractura Tipo de muestra ensayada a Tracción

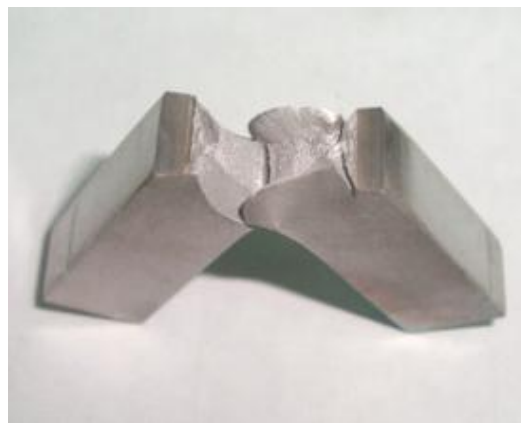


Figura 4.28 Fractura Tipo de muestra ensayada a Impacto tipo Charpy, Total (Izquierda) y Parcial (Derecha)

Aun así, por razón del examen macroscópico de las mismas se puede observar que existe una cantidad de signos que indican el tipo de fractura que tienen las probetas: en primera instancia existe el hecho de que ambas probetas presentaron una gran cantidad de deformación durante el ensayo y también se formó encuellamiento, lo que sugiere una fractura dúctil. Las probetas de ensayo Charpy presentaron fracturas variadas, en su mayoría parciales, en la figura 4.28 se visualiza una de las muestras fracturadas, existe de la misma manera una zona sobresaliente y otra que le corresponde conocida como labios de cortante. Por el simple hecho de que las probetas de impacto no hayan roto en su totalidad, este es un indicativo de que el material es bastante dúctil, ya que tiene la capacidad de absorber gran cantidad de energía sin romperse. Sin embargo en la zona de fractura se observan zonas de brillantes hacia el borde y zonas opacas más hacia el centro, lo que sugiere que existen zonas frágiles y dúctiles respectivamente, por lo tanto ambas fracturas son calificadas como tipo mixta.

4.4.3 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Una vez realizado el análisis macroscópico se realizó el microscópico apoyado en base a la microscopía electrónica de barrido realizada. Para ello por cada condición se tomaron imágenes de 388x, 775x, y 2000x para observar la superficie de fractura. Primeramente en las figuras 4.29, 4.30 y 4.31 se observan los aumentos realizados para la probeta A3 (impacto) con la condición de 6V.

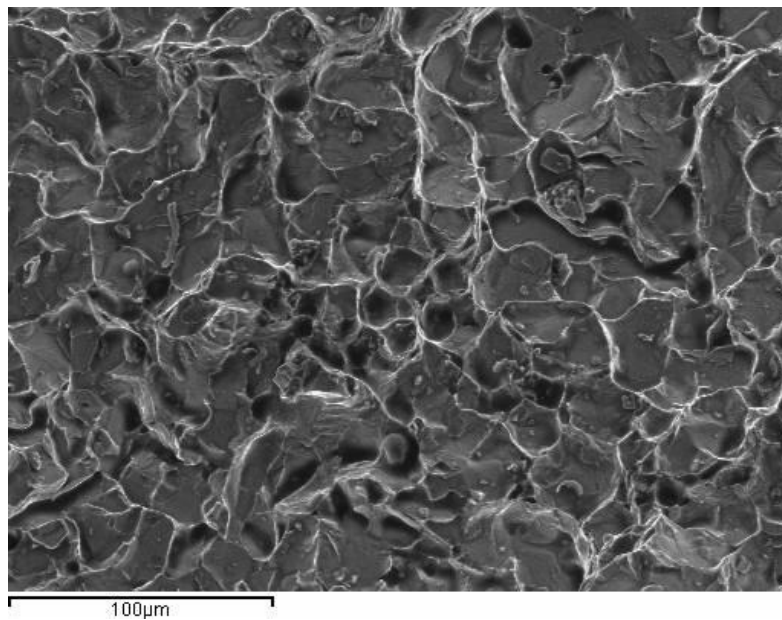


Figura 4.29 Superficie de fractura de A3 con aumento de 388x.

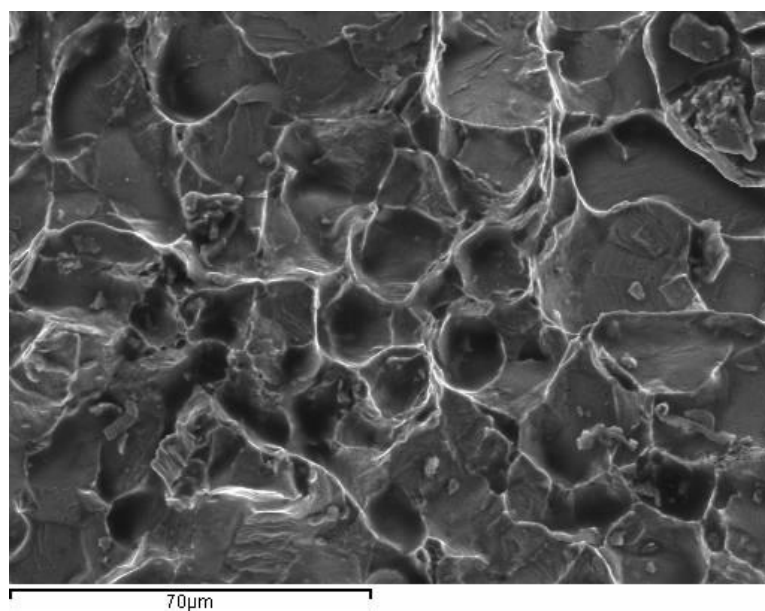


Figura 4.30 Superficie de fractura de A3 con aumento de 775x.

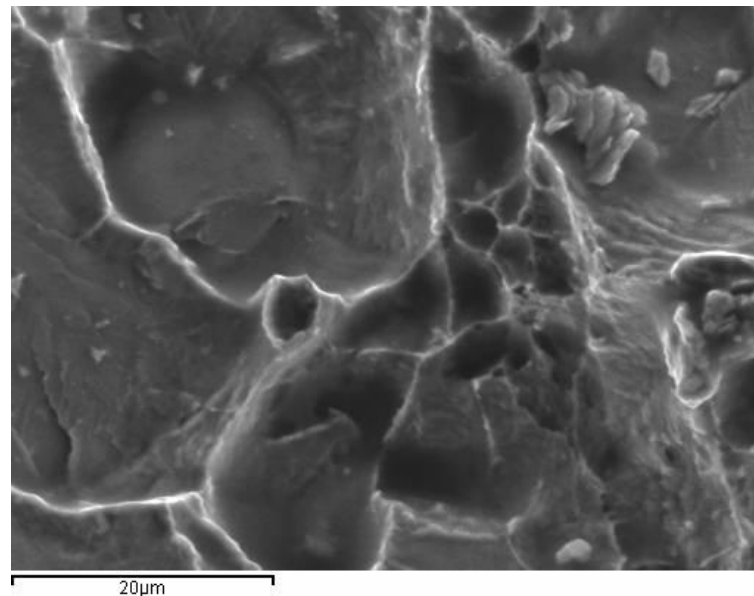


Figura 4.31 Superficie de fractura de A3 con aumento de 2000x.

Ahora bien se presentan a continuación en las figuras 4.32, 4.33, y 4.34 las imágenes representativas a la muestra B3 (impacto) que refleja la condición de 8V.

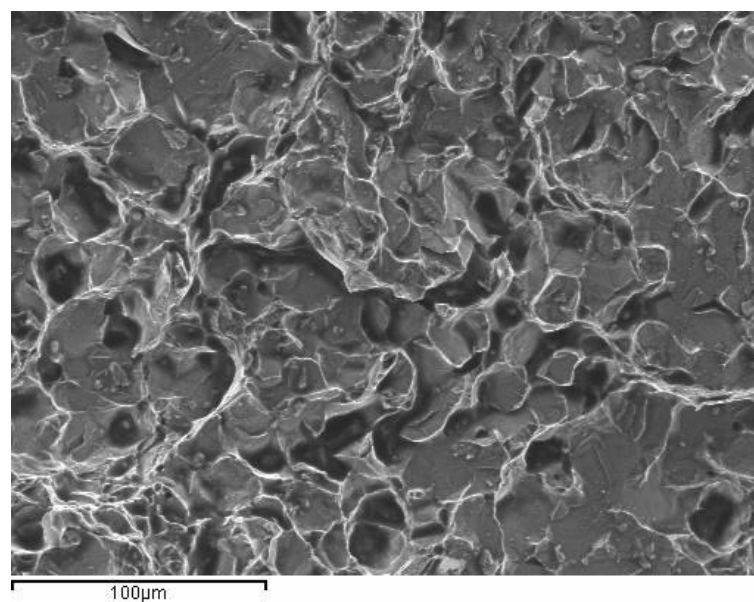


Figura 4.32 Superficie de fractura de B3 con aumento de 388x.

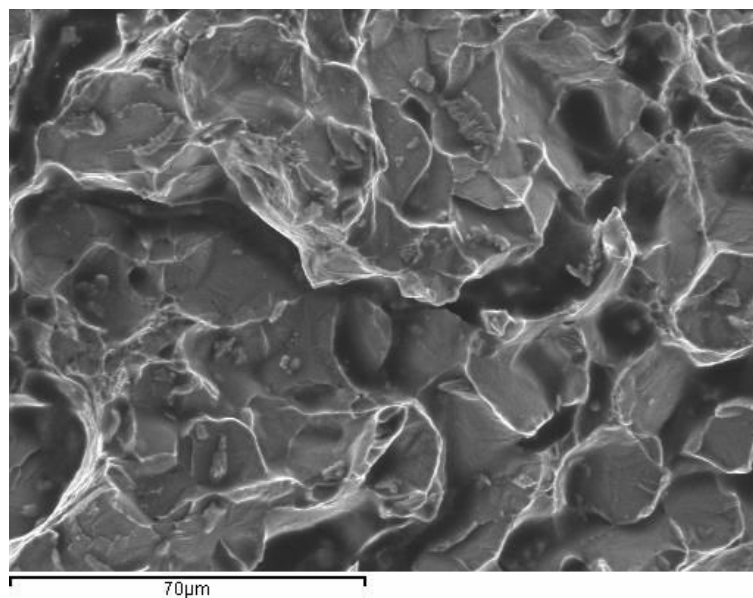


Figura 4.33 Superficie de fractura de B3 con aumento de 775x.

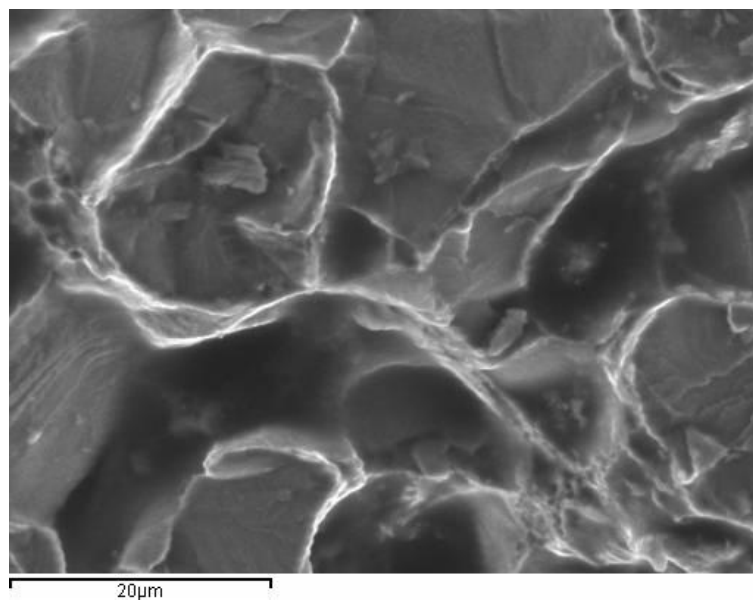


Figura 4.34 Superficie de fractura de B3 con aumento de 2000x.

Por último, a continuación, se muestran las imágenes captadas de las probetas C5 (impacto) con la condición de 10V, correspondientes a las figuras 4.35, 4.36 y 4.37

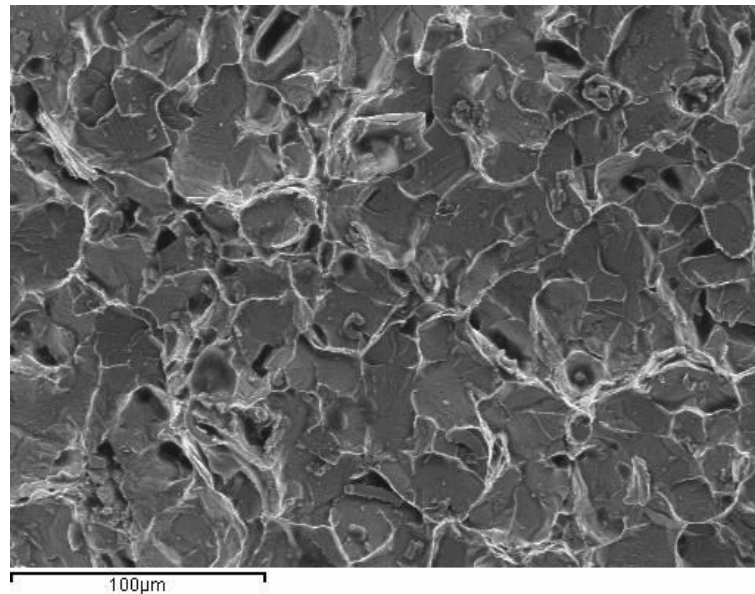


Figura 4.35 Superficie de fractura de C5 con aumento de 388x.

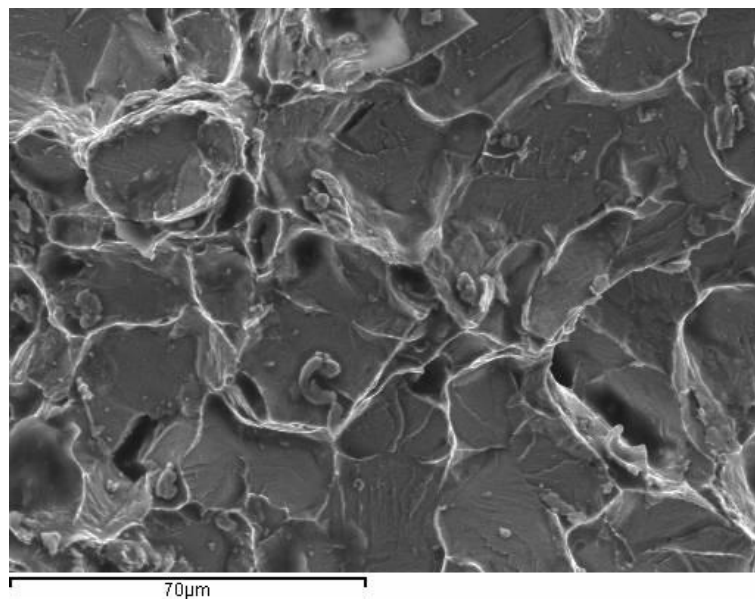


Figura 4.36 Superficie de fractura de C5 con aumento de 775x

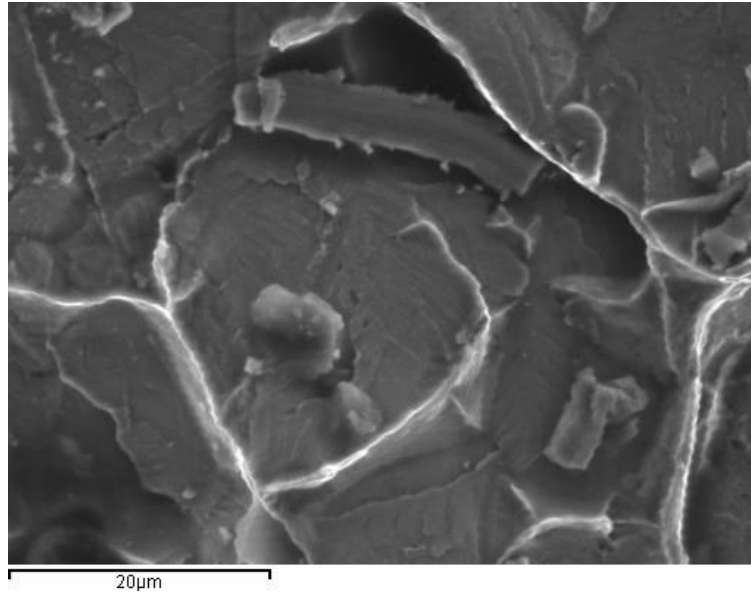


Figura 4.37 Superficie de fractura de C5 con aumento de 2000x.

Ya observado los resultados de las imágenes captadas se puede determinar que existe una cantidad significativa de dimples presentes a lo largo de toda la microestructura, sin importar la condición tomada, además cabe resaltar que hay presencia de clivaje en la zona de fractura y también se observan algunas facetas de ruptura intergranulares, indicando fragilidad, además se visualizan a lo largo de la superficie gran cantidad de carburos, mostrándose como pequeñas partículas de tonalidad diferente a los granos. A nivel de las 2000x no se observan rastros de estrías de fatiga ni deslizamiento de los granos con respecto a las otras, ambas características de rupturas frágiles.

Adicionalmente se tomaron muestras para la condición más crítica de la zona de fractura en el borde de la misma para observar si existen cambios en

el tipo de fractura debido a que a exposición al ácido tuvo un alcance poco profundo, y fue más evidente a nivel superficial, se obtuvo la imagen que se observa en la figura 4.38.

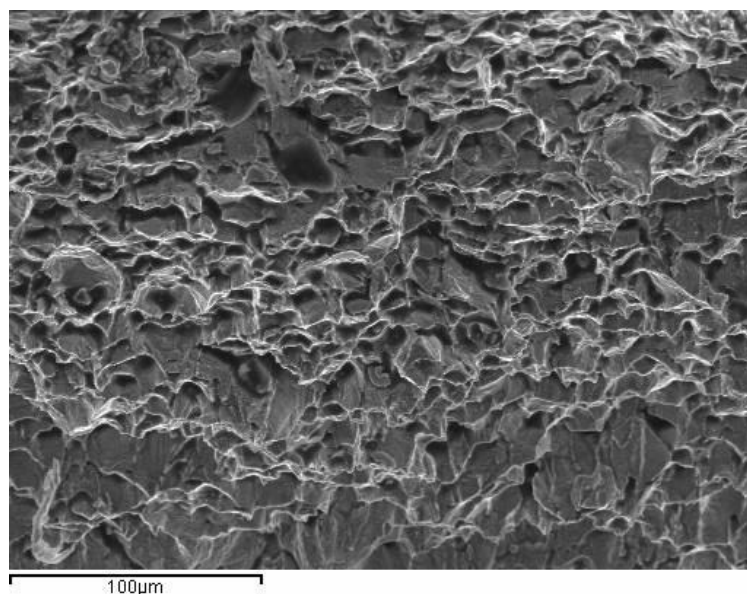


Figura 4.38 Borde de superficie de fractura de C5 con aumento de 388x.

En esa imagen observada se ven sencillamente las mismas propiedades anteriormente discutidas pero magnificadas, es decir, existe una cantidad muy superior de dimples, y sin embargo también se observan varias zonas de clivajes. Por ello se puede concluir que la fractura es netamente mixta.

Ahora bien, también se tomaron muestras de la superficie de fractura a nivel de las probetas de tracción utilizadas, se escogió capturar la copa en la fractografía y el resultado se muestra en las figuras 4.39, 4.40 y 4.41 de la condición de 6V, ya que es la probeta A6 (tracción).

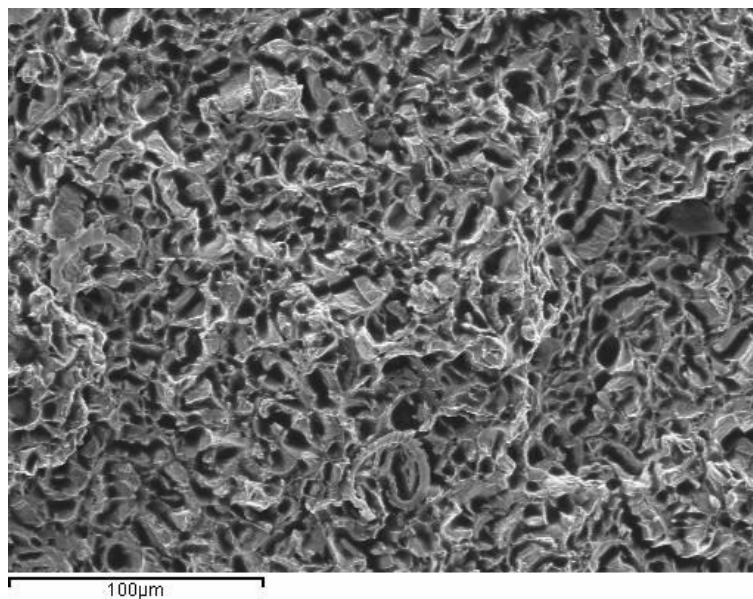


Figura 4.39 Superficie de fractura de A6 con aumento de 388x.

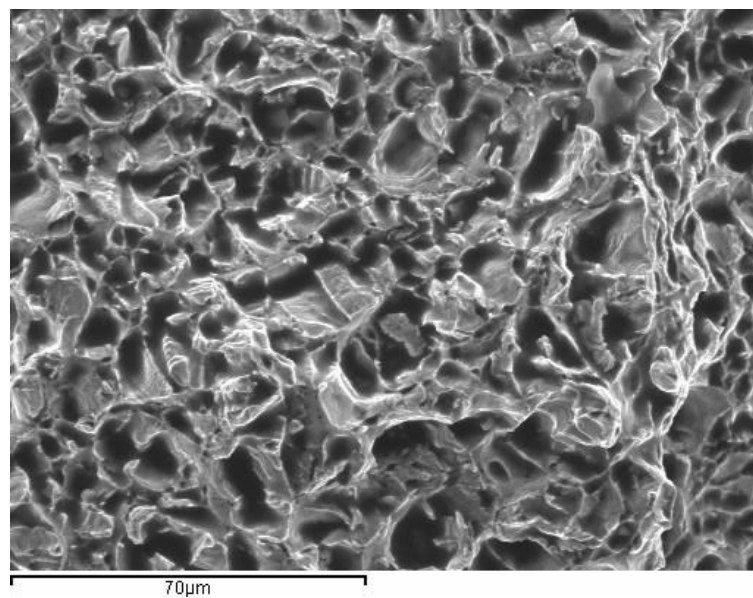


Figura 4.40 Superficie de fractura de A6 con aumento de 775x.

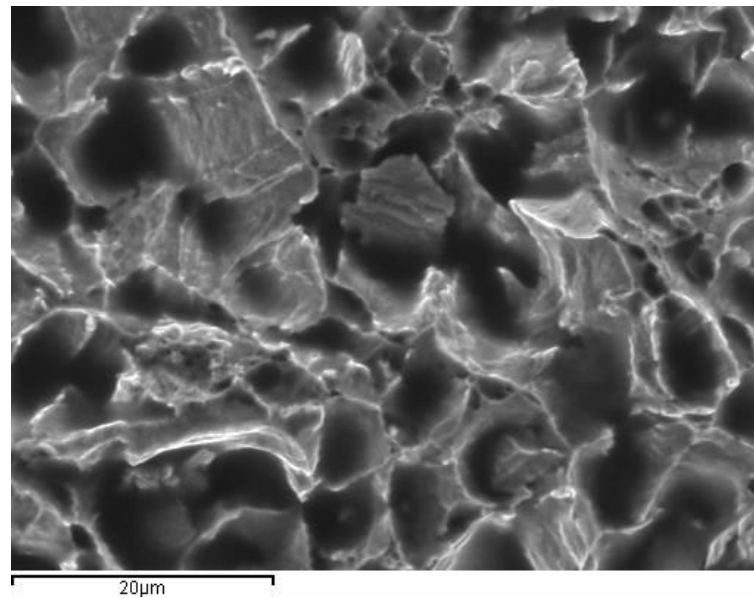


Figura 4.41 Superficie de fractura de A6 con aumento de 2000x.

Seguidamente se muestran las figuras correspondientes a la muestra B6 (tracción) correspondiente al período de 8V en las figuras 4.42, 4.43 y 4.44

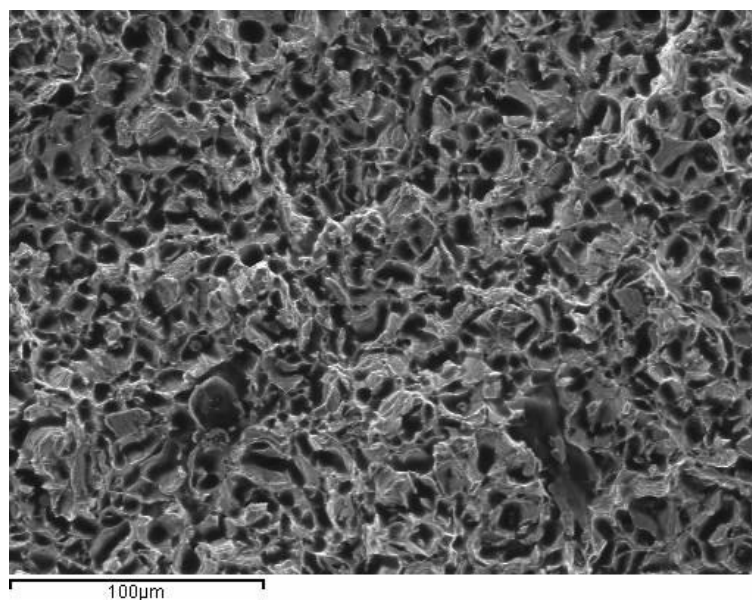


Figura 4.42 Superficie de fractura de B6 con aumento de 388x

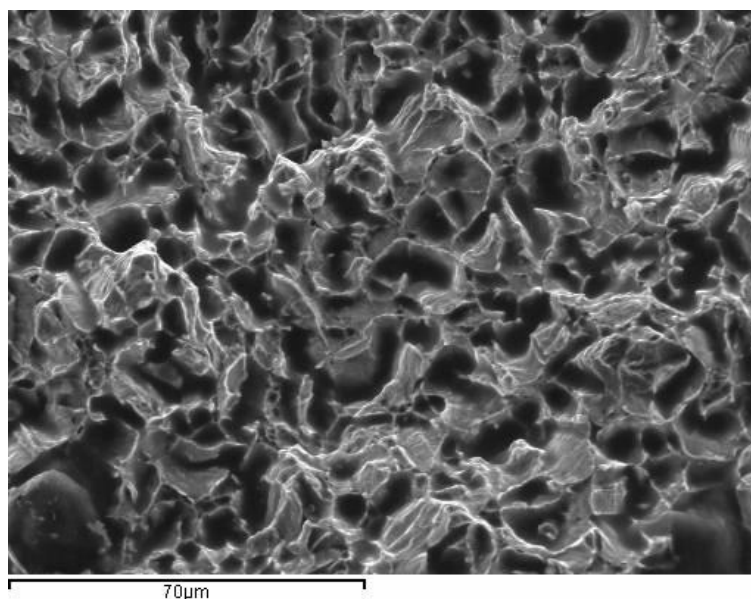


Figura 4.43 Superficie de fractura de B6 con aumento de 775x.

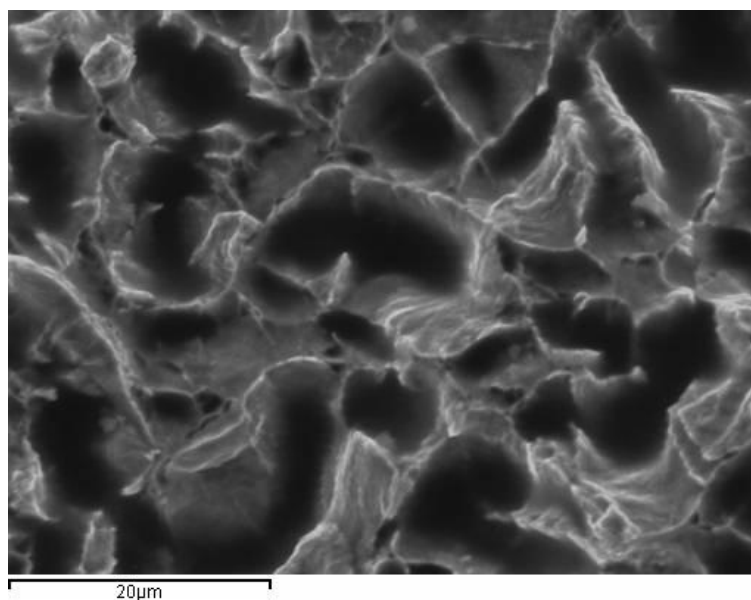


Figura 4.44 Superficie de fractura de B6 con aumento de 2000x.

Por último se muestran las imágenes correspondientes a la probeta C7 (tracción) del período de 10V para los mismos aumentos en las figuras 4.45, 4.46 y 4.47.

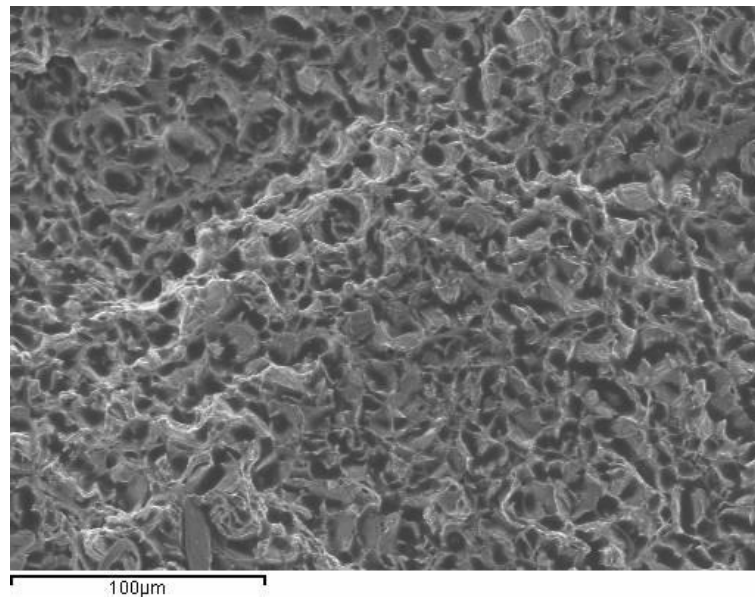


Figura 4.45 Superficie de fractura de C7 con aumento de 388x.

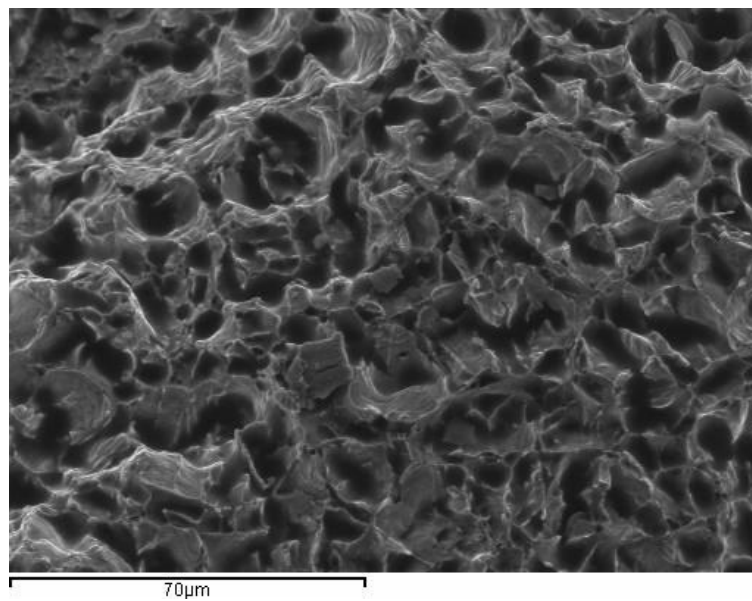


Figura 4.46 Superficie de fractura de C7 con aumento de 775x.

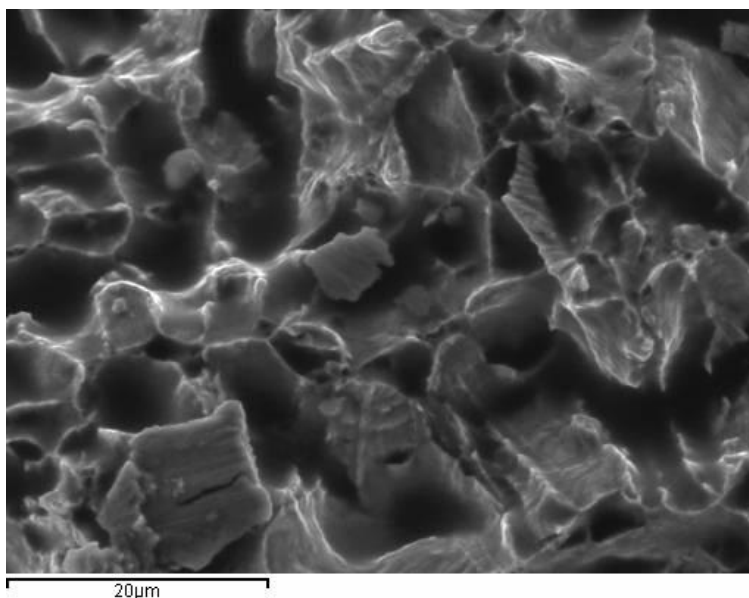


Figura 4.47 Superficie de fractura de C7 con aumento de 2000x.

Observando las imágenes obtenidas en tracción se puede determinar que las condiciones de fracturas para todos los períodos son exactamente iguales y no hay cambios significativos entre los mismos. La superficie en sí es algo diferente a la de las probetas de impacto, sin embargo los elementos son similares; los dimples son mucho más comunes y numerosos en esta superficie y se observa facetas de clivaje en la misma significando esto que la fractura no es totalmente dúctil sino que posee características frágiles.

Así como en el caso de las probetas de impacto, para la condición más crítica (10V) se tomaron imágenes del borde de la superficie de fractura para observar si existen cambios con respecto al centro de la misma y se puede observar en la figura 4.48.

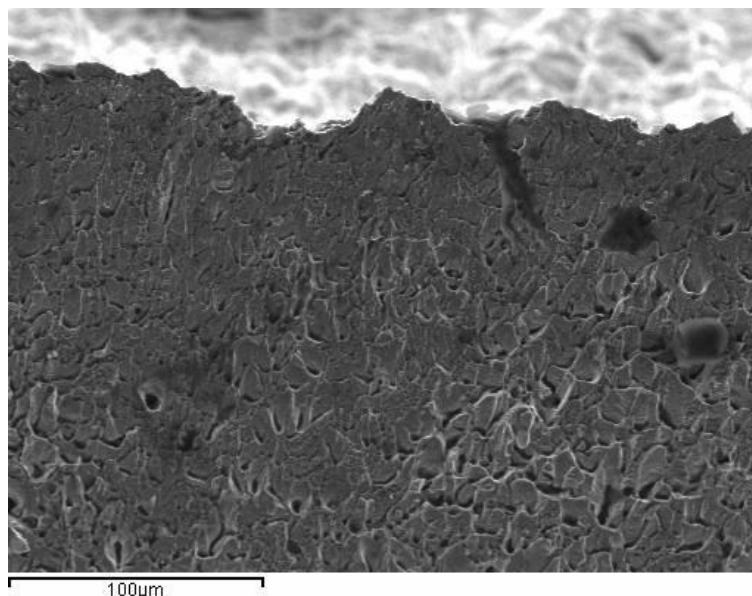


Figura 4.48 Borde de superficie de fractura de C7 con aumento de 388x.

Aquí, los dimples están más dispersos que en el centro. Se observan características de clivaje hacia los bordes.

En las imágenes obtenidas por el MEB de la parte superficial de las probetas ayuda a corroborar que hubo cierto deterioro intergranular del material, ya que en varias de ellas para las diferentes condiciones se logran ver la profundidad que hay entre los bordes de grano, sin embargo estos defectos fueron muy puntuales y son debidos a la segregación de carburos durante la sensibilización y la exposición al ácido.

Por otro lado también se denota que la fase más atacada es la ferrita, aunque se nota que en algunas zonas los granos de Austenita no están bien diferenciados. Las probetas de la condición más baja son las que resultaron menos atacadas, pudiéndose diferenciar mejor los granos de ambas fases. En el caso de las probetas con la condición intermedia se pueden observar de igual manera los granos, mas sin embargo existe un mayor deterioro en los bordes de grano de las fases presentes. Para la condición más fuerte se

denota un menoscabo mucho mayor, en donde ya los granos de la ferrita no son diferenciables unos de los otros y la Austenita si prevalece marcada y también se ve bastante deterioro superficial general.

4.5 Discusión de resultados

4.5.1 Comparación de resultados en ensayo de Tracción.

Tomando en cuenta los valores obtenidos del esfuerzo de fluencia, se observó que la variación máxima entre los promedios de las diferentes condiciones es de alrededor del 2,1%, siendo este valor despreciable para aseverar que hubo cambios significativos debidos a la corrosión en el material. Por otra parte comparando los valores que se tienen de condición original con el mínimo obtenido (siendo el más crítico) se observa que existe una diferencia del 3,7%, que tampoco es un cambio representativo, y puede deberse a que el dato del esfuerzo en condiciones originales fue obtenido del fabricante y no bajo la misma máquina de ensayo.

Seguidamente se tienen los valores de esfuerzo máximo, los cuales varían en hasta un 1% entre las condiciones A, B y C, y en 9,7% aproximadamente comparando el mínimo obtenido con el valor del material en condición original.

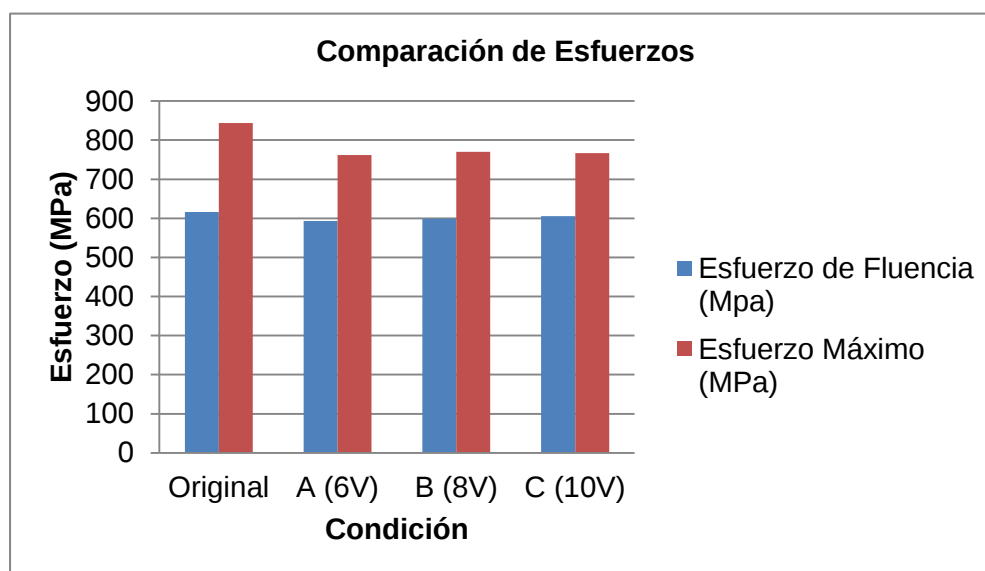


Figura 4.49 Gráfico comparativo entre Esfuerzos

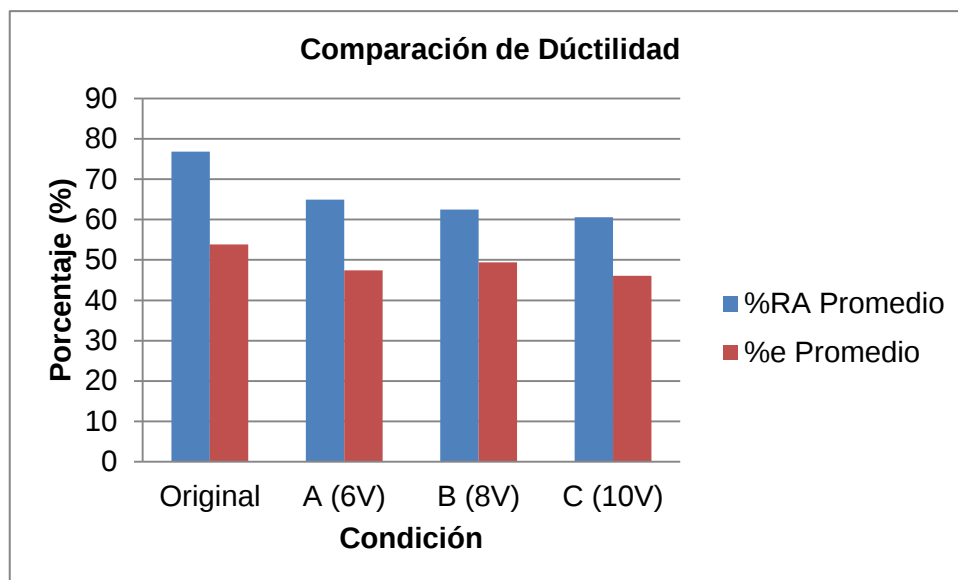


Figura 4.50 Gráfico comparativo de Ductilidad

El comportamiento observado del %RA es variable, ya que el porcentaje de cambio es de alrededor del 6,7% entre los valores máximo y mínimo obtenidos en el proceso de corrosión para las diferentes condiciones, por otra parte comparándolo con las condiciones originales, existe una variación máxima del 21,20% (contra el valor promedio mínimo, obtenido en la condición C). Los cambios son suficientemente amplios como para aseverar que se afecta en cierto modo la ductilidad, específicamente una fragilización del material. Si bien la corriente o diferencia de potencial no son determinantes en aplicaciones específicas, se manipulan de manera tal de que aceleren el proceso de corrosión que podría sufrir un acero Dúplex 2507 durante su limpieza.

En el estudio de la elongación no se observa un comportamiento muy variable; el porcentaje promedio mínimo de elongación se encuentra en la condición C, el máximo lo posee la condición B, se observa una reducción aproximada del 3,6% y, a su vez comparando las condiciones originales se determina un cambio del 14,50%, lo cual se puede atribuir en gran parte a la

sensibilización y por otro lado se debe tomar en cuenta que el porcentaje más crítico lo posee la condición expuesta con mayor diferencia de potencial (C) indicando que el ácido tiene un efecto degradante sobre el material.

En esta perspectiva es necesario recalcar que fue aplicado un tratamiento térmico a la población, generando condiciones críticas en la misma. A pesar de que los valores hayan demostrado cierta tendencia no se observa casi dispersión entre ellos, por lo que es probable que el cambio que pudiesen haber sufrido haya tenido lugar durante el normalizado aplicado y la exposición del ácido haya agravado los cambios en el material.

4.5.2 Comparación de resultados en ensayo de impacto Charpy.

La sensibilización afecta el comportamiento del material de manera determinante. Se debe recordar que el ensayo de la condición original sugiere que la energía absorbida excede la capacidad de la máquina de ensayos, mas sin embargo el resultado obtenido para la condición sensibilizada no puede ser tomado en cuenta como exacto, ya que al haber sido ensayada tan solo una probeta para esta condición se genera un alto grado de incertidumbre. Adicionalmente el estudio de la condición de la sensibilización no forma parte del trabajo de investigación, sino más bien es utilizado como referencia.

Los valores del ensayo de impacto son bastante sensibles e intervienen factores como; el tiempo, calidad de equipos, temperatura, entre otros. De la misma manera afecta la escasez de muestras ya que amplía la dispersión entre los datos.

La condición A presenta un decremento en un orden de 26,30% con respecto a la probeta original, a su vez para la condición B disminuye en 33,6%, finalmente para la condición C el porcentaje de reducción es 45,90%. Comparando los promedios de ambas (condiciones A y C) se tiene una

reducción aproximada de 26,67%. Las diferencias entre las condiciones A y B no son tan drásticas (menos del 10%).

El gráfico mostrado a continuación (Figura 4.51) se construye a propósito de verificar el comportamiento que presentan las EAI de cada condición. Las EAI promedio de las condiciones A, B y C se encuentran por debajo de la condición inicial (146,02 J) tal como se observa en el gráfico 4.51. La fragilización del material se debe en gran parte a la sensitización aplicada y la exposición al ácido apoya este proceso.

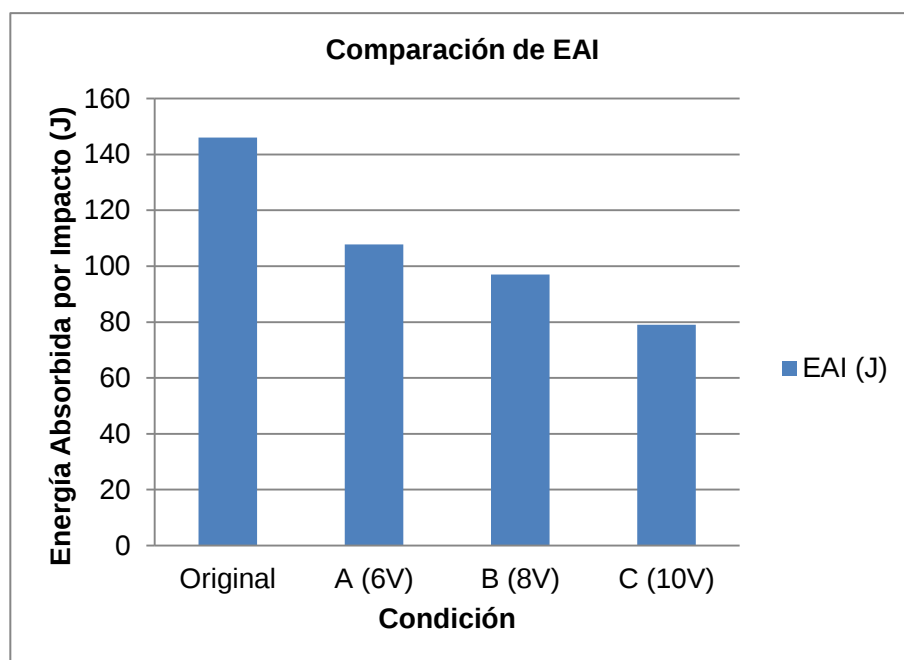


Figura 4.51 Comparación de EAI para las diferentes condiciones

La dispersión entre los valores promedios de la energía absorbida por impacto observados en la gráfica también se debe al hecho de que las probetas al realizar el momento de la sensibilización fueron colocadas en su totalidad simultáneamente en el horno, lo que indica que algunas de ellas estuvieron sometidas a más calor que otras debido a la naturaleza del mismo, formándose así una mayor cantidad de carburos de cromo en ellas, lo que

influye altamente en su tenacidad. A continuación se presenta la gráfica relativa a los resultados del factor de intensidad de esfuerzos.

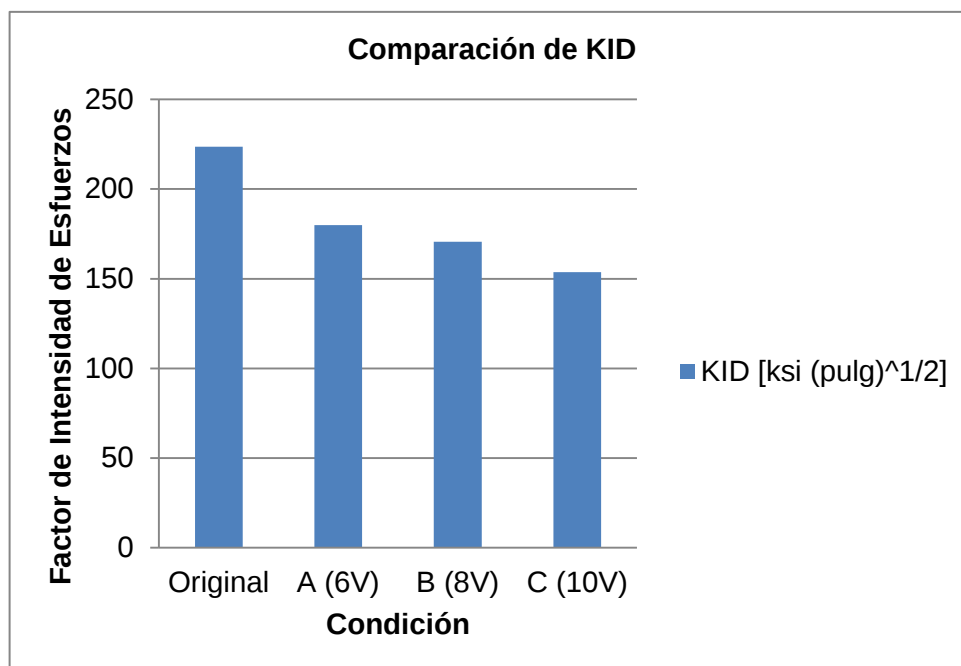


Figura 4.52 Comparación de K_{ID} para las diferentes condiciones

La condición que presenta el valor más crítico de K_{ID} es la condición C, con una disminución de 31,32% respecto a la condición inicial, es importante recordar que mientras más bajo sea el factor K_{ID} el material es más propenso a generar fracturas frágiles, sin embargo debe tenerse en cuenta lo explicado anteriormente. En resumen, se precisa que los resultados referidos al ensayo de impacto, tanto; EAI, como K_{ID} , indican que la causa para el deterioro de la tenacidad es el tratamiento térmico aplicado.

4.5.3 Comparación de resultados en ensayos de dureza.

Gráficos comparativos entre datos de Microdureza y Dureza.

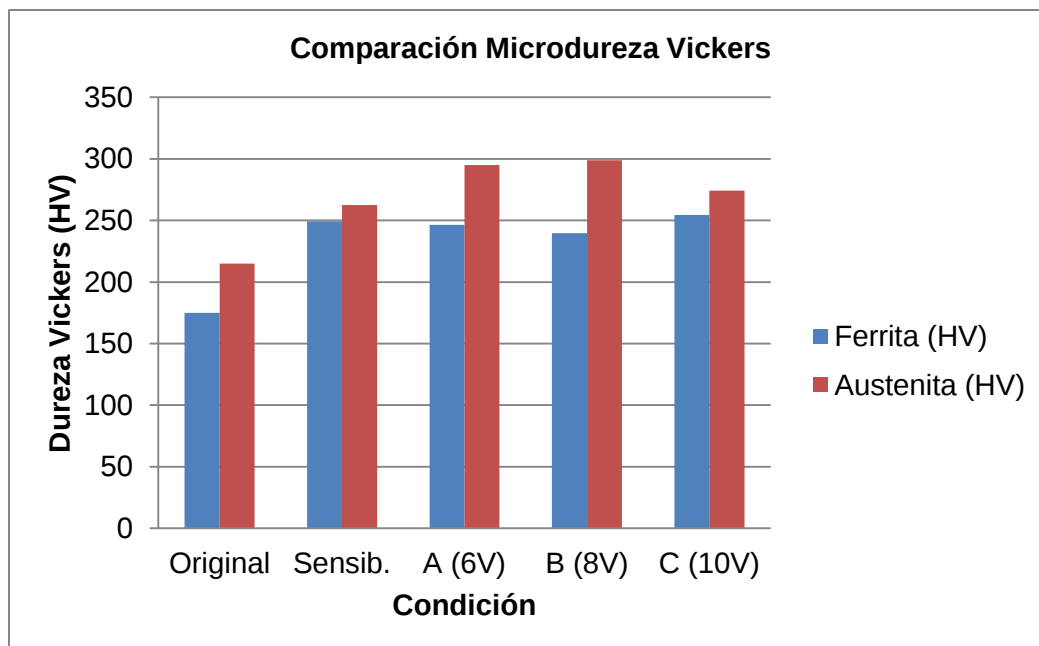


Figura 4.53 Comparación de Microdurezas para cada Condición y Fase

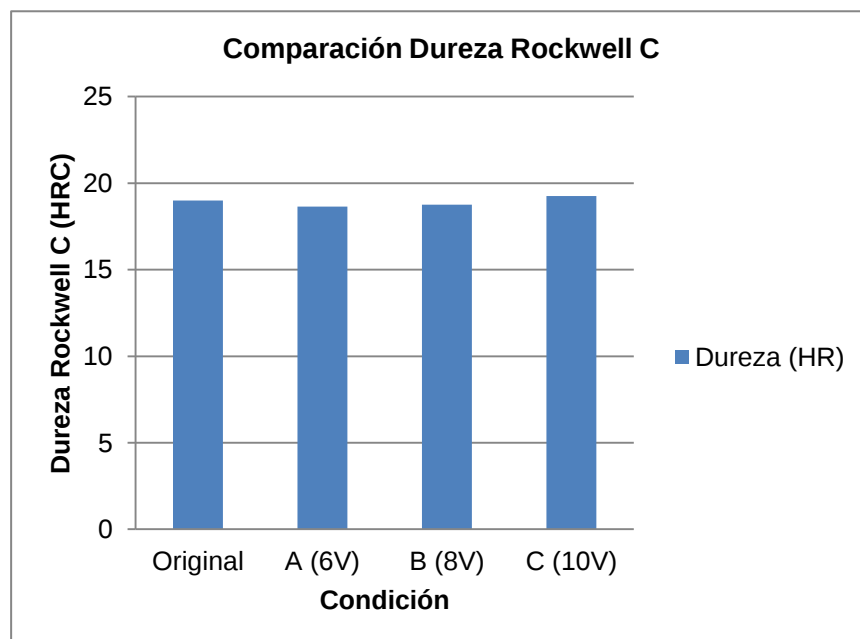


Figura 4.54 Comparación de Dureza Rockwell

Una vez aplicados los ensayos de microdureza referentes a cada fase, se grafican en la figura 4.53 los datos obtenidos para comparar más fácilmente los resultados. Lo primero que se visualiza es que los promedios HV (Dureza Vickers) de la condición C son más cercanos a los valores originales. Existe cierta dispersión debido a la condición de las muestras. Hay una gran cantidad de carburos presentes debido al proceso de sensibilización que fueron observados y se intentó que no afectaran las medidas tomadas.

La microdureza reportada en la fase austenítica se mantiene relativamente constante a lo largo de todas las condiciones desde el proceso de sensibilización, la ferrita disminuye y aumenta sin seguir una tendencia clara por la alta presencia de carburos. Luego de la sensibilización se observa en general un aumento de la dureza con respecto a los valores originales, esto debido probablemente a que dicha sensibilización endureció las fases.

Se observa en lo referente al comportamiento de los microconstituyentes un aumento general en la dureza luego de la sensibilización, sin embargo la tendencia luego del tratamiento no es clara, a grandes rasgos se denota que la microdureza de la austenita se mantiene relativamente constante al aumentar la diferencia de potencial concordando con lo estudiado en la teoría ya que se precisa que la austenita retenga su resistencia por sus fuertes características. La tendencia de la ferrita es oscilante, la cantidad de carburos incluidos en esta fase hace que las medidas no sigan un patrón constante.

Como se puede observar en el gráfico 4.54 a pesar de que los valores varían por muy poco. El incremento total de la dureza Rockwell es de aproximadamente 3,2%, ocurriendo en mayor parte hacia la condición C (10V). Sin embargo estos resultados no son concluyentes del endurecimiento progresivo del material, ya que varían porcentajes muy pequeños entre las condiciones.

4.5.4 Relación entre ensayos mecánicos

Se tiene primeramente que los resultados arrojados por el ensayo de tracción reflejan que la probeta no sufre un cambio significativo a nivel de resistencia general del material, sin embargo hubo una variación en cuanto la ductilidad del mismo, ya que para todos los porcentajes se tienen diferenciaciones de hasta cerca de un 20% pero con respecto a las condiciones originales. Además se tiene que el ácido oxálico genera un cambio adicional en la ductilidad del material.

Por otra parte se tiene que para el ensayo de impacto, el material se ve bastante afectado por el proceso de sensibilización, y sin embargo existe un cambio dentro de las condiciones ensayadas, lo que es debido al contacto con el ácido, lo cual fragiliza al mismo, concordando así con el estudio de ductilidad.

La resistencia al impacto si se vio mayormente afectada más que la parte de tracción debido a que se trata de un ensayo más sensible que depende de muchos más factores. Es evidente la fragilización que sufrió la probeta por el tratamiento térmico realizado, que fue el factor más determinante en los resultados obtenidos, sin embargo también existe el cambio generado por el ácido. También se deben analizar los resultados de la dureza, teniendo en cuenta que la dureza Rockwell en la superficie no cambia a lo largo de todas las condiciones de corrosión ni cambios significativos con respecto al material original (alrededor del 4%). Y este resultado también es apoyado por la microdureza tomada de las fases, ya que al haber un cambio poco perceptible en la dureza de la austenita (alrededor de un 10%), el material mantiene las propiedades de resistencia sin mucha variación; a su vez la ferrita no tiene un comportamiento claro, debido a la cantidad de carburos formados a lo largo de esta fase, por lo que existen no permitiendo una tendencia definida.

CAPÍTULO 5

Conclusiones y Recomendaciones

En el siguiente capítulo se sintetiza en varios puntos los aspectos más relevantes observados y analizados del trabajo realizado, las recomendaciones emitidas se hacen en fin de apoyar futuros trabajos o aplicaciones referentes a la exposición del acero dúplex 2507 a ácido oxálico. Además de ello se recalcan las observaciones y hechos más destacables de los experimentos y estudios.

5.1 Conclusiones

Dentro de los aspectos más destacables del estudio se encuentran los siguientes puntos:

- Se demostró mediante los ensayos realizados que la sensibilización y exposición al ácido afecta la tenacidad al impacto del acero SAF 2507, reduciendo en hasta un 45% la misma, y causa un deterioro en las propiedades del mismo, a pesar de que el factor que infiere cambios mayores a las propiedades del material es el tratamiento de sensibilización aplicado.

- Se determinó que los tiempos de exposición, y el voltaje aplicado al ácido no fueron lo suficientemente agresivos para evidenciar claramente la corrosión intergranular en el acero estudiado, se formaron gran cantidad de carburos durante la sensibilización, mientras otras singularidades microestructurales fueron agravadas por la exposición al ácido.
- Se estableció que las propiedades estáticas del material se mantuvieron en los ensayos de tracción, y dureza Rockwell, solamente se observó un cambio en las propiedades más sensibles; la tenacidad de impacto y la microdureza Vickers.
- Se determinó que los comportamientos de la dureza Vickers se deben a la posición de las probetas dentro del proceso de sensibilización donde ocurre una distribución irregular de la temperatura en las mismas generando la formación desigual de carburos de cromo.

5.2 Recomendaciones

Adicionalmente se mencionan las siguientes recomendaciones para estudios y aplicaciones futuras.

- Aumentar los periodos de exposición de las muestras o la concentración del ácido oxálico para generar un ambiente más agresivo que pueda provocar corrosión intergranular dentro de la microestructura del material.
- Incrementar la temperaturas de sensibilización aproximadamente a 700 u 800°C y las de exposición al ácido a ebullición, para generar condiciones críticas y simular las aplicaciones de trabajo del material, así observar las relaciones que existen entre los deterioros provocados por ambos factores.
- Combinar el medio corrosivo de ácidos orgánicos, ya sea ácido oxálico, acético o fórmico, con diversos tipos de impurezas químicas como lo son los cloruros, iones férricos o cúpricos, aire y peróxidos presentes en inherentes a este tipo de ácidos, dichas impurezas aumentan considerablemente la agresividad corrosiva del medio.

- 128 *Estudio de la tenacidad de impacto del acero dúplex 2507 sometido a corrosión previa por parte de una solución de ácido oxálico al 10% según la norma ASTM 202-02A*

Referencias

- Askeland D., (1996). ***The Science and Engineering of Materials.***
- ASM International, (2003). ***Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection.***
- Kalpakjian S., Schmid S., (2008). ***Manufactura, Ingeniería y Tecnología.***
- Rodríguez M.P., Almagro J.F., Botella J., Valerga P., (2003) ***Cinéticas de transformación de fases a 850°C de aceros inoxidables dúplex clásicos (2205 y 2507) y de uno nuevo de bajo contenido en níquel y alto en manganeso (DBNi).***
- Sánchez L., Gutiérrez-Solana F. (2002), Correlación entre la resistencia al impacto y tenacidad a la fractura en aceros dúplex inoxidables envejecidos. ***From Charpy to Present Impact Testing***, pp. 87 – 94, Oxford: Elsevier Science.
- Sekine I., Okano C., Yuasa M. (1990), The corrosion behaviour of ferritic stainless steel in oxalic acid solutions. ***Corrosion Science***, Vol. 30, No. 4/5, pp. 351 – 366.
- Smith W., Hashemi J., (2004), ***Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales.***
- U.S. Department of Energy., (1993). ***DOE Fundamentals Handbook. Material Science. Volume 2.***
- Yang Z., Su J., y Wang Y. (2009), Investigation on Metallurgical Factors Controlling Charpy Impact Toughness in Duplex Stainless Steel. ***Journal of Iron and Steel Research***, 16(2), 73 – 79.

- 130 *Estudio de la tenacidad de impacto del acero dúplex 2507 sometido a corrosión previa por parte de una solución de ácido oxálico al 10% según la norma ASTM 202-02A*

Anexos



CERTIFICATE No. A/06-560259 Rev 00

Date 2006-03-23 Page 1/2

INSPECTION CERTIFICATE acc to
EN 10 204 3.1

SANVEN STEEL, C.A.
AVENIDA FRANCISCO DE MIRANDA
TORRE LA PRIMERA.PISO 4 OFC 4A
CAMPO ALEGRE/CARACAS 1060
VENEZUELA

Customer References		Sandvik References	
SMT-2006-22-UC	Customer order 2006-03-22	Order No.	Subs No. ABSMT Dispatch note 46757/53
610-06379 SANVEN		ABSMT No.	C.Code 284-63430 72
Material description		Steel/material Designations	
HOT WORKED STAINLESS BAR STEEL		Sandvik SS	
ANNEALED & STRAIGHTENED		SAF 2507 2328	
PEEL TURNED AND POLISHED		UNS EN no S32750 1.4410	
Steel making process Electric furnace			
Technical requirements EN 10088-3:-2005			
EXTENT OF DELIVERY			
It	Product designation	Heat	Lot
01	MBR-SAF2507-20 MA-3200-	507366	92493
			Pieces 5
			Kg 55.0
		Total	5 55.0
TEST RESULTS			
Chemical composition (weight%)			
Heat	C	Si	Mn
507366	0.014	0.33	0.77
	P	S	Cr
	0.017	0.0006	25.15
	Ni	Mo	
	6.96	3.91	
	Cu	N	
507366	0.11	0.282	
Tensile test at room temperature			
	Yield strength	Tensile strength	Elongation
	MPa	MPa	%
Lot	Rp0.2	Rm	A
92493	629	867	36
	Rp1.0		Red.of Area
	707		%
			Z
			67
Hardness test			
	Min	Max	
Lot	HRC	HRC	
92493	21.0	22.0	
Quality assurance - Ulf Svensson/QA-manager Primary Products			
MTC Service / Certificates			

AB SANDVIK MATERIALS TECHNOLOGY Reg No. 556234-6832 VAT No. SE663000-060901
SE-81181 SANDVIKEN SWEDEN www.smt.sandvik.com mtc_service.smt@sandvik.com



CERTIFICATE No. A/06-560259 Rev 00

Date 2006-03-23 Page 2/2

Following controls/tests have been satisfactorily performed:

- Material Identification.
- Visual inspection and dimensional control.

Heat Treatment:

1100 degrees C/30 min. Quenched in water.

The delivered products comply with the specifications and requirements of the order.

The material is manufactured according to a Quality system, approved and registered to ISO 9001.

The certificate is produced with EDP and valid without signature.