



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**EVALUACIÓN DEL DETERIORO
MICROESTRUCTURAL DE UN ACERO
INOXIDABLE DÚPLEX, EXPUESTO A UN
AMBIENTE CORROSIVO DE CLORURO DE SODIO
(NaCl) al 3%**

GARAY RONALD
RODRÍGUEZ PEDRO

VALENCIA, DICIEMBRE 2011



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**EVALUACIÓN DEL DETERIORO
MICROESTRUCTURAL DE UN ACERO
INOXIDABLE DÚPLEX, EXPUESTO A UN
AMBIENTE CORROSIVO DE CLORURO DE SODIO
(NaCl) al 3%**

GARAY RONALD
RODRÍGUEZ PEDRO

VALENCIA, DICIEMBRE 2011



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**EVALUACIÓN DEL DETERIORO
MICROESTRUCTURAL DE UN ACERO
INOXIDABLE DÚPLEX, EXPUESTO A UN
AMBIENTE CORROSIVO DE CLORURO DE SODIO
(NaCl) al 3%**

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE
UNIVERSIDAD DE CARABOBO PARA OPTAR AL TÍTULO
DE INGENIERO MECÁNICO**

Tutora Prof. Dra. Ing. Laura Sáenz

GARAY RONALD
RODRÍGUEZ PEDRO

VALENCIA, DICIEMBRE 2011



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado para evaluar el Trabajo Especial de grado titulado “*Evaluación del deterioro Microestructural de un Acero Inoxidable Dúplex, expuesto a un ambiente corrosivo de Cloruro de Sodio (NaCl) al 3%*”, realizado por los bachilleres: **Ronald Garay C.I. Nro. 18.180.095** y **Pedro Rodríguez C.I. Nro. 18.868.104**, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

Tutora Prof. Dra. Ing. Laura Sáenz
Presidente del Jurado

Prof. Eleazar Díaz
Miembro del Jurado

Prof. Sandra Cabello
Miembro del Jurado



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado para evaluar el Trabajo Especial de grado titulado “*Evaluación del deterioro Microestructural de un Acero Inoxidable Dúplex, expuesto a un ambiente corrosivo de Cloruro de Sodio (NaCl) al 3%*”, realizado por los bachilleres: **Ronald Garay C.I. Nro. 18.180.095** y **Pedro Rodríguez C.I. Nro. 18.868.104**, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

Tutora Prof. Dra. Ing. Laura Sáenz
Presidente del Jurado

Prof. Eleazar Díaz
Miembro del Jurado

Prof. Franklim Camejo
Miembro del Jurado (Suplente)

Nomenclatura

NaCl.....	Cloruro de sodio
Cr.....	Cromo
Ni.....	Níquel
S.....	Azufre
P.....	Fósforo
Mn.....	Magnesio
Mo.....	Molibdeno
C.....	Carbono
Fe.....	Hierro
Si.....	Silicio
Ti.....	Titanio
Nb.....	Niobio
α	Ferrita
γ	Austenita
h.....	Horas
psi.....	Libra por pulgada cuadrada
$^{\circ}\text{C}$	Grados Celcius
M.E.B.....	Microscopía Electrónica de Barrido
MPa.....	Mega Pascales
Kj/mol.....	Kilo Joule por mol
(σ).....	Sigma
(χ).....	Chi
min.....	Minuto
EDX.....	Energía Dispersiva de Rayos X

K.....	Grados Kelvin
Kg/m ³	Kilogramo por metro cúbico
mm.....	Milímetro
S/m.....	Siemens por metro
Fe-C.....	Hierro-Carbono
BCC.....	Sistema cúbico centrado en el cuerpo
FCC.....	Sistema cúbico centrado en las Caras
Fe ₃ C.....	Carburo de hierro
ph.....	Potencial de hidrógeno
CCC.....	Estructuras centradas de las caras
DSS.....	Acero inoxidable dúplex
pulg.....	Pulgadas
Kgmf.....	Kilogramo fuerza
K _C	Factor de intensidad de esfuerzo crítico de estado plano
K _{IC}	Factor de intensidad de esfuerzo crítico de estado de deformación
K _{ID}	Factor de intensidad de esfuerzo crítico de estado de deformación plana
COD.....	Desplazamiento de apertura de boca
CVN.....	Valor de ensayo de impacto Charpy
σ _Y	Esfuerzo medio
σ _y	Esfuerzo de fluencia
σ _m	Esfuerzo máximo
cm.....	Centímetro
Na ₂ S ₂ O ₅	Bisulfito de sodio
Hcl.....	Ácido clorhídrico
s.....	Segundos
HV.....	Escala Vickers
M.O.....	Microscopio Óptico

Resumen

La sustitución de los aceros inoxidable ferríticos y austeníticos por Aceros Inoxidables Dúplex en la fabricación de componentes industriales tiene su origen en la excelente combinación entre las propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión, de allí el interés por el estudio de estos materiales. En la actualidad este tipo de aceros está siendo utilizado con más frecuencia en la industria química, petrolera y petroquímica, particularmente en ambientes marítimos, para la construcción de tuberías y puentes en contacto con cloruro de sodio (NaCl al 3%). En éste trabajo se evaluó el deterioro microestructural de un acero inoxidable dúplex 2304 sometido en medio corrosivo de NaCl al 3%. Se determinaron las propiedades mecánicas a través de ensayos de tracción, impacto y microdureza Vickers con muestras en condiciones originales y sometidas en una cámara de niebla salina a tiempos de exposición de 24, 48, 72, 96 horas, y no se observó cambios en la ductilidad, tenacidad de impacto, microdureza. No se evidenció deterioro microestructural por Microscopía óptica M.O ni por Microscopía electrónica de barrido MEB. No se encontró variación en el peso de las muestras bajo el ambiente de NaCl al 3% en las condiciones estudiadas. Se observó que el material en todas las condiciones de estudio posee un comportamiento altamente dúctil, producto de la formación “copa-cono” en las probetas de tracción característico de la ductilidad presente para todas las condiciones de 24, 48, 72 y 96 horas bajo el ambiente de NaCl al 3%. Se observó en el análisis macroscópico de las probetas de impacto una fractura mixta donde se aprecia la ductilidad del material por hoyuelos, cavidades o “dimples” y facetas de clivajes.

Palabras clave: Acero Inoxidable Dúplex SAF 2304, NaCl al 3%, resistencia mecánica, ductilidad, tenacidad de impacto.

Dedicatoria

A DIOS por darme la vida, y permitirme ser y tener una familia, un hogar donde regresar, por cada una de las cosas que dichosamente me brinda, por enseñarme a levantarme de las caídas, y por permitirme llegar a esta etapa de la vida.

A ti papá que estas junto a Dios, y darme en vida el inmenso amor de padre, dándome hasta lo que no tenias. Y hoy eres mi luz en los caminos que emprendo. Te amo.

A mi mamá por su infinito amor incondicional, que es mi motor de vida en cada una de las cosas que hago. Hoy lo que soy te lo debo a ti. Te amo.

A mis hermanos Annerys, Gerald, Gastbey, Thaisita, por su incondicional apoyo. A mis cuñados Carlos, Jean, Claudimar, a mis sobrinos: Kimberlys, Oriana, Genesis, Carlos David, Natalie, Fabian, Jonathan y Keven.

A mi compañero de Tesis Pedro Rodríguez por su alta entrega y su paciencia en todo momento. A mis grandes amigos inolvidables de la universidad, los cuales me sirvieron para conocer personas geniales, y fueron mi mayor trampolín en mi crecimiento académico y profesional. A mis amigos Dayana, Hector, Tonny y Andrés que estuvieron conmigo en todo momento. Y a todas aquellas que de alguna forma u otra me dieron su aporte valioso para llegar a la culminación de esta etapa de la vida.

RONALD GARAY

A Dios por darme la vida y la luz llena de bendiciones, y fortaleciéndome de las adversidades que se presentan en el camino.

A mi mamá y a mi papá por su incondicional amor, guía, apoyo, protección fraternal.

A mis hermanas Julie y Rossany, que son mis tesoros y me dan la alegría en todo momento.

PEDRO RODRÍGUEZ

Agradecimientos

A Dios por darme la bendición de vivir, y darme la dicha de tener a mi madre, a mi familia, y a un hogar.

A mi papá que desde el cielo me guía y me alumbra los caminos siendo mi inspiración para culminar esta etapa.

A mi mamá que me brinda todo su infinito amor apoyándome día a día en todas las actividades que emprendo.

A mis hermanos, tíos, primos y amigos que en todo momento me extendieron su mano.

A mi tutora Prof. Dra. Ing. Laura Sáenz por su gran apoyo y soporte brindado en todo momento, por su valiosa guía para realizar el Trabajo de Grado, y por enseñarnos no solo grandemente a nivel profesional, sino también por su gran calidad humana. Gracias Prof. Laura.

A la empresa TRIME C.A por su colaboración en aportar el material con el cual se realizó el Trabajo de Grado.

A todas aquellas personas que me brindaron su calurosa y valiosa ayuda en todo momento. Gracias a Todos.

RONALD GARAY

Agradecimientos

A DIOS por darme la bendición de vivir, y darme la dicha de tener a mi madre, a mi familia, y un hogar.

A mi Tutora Prof. Dra. Ing. LAURA SÁENZ por su gran apoyo y soporte brindado en todo momento, por su valiosa guía para realizar el Trabajo de Grado, y por enseñarnos no solo grandemente a nivel profesional, sino también por su gran calidad humana. Gracias Prof. Laura.

A la Empresa TRIME C.A por su colaboración en aportar el material con el cual se realizó el Trabajo de Grado.

A mis Amados y Queridos PADRES, por darme la oportunidad de vivir y crecer junto con Uds. Gracias por el apoyo, tanto económicamente como espiritualmente, por la paciencia, la perseverancia, la constancia y el amor brindado durante estos años de sacrificio, entrega y dedicación. LOS AMO.

A mis Queridas y Adoradas HERMANAS por su ayuda emocional, su apoyo, sus críticas, sus bromas durante el recorrido de este camino. LAS AMO.

A mi Compañero de trabajo RONALD GARAY por su ayuda, colaboración y enseñanzas, que se nos presentaron durante el transcurso de este camino. Gracias

A mis Amigos HECTOR AQUINO Y DAYANA MATA por su valiosa colaboración durante el desarrollo de este Trabajo, tomando de su valioso tiempo para prestarme ayuda cuando más la necesitaba. Gracias los Quiero.

A todas y cada unas de esas personas que de una u otra forman, ayudaron, colaboraron y prestaron su ayuda para la elaboración y culminación de este trabajo, siendo este una meta mas alcanzada. Gracias

PEDRO RODRÍGUEZ

Índice General

Índice General	i
Índice de Figuras	v
Índice de Tablas	viii
CAPÍTULO 1 Introducción	1
1.1 Introducción	1
1.2 Planteamiento del Problema	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos	3, 4
1.4 Justificación	4
1.5 Alcance	5
1.6 Limitaciones	5
CAPÍTULO 2 Marco Teórico	6
2.1 Antecedentes	6
2.2 Bases teóricas,	10
2.2.1 Acero	10

acero	2.2.2 Propiedades mecánicas y tecnológicas del	11
	2.2.3 Diagrama del acero	13
	2.2.4 Fases de aleación hierro-carbono	15
	2.2.5 Aceros inoxidable	18
	2.2.5.1 Clasificación de los Aceros Inoxidables	20
	2.2.5.2 Aceros Inoxidables Martensíticos	21
	2.2.5.3 Aceros Inoxidables Ferríticos	23
	2.2.5.4 Acero Inoxidable Austeníticos	24
	2.2.6 Acero Inoxidable Dúplex	26
	2.2.6.1 Aceros inoxidables austeno-ferríticos dúplex	27
	2.2.6.2 Clasificación de los aceros inoxidables dúplex	28
	2.2.6.3 Campo de aplicación de los acero dúplex	29
	2.2.7 Resistencia a la corrosión de los acero inoxidable	30
	2.2.8 Ensayo de Tracción	31
	2.2.9 Ensayo de Impacto	34
	2.2.9.1 Tenacidad de fractura	35
	2.2.9.2 Método de Rolfe-Novak-Barson	36
	2.2.10 Microscopia Óptica	38
	2.2.11 Corrosión: Causas y remedios	39
	2.2.11.1 Corrosión intergranular	39
	2.2.11.2 Corrosión Galvánica	40
	2.2.11.3 Corrosión por contacto	41
	2.2.11.4 Corrosión por picadura	42
	2.2.11.5 Corrosión por fatiga	42
	2.2.12 Ensayo de corrosión	44
	2.2.12.1 Ensayo de corrosión en cámara de niebla salina	45
	2.2.12.2 Cámara de Niebla salina	46

CAPÍTULO 3	Marco Metodológico	47
3.1	Nivel de Investigación	47
3.2	Población y Muestra	47
3.3	Caracterización del material	48
3.4	Descripción de la metodología a seguida	48, 49
3.5	Condición original	50
3.6	Mecanizado de las probetas	50
3.7	Tratamiento con la cámara de niebla salina	52
3.8	Ensayo a realizar	53
3.8.1	Ensayo de Tracción	53
3.8.2	Ensayo de Impacto Charpy en “V”	54
3.8.3	Metalografía	55
3.8.4	Microscopio óptico y microscopia electrónica de barrido	56
MEB		56
3.8.5	Ensayo de microdureza Vickers	59

CAPÍTULO 4	Resultados y Análisis	61
4.1	Composición química	61
4.2	Microestructura de las Fases	62
4.3	Ensayo de Tracción Uniaxial	64
4.4	Ductilidad	74
4.5	Ensayo de microdureza Vickers	78
4.6	Ensayo de Impacto	80
4.7	Fractografía	83
4.7.1	Fractografía de las probetas de tracción	83

4.7.2 Fractografía de las probetas de impacto	89
4.8 Microestructura por microscopio óptico a 100x	95
4.9 Microestructura por microscopio óptico a 400x	96, 97
4.10 Microestructura por microscopio electrónico de barrido MEB a 800x	98, 99
4.11 Microestructura por microscopio electrónico de barrido MEB a 1500x	100
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	102
Conclusiones	102
Recomendaciones	104
REFERENCIAS	105
APENDICES	108
ANEXOS	119

Índice de Figuras

2.1 Diagrama Hierro Carbono	13
2.2 Microestructura de la Perlita	16
2.3 Acero Inoxidable	19
2.4 Acero Inoxidable Martensítico	21
2.5 Acero Inoxidable Ferrítico	23
2.6 Acero Inoxidable Austenítico	25
2.7 Micrografía de un Acero Inoxidable Dúplex	27
2.8 Esquema de Ensayo de Tracción	32
2.9 Péndulo de Charpy	35
2.10 Esquema de Función del Péndulo de Charpy	35
2.11 Correlación entre la tenacidad K _{IC} y la Energía Charpy CVN	37
3.1 Diagrama de Actividades	49
3.2 Dimensión de Probetas Planas de Tracción	51
3.3 Dimensión de Probetas por Ensayo Charpy en “V”	51
3.4 Probetas de Tracción y Charpy utilizados	52
3.5 Cámara de Niebla Salina	52
3.6 Máquina Galdabini	54
3.7 Máquina de Impacto Charpy	55
3.8 Cortadora Metalográfica	56
3.9 Pulidora Metalográfica	57
3.10 Extractor de Gases	57
3.11 Secador	58
3.12 Microscopio Óptico Marca Unión	59
3.13 Microscopio Electrónico de Barrido Philips	59

3.14 Microdurómetro Vickers digital	60
4.1 Microestructura por MEB a 500X	63
4.2 Grafica Esfuerzo vs Deformación condición inicial	65
4.3 Grafica Esfuerzo vs Deformación condición 1 (24h)	65
4.4 Grafica Esfuerzo vs Deformación condición 2 (48h)	66
4.5 Grafica Esfuerzo vs Deformación condición 3 (72h)	66
4.6 Grafica Esfuerzo vs Deformación condición 4 (96h)	67
4.7 Grafica Esfuerzo vs Condiciones	72
4.8 Grafica Esfuerzo ultimo vs Condiciones	72
4.9 Grafica % de Reducción de Área en Función del Tiempo	76
4.10 Grafica Deformación vs Condición Ingenieril	77
4.11 Grafica Microdureza vs Condición Vickers	80
4.12 Grafica comparativa entre EAI y el Factor Intensidad	82
4.13 Fractografía probeta de Tracción tomada por una cámara 12MP en condición original	83
4.14 Superficie de fractura en condición original por MEB	84
4.15 Fractografía probeta de Tracción tomada por cámara 12MP en condición 1 (24h)	84
4.16 Superficie de fractura en condición 1 por MEB	85
4.17 Fractografía probeta de Tracción tomada por una cámara 12 MP condición 2 (48h)	85
4.18 Superficie de fractura en condición 2 por MEB(48h)	86
4.19 Fractografía probeta de Tracción tomada por una cámara 12MP condición 3 (72h)	86
4.20 Superficie de fractura en condición 3 por MEB	87
4.21 Fractografía probeta de Tracción tomada por una cámara 12MP condición 4 (96h)	87
4.22 Superficie de fractura en condición 4 por MEB	88
4.23 Fractografía probeta de Impacto tomada por una cámara 12MP en condición original	89
4.24 Superficie de fractura en condición original por MEB	90

4.25 Fractografía probeta de Impacto tomada por una cámara 12 MP en condición 1 (24h)	90
4.26 Superficie de Fractura en condición 1 por MEB	91
4.27 Fractografía probeta de Impacto tomada por una cámara 12MP en condición 2 (48h)	91
4.28 Superficie de Fractura en condición 2 por MEB	92
4.29 Fractografía probeta de Impacto tomada por una cámara 12MP en condición 3 (72h)	92
4.30 Superficie de Fractura en condición 3 por MEB	93
4.31 Fractografía probeta de Impacto tomada por una cámara 12MP en condición 4 (96h)	93
4.32 Superficie de Fractura en condición 4 por MEB	94
4.33 Microestructura por Microscopia óptica a 100X	95
4.34 Microestructura por Microscopia óptica a 400X	97
4.35 Microestructura por Microscopia electrónica de barrido M.E.B a 800X	99
4.36 Microestructura por Microscopia electrónica de barrido M.E.B a 1500X	100

Índice de Tablas

2.1 Propiedades Mecánicas del Acero Dúplex	28
3.1 Dimensión de Probetas Planas de Tracción	51
3.2 Numero de Ensayos para cada condición estudiada	53
4.1 Comparación de la Composición Química del Acero Inoxidable Dúplex SAF2304	62
4.2 Condición de trabajo del Acero Inoxidable Dúplex SAF2304	64
4.3 Propiedades Mecánicas del Acero Inoxidable Dúplex SAF2304 en condición inicial	68
4.4 Propiedades Mecánicas del Acero Inoxidable Dúplex SAF2304 en condición 1 (24h)	68
4.5 Propiedades Mecánicas del Acero Inoxidable Dúplex SAF2304 en condición 2 (48h)	69
4.6 Propiedades Mecánicas del Acero Inoxidable Dúplex SAF2304 en condición 3 (72h)	69
4.7 Propiedades Mecánicas del Acero Inoxidable Dúplex SAF2304 en condición 4 (96h)	70
4.8 Propiedades Mecánicas del Acero Inoxidable Dúplex en Promedio	71
4.9 Valores del Área final de las Probetas de Tracción	74, 75
4.10 Valores promedio de Reducción del Área de las probetas de Tracción para cada una de las condiciones	75, 76

4.11 Valores de Microdureza Vickers (HV)	78, 79
4.12 Valores de Energía Absorbida y factor de intensidad para cada condición	81

1.1 Introducción

En las diferentes industrias que se desarrollan a nivel mundial, las más destacadas son: la alimenticia, petrolera, petroquímica, automovilística, entre otras, donde se emplean una gran variedad de materiales metálicos para transportar, resguardar, contener la materia prima y productos que generan. Entre estos materiales se encuentran los aceros inoxidable, que desde décadas atrás han funcionado bien en dichas industrias pero los adelantos tecnológicos han originado nuevos materiales donde se les realizan diferentes estudios y análisis para determinar sus propiedades y así establecer si son apropiados o no para una aplicación específicas, siendo mejores que los aceros anteriores; la resistencia a la corrosión es una propiedad de mucha importancia que se debe tener en cuenta sobre todo en dichas industrias, ya que debido a ella se presentan muchas fallas, como inicios de fracturas, fugas en tanques o conducciones, disminución de resistencia mecánica en estructuras o en partes de máquinas, desviaciones del funcionamiento normal de equipos, contaminación debida a los productos derivados de la corrosión, entre otras.

Es aquí donde se hace necesario un estudio sobre este fenómeno, sobre todo en ambientes atmosféricos y salinos donde se encuentran expuestos la mayoría de estos materiales, para así determinar cuál cumple con las exigencias de diseño y resistencia al medio ambiente de trabajo, ya que dicho fenómeno produce y acelera su degradación, desgaste, cambios en su estructura y propiedades mecánicas afectando su calidad y desempeño.

1.2 Planteamiento de Problema

Los aceros inoxidable surgieron a partir del siglo XX, en donde su aparición industrial tiene diversos orígenes, entre ellos Inglaterra en el año 1913, Alemania en el año 1914 y Francia en 1917. La composición química de los aceros inoxidable al igual que los aceros poseen aleaciones de hierro y carbono (alrededor de 0,05% hasta menos de un 2% C) la diferencia de estos aceros comunes es que los aceros inoxidable también contienen otros elementos de aleación, tal es el caso del Cromo (Cr), Níquel (Ni), Azufre (S), Fósforo (P), y Magnesio (Mn), los cuales conforman propiedades mecánicas específicas para su utilización en la industria metalmeccánica.

Dentro de las distintas gamas de los aceros, se encuentran los aceros inoxidable dúplex, los cuales están microestructuralmente conformados por una combinación ferrita (α) - austenita (γ). Unos de sus componentes químicos más importantes son el Cromo (Cr) por su papel en la resistencia a la corrosión y el Níquel (Ni) en las propiedades mecánicas. Su aplicabilidad ha venido creciendo vertiginosamente en los últimos años en las diferentes industrias, tales como las químicas, del transporte, automotriz, gas, petróleo, papel, de la construcción, aeronáuticas, y alimenticias. El uso de los aceros inoxidable dúplex representan el tercer tipo de aceros inoxidable con más demanda en el mercado. La aceptación que han recibido los aceros dúplex se debe a su elevada resistencia a la corrosión, junto con unas buenas propiedades mecánicas.

El interés en investigar el acero inoxidable dúplex radica en diversos factores que influyen en las propiedades mecánicas, haciendo que puedan cambiar, entre éstos están: la temperatura, la fatiga, la corrosión. En la mayoría de los casos, el deterioro en las estructuras que contengan acero inoxidable se debe a la penetración de cloruros, agua o dióxido de carbono de la atmósfera. Por tanto,

la corrosión que estos generan, influyen en la vida útil de las estructuras construidas con acero inoxidable.

En la actualidad, las aplicaciones de este acero en las industrias venezolanas se extienden por la alimenticia, la petrolera y la automotriz, sus aplicaciones son muy variadas por ende aumentan su demanda, es por ello, que existe la necesidad de realizar investigaciones a medida que avanza y se afianza como un buen acero anticorrosivo en dichas industrias.

El estudio de los aceros inoxidables dúplex expuestos en ambientes corrosivos, se hace imperativo para evaluar su microestructura y relacionarlas con propiedades mecánicas con el fin de mejorar los parámetros de diseño y optimizar al máximo su aplicabilidad.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar el deterioro Microestructural de un acero inoxidable dúplex, expuesto a un ambiente corrosivo: Cloruro de sodio (NaCl al 3%).

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Caracterizar el acero mediante un análisis químico, microscopía óptica, ensayo de tracción, impacto Charpy y microdureza para establecer las propiedades mecánicas iniciales del material.
2. Exponer el Acero Dúplex en cámara de niebla salina según norma ASTM-B117 en un intervalo de 24, 48, 72 y 96 horas continuas.
3. Evaluar la microestructura, microdureza y tamaño de grano.

4. Comparar los resultados obtenidos de los ensayos de tracción e impacto antes y después de someter las probetas en ambiente corrosivo.
5. Evaluar la superficie de fractura de tracción e impacto del acero dúplex sometido en un ambiente corrosivo a través de microscopía electrónica de barrido.

1.4 Justificación

En la actualidad el empleo y uso de los aceros inoxidable ha ido creciendo considerablemente, es por ello, que se hacen estudios para ver su comportamiento en ambientes donde se vaya a utilizar. Un acero inoxidable que se ha destacado en los últimos años ha sido el acero inoxidable dúplex en donde su campo de aplicación aumentará a medida que se realicen más estudios sobre él, desde la industria alimenticia, petrolera, petroquímica, automotriz, etc.

Existen diversos factores que hacen que las propiedades mecánicas puedan cambiar, entre éstos están: la temperatura, la fatiga, la corrosión, etc. Esta última es una de las mayores desventajas para los aceros, ya que se oxida con facilidad aumentando su volumen y provocando grietas superficiales que posibilitan el incremento y progreso de la oxidación hasta consumir la pieza inutilizándola. Es por ello, que se genera esta necesidad de estudio de estas propiedades para mejorar y aumentar su aplicabilidad en la industria.

El objetivo de este estudio se ha planteado con base en dicha necesidad, de tomar en cuenta cómo afecta el fenómeno de la corrosión en el comportamiento de los aceros inoxidables dúplex. De este estudio se puede describir bajo qué condiciones puede trabajar el material de manera óptima, eficaz, asegurando su confiabilidad, seguridad y eficiencia en su aplicación.

1.5 Alcance

- 1) Se utilizará acero inoxidable Dúplex SAF 2304 de espesor 12mm (e=12mm).
- 2) El medio corrosivo utilizado será: Cloruro de Sodio (NaCl al 3%)
- 3) La caracterización del material se hará mediante ensayos mecánicos (tenacidad de impacto, microdureza, microestructura óptica y por microscopía electrónica de barrido).
- 4) Para una solución fija al 3% de NaCl (agua de mar sintética) se realizó el ensayo de impacto Charpy a 20 muestras dentro de la cámara salina (a una temperatura entre 33 y 37 °C y a una presión de entre 10 y 20 psi) divididas en 4 intervalos de tiempo, distribuidas en la condición siguiente: 5 probetas a 24 horas, 5 probetas a 48 horas, 5 probetas a 72 horas, 5 probetas a 96 horas. En condiciones ambientales (condición original) se aplicará ensayo de impacto a 5 probetas, para comparar el deterioro microestructural y las propiedades mecánicas del acero inoxidable dúplex SAF 2304.
- 5) Para una solución fija al 3% de NaCl, se realizó el ensayo de tracción a 12 muestras dentro de la cámara salina (a una temperatura entre 33 y 37 °C y a una presión de entre 10 y 20 psi) divididas en 4 intervalos de tiempo, distribuidas en la condición siguiente: 3 probetas a 24 horas, 3 probetas a 48 horas, 3 probetas a 72 horas, 3 probetas a 96 horas. En condiciones ambientales (condición original) se aplicará ensayo de tracción a 3 probetas, para comparar el deterioro microestructural y las propiedades mecánicas del acero inoxidable dúplex SAF 2304.

1.6 Limitaciones

1. Disponibilidad del Laboratorio.
2. Empleo de la Cámara de niebla salina, en cuanto, a los días de uso.

2.1 Antecedentes

Rojas y Lago. (2002) Estudiaron el comportamiento de la corrosión de los aceros inoxidable de las series AISI 304, AISI 316 y un acero italiano que cumple con la designación F-138 de las normas ASTM de posible uso en traumatología, en presencia de proteínas del músculo esquelético. La investigación se llevó a cabo usando medidas de polarización potenciodinámica y polarización cíclica, en un medio electrolito que simula al fluido celular, el cual contiene la misma composición del músculo esquelético en proteínas y sales. Para evaluar el efecto de las proteínas se realizaron las pruebas con y sin la adición de las proteínas a la composición del fluido celular, a una temperatura de 37 °C. Las pruebas electroquímicas revelaron que las proteínas tienen un efecto negativo sobre la resistencia a la corrosión por picadura, dependiendo de la calidad del acero empleado en la prueba. Los más resistentes resultaron el AISI 316L y el F-138. Estudios realizados por micrografía electrónica en la superficie del acero después de la polarización cíclica en fluido celular con proteínas revelaron la presencia de una capa mixta formada por óxidos y proteínas adheridas a la superficie del metal. Esta capa pasiva mostró ser más inestable que la correspondiente a la obtenida sin proteínas. Las curvas de Tafel revelaron que la corrosión en presencia de proteínas sigue un proceso de control disfuncional. Los resultados obtenidos respecto a la formación de picaduras, fueron similares a los que presentan estos aceros cuando son expuestos a ambientes marinos.

Se continúa avanzando con los estudios acerca de los medios corrosivos que influyen en los aceros inoxidable y austenoferríticos, por lo que se tiene de

Vera y Canas. (2005), realizaron estudios donde se evaluó el comportamiento frente a la corrosión en medio marino de acero galvanizado y acero galvanizado pintado (Dúplex) haciendo uso de ensayos electroquímicos y acelerados de laboratorio. Las medidas electroquímicas consideraron potencial de corrosión a circuito abierto, curvas de polarización y polarización potencioestática en cloruro de sodio 0.1M. Los ensayos acelerados se realizaron en cámara de niebla salina y con el método Cebelcor. El grado de ataque del material se observó por microscopía electrónica de barrido. Los resultados muestran que el sistema Dúplex presenta un mejor comportamiento frente la corrosión en medio de cloruros que el acero galvanizado, aumentando su durabilidad en el tiempo.

Posteriormente **Sáenz y Hilders. (2007)**, realizaron estudios del acero inoxidable dúplex SAF 2507 sometido a un tratamiento térmico de envejecimiento a 850 °C durante períodos de 0,5, 1, 5, 24 y 48 horas. Para la evaluación del comportamiento mecánico se realizaron ensayos de tracción, impacto (Charpy en V) y microdureza Vickers, así como también se realizó el estudio de la microestructura y superficies de fractura del material por medio de microscopía óptica y Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). De los resultados obtenidos en los diferentes ensayos mecánicos se aprecian cambios en las propiedades mecánicas del material como consecuencia de la aplicación del tratamiento térmico de envejecimiento. En la evaluación de la tenacidad del material se observó que es muy baja en las condiciones tratadas térmicamente, mientras que la condición original ofreció mayor tenacidad al impacto. Se presume por los resultados de los ensayos mecánicos la presencia de fase sigma, y con el estudio de las microestructuras se observa que el material después de haber sido tratado térmicamente fragiliza, siendo éste un efecto generado por la fase sigma, y a su vez, se afecta la tenacidad del material disminuyéndola.

Se da a lugar a otra investigación por **Sáenz y Avendaño. (Agosto 2007)** En la cual se estudió al acero inoxidable austenítico AISI 304 sometido a ensayos de creep. Los ensayos de termofluencia o creep se realizaron a las siguientes condiciones: esfuerzos de 195 MPa (28330 psi), y 293 MPa (42496 psi), con temperaturas de 600 °C, 700 °C, 800 °C y 900 °C. En las muestras ensayadas se observó por microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido, y la técnica de ED-X, la existencia de precipitados de carburos de cromo rico en hierro, maclas presentes en el material, precipitados en los límites de grano, sobre las maclas y en la unión de granos (puntos Triples), lo que llevó a concluir que todas las condiciones ensayadas se encuentran entre el final de la etapa II y el comienzo de la etapa III de la curva de creep. Los resultados demuestran que para el esfuerzo de 28330 psi, la energía de activación, Q fue de 366,82 kJ/mol y para el esfuerzo de 293 MPa, Q es de 16,49 kJ/mol. Para las temperaturas de 700 °C y 800°C, el exponente potencial de esfuerzo n, fue de 17,66 y 1,125 respectivamente. El mayor porcentaje de deformación se encontró para la temperatura de 900 °C y esfuerzo de 195 MPa, siendo ésta la condición que duró menor tiempo de ensayo.

Siguiendo este mismo orden de ideas, se continúa avanzando en el estudio del acero dúplex en el que se menciona a **Serna. (2007)** donde se tiene que para el control de procesos de fabricación y el desempeño de aceros inoxidables dúplex, es importante conocer su evolución microestructural, pues en algunos rangos de temperatura, pueden precipitar fases intermetálicas como σ (σ) y χ (χ), que deterioran sus propiedades mecánicas y su resistencia a la corrosión. Tres tipos de aceros inoxidables se sometieron a tratamientos térmicos de 850 °C por 35 y 120 min. Se analizaron la evolución de las fases σ y χ por medio de un microscopio óptico, microscopio electrónico de barrido y difracción de rayos-X. Se determinaron la fracción volumétrica de las fases, su composición química y sus parámetros de red.

En lo anteriormente destacado, se puede enfocar que cuando se somete un acero dúplex a un tratamiento térmico, modifica su microestructura y fragiliza más pronto que en condiciones naturales, por lo que se abre otra gama de estudios por **Sáenz y Plaza. (Diciembre 2007)** donde se presentó el estudio de la fragilización de un acero inoxidable dúplex SAF 2205 sometido a un tratamiento térmico de envejecimiento a una temperatura de 850 °C. El tratamiento térmico realizado fue primero de una solubilización del material a una temperatura de 1.100 °C durante una hora, para luego ser templado en agua a temperatura ambiente. Luego se envejeció el material a una temperatura de 850 °C durante tiempos de permanencia de 48 y 54 minutos y 1, 12 y 24 horas. Se observó que, de las condiciones estudiadas, la de 6 horas presenta los valores más altos de esfuerzos en la microestructura del material y presencia de la fase sigma (σ), luego de realizar una espectroscopía por difracción de energía de rayos X (EDX). La fase σ tiende a endurecer y fragilizar el material por tener un alto contenido de cromo que, según los valores arrojados por el EDX, es de aproximadamente 30% para todas las condiciones. Las superficies de fractura fueron evaluadas por microscopía electrónica de barrido, encontrándose que el material tiene un mecanismo de fractura dúctil, que cambia a fractura frágil luego de realizado el tratamiento térmico de envejecimiento.

Para converger en los criterios y poder hacer comparaciones destacar ventajas y desventajas frente un acero dúplex con respecto a un acero austenítico, se indica la siguiente investigación por **Saucedo et al. (2009)** en donde empleó el método del ensayo miniatura de embutido para evaluar la tenacidad criogénica en dos aceros inoxidables austeníticos con nitrógeno. Los aceros fueron previamente solubilizados a 1.373 K y templados en agua y envejecidos a las temperaturas de 973, 1.073 y 1.173 K por tiempos de 10 a 1.000 minutos. La tenacidad a 77 K se evaluó también con el ensayo de impacto Charpy. La energía de fractura de ambos ensayos disminuye con el tiempo de envejecido como un resultado de la

precipitación intergranular de carburos y nitruros. La fractura de la superficie de las probetas ensayadas cambió de transgranular dúctil a intergranular frágil conforme disminuye la energía de fractura. Se encontró una relación lineal entre las energías de fractura del ensayo estándar y miniatura.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Acero

El acero es una aleación de hierro y carbono, donde el carbono no supera el 2,0% en peso de la composición de la aleación, alcanzando normalmente porcentajes entre el 0,2% y el 0,3%. Porcentajes mayores que el 2,0% de carbono dan lugar a las fundiciones, aleaciones que al ser quebradizas y no poderse forjar (a diferencia de los aceros), se moldean.

La definición anterior, sin embargo, se circunscribe a los aceros al carbono en los que este último es el único aleante o los demás presentes lo están en cantidades muy pequeñas pues de hecho existen multitud de tipos de acero con composiciones muy diversas que reciben denominaciones específicas en virtud ya sea de los elementos que predominan en su composición (aceros al silicio), de su susceptibilidad a ciertos tratamientos (aceros de cementación), de alguna característica potenciada (aceros inoxidable) e incluso en función de su uso (aceros estructurales). Usualmente estas aleaciones de carbono se engloban bajo la denominación genérica de aceros especiales, razón por la que aquí se ha adoptado la definición de los comunes o "al carbono" siendo los primeros fabricados y los más empleados, sirvieron de base para los demás. Esta gran variedad de aceros llevó a Siemens a definir el acero como «un compuesto de hierro y otra sustancia que incrementa su resistencia.

Por la variedad ya apuntada y por su disponibilidad (sus dos elementos primordiales abundan en la naturaleza facilitando su producción en cantidades industriales) los aceros son las aleaciones más utilizadas en la construcción de maquinaria, herramientas, edificios y obras públicas, habiendo contribuido al alto nivel de desarrollo tecnológico de las sociedades industrializadas. Sin embargo, en ciertos sectores, como la construcción aeronáutica, el acero apenas se utiliza debido a que es un material muy denso, casi tres veces más denso que el aluminio (7.850 kg/m^3 de densidad frente a los 2.700 kg/m^3 del aluminio).

2.2.2 Propiedades mecánicas y tecnológicas del acero

Aunque es difícil establecer las propiedades físicas y mecánicas del acero debido a que éstas varían con los ajustes en su composición y los diversos tratamientos térmicos, químicos o mecánicos, con los que pueden conseguirse aceros con combinaciones de características adecuadas para infinidad de aplicaciones, se pueden citar algunas propiedades genéricas:

- Su densidad media es de 7.850 kg/m^3 .
- El punto de fusión del acero depende del tipo de aleación y los porcentajes de elementos aleantes. El de su componente principal, el hierro es de alrededor de $1.510 \text{ }^\circ\text{C}$ en estado puro (sin alear), sin embargo el acero presenta frecuentemente temperaturas de fusión de alrededor de $1.375 \text{ }^\circ\text{C}$, y en general la temperatura necesaria para la fusión aumenta a medida que se funde (excepto las aleaciones eutécticas que funden de rápidamente). Por otra parte, el acero rápido funde a $1.650 \text{ }^\circ\text{C}$
- Su punto de ebullición es de alrededor de $3.000 \text{ }^\circ\text{C}$.

- Es un material muy tenaz, especialmente en alguna de las aleaciones usadas para fabricar herramientas.
- Relativamente dúctil. Con él se obtienen hilos delgados llamados alambres.
- Es maleable. Se pueden obtener láminas delgadas llamadas hojalata. La hojalata es una lámina de acero, de entre 0,5 y 0,12 mm de espesor, recubierta, generalmente de forma electrolítica, por estaño.
- Permite una buena mecanización en máquinas y herramientas antes de recibir un tratamiento térmico.
- Algunas composiciones y formas del acero mantienen mayor memoria, y se deforman al sobrepasar su límite elástico.
- La dureza de los aceros varía entre la del hierro y la que se puede lograr mediante su aleación u otros procedimientos térmicos o químicos entre los cuales quizá el más conocido sea el templado del acero, aplicable a aceros con alto contenido en carbono, que permite, cuando es superficial, conservar un núcleo tenaz en la pieza que evite fracturas frágiles. Aceros típicos con un alto grado de dureza superficial son los que se emplean en las herramientas de mecanizado, denominados aceros rápidos que contienen cantidades significativas de cromo, wolframio, molibdeno y vanadio. Los ensayos tecnológicos para medir la dureza son Brinell, Vickers y Rockwell, entre otros.
- Se puede soldar con facilidad.
- La corrosión es la mayor desventaja de los aceros ya que el hierro se oxida con suma facilidad incrementando su volumen y provocando grietas superficiales que posibilitan el progreso de la oxidación hasta que se consume la pieza por completo. Tradicionalmente, los aceros se han venido protegiendo mediante tratamientos superficiales diversos. Si bien, existen aleaciones con resistencia a la corrosión mejorada como los aceros de construcción aptos para intemperie (en ciertos ambientes) o los aceros inoxidable.

- Posee una alta conductividad eléctrica. Aunque depende de su composición, es aproximadamente de $3 \cdot 10^6$ S/m. En las líneas aéreas de alta tensión se utilizan con frecuencia conductores de aluminio con alma de acero proporcionando este último la resistencia mecánica necesaria para incrementar los vasos entre las torres y optimizar el coste de la instalación.
- Se utiliza para la fabricación de imanes permanentes artificiales, ya que una pieza de acero imantada no pierde su imantación si no se la calienta hasta cierta temperatura. La magnetización artificial se hace por contacto, inducción o mediante procedimientos eléctricos. En lo que respecta al acero inoxidable, al acero inoxidable ferrítico sí se le pega el imán, pero al acero inoxidable austenítico no se le pega el imán ya que la fase del hierro conocida como austenita no es atraída por los imanes. Los aceros inoxidables contienen principalmente cromo y níquel en porcentajes del orden del 10% además de algunos aleantes en menor proporción.

2.2.3 Diagrama Hierro-Carbono (Fe-C)

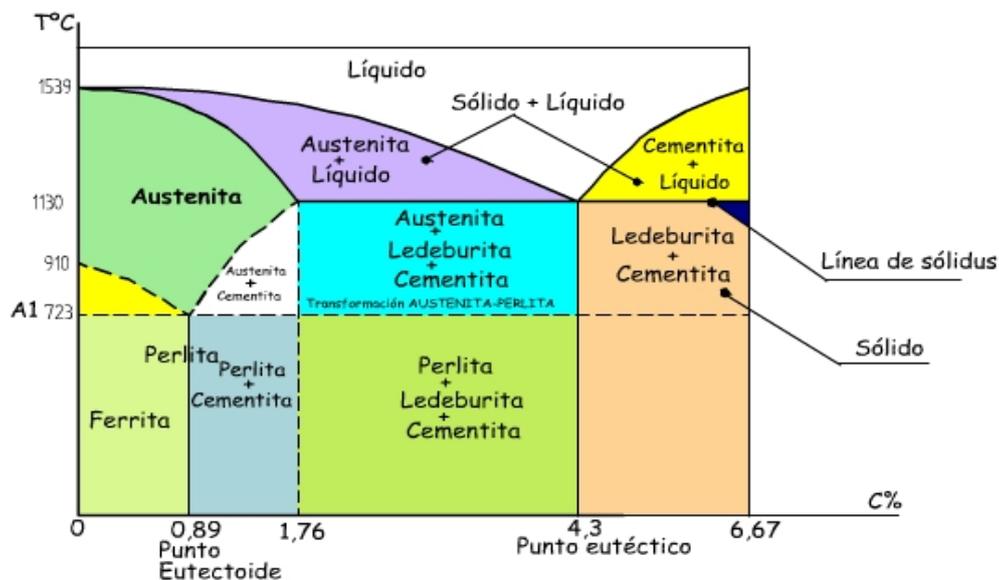


Figura 2.1 Diagrama Hierro- Carbono (Fe-C) [17]

En el diagrama de equilibrio, o de fases, Fe-C se representan las transformaciones que sufren los aceros al carbono con la temperatura, admitiendo que el calentamiento (o enfriamiento) de la mezcla se realiza muy lentamente de modo que los procesos de difusión (homogeneización) tienen tiempo para completarse. Dicho diagrama se obtiene experimentalmente identificando los puntos críticos (temperaturas a las que se producen las sucesivas transformaciones) por métodos diversos.

Fases

El hierro puro presenta tres estados alotrópicos a medida que se incrementa la temperatura desde el ambiente:

- Hasta los 911 °C, el hierro ordinario, cristaliza en el sistema cúbico centrado en el cuerpo (BCC) y recibe la denominación de hierro α o ferrita. Es un material dúctil y maleable responsable de la buena forjabilidad de las aleaciones con bajo contenido en carbono y es ferromagnético hasta los 770 °C (temperatura de Curie a la que pierde dicha cualidad). La ferrita puede disolver muy pequeñas cantidades de carbono.
- Entre 911 y 1.400 °C cristaliza en el sistema cúbico centrado en las caras (FCC) y recibe la denominación de hierro γ o austenita. Dada su mayor compacidad la austenita se deforma con mayor facilidad y es paramagnética.
- Entre 1.400 y 1.538 °C cristaliza de nuevo en el sistema cúbico centrado en el cuerpo y recibe la denominación de hierro δ que es en esencia el mismo hierro alfa pero con parámetro de red mayor por efecto de la temperatura.
- A mayor temperatura el hierro se encuentra en estado líquido.
- Si se añade carbono al hierro, sus átomos podrían situarse simplemente en los intersticios de la red cristalina de este último; sin embargo, en los aceros aparece

combinado formando carburo de hierro (Fe_3C), es decir, un compuesto químico definido y que recibe la denominación de cementita de modo que los aceros al carbono están constituidos realmente por ferrita y cementita.[12]

2.2.4 Fases de la aleación de Hierro-Carbono

Austenita (hierro-duro):

La austenita es una forma de ordenamiento distinta de los átomos de hierro y carbono. Ésta es la forma estable del hierro puro a temperaturas que oscilan entre los 900 a 1.400 °C. Está formado por una disolución sólida del carbono de hierro, lo que supone un porcentaje máximo de C del 2%. Es dúctil, blanda y tenaz.

Es la forma cúbica centrada en las caras (FCC) del hierro. También se le conoce como austerita. Admite el temple, mas no es magnético.

Ferrita (hierro. blando):

La ferrita (o hierro alfa) es, en metalurgia una de las estructuras moleculares del hierro. Cristaliza en el sistema cúbico centrado en el cuerpo (BCC) y tiene propiedades magnéticas, a diferencia de la austenita, que es FCC y no magnética. Se emplea en la fabricación de: imanes permanentes aleados con cobalto y bario; en núcleos de inductancias y transformadores con níquel, cinc o manganeso.

Cementita (carburo de hierro. Fe_3C):

La cementita o carburo de hierro se produce por efecto del exceso de carbono sobre el límite de solubilidad. Si bien la composición química de la cementita es Fe_3C , la estructura cristalina es del tipo ortorrómbica con 12 átomos de hierro y 4 átomos de carbono por celda.

Perlita (88% ferrita, 12% cementita):



Figura 2.2 Microestructura de la Perlita [18]

Se denomina perlita a la microestructura formada por capas o láminas alternas de las dos fases (α y cementita) durante el enfriamiento lento de un acero a temperatura eutectoide. Se le da este nombre porque tiene la apariencia de una perla al observarse microscópicamente a pocos aumentos.

Ledeburita (ferrita - cementita eutéctica, 4,3% carbono):

Ledeburita es una mezcla eutéctica que contiene un 95,7% de hierro y un 4,3% de carbono, por lo tanto no es constituyente de los aceros sino de las fundiciones. La ledeburita se llama así en homenaje a Adolf Lebedur (1836-1916).

Es el constituyente eutéctico que se forma al enfriar la fundición líquida de 4.3% C desde 1.145 °C. Está formada por 52% de cementita y 48% de austenita de 2% C. La ledeburita no existe a temperatura ambiente en las fundiciones ordinarias debido a que en el enfriamiento se transforma en cementita y perlita; sin embargo, en las fundiciones se pueden conocer las zonas donde existió la ledeburita por el aspecto eutéctico con que quedan las agrupaciones de perlita y

cementita. A veces, a estas zonas donde existió la ledeburita se la llama Ledeburita Transformada.

Bainita:

La bainita es una mezcla de fases de ferrita y cementita y en su formación intervienen procesos de difusión.

La bainita forma agujas o placas, dependiendo de la temperatura de transformación. Los detalles microestructurales de la bainita son tan finos que su resolución solo es posible mediante el microscopio electrónico. Está compuesta de una matriz ferrítica y de partículas alargadas de cementita. La fase que rodea las agujas es martensita, a menos que se haga un tratamiento isotérmico hasta transformar toda la austenita en bainita.

El diagrama de fases Fe-C muestra dos composiciones singulares:

Un eutéctico (composición para la cual el punto de fusión es mínimo) que se denomina ledeburita y contiene un 4,3% de carbono (64,5% de cementita). La ledeburita aparece entre los constituyentes de la aleación cuando el contenido en carbono supera el 2% (región del diagrama no mostrada) y es la responsable de la mala forjabilidad de la aleación marcando la frontera entre los aceros con menos del 2% de C (forjables) y las fundiciones con porcentajes de carbono superiores (no forjables y fabricadas por moldeo). De este modo, se observa que por encima de la temperatura crítica A_3 los aceros están constituidos solo por austenita, una solución sólida de carbono en hierro y su microestructura en condición es de enfriamiento lento dependerá por tanto de las transformaciones que sufra ésta.

Un eutectoide en la zona de los aceros, equivalente al eutéctico pero en estado sólido, donde la temperatura de transformación de la austenita es mínima. El eutectoide contiene un 0,77% C (13,5% de cementita) y se denomina perlita. Está constituido por capas alternas de ferrita y cementita, siendo sus propiedades

mecánicas intermedias entre las de la ferrita y la cementita.

La existencia del eutectoide permite distinguir dos tipos de aleaciones de acero:

Aceros hipoeutectoides ($< 0,77\% \text{ C}$). Al enfriarse por debajo de la temperatura crítica A_3 comienza a precipitar la ferrita entre los granos (cristales) de austenita y al alcanzar la temperatura crítica A_1 la austenita restante se transforma en perlita. Se obtiene por tanto a temperatura ambiente una estructura de cristales de perlita embebidos en una matriz de ferrita.

Aceros hipereutectoides ($>0,77\% \text{ C}$). Al enfriarse por debajo de la temperatura crítica se precipita el carburo de hierro resultando a temperatura ambiente cristales de perlita embebidos en una matriz de cementita.

Aceros inoxidables

Los aceros inoxidables son resistentes a la corrosión, dado que el cromo, u otros metales que contiene, posee gran afinidad por el oxígeno y reacciona con él formando una capa pasivadora, evitando así la corrosión del hierro.

2.2.5 Aceros inoxidables

El objetivo de mezclar metales, o metales con no metales es el de obtener aleaciones que puedan ser utilizadas en distintas exigencias. En el caso del Hierro (Fe), este material es aleado con metales y no metales con el fin de mejorar sus características mecánicas y/o químicas.

Los elementos de aleación más utilizados son el Silicio, Manganeso, Níquel, Cromo, Molibdeno, Cobre, vanadio y otros. Algunos de ellos se combinan con el Carbono durante el enfriamiento, formando carburos u otros compuestos, es decir, son agentes endurecedores del acero



Figura 2.3 Acero inoxidable [19]

Al aumentar en un mínimo de 11% de Cromo, se obtienen los aceros inoxidables, los que tienen propiedades mecánicas especiales. Se acepta que el mecanismo de resistencia a la corrosión en estos aceros, es debido a la formación de una capa superficial de óxido de cromo muy fina, que impide el ataque corrosivo.

Los aceros inoxidables son una importante clase de aleaciones tanto en forma procesada como fundida para un número de aplicaciones en diversos ambientes. Estas aplicaciones dependen de varios factores como sus propiedades mecánicas a diferentes temperaturas, su resistencia a diferentes tipos de corrosión, su soldabilidad, su fácil conformado en frío y caliente; todos éstos con su estructura y composición química.

Los aceros inoxidables son usados extensamente en una gama de industrias, como la química, de alimentos, petrolera, etc.; así como también son empleados a diario en productos de hogar y comerciales. La presentación de acero inoxidable es diversa; se pueden nombrar como ejemplos los siguientes productos: chapas, barras, alambres, perfiles laminados, mallas, tuberías, válvulas, tortillería, etc.; también se presentan en productos manufacturados como calderas, tinas de

fermentación, intercambiadores de calor etc.

Los aceros inoxidable son basados en sistemas Fe-Cr, Fe-Cr-C y Fe-Cr-Ni, definiendo la característica de inoxidable de estos aceros, la cantidad de cromo de estos aceros en valores de 11%, para asegurar una capa protectora de óxido de cromo en la superficie. Pocos aceros contienen más del 30% de cromo y menos de 50% de hierro.

Estos aceros pueden contener una cantidad de otros elementos que altera su microestructura y propiedades al influir en cada una de las fases cristalinas que van a determinar la estructura metalúrgica, definiendo así el tipo de acero inoxidable. Estos elementos pueden ser: Mn, Si, P, Ni, Mo, Cu, Ti, N, B, W, Se, Te.

2.2.5.1 Clasificación de los aceros inoxidables:

Los aceros inoxidables están clasificados por su microestructura definiéndose como austeníticos, martensíticos, ferríticos y dúplex (austeníticos - ferríticos). Además existe un número de precipitación-templabilidad (PH) para los aceros inoxidables martensíticos y austeníticos y son normalmente clasificados separadamente como PH de aceros inoxidables. En las fundiciones de estos aceros existen variantes en toda su microestructura, pero su comportamiento en la soldadura es muchas veces único con respecto a los aceros inoxidables procesados.

Los aceros inoxidables no son indestructibles, sin embargo con una selección cuidadosa, sometidos a procesos de transformación adecuados y realizando una limpieza periódica, algún integrante de la familia de los aceros inoxidables resistirá las condiciones corrosivas y de servicio más severas.

2.2.5.2 Aceros inoxidables martensíticos:

En los aceros inoxidables martensíticos, el carbono está en una concentración tal, que permite la formación de austenita a altas temperaturas, que a su vez se transforma en martensita durante el enfriamiento.

La martensita es una fase rica en carbono, frágil y extraordinariamente dura. Los aceros inoxidables martensíticos tienen la característica común de ser magnéticos y endurecibles por tratamiento térmico, presentando cuando templados una microestructura acicular (en forma de agujas).



Figura 2.4 Acero inoxidable martensítico [20]

Es importante observar que estos aceros son normalmente producidos por la industria siderúrgica en estado recocido, con ductilidad razonablemente buena. Solamente después de templados serán muy duros y poco dúctiles. Pero es precisamente en esta condición (templados), que serán resistentes a la corrosión.

El más utilizado de los aceros inoxidables martensíticos es el Tipo 420. En estado recocido (estructura ferrítica), no presenta buen comportamiento frente a la corrosión atmosférica. Esto porque durante la operación de recocido, a una temperatura aproximada de 760 °C, el carbono y el cromo se combinan para formar carburos de cromo, Cr_{23}C_6 . Cada molécula de carburo de cromo contiene,

en peso, aproximadamente 95% de cromo. Considerando el alto tenor de carbono y el bajo tenor de cromo del acero inoxidable 420 (aproximadamente 0,35% C y 12,50% Cr), como todo el carbono precipita como carburo de cromo durante el recocido, esta precipitación retirará de la solución sólida aproximadamente la mitad del cromo disponible. Por eso, el acero inoxidable 420, es colocado en servicio por el usuario, solamente después de un tratamiento de temple. Cuando templado, el carbono forma parte de la fase martensítica, no siendo encontrado en la aleación precipitado como carburo de cromo.

La alta dureza y la consecuente resistencia al desgaste, determinan las aplicaciones de este material, utilizado en cuchillería, discos de freno, equipos quirúrgicos, odontológicos y turbinas.

Si la cantidad elevada de carbono es un inconveniente en el acero inoxidable 420 en estado recocido, una solución lógica es la de disminuir este tenor, lo que se hace en el inoxidable Tipo 410. Como este material tiene un máximo de 0,15% de carbono, esta cantidad no es suficiente para remover tanto cromo de la solución sólida y, consecuentemente, presenta una buena resistencia a la corrosión atmosférica, tanto en la condición de recocido como de templado.

Después del tratamiento de temple, las durezas alcanzadas por este material no son tan altas como las presentadas por el inoxidable 420. Las principales aplicaciones del inoxidable 410 son en equipos para refinación de petróleo, válvulas, componentes de bombas y cuchillería.

Aumentando la cantidad de azufre se obtiene el inoxidable 420 F, una variedad del 420, con buena maquinabilidad.

Adiciones de carbono (para obtenerse durezas todavía mayores) y de cromo y molibdeno (mejorando también la resistencia a la corrosión) conllevan a los aceros inoxidables martensíticos Tipo 440.

2.2.5.3 Aceros inoxidables ferríticos

Los aceros inoxidables ferríticos también son magnéticos. A pesar de tener una menor cantidad de carbono que los martensíticos, se tornan parcialmente austeníticos a altas temperaturas y consecuentemente precipitan martensita durante el enfriamiento. Puede decirse que son parcialmente endurecibles por tratamiento térmico.



Figura 2.5 Aceros inoxidables ferríticos [21]

Los aceros inoxidables ferríticos contienen, de un modo general, un tenor de cromo superior al de los martensíticos. Este aumento en la cantidad de cromo mejora la resistencia a la corrosión en diversos medios, pero sacrifica en parte otras propiedades, como la resistencia al impacto.

El más utilizado de los aceros inoxidables ferríticos es el Tipo 430, que contiene 16 a 18% de cromo y un máximo de 0,12% de carbono. Entre sus aplicaciones, se puede mencionar: cubiertos, vajillas, cocinas, piletas, monedas, revestimientos, mostradores frigoríficos.

Uno de los mayores problemas del inoxidable 430 es la pérdida de ductilidad en las regiones soldadas, que normalmente son frágiles y de menor resistencia a la corrosión. El elevado crecimiento del tamaño de grano, la formación parcial de martensita y la precipitación de carbonitruros de cromo, son las principales causas generadoras de este problema.

Para enfrentar este inconveniente, se adiciona titanio y/o niobio, como estabilizadores del carbono. Los Tipos 409, 430 Ti y 430 Nb son muy utilizados, principalmente en silenciadores y escapes de automóviles.

El aluminio se utiliza también como un estabilizador de ferrita. El inoxidable 405, con aluminio entre 0,10 y 0,30% es muy utilizado en la fabricación de estructuras que no podrán ser recocidas después de la operación de soldado.

Aunque los inoxidables ferríticos presentan una buena resistencia a la corrosión, algunas características limitan la utilización de los mismos en determinadas aplicaciones. La estampabilidad es buena, aunque insuficiente en aplicaciones que requieren estampado profundo. La soldabilidad es apenas discreta, por los problemas ya mencionados.

Una gran mejoría en muchas propiedades es conseguida con la introducción de níquel como elemento de aleación. Con determinados tenores de níquel es posible conseguir un cambio de la estructura ferrítica hacia austenítica.

2.2.5.4 Aceros inoxidables austeníticos:

Los aceros inoxidables austeníticos no son magnéticos y no pueden ser endurecidos por tratamiento térmico. Son muy dúctiles y presentan excelente soldabilidad. Su microestructura está constituida fundamentalmente por granos de austenita. La presencia de Ni en estos aceros permite estabilizar la fase austenítica, pues de otro modo la adición única de Cr produciría una microestructura ferrítica a temperatura ambiente.



Figura 2.6 Acero inoxidable austeníticos [22]

Los aceros inoxidables austeníticos tienen una estructura austenítica estable independiente de la temperatura, tienen una estructura centrada en las caras (FCC), se obtienen agregando níquel a la aleación, por lo que la estructura cristalina del material se transforma en austenita (γ) y de aquí adquieren el nombre. Son aceros que además de contener cromo en proporción de 16-26% contienen níquel en proporción de 6-22%, y contenidos en carbono muy bajo, inferior al 0,1 %, y que solo pueden aumentarlo hasta el 0,25% en casos de máximo contenido de cromo y níquel. Se incluyen en estas consideraciones aquellos aceros en los que la parte del níquel está ocupada por el manganeso, otro elemento austenizante.

En la familia de los aceros inoxidables austeníticos se distinguen dos grupos: el de los austeníticos al cromo-níquel, por una parte, y al cromo-manganeso-níquel, por otra. El primer grupo es el más importante, dado que a él pertenecen la mayor parte de los aceros inoxidables comúnmente empleados, y está compuesto por aleaciones hierro-carbono-cromo-níquel con aporte ocasional de otros elementos, como el molibdeno, el titanio, el niobio, etc. El segundo grupo, por el contrario, es cuantitativamente más modesto y está formado por aleaciones de hierro-carbono-cromo-manganeso-níquel.

Los aceros inoxidables austeníticos son los más utilizados por su amplia variedad de propiedades, se obtienen agregando Níquel a la aleación, por lo que la estructura cristalina del material se transforma en austenita y de aquí adquieren el

nombre. El contenido de Cromo varía de 16 a 28%, el de Níquel de 3.5 a 22% y el de Molibdeno 1.5 a 6%.

Los tipos más comunes son el AISI 304, 304L, 316, 316L, 310 y 317. Las propiedades básicas son: Excelente resistencia a la corrosión, excelente factor de higiene - limpieza, fáciles de transformar, excelente soldabilidad, no se endurecen por tratamiento térmico, se pueden utilizar tanto a temperaturas criogénicas como a elevadas temperaturas. El acero inoxidable austenítico más popular es el tipo 304, que contiene básicamente 18% de cromo y 8% de níquel, con un tenor de carbono limitado a un máximo de 0,08%.

Los aceros inoxidables son un grupo de aceros aleados que presentan una resistencia muy significativa a la corrosión (ello no significa que todos resistan ante todo los medios corrosivos).

Los aceros inoxidables se definen como aceros que contienen un 10,5% o más de cromo. Las pruebas y experimentos realizados indican que un mínimo de 10,5% de cromo es requerido para hacer que el acero inoxidable tenga suficiente resistencia a la corrosión. Contrariamente a la creencia popular que el acero inoxidable se produce por la presencia de Ni (Níquel), es la presencia del cromo lo que hace que el acero sea "Inoxidable".

2.2.6 Aceros inoxidables dúplex

Aceros inoxidables dúplex, también conocidos como acero inoxidable austenítico-ferrítico, de la familia de grados con proporciones iguales de ferrita y austenita. Estos aceros tienen una microestructura doble la cual contribuye a su alta fuerza y alta resistencia a la fractura de corrosión. Debido a su alto contenido de cromo, nitrógeno y molibdeno, los aceros dúplex ofrecen una buena resistencia a corrosión local y uniforme. Estos aceros también son fáciles de soldar.

2.2.6.1 Aceros inoxidables austeno-ferríticos: “DÚPLEX”:

Los aceros inoxidables dúplex o austeno-ferríticos son aleaciones de hierro, cromo, níquel y molibdeno que forman una mezcla de austenita (60-40%) y ferrita (40-60%). Otros elementos aleantes son: Mn (Manganeso), Cu (Cobre), Si (Silicio), P (Fósforo), S (Azufre), N (Nitrógeno).

Sus características generales son:

- * La estructura dúplex mejora la resistencia a la corrosión bajo esfuerzo en ambientes con iones cloruro.
- * Son magnéticos.
- * Su soldabilidad, tenacidad y ductilidad son buenas, intermedias entre las de los aceros austeníticos y ferríticos.
- * No se endurecen por tratamiento térmico, por ejemplo temple, pero sí por deformación en frío o en caliente.

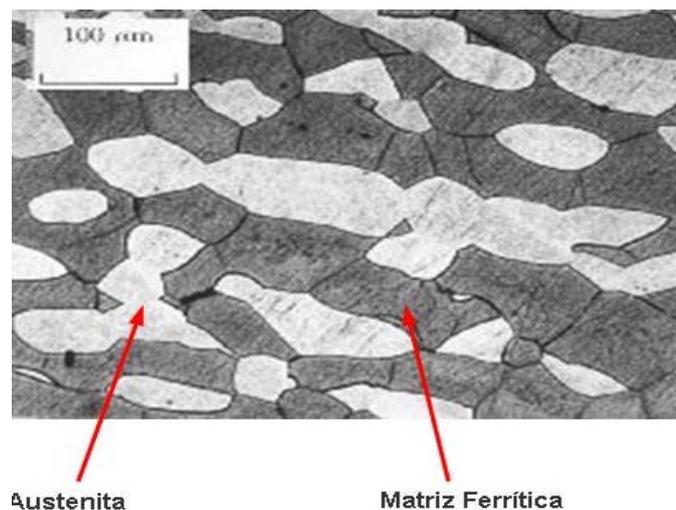


Figura 2.7 Micrografía de un acero inoxidable dúplex [23]

2.2.6.2 Clasificación de los aceros inoxidables dúplex:

- **Acero inoxidable dúplex SAF 2304**

El acero SAF 2304 es un acero inoxidable dúplex (austeno-ferrítico) con bajo contenido en carbono. Se caracteriza por las siguientes propiedades:

- ✓ Muy buena resistencia a la corrosión bajo esfuerzo.
- ✓ Buena resistencia a la corrosión generalizada y a la corrosión por picaduras.
- ✓ Alta resistencia mecánica.
- ✓ Buena tenacidad.
- ✓ Buena soldabilidad.

Tabla 2.1 Propiedades mecánicas del acero Dúplex SAF 2304. [24]

Grado	Resistencia mecánica (MPa)	Límite elástico 0,2% (MPa)	Dureza Rockwell (HRC)
SAF 2304	600 (valor mínimo)	400 (valor mínimo)	30,5 (valor máx.)

Otras características:

- ✓ Si el acero SAF 2304 se expone a altas temperaturas (> 280°C) durante largos periodos de tiempo, se produce un cambio en su microestructura, que da lugar a una reducción de su resistencia al impacto.
- ✓ Debido a su alto contenido en cromo, posee una excelente resistencia a la corrosión en ambientes ácidos.
- ✓ Debido a su microestructura bifásica, posee una excelente resistencia a la corrosión bajo esfuerzo.
- ✓ En general posee una resistencia mecánica y a la corrosión mayor que las de los aceros inoxidables austeníticos. [24]

- **Acero inoxidable dúplex SAF 2205**

Este acero se encuentra en el grupo de inoxidables dúplex que contienen nitrógeno y sus fabricantes lo suministran en una gran variedad de formatos. Es el acero inoxidable dúplex más empleado.

La actitud que presentan los aceros inoxidables dúplex a ser mecanizados difiere algo de la de los aceros al carbono y de los aceros inoxidables austeníticos, debido a las diferencias en cuanto a resistencia mecánica y a su microestructura. Dadas sus excelentes propiedades anticorrosivas, el acero SAF 2205 es un material muy adecuado para medios que contengan iones cloruro, así como sulfuros. Se emplea en conductos enterrados para la extracción de petróleo y de gas, en refinerías y en procesos que impliquen la contaminación con cloruros.

Su alta resistencia mecánica lo hace idóneo para su empleo en estructuras que estén sometidas a grandes cargas. Sus buenas propiedades mecánicas y anticorrosivas hacen de su elección una alternativa económica en muchas aplicaciones. [25]

2.2.6.3 Campo de aplicaciones de los aceros dúplex:

Los aceros inoxidables dúplex poseen una atractiva combinación de propiedades mecánicas y anticorrosivas, por lo que hacen al material una excelente opción para aplicaciones marinas y petroquímicas, particularmente en aquellas donde tengan presencia medios clorinados. Su aplicación se ha incrementado notablemente en la industria química, del transporte, del gas y petróleo, y del papel. La aceptación que han recibido los aceros dúplex se debe a su elevada resistencia a la corrosión, junto con unas buenas propiedades mecánicas, lo que los hace especialmente indicados en situaciones de posible

corrosión bajo tensión.

El interés en los DSS se ha visto incrementado gracias al desarrollo de mejoras en las propiedades del material a la corrosión inducida por medios clorinados, la cual es un problema de gran envergadura en industrias con las aplicaciones antes descritas.[26]

La aplicación más común de estos aceros es en forma de productos planos (plancha, chapa, banda) obtenidos mediante procesos de laminación, aproximadamente el 95% de la producción mundial de los aceros dúplex laminados se fabrica según un mismo proceso industrial: en una primera etapa el acero procedente de colada continua se lamina en caliente para conseguir importantes reducciones de espesor, seguidamente se realiza un tratamiento térmico de recocido con el fin de recuperar su ductilidad para la posterior laminación en frío hasta el espesor final requerido.

2.2.7 Resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables

Todos los aceros inoxidables contienen el cromo suficiente para darles sus características de inoxidables. Muchas aleaciones inoxidables contienen además níquel para reforzar aún más su resistencia a la corrosión. Estas aleaciones son añadidas al acero en estado de fusión para hacerlo "inoxidable en toda su masa". Por este motivo, los aceros inoxidables no necesitan ser ni chapeados, ni pintados, ni de ningún otro tratamiento superficial para mejorar su resistencia a la corrosión. En el acero inoxidable no hay nada que se pueda pelar, ni desgastar, ni saltar y desprenderse.

El acero ordinario, cuando queda expuesto a los elementos, se oxida y se forma óxido de hierro pulverulento en su superficie. Si no se combate, la oxidación sigue adelante hasta que el acero esté completamente corroído.

También los aceros inoxidable se oxidan, pero en vez de óxido común, lo que se forma en la superficie es una tenue película de óxido de cromo muy densa que constituye una coraza contra los ataques de la corrosión. Si se elimina esta película de óxido de cromo que recubre los aceros inoxidable, se vuelve a formar inmediatamente al combinarse el cromo con el oxígeno de la atmósfera ambiente.

El empleo de acero inoxidable estará bajo la dependencia de las características oxidantes del ambiente. Si imperan condiciones fuertemente oxidantes, los aceros inoxidable resultan superiores a los metales y aleaciones más nobles. Sin embargo, en la misma familia de los aceros inoxidable la resistencia a la corrosión varía considerablemente de un tipo al otro. En el grupo al cromo níquel, los tipos 301 y 302 son menos resistentes a la corrosión que los tipos 310 y 316. En el grupo más sencillo al cromo, los tipos 405 y 410 son menos resistentes a la corrosión que los tipos 430 y 442.

2.2.8 Ensayo de tracción

Es uno de los ensayos más empleados. Consiste en someter una probeta normalizada a esfuerzos progresivos y crecientes de tracción en la dirección de su eje hasta que llegue a la deformación y a la rotura correspondiente. Esta propiedad es de importancia en ingeniería cuando se considera la habilidad del material a soportar un esfuerzo sin deformarse y fracturarse.

El tipo de muestra utilizado para el ensayo de tracción varía considerablemente. Para metales con una sección gruesa en forma de plancha se utiliza comúnmente una muestra cilíndrica de 0,50 in. de diámetro. Para metales con secciones más finas en formas de láminas se usan muestras planas, la longitud patrón más comúnmente utilizadas para pruebas de tracción es una longitud de 2 in.

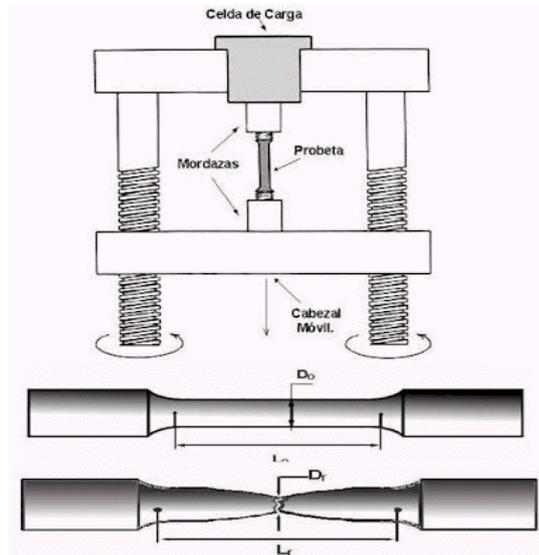


Figura. 2.8 Dibujo esquemático de un ensayo de tracción (Fundamentos de la Ciencia de Materiales). [12]

El tipo de muestra utilizado para el ensayo de tracción varía considerablemente. Para metales con una sección gruesa en forma de plancha se utiliza comúnmente una muestra cilíndrica de 0,50 in. de diámetro. Para metales con secciones más finas en formas de láminas se usan muestras planas, la longitud patrón más comúnmente utilizadas para pruebas de tracción es una longitud de 2 pulg.

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

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (\text{Ec 2.1})$$

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*)

Para calcular la *deformación* a partir del *alargamiento*, se utiliza la siguiente ecuación:

$$e = \frac{l_f - l_0}{l_0} \quad (\text{Ec 2.2})$$

De donde:

- e = Deformación de ingeniería
- 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*)

Para calcular los porcentajes de reducción de áreas se empleo la siguiente ecuación:

$$\% R.A = \frac{A_o - A_f}{A_o} \quad (\text{Ec 2.3})$$

De donde:

- A_0 = Área inicial (*mm*²)
- A_f = Área final (*mm*²)

$$\sigma = \sigma_i(1 + e) \quad (\text{Ec 2.4})$$

De donde:

- σ_r = esfuerzo real (*MPa*)
- σ_i = Esfuerzo de ingeniería (*MPa*)
- e = Deformación de ingeniería (*mm/mm*)

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (\text{Ec 2.5})$$

De donde:

- e = Deformación de ingeniería (mm/mm)
- ε = deformación real

2.2.9 Ensayo de impacto

Los ensayos dinámicos de choque se realizan generalmente en máquinas denominadas péndulos o martillos pendulares, en las que se verifica el comportamiento de los materiales al ser golpeados por una masa conocida a la que se deja caer desde una altura determinada, realizándose la experiencia en la mayoría de los casos, de dos maneras distintas según que la probeta rompa por flexionamiento (flexión por choque) o que su rotura se alcance por deformación longitudinal (tracción por choque). Los valores obtenidos en estos ensayos son únicamente comparables, en materiales con propiedades similares ya sean siempre dúctiles o frágiles, cuando se realizan sobre el mismo tipo de probeta y en idénticas condiciones de ensayo.

La máquina de ensayo determinará el trabajo absorbido por el material cuando éste es roto de un solo golpe por la masa pendular y su valor en kgmf o Joule, o relacionándolo con la sección o volumen de la probeta, según el método nos indicará la resistencia al choque o capacidad del material para absorber cargas dinámicas de impacto (resiliencia).



Figura 2.9 Péndulo Charpy. [19]

El principio de funcionamiento de las máquinas utilizadas es el que ilustra esquemáticamente la figura 2.10, en donde son ensayadas las probetas entalladas de impacto. El péndulo cae sobre el dorso de la probeta y la fractura. La diferencia entre la altura inicial del péndulo (h) y la final tras el impacto (h') permite medir la energía absorbida en el proceso de fracturar la probeta.

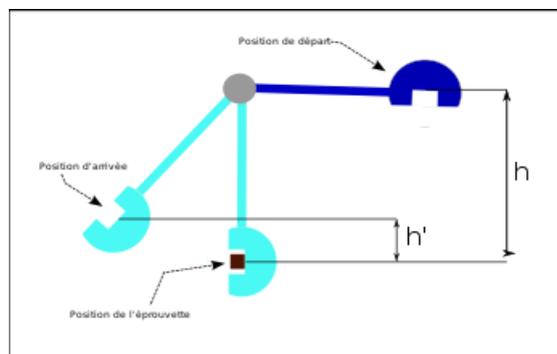


Figura 2.10 Esquema de funcionamiento del péndulo de Charpy [20]

2.2.9.1 Tenacidad de fractura:

La tenacidad de fractura puede ser definida como la habilidad de un material para transmitir carga o deformación plástica, en presencia de una muesca y puede ser descrita, en términos del factor de intensidad de esfuerzo crítico bajo

condiciones de estado plano de esfuerzos (K_c) o de estado plano de deformación (K_{IC}) para carga lenta y comportamiento lineal elástico. K_{IC} es una medida de tenacidad crítica de un material bajo condiciones de máxima restricción plástica (estado de deformación plana) y bajo carga dinámica o de impacto, también para comportamiento lineal- elástico. Para comportamiento elástico-plástico (materiales con mayores niveles de tenacidad con entalla que exhiben un comportamiento lineal- elástico). La tenacidad del material es medida en términos de parámetros tales como: K_{IC} , integral J (J_{IC}), curva R, desplazamiento de apertura de boca (COD).

La tenacidad a la fractura depende del espesor de la probeta: conforme se incrementa el espesor, la tenacidad a la fractura K_c disminuye hasta un valor constante. Esta constante se conoce como la tenacidad a la fractura en estado de deformación plana K_{IC} . Generalmente K_{IC} se reporta como propiedad de un material. [23]

2.2.9.2 Método de Rolfe-Novak-Barsom:

Debido a que la determinación experimental del K_{IC} , J_{IC} y COD es costosa (maquinado, pre-agrietado por fatiga, ensayo) y no es generalmente usada para control de calidad, en los últimos años se ha tratado de correlacionar los resultados de ensayos mecánicos más simples con la tenacidad y el K_{IC} del material. Ciertas relaciones empíricas entre los valores de K_{IC} y CVN han sido propuestas en base a los resultados de diferentes investigaciones.

Barson y Rolfe en el año 1986 observaron que el efecto de la temperatura y a velocidad de carga en los valores de CVN y K_{IC} es la misma, la cual sugiere la posibilidad de establecer ciertas relaciones empíricas entre los resultados de estos dos ensayos. En el rango dúctil, la diferencia entre las muestras de ensayo para K_{IC} y CVN; la velocidad de carga y agudeza en la entalla, no son tan

significativos por lo cual se espera una correlación razonable. [27]

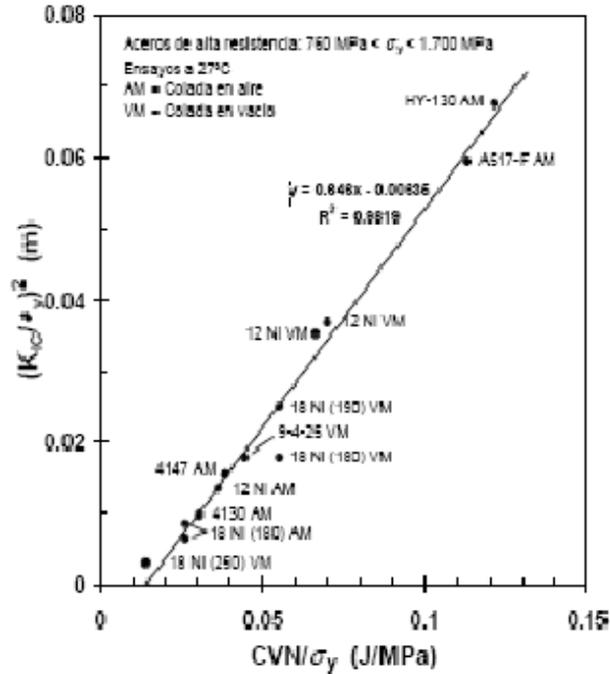


Figura 2.11 Correlación entre la tenacidad (K_{IC}) y la energía Charpy (CVN) [27]

En la figura 2.3 se muestra la relación entre valores de K_{IC} y CVN desarrollada a partir de los resultados obtenidos de once aceros con resistencia a la fluencia entre 110 y 246 Ksi, valores de K_{IC} entre 87 y 246 Ksi.pulg^{1/2} y valores de impacto Charpy entre 16 y 89 pie*lbs.

La relación propuesta por Rolfe, Novak y Barsom es:

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_Y}\right)^2 = \left(\frac{5}{\sigma_Y}\right) \cdot [CVN - (20/\sigma_Y)] \quad \text{(Ec 2.6)}$$

Donde:

K_{IC} = factor de intensidad de esfuerzo crítico bajo condiciones de estado plano de deformación en (Ksi.pulg^{1/2})

CVN = valor de ensayo de impacto a Charpy CVN en (pie.Lb),

$$\text{Donde: } \sigma_Y = (\sigma_y + \sigma_M) / 2 \quad (\text{Ec 2.7})$$

σ_y = Esfuerzo de fluencia en unidades de Ksi

σ_M = Esfuerzo máximo en unidades de Ksi

Esta relación está además de acuerdo con el criterio de falla del integral J. Ya que el valor de K_{IC} es un ensayo estático y el CVN de impacto es un ensayo dinámico, esta relación está limitada a aceros con resistencia a la fluencia mayor que 100 Ksi. Sin embargo debido a que esta relación es válida para aceros en el rango dúctil donde los valores de CVN de impacto y en doblado lento son aproximadamente constantes para aceros con resistencia de fluencia diferentes, dicha relación podría ser extendida a aceros con σ_y menor que 100 Ksi. [27]

2.2.10 Microscopia óptica

Para realizar la revisión microscópica de la muestra, previamente se debe preparar de acuerdo a ciertas normas, luego se exponen a la acción química de un reactivo y, como último paso, se observa la muestra en el microscopio metalográfico. La confiabilidad de esta información, sobre la microestructura y los constituyentes del material en estudio, está imitadamente vinculada con el proceso antes descrito, de no ser así, el ensayo puede arrojar que disten de la realidad.

2.2.11 Corrosión: causas y remedios

Son cinco los riesgos que amenazan el éxito del uso de los aceros inoxidable. Estos son: la corrosión intergranular, la corrosión por efecto galvánico, la corrosión por contacto, la corrosión en forma de picado o de pinchazos de alfiler, y la corrosión por fatiga. Muchos fracasos pueden ser evitados dándose cuenta sencillamente de los riesgos involucrados y adoptando las medidas apropiadas para eliminarlos.

2.2.11.1 Corrosión intergranular

Un tratamiento térmico inadecuado del acero inoxidable puede producir una red de carburos en los aceros con más del 0,03 por ciento de carbono, o sin adición de titanio o de columbio. El metal que contenga tal red es susceptible de corrosión intergranular que podrá ser causa de fracaso en condiciones muy corrosivas y reducir la duración útil en muchos servicios relativamente ligeros. Los procedimientos normales de soldadura introducen en el metal la susceptibilidad a la precipitación de los carburos. Que el acero sea susceptible de corrosión intergranular no significa necesariamente que será atacado por ella. En servicio, el resultado puede ser satisfactorio. Pero la posibilidad de corrosión intergranular deberá ser tomada en cuenta siempre que no quede excluida según la experiencia previa. La precipitación de carburos puede ser eliminada por uno de los tres procedimientos indicados a continuación:

a) **Por recocido:** una vez terminadas las operaciones de elaboración y de soldadura, el acero deberá ser calentado hasta una temperatura lo suficientemente alta para disolver los carburos, lo que es generalmente entre 1036 °C y 1150 °C, para enfriarlo luego con la rapidez suficiente para evitar que se vuelva a precipitar el carburo y utilizando para ello un chorro de aire o agua. Un tratamiento térmico

localizado en la zona inmediatamente adyacente a la soldadura no da resultados satisfactorios. Para un recocido efectivo, toda la pieza deberá ser calentada y apropiadamente enfriada con rapidez.

b) Utilizando acero que contenga menos de 0,03 % de carbono.

c) **Utilizando un acero estabilizado:** el titanio o el columbio se combinan con el carbono y evitan las precipitaciones perjudiciales. Los aceros estabilizados son necesarios para todo servicio que implique prolongadas exposiciones a las temperaturas entre 426° C y 871 °C.

El peligro inherente a la precipitación de carburo de cromo ha llegado a ser tan bien conocido y tan fácilmente evitado que ocurra pocos fracasos debidos a esta causa.

2.2.11.2 Corrosión galvánica

La corrosión galvánica ejerce una acción localizada que puede sobrevenir cuando una junta de unión entre dos metales disimilares está sumergida en una solución que puede obrar como electrolito. En un medio corrosivo, los dos metales diferentes forman unos electrodos cortocircuitados y constituyen una celda electroquímica. De ello resulta la disolución del electrodo anódico, mientras que el cátodo permanece inalterable. El potencial variará según la posición ocupada por los metales y aleaciones en el cuadro de las series galvánicas que se acompaña.

El empleo de distintos metales en una solución corrosiva no significa que la corrosión galvánica sea inevitable.

La corrosión se atribuye frecuentemente a la acción galvánica cuando su

verdadera causa se debe efectivamente a unas condiciones anormales de operación. Así por ejemplo, el uso de ácido clorhídrico, para sustituir un material de limpieza normal, puede destruir la película pasiva del acero inoxidable. En tal caso se puede formar una celda galvánica que empezará a funcionar tan pronto como la pieza en cuestión entre en función. El volver a proyectar y a construir una pieza que sea completamente de acero inoxidable puede ser muy costoso y la nueva pieza proyectada puede ser difícil de fabricar. Así, cuando aparentemente la acción galvánica sea la única causa de un desperfecto en una unidad que, demostradamente, es de un buen diseño, convendrá realizar una verificación meticulosa para cerciorarse de que todas las condiciones de operación son normales.

2.2.11.3 Corrosión por contacto

El tercer riesgo es la corrosión por contacto. Una diminuta partícula de acero al carbono, una escama de óxido, cobre u otra substancia extraña cualquiera incrustada en el acero inoxidable puede ser suficiente para destruir la pasividad en el punto de contacto. El ataque empieza al formarse una celda galvánica con la partícula de material extraño como ánodo. Mientras dura la acción electroquímica que disuelve lo contaminado, iones de hidrógeno se liberan haciendo que el acero inoxidable se vuelva activo en el punto de contacto. La acción de picado puede proseguir después de haber sido eliminada la partícula extraña por haberse constituido una celda activa-pasiva entre la diminuta superficie anódica atacada y la extensa área catódica circunvecina. Cuando las secciones inoxidables entran en servicio deberán estar limpias de escamas de óxido, de aceite, de pequeñas partículas metálicas procedentes de las herramientas, troqueles e hileras, así como de todo material extraño. La corrosión por contacto puede iniciarse al cabo de mucho tiempo de estar la pieza en servicio si los métodos de limpieza empleados

no son meticulosos. [28]

2.2.11.4 Picado o corrosión en forma de pinchazos de alfiler

Las soluciones que contengan cloruros podrían atacar por una acción de picado, y en las picaduras se podrán desarrollar celdas galvánicas. Los daños debidos a este picado son también llamados pinchazos de alfiler causados por la corrosión. Los cloruros ácidos, tales como el cloruro férrico y el cloruro sódico son particularmente peligrosos, pero cualquier cloruro en concentración apreciable puede ser la causa posible de perturbaciones. Generalmente los fracasos del acero inoxidable en un medio supuestamente a salvo de la corrosión son atribuibles a la presencia del ion cloruro en mayor concentración que la previsible.

El molibdeno contenido en los tipos 316 y 317 aumenta la resistencia al picado. Estas aleaciones quedan sometidas a los desperfectos debidos a la corrosión por fatiga; así pues, los recipientes deberán quedar tan exentos de esfuerzos como sea posible. Grietas, fisuras y bolsas de estancamiento deberán ser eliminadas ya que son las superficies limpias y en buen estado las que mejor resisten al picado, cualquiera que sea la calidad del acero inoxidable.

2.2.11.5 Corrosión por fatiga

La corrosión por fatiga es otro de los riesgos que han de ser eliminados. Casi todos los metales y aleaciones, incluso el acero austenítico inoxidable, pueden fallar al agrietarse o quebrarse debido a la corrosión por fatiga en condiciones que impliquen esfuerzos aplicados o esfuerzos residuales combinadas con agentes ligeramente corrosivos. Las soluciones de cloruro son de lo más perjudicial al provocar el agrietamiento de los aceros inoxidables austeníticos.

El mecanismo causante de la corrosión por fatiga todavía no ha sido

determinado. Es principalmente transgranular y puede ir acompañado de ataques de picado. Son muy susceptibles las piezas que han estado sometidas a un fuerte trabajo en frío, pero el acero recocido puede también agrietarse cuando se le somete a condiciones difíciles. Es más fácil que el agrietamiento se produzca en soluciones calientes que en las frías. El tipo 315 y el tipo 317, en la condición de recocido, ofrecen mayor resistencia al ion cloruro que el tipo 302 y el tipo 304. Pero si están bajo esfuerzos fuertes, pueden fallar lo mismo en un ambiente conducente a la corrosión por fatiga.

Esfuerzos fuertes y débiles en el mismo elemento producen una condición que fácilmente puede conducir a la corrosión por fatiga en presencia de cloruros.

Los aceros inoxidable, estirados, embutidos o trabajados en frío se agrietan fácilmente en sistemas que contengan sulfuro de hidrógeno acuoso. Distintos medios, incluso las soluciones cáusticas calientes bajo presión, han causado el agrietamiento según ha sido informado, aunque en la mayoría de estos casos pueden haber sido causadas por impurezas no observadas contenidas en el cloruro.

Las precauciones generales que indicamos a continuación deberán ser adoptadas para prevenir la corrosión por fatiga:

- a) Asegurarse de que no se acumulen sales corrosivas procedentes del material aislante, del goteo o de pulverizaciones o salpicaduras corrosivas en el área del recipiente.
- b) Evitar toda cavidad donde se recoja agua durante el ciclo de operaciones, acumulándose una concentración de sales en la cavidad.
- c) Especificar que las planchas perforadas deberán ser tratadas para eliminar completamente los esfuerzos interiores después de haber sido taladradas, si han de ser utilizadas como pantalla para operaciones de las que se sabe corren el riesgo

de que se produzca corrosión.

d) Elíjanse tubos con buena concentricidad y con unos límites de tolerancia muy estrechos en el grueso de las paredes, para los haces de tubos destinados a los intercambiadores de calor, con el fin de evitar tensiones elevadas y desiguales cuando se los curva para los distribuidores.

e) Evitar el unir por soldadura metales con coeficientes de dilatación diferentes cuando el recipiente deba ser calentado durante las operaciones. Los tipos de la serie 300 se dilatan aproximadamente de 1 a 1 1/2 veces más que los tipos de la serie 400.

f) Utilizar los tipos con el 0,03% como máximo de carbono, 304 L, 316 L, y 317 L, para reparar recipientes respectivamente de los tipos 304, 316 y 317 siempre que se desee reducir localmente los esfuerzos después de hecha la reparación. Únicamente el acero con el 0,03 % de carbono como máximo deberá ser calentado a más de 426 °C siempre que exista el riesgo de que se produzca corrosión intergranular.

g) Evítese el curvado cíclico que repetidamente tensa el acero inoxidable por encima de su resistencia a la deformación o límite de elasticidad. Esto puede formar tensiones interiores que favorezcan la corrosión por fatiga inclusive en un medio de efecto moderado. [28]

2.2.12 Ensayos de corrosión

Los ensayos de corrosión se establecen con el fin de obtener resultados cualitativos y/o cuantitativos, y se pueden clasificar, de forma general, en cinco tipos:

1. Ensayos de rutina, para comprobar el logro de un determinado standard de calidad del metal o del medio corrosivo. En ambos casos, la reproducibilidad de los resultados tiene generalmente más importancia que la simulación exacta de las condiciones en que se produce la corrosión.
2. Ensayos de comparación de diferentes metales, con el objetivo de seleccionar el más apropiado para un determinado fin, o bien evaluar un metal nuevo, comparándolo con otro cuyo comportamiento en servicio sea ya conocido.
3. Estimación de la vida de un metal en condiciones de servicio dadas. Para este fin se requiere, generalmente, la calibración del ensayo en relación con el comportamiento durante la utilización, o la inclusión de ciertas muestras de control cuyo comportamiento ya se conoce.
4. Determinación de los diferentes tipos de medio ambiente y condiciones en las cuales puede usarse satisfactoriamente un determinado metal.
5. Pruebas para la obtención de nuevas aleaciones que posean una elevada resistencia a la corrosión. [28]

2.2.12.1 Ensayo de corrosión en cámara de niebla salina:

El ensayo de niebla salina consiste en exponer la pieza objeto del ensayo a una niebla salina durante un cierto período en el interior de la cámara, bajo condiciones controladas. El tiempo transcurrido desde que se introdujo la pieza o artículo hasta que comienza el ataque de la corrosión, proporciona una medida de la capacidad de resistencia del metal constituyente o del recubrimiento a dicho ataque.

2.2.12.2 Cámara de niebla salina:

La misión de la cámara de niebla salina es la simulación controlada de la climatología marina para aplicarla a la realización de ensayos de corrosión acelerada en el laboratorio

Concepto:

El término “cámara salina” es la acepción coloquial comúnmente utilizada en el argot de laboratorios de calidad, para definir a las cámaras de ensayos de corrosión por niebla salina.

Aplicaciones:

Determinación del grado de resistencia a la corrosión de los metales.
Pruebas de calidad de recubrimientos y medios de protección superficial.
Investigación de nuevos productos.

Características:

- Homogeneidad de la densidad de niebla producida.
- Programación automática de caudal de solución salina.
- Mantenimiento de la tolerancia de pluviometría media.
- Composición química y ph controlados.

3.1 Nivel de la investigación:

El siguiente trabajo de investigación es de tipo experimental y descriptiva, ya que, consiste en la caracterización de un acero inoxidable dúplex, con el fin de establecer las propiedades del acero. Esta investigación también se basa en el diseño experimental, debido a que, se someterá el acero inoxidable dúplex, a un tratamiento de exposición a un medio corrosivo de cloruro de sodio (NaCl), para observar los efectos y reacciones que se producen; pretendiendo establecer una relación causa-efecto.

3.2 Población y muestra:

La población de esta investigación se refiere al acero inoxidable dúplex SAF 2304, Se utilizaron 40 muestras (probetas) del acero que se dividieron en: para el ensayo de impacto 5 muestras a 4 tiempos diferentes con un total de 20 probetas, para el ensayo de tracción 3 muestras a 4 tiempos diferentes para un total de 12 probetas. Además, de 5 probetas más para impacto y 3 para tracción que serán las bases para el estudio ya que no se expondrán al ambiente corrosivo y estas serán en condiciones originales del acero y será la guía para dicho estudio.

En total se emplearon 25 probetas de Impacto y 15 probetas de tracción.

3.3 Caracterización del Material:

El material en estudio es un acero inoxidable austeno-ferrítico SAF 2304 el cual fue suministrado por la empresa “Trabajos Industriales y Mecánicos, C.A.” (TRIME, C.A.), ubicada en la zona industrial Municipal Norte de Valencia, Edo. Carabobo, efectuándose un análisis químico por la técnica de Fluorescencia de Rayos X, en la Refinería el Palito en el área de Gerencia Técnica Municipio Puerto Cabello, con el propósito de obtener el porcentaje en peso de los elementos que componen este acero.

3.4 Descripción de la metodología a seguir:

En el siguiente diagrama se muestra la metodología seguida para la realización de la siguiente investigación:

Evaluación del deterioro Microestructural de un Acero Dúplex, expuesto a un ambiente corrosivo de Cloruro de Sodio (NaCl)

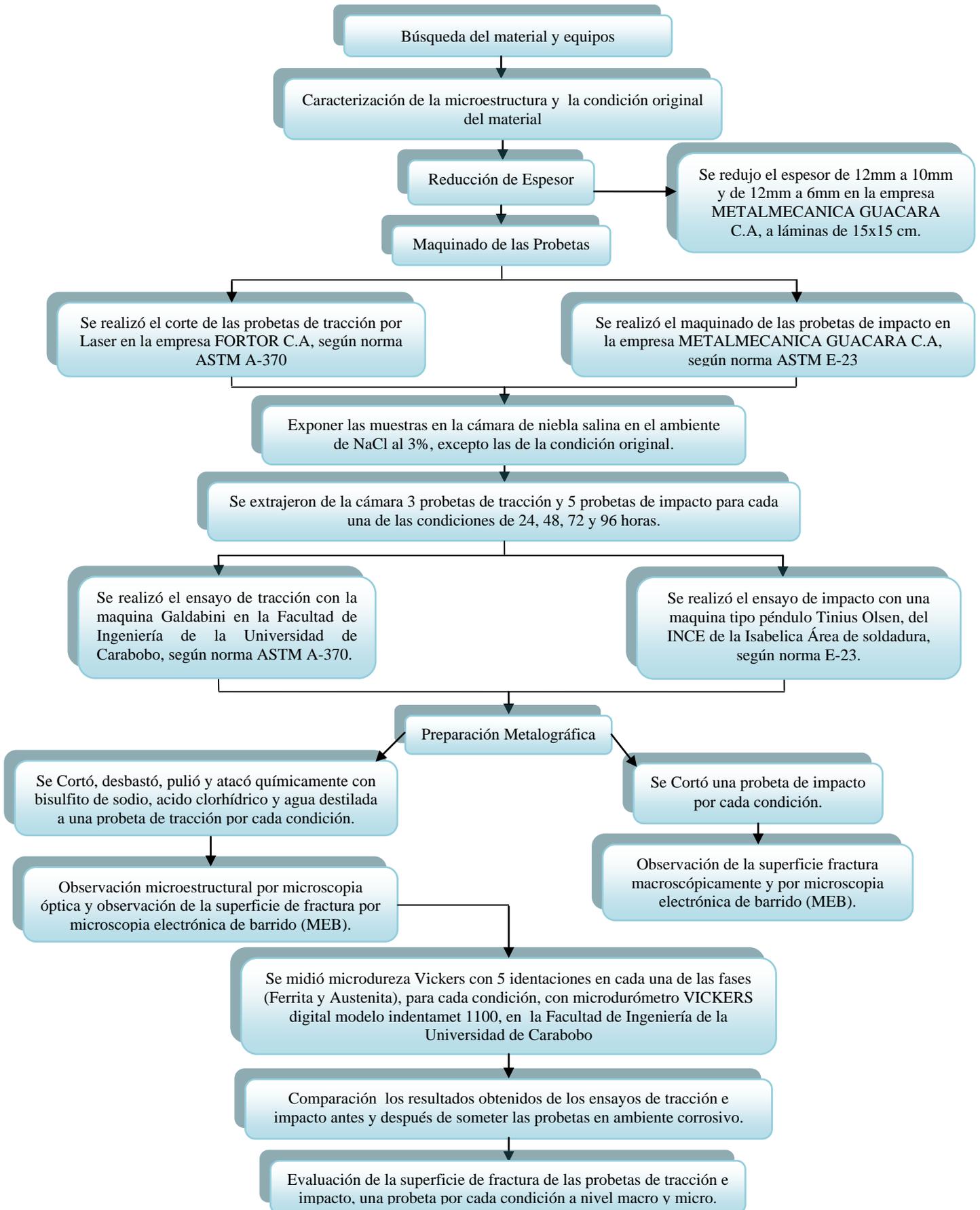


Figura 3.1 Diagrama de actividades.

3.5 Condición original del material:

El material fue suministrado por la empresa “Trabajos Industriales y Mecánicos, C.A.” (TRIME, C.A.), ubicada en la zona industrial Municipal Norte de Valencia, Edo. Carabobo. Las condiciones originales se desconocen ya que a este material se le habían realizado cortes anteriormente. Las dimensiones aproximadas de la lámina son de 1500x500 mm y de espesor 12 mm.

3.6 Mecanizado de las Probetas:

El mecanizado de las probetas se realizó en la empresa METALMECANICA GUACARA, C.A. ubicada en el municipio Guácará en el centro de Guácará; Edo. Carabobo, mediante el empleo de Fresadora y Torno según las normas ASTM E-23 para el ensayo de Impacto Charpy y así garantizar en todas las probetas la forma correcta así como la exactitud del entalle. Por otro lado para el ensayo de Tracción las probetas se cortaron según la norma ASTM A-370, en donde estas últimas se realizaron en la empresa FORTOR DE VENEZUELA, C.A, empleando una máquina para realizar el corte de las probetas con Laser para garantizar en todas las probetas la forma correcta. Las probetas fueron maquinadas en tamaño sub-size de las normas, tanto las de tracción como las de Charpy, debido a la cantidad del material y se hicieron bajo las normas, a continuación se muestra en las siguientes figuras 3.2, 3.3 y 3.4 y en la tabla 3.1 las dimensiones de las probetas:

Evaluación del deterioro Microestructural de un Acero Dúplex, expuesto a un ambiente corrosivo de Cloruro de Sodio (NaCl)

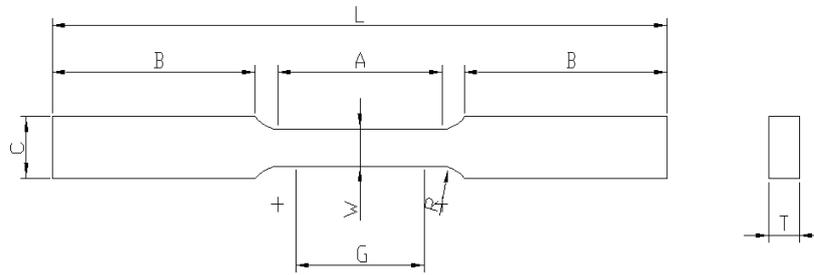


Figura 3.2 Dimensiones de probetas planas de tracción según normal ASTM A-370.

Tabla 3.1 Dimensiones de probetas planas de tracción según normal ASTM A-370.

$G = 25,0 \pm 0,08 \text{ mm}$	$A = 32,0 \text{ mm}$
$W = 6,25 \pm 0,05 \text{ mm}$	$B = 32,0 \text{ mm}$
$R = 6,0 \text{ mm}$	$C = 10,0 \text{ mm}$
$L = 120,0 \text{ mm}$	$T = \text{Espesor del material (6 mm)}$

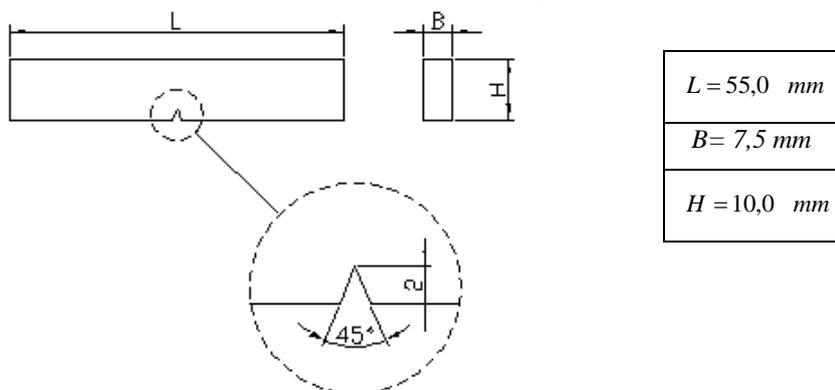


Figura 3.3 Dimensiones de probetas para ensayo Charpy en "V" según normal ASTM E-23

Evaluación del deterioro Microestructural de un Acero Dúplex, expuesto a un ambiente corrosivo de Cloruro de Sodio (NaCl)

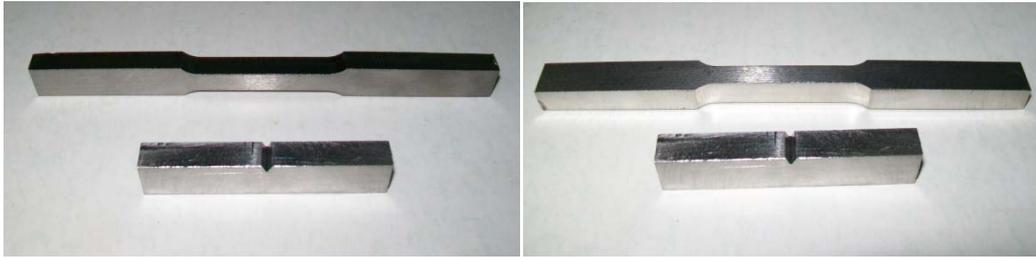


Figura 3.4 Probetas de Tracción y Charpy utilizadas.

3.7 Tratamiento con la Cámara de Niebla Salina:

En este punto las probetas se colocaron dentro de la cámara de niebla salina una vez, que esta cámara tenga las condiciones ideales para el tratamiento (Temperatura de 33 a 37 °C, Presión de 10 a 25 psi), dichas condiciones están basadas según la Norma ASTM B117.



Figura 3.5 Cámara de Niebla Salina

3.8 Ensayos a realizar:

En esta etapa se realizaron ensayos de tracción, impacto, microdureza, metalografía y análisis por microscopía electrónica de barrido para condiciones de estudio. En la tabla siguiente se detalla el número de ensayos a efectuar para cada una de las condiciones:

Tabla 3.2 Número de ensayos para cada condición estudiada.

ENSAYO	CONDICIÓN				
	Original	Exposición en la cámara de niebla salina			
		24 h	48 h	72 h	96 h
Tracción	3	3	3	3	3
Impacto	5	5	5	5	5
Microdureza	5 Identaciones por cada fase	5 Identaciones por cada fase	5 Identaciones por cada fase	5 Identaciones por cada fase	5 Identaciones por cada fase

3.8.1 Ensayo de Tracción:

Este ensayo de tracción, consiste en producir cargas normales sobre la sección transversal de la misma, a fin de producir un alargamiento y fractura final en un intervalo de tiempo relativamente corto a una velocidad constante. Una vez alcanzada la ruptura se obtiene la curva de carga en función del alargamiento suministrado por la máquina de ensayo, estos datos son necesarios para construir la gráfica *esfuerzo vs. Deformación* de donde se obtienen las propiedades mecánicas para cada condición de exposición en la cámara de niebla salina como: esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo, esfuerzo de ruptura, porcentaje de reducción de área, y el tipo de fractura para cada condición de ensayo. Para este estudio se utilizan 15 probetas dimensionadas según la norma ASTM A-370

El equipo utilizado es la maquina GALDABINI del Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería en la Universidad de Carabobo la cual posee las siguientes características:

Marca: GALDABINI SPA modelo 2195C y capacidad de 20 Ton



Figura 3.6 Maquina GALDABINI

3.8.2 Ensayo de impacto:

Mediante el ensayo Charpy se logra determinar cuanta energía absorbida por impacto disipa una probeta al ser golpeada por un pesado péndulo en caída libre. El ensayo se llevo a cabo en una máquina marca y modelo TINIUS OLSEN TESTING MACHINE CO. WILLOW GROVE, P.A U.S.A; con un intervalo de 0-41.5 Kg/m, ubicada en Urb. La Isabelica, específicamente en el INCES Isabelica en el área de Soldadura, Para este ensayo se utilizaron probetas tipo Charpy con entalle en V según la norma ASTM E-23, como se observa en la figura 3.3, teniendo presente una serie de pasos estandarizados para el correcto manejo del mismo, dentro de los cuales se tiene la calibración de la zona de

impacto, de manera que la probeta reciba el golpe justo en la parte opuesta al entalle.



Figura 3.7 Máquina de impacto Charpy TINIUS OLSEN.

3.8.3 Metalografía:

- **Toma de la muestra:** para cada una de las condiciones de trabajo se seleccionó una probeta de tracción, a la cual se le cortó dos muestras en la sección calibrada de aproximadamente 1 cm cada una; una contendrá la superficie de fractura para analizar en el microscopio electrónico de barrido (MEB) y la otra se prepara de manera tal que pueda ser observada en el microscopio óptico. Para realizar estos cortes se utilizó una cortadora metalografía de probetas del laboratorio de materiales de la facultad de ingeniería en la universidad de Carabobo la cual posee las siguientes características: Marca: BUEHLER , Modelo: Samplimet. (Figura 3.8)



Figura 3.8 Cortadora metalografía BUEHLER

- **Desbaste:** El proceso de desbaste se realizó pasando por cada papel de lija de la más gruesa a la más fina (240, 340, 400, 600), de esta manera obtener una superficie completamente plana y lisa. La operación de desbaste debe ser perpendicular (90°) a la dirección de las rayas dejadas en el último desbaste.
- **Pulido:** Esta operación se realizó utilizando una pulidora metalográfica marca BUEHLER del Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería en la Universidad de Carabobo, que consta de dos platos rotatorios (pulido grueso y pulido fino) de dos velocidades cada uno con un sistema de agua y drenaje, el objetivo es eliminar las rayas, manchas y toda traza de metal deformado en las operaciones anteriores para obtener un acabado tipo espejo. Se utiliza un líquido abrasivo (alúmina gruesa de 0,1 micras y alúmina fina de 0,05 micras de concentración) para la obtención de un mejor acabado. (Figura 3.9)



Figura 3.9 Pulidora metalografía BUEHLER

- **Ataque:** El ataque realizado fue de tipo químico, con la campana extractora de gases (Figura 3.10), en donde el reactivo utilizado está compuesto de 1 gr de Bisulfito de Sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$), 50 ml agua destilada y 15 ml de ácido clorhídrico (HCL), durante aproximadamente 5 s. Después de atacar con el químico se debe rociar etanol en la zona e inmediatamente llevar al secador (Figura 3.11). El objetivo del ataque que se realiza a la superficie pulida es desarrollar la estructura micrográfica y hacerla visible al microscopio metalográfico.



Figura 3.10 Extractora de gases.



Figura 3.11 Secador.

3.8.4 Microscopía Óptica y Electrónica de Barrido:

La observación se realizó con un microscopio óptico marca UNION modelo MC 86267 con aumentos de 50-1000x del Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería en la Universidad de Carabobo (Figura 3.12). Inicialmente las probetas preparadas metalográficamente fueron observadas bajo un microscopio óptico con la finalidad de ver las fases presentes en la microestructura del material.

También se realizó una microscopía electrónica de barrido (MEB), con un equipo marca Philips y modelo KL30 de la Fundación para el Desarrollo y Asesoría en Tecnología (FUNDATEC), ubicado en el Km. 8 de la Panamericana en el I.U.T.-R.C. “Dr. Federico Rivero Palacio” (Figura 3.13). El objetivo primordial del MEB es el observar la estructura tridimensional de la muestra, utilizando los electrones secundarios producidos por la misma, debido a la irradiación de un haz de electrones de alta energía. Estos electrones secundarios son recibidos por detectores adecuados (centelleo), los cuales cambian a señales eléctricas, estas señales eléctricas se amplían o se modifican a través del circuito electrónico para detectores y se inyectan al tubo de rayos catódicos, controlando también el contraste de la imagen.



Figura 3.12 Microscopio óptico marca UNION



Figura 3.13 Microscopio electrónico de barrido PHILIPS

3.8.5 Ensayo de microdureza.

Este ensayo se realizó en el microdurómetro VICKERS digital modelo indentamet 1100, del Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería en la Universidad de Carabobo (Figura 3.14). El método a emplear es el Vickers, consiste en colocar una probeta preparada sobre la base del microdurómetro, se penetra la superficie del material con un indentador punta de diamante a través de la aplicación de una carga que puede variar según la dureza

Evaluación del deterioro Microestructural de un Acero Dúplex, expuesto a un ambiente corrosivo de Cloruro de Sodio (NaCl)

del material, luego se mide la diagonal vertical de la misma por medio de un ocular micrométrico con índices móviles que posee el microdurómetro.



Figura 3.14 Microdurómetro VICKERS digital.

CAPÍTULO 4

Resultados y Análisis

En este capítulo se presentan los resultados y análisis de las muestras del acero Dúplex SAF 2304, las cuales fueron sometidas en la cámara de niebla salina para establecer criterios comparativos a través del tiempo de permanencia dentro de la cámara en el intervalo de 0 a 96 horas, y luego se le aplicaron ensayos mecánicos de tracción e impacto Charpy, microdureza Vickers HV, microscopía óptica M.O y microscopía electrónica de barrido M.E.B para evaluar su deterioro microestructural.

4.1 Composición química del material.

Se realizó un análisis de chispa para determinar la composición química del acero donde se obtuvo la composición química de los principales elementos que componen al acero. Se realizó la verificación de la composición química elemental mediante la técnica de Fluorescencia de Rayos X en la Refinería “El Palito” Puerto Cabello. A continuación en la tabla 4.1 se muestra la composición química del material y el análisis realizado por la Refinería “El Palito” y, los valores establecidos en la norma ASTM A-276-04.

Tabla 4.1 Comparación de la composición química del acero inoxidable dúplex SAF-2304, en % de peso.

Origen del estudio	C (%)	Mn (%)	P (%)	Fe (%)	Si (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)
<i>Norma ASTM A-276-04</i>	0,030	2,50	0,040	–	1,00	21,5-24,5	3,0-5,5	0,05-0,60
<i>Refinería el Palito (Fluorescencia de Rayos X)</i>	–	1,37	–	71.35	–	22,61	4,31	0.36

En la tabla 4.1 se observa que los principales elementos aleantes cromo (Cr), níquel (Ni) y molibdeno (Mo) que componen el acero SAF-2304. Se encuentran dentro del intervalo recomendado por la norma ASTM A-276-04. Mientras que el elemento manganeso está por debajo de lo especificado en la mencionada norma. De este modo, la norma ASTM A-276-04 indica que el acero inoxidable dúplex que se estudió es un S32304 (SAF 2304).

4.2 Microestructura de las fases presentes en el acero inoxidable dúplex SAF 2304

A continuación en la figura 4.1 se muestra la microestructura de las fases presentes en el acero inoxidable dúplex SAF 2304 a través de la microscopía electrónica de barrido M.E.B:

Evaluación del deterioro Microestructural de un Acero Dúplex, expuesto a un ambiente corrosivo de Cloruro de Sodio (NaCl) al 3%

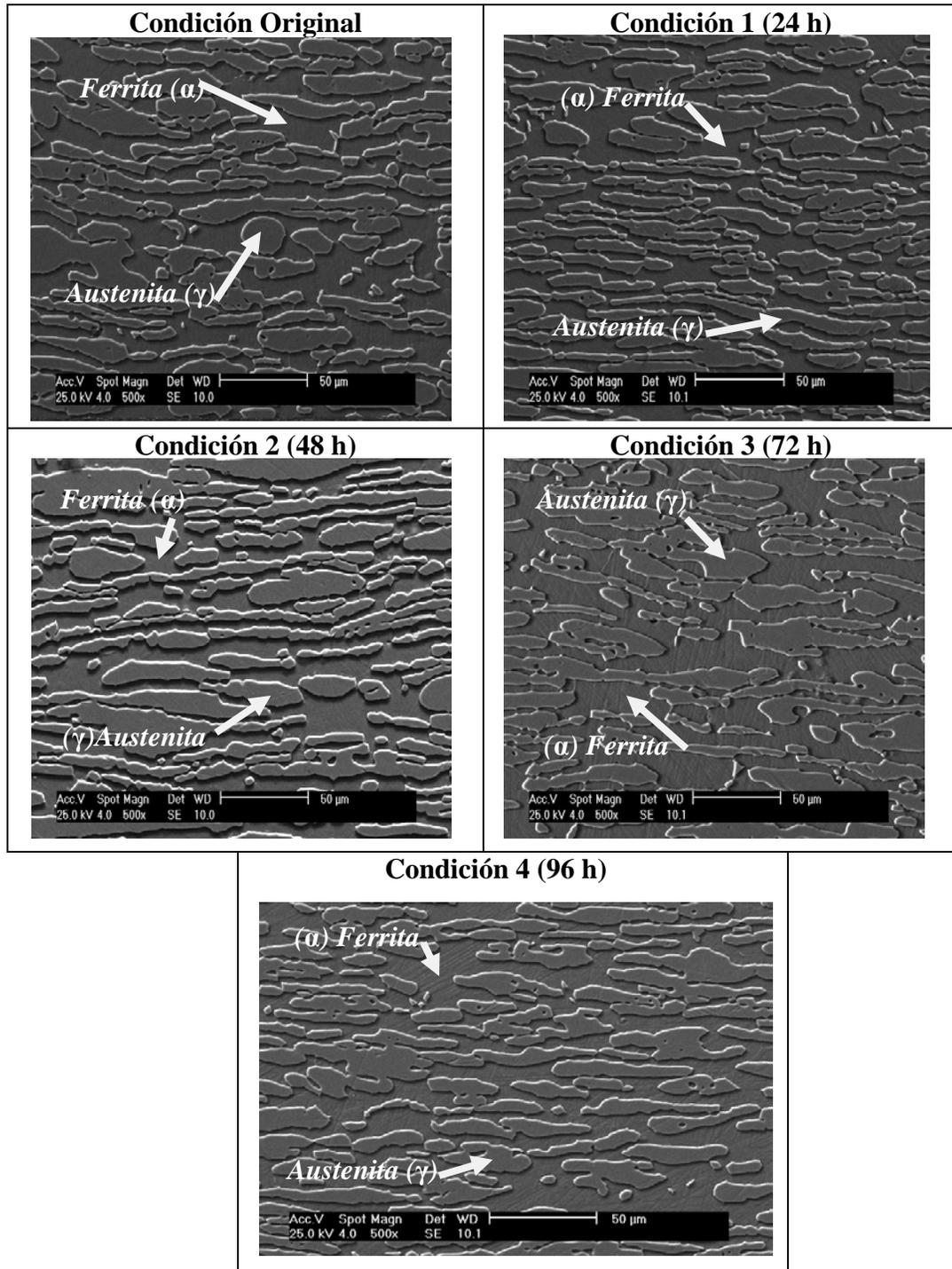


Figura 4.1 Microestructura por microscopía electrónica de barrido (MEB) a 500x de una probeta de tracción por cada condición de 24, 48, 72 y 96 horas.

En la Figura 4.1 se observa la microestructura del acero inoxidable dúplex SAF 2304 de cada una de las condiciones por medio de MEB a 500x, en donde se observan las dos (2) fases presentes en las muestras del acero inoxidable dúplex SAF 2304, dichas fases son la ferrita (α) y la austenita (γ) características de este acero. Debido a la densidad de la Ferrita se observa con profundidad ya que la Ferrita (α) es menos densa que la austenita (γ) y por esto se dice que la matriz del acero es ferrítica. Por otro lado la austenita (γ) por ser más densa se eleva y se agrupa en forma de islas.

4.3 Ensayo de tracción uniaxial.

Para determinar las propiedades mecánicas al acero inoxidable dúplex SAF-2304 se realizaron tres ensayos de tracción uniaxial por cada condición, con probetas de tamaño sub-size (Figura 3.2 y Tabla 3.1) probeta según la norma ASTM A-370, en la tabla 4.4 se especifican las condiciones de trabajo a las cuales fue sometido el material previamente. Las propiedades mecánicas que se determinaron mediante el ensayo de tracción son esfuerzo de fluencia, esfuerzo último y porcentaje de deformación de Ingeniería % e.

Tabla 4.2 Condiciones de trabajo del acero inoxidable dúplex SAF-2304.

N°	Condición	Tiempo (h)
0	Inicial (Original)	-
1	Cámara de Niebla salina con NaCl al 3%	24
2	Cámara de Niebla salina con NaCl al 3%	48
3	Cámara de Niebla salina con NaCl al 3%	72
4	Cámara de Niebla salina con NaCl al 3%	96

A continuación se muestran las gráficas esfuerzo-deformación en las figuras 4.2 a la 4.6 para cada una de las condiciones de ensayo.

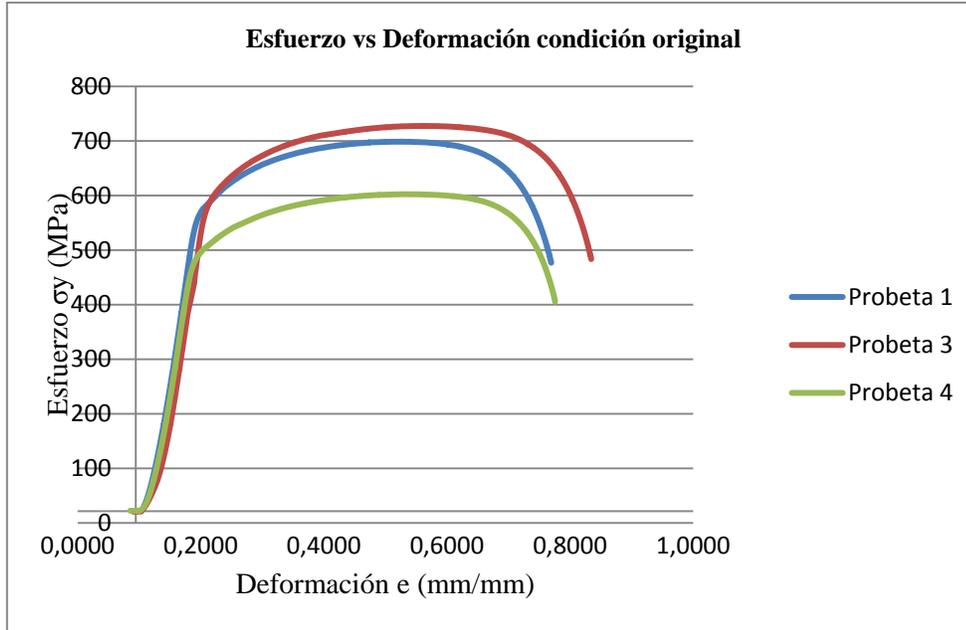


Figura 4.2 Gráfica esfuerzo vs deformación condición original

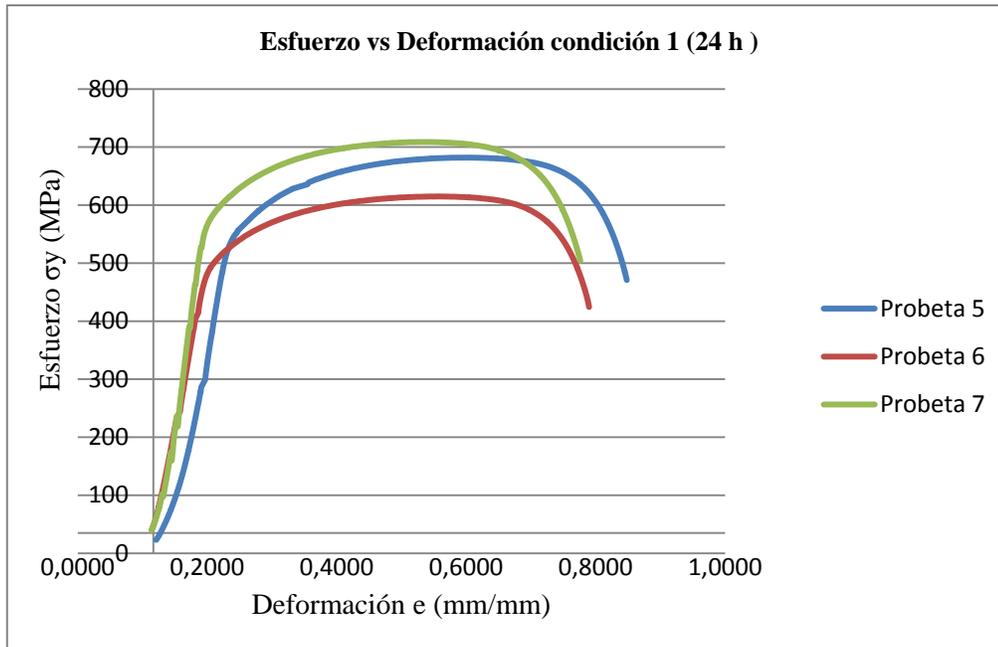


Figura 4.3 Gráfica Esfuerzo vs Deformación condición 1 (24 h)

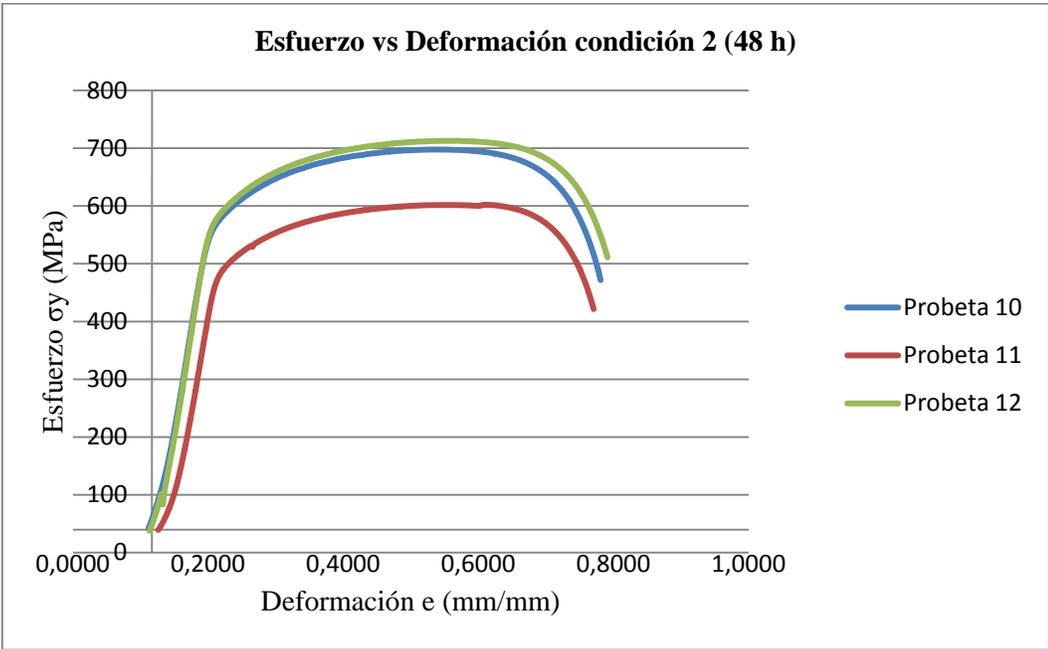


Figura 4.4 Gráfica Esfuerzo vs Deformación condición 2 (48 h)

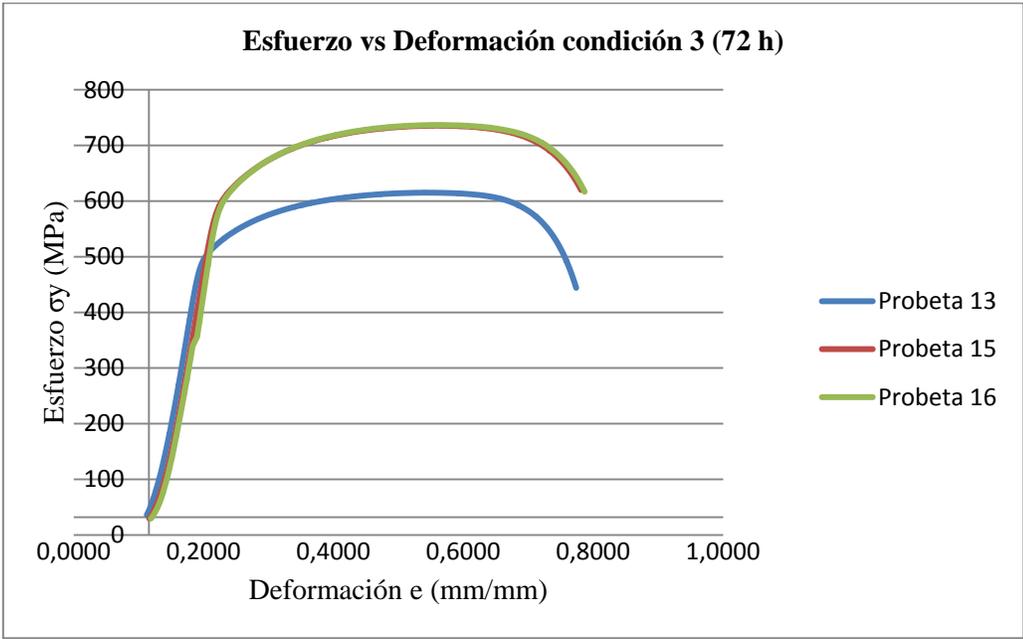


Figura 4.5 Gráfica Esfuerzo vs Deformación condición 3 (72 h)

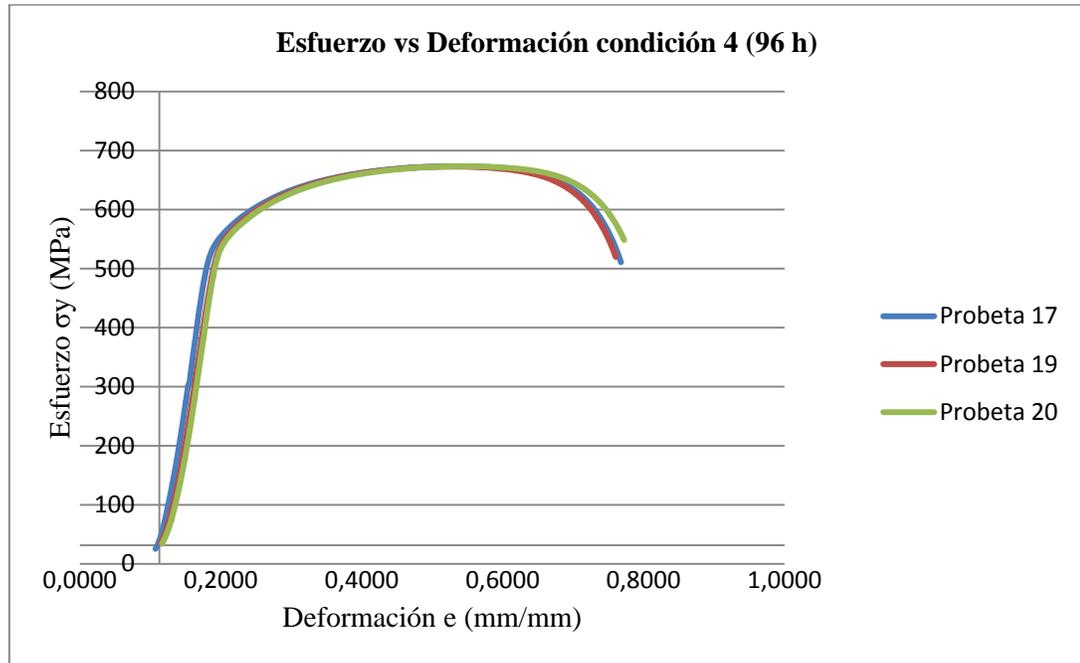


Figura 4.6 Gráfica Esfuerzo vs Deformación condición 4 (96 h)

En las figura 4.2 hasta 4.5 se puede observar que las curvas esfuerzo vs deformación presentan un comportamiento desfasado entre cada condición. Se señala que la condición inicial puede observarse ese desfase producto de los distintos espesores de las probetas que presentaron dispersión entre sus valores con un rango de tolerancia de 0.7mm, por lo que al presentarse ese desperfecto en el mecanizado de las probetas, la máquina de tracción GALDABINI, aplicó mayor carga axial siendo directamente proporcional al área de la sección transversal de la zona calibrada. El comportamiento de las figuras 4.3; 4.4; 4.5 presentó analogía a la condición inicial.

A medida que transcurre el tiempo se observa que desde la figura 4.2 a la 4.6 se observa una similitud en las curvas, siendo indicativo un aumento en la deformación plástica. En la condición de 96 horas, todas las propiedades mecánicas son similares, ésta es una característica relevante ya que a mayor tiempo en ambiente

de NaCl al 3% se “alinean” a una mayor deformación plástica, y a un mayor esfuerzo de fluencia y último, y los valores son muy próximos entre sí.

Las propiedades mecánicas de esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo y deformación ingenieril obtenidos del ensayo de tracción se reportan desde la tabla 4.5 hasta la tabla 4.9.

Tabla 4.3 Propiedades mecánicas del acero inoxidable dúplex SAF-2304 en condición original. (Sin ambiente de NaCl al 3%)

N° Probetas	Esfuerzo de Fluencia	Esfuerzo Máximo
	σ_{ys} (MPa)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)
1	642	699
2	649	728
3	548	602
Promedio	613±54,40	676,33±65,98

Tabla 4.4 Propiedades mecánicas del acero inoxidable dúplex SAF-2304 condición 1 (24 h) sometido al ambiente de NaCl al 3%

N° Probetas	Esfuerzo de Fluencia	Esfuerzo Máximo
	σ_{ys} (MPa)	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)
1	619	682
2	565	615
3	649	709
Promedio	611,0±42,56	668,66 ±48,39

Tabla 4.5 Propiedades mecánicas del acero inoxidable dúplex SAF-2304 condición 2 (48 h) sometido al ambiente de NaCl al 3%

N° Probetas	Esfuerzo de Fluencia σ_{ys} (MPa)	Esfuerzo Máximo $\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)
1	645	698
2	536	602
3	654	713
Promedio	611,16 ±65,68	671,0 ±60,22

Tabla 4.6 Propiedades mecánicas del acero inoxidable dúplex SAF-2304 condición 3 (72 h) sometido al ambiente NaCl al 3%

N° Probetas	Esfuerzo de Fluencia σ_{ys} (MPa)	Esfuerzo Máximo $\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)
1	567	615
2	673	635
3	676	737
Promedio	638,66 ±62,08	695,66 ±65,43

Tabla 4.7 Propiedades mecánicas del acero inoxidable dúplex SAF-2304 condición 4 (96 h) sometido al ambiente NaCl al 3%

N° Probetas	Esfuerzo de Fluencia σ_{ys} (MPa)	Esfuerzo Máximo $\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)
1	646	673
2	614	673
3	618	674
Promedio	626,0 ±17,43	673,33±0,57

En la tabla 4.8 se reporta un resumen de los valores promedios de las propiedades de resistencia mecánicas anteriormente expuestas para cada una de las condiciones de original, 24, 48, 72 y 96 horas sometido al ambiente de NaCl al 3%

Tabla 4.8 Propiedades mecánicas promedio del acero inoxidable dúplex SAF-2304 para cada una de las condiciones de estudio.

Condición	Esfuerzo de Fluencia σ_{ys} (MPa)	Esfuerzo Máximo $\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)
Condición original	613,0 \pm 54,40	676,33 \pm 65,98
Condición 1 (24 h sometido al ambiente de NaCl al 3%)	611,0 \pm 42,56	668,66 \pm 48,39
Condición 2 (48 h sometido al ambiente de NaCl al 3%)	611,16 \pm 65,68	671,0 \pm 60,22
Condición 3 (72 h sometido al ambiente de NaCl al 3%)	638,66 \pm 62,08	695,66 \pm 65,43
Condición 4 (96 h sometido al ambiente de NaCl al 3%)	626,0 \pm 17,43	673,33 \pm 0,57

En las siguientes figuras 4.7; 4.8 y 4.9 se representan las propiedades de resistencia mecánicas en función de las condiciones de ensayo.

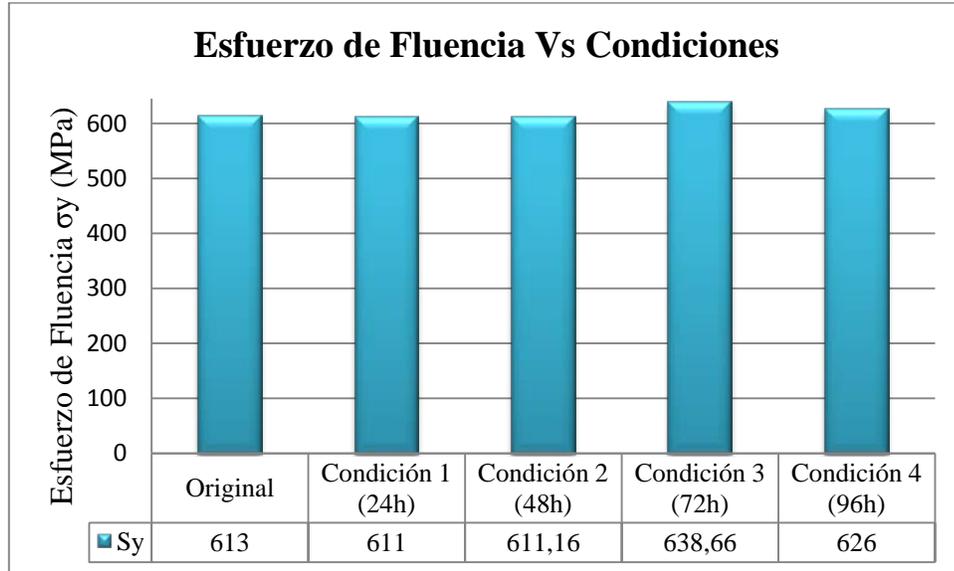


Figura 4.7 Gráfica Esfuerzo de Fluencia Vs Condiciones

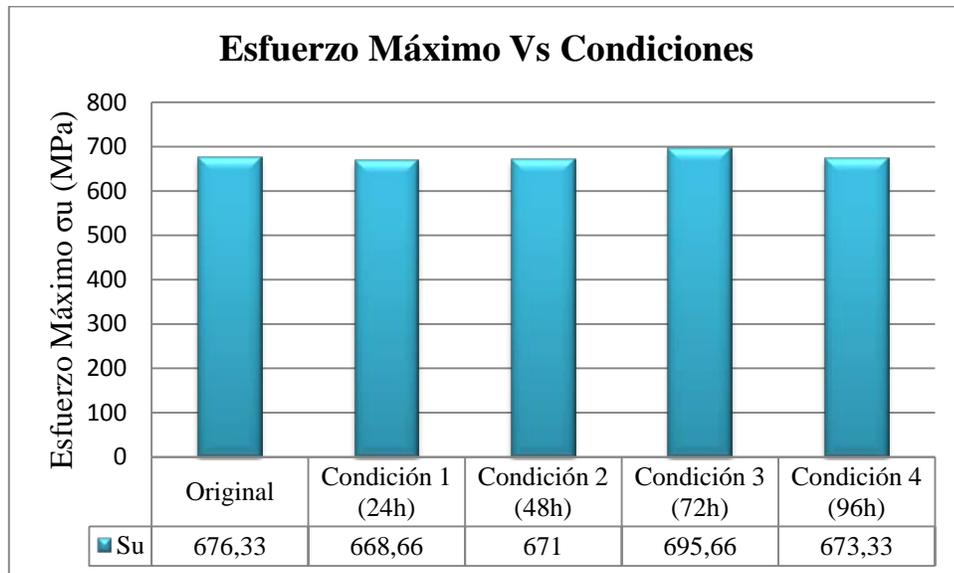


Figura 4.8 Gráfica Esfuerzo Último Vs Condiciones

En las figuras 4.7 y 4.8 se observa claramente que el comportamiento de las graficas esfuerzo de fluencia y esfuerzo último disminuyeron para ambos casos de la

condición inicial a la condición de 24 horas en 0,32 y 1,13 % respectivamente. De la condición de 24 a la 48 horas ambos esfuerzos aumentaron porcentualmente en 0,02 y 0,33% respectivamente. De la condición 48 a 72 horas hay un incremento tanto en el de fluencia como en el esfuerzo último en 4,3 y 3,5% respectivamente. Finalmente se visualiza de la condición 72 a las 96 horas expuesto en el medio de NaCl una disminución igualmente para ambos esfuerzos de 1,98 y 3,24. Los datos obtenidos de los gráficos 4.7 y 4.8 indican que no hay variación de las propiedades de resistencia mecánica ya que para la condición original, 24, 48, 72, 96 horas no excede el 10% de dispersión de los valores arrojados. Por lo que las propiedades de resistencia mecánica se mantienen constantes bajo el ambiente corrosivo de NaCl al 3% en las condiciones estudiadas.

Cuando se compara el esfuerzo de fluencia de la condición inicial respecto a la de 72 horas se obtiene un aumento de 4,01%, por su parte el esfuerzo último al evaluar la condición de 72 horas respecto a la inicial se obtiene también un incremento de 2,85%.

Tanto en la gráfica 4.7 de esfuerzo de fluencia como la grafica 4.8 de esfuerzo último la condición de 72 horas es la que presenta los valores máximos de esos esfuerzos, por lo que indica que fue la condición que más le afectó la exposición en el medio corrosivo de NaCl.

Se observó que en todas las condiciones de estudios las propiedades de resistencia mecánicas se encuentran con poca variación porcentual respecto a la condición inicial lo que es indicativo de permanecer constantes en función del tiempo de exposición al ambiente corrosivo de NaCl al 3%.

4.4 Ductilidad

Para determinar la ductilidad del material se evaluó la reducción de área. Se midió las longitudes del área antes y después de la fractura final de cada probeta de tracción como se muestran en la tabla 4.9 El área inicial de la probeta es 36mm^2 para todas las condiciones de estudio.

Tabla 4.9 Valores del área final de las probetas de tracción.

Condición	N°Probetas	Área Final A_f (mm^2)	Deformación Ingenieril %e
Condición original sin exposición al ambiente de NaCl al 3%	1	10,25	45,66
	2	12,0	53,54
	3	12,16	41,73
	Promedio	11,47 ±1,05	46,97 ±6,01
Condición 1 (24h) expuesto al ambiente de NaCl al 3%	1	9,38	49,60
	2	11,25	53,54
	3	10,0	49,60
	Promedio	10,21 ±0,95	50,91 ±2,27
Condición 2 (48h) expuesto al ambiente de NaCl al 3%	1	12	49,60
	2	12,38	53,54
	3	9,75	54,54
	Promedio	11,37 ±1,42	52,22 ±2,61

Condición 3 (72h) expuesto al ambiente de NaCl 3%	1	11,25	53,54
	2	12	53,54
	3	11,25	57,48
	Promedio	11,5 ±0,43	54,85 ±2,27
Condición 4 (96h) expuesto al ambiente de NaCl al 3%	1	10,0	53,54
	2	8,75	53,54
	3	10,0	53,54
	Promedio	9,58 ±0,72	53,54 ±0

Tabla 4.10 Valores promedio de reducción de área de la probetas de tracción para cada una de las condiciones de estudio.

Condición	Área Inicial A_0 (mm²)	Área Final A_f (mm²)	% de Reducción de área	Porcentaje de Alargamiento % e
Condición original sin exposición al ambiente de NaCl al 3%	37,00±1,19	11,47±1,05	69,00	46,97±6,01
Condición 1 (24h) expuesto al ambiente de NaCl 3%	36,05±0,89	10,21±0,95	71,67	50,91±2,27

Evaluación del deterioro Microestructural de un Acero Dúplex, expuesto a un ambiente corrosivo de Cloruro de Sodio (NaCl) al 3%

Condición 2 (48h) expuesto al ambiente de NaCl 3%	39,47±0,95	11,37±1,42	71,19	52,22±2,61
Condición 3 (72h) expuesto al ambiente de NaCl 3%	40,59±1,40	11,5±0,43	71,66	54,85±2,27
Condición 4 (96h) expuesto al ambiente de NaCl 3%	39,5±0,86	9,58±0,72	75,74	53,54±0

En la tabla 4.10 se observa el porcentaje de reducción de área en función del tiempo para las condiciones de estudio.

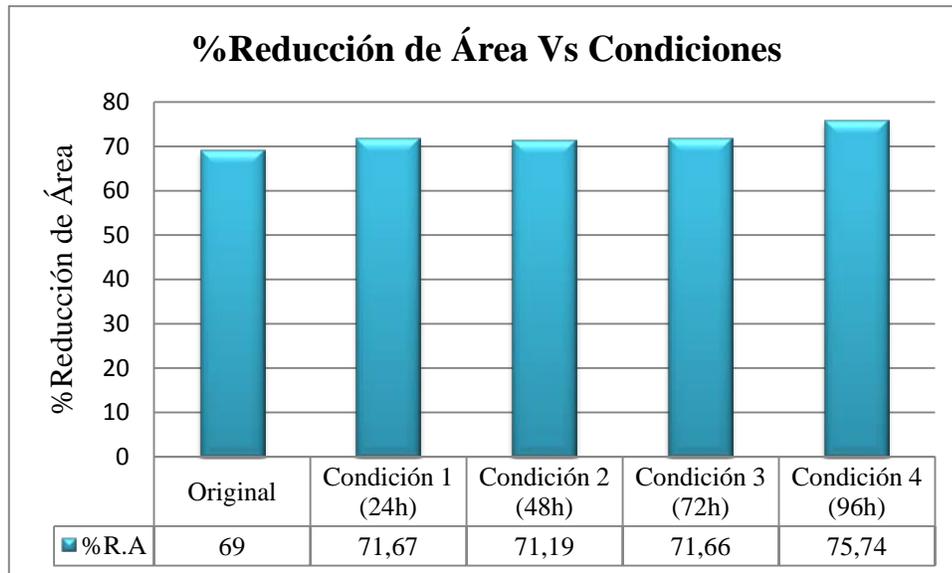


Figura 4.9 Gráfica de % reducción de área en función de las condiciones.

Al evaluar la ductilidad del acero SAF-2304 por el porcentaje de reducción de área en la figura 4.9 se observa que a medida que aumenta el tiempo la exposición en el medio corrosivo de NaCl de la condición inicial respecto a la condición de 96 horas se incrementa el porcentaje de reducción de área con una diferencia del 5,25%, lo que implica que el comportamiento de este material en las condiciones se mantiene estable, es decir constante, y aumenta muy poco su ductilidad.

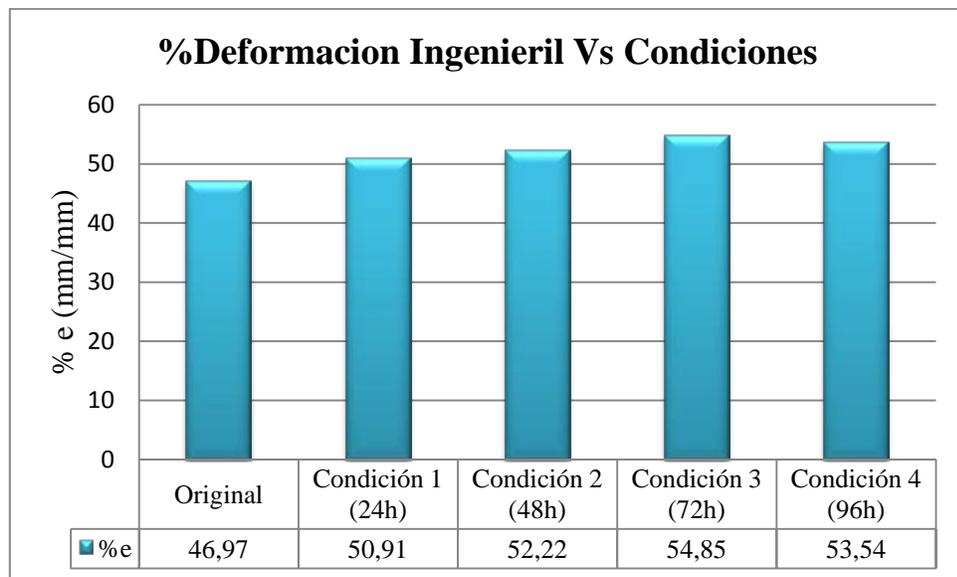


Figura 4.10 Gráfica Deformación Ingenieril Vs Condición

En la figura 4.10 la cual representa la deformación ingenieril el máximo valor se visualiza en la condición de 72 horas, habiendo un incremento respecto a la condición inicial en 14,36% lo que se traduce en un ablandamiento del material por efecto del NaCl. A medida que aumente el tiempo de exposición en el ambiente corrosivo de NaCl al 3% incrementa la ductilidad del material.

4.5 Ensayo de Microdureza Vickers HV.

Para este ensayo se realizaron 5 indentaciones para cada una de las condiciones usando la escala Vickers (HV), para luego obtener un promedio que nos indique el valor de la microdureza; se utilizó una carga de 25gr. Se empleó un tiempo en la carga de cinco (5) segundos. En la tabla 4.13 se muestra los valores obtenidos del ensayo y, en la figura 4.13 la gráfica microdureza Vickers en función del tiempo.

Tabla 4.11 Valores de microdureza Vickers (HV) para cada una de las condiciones de estudio. Carga=25gr. Identaciones=5. Tiempo=5seg.

Nº Identaciones	Condición	Ferrita (α)	Austenita (γ)
1	Condición original	322	206
2		287	322
3		272	363
4		279	299
5		251	327
Promedio±Desviación Estándar			282±26
1	Condición 1 (24 h) en NaCl al 3%	251	274
2		232	327
3		238	304
4		222	270
5		225	330
Promedio±Desviación Estándar			234±12

Evaluación del deterioro Microestructural de un Acero Dúplex, expuesto a un ambiente corrosivo de Cloruro de Sodio (NaCl) al 3%

1	Condición 2 (48 h) en NaCl al 3%	218	297
2		245	240
3		240	238
4		221	279
5		229	285
Promedio±Desviación Estándar		231±12	268±27
1	Condición 3 (72 h) en NaCl al 3%	233	260
2		218	287
3		206	283
4		209	256
5		224	287
Promedio±Desviación Estándar		218±11	275±15
1	Condición 4 (96 h) en NaCl al 3%	227	240
2		191	262
3		191	268
4		206	262
5		201	238
Promedio±Desviación Estándar		203±15	254±14

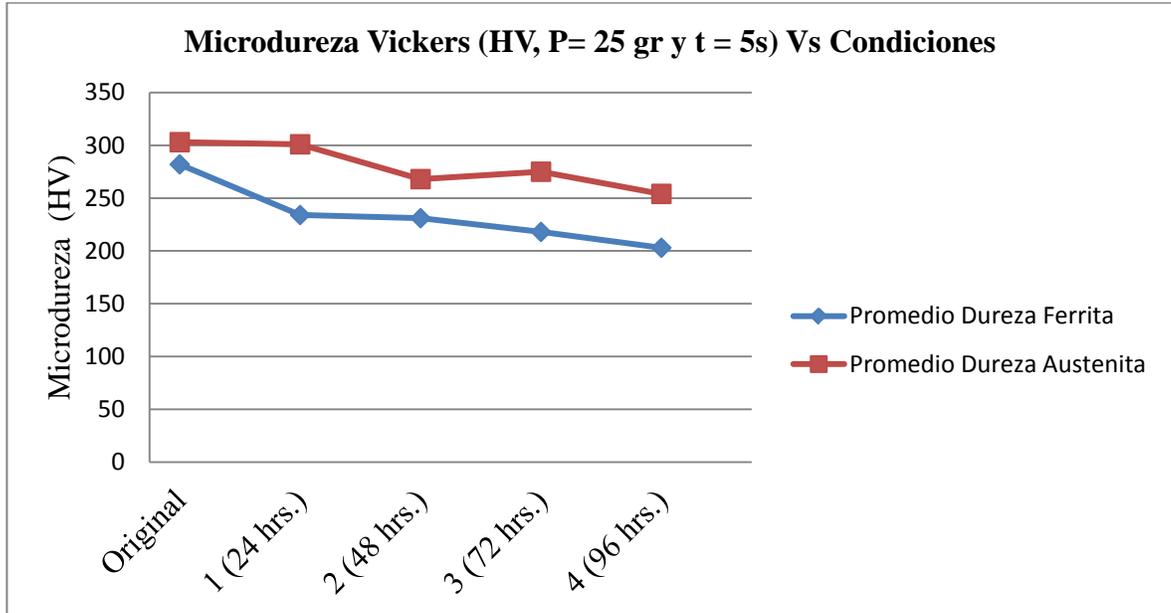


Figura 4.11 Gráfica Microdureza Vickers (HV, P= 25 gr y t = 5s) en función de las condiciones

En la figura 4.11 se visualiza una disminución de la microdureza tanto en la fase ferrítica como en la fase austenítica, los resultados obtenidos se traducen a ser propios de condiciones que al disminuir la microdureza de austenita al ser expuesto en un ambiente corrosivo de NaCl al 3%, el material fragiliza lentamente.

4.6 Ensayo de Impacto.

Para el ensayo se realizaron probetas tipo subsized bajo la norma ASTM E-23 y se realizaron 5 ensayos para cada condición. El equipo utilizado registro valores expresados en Kgm y por medio de una conversión se transformó a la unidad del sistema internacional J (N*m), la cual representa la energía absorbida por impacto (CVN). Mediante la relación propuesta por Rolfe, Novak y Barson (Ec 2.6 y Ec 2.7) se procedió a determinar el factor de intensidad de esfuerzo K_{IC} . A continuación se presentan en la tabla 4.14 los valores obtenidos del ensayo.

Tabla 4.12 Valores de energía absorbida por impacto y factor de intensidad de esfuerzo para cada condición de estudio.

N ^o de Probetas	CONDICIONES				
	Original	1 (24 h)	2 (48 h)	3 (72 h)	4 (96 h)
1	22,50	22,50	23,25	24,00	23,50
2	24,50	24,50	24,00	23,50	22,75
3	26,75	23,50	22,00	21,50	23,75
4	23,50	21,75	25,50	24,50	24,00
5	24,00	23,25	23,50	22,00	22,50
CVN, Kpm	24,25	23,10	23,65	23,10	23,30
Desviacion Estandar	1,58	1,03	1,26	1,29	0,64
CVN, J	237,2	226,38	231,77	226,38	228,34
K_{IC}(Ksi.pulg^{1/2})	285,80	278,10	281,70	284,00	281,50

A continuación se presenta la grafica de energía absorbida por impacto y tenacidad de impacto en función de la condición original, 24, 48, 72 y 96 horas (Figura 4.12):

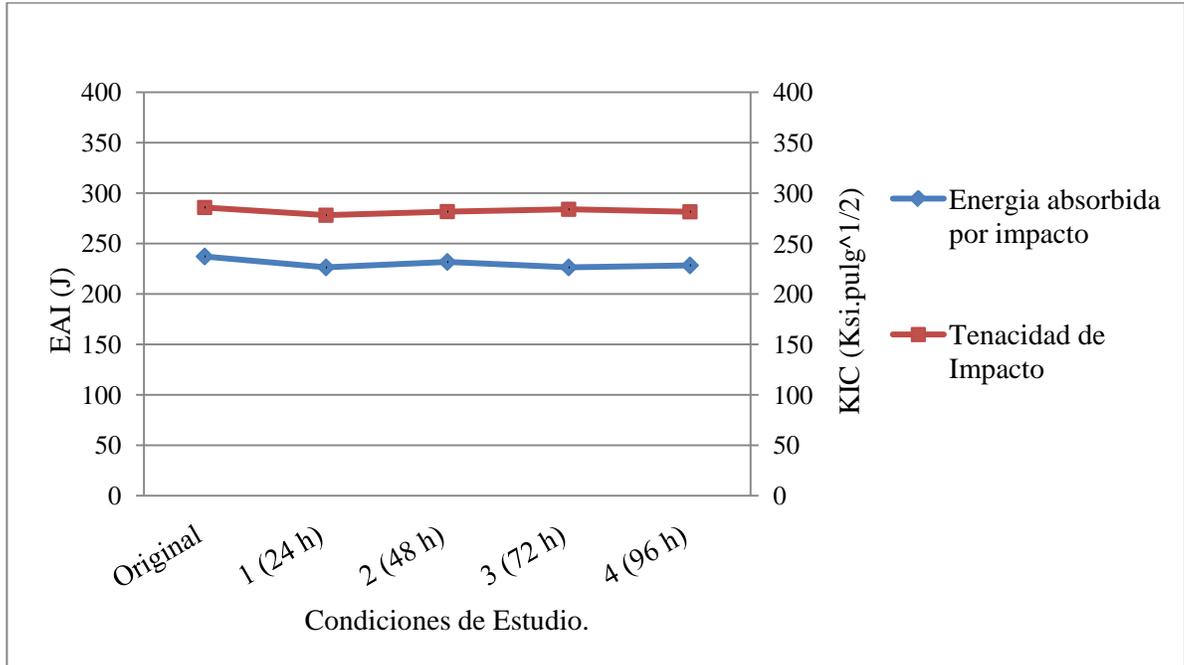


Figura 4.12 Gráfica comparativa entre la energía absorbida por impacto con el factor de intensidad de esfuerzo en función de las condiciones de estudio.

En la figura 4.12 se observa que tanto los valores de la energía absorbida (CVN) y los valores del factor de intensidad de esfuerzo (K_{IC}) muestran un comportamiento constante en todas las condiciones de estudio, ya que existe una variación en el orden aproximadamente del 4,56% de la energía absorbida por impacto y del 2,69% del factor de intensidad de esfuerzo. En los valores de energía absorbida por impacto no hubo una dispersión mayor al 10% por lo que se considera constantes para las condiciones estudiadas. El valor máximo del factor de intensidad de esfuerzo se registró para la condición inicial, de manera similar se comporta la energía absorbida para todas las condiciones experimentadas. Los valores arrojados de la energía absorbida por impacto son altos en comparación con otros aceros, y al ser sometido en el ambiente de NaCl al 3% no presentó cambios en la tenacidad de impacto.

4.7 Fractografía.

La fractografía se realizó a diferentes superficies de fractura proveniente de los ensayos de tracción y de Charpy a cada una de las condiciones de estudio, con la finalidad de establecer los diferentes mecanismos que intervinieron en la fractura, este estudio se efectuó en 2 etapas, una fractografía, y una microscópica electrónica de barrido MEB.

4.7.1 Fractografía de las Probetas de Tracción

Probeta de Tracción en Condición Original

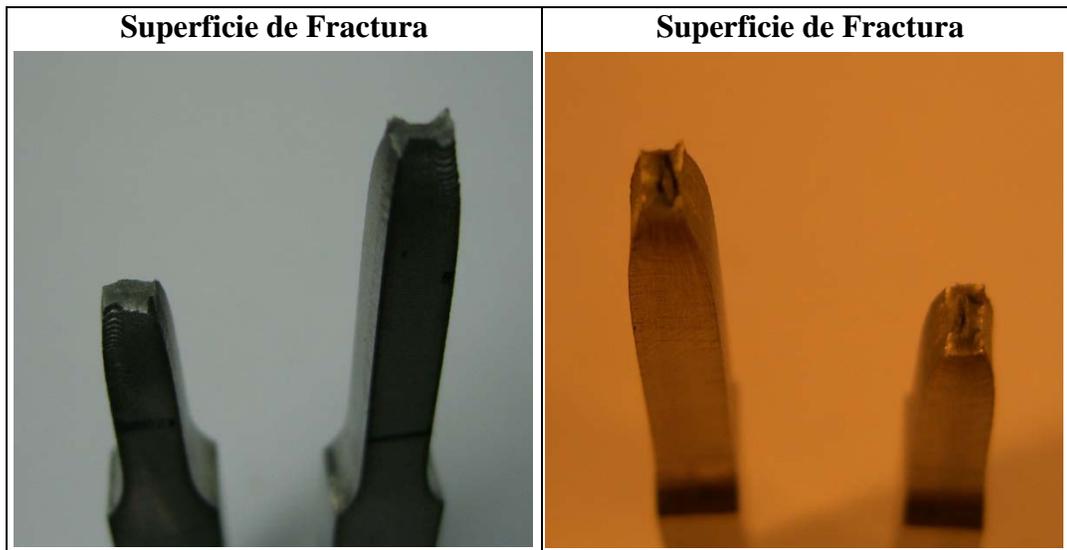


Figura 4.13 Fractografía de la probeta de tracción tomada por una cámara de 12 megapíxeles

Evaluación del deterioro Microestructural de un Acero Dúplex, expuesto a un ambiente corrosivo de Cloruro de Sodio (NaCl) al 3%

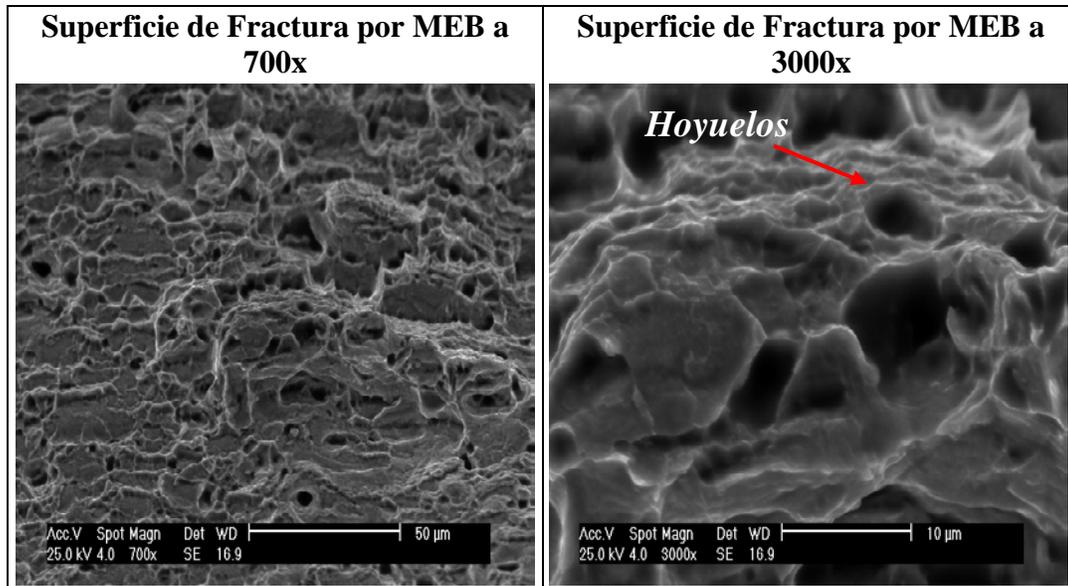


Figura 4.14 Superficie de fractura en condición original tomada por MEB.

Probeta de Tracción en Condición 1 (24 h)

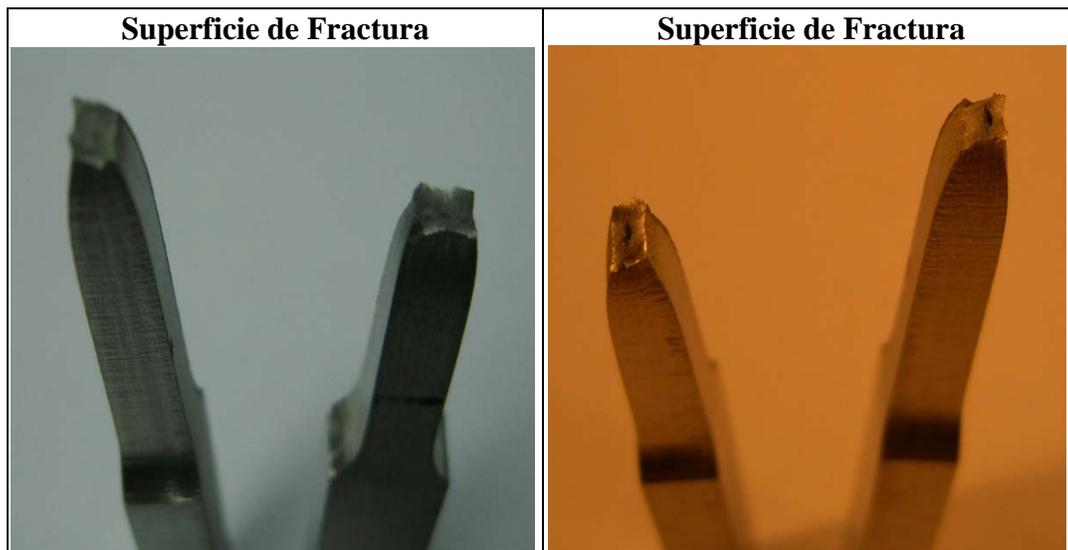


Figura 4.15 Fractografía de la probeta de tracción tomada por una cámara de 12 megapíxeles

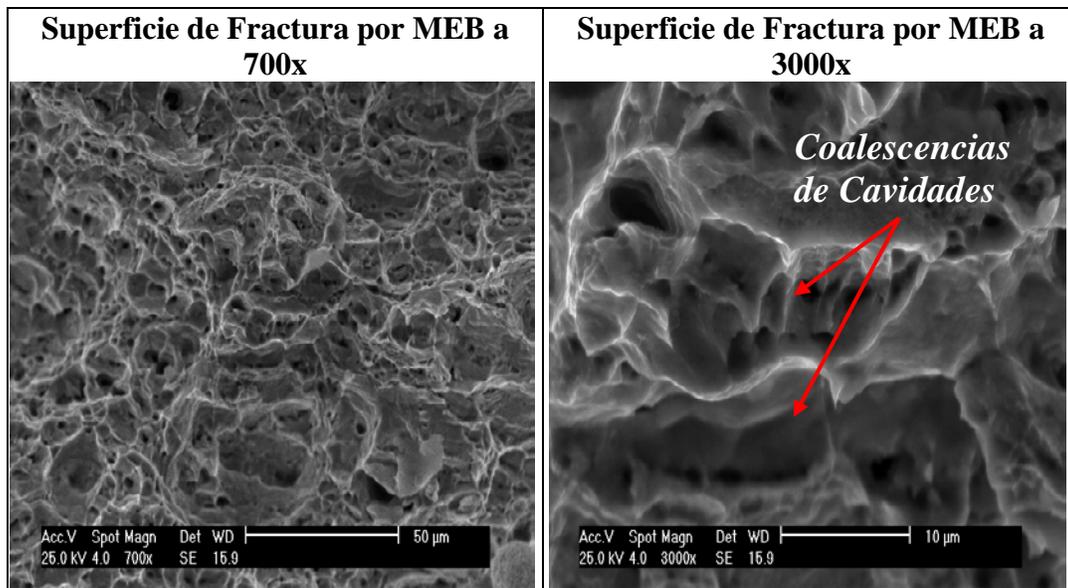


Figura 4.16 Superficie de fractura en condición 1 (24 h) tomada por MEB.

Probeta de Tracción en Condición 2 (48 h)

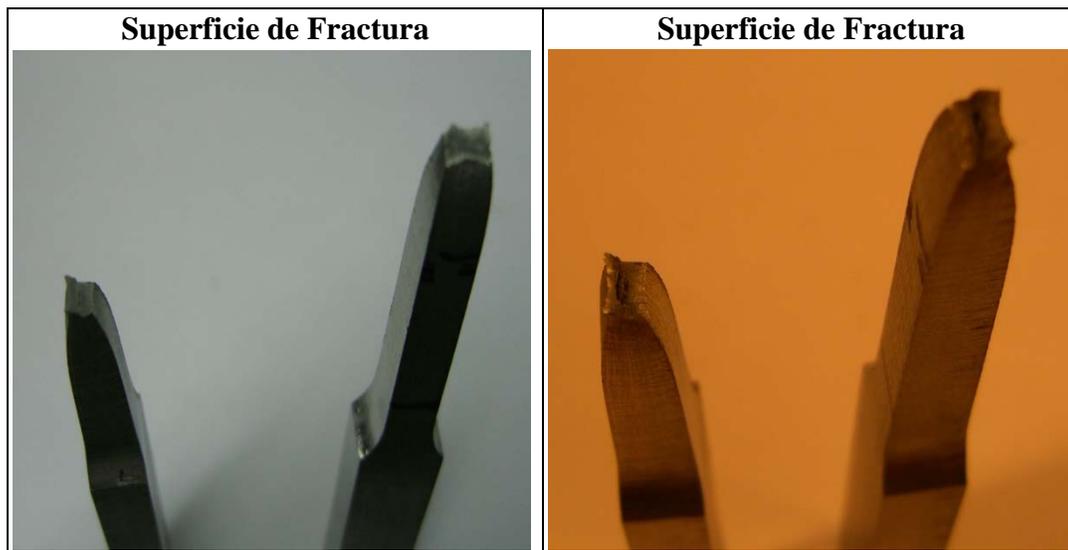


Figura 4.17 Fractografía de la probeta de tracción tomada por una cámara de 12 megapíxeles

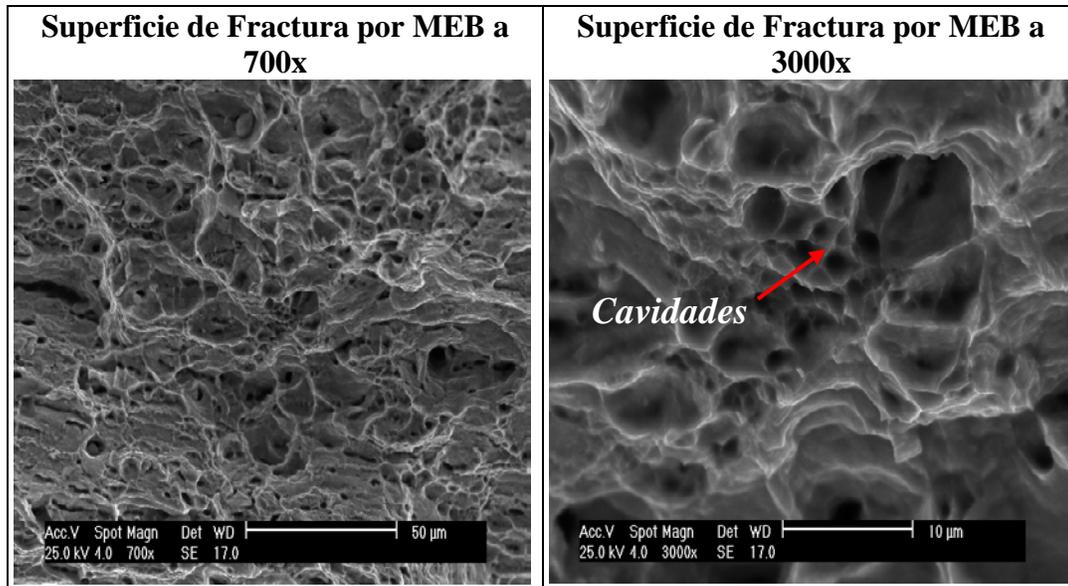


Figura 4.18 Superficie de fractura en condición 2 (48 h) tomada por MEB.

Probeta de Tracción en Condición 3 (72 h)

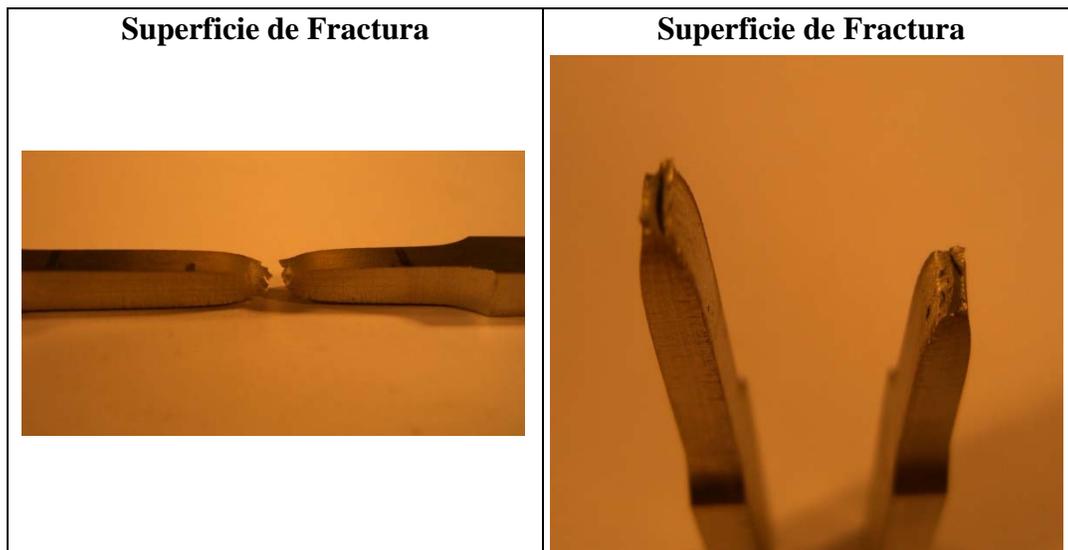


Figura 4.19 Fractografía de la probeta de tracción tomada por una cámara de 12 megapíxeles

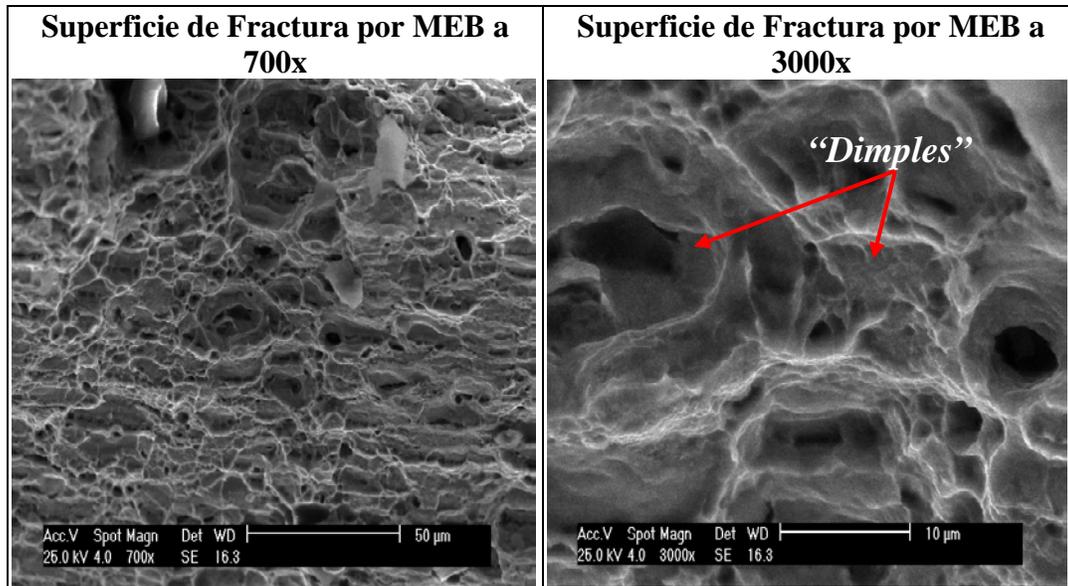


Figura 4.20 Superficie de fractura en condición 3 (72 h) tomada por MEB.

Probeta de Tracción en Condición 4 (96 h)

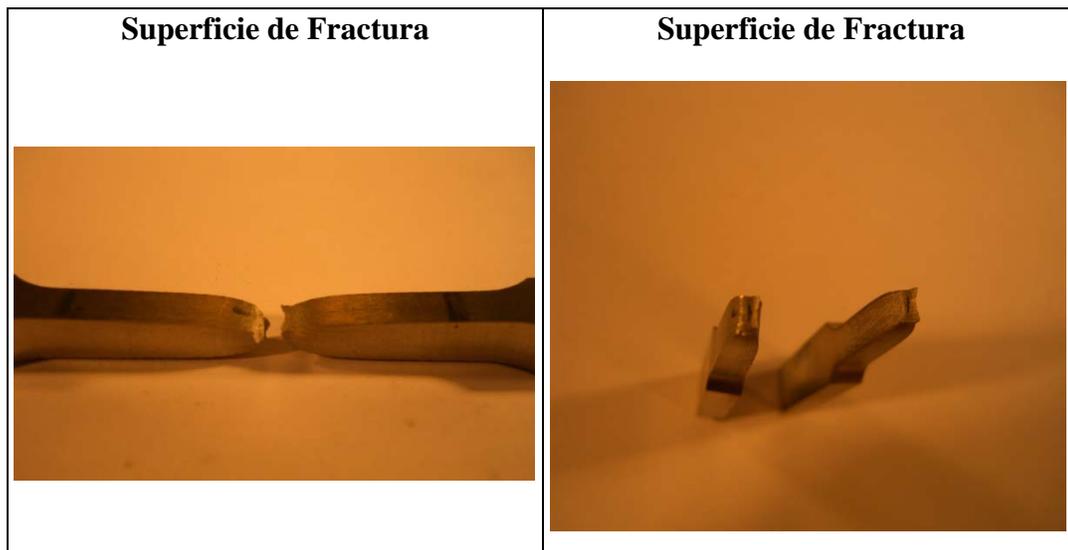


Figura 4.21 Fractografía de la probeta de tracción tomada por una cámara de 12 megapixeles

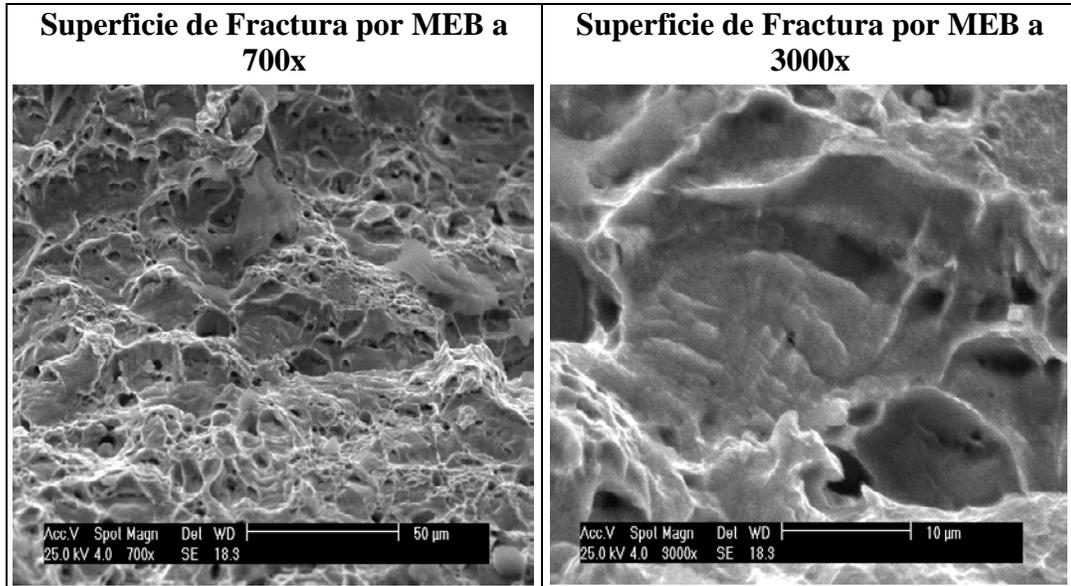


Figura 4.22 Superficie de fractura en condición 4 (96 h) tomada por MEB.

En la figura 4.13, 4.15, 4.17, 4.19 y 4.21 se observan en la superficie de fractura las probetas de tracción planas, donde se evidenció a simple vista y con ayuda de una cámara de 12 mega píxeles la presencia de encuellamiento, por ende reducción del área transversal y posterior fractura para todas las condiciones de estudio. Se detalló que la fractura ocurre dentro de la zona calibrada por lo tanto se corrobora que el ensayo de tracción es válido, también se logró observar en la fractura el desgarre fibroso con forma de copa-cono y deformaciones plásticas grandes características de una fractura dúctil.

En las figuras 4.14, 4.16, 4.18, 4.20 y 4.22 se observan las superficies de fractura del material por MEB con aumentos de 700x y 3000x para cada una de las condiciones de tracción donde se pudo apreciar hoyuelos, cavidades o “dimples” y un mecanismo de fractura de tipo coalescencia de cavidades, los cuales poseen formas y tamaños diversos (figura 4.16, 4.18, 4.20 y 4.22). Un punto importante es la

observación de las coalescencias de cavidades en la figura 4.16 ya que estas se originan por la unión de varios hoyuelos o cavidades afirmando así la presencia de una fractura dúctil en cada una de las condiciones.

4.7.2 Fractografía de las Probetas de Impacto

Probeta de Impacto en Condición Original

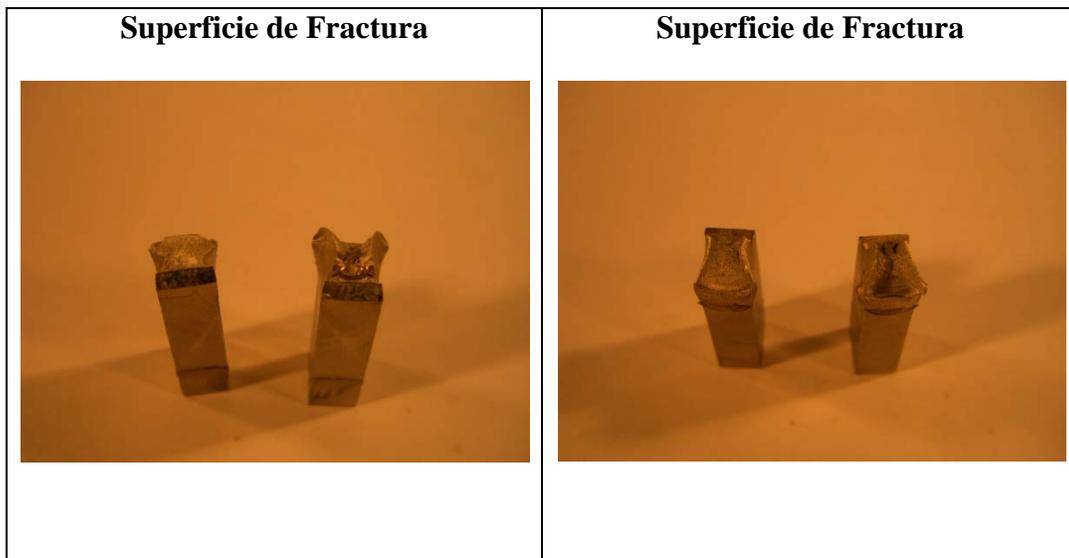


Figura 4.23 Fractografía de la probeta de impacto tomada por una cámara de 12 megapíxeles

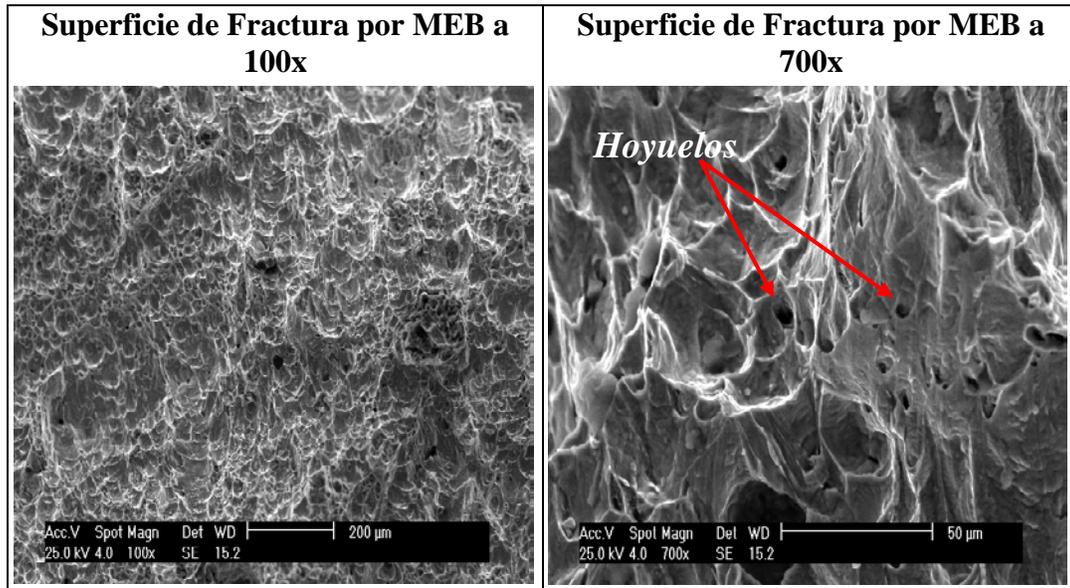


Figura 4.24 Superficie de fractura en condición original tomada por MEB.

Probeta de Impacto en Condición 1 (24 h)

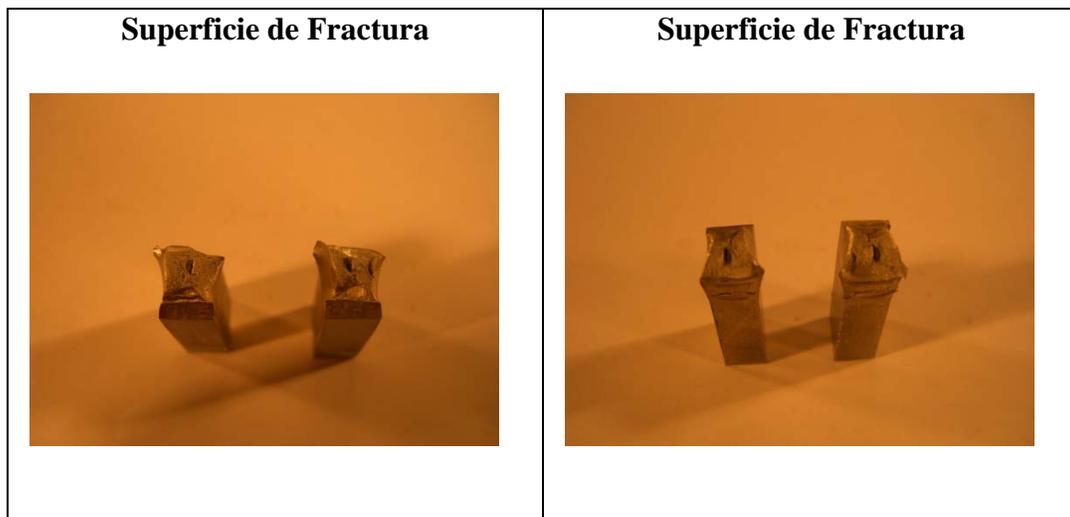


Figura 4.25 Fractografía de la probeta de impacto tomada por una cámara de 12 megapíxeles

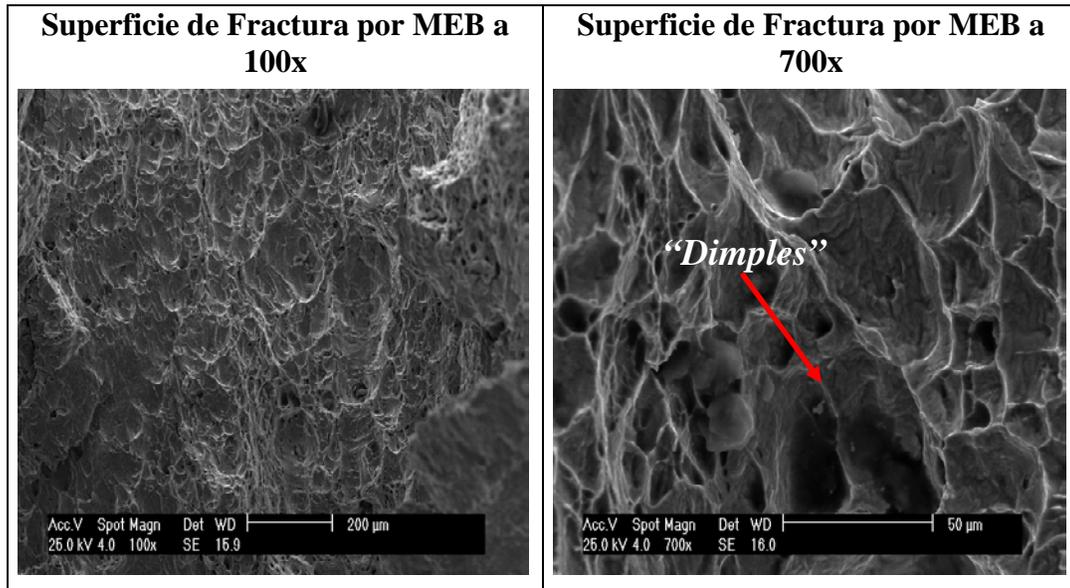


Figura 4.26 superficie de fractura en condición 1 (24 h) tomada por MEB.

Probeta de Impacto en Condición 2 (48 h)

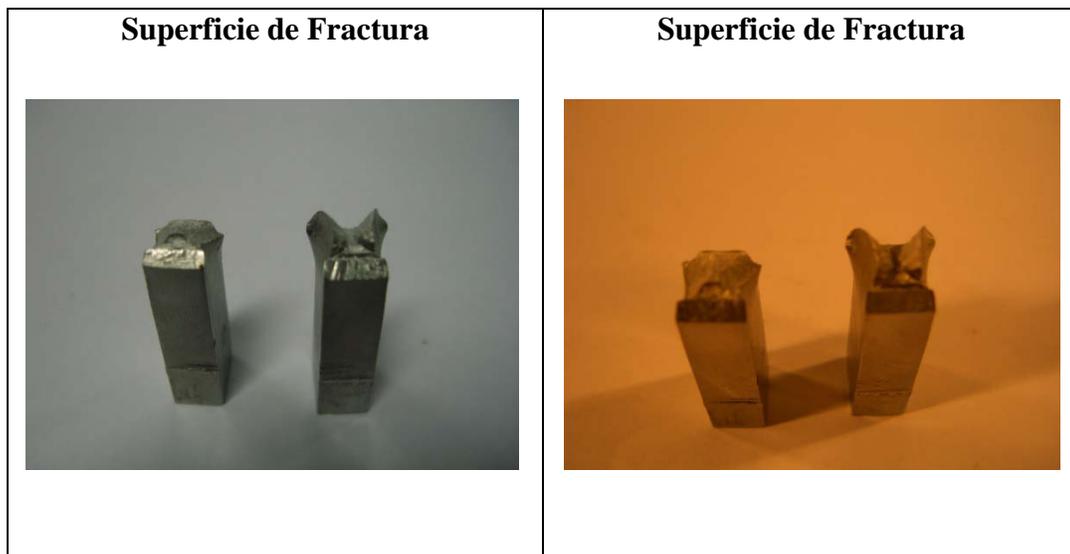


Figura 4.27 Fractografía de la probeta de impacto tomada por una cámara de 12 megapíxeles

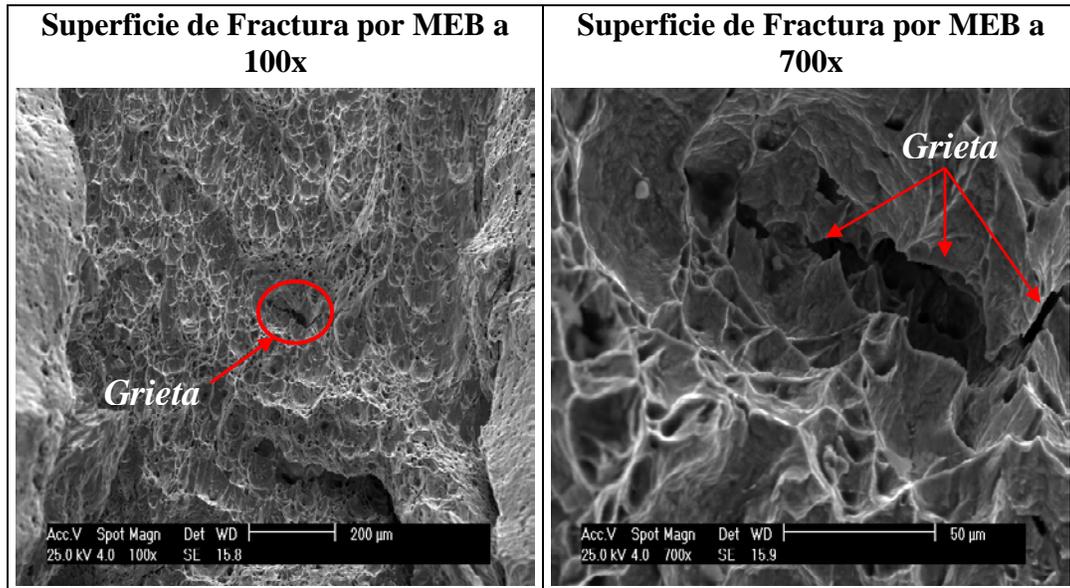


Figura 4.28 Superficie de fractura en condición 2 (48 h) tomada por MEB.

Probeta de Impacto en Condicion 3 (72 h)

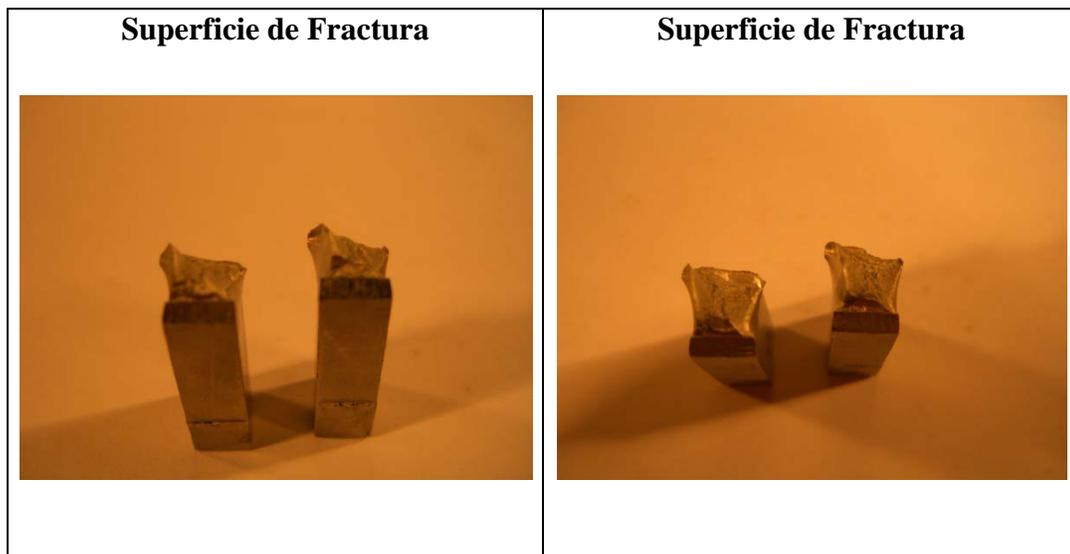


Figura 4.29 Fractografía de la probeta de impacto tomada por una cámara de 12 megapixeles

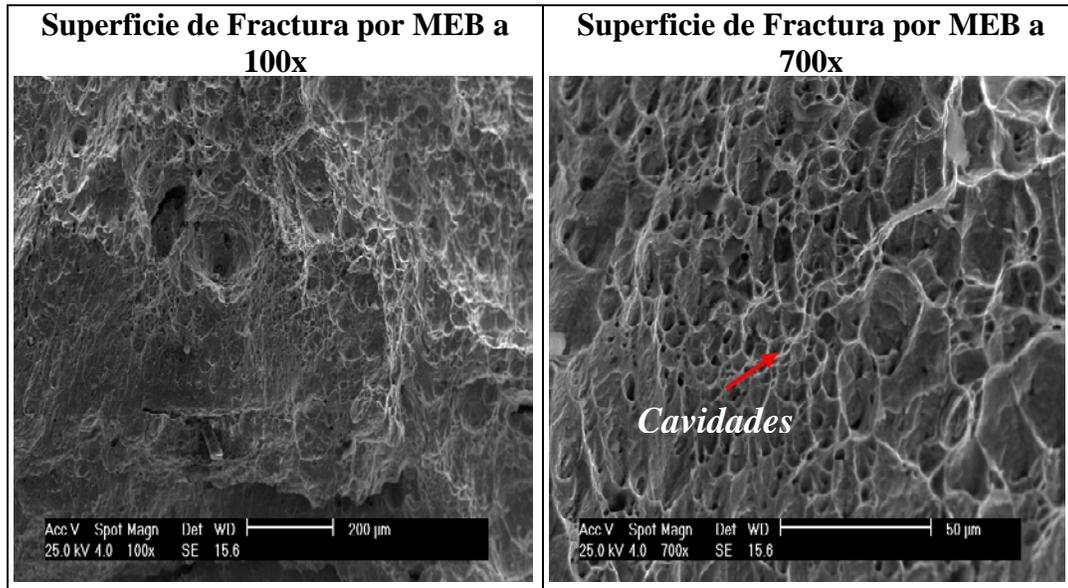


Figura 4.30 Superficie de fractura en condición 3 (72 h) tomada por MEB.

Probeta de Impacto en Condición 4 (96 h)

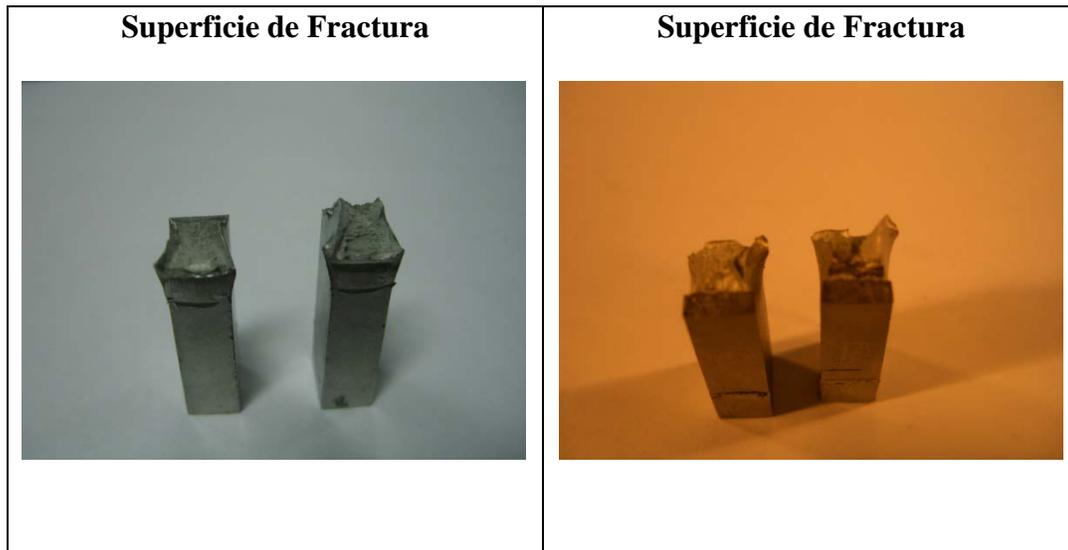


Figura 4.31 Fractografía de la probeta de impacto tomada por una cámara de 12 megapíxeles

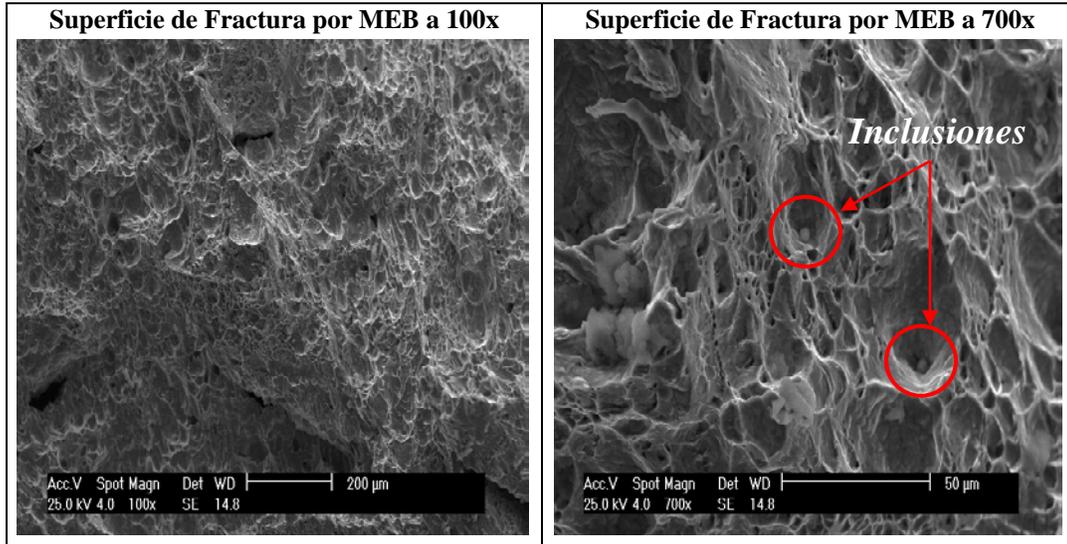


Figura 4.32 Superficie de fractura en condición 4 (96 h) tomada por MEB.

En la figura 4.23, 4.25, 4.27, 4.29 y 4.31 se muestran las superficies de fracturas probetas de impacto Charpy en “V” para cada una de las condiciones donde se observó alargamiento del material en las probetas fracturadas, es decir, deformaciones plásticas muy evidentes mostrándose los desgarros fibrosos característicos de las formaciones de labios de corte.

En las figuras 4.24, 4.26, 4.28, 4.30 y 4.32 se observan las superficies de fractura del material por MEB con aumentos de 700x y 3000x para cada una de las condiciones de Impacto Charpy donde se pudo apreciar hoyuelos o “dimples”, grietas e inclusiones, para los cuales poseen formas y tamaños diversos (figuras 4.24, 4.26, 4.28, 4.30 y 4.32). Los dimples son característicos de las fracturas dúctiles ya que surgen en este tipo de mecanismo fracturas debido a la unión de cavidades u hoyuelos entre sí denominado coalescencias de cavidades.

En las figuras 4.28, 4.30 y 4.32 se observan pequeñas grietas dispersas en la condición 2 (48 h), creando una leve condición de fragilidad, en donde se puede decir que en estas condiciones para el momento del ensayo de impacto Charpy las probetas presentaron posiblemente una fractura mixta, en donde se aprecia la ductilidad del material por lo hoyuelos, cavidades o “dimples” pero también la formación de pequeñas grietas intergranulares creando una condición fragilidad en el material.

4.8 Microestructura por microscopía óptica del acero inoxidable dúplex SAF 2304 de las diferentes condiciones a 100x.

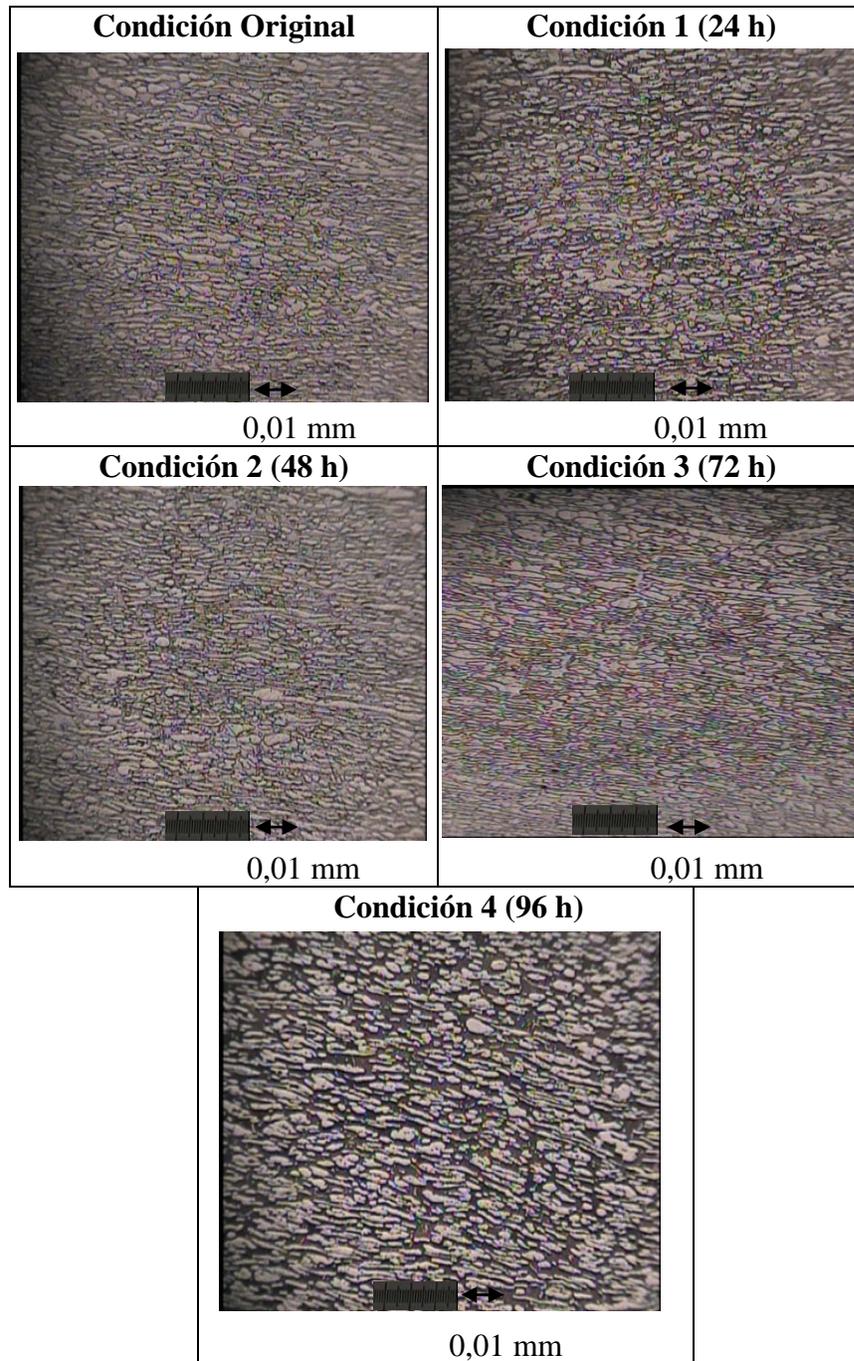


Figura 4.33 Microestructura por microscopía óptica del acero inoxidable dúplex SAF 2304 a 100x

En la figura 4.33 se observó 2 fases en cada una de las condiciones la ferrita y la austenita, observándose una distribución homogénea con un aproximado de 55% de Austenita y un 45% de ferrita por microscopia óptica a 100x, en donde se determino basado en la norma ASTM 112 con los patrones que posee el microscopio óptico a 100x, el tamaño de granos para cada una, arrojando el valor ASTM #8 indicando de esta manera que el numero de granos promedio por pulgada cuadrada son de 128 para todas las condiciones.

A continuación de se presenta la microestructura por microscopia óptica del acero inoxidable dúplex SAF 2304 a 400x, para cada una de las condiciones: original, 24, 48, 72 y 96 horas (Figura 4.34)

4.9 Microestructura por microscopia óptica del acero inoxidable dúplex SAF 2304 para cada una de las condiciones a 400x

Evaluación del deterioro Microestructural de un Acero Dúplex, expuesto a un ambiente corrosivo de Cloruro de Sodio (NaCl) al 3%

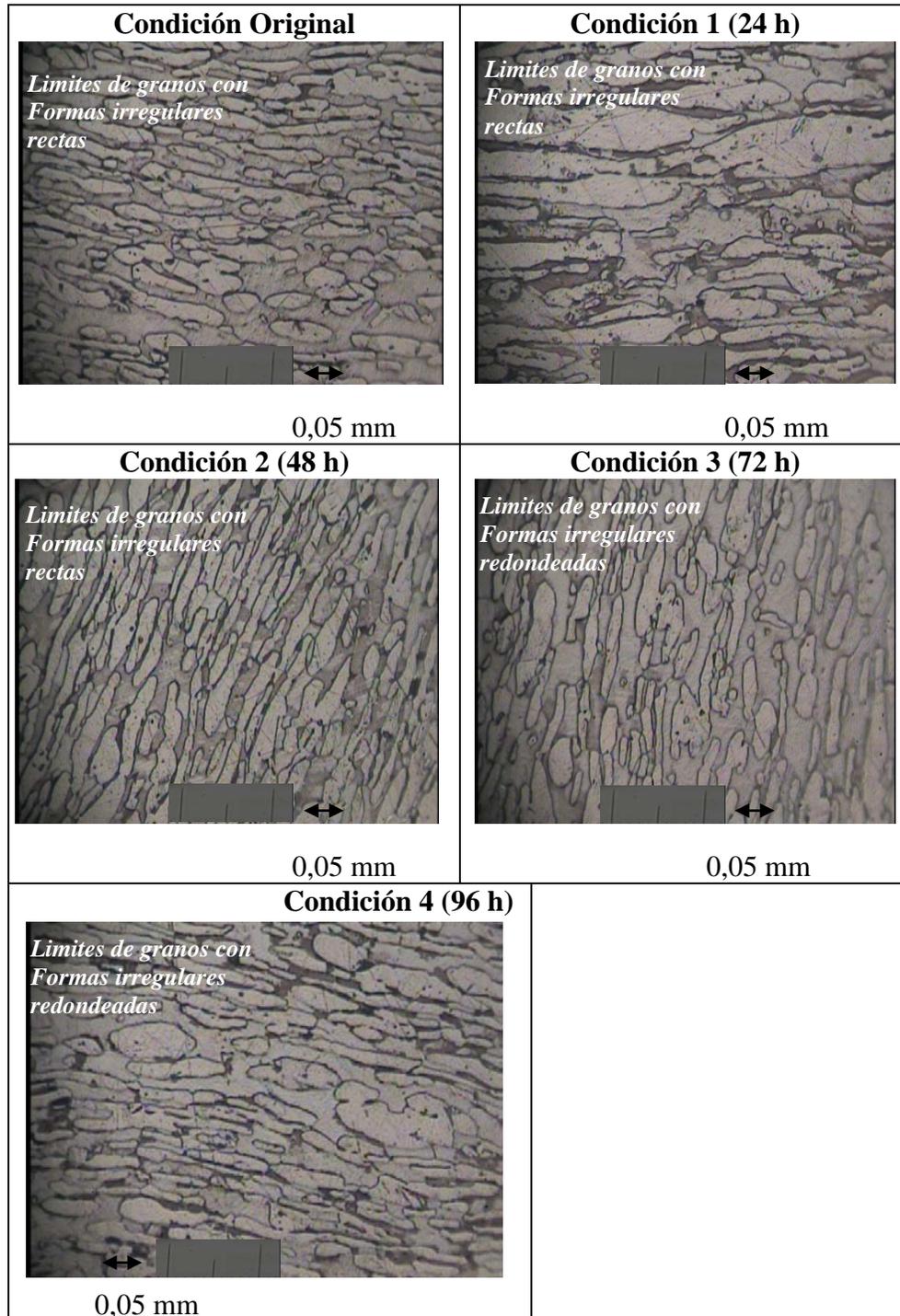


Figura 4.34 microestructura por microscopía óptica del acero inoxidable dúplex SAF 2304 a 400x

En la figura 4.34 se observa por microscopía óptica a 400x, que para cada una de las condiciones de tracción del acero inoxidable dúplex SAF 2304 se observo que la fase Austenita (γ) levemente va homogeneizándose hasta ir pasando los limites de grano con formas irregulares rectas ha formas irregulares redondeadas, a medida que va pasando de condición en condición.

A continuación de se presenta la microestructura por microscopía electrónica de barrido del acero inoxidable dúplex SAF 2304 a 800x (Figura 4.35) y a 1500x (Figura 4.36), para cada una de las condiciones: original, 24, 48, 72 y 96 horas

4.10 Microestructura del acero inoxidable dúplex SAF 2304 por microscopía electrónica de barrido M.E.B a 800x

Evaluación del deterioro Microestructural de un Acero Dúplex, expuesto a un ambiente corrosivo de Cloruro de Sodio (NaCl) al 3%

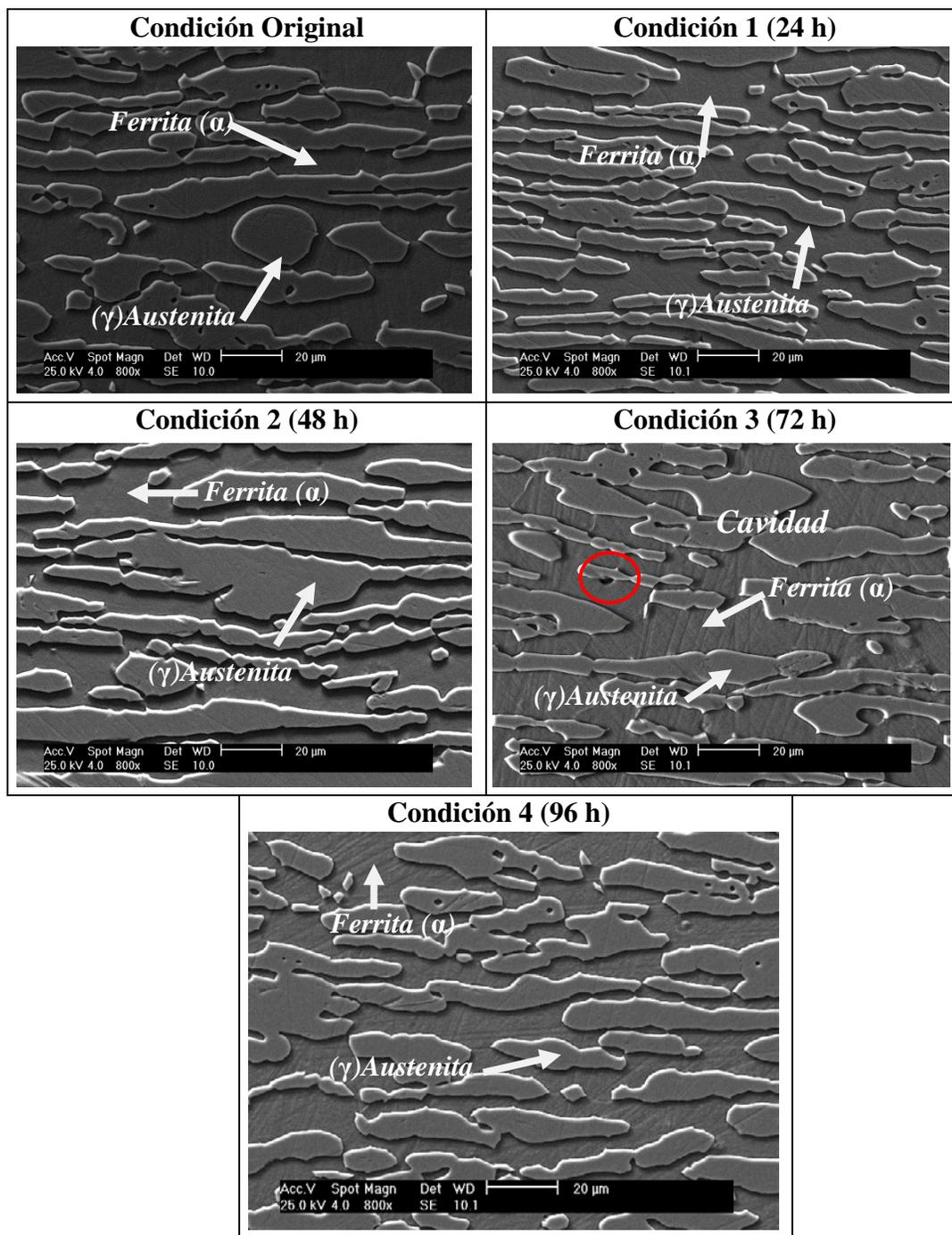


Figura 4.35 Microestructura del acero inoxidable dúplex SAF 2304 por microscopía electrónica de barrido (MEB) a 800x

4.11 Microestructura del acero inoxidable dúplex SAF 2304 por microscopia electrónica de barrido M.E.B a 1500x

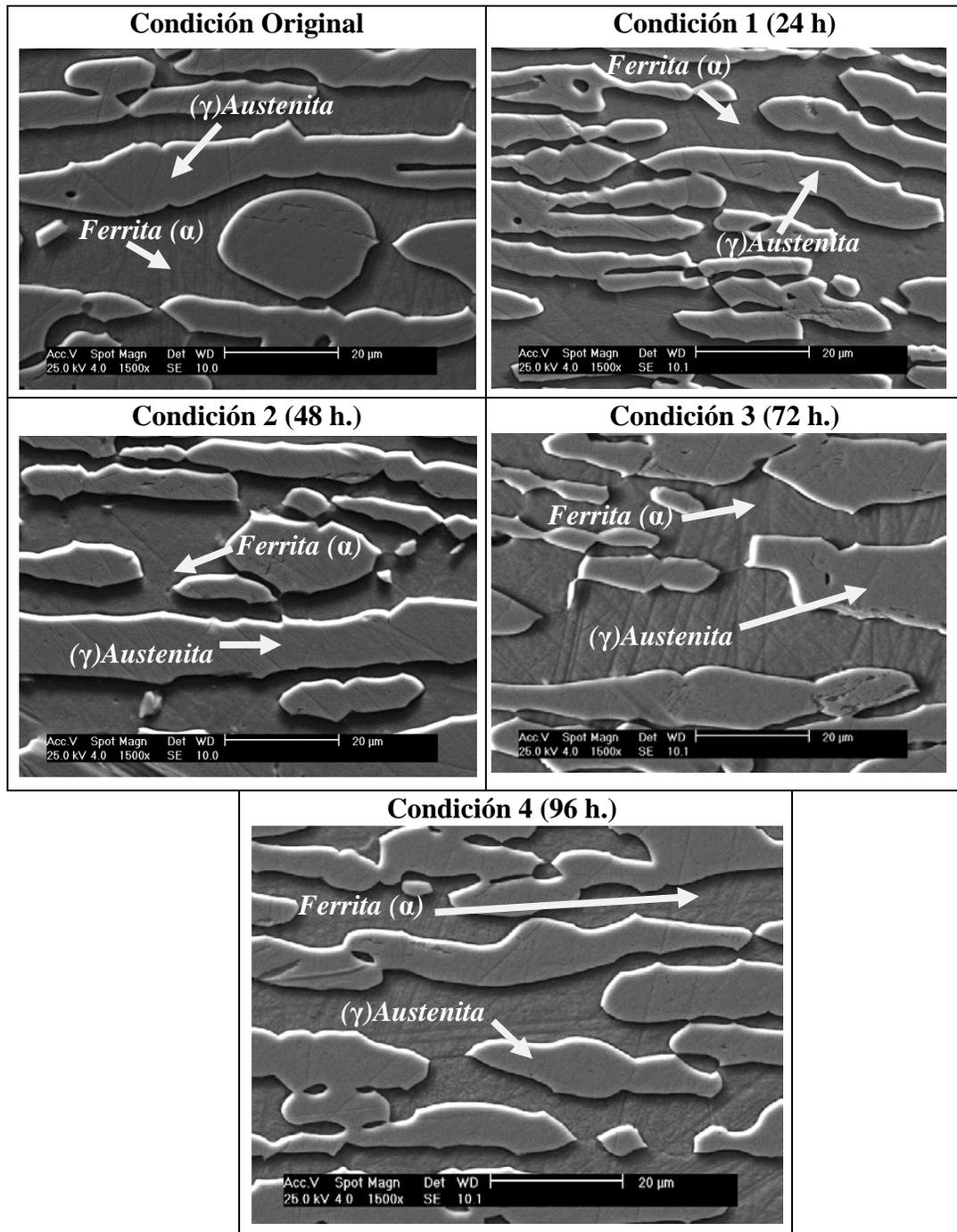


Figura 4.36 Microestructura del acero inoxidable dúplex SAF 2304 por microscopia electrónica de barrido (MEB) a 1500x

En las figuras 4.35 y 4.36 se observa la microestructura del material por MEB con aumentos de 800x y 1500x para cada una de las condiciones de tracción donde se pudo apreciar las fases presentes en la microestructura del acero inoxidable dúplex SAF 2304.

Para finalizar, los resultados obtenidos de las propiedades de resistencia mecánica tanto para el esfuerzo de fluencia y el esfuerzo máximo, permanecieron constantes para todas las condiciones de estudio, visualizándose un incremento en la deformación plástica, y los valores obtenidos no presentaron una dispersión mayor al 10% al ser sometidas las probetas en el ambiente corrosivo de NaCl al 3%.

Se observó en la deformación ingenieril un aumento de 14,36% comparado con la condición original a partir de la condición de 72 h, lo que se traduce a un ablandamiento del material, lo que indica que al ser sometidas las muestras del acero inoxidable dúplex SAF 2304 aumenta su ductilidad al ser expuesto en el NaCl al 3%. Los valores obtenidos de la tenacidad de impacto son altos, y a su vez se observó que para todas las condiciones estudiadas no hubo dispersión de los valores de tenacidad de impacto, la cual se mantiene constante, por lo que el medio corrosivo de NaCl al 3% no le afecta.

Del la macroscopía en las muestras de tracción se visualizó la formación del “copa-cono” característico de la alta ductilidad del material. En las probetas de impacto se observó la formación de los labios de corte con tonalidades opacas.

Se observó por microscopia óptica a 400x, que para cada una de las condiciones de tracción del acero inoxidable dúplex SAF 2304 la fase Austenita (γ) se homogeniza hasta ir pasando los límites de grano con formas irregulares rectas ha formas irregulares redondeadas, a medida que va pasando de condición en condición.

En la microscopia electrónica de barrido se visualizó la austenita en relieve en formas de islas, sobre la matriz ferrítica.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- No se observó deterioro microestructural del acero inoxidable dúplex SAF 2304 expuesto a un ambiente de cloruro de sodio (NaCl) al 3% en las condiciones de 24, 48, 72 y 96 horas, a través del microscopio óptico y de la microscopía electrónica de barrido M.E.B.
- Se observó las dos fases presentes en el acero inoxidable dúplex SAF 2304, compuesta por una matriz Ferrita (α) e islas de Austenita (γ) características de este acero.
- Se observó que en todas las condiciones de estudios las propiedades mecánicas por resistencia mecánica, microdureza, tenacidad de impacto presentan poca variación porcentual respecto a la condición inicial lo que es indicativo de permanecer constantes en función del tiempo. Por lo que se concluye que el medio corrosivo de NaCl al 3% no modifica las propiedades mecánicas del acero inoxidable dúplex SAF 2304.

- La ductilidad medida a través del porcentaje de deformación ingenieril en la condición de 72 h, se observó un incremento al ser comparada con la condición original de 14,36% lo que se traduce en un ablandamiento del material por efecto del NaCl al 3%.
- La tenacidad de impacto permanece constante en las condiciones ensayadas, por ende, el medio corrosivo de cloruro de sodio NaCl al 3%, no afecta esta propiedad del acero inoxidable dúplex SAF 2304. Además se observa que su EAI (energía absorbida por impacto) es grande al ser comparada con los aceros al carbono ordinarios.
- Se obtuvo una disminución de la microdureza Vickers tanto en la fase ferrítica como en la fase austenítica al comparar los resultados obtenidos con la condición original.
- Se evidenció que el material en todas las condiciones de estudio (24, 48, 72 y 96 horas) posee un comportamiento altamente dúctil, producto de la formación “copa-cono” y del mecanismo de fractura por coalescencia de cavidades en las probetas de tracción.
- Se observó en el análisis macroscópico, en las probetas de impacto una fractura mixta, producto de la presencia de grietas y zonas en donde se aprecia la ductilidad del material con labios de corte pronunciados.
- En el análisis de microscopia electrónica de barrido M.E.B se encontraron en las superficies de fractura de las muestras de tracción un mecanismo de fracturas coalescencias de cavidades caracterizado por hoyuelos, cavidades o “dimples”.

Recomendaciones

- Realizar el estudio de la evaluación de deterioro microestructural del acero dúplex a mayores tiempos de exposición en un ambiente corrosivo de NaCl al 3% y a otros medios corrosivos más agresivos a fin de evaluar el comportamiento del acero inoxidable dúplex 2304.
- Realizar estudios utilizando la técnica de energía dispersiva de rayos X (EDX) a fin de determinar cuantitativamente los elementos presentes en las inclusiones e impurezas en cada una de las fases del acero inoxidable dúplex SAF 2304.
- Realizar estudios de las curvas de pasivación del acero inoxidable dúplex SAF 2304 para determinar la velocidad de corrosión, ya que, estas curvas son más sensibles a los cambios que pudiese presentar este acero.

REFERENCIAS

1. Hartwell Robert, 'Markets, Technology and the Structure of Enterprise in the Development of the Eleventh Century Chinese Iron and Steel Industry' *Journal of Economic History* 26 (1966). pp. 53-54
2. Juleff. «An ancient wind powered iron smelting technology in Sri Lanka». *Nature* 379 Vol3. 1996 pp. 60-63.
3. Matthews Robert Guy (24-4-2009). «La industria del acero prevé más pérdidas en medio de una sobreproducción». *The Wall Street Journal*. Consultado el 28 de abril de 2 009.
4. Rojas Christian, Lago María. “Efectos de las proteínas del músculo esquelético en la corrosión de aceros inoxidables” Editorial: Fundavac-Asovac. Vol. 53, Nro. 2. Caracas, Venezuela 2002. PP 71 - 164
5. Sáenz Laura, Hilders Oswaldo A.. “Estudio de un acero inoxidable dúplex SAF 2507 sometido a un tratamiento térmico de envejecimiento a una temperatura de 850 °C por tiempos entre 1 hora y 48 horas”. *Rev. Fac. Ing. UCV* v.22 n.3 Caracas Julio 2007
6. Sáenz Laura Palencia, Avendaño Yurelis. “Evaluación microestructural del acero inoxidable austenítico AISI 304 sometido a ensayos de Creep” *Revista Ingeniería UC*. Vol. 14 no 2. Universidad de Carabobo Agosto 2007. PP 42-49.

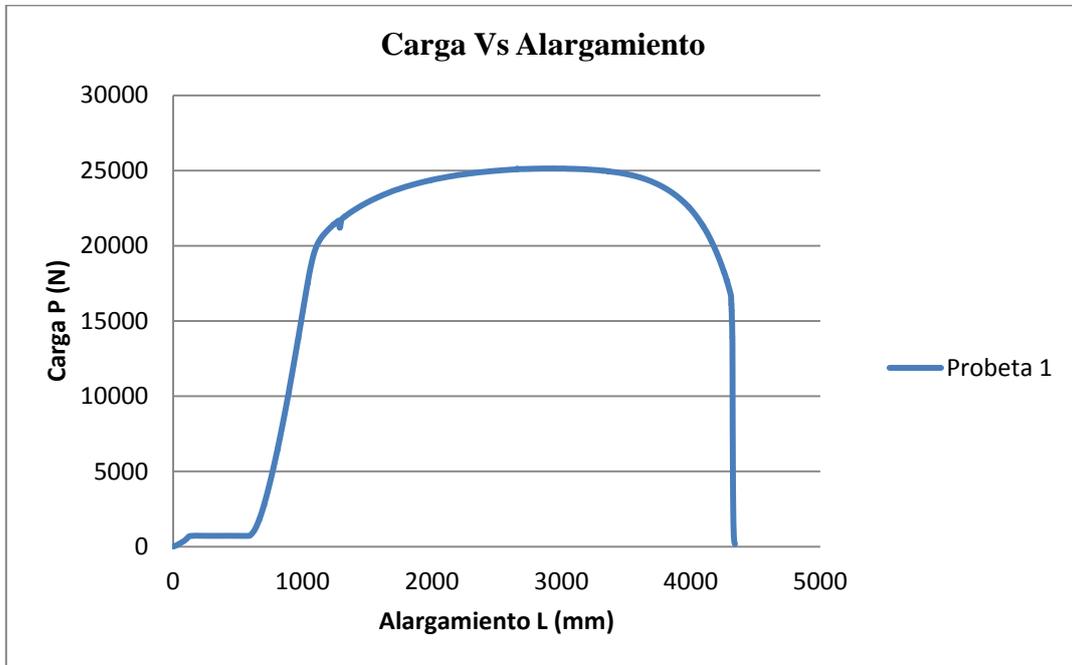
7. Sáenz Laura Palencia, Plaza Luis. “Estudio de la fragilización del acero inoxidable dúplex SAF 2205 envejecido” Revista Ingeniería UC. vol. 14, no 3. Universidad de Carabobo Diciembre 2007. PP 68-76
8. Saucedo Muñoz Maribel L. “Evaluación del deterioro en la tenacidad criogénica por envejecido en aceros inoxidables austeníticos por ensayos mecánicos miniaturas” Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales. “Volumen Suplemento” S1. Universidad Simón Bolívar (Venezuela) 2009 PP 281-286
9. Serna Claudia P. “Precipitación de fases intermetálicas de aceros dúplex sometidos a tratamientos térmicos a temperatura de 850 °C”. Scientia Et Tehcnica vol XIII Nro 36. Universidad Tecnológica de Pereira Septiembre 2007. PP 519-524
10. Vera R, Canas F. “Comportamiento Frente a la Corrosión en Ambiente Marino de Acero Galvanizado y Acero Galvanizado Pintado (Duplex)”. *Inf. tecnol.* [online]. Vol. 16, n.4. 2005 PP 53-58.
11. Askeland, D. (1998). “*Ciencia e ingeniería de los materiales*”. (3^{era} ed.). Internacional Thomson.
12. Shackelford, J. (1999). “*Ciencia de materiales para ingeniería*”. (3^{era} ed.). Prentice Hall
13. Avesta Polarit Stainless “Mechanicals Properties of Stainless Steel Duplex SAF 2205, SAF 2304 and Sandvik SAF 2507”.
14. ASTM E 23-06 “Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials”. EVA 1994
15. ASTM Metals Handbook. Volumen 8. Metallography, estructuras and Phase Diagrams. 8^{va} Edición 1973
16. ASTM A 370-05 “Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products”. EVA 1994

17. Diagrama Hierro carbono. <http://www.outokumpu.com/Products/Stainless-steel-grades/?gclid=CKKC2bjG3awCFUbf4AodLBexpG>
18. Microestructura de la perlita. <http://es.wikipedia.org/wiki/Perlita>
19. Acero Inoxidable. http://es.wikipedia.org/wiki/Acero_inoxidable
20. Acero Inoxidable Martensítico.
http://es.wikipedia.org/wiki/Acero_inoxidable_martens%C3%ADtico
21. Aceros Inoxidables Ferríticos. http://html.rincondelvago.com/aceros-inoxidables_1.html
22. Aceros Inoxidables Austeníticos.
http://www.gualstainless.com/htm/img/imatges/cms/pdf/Spanish_200.pdf
23. Micrografía de un acero inoxidable dúplex.
http://www.upv.es/pms2002/Comunicaciones/029_FARGAS.PDF
24. Acero Inoxidable dúplex.
http://www.obtesol.es/index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=147
25. Acero Inoxidable dúplex 2205.
http://megamex.com/stainless_2205.html?gclid=CObMj9vS3awCFQnf4AodhBSTEQ
26. Aplicaciones de los aceros inoxidables dúplex.
http://www.cordes.com.ar/index.php?modulo=mater&accion=sitio_ver&idmater=158&page_ANTE=1
27. Energía absorbida por ensayo de impacto.
<http://www.engr.uvic.ca/~mech471/FRACT-508.pdf>
28. Corrosión. <http://es.wikipedia.org/wiki/Corrosi%C3%B3n>

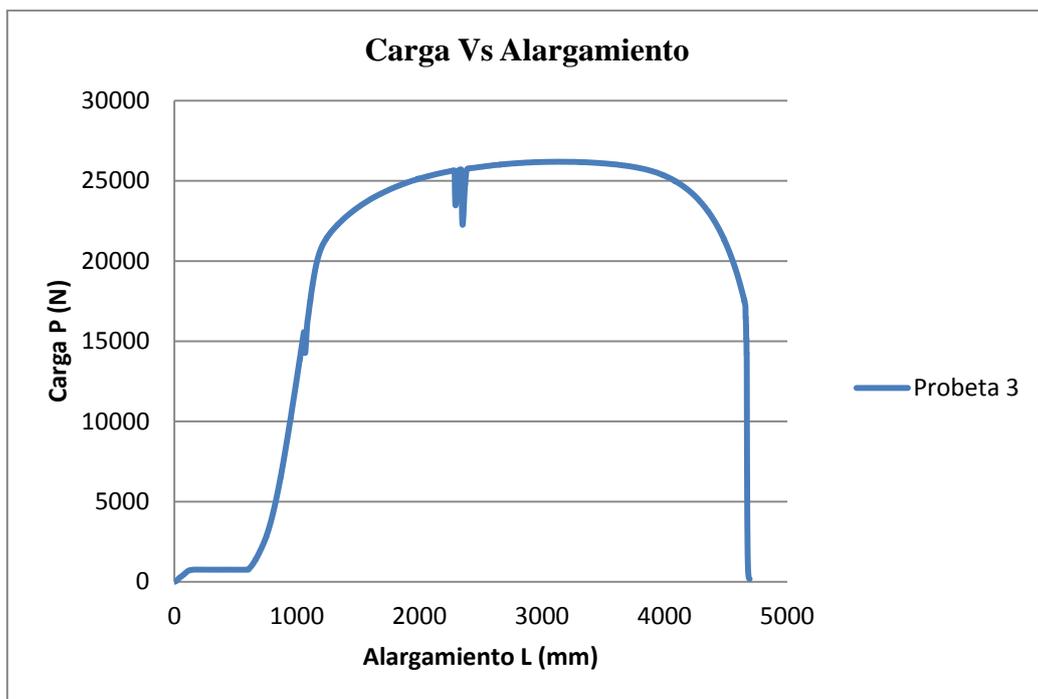
APENDICE

Gráficas de Carga Vs Alargamiento (Valores obtenidos de la Maquina de Tracción Galdabini)

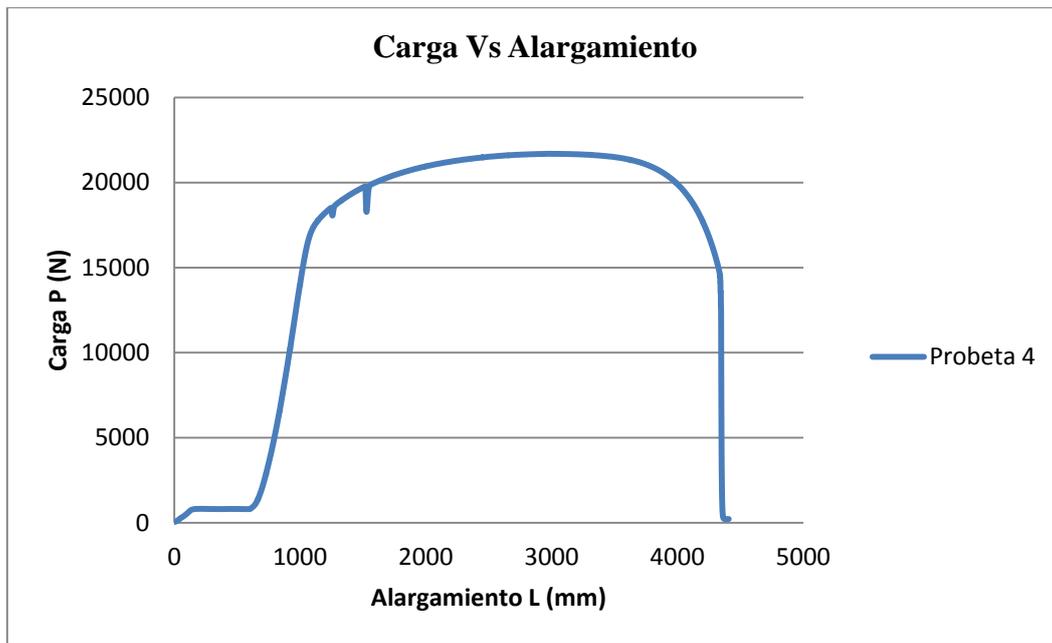
Probeta 1: Condición Original



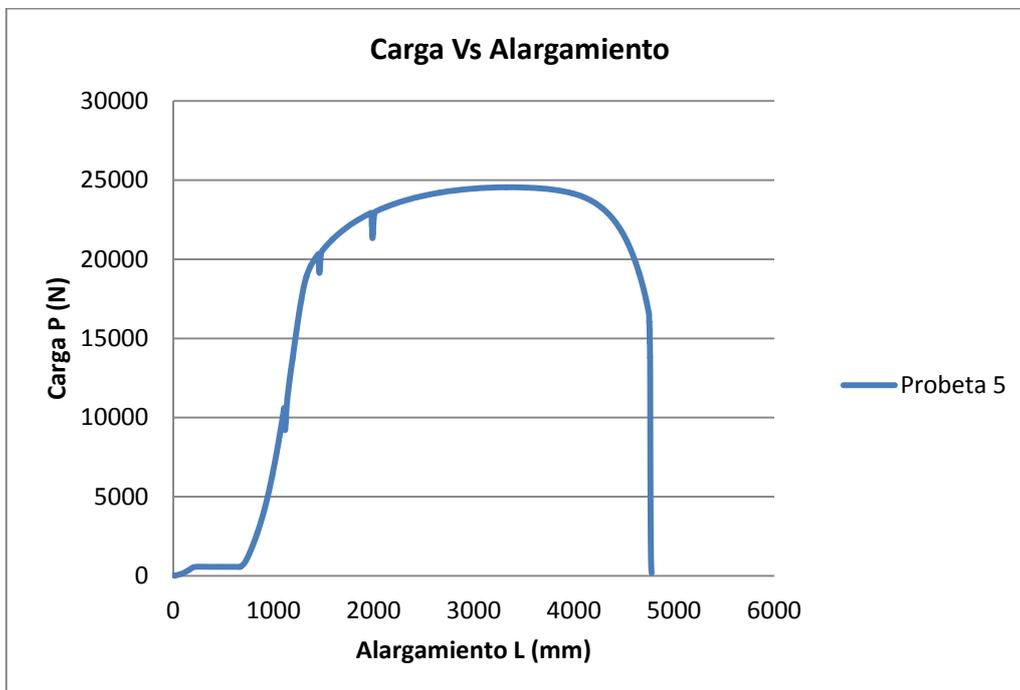
Probeta 3: Condición Original



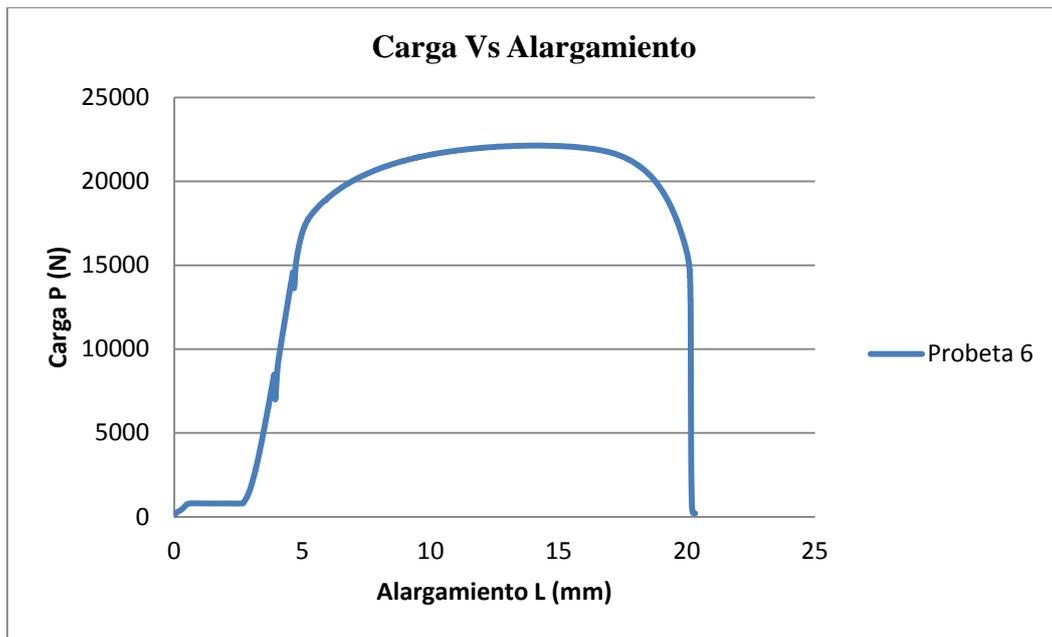
Probeta 4: Condición Original



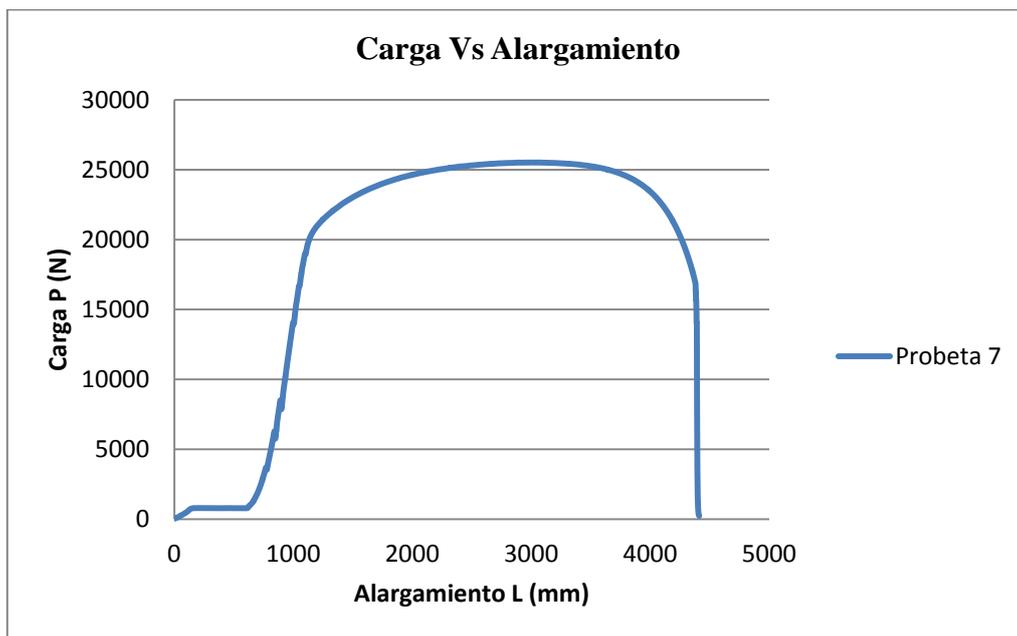
Probeta 5: Condición 24 h en NaCl al 3%



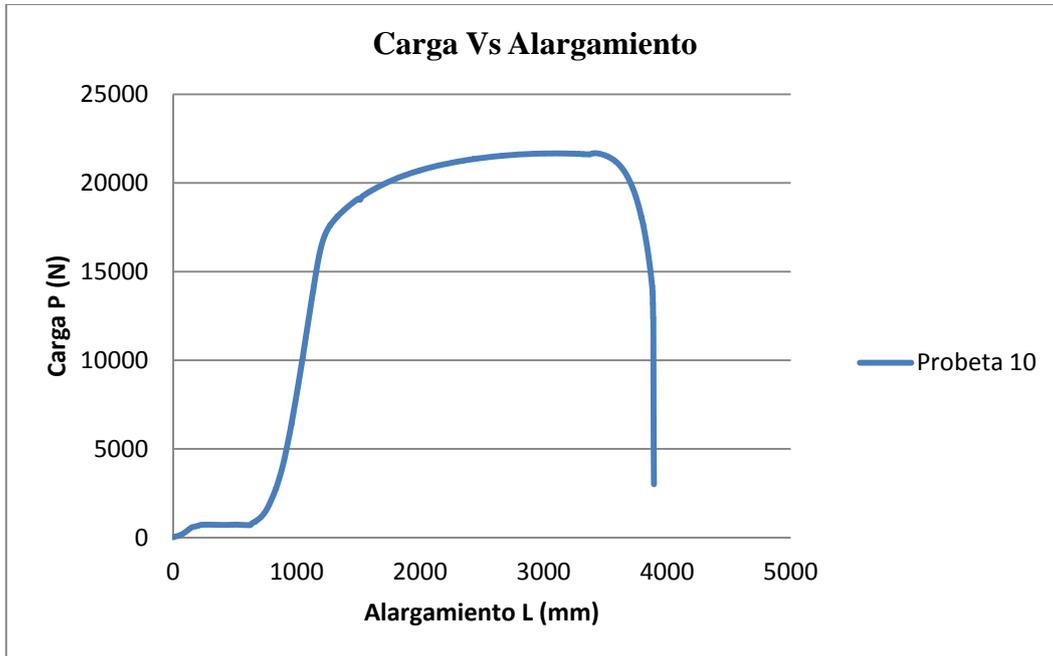
Probeta 6: Condición 24 h en NaCl al 3%



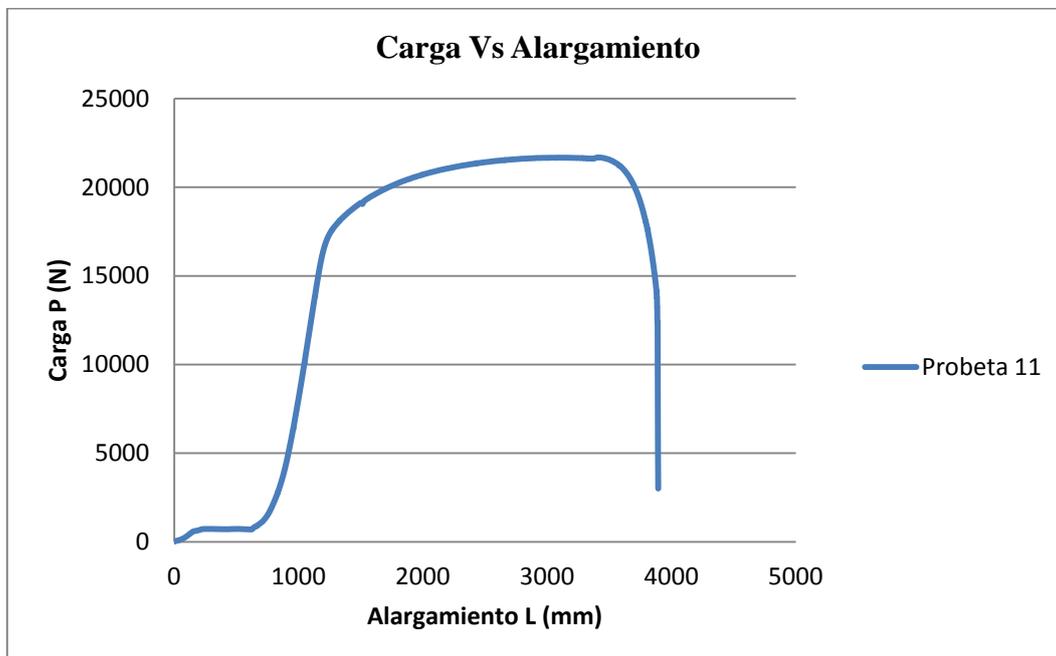
Probeta 7: Condición 24 h en NaCl al 3%



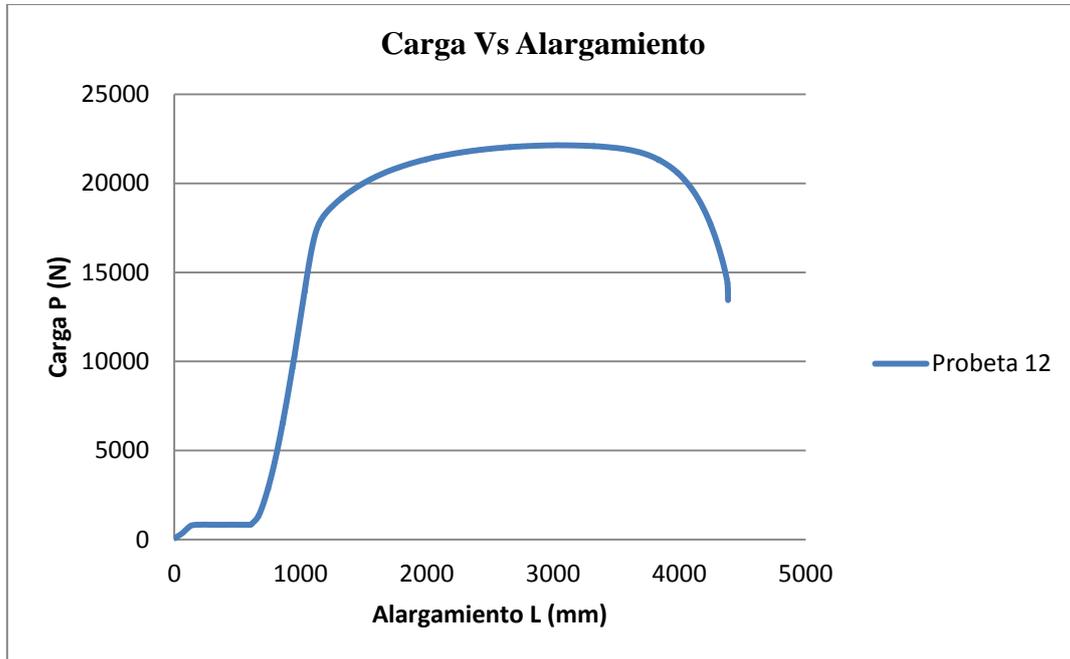
Probeta 10: Condición 48 h en NaCl al 3%



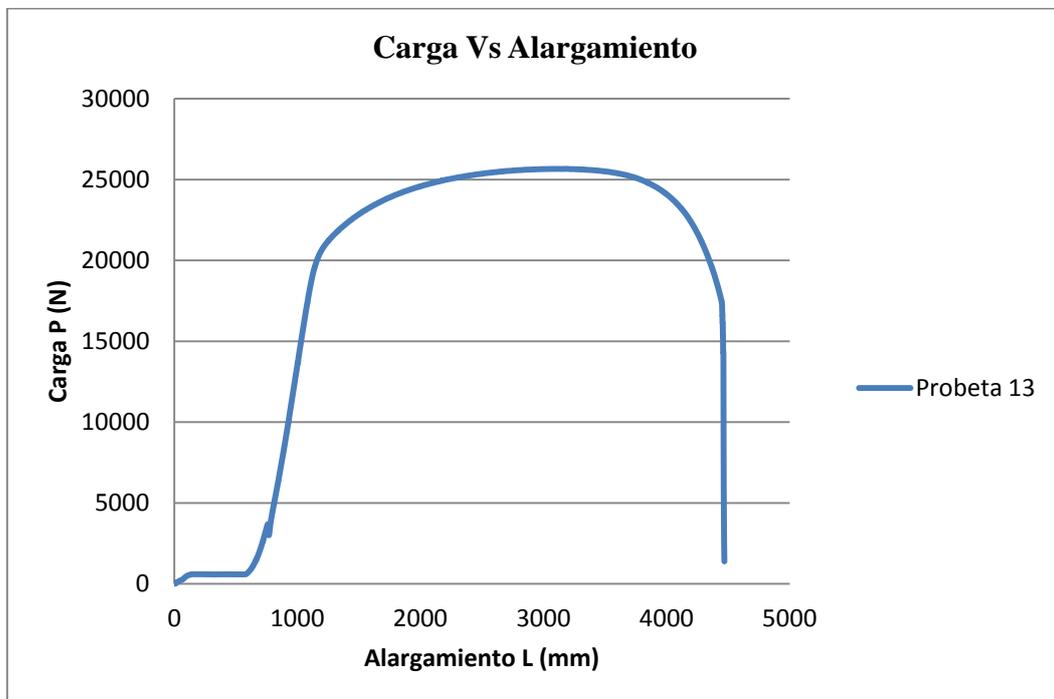
Probeta 11: Condición 48 h en NaCl al 3%



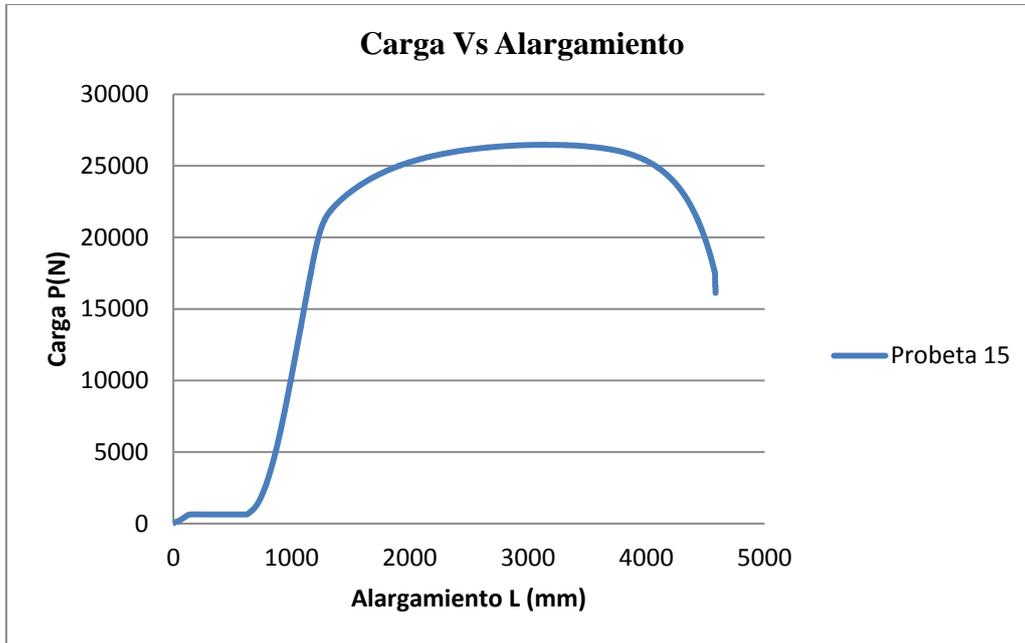
Probeta 12: Condición 48 h en NaCl al 3%



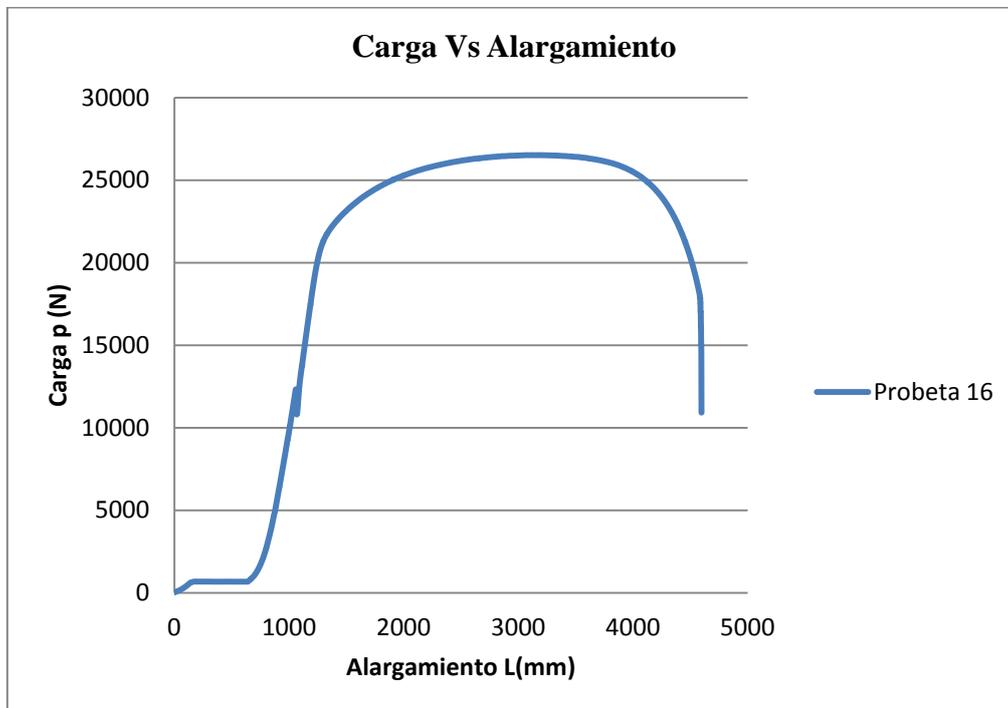
Probeta 13: Condición 48 h en NaCl al 3%



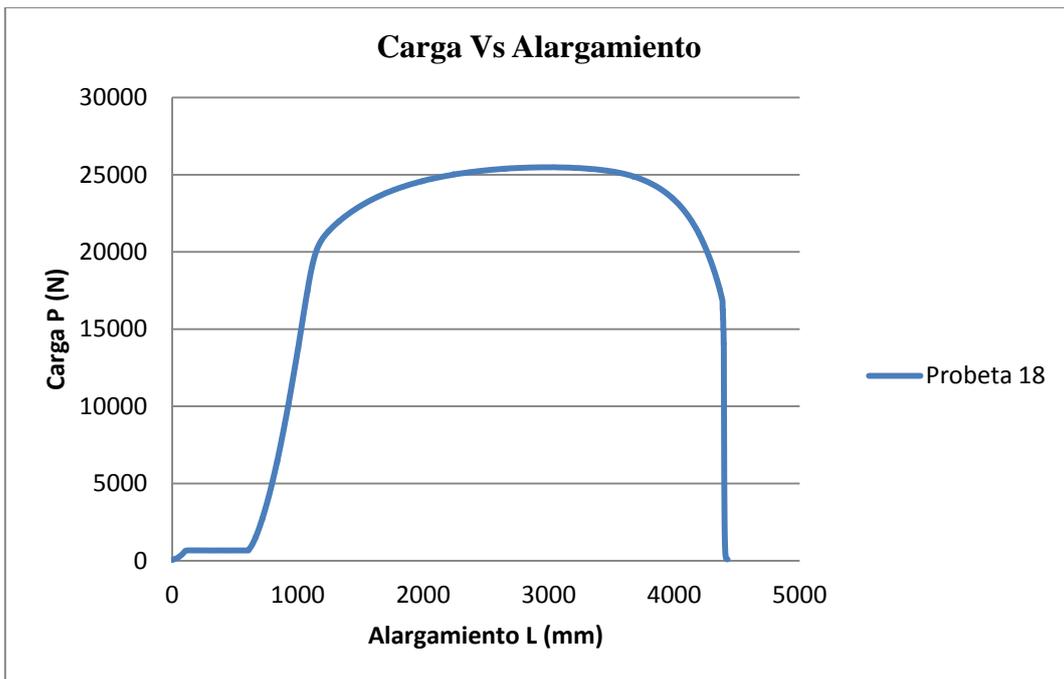
Probeta 15: Condición 72 h en NaCl al 3%



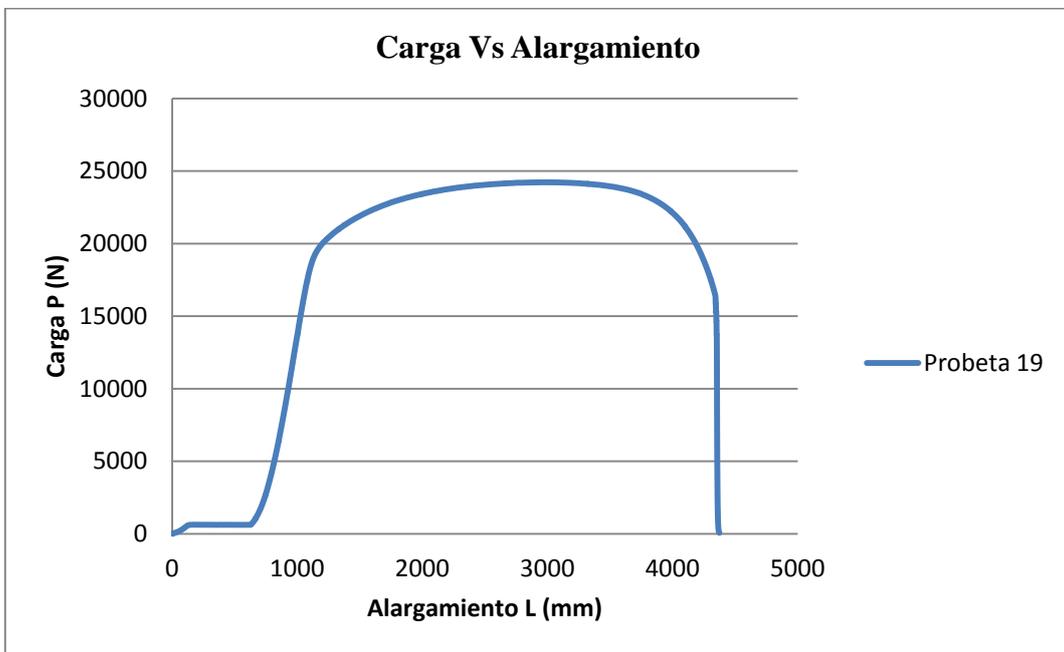
Probeta 16: Condición 72 h en NaCl al 3%



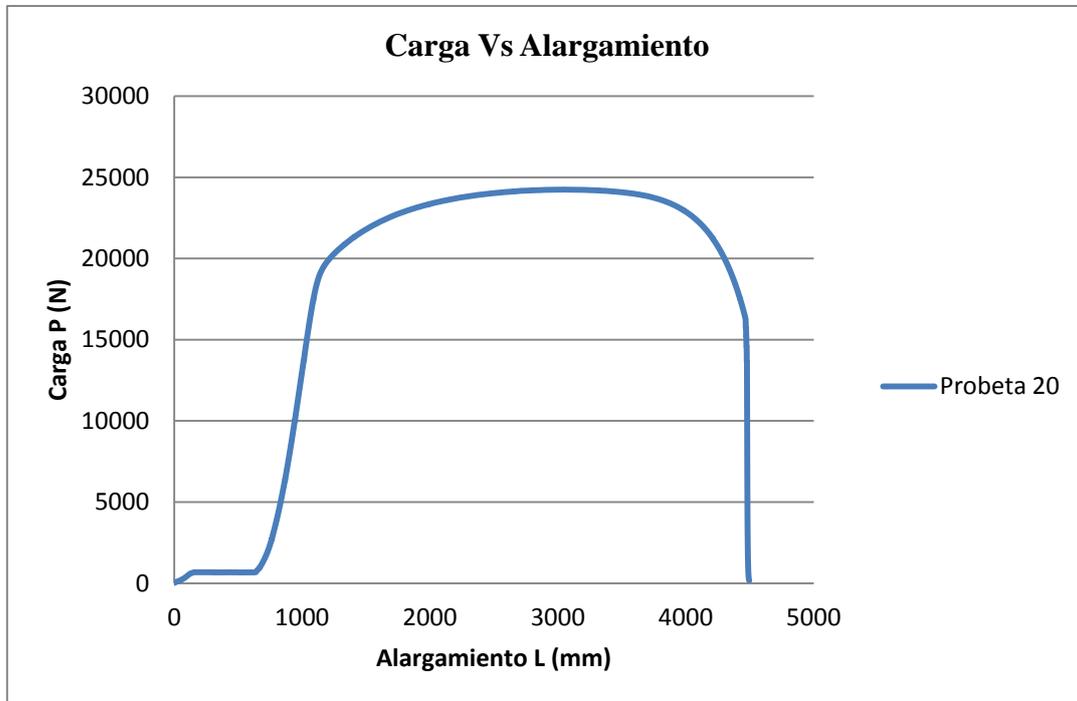
Probeta 18: Condición 96 h en NaCl al 3%



Probeta 19: Condición 96 h en NaCl al 3%



Probeta 20: Condición 96 h en NaCl al 3%



ANEXOS

