



Instituto Politécnico Nacional

Escuela Superior de Ingeniería
Química e Industrias Extractivas

INFLUENCIA DEL FLUJO DE
SOLUCIÓN SALINA Y
CARACTERÍSTICAS
METALÚRGICAS EN EL
DESARROLLO DE CORROSIÓN
UNIFORME Y CORROSIÓN
LOCALIZADA EN ACEROS BAJO
CARBONO

TESIS

Que para obtener el título de:
Ingeniero en Metalurgia y Materiales

PRESENTA

Luis Fernando Andrade Torres

Asesor de la tesis

Dr. Manuel Alejandro Beltrán Zúñiga

Dr. Diego Israel Rivas López



Folio
T-DEySA-061-21

85 Aniversario del Instituto Politécnico Nacional
70 Aniversario del CECyT 11 "Wilfrido Massieu"
60 Aniversario de la Escuela Superior de Física y Matemáticas
50 Aniversario del CECyT 12 "José Ma. Morelos" y del CECyT 13 "Ricardo Flores Magón"

Asunto
Autorización de tema

CDMX, 05 de octubre de 2021

Pasante
Luis Fernando Andrade Torres
PRESENTE

Boleta
2015320056

Programa Académico
I.M.M.

Mediante el presente se hace de su conocimiento que la Subdirección Académica a través de este Departamento autoriza al **Dr. Diego Israel Rivas López** y al **Dr. Manuel Alejandro Beltrán Zúñiga** sean asesores en el tema que propone usted desarrollar como prueba escrita en la opción **Tesis Individual**, con el título y contenido siguiente:

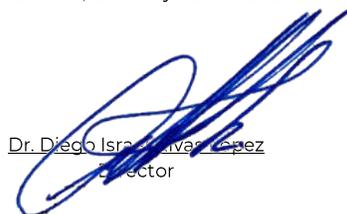
Influencia del flujo de solución salina y características metalúrgicas en el desarrollo de corrosión uniforme y corrosión localizada en aceros bajo carbono

- Resumen
- I. Introducción
 - II. Antecedentes teóricos
 - III. Metodología experimental
 - IV. Análisis de resultados
- Conclusiones.
Anexo 1
Anexo 2
Anexo 3
Referencias Bibliográficas

De acuerdo al artículo 28 del Reglamento de Titulación Profesional del Instituto Politécnico Nacional, el trabajo deberá ser concluido en un término no mayor de un año, a partir de esta fecha.



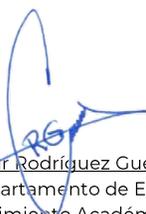
Dr. José Ortiz Landeros
Presidente de la Academia de
Metalurgia Física



Dr. Diego Israel Rivas López
Director



Dr. Manuel Alejandro Beltrán Zúñiga
Director



Ing. César Rodríguez Guerrero
Jefe del Departamento de Evaluación
y Seguimiento Académico.



M. en C. Isaura García Maldonado
Subdirectora Académica

c.c.p.- Depto. de Evaluación y Seguimiento Académico.
c.c.p.- Depto. de Gestión Escolar.
CRG/mlcp

Edificio 7, 1er nivel, Unidad Profesional "Adolfo López Mateos", Col. Zacatenco,
Alcaldía Gustavo A. Madero, C.P. 07738, Ciudad de México,
Conmutador 01 (55) 57296000 ext 55104 www.esiqie.ipn.mx; www.ipn.mx



Folio

T-DEYSA-061-21

85 Aniversario del Instituto Politécnico Nacional
70 Aniversario del CECyT 11 "Wilfrido Massieu"
60 Aniversario de la Escuela Superior de Física y Matemáticas
50 Aniversario del CECyT 12 "José Ma. Morelos" y del CECyT 13 "Ricardo Flores Magón"

Asunto

Autorización de Impresión

CDMX, a 08 de diciembre de 2021

Pasante

Luis Fernando Andrade Torres
PRESENTE

Boleta
2015320056

Programa Académico
I.M.M.

Los suscritos tenemos el agrado de informar a usted, que habiendo procedido a revisar el borrador de la modalidad de titulación correspondiente denominado:

"Influencia del flujo de solución salina y características metalúrgicas en el desarrollo de corrosión uniforme y corrosión localizada en aceros bajo carbono"

encontramos que el citado trabajo escrito de **Tesis Individual**, reúne los requisitos para **autorizar el examen profesional y proceder a su impresión** según el caso, debiendo tomar en consideración las indicaciones y correcciones que al respecto se le hicieron.

Atentamente
JURADO



Dr. Héctor Javier Dorantes Rosales
Presidente



Ing. Claudia Ramírez Rodríguez
Secretaria



Dr. Diego Rafael Rivas López
Vocal 1



Ing. Ana Lilia Pérez Flores
Vocal 2



Dr. Manuel Alejandro Beltrán Zúñiga
Vocal 3

c.c.p.- Depto. de Evaluación y Seguimiento Académico.
c.c.p.- Depto. de Gestión Escolar.
CRC/mlcp



Folio
T-DEySA-061-21

85 Aniversario del Instituto Politécnico Nacional
70 Aniversario del CECyT 11 "Wilfrido Massieu"
60 Aniversario de la Escuela Superior de Física y Matemáticas
50 Aniversario del CECyT 12 "José Ma. Morelos" y del CECyT 13 "Ricardo Flores Magón"

Asunto
Cesión de derechos

CDMX, a 08 de diciembre de 2021

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

El que suscribe: **Luis Fernando Andrade Torres** estudiante del Programa de: **Ingeniería en Metalurgia y Materiales** con número de Boleta: **2015320056**, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo escrito, por la opción: **Tesis Individual**, bajo la dirección del profesor **Dr. Diego Israel Rivas López** y el **Dr. Manuel Alejandro Beltrán Zúñiga** ceden los derechos del trabajo **"Influencia del flujo de solución salina y características metalúrgicas en el desarrollo de corrosión uniforme y corrosión localizada en aceros bajo carbono"** al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

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

Atentamente

LUIS FERNANDO ANDRADE TORRES

Nombre y Firma
del estudiante

Dr. Diego Israel Rivas López

Nombre y Firma
Del director

Dr. Manuel Alejandro Beltrán Zúñiga

Nombre y Firma
del director



INDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES TEÓRICOS	3
2.1 Definición de corrosión	3
2.2 Corrosión del acero en medio acuoso	4
2.3 Corrosión uniforme	5
2.4 Corrosión localizada	8
2.5 Daños en líneas de transporte de hidrocarburos por corrosión en México	11
2.6 Especificación del acero utilizado en tuberías de transporte de hidrocarburos	13
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	18
3.1 Recepción de muestras	19
3.2 Estudio de propiedades metalúrgicas	19
3.2.1 Pruebas mecánicas.....	19
3.2.2 Análisis de composición química.....	21
3.2.3 Análisis metalográfico.....	21
3.2.4 Pruebas electroquímicas.....	22
3.3 Prueba de flujo	23
3.3.1 Corte y preparación de medias cañas para pruebas de flujo	23
3.3.2 Preparación de solución salina.....	24
3.3.3 Exposición de muestras a flujo continuo	25
3.4 Análisis fenomenológico.	26
3.5 Identificación de parámetros de influencia.....	26
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	28
4.1 Propiedades mecánicas	28
4.2 Análisis químico.....	29
4.3 Caracterización microestructural	31
4.4 Pruebas electroquímicas.....	33
4.5 Prueba de flujo.....	35
4.6 Pruebas de inmersión y flujo dinámico.....	41
CAPÍTULO 5. ANALISIS DE RESULTADOS	44
5.1 Caracterización de muestras	44
5.2 Análisis de caracterización microestructural	44

5.3 Pruebas de flujo	50
5.3.1 Relación del grado de bandeamiento con el contenido de productos de corrosión .	51
5.3.2 Relación del parámetro de orientación microestructural con el contenido de productos de corrosión.....	52
5.3.3 Relación entre el contenido de carbono y la microestructura con el contenido de productos de corrosión.....	53
5.3.4 Relación del contenido y distribución de fases con respecto al contenido de productos de corrosión desarrollada en pruebas de flujo.....	53
5.3.5 Relación de la velocidad de corrosión con respecto al contenido de productos de corrosión desarrollada en pruebas de flujo	57
5.4 Resultados de las pruebas de inmersión	57
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	59
CAPÍTULO 7. REFERENCIAS	61
ANEXO 1. MICROGRAFIAS DE INCLUSIONES.	63
ANEXO 2. MICROESTRUCTURAS	73
ANEXO 3. PATRONES DE CORROSIÓN.	81

INDICE DE FIGURAS

Figura	Descripción	Página
1	Ciclo de refinación-corrosión.	3
2	Celda de corrosión del acero en un medio acuoso.	5
3	Ejemplo de corrosión uniforme.	6
4	Corrosión uniforme en ranura o canal.	6
5	Proceso general de corrosión localizada.	9
6	Vista general de la picadura generada en un acero bajo carbono.	9
7	Histograma de profundidad media.	10
8	Profundidad de la picadura como una unidad de función del área expuesta.	11
9	Gráfica de los porcentajes de las diversas causas de incidentes en región sur durante el periodo de 1995 a 2004: CE; Corrosión Externa, CI; Corrosión Interna, DM; Daño Mecánico, MS; Material y Soldadura, y OT; Otras causas	12
10	Gráfico de los porcentajes de las diversas causas de incidentes en: (a) región norte México y (b) E.U., durante el periodo de 1995 a 2004: CE; Corrosión Externa, CI; Corrosión Interna, DM; Daño Mecánico, PG; Peligro Geotécnico, MS; Material y Soldadura, y OT; Otras causas	12
11	Gráfico del tipo de falla en región sur durante el periodo de 1995 a 2004: FP; Fuga Pequeña, FG; Fuga Grande, y RU; Rupturas	13
12	Microestructura de un acero API 5L X52, capturada en campo claro en un microscopio óptico, atacado con nital 3% a 20X aumentos.	17

13	Diagrama de metodología experimental.	18
14	Condición de recibido y dimensiones del tubo A1.	19
15	Condición de recibido y dimensiones del tubo A2.	19
16	Condiciones y procedimiento de pruebas mecánicas.	20
17	Procedimiento de análisis de composición química.	21
18	Procedimiento y equipo utilizado en análisis metalográfico	22
19	Procedimiento y equipo de prueba electroquímica.	23
20	Plano de corte y preparación para cada carrete.	24
21	Carrete cortado y desbastado en prueba.	24
22	Diseño de arreglo experimental.	25
23	Montaje del diseño experimental para las pruebas de medias cañas expuestas a un flujo continuo de solución salina NACE 1D-196.	26
24	Distribución del grado API de las muestras probadas en el presente estudio.	29
25	Distribución de contenido de Carbono en las muestras del estudio.	30
26	Apariencia de las superficies después de las pruebas de inmersión en especímenes tomados de tubos sin productos de corrosión adheridos y con productos de corrosión respectivamente	36
27	Apariencia de las superficies después de las pruebas de inmersión en especímenes tomados de tubos sin productos de corrosión adheridos y con productos de corrosión respectivamente	37
28	Apariencia de las superficies después de las pruebas de inmersión en especímenes tomados de tubos sin productos de corrosión adheridos y con productos de corrosión respectivamente.	38
29	Apariencia de las superficies después de las pruebas de inmersión en especímenes tomados de tubos sin productos de corrosión adheridos y con productos de corrosión respectivamente.	39
30	Apariencia de las superficies después de las pruebas de inmersión en especímenes tomados de tubos sin productos de corrosión adheridos y con productos de corrosión respectivamente.	40
31	Histograma de Porcentaje de inclusiones en dirección transversal (G) y productos de corrosión.	44
32	Histograma de Porcentaje de inclusiones en dirección longitudinal (F) y productos de corrosión.	45
33	Histograma de Porcentaje de Ferrita en dirección transversal (G) y productos de corrosión.	45
34	Histograma de Porcentaje de Ferrita en dirección longitudinal (F) y productos de corrosión	46
35	Histograma de Porcentaje de Ferrita en dirección superficial (S) y productos de corrosión	46
36	Histograma del parámetro de orientación microestructural (Ω ,W) y productos de corrosión.	47
37	Histograma del grado de bandeamiento (AI) y productos de corrosión.	48
38	Muestra A1 y A37 respectivamente, microestructura ferrita-perlita con bandeamiento. (Dirección transversal).	50

39	Relación del grado de bandeamiento y el contenido de productos de corrosión.	51
40	Relación del parámetro de orientación microestructural y el contenido de productos de corrosión.	52
41	Relación del contenido de carbono y el contenido de productos de corrosión.	53
42	Demostración de que el contenido de ferrita y perlita en dirección transversal está relacionado con los productos de corrosión	55
43	Demostración de que el contenido de ferrita y perlita en dirección longitudinal está relacionado con los productos de corrosión	56
44	Velocidad de corrosión con respecto al desarrollo aparente de los productos de corrosión	57

INDICE DE TABLAS

Tabla	Descripción	Página
1	Unidades de la velocidad de corrosión.	7
2	Grupos de acuerdo a la velocidad de corrosión.	7
3	Resumen de las diferencias entre PSL1 Y PSL2	14
4	Composición química para PSL1 en porcentaje peso (% wt)	15
5	Composición química para PSL2 en porcentaje peso (% wt).	16
6	Propiedades mecánicas para PSL1.	16
7	Propiedades mecánicas para PSL2.	17
8	Reactivos de solución salina NACE 1D-196	25
9	Propiedades mecánicas de muestras obtenidas en el presente estudio.	28
10	Resultados del análisis químico en % peso.	29
11	Micrografía de inclusiones no metálicas presentes en muestras. Microscopio metalográfico campo claro, sin ataque.	31
12	Microestructura de muestras en secciones transversal, longitudinal y superficial. Microscopio metalográfico campo claro. (Muestra A1 y A2, sin y con depósito de corrosión respectivamente).	32
13	Análisis microestructural de muestras.	32
14	Caracterización electroquímica.	34
15	Comparación de los patrones con respecto al daño en campo y laboratorio.	41
16	Comparación entre las pruebas realizadas en laboratorio (inmersión y pruebas de flujo dinámico).	42
17	Muestras que exceden el %S indicada por la especificación API 5L	49

RESUMEN

El presente trabajo muestra la sensibilidad al desarrollo de corrosión de tipo localizada o uniforme, mediante el análisis de la morfología de los productos de corrosión generados durante una prueba de flujo propuesta en distintos aceros de especificación API-5L utilizando la solución salina NACE 1D-196. Para la realización del estudio se emplearon 37 muestras de aceros con diferentes composiciones y características metalúrgicas, obtenidas de ductos retirados de servicio, principalmente por daños de corrosión interna. Como parte del estudio se diseñó un arreglo experimental de flujo, en el cual se expusieron las superficies de acero durante cinco días.

Los resultados muestran que las características de los productos de corrosión para los aceros de especificación API-5L dependen principalmente de contenido de carbono y la distribución superficial de los microconstituyentes. En general se encontró que el flujo de solución salina inhibe la generación de los patrones de corrosión localizada, por lo que todas las muestras desarrollaron corrosión uniforme en forma de canal. Sin embargo, una observación y análisis más detallado muestran que contenidos inferiores a 0.125%wt de carbono promueven la presencia de productos de corrosión, mientras que, a partir de contenidos de carbono iguales o superiores a 0.160%wt disminuyen la presencia de estos productos; y siendo mínimos en contenidos mayores a 0.200%wt de carbono. El análisis estadístico permitió determinar que existe una relación directa entre el porcentaje de ferrita y perlita en el desarrollo aparente de los productos de corrosión, estimando que a valores menores al 86% de contenido de ferrita disminuye la formación de productos de corrosión

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En el año 1999 la Administración Federal de Autopistas de EUA (FHWA) en colaboración con CC Technologies Laboratories, Inc y NACE realizó un estudio para cuantificar el costo de la corrosión en los Estados Unidos de América. Los resultados del estudio mostraron que el costo total por año de la corrosión en USA es de USD \$276 billones, de los cuales USD \$7 billones corresponden a los gastos realizados por corrosión en tuberías para transporte de gas natural, de petróleo y de líquidos peligrosos [1].

Estos costos comprueban la importancia de estudiar la corrosión y buscar nuevas alternativas para controlar este fenómeno natural. Los científicos estiman que entre un 25% y un 30% de los costos de la corrosión podrían ser evitados si se realizaran análisis preventivos y se emplearan estrategias efectivas para el control de la corrosión [2].

En el país mexicano los estudios relacionados al tema de corrosión a nivel nacional son muy escasos. Por lo dicho anteriormente, es de suma importancia conocer el tipo de corrosión que se presenta en los diferentes aceros utilizados en la industria petrolera, principalmente en la tubería de transporte de hidrocarburos, ya que, aunque estos no representen un agente corrosivo por sí mismos, la presencia de contaminantes como el agua, cataliza la presencia de corrosión interna y puede llegar a ocasionar corrosión localizada. La cual puede provocar grandes daños y pérdida económica. Es por esto que se prefiere una corrosión uniforme que pueda ser controlada y así disminuir los daños provocados.

En este trabajo se estudiaron fugas causadas por el fenómeno de corrosión en un ambiente de flujo continuo, y el historial de resultados ha mostrado que éstas presentan en su totalidad un comportamiento de corrosión uniforme; así mismo, que los ductos fabricados con aceros de extra bajo contenido de carbono muestran mayor sensibilidad al desarrollo del ataque, lo que produce una mayor velocidad de corrosión.

Es por esto que, en este trabajo de investigación se identificó si existe alguna relación entre las características metalúrgicas de los aceros y la formación de depósitos que favorezcan el desarrollo de la corrosión. Lo anterior se realizó mediante pruebas de corrosión en flujo de solución salina continuo, a partir de muestras de tubos de acero especificación API 5L.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES TEÓRICOS

2.1 Definición de corrosión

La palabra corrosión es tan vieja como la tierra. Con el paso del tiempo la materia tenderá a regresar a su estado mínimo de energía, y los metales dejarán de estar en su estado elemental combinándose electroquímicamente con el medio ambiente y formando nuevamente óxidos, sulfuros, carbonatos, etc. Por este motivo, la corrosión ha sido conocida con diferentes nombres, comúnmente se le conoce como óxido.[3]

La corrosión es un proceso natural de destrucción, como lo son los tornados, ciclones y erupciones volcánicas, con la gran diferencia de que la corrosión puede ser prevenida y controlada.

Existen diversas definiciones de la corrosión, una definición general sería que la corrosión es la interacción química o electroquímica entre un material y su medio ambiente, que resulta en el deterioro de la superficie y o las propiedades de dicho material. En otras palabras, la corrosión es una metalurgia extractiva inversa, como ejemplo se muestra el ciclo de refinación-corrosión del acero en la **Figura 1** [4].

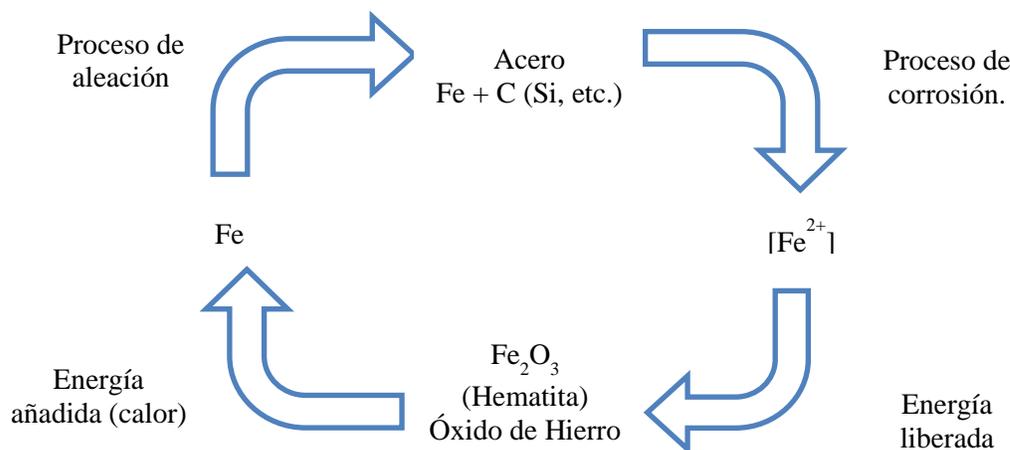


Figura 1. Ciclo de refinación-corrosión.

Prácticamente todos los ambientes son corrosivos en cierto grado, pero en general, los materiales “inorgánicos” son más corrosivos que los materiales

“orgánicos”. Por ejemplo, la corrosión en la industria del petróleo se debe más al cloruro de sodio, sulfuro de sodio, ácido clorhídrico y sulfúrico que, a el aceite, nafta o la gasolina. Otro factor que usualmente aumenta las condiciones de corrosión son las temperaturas y presiones altas [5].

2.2 Corrosión del acero en medio acuoso

Aunque la corrosión es un proceso complicado, este puede ser comprendido más fácilmente como una reacción electroquímica. Cuando el acero se encuentra en presencia de agua y oxígeno, la disolución del material ocurre en ciertas áreas llamadas zonas anódicas (ánodo), el hierro elemental Fe^0 pasa a la solución oxidándose a iones ferroso (Fe^{2+}) y férrico (Fe^{3+}). Como resultado de este proceso se liberarán dos electrones que fluyen a través del acero al área catódica (cátodo); donde, en presencia de oxígeno (O_2), se forman óxido ferroso (FeO) y óxido férrico (Fe_2O_3) como incrustaciones o precipitados. Un subproducto de la reacción en el cátodo son los iones hidroxilo (OH^-) resultantes en la superficie del metal por la reducción del agua. Este fenómeno y sus reacciones se pueden apreciar más claramente en la **Figura 2** [1].

Es importante mencionar que el hierro también puede reaccionar con el bióxido de carbono (CO_2), formando carbonato ferroso (FeCO_3) y con el ácido sulfúrico (H_2S) formando sulfuros de hierro (Fe_xS_x). En presencia de estos compuestos (CO_2 y H_2S), la reacción catódica puede generar gas hidrógeno.

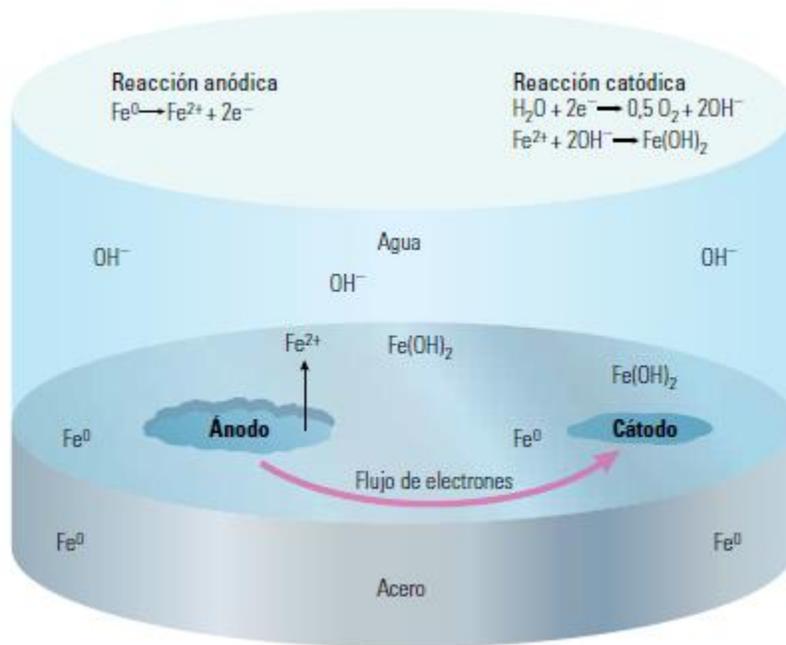


Figura 2. Celda de corrosión del acero en un medio acuoso. [1]

2.3 Corrosión uniforme

La corrosión uniforme puede ser definida como una reacción electroquímica o química que se lleva a cabo homogéneamente sobre la totalidad de la superficie o sobre un área extensa. Este tipo de ataque es la forma de corrosión más común y aunque a simple vista puede parecer una corrosión crítica, es la forma de corrosión preferencial, porque desde un punto de vista técnico, el tiempo de vida del material puede ser estimado de forma más precisa que en la corrosión localizada. [5]

Algunos ejemplos de este tipo de corrosión pueden ser observado en la **Figura 3**, donde se puede apreciar que es el mismo nivel de daño sobre la superficie de todo el tubo.



Figura 3. Ejemplo de corrosión uniforme.

Este tipo de corrosión no siempre tiene que estar presente a lo largo de toda el área como se muestra en la **Figura 3**. La corrosión uniforme también puede estar presente solamente en un área extensa o donde el medio más corrosivo tiene contacto con la superficie, un ejemplo se muestra en la **Figura 4**, donde se muestra la corrosión solamente en el área donde la solución corrosiva tuvo contacto con la superficie del acero. Este tipo de corrosión uniforme es conocida como corrosión en ranura o canal.



Figura 4. Corrosión uniforme en ranura o canal.

La velocidad de ataque uniforme se puede presentar en distintas unidades, algunas de las terminologías y abreviaciones más utilizadas se muestran en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Unidades de la velocidad de corrosión.

Terminología	Unidades
Milímetros por año	mm/año
Gramos por metro cuadrado por día	gmd
Pulgadas por año	ipa
Milésimas de pulgada por año	mpa
Miligramos por decímetro cuadrado por día	mdd

Nota: Estas unidades se refieren a la penetración de metal o a la pérdida de peso de metal, sin tomar en cuenta los productos de corrosión adherentes o no adherentes sobre la superficie del acero.

Un ejemplo es que el agua de mar corroe al acero a una velocidad relativamente uniforme de aproximadamente: $0.13\text{mm/año} = 2.5\text{gmd} = 25\text{mdd} = 0.005\text{ipa}$.

La conversión de mm/año para gmd o viceversa requiere el conocimiento de la densidad del metal.

De acuerdo a su velocidad de corrosión y la aplicación deseada los metales pueden ser clasificados en tres grupos, estos grupos se muestran en la **Tabla 2**. [6]

Tabla 2. Grupos de acuerdo a la velocidad de corrosión.

Velocidad de corrosión (mm/año)	Propiedades	Ejemplo
<0.15	Buena resistencia a la corrosión.	Asientos de válvulas, ejes de bomba y los impulsores
0.15 a 1.5	Resistencia a la corrosión satisfactoria*	Tanques, tubería, cabezas de tuercas
>1.5	Usualmente no es satisfactorio	

*Si una velocidad de corrosión más alta puede ser tolerada

2.4 Corrosión localizada

Este tipo de corrosión es la causante mayor de las fallas de los materiales en las diferentes industrias, y lo más importante es que regularmente estas fallas suceden de forma inesperada y los daños que ocasionan son aún mayores.

Las fallas ocasionadas por la corrosión localizada son difíciles de predecir ya que generalmente son indetectables en su fase inicial. Esto se debe a que en sus comienzos la cantidad del metal atacado es muy poco, pero en un área muy pequeña. Por ejemplo, una pequeña fisura en el fondo de un recipiente que contenga líquidos, por el ataque localizado después de un tiempo atravesará el recipiente y podría generar diversos accidentes.

Existen diferentes formas de corrosión localizada, las más comunes son:

- Corrosión en grietas.
- Corrosión galvánica.
- Corrosión filiforme.
- Corrosión por picaduras.
- Corrosión intergranular.

Aunque cada una de las formas de corrosión localizada tiene sus características particulares, todas comparten una serie de pasos en común, este proceso es explicado en la **Figura 5**. [7]

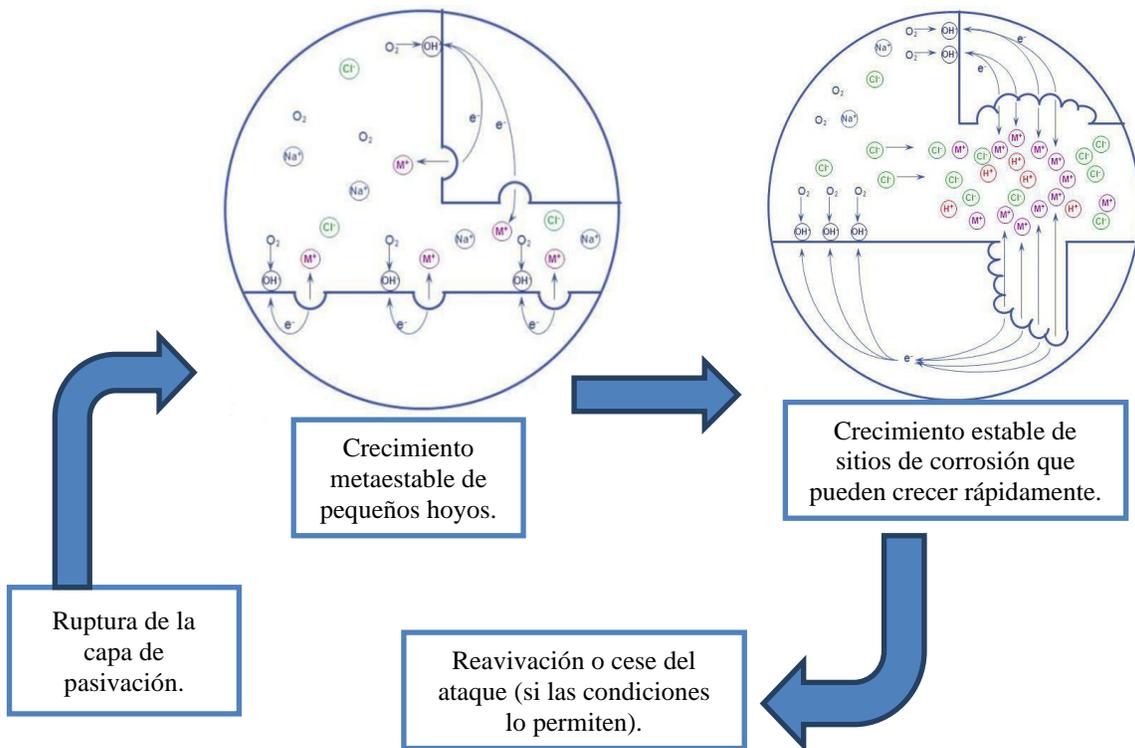


Figura 5. Proceso general de corrosión localizada.

La prueba de pérdida de peso convencional no puede ser utilizada para fines de evaluación o comparación en este tipo de corrosión. En este caso la pérdida de metal es muy pequeña y no indica la profundidad de penetración. La **Figura 6** muestra una picadura capturada en un Microscopio Electrónico de Barrido (MEB).

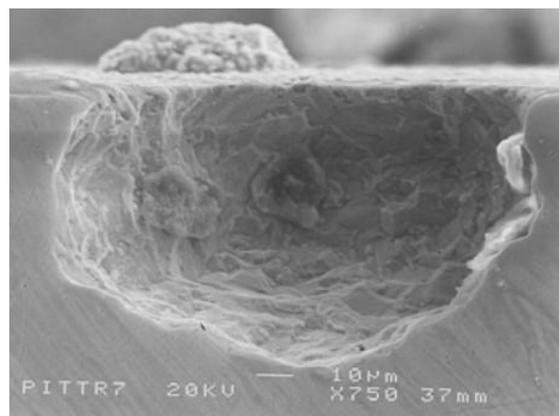


Figura 6. Vista general de la picadura generada en un acero bajo carbono.

Un método para medir la profundidad de la picadura es por medio de la Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) como se puede apreciar en la **Figura 6** y por medio de operaciones matemáticas podríamos calcular su volumen, sin embargo las mediciones de profundidad de la picadura se complican por el hecho de que hay una variación estadística de la picadura en un espécimen expuesto, por ejemplo en la **Figura 7** se muestra un histograma de la profundidad media en relación con el número de picaduras.

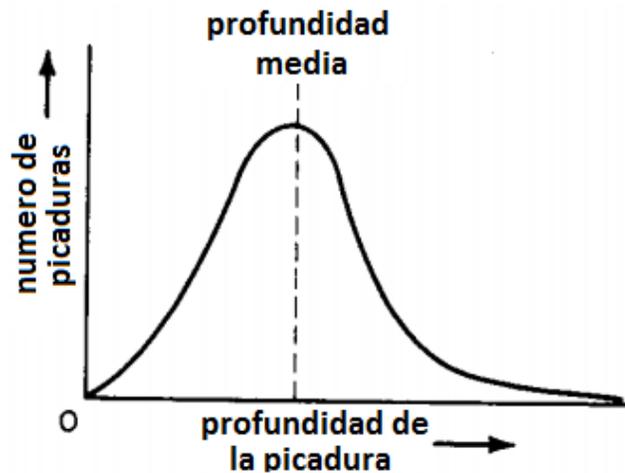


Figura 7. Histograma de profundidad media.

En la **Figura 8** se muestra la probabilidad relativa de encontrar una picadura de una profundidad dada como una función del área expuesta. Por ejemplo, hay una probabilidad de 0,2 (20%) de una picadura con una profundidad de D que ocurre sobre una muestra con una superficie de 1. En un espécimen cuatro veces más grande, es una certeza virtual (probabilidad = 1,0) que una picadura de esta profundidad se produzca, y un 90% de probabilidades de que una picadura dos veces más profundo también aparezca. [5]

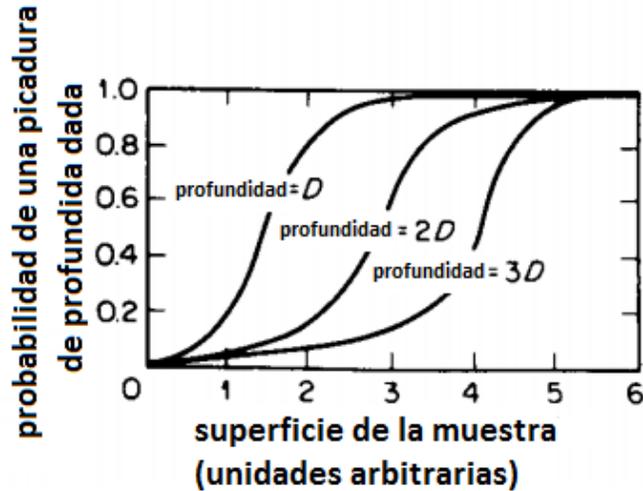


Figura 8. Profundidad de la picadura como una unidad de función del área expuesta.

Esto indica claramente que los intentos para predecir la vida de un componente grande sobre la base de las pruebas realizadas en pequeñas muestras de laboratorio serían imprudentes.

2.5 Daños en líneas de transporte de hidrocarburos por corrosión en México

México cuenta con más de 68,000 km de ductos empleados básicamente para el transporte de hidrocarburos [8]. El análisis histórico de los índices de falla indica que la corrosión externa representa una de las principales causas de falla en este tipo de sistema. La **Figura 9** muestra las causas de incidentes obtenidos del estudio de los datos históricos registrados en los ductos a cargo de PEP (PEMEX Exploración y Producción) de la Región Sur de México de 1995 a 2004. Se observa que, de manera conjunta, la corrosión externa (66% del incidente) y la corrosión interna (14% de incidentes), han provocado aproximadamente el 80% de los incidentes en los ductos operados por PEP [10].

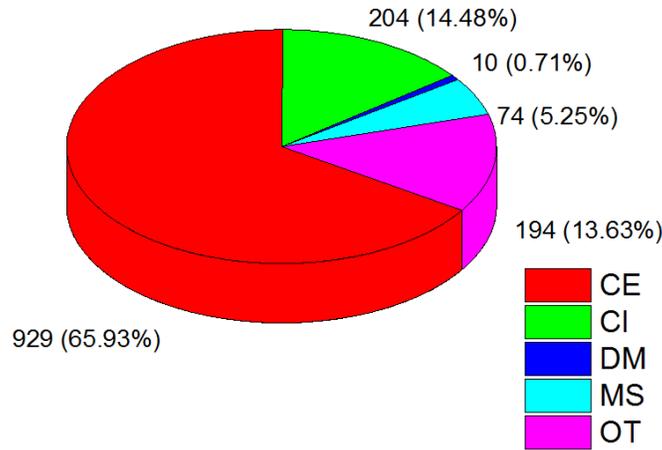


Figura 9. Gráfica de los porcentajes de las diversas causas de incidentes en región sur durante el periodo de 1995 a 2004: CE; Corrosión Externa, CI; Corrosión Interna, DM; Daño Mecánico, MS; Material y Soldadura, y OT; Otras causas [9].

A diferencia de la tendencia que se reporta en el estudio de la Región Sur de México, la corrosión externa en otros sistemas analizados (México región norte y Estados Unidos), no representan la mayor causa de incidentes. Sin embargo, esta tiene una presencia relevante, **Figura (10 (a) y (b))**, respectivamente [9].

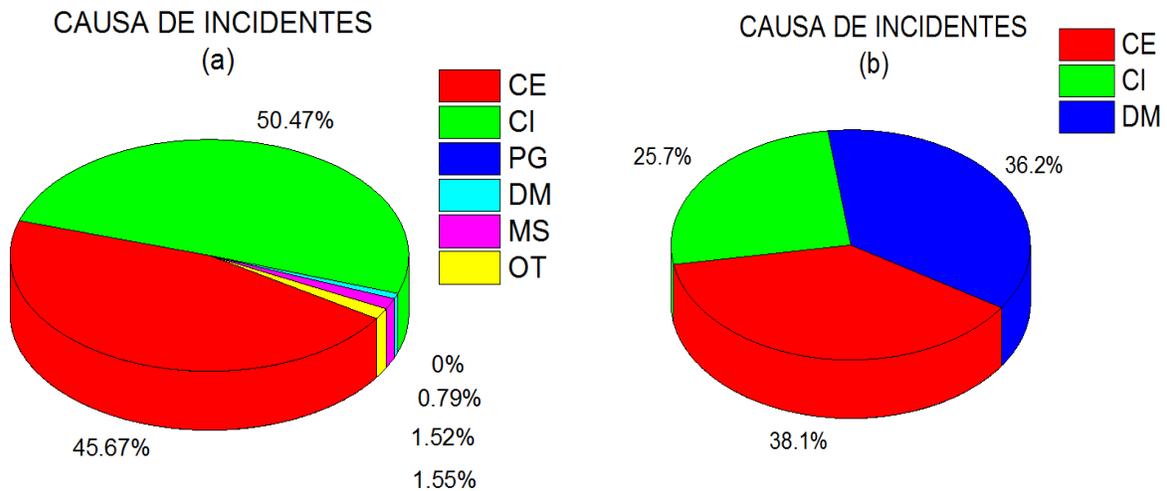


Figura 10. Gráfico de los porcentajes de las diversas causas de incidentes en: (a) región norte México y (b) E.U., durante el periodo de 1995 a 2004: CE; Corrosión Externa, CI; Corrosión Interna, DM; Daño Mecánico, PG; Peligro Geotécnico, MS; Material y Soldadura, y OT; Otras causas [9].

Con respecto al tipo de incidentes reportados en la Región Sur de México de 1995 a 2004 las fugas pequeñas dominan en más del 99% el espectro de todos los incidentes reportados, mientras que las fugas grandes y las rupturas

representan menos del 0.5% del total de los incidentes reportados, **Figura 11.** [9]

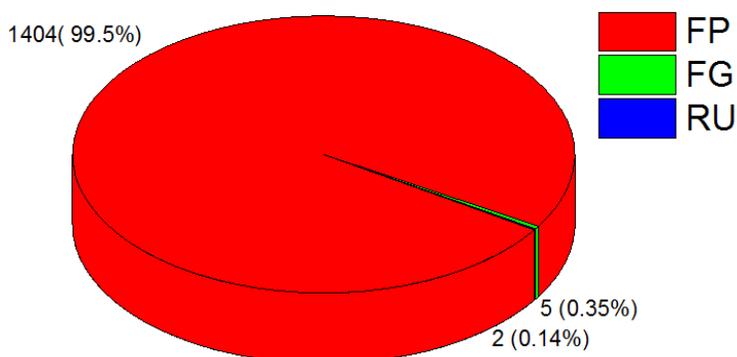


Figura 11. Gráfico del tipo de falla en región sur durante el periodo de 1995 a 2004: FP; Fuga Pequeña, FG; Fuga Grande, y RU; Rupturas [9].

Los gráficos anteriores indican que es de gran importancia el entendimiento y control en este tipo de sistemas sobre el proceso de corrosión.

2.6 Especificación del acero utilizado en tuberías de transporte de hidrocarburos

En México, el acero que se utiliza para las tuberías en las líneas de conducción de hidrocarburos, son fabricados de acuerdo a la especificación API 5L. Esta especificación nos habla principalmente de dos niveles de especificación de producto (product specification level, por sus siglas en ingles PSL1 y PSL2) los cuales son fabricados en un horno abierto o eléctrico. Los grados de acero que entran en esta especificación son: los grados estándar A25, A, B, X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70 y X80; y cualquier grado intermedio. Estos grados de acero son nombrados de acuerdo con su esfuerzo de cedencia en libra por pulgada cuadrada (pound square inches, psi por sus siglas en ingles) y dicho esfuerzo representa la tensión requerida para que se produzca una elongación permanente en la tubería.

Por ejemplo, un acero X46 tiene un esfuerzo de cedencia de 46,000 psi. [10]

La especificación API describe las dimensiones, peso y longitudes para cada tamaño y cada grado de tubo, así como sus tolerancias. En la **Tabla 3** se muestra un resumen con las diferencias entre las especificaciones.

Tabla 3. Resumen de las diferencias entre PSL1 Y PSL2 [10].

Parámetro	PSL1	PSL2
Intervalo de grados	De A25 a X70	De B a X80
Intervalo de tamaño	De 0.405 a 80	De 4.5 a 80
Tipo de extremo del tubo	Plano, roscado, acampanado o acoplamiento especial	Plano
Costura de soldadura	Todos los métodos; soldadura continua limitada a Grado A25	Todos los métodos, excepto soldadura continua y láser
Soldadura eléctrica: frecuencia	No tiene mínimo	100 kHz mínimo
Tratamiento térmico de la soldadura eléctrica	Se requiere para grados mayores que X42	Se requiere para todos los grados
Contenido máximo de carbono para tubos sin costura	0.28% para grados \geq B	0.24%
Contenido máximo de carbono para tubos con costura	0.26% para grados \geq B	0.22%
Contenido máximo de fósforo	0.030% para grados \geq A	0.025%
Contenido máximo de azufre	0.030%	0.015%
Carbono equivalente	Únicamente cuando el comprador lo especifica SR18	Existe un máximo requerido para cada grado
Esfuerzo de cedencia máximo	Ninguno	Hay un máximo para cada grado
Esfuerzo de tensión final	Ninguno	Hay un máximo para cada grado
Resistencia a la fractura	Ninguno	Requerido para todos los grados
Inspección no destructiva	Únicamente cuando el comprador lo especifica SR4	Obligatorio SR4

Parámetro	PSL1	PSL2
Reparación con soldadura del cuerpo del tubo o placa	Permitido	Prohibido
Reparación con soldadura de las costuras	Permitido por acuerdo	Prohibido
Certificación	Certificados cuando es especificado por SR15	Certificados (SR15.1) obligatorios
Trazabilidad	Trazable solo hasta que todas las pruebas hayan sido pasadas, a menos que SR15 sea especificado.	Trazable después de completar las pruebas (SR15.2) obligatorias

Típicamente, una tubería de acero API 5L contiene entre 0.21%wt hasta 0.28%wt de Carbono, a continuación, en la **Tabla 4 y 5** se muestra la composición química para los diferentes grados de aceros divididos en su especificación correspondiente. [10]

Tabla 4. Composición química para PSL1 en porcentaje peso (%wt). [10]

Grado & Clase	Carbono máx. a	Manganeso máx. a	Fósforo		Azufre máx.	Titanio máx.	Otros
			mín.	máx.			
Sin costura							
A25, C1 I	0.21	0.60		0.030	0.030		
A25, C1 II	0.21	0.60	0.045	0.080	0.030		
A	0.22	0.90		0.030	0.030		
B	0.28	1.20		0.030	0.030	0.04	b, c, d
X42	0.28	1.30		0.030	0.030	0.04	c, d
X46, X52, X56	0.28	1.40		0.030	0.030	0.04	c, d
X60	0.28	1.40		0.030	0.030	0.04	c, d
X65, X70	0.28	1.40		0.030	0.030	0.06	c, d
Soldados							
A25, C1I	0.21	0.60		0.030	0.030		
A25, C1II	0.21	0.60	0.045	0.080	0.030		
A	0.22	0.90		0.030	0.030		
B	0.26	1.20		0.030	0.030	0.04	b, c, d
X42	0.26	1.30		0.030	0.030	0.04	c, d
X46, X52, X56	0.26	1.40		0.030	0.030	0.04	c, d

X60	0.26	1.40		0.030	0.030	0.04	c, d
X65	0.26	1.45		0.030	0.030	0.06	c, d
X70	0.26	1.65		0.030	0.030	0.06	c, d

Tabla 5. Composición química para PSL2 en porcentaje peso (%wt). [10]

Grado	Carbono máx. a	Manganeso máx. a	Fósforo máx.	Azufre máx.	Titanio máx.	Otros
Sin costura						
B	0.24	1.20	0.025	0.015	0.04	d, e
X42	0.24	1.30	0.025	0.015	0.04	c, d
X46, X52, X56, X60	0.24	1.40	0.025	0.015	0.04	c, d
X65, X70, X80	0.24	1.40	0.025	0.015	0.06	c, d
Soldados						
B	0.22	1.20	0.025	0.015	0.04	d, e
X42	0.22	1.30	0.025	0.015	0.04	c, d
X46, X52, X56	0.22	1.40	0.025	0.015	0.04	c, d
X60	0.22	1.40	0.025	0.015	0.04	c, d
X65	0.22	1.45	0.025	0.015	0.06	c, d
X70	0.22	1.65	0.025	0.015	0.06	c, d
X80	0.22	1.85	0.025	0.015	0.06	c, d

- a. Por cada reducción de 0.01% por debajo del contenido de carbono máximo especificado, un aumento de 0.05% por encima del manganeso máximo especificado el contenido es permisible: máx. de 1.50% para X42 a X52, máx. de 1.65% para X52 a X70 y hasta 2.00% para X70 y superiores.
- b. La suma del contenido de Columbio (Niobio) y Vanadio no debe exceder el 0.03%.
- c. Columbio (Niobio), Vanadio, o combinaciones a petición del fabricante.
- d. La suma del contenido de Columbio (Niobio), y Titanio no debe exceder el 0.15%
- e. La suma del contenido de Columbio (Niobio) y Vanadio no debe exceder el 0.06%

Las **Tablas 6 y 7** muestran las propiedades mecánicas para cada especificación.

Tabla 6. Propiedades mecánicas para PSL1. [10]

Grado	Resistencia a la cedencia, Mínimo		Esfuerzo de tensión final, mínimo		Elongación en 2 in (50.8 mm), mínimo, %
	psi	MPa	Psi	MPa	
A25	25,000	172	45,000	310	a
A	30,000	207	48,000	331	a
B	35,000	241	60,000	414	a
X42	42,000	290	60,000	414	a
X46	46,000	317	63,000	434	a
X52	52,000	359	66,000	455	a
X56	56,000	386	71,000	490	a
X60	60,000	414	75,000	517	a
X65	65,000	448	77,000	531	a

X70	70,000	483	82,000	565	a
------------	--------	-----	--------	-----	---

Tabla 7. Propiedades mecánicas para PSL2. [10]

Grado	Resistencia a la cedencia				Esfuerzo de tensión final				Elongación en 2 in (50.8 mm), mínimo, %
	mínimo		máximo		mínimo		máximo		
	psi	MPa	Psi	MPa	psi	MPa	psi	MPa	
B	35,000	241	65,000	448	60,000	414	110,000	758	a
X42	42,000	290	72,000	496	60,000	414	110,000	758	a
X46	46,000	317	76,000	524	63,000	434	110,000	758	a
X52	52,000	359	77,000	531	66,000	455	110,000	758	a
X56	56,000	386	79,000	544	71,000	490	110,000	758	a
X60	60,000	414	82,000	565	75,000	517	110,000	758	a
X65	65,000	448	87,000	600	77,000	531	110,000	758	a
X70	70,000	483	90,000	621	82,000	565	110,000	758	a
X80	80,000	552	100,000	690	90,000	621	120,000	827	a

- a. Se determinada con la ecuación contenida en la especificación API 5L, tomando en cuenta el área de prueba y el esfuerzo ultimo de tensión en psi.

La microestructura típica de los aceros API 5L utilizados en esta tesis es de una matriz ferrítica con islas o colonias de perlita laminar bandeada. Como ejemplo en la **Figura 12** se muestra la microestructura de un acero API 5L X52, en una condición de tratamiento térmico normalizado.

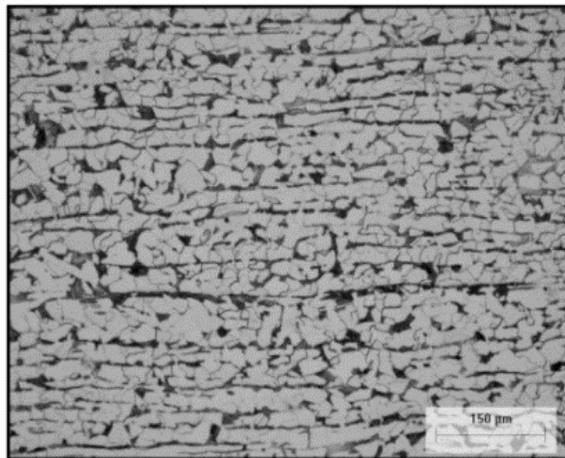


Figura 12. Microestructura de un acero API 5L X52, capturada en campo claro en un microscopio óptico, atacado con nital 3% a 20X aumentos.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Las pruebas realizadas para esta investigación se realizaron en los laboratorios del Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Materiales de la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas (ESIQIE) del IPN, la metodología trabajada para el desarrollo del presente estudio se muestra en la **Figura 13**. El diagrama de metodología experimental (**Figura 13**) muestra la secuencia para realizar la presente tesis, la cual se explica más detalladamente más adelante.

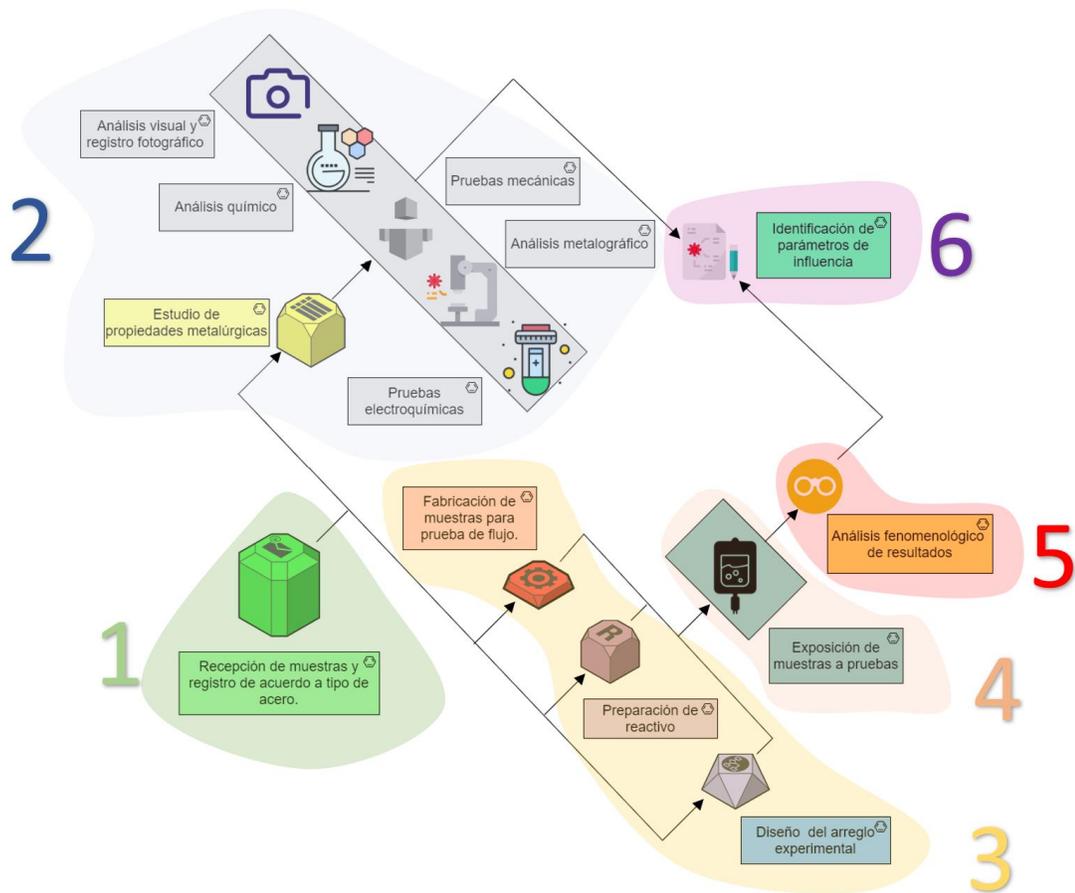


Figura 13. Diagrama de metodología experimental.

3.1 Recepción de muestras

La primera parte de la metodología experimental consistió en un examen visual de las muestras de tubo objeto de estudio, la realización de un registro fotográfico, verificación de dimensiones, así como la identificación proveniente de los fabricantes. Algunos de estas muestras se observan en las **Figuras 14 y 15**.



Figura 14. Condición de recibido y dimensiones del tubo A1.



Figura 15. Condición de recibido y dimensiones del tubo A2.

3.2 Estudio de propiedades metalúrgicas

Se realizó el estudio de las diversas propiedades metalúrgicas a las 37 muestras de acero bajo carbono, las cuales son presentadas más a detalle a continuación.

3.2.1 Pruebas mecánicas

Se realizaron dos análisis diferentes para determinar las propiedades mecánicas de las 37 muestras y clasificarlas de acuerdo a su grado de resistencia mecánica API.

- a. La determinación de dureza Rockwell B, de acuerdo a la norma ASTM E18. [11]

b. Propiedades de tensión uniaxial, de acuerdo con el procedimiento de la norma ASTM E8M [12].

Los equipos y las condiciones de trabajo de ambas pruebas se observan en la **Figura 16**.

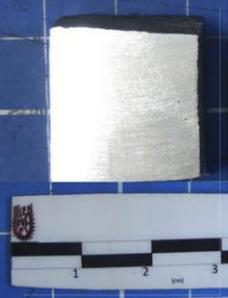
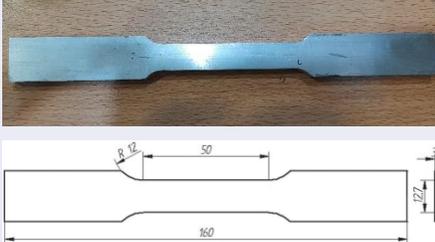
Prueba	Dureza Rockwell	Tensión Uniaxial
Probeta		
	Cupón de 2x2 cm. a lija 80.	Probeta estándar acorde a la norma con un ancho de 127 mm.
Equipo		
	Durómetro Rockwell Wilson	Maquina universal de ensayos Shimadzu Autograph AG-100 KNG
Condiciones de trabajo:	Temperatura: 20°C Identador de punta cilíndrica de Carburo de Tungsteno de 1.16 in.	Temperatura ambiente: 20°C

Figura 16. Condiciones y procedimiento de pruebas mecánicas.

3.2.2 Análisis de composición química

Determinación del contenido de elementos aleantes de los diferentes aceros mediante la espectroscopia de emisión óptica (EEO) según el estándar ASTM E-415 [13].

El etiquetado de muestras se hizo en base al contenido de Carbono, siendo la muestra A1 la de menor contenido y la A37 la muestra con mayor %wt de Carbono. La **figura 17** muestra específicamente las condiciones en las cuales se realizó el análisis de composición química.

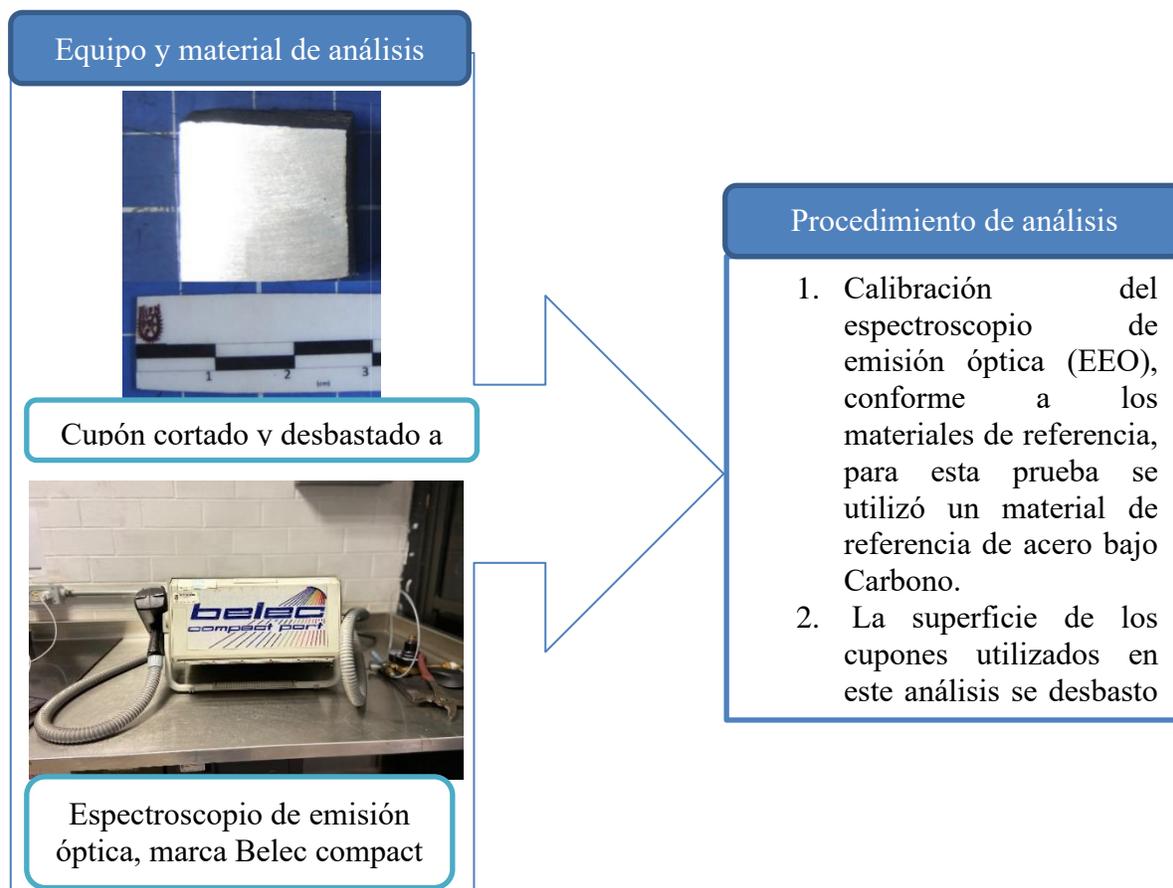


Figure 17. Procedimiento de análisis de composición química.

3.2.3 Análisis metalográfico

Preparación de muestras para análisis metalográfico, llevando a cabo el procedimiento de corte, desbaste y pulido de muestras metalográficas para su observación en el microscopio y estereoscopio de acuerdo con los

procedimientos descritos en las normas: ASTM E-3 [14], ASTM E-112 [15] y ASTM E-1382 [16]. La **Figura 18** muestra los equipos de trabajo y las condiciones utilizadas para la obtención del análisis.

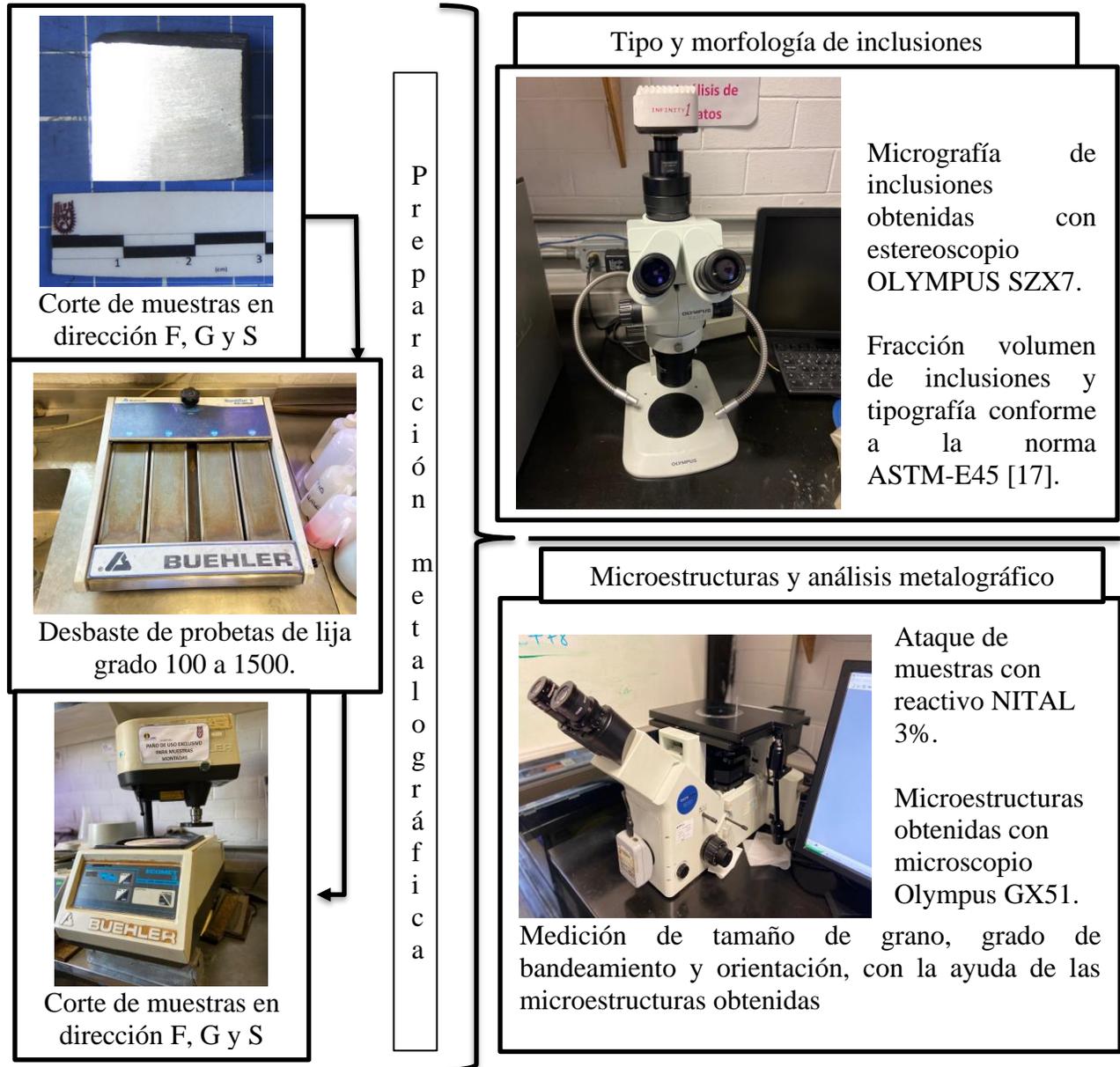


Figura 17. Procedimiento y equipo utilizado en análisis metalográfico.

3.2.4 Pruebas electroquímicas

Determinación de la velocidad de corrosión, potencial de corrosión y densidad de corriente de corrosión de cupones extraídos de las muestras de los aceros objeto de estudio, utilizando la técnica de resistencia a la

polarización, de acuerdo con el procedimiento sugerido en la norma ASTM G-59 [18]. El equipo y las condiciones utilizados para esta prueba se encuentran en la **Figura 19**.



Figura 18. Procedimiento y equipo de prueba electroquímica.

3.3 Prueba de flujo

La preparación de esta experimentación requirió de ciertos pasos que serán explicados a continuación, los cuales, como se puede apreciar en la **Figura 13** se hicieron de forma paralela junto con el estudio de las propiedades metalúrgicas.

3.3.1 Corte y preparación de medias cañas para pruebas de flujo

Los carretes fueron cortados longitudinalmente a media caña y transversalmente fueron cortados a 22 cm, como se muestra en la **Figura 20**.

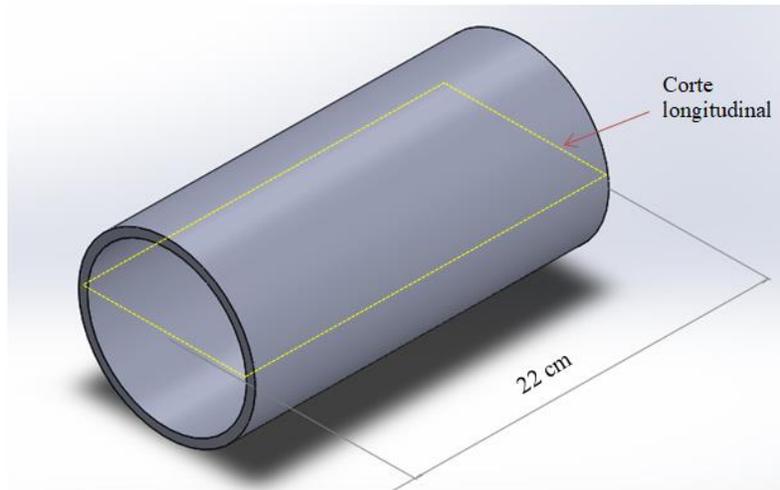


Figura 19. Plano de corte y preparación para cada carrete.

Las medias cañas fueron desbastados hasta una lija grado 600 en la superficie interna del tubo; finalmente, se identificó cada carrete mediante grabado mecánico. La **Figura 21** muestra un modelo de la pieza cortada

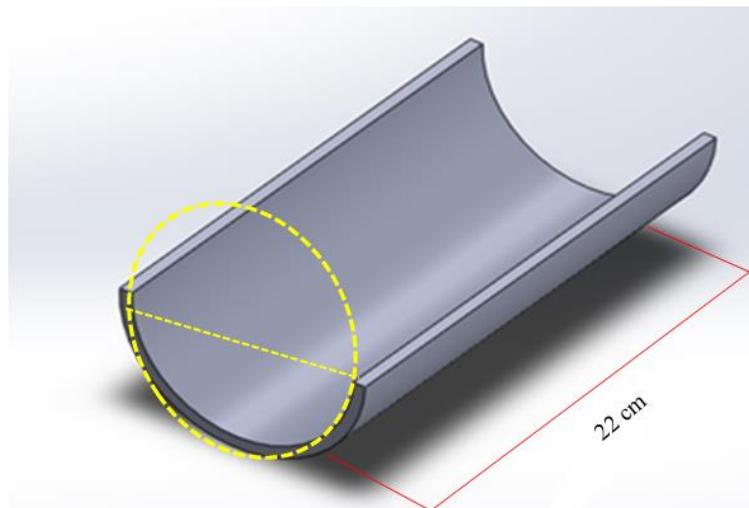


Figura 20. Carrete cortado y desbastado en prueba.

3.3.2 Preparación de solución salina

La solución salina se preparó conforme a la norma NACE 1D-196, en donde se indica la cantidad de reactivos a disolver en gramos por litro de solución. La **Tabla 8** muestra la composición de la solución salina utilizada en la experimentación:

Tabla 8. Reactivos de solución salina NACE 1D-196

Nombre	Especie	Cantidad
Cloruro de Calcio	$CaCl_2 * 2H_2O$	4.4773g
Cloruro de Magnesio	$MgCl_2 * 6H_2O$	2.0610g
Cloruro de Sodio	$NaCl$	106.57g
Agua destilada	H_2O	1lt

Los reactivos fueron pesados mediante una balanza digital y posteriormente disueltos en un matraz aforado y se adicionaron en un garrafón para su almacenamiento y distribución a los contenedores de las probetas.

3.3.3 Exposición de muestras a flujo continuo

Con el fin de estudiar las características cualitativas de la corrosión por flujo salino en acero bajo carbono, se diseñó un arreglo experimental de flujo controlado. Este arreglo fue modelado con ayuda de un software CAD 3D y se muestra en la **Figura 22**.

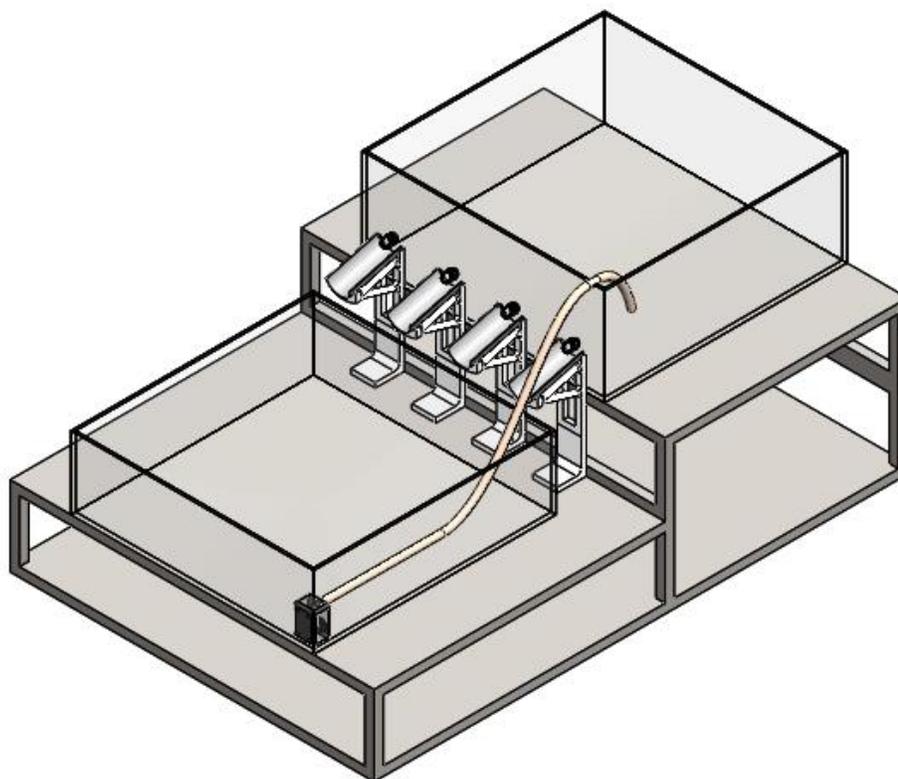


Figura 21. Diseño de arreglo experimental.

Los carretes previamente preparados fueron montados en el arreglo experimental, como se muestra en la **Figura 23**. Se suministró un flujo continuo de solución salina NACE 1D-196 a una tasa de 1.5 l/min. El tiempo de exposición para cada carrete fue de cinco días.

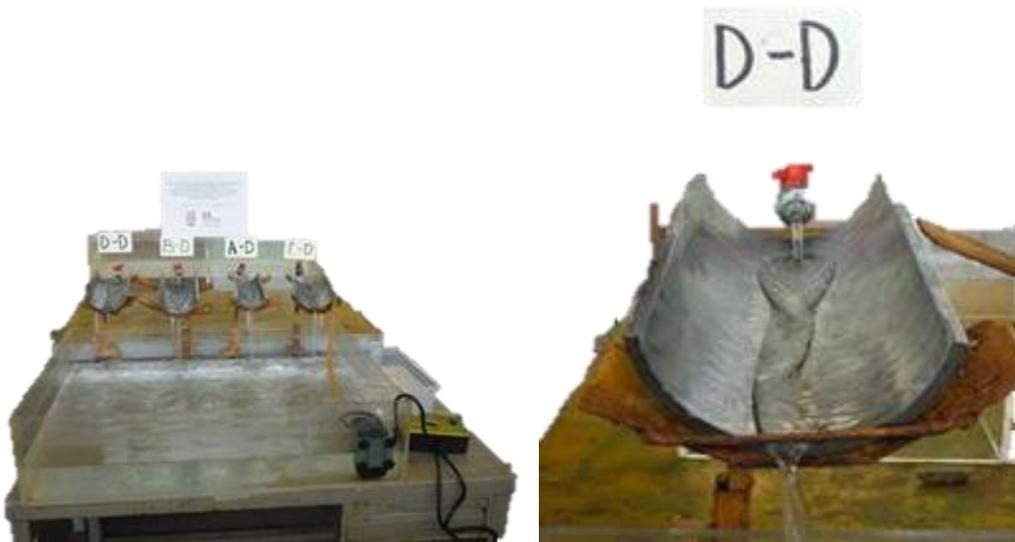


Figura 22. Montaje del diseño experimental para las pruebas de medias cañas expuestas a un flujo continuo de solución salina NACE 1D-196.

3.4 Análisis fenomenológico.

Una vez cumplido el tiempo de exposición, se realizó el registro fotográfico de los carretes expuestos, se determinó el tipo de corrosión y se clasificó de acuerdo con las características observadas de los productos de corrosión. Esta clasificación se realizó principalmente con base en la cantidad de productos de corrosión presentes en las muestras.

3.5 Identificación de parámetros de influencia

Posteriormente, de acuerdo con la clasificación cualitativa de las muestras, se realizaron análisis estadísticos para la identificación de los parámetros de influencia.

Las características metalúrgicas que se utilizaron para estos análisis estadísticos son:

- a. Análisis químico, específicamente con cada uno de los elementos presentes en las muestras.
- b. Porcentaje de microconstituyentes.
- c. Bandeamiento.
- d. Orientación (Omega).
- e. Fracción volumen de inclusiones.
- f. Tamaño de grano ASTM.
- g. Velocidad de corrosión.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1 Propiedades mecánicas

La **Tabla 9** muestra las propiedades mecánicas de resistencia a la tensión uniaxial y dureza en escala Brinell (HB), obtenidas experimentalmente.

Tabla 9. Propiedades mecánicas de muestras obtenidas en el presente estudio.

ID	Esfuerzo a la tensión (psi)	Reducción de área (%)	% de Alargamiento	Esfuerzo de cedencia (psi)	HB aproximado
A1	71,445	78.0	12.6	68,234	159
A2	63,043	67.8	20.7	53,100	150
A3	68,131	75.4	22.0	59,514	159
A4	79,884	73.0	22.2	62,159	172
A5	68,904	77.8	21.9	58,203	150
A6	58,543	67.8	10.6	57,185	135
A7	62,037	75.2	24.0	57,384	144
A8	69,089	79.0	23.9	61,865	156
A9	62,219	71.7	19.9	50,181	137
A10	73,733	76.8	20.9	67,858	200
A11	76,106	64.9	20.4	62,435	162
A12	76,711	72.8	23.6	62,878	159
A13	75,941	73.5	23.1	62,001	165
A14	75,919	73.1	22.3	60,155	156
A15	76,713	73.5	22.9	61,057	153
A16	63,009	63.8	9.6	59,480	141
A17	68,119	48.8	9.8	65,088	147
A18	80,446	71.1	21.8	64,099	165
A19	76,789	71.9	22.3	61,467	165
A20	77,000	72.9	21.7	63,023	162
A21	79,559	74.7	23.3	64,657	172
A22	66,650	75.0	11.3	65,834	150
A23	76,978	71.9	23.2	62,241	165
A24	81,561	70.5	212.0	61,840	169
A25	81,075	73.0	23.3	64,553	169
A26	75,339	65.6	19.9	68,495	165
A27	77,526	72.0	23.3	62,374	169
A28	75,833	63.7	20.5	71,721	165
A29	75,341	56.0	19.6	60,215	156
A30	73,370	57.6	19.0	61,071	165
A31	79,630	65.1	21.6	58,038	156
A32	81,600	64.6	18.9	62,213	159
A33	73,007	60.9	19.4	62,155	159

ID	Esfuerzo a la tensión (psi)	Reducción de área (%)	% de Alargamiento	Esfuerzo de cedencia (psi)	HB aproximado
A34	75,320	54.6	19.1	56,275	147
A35	81,240	67.0	19.5	58,014	162
A36	82,427	55.1	18.9	57,164	169
A37	87,450	64.1	19.0	63,552	172

Las pruebas fueron realizadas en aceros de diferentes grados API 5L. La **Figura 24** muestra la distribución de grados API 5L

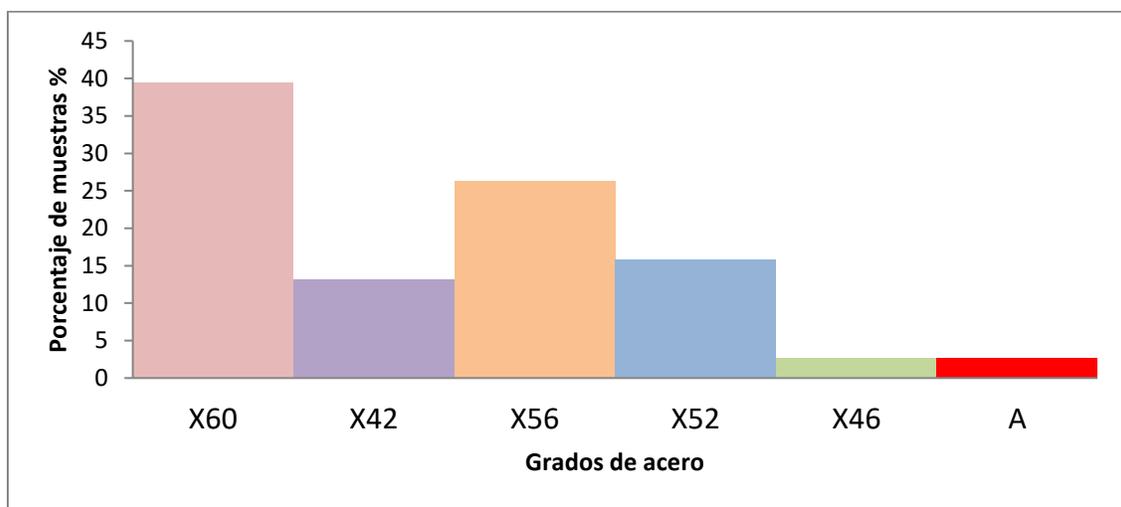


Figura 23. Distribución del grado API de las muestras probadas en el presente estudio.

4.2 Análisis químico

La **Tabla 10** muestra la composición química en porcentaje peso (% wt) de los diferentes aceros ensayados.

Tabla 10. Resultados del análisis químico en % peso.

ID	Grado API	C	Mn	P	S	Si
A1	X56	0.05	0.73	0.02	0.01	0.23
A2	X42	0.06	0.92	0.01	0.05	0.07
A3	X52	0.06	1.32	0.01	0.04	0.10
A4	X60	0.06	0.72	0.02	0.04	0.02
A5	X56	0.08	1.37	0.02	0.03	0.11
A6	A	0.08	0.57	0.00	0.09	0.01
A7	X42	0.08	0.61	0.03	0.04	0.21
A8	X52	0.09	1.27	0.01	0.03	0.14
A9	X42	0.09	0.61	0.01	0.02	0.13
A10	X56	0.10	0.88	0.01	0.02	0.26
A11	X60	0.11	1.00	0.01	0.04	0.22
A12	X60	0.12	1.07	0.02	0.03	0.25
A13	X60	0.12	1.04	0.01	0.03	0.24

ID	Grado API	C	Mn	P	S	Si
A14	X56	0.12	1.00	0.01	0.04	0.21
A15	X60	0.12	1.14	0.02	0.03	0.26
A16	X42	0.12	0.59	0.00	0.05	0.01
A17	X52	0.13	0.61	0.01	0.08	0.09
A18	X60	0.13	1.16	0.02	0.03	0.25
A19	X60	0.13	1.00	0.01	0.02	0.24
A20	X42	0.13	0.98	0.01	0.02	0.23
A21	X60	0.14	1.06	0.01	0.01	0.26
A22	X46	0.14	1.13	0.02	0.04	0.27
A23	X60	0.15	1.02	0.01	0.02	0.25
A24	X60	0.15	1.21	0.00	0.02	0.23
A25	X60	0.17	1.14	0.01	0.02	0.26
A26	X60	0.17	1.15	0.03	0.04	0.30
A27	X60	0.17	1.05	0.01	0.03	0.28
A28	X60	0.17	0.87	0.01	0.03	0.12
A29	X56	0.19	0.91	0.02	0.03	0.15
A30	X56	0.19	0.61	0.00	0.02	0.22
A31	X56	0.19	1.25	0.03	0.04	0.24
A32	X56	0.20	1.15	0.01	0.02	0.24
A33	X56	0.22	0.81	0.01	0.01	0.27
A34	X52	0.23	0.60	0.00	0.03	0.25
A35	X56	0.24	1.18	0.02	0.02	0.25
A36	X52	0.25	0.77	0.03	0.04	0.24
A37	X60	0.298	1.17	0.01	0.02	0.25

La **Figura 25** muestra la distribución de los 37 aceros analizados en función del contenido de carbono.

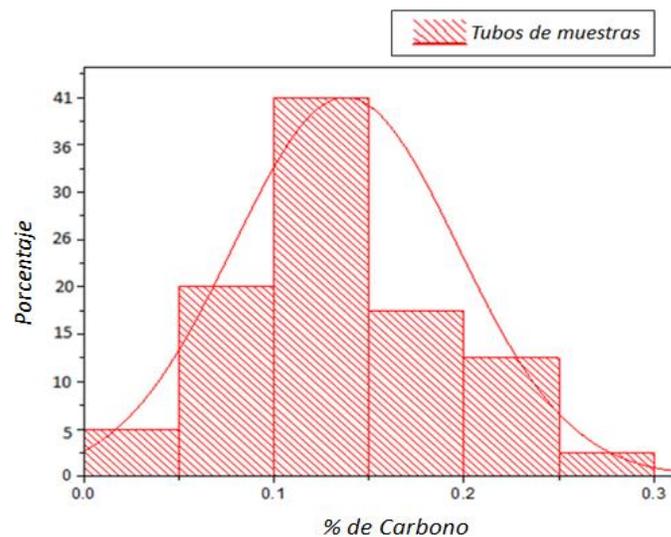
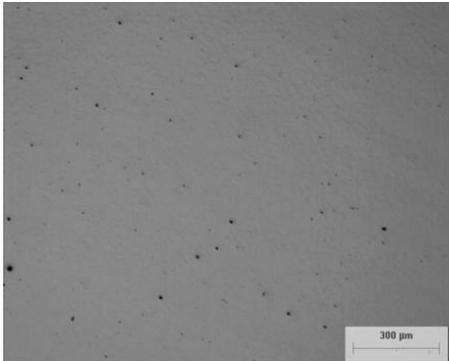
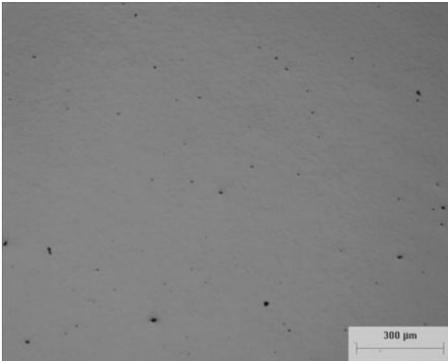
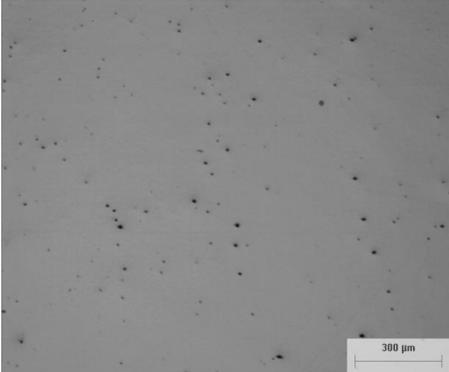
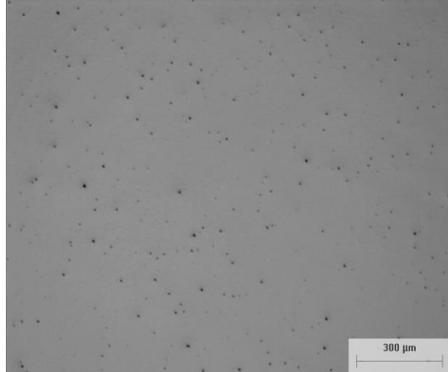


Figura 24. Distribución de contenido de Carbono en las muestras del estudio.

4.3 Caracterización microestructural

La **Tabla 11** muestra de manera representativa el tipo y morfología de inclusiones no metálicas observadas en los diferentes aceros de prueba, para las direcciones longitudinal y transversal. La totalidad de las micrografías de inclusiones no metálicas se presentan en el anexo 1.

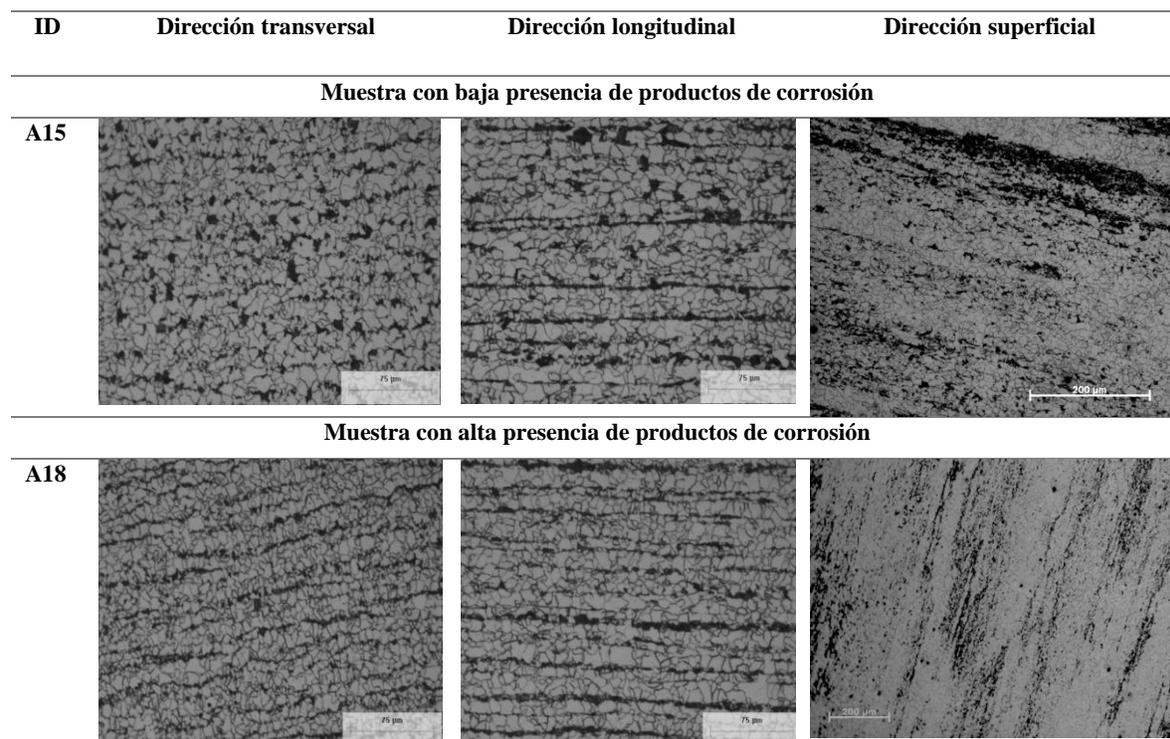
Tabla 11. Micrografía de inclusiones no metálicas presentes en muestras. Microscopio metalográfico campo claro, sin ataque.

ID Muestra campo	Dirección transversal	Dirección longitudinal	Presencia de Productos de corrosión
A15			BAJA
A12			ALTA

La **Tabla 12** muestra las microestructuras representativas observadas en los tubos de acero ensayados, las cuales consisten en una matriz de granos ferríticos con colonias de perlita laminar.

Así mismo, estas microestructuras se clasificaron de acuerdo con la cantidad de productos de corrosión presentes en la superficie expuesta. (La totalidad de las microestructuras obtenidas se encuentran en el anexo 2).

Tabla 12. Microestructura de muestras en secciones transversal, longitudinal y superficial. Microscopio metalográfico campo claro. (Muestra A1 y A2, sin y con depósito de corrosión respectivamente).



Los conteos estereológicos del análisis metalográfico se muestran en la **Tabla 13** para tamaño de grano, porcentaje de microconstituyentes, contenido y tipo de inclusiones no metálicas, grado bandeamiento (A_i) y orientación microestructural (Ω_{12}), para las tres direcciones analizadas.

Tabla 13. Análisis microestructural de muestras.

ID	Ω	A _i	Fracción Volumen de inclusiones		Tipo de inclusión	% Ferrita			% Perlita			Tamaño de grano ASTM
			F	G		F	G	S	F	G	S	
A1	-0.07	0.90	0.05	0.10	D	97.35	97.18	80.84	2.65	2.82	19.15	9.50
A2	0.24	1.50	0.02	0.06	D	95.82	96.74	83.33	4.18	3.26	16.66	10.70
A3	0.09	1.15	0.03	0.03	D	94.18	97.99	89.84	5.82	2.01	10.15	11.00
A4	0.23	1.46	0.07	0.14	D	83.88	84.74	86.61	16.12	15.26	14.38	10.00
A5	0.10	1.16	0.09	0.08	D	96.38	95.06	87.38	3.62	4.94	12.61	10.90
A6	0.06	1.09	0.09	0.24	A	98.09	99.32	75.82	1.91	0.68	24.17	8.20
A7	-0.14	0.81	0.16	0.16	D	95.37	94.68	85.06	4.63	5.32	14.93	10.00
A8	0.07	1.12	0.09	0.06	D	96.73	96.98	88.21	3.27	3.02	11.78	11.00
A9	0.00	1.00	0.10	0.14	D	93.79	95.33	84.53	6.21	4.67	15.46	9.00

ID	Ω	AI	Fracción Volumen de inclusiones		Tipo de inclusión	% Ferrita			% Perlita			Tamaño de grano ASTM
			F	G		F	G	S	F	G	S	
A10	0.20	1.38	0.16	0.16	D	94.88	94.02	91.06	5.12	5.98	8.93	11.60
A11	0.18	1.35	0.06	0.08	D	91.73	92.23	89.01	8.27	7.77	10.99	11.50
A12	0.67	4.23	0.09	0.13	D	82.76	86.03	88.11	17.24	13.97	11.88	11.00
A13	0.51	2.66	0.11	0.13	D	88.04	86.70	85.79	11.96	13.30	14.20	11.30
A14	0.34	1.80	0.04	0.06	D	86.79	88.09	87.38	13.21	11.91	12.61	11.40
A15	0.53	2.76	0.06	0.05	D	88.13	83.42	86.01	11.87	16.58	13.99	11.00
A16	-0.04	0.94	0.07	0.08	A	89.63	95.46	83.68	10.37	4.54	16.31	8.50
A17	0.26	1.56	0.08	0.29	A	90.63	92.30	66.71	9.37	7.70	33.28	8.70
A18	0.21	1.42	0.20	0.25	D	88.75	92.35	85.95	11.25	7.65	14.04	11.00
A19	0.42	2.15	0.07	0.07	D	90.81	80.55	85.65	9.19	19.55	14.34	11.20
A20	0.55	2.93	0.20	0.20	D	91.79	92.02	82.78	8.21	7.98	17.21	11.00
A21	0.46	2.32	0.07	0.11	D	92.21	92.77	88.96	7.79	7.23	11.03	11.00
A22	-0.68	0.36	0.01	0.01	D	98.39	99.58	86.66	1.61	0.42	13.33	10.00
A23	0.53	2.76	0.07	0.10	D	93.46	94.80	0.00	6.54	5.20	0.00	11.30
A24	0.38	1.95	0.17	0.22	D	88.27	93.49	81.22	11.73	6.51	18.77	11.00
A25	0.66	4.07	0.17	0.15	D	89.02	90.47	85.24	10.98	9.53	14.75	11.50
A26	0.59	3.26	0.29	0.31	D	89.82	88.53	79.41	10.18	11.47	20.58	11.00
A27	0.46	2.32	0.03	0.06	D	87.30	88.11	88.91	12.70	11.89	11.08	11.60
A28	0.75	5.79	0.20	0.14	D	84.93	90.78	89.31	15.07	9.22	10.68	11.00
A29	0.70	4.61	0.16	0.18	D	86.12	85.77	84.40	13.88	14.23	13.59	11.00
A30	0.14	1.25	0.08	0.08	D	79.81	81.08	72.23	20.19	18.92	27.76	7.80
A31	0.68	4.37	0.20	0.07	D	83.08	83.16	75.67	16.92	16.84	24.32	10.00
A32	0.74	5.48	0.04	0.04	D	76.73	70.75	75.05	23.27	29.25	24.94	9.80
A33	0.37	1.94	0.02	0.13	D	85.83	87.57	80.55	14.17	12.43	19.44	9.90
A34	0.18	1.33	0.08	0.10	A	76.10	79.04	76.59	23.90	20.96	23.40	9.50
A35	0.74	5.52	0.06	0.04	D	76.61	77.85	70.62	23.39	22.15	29.37	9.80
A36	0.24	1.49	0.14	0.14	A	79.74	81.09	80.94	20.26	18.91	19.05	10.00
A37	0.70	4.71	0.09	0.14	D	68.28	69.20	69.79	31.72	30.80	30.20	10.30

Nota: Ω_{12} : grado de orientación, este valor varía de cero (completamente aleatorio) a uno (completamente orientado).

4.4 Pruebas electroquímicas

La **Tabla 14** muestra los resultados obtenidos de la prueba de resistencia a la corrosión en los diferentes aceros.

Tabla 14. Caracterización electroquímica.

ID	E_{corr} (m V)	i_{corr} (μ A)	R_p (Ω)	V.C. (mmpy)
A1	-555.42	10.990	1980.25	0.067
A2	-538.04	11.032	1971.45	0.092
A3	-549.73	7.353	2970.01	0.043
A4	-595.10	10.948	2018.69	0.068
A5	-555.80	9.743	2297.80	0.062
A6	-554.34	11.622	1872.64	0.054
A7	-616.58	7.817	2781.46	0.067
A8	-586.15	9.455	2308.26	0.082
A9	MATERIAL INSUFICIENTE			
A10	-632.29	14.702	1484.72	0.099
A11	-569.58	5.599	3893.27	0.039
A12	-627.05	6.237	3496.65	0.054
A13	-601.37	7.966	2743.01	0.054
A14	-620.21	15.136	1436.64	0.075
A15	-595.83	7.308	3034.58	0.063
A16	-557.63	15.508	1403.97	0.083
A17	-594.53	8.173	2753.37	0.052
A18	-625.75	7.083	3092.35	0.060
A19	MATERIAL INSUFICIENTE			
A20	MATERIAL INSUFICIENTE			
A21	-597.94	10.644	2043.00	0.079
A22	-566.24	8.264	2633.82	0.054
A23	-613.80	9.959	2185.14	0.086
A24	-605.21	7.657	2845.02	0.051
A25	-590.71	6.453	3371.75	0.043
A26	-603.25	6.764	3260.82	0.058
A27	-608.12	9.372	2322.50	0.049
A28	-608.12	9.372	2322.50	0.049
A29	-606.43	11.324	1920.59	0.097
A30	-558.61	10.468	2083.63	0.061
A31	-590.58	10.960	1983.72	0.066
A32	-598.18	10.528	2075.18	0.081
A33	-620.41	8.816	2466.68	0.068
A34	-577.44	8.893	2447.11	0.050
A35	-624.13	9.759	2229.62	0.064
A36	-590.97	16.012	1357.82	0.087
A37	-600.31	6.239	3942.93	0.049

4.5 Prueba de flujo

Al analizarse los resultados de las pruebas de flujo se observó el desarrollo de corrosión uniforme en todas las muestras, y se realizó una clasificación de forma visual de acuerdo a las variaciones cualitativas de los productos de corrosión desarrollados en los distintos aceros, identificándolos como: “*alta presencia de productos de corrosión*” y “*baja presencia de productos de corrosión*” refiriéndose a la cantidad de productos de corrosión observados en la superficie de las muestras. Las **Figuras 26 a 30** muestran la apariencia de las superficies de acero expuestas, después de la prueba de flujo.

MUESTRA A15

BAJA PRESENCIA DE PRODUCTOS DE CORROSIÓN ADHERIDOS



MUESTRA A10

ALTA PRESENCIA DE PRODUCTOS DE CORROSIÓN ADHERIDOS



Figura 25. Apariencia de las superficies después de las pruebas de inmersión en especímenes tomados de tubos sin productos de corrosión adheridos y con productos de corrosión respectivamente

MUESTRA A18

BAJA PRESENCIA DE PRODUCTOS DE CORROSIÓN ADHERIDOS



MUESTRA A31

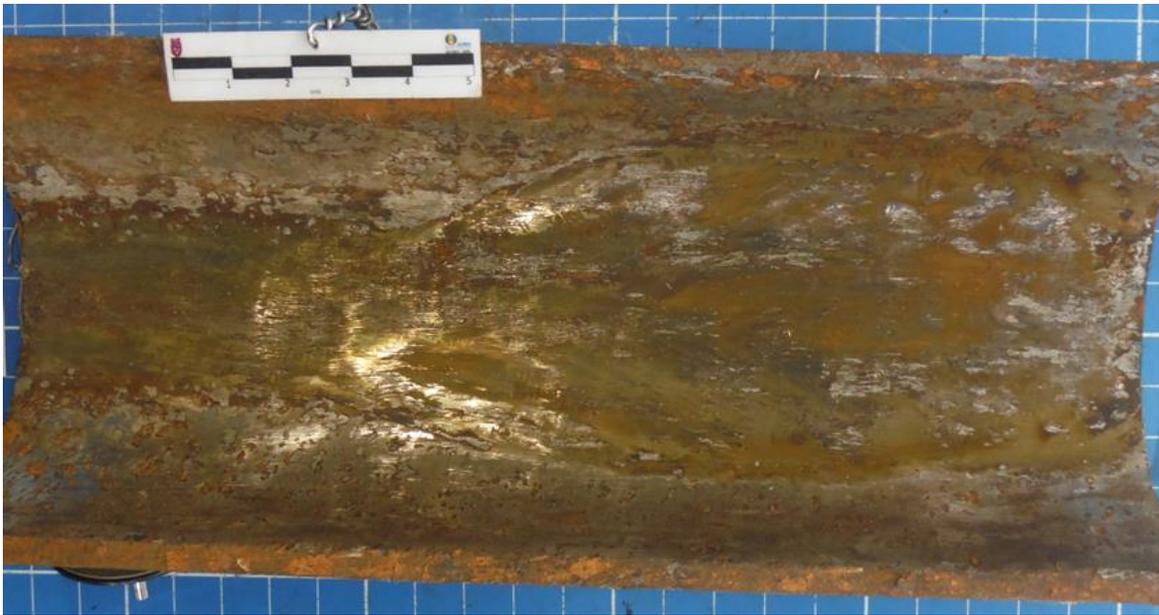
ALTA PRESENCIA DE PRODUCTOS DE CORROSIÓN ADHERIDOS



Figura 26. Apariencia de las superficies después de las pruebas de inmersión en especímenes tomados de tubos sin productos de corrosión adheridos y con productos de corrosión respectivamente.

MUESTRA A26

BAJA PRESENCIA DE PRODUCTOS DE CORROSIÓN ADHERIDOS



MUESTRA A23

ALTA PRESENCIA DE PRODUCTOS DE CORROSIÓN ADHERIDOS

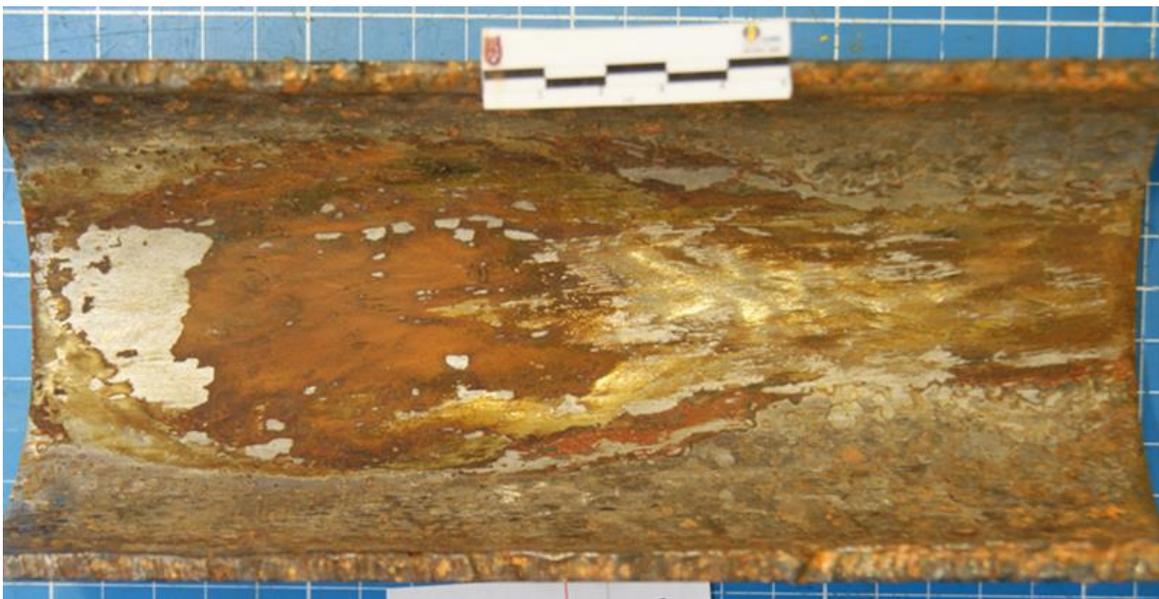
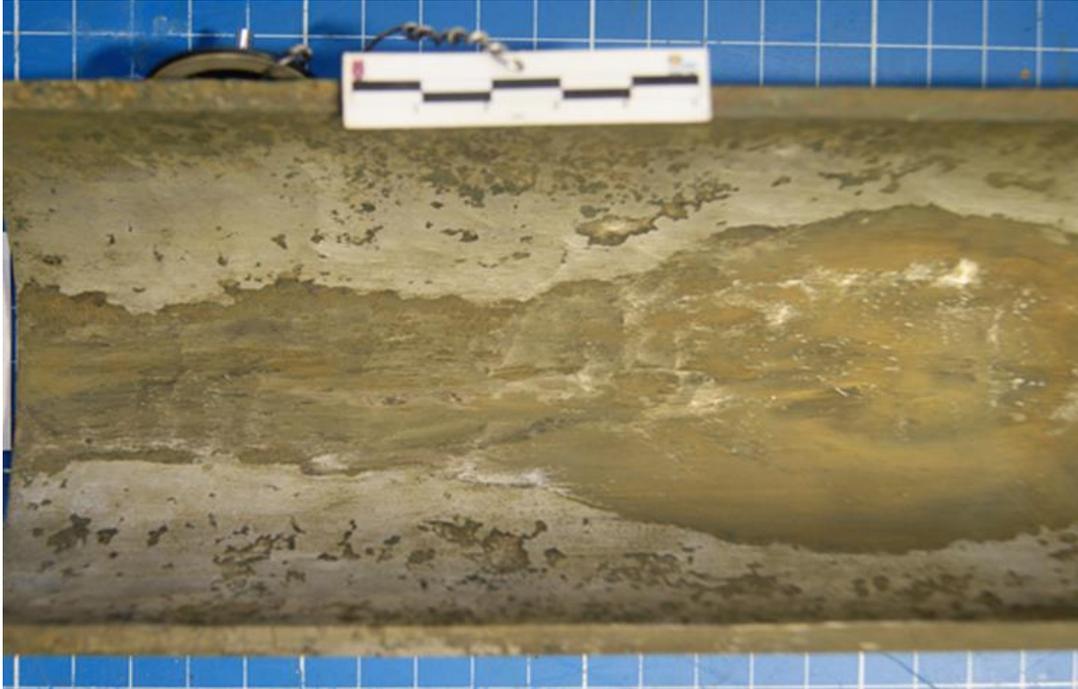


Figura 27. Apariencia de las superficies después de las pruebas de inmersión en especímenes tomados de tubos sin productos de corrosión adheridos y con productos de corrosión respectivamente.

MUESTRA A25

BAJA PRESENCIA DE PRODUCTOS DE CORROSIÓN ADHERIDOS



MUESTRA A1

ALTA PRESENCIA DE PRODUCTOS DE CORROSIÓN ADHERIDOS

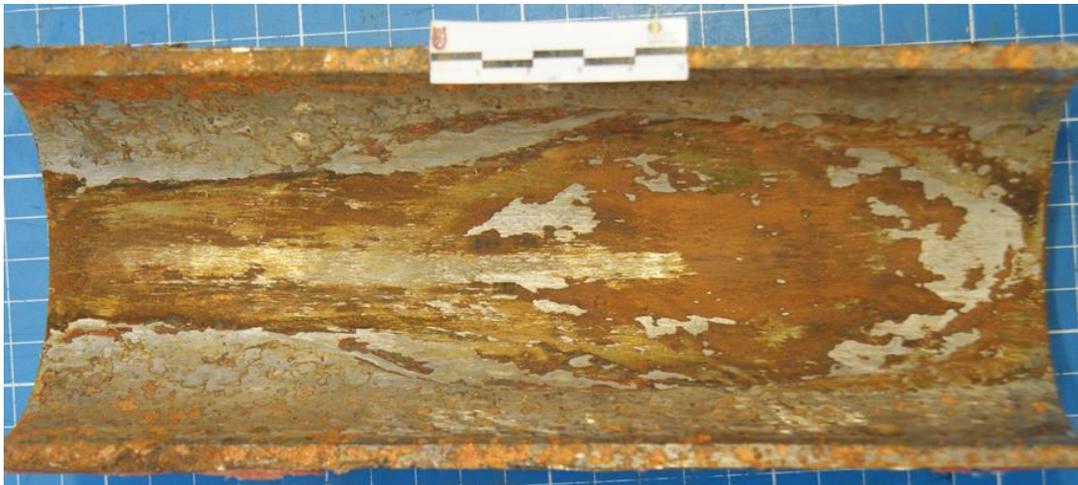


Figura 28. Apariencia de las superficies después de las pruebas de inmersión en especímenes tomados de tubos sin productos de corrosión adheridos y con productos de corrosión respectivamente.

MUESTRA A3

BAJA PRESENCIA DE PRODUCTOS DE CORROSIÓN ADHERIDOS



MUESTRA A30

ALTA PRESENCIA DE PRODUCTOS DE CORROSIÓN ADHERIDOS



Figura 29. Apariencia de las superficies después de las pruebas de inmersión en especímenes tomados de tubos sin productos de corrosión adheridos y con productos de corrosión respectivamente.

4.6 Pruebas de inmersión y flujo dinámico

La **Tabla 15** muestra los resultados de las pruebas de flujo dinámico, describiendo el tipo de daño generado y las características de la capa de pasivación de óxido metálico desarrolladas durante la experimentación en laboratorio; así mismo, estos resultados se comparan con el daño generado durante el servicio de cada uno de los tubos de acero analizados.

Tabla 15. Comparación de los patrones con respecto al daño en campo y laboratorio.

ID Muestra campo	Patrón (daño en campo)	Pruebas de laboratorio	COINCIDE	Presencia de productos de corrosión
A1	Corrosión Localizada	Corrosión uniforme		Alta
A2	Corrosión Localizada	Corrosión uniforme		Alta
A3	Corrosión Localizada	Corrosión uniforme		Baja
A4	Corrosión Localizada	Corrosión uniforme		Baja
A5	Corrosión Localizada	Corrosión uniforme		Alta
A6	Corrosión uniforme	Corrosión uniforme		Baja
A7	Corrosión Localizada	Corrosión uniforme		Baja
A8	Corrosión Localizada	Corrosión uniforme		Baja
A9	Corrosión Localizada	Corrosión uniforme		Alta
A10	Corrosión Localizada	Corrosión uniforme		Alta
A11	Corrosión Localizada	Corrosión uniforme		Alta
A12	Corrosión uniforme	Corrosión uniforme		Alta
A13	Corrosión uniforme	Corrosión uniforme		Alta
A14	Corrosión Localizada	Corrosión uniforme		Alta
A15	Corrosión uniforme	Corrosión uniforme		Baja
A16	Corrosión uniforme	Corrosión uniforme		Alta
A17	Corrosión Localizada	Corrosión uniforme		Alta
A18	Corrosión uniforme	Corrosión uniforme		Baja
A19	Corrosión Localizada	Corrosión uniforme		Alta
A20	Corrosión Localizada	Corrosión uniforme		Baja
A21	Corrosión uniforme	Corrosión uniforme		Alta
A22	Corrosión Localizada	Corrosión uniforme		Baja
A23	Corrosión uniforme	Corrosión uniforme		Alta
A24	Corrosión Localizada	Corrosión uniforme		Alta
A25	Corrosión Localizada	Corrosión uniforme		Alta
A26	Corrosión uniforme	Corrosión uniforme		Baja
A27	Corrosión uniforme	Corrosión uniforme		Baja
A28	Corrosión uniforme	Corrosión uniforme		Baja
A29	Corrosión uniforme	Corrosión uniforme		Alta

ID Muestra campo	Patrón (daño en campo)	Pruebas de laboratorio	COINCIDE	Presencia de productos de corrosión
A30	Corrosión uniforme	Corrosión uniforme		Alta
A31	Corrosión uniforme	Corrosión uniforme		Alta
A32	Corrosión uniforme	Corrosión uniforme		Baja
A33	Corrosión uniforme	Corrosión uniforme		Baja
A34	Corrosión uniforme	Corrosión uniforme		Baja
A35	Corrosión uniforme	Corrosión uniforme		Baja
A36	Corrosión uniforme	Corrosión uniforme		Baja
A37	Corrosión uniforme	Corrosión uniforme		Baja

Esta tesis es parte de una investigación más extensa, en la cual se desarrolló una primera tesis, que utilizó las pruebas de inmersión para su experimentación [19]. A continuación, la **Tabla 16**, muestra la comparación entre los resultados obtenidos de la prueba de flujo dinámico y las pruebas de inmersión, realizadas a los aceros de estudio.

Tabla 16. Comparación entre las pruebas realizadas en laboratorio (inmersión y pruebas de flujo dinámico).

ID Muestra de Campo	PATRÓN (DAÑO EN PRUEBA DE INMERSIÓN)	PATRÓN (DAÑO EN PRUEBA DE FLUJO DINÁMICO)	COINCIDE
A1	Corrosión Uniforme	Corrosión Uniforme	
A2	Corrosión Localizada	Corrosión Uniforme	
A3	Corrosión Localizada	Corrosión Uniforme	
A4	Corrosión Localizada	Corrosión Uniforme	
A5	Corrosión Localizada	Corrosión Uniforme	
A6	Corrosión Uniforme	Corrosión Uniforme	
A7	Corrosión Localizada	Corrosión Uniforme	
A8	Corrosión Localizada	Corrosión Uniforme	
A9	MATERIAL INSUFICIENTE	Corrosión Uniforme	
A10	Corrosión Localizada	Corrosión Uniforme	
A11	Corrosión Uniforme	Corrosión Uniforme	
A12	Corrosión Uniforme	Corrosión Uniforme	
A13	Corrosión Uniforme	Corrosión Uniforme	
A14	Corrosión Localizada	Corrosión Uniforme	
A15	Corrosión Uniforme	Corrosión Uniforme	
A16	Corrosión Uniforme	Corrosión Uniforme	
A17	Corrosión Localizada	Corrosión Uniforme	

ID Muestra de Campo	PATRÓN (DAÑO EN PRUEBA DE INMERSIÓN)	PATRÓN (DAÑO EN PRUEBA DE FLUJO DINÁMICO)	COINCIDE
A18	Corrosión Uniforme	Corrosión Uniforme	
A19	MATERIAL INSUFICIENTE	Corrosión Uniforme	
A20	Corrosión Localizada	Corrosión Uniforme	
A21	Corrosión Uniforme	Corrosión Uniforme	
A22	Corrosión Localizada	Corrosión Uniforme	
A23	Corrosión Uniforme	Corrosión Uniforme	
A24	Corrosión Localizada	Corrosión Uniforme	
A25	Corrosión Localizada	Corrosión Uniforme	
A26	Corrosión Uniforme	Corrosión Uniforme	
A27	Corrosión Uniforme	Corrosión Uniforme	
A28	Corrosión Uniforme	Corrosión Uniforme	
A29	Corrosión Localizada	Corrosión Uniforme	
A30	MATERIAL INSUFICIENTE	Corrosión Uniforme	
A31	Corrosión Uniforme	Corrosión Uniforme	
A32	Corrosión Uniforme	Corrosión Uniforme	
A33	Corrosión Uniforme	Corrosión Uniforme	
A34	Corrosión Uniforme	Corrosión Uniforme	
A35	Corrosión Uniforme	Corrosión Uniforme	
A36	Corrosión Uniforme	Corrosión Uniforme	
A37	Corrosión Localizada	Corrosión Uniforme	

CAPÍTULO 5. ANALISIS DE RESULTADOS

5.1 Caracterización de muestras

En este trabajo de investigación se analizaron 37 tubos de acero API 5L, con seis distintos grados de tubería, dentro de los que se encuentran: X42, X46, X52, X56, X60 y A. Todos los aceros analizados cumplen en lo general con los requerimientos del estándar API-5L. La **Figura 24** muestra la distribución normal de los distintos grados de acero API encontrados en la muestra.

Al realizar una inspección superficial a las muestras recibidas se observó que este material fue retirado de servicio, al detectarse defectos en la superficie interna de la tubería, como rayaduras, cavitaciones y pérdida del metal.

5.2 Análisis de caracterización microestructural

Las **Figuras 31 y 32** muestran un histograma de la distribución del contenido de inclusiones no metálicas, de las secciones transversal y longitudinal, en función de la cantidad de depósitos presentes en la superficie expuesta.

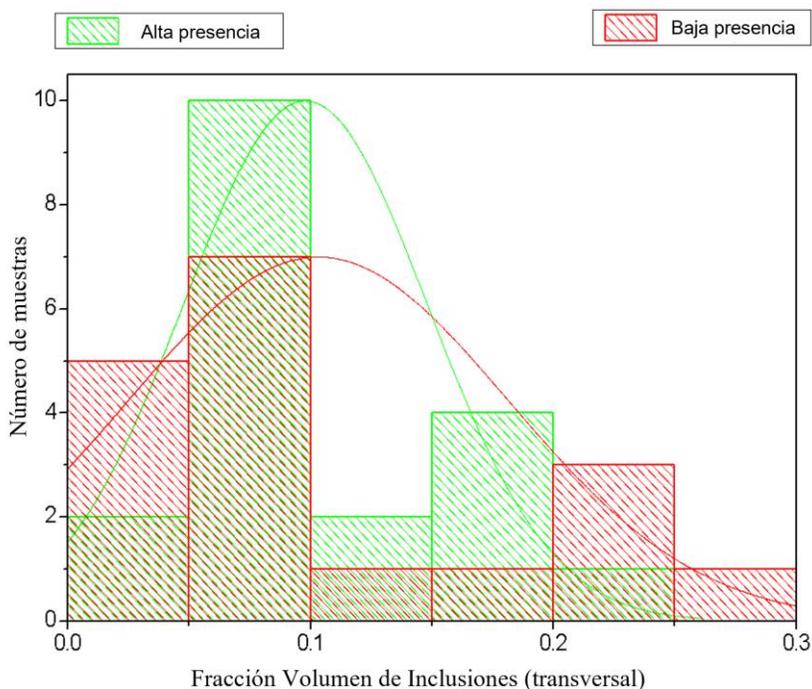


Figura 30. Histograma de Porcentaje de inclusiones en dirección transversal (G) y productos de corrosión.

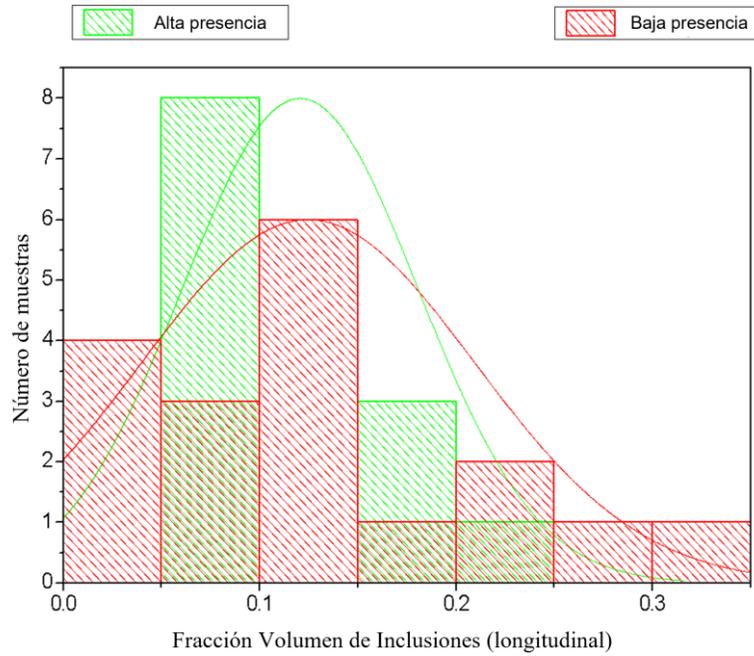


Figura 31. Histograma de Porcentaje de inclusiones en dirección longitudinal (F) y productos de corrosión.

La distribución de frecuencia del contenido de ferrita se presenta en las **Figuras 33, 34 y 35**, para las secciones longitudinal, transversal y superficial interna, respectivamente. Estos resultados se presentan en función de los depósitos de corrosión formados durante las pruebas de flujo.

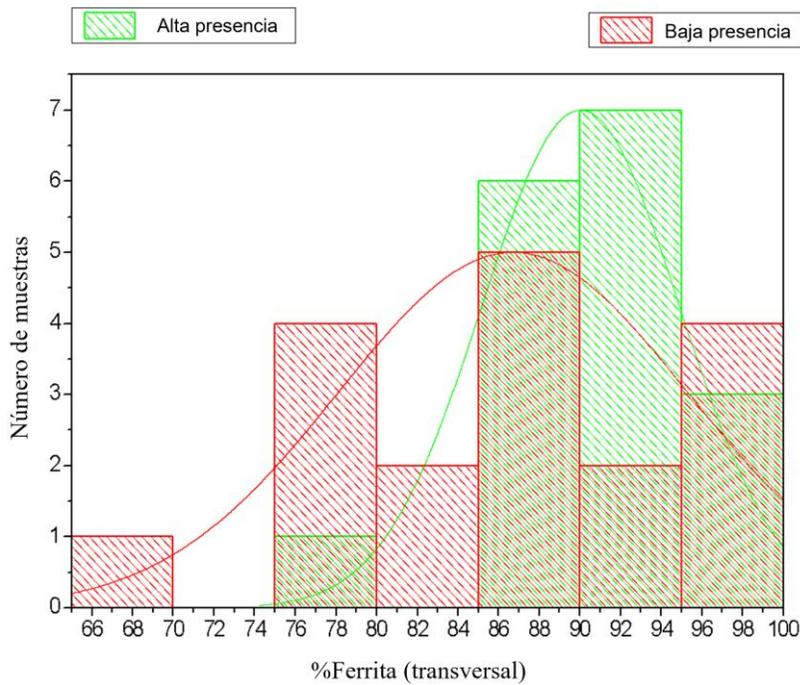


Figura 32. Histograma de Porcentaje de Ferrita en dirección transversal (G) y productos de corrosión.

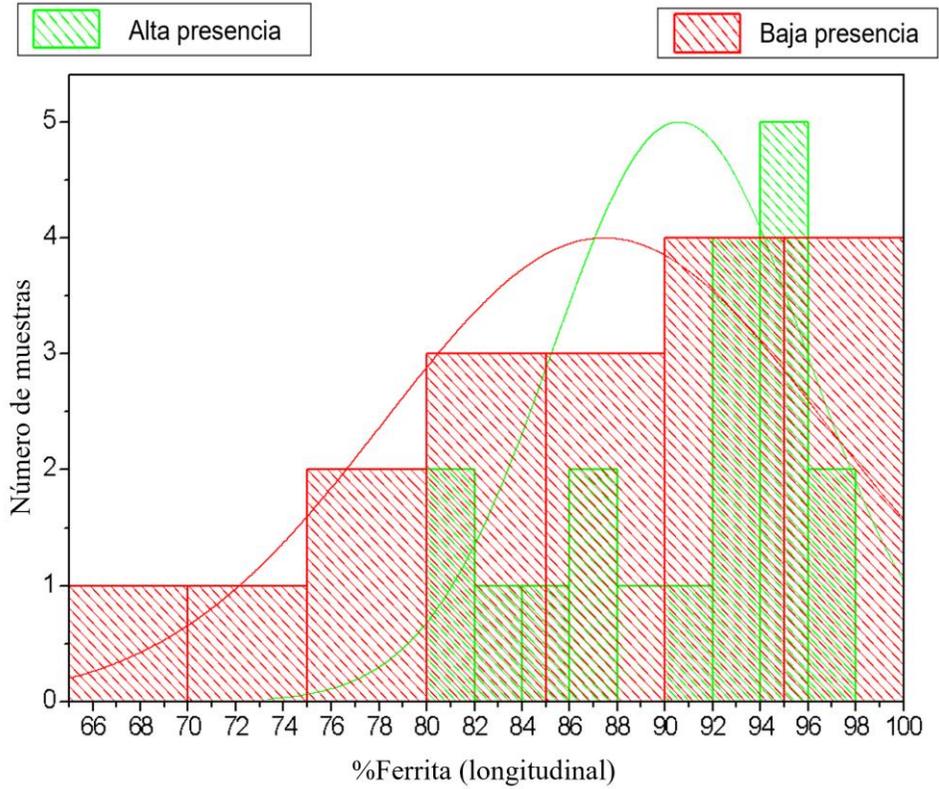


Figura 33. Histograma de Porcentaje de Ferrita en dirección longitudinal (F) y productos de corrosión

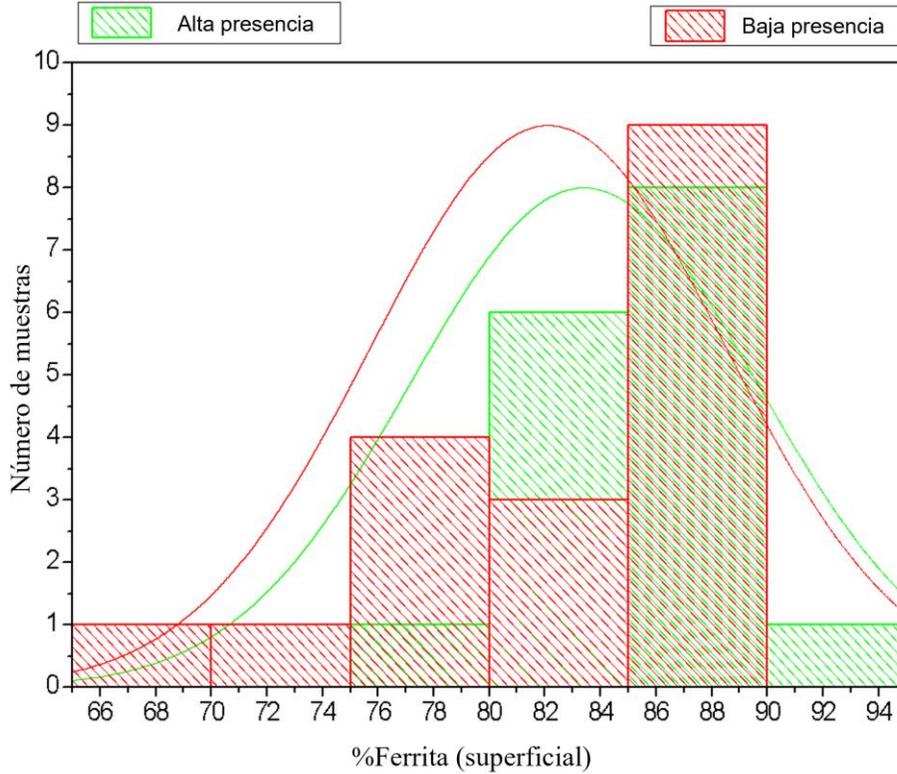


Figura 34. Histograma de Porcentaje de Ferrita en dirección superficial (S) y productos de corrosión

La **Figura 36 y 37** muestra la distribución de frecuencia pertinentes a la orientación microestructural y el grado de bandeamiento respectivamente, en función de las dos clasificaciones referentes a la cantidad de productos de corrosión presentes en la superficie.

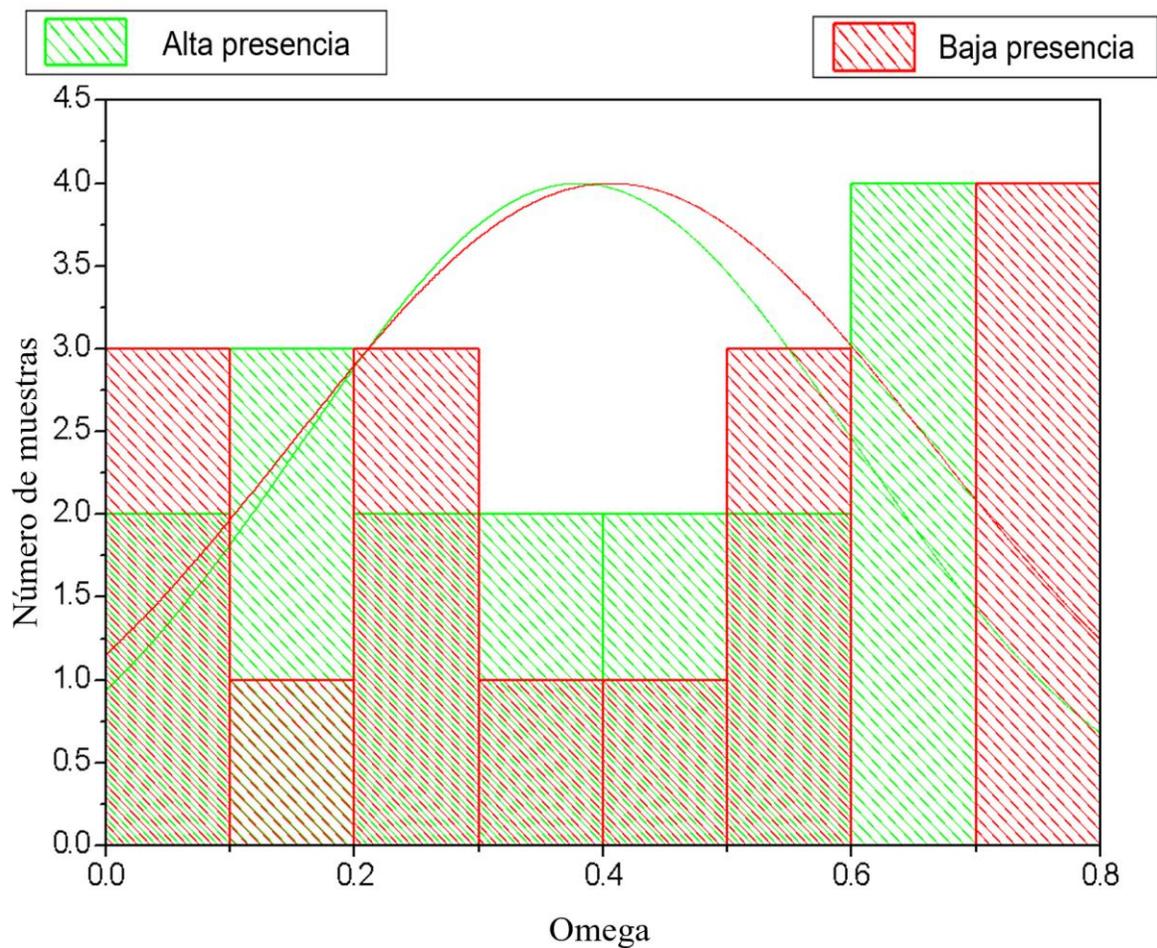


Figura 35. Histograma del parámetro de orientación microestructural (Ω) y productos de corrosión.

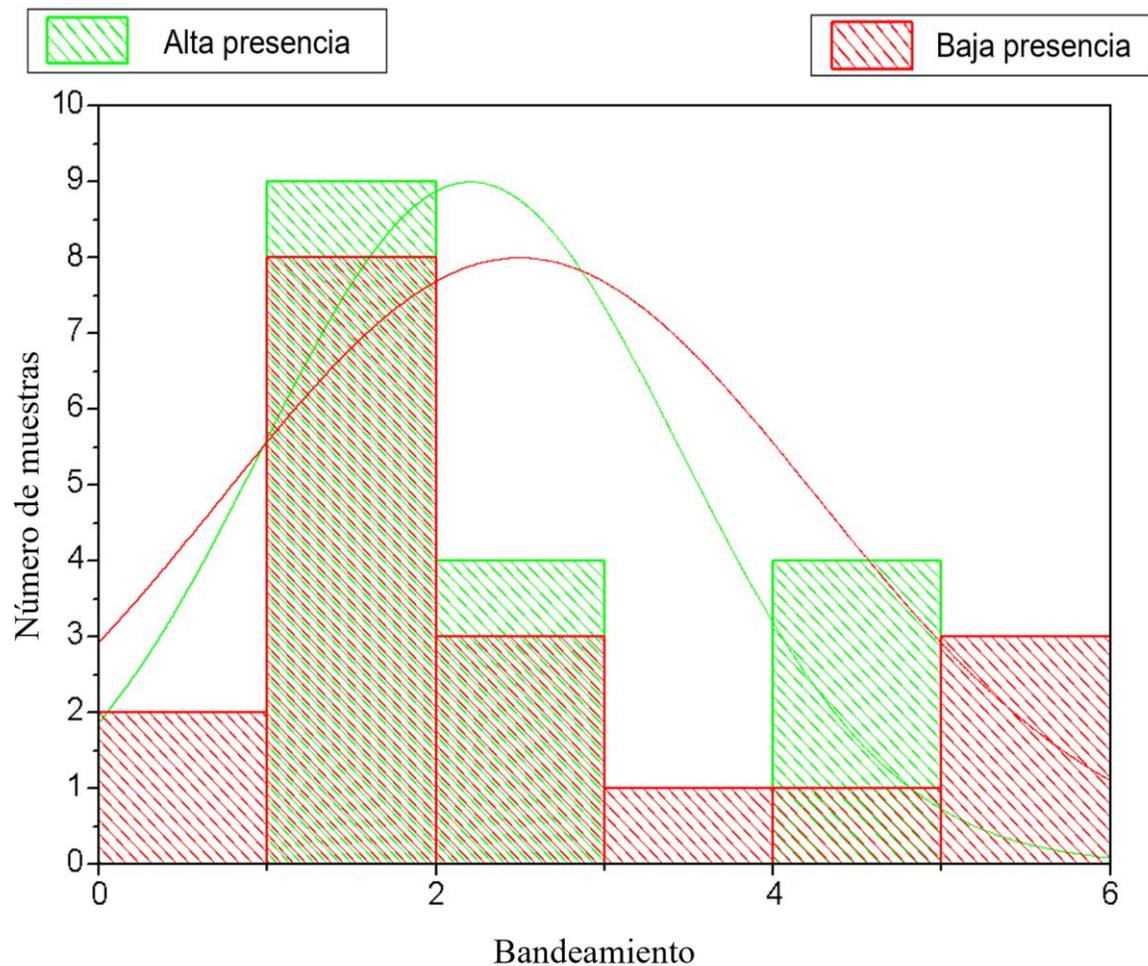


Figura 36. Histograma del grado de bandeamiento (AI) y productos de corrosión.

El análisis químico realizado a los aceros de prueba indicó que la mayoría de las muestras cumple con la especificación API 5L, exceptuando el contenido de azufre que en varios aceros es ligeramente superior al máximo requerido, como se muestra en la **Tabla 17**. Además, la muestra A23 rebasó sutilmente el contenido de carbono.

Sin embargo, el análisis metalográfico indicó que la variación en el contenido de azufre no es significativa debido a la cantidad de inclusiones no metálicas observadas.

Tabla 17. Muestras que exceden el %S indicada por la especificación API 5L.

ID Muestra campo	S	S (máx.) especificación API 5L	Grado API
A18	0.033	0.03	X60
A7	0.038	0.03	X42
A12	0.034	0.03	X60
A32	0.038	0.03	X56
A26	0.038	0.03	X60
A24	0.031	0.03	X60
A10	0.038	0.03	X46
A11	0.040	0.03	X60
A14	0.041	0.03	X56
A13	0.031	0.03	X60
A5	0.037	0.03	X52
A37	0.089	0.03	A
A30	0.050	0.03	X42
A36	0.039	0.03	X52
A16	0.053	0.03	X42

El resultado del análisis metalográfico expuso que el 90% de las muestras presentan inclusiones no metálicas del tipo D de la serie fina con una fracción volumen de 0.01 a 0.29. Mientras que las muestras restantes (A6, A16, A17, A34, A36) presentaron inclusiones del tipo A, con una fracción volumen entre 0.09 y 0.14.

El análisis metalográfico presentó que la totalidad de las microestructuras analizadas corresponden a una matriz de granos ferríticos con colonias de perlita laminar, cuya fracción volumen depende del contenido de carbono. El grado de bandeamiento que presentan 17 de las 37 muestras analizadas fue bajo ($A_i \leq 2$), mientras que el bandeamiento intermedio ($2 < A_i < 4$) y bandeamiento alto ($A_i \geq 4$) fue presenciado en 9 y 4 muestras, respectivamente. En la **Figura 38** se aprecia el grado de bandeamiento en dos muestras diferentes, donde la primera (A37) presentó un grado de bandeamiento alto ($A_i = 4.714$) y la segunda (A1) colonias de perlita distribuidas aleatoriamente y en bajo contenido, por lo que corresponde un

grado de bandeamiento bajo ($A_i=0.9$). Esto se puede observar visualmente con la alineación de las colonias de perlita en cada una de las muestras.

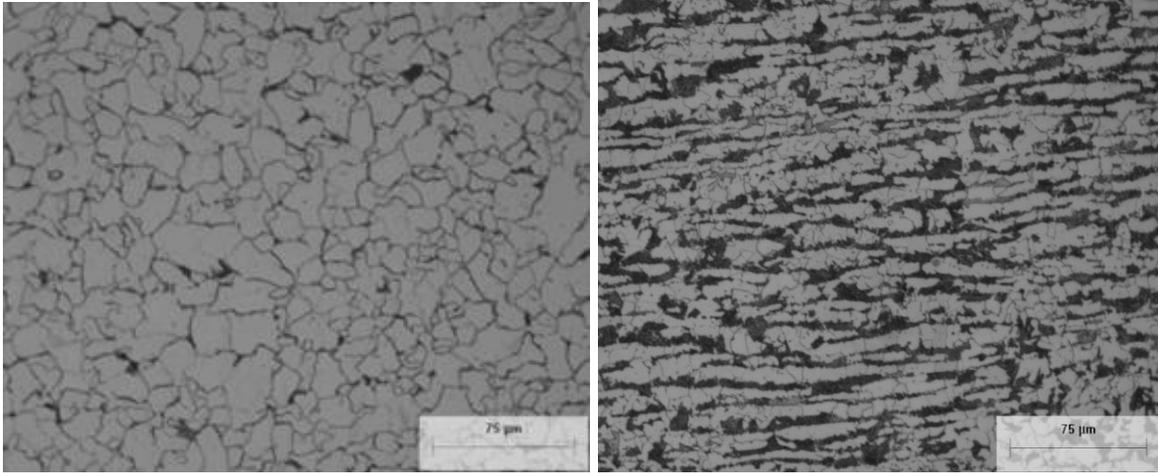


Figura 37. Muestra A1 y A37 respectivamente, microestructura ferrita-perlita con bandeamiento. (Dirección transversal).

5.3 Pruebas de flujo

Los resultados de las pruebas de flujo dinámico muestran que todos los aceros analizados desarrollaron el mismo tipo de corrosión (corrosión uniforme), más específicamente identificada como corrosión por flujo. Los resultados de la **Tabla 15** indican que no existe correlación entre las pruebas de flujo dinámico y los daños generados en servicio, esto debido a que en campo si se presentó corrosión de tipo localizada. Es decir, el tipo de corrosión desarrollada en la prueba de flujo dinámico no presentó las mismas características morfológicas de daño y depósitos de corrosión observadas en servicio.

En contraste, los resultados obtenidos durante las pruebas de inmersión fueron más apegados a los desarrollados en servicio.

5.3.1 Relación del grado de bandeamiento con el contenido de productos de corrosión

Los resultados estadísticos del grado de bandeamiento contra la cantidad de productos de corrosión presentes en las muestras, reflejan que esta propiedad metalográfica no influye en el contenido de estos productos como se muestra en la **Figura 39**, esto al considerar que no existe diferencia entre la media de las muestras para cada tipo de patrón, el cual corresponde a un grado de bandeamiento bajo de aproximadamente $A_i=2$.

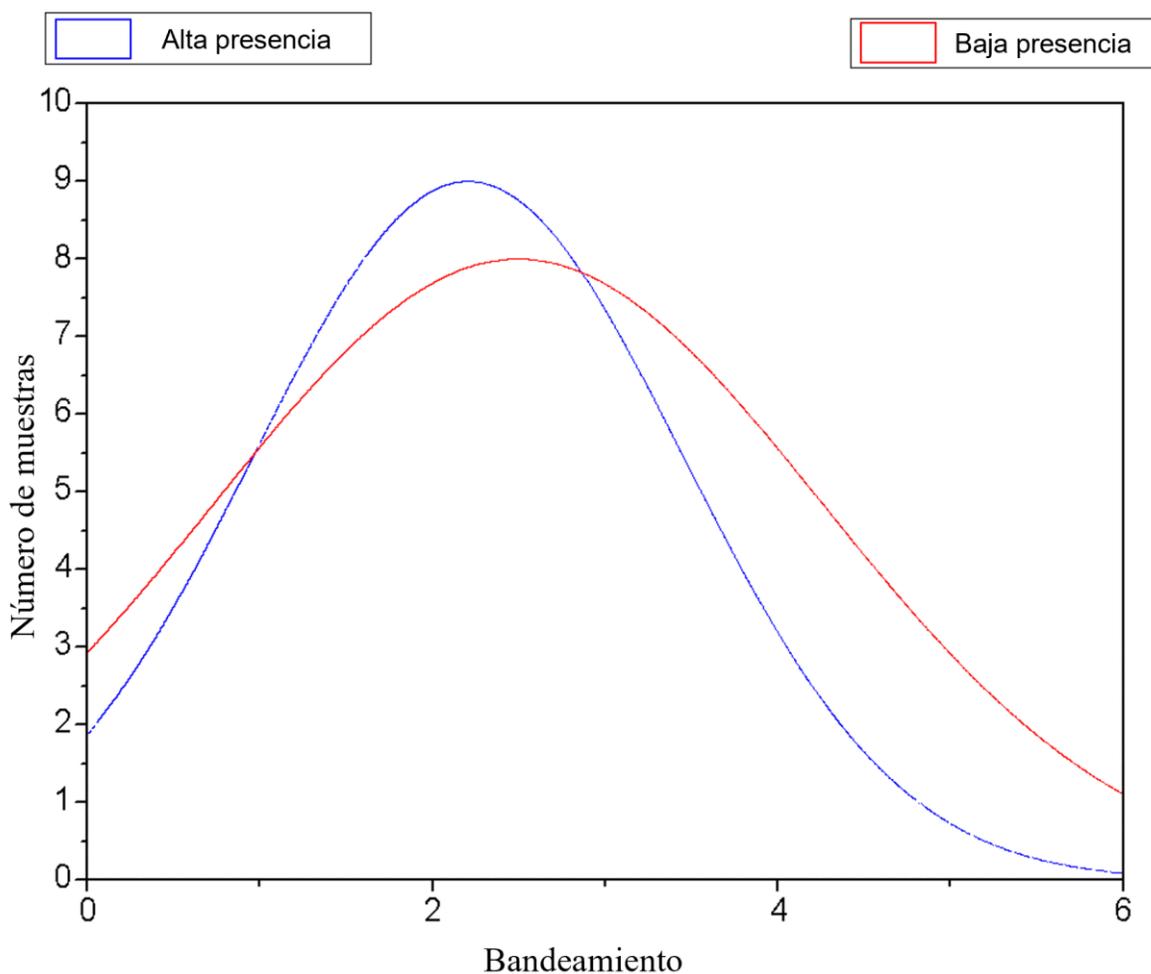


Figura 38. Relación del grado de bandeamiento y el contenido de productos de corrosión.

5.3.2 Relación del parámetro de orientación microestructural con el contenido de productos de corrosión

Las medias estadísticas del parámetro de orientación microestructural obtenidas de las muestras con alta y baja presencia de productos de corrosión presentaron similitud en su valor ($\Omega=0,4$), demostrando que esta propiedad metalográfica no influye en el desarrollo de los productos de corrosión adheridos en los aceros expuestos a flujo salino, como se muestra en la **Figura 40**.

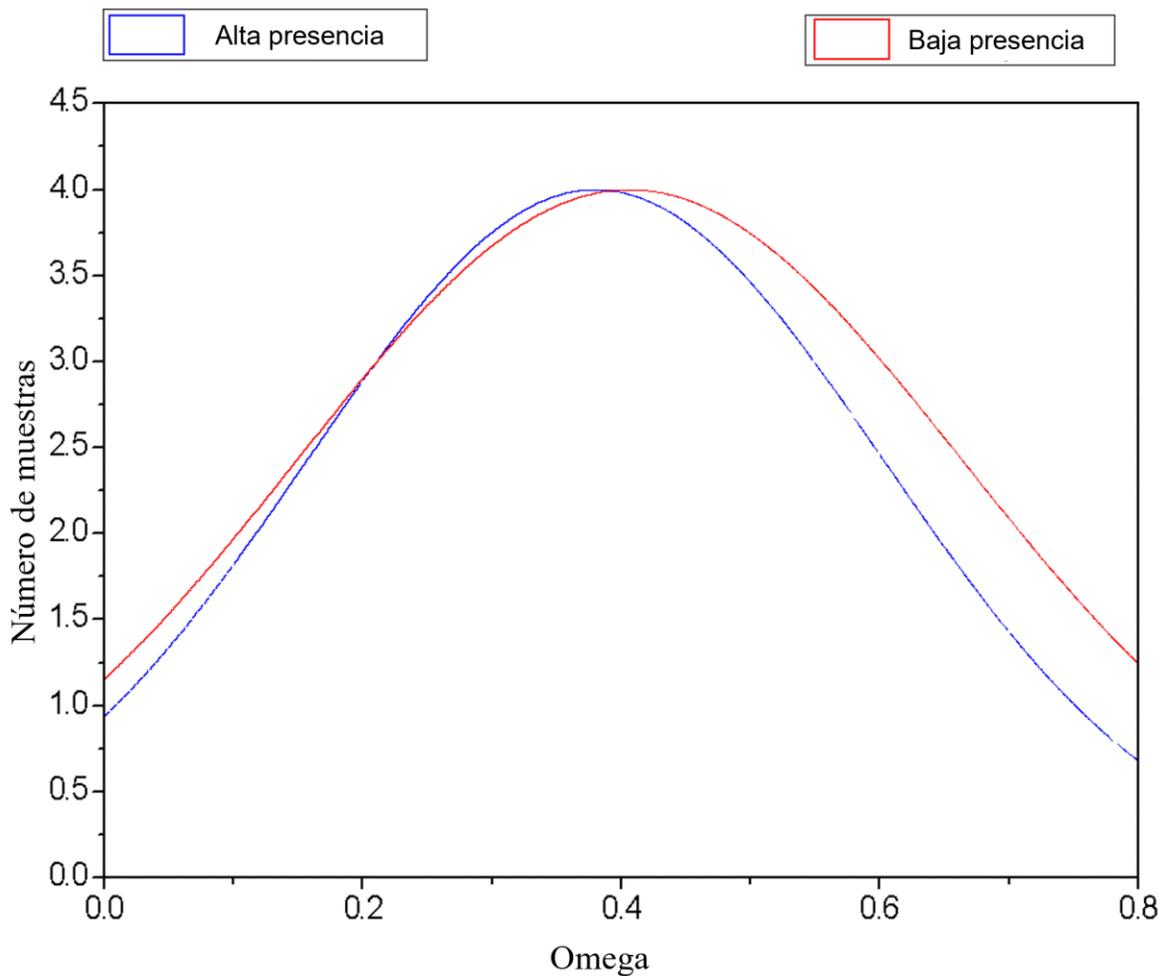


Figura 39. Relación del parámetro de orientación microestructural y el contenido de productos de corrosión.

5.3.3 Relación entre el contenido de carbono y la microestructura con el contenido de productos de corrosión

Los resultados estadísticos exponen que los productos de corrosión desarrollados son dependientes al contenido de carbono. Los ajustes de las funciones de probabilidad determinan que, para contenidos iguales o menores a 0.125% peso de carbono, se favorece la deposición de productos de corrosión, mientras que valores iguales o superiores a 0.160% de carbono, favorecen la ausencia de estos productos, como se muestra en la **Figura 41**.

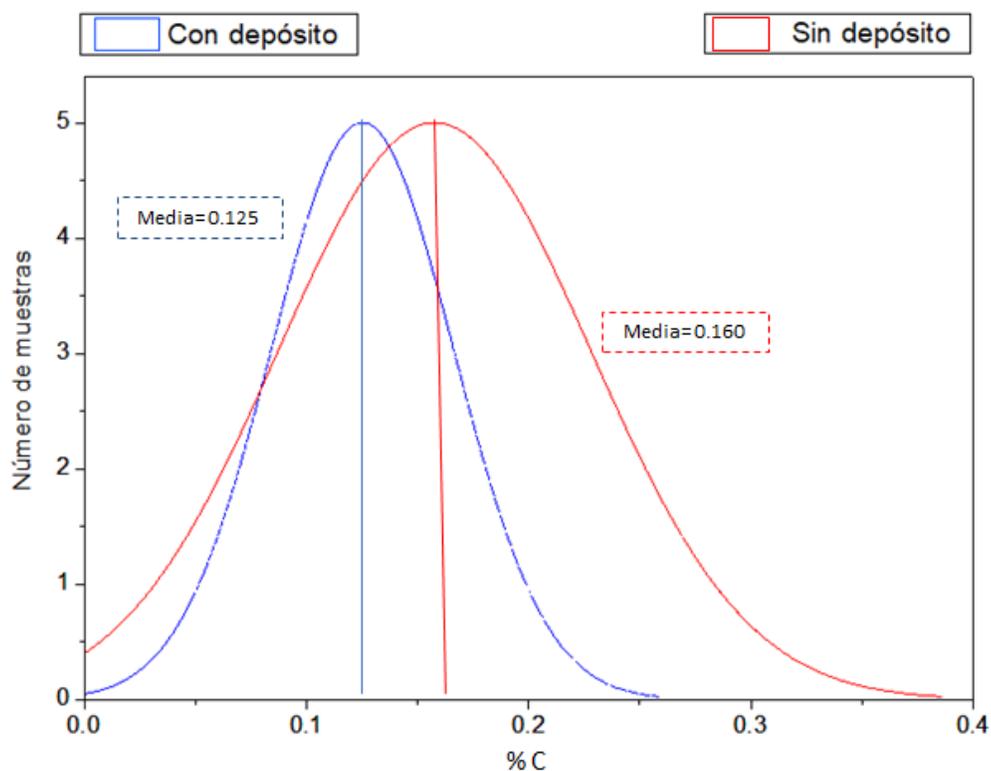


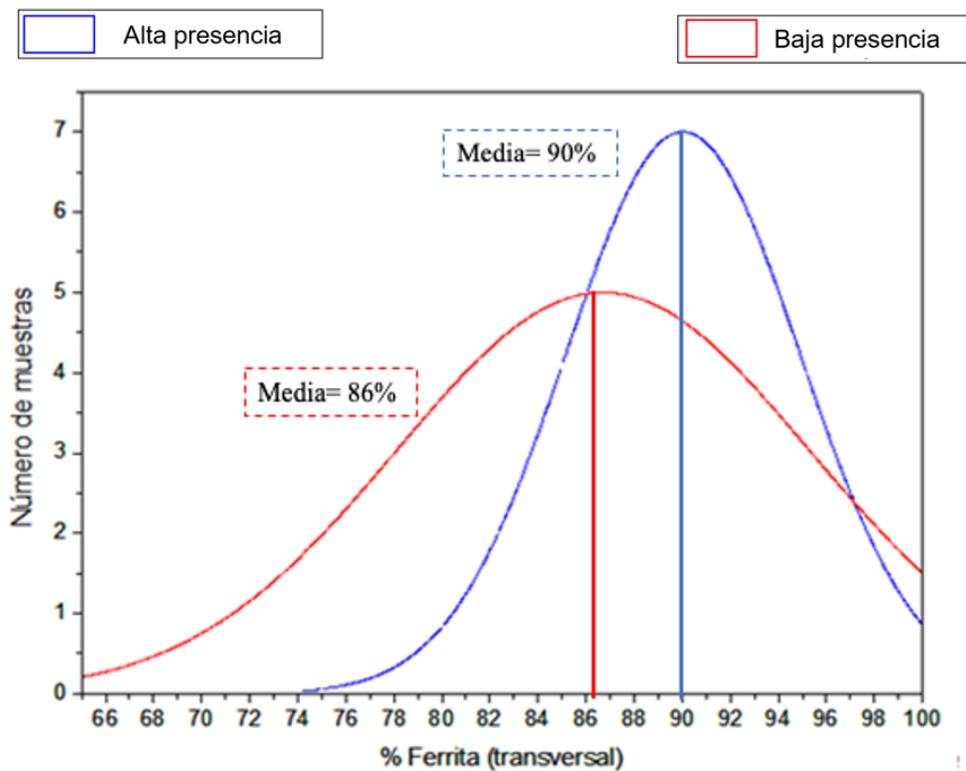
Figura 40. Relación del contenido de carbono y el contenido de productos de corrosión.

5.3.4 Relación del contenido y distribución de fases con respecto al contenido de productos de corrosión desarrollada en pruebas de flujo

De igual forma, los resultados de la fracción de ferrita y perlita de las caras transversales y longitudinales indican una clara diferencia entre estas dos clasificaciones. Por lo tanto, es posible establecer que la homogeneidad de la

disolución tiene una fuerte dependencia a la proporción de los microcomponentes.

Los ajustes de las funciones de probabilidad determinan que, para contenidos menores a 10% peso de perlita, se favorece la adhesión de productos de corrosión, mientras que valores iguales o superiores a 13% peso de perlita, la presencia de estos productos de corrosión es menor, como se muestra en las **Figuras 42 y 43**.



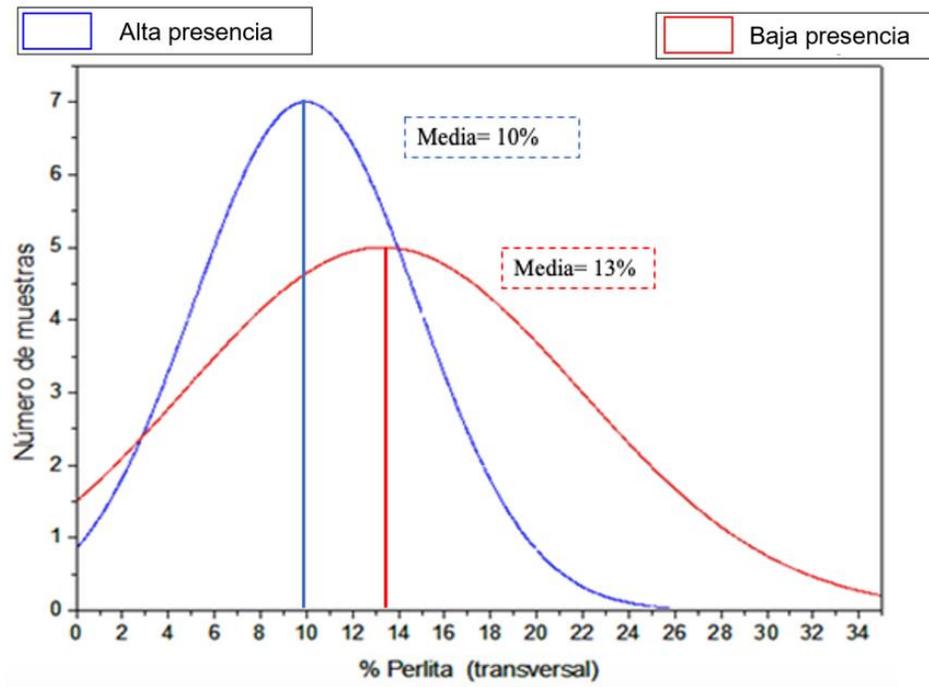


Figura 42. Demostración de que el contenido de ferrita y perlita en dirección transversal está relacionado con los productos de corrosión

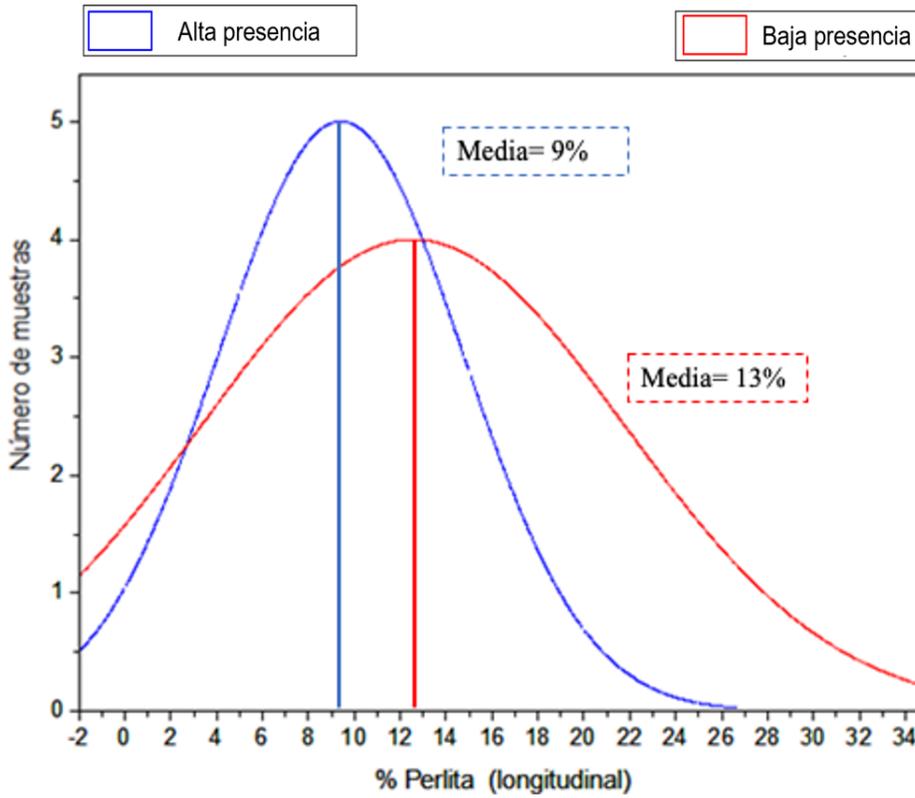
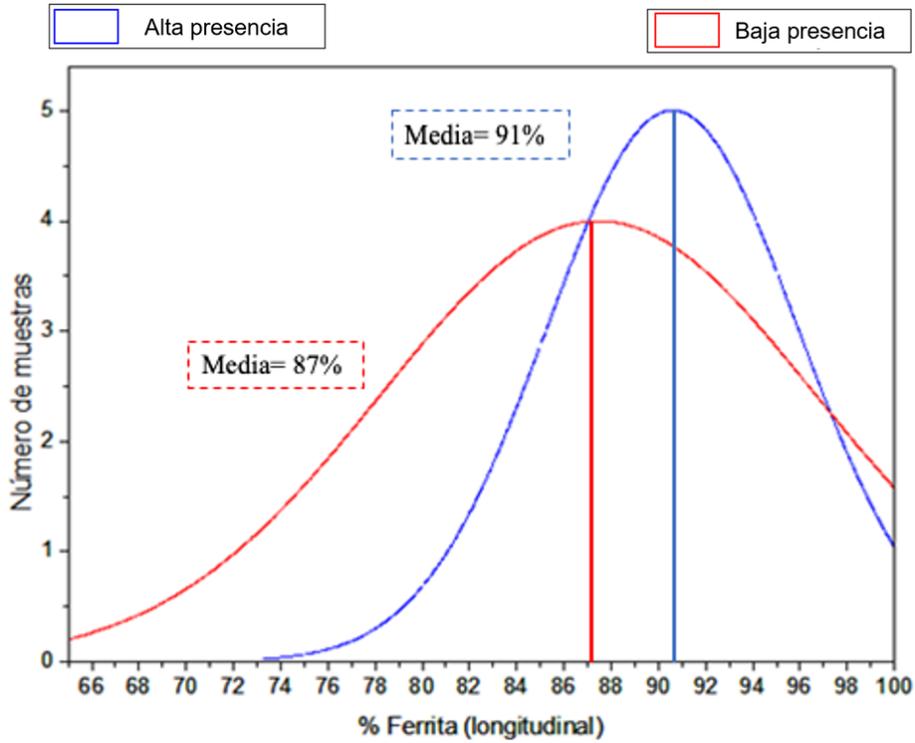


Figura 43. Demostración de que el contenido de ferrita y perlita en dirección longitudinal está relacionado con los productos de corrosión

5.3.5 Relación de la velocidad de corrosión con respecto al contenido de productos de corrosión desarrollada en pruebas de flujo

En la **Figura 44** se muestra el histograma de velocidad de corrosión con respecto al desarrollo aparente de los productos de corrosión, y en la figura se detecta que no existe tanta distinción entre las dos clasificaciones. Por lo tanto, se puede determinar que la prueba de polarización no es capaz de distinguir la cantidad de productos de corrosión generados para la prueba propuesta.

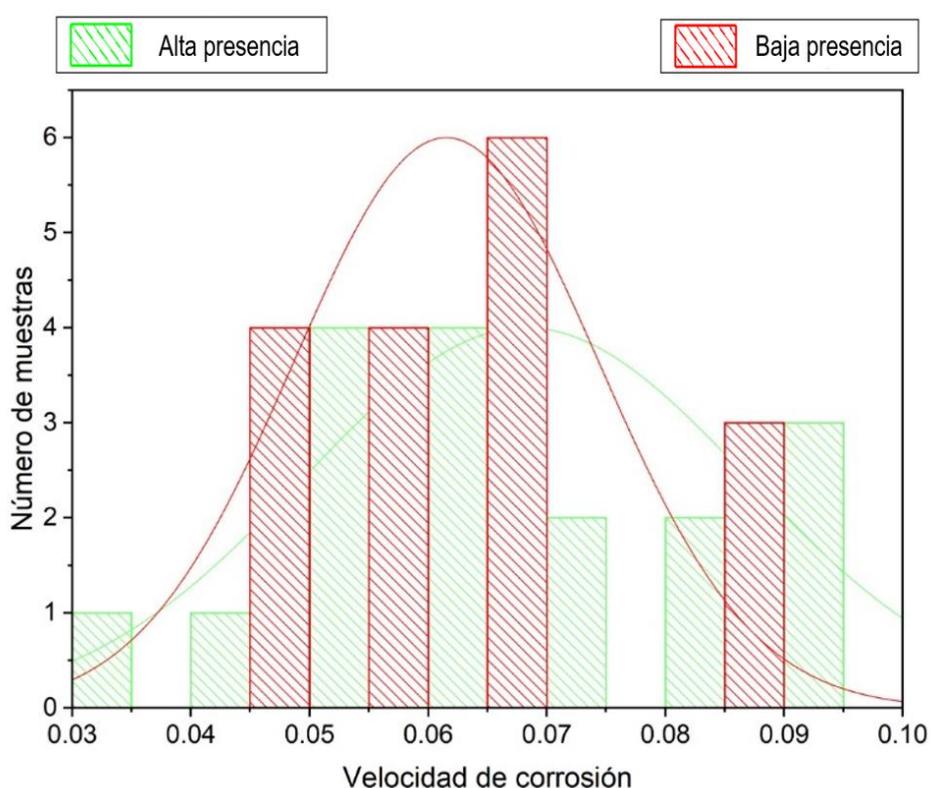


Figura 44. Velocidad de corrosión con respecto al desarrollo aparente de los productos de corrosión

5.4 Resultados de las pruebas de inmersión

Los resultados de las pruebas de inmersión demuestran que el patrón de corrosión depende de 4 características metalúrgicas de los aceros, principalmente el contenido de carbono, grado de bandeamiento (A_i), porcentaje de fases y parámetro de orientación microestructural (Ω_{12}).

Se encontró que para contenidos iguales o menores a 0.100% peso de carbono, se favorece la corrosión localizada, mientras que valores iguales o superiores a 0.170% de carbono, favorecen la corrosión uniforme.

Es importante mencionar que las **Tablas 15** y **16** señalan que no existe relación entre las pruebas de flujo dinámico y los daños registrados en campo, lo cual se atribuye principalmente a que las pruebas de este trabajo suministraron un flujo salino continuo, por lo que el constante movimiento del electrolito impidió la disolución colectiva, fenómeno que no sucede en condiciones reales de servicio ni en las pruebas por inmersión, donde el fluido estancado permite la disolución selectiva de fases. Además, la heterogeneidad microestructural propicia zonas anódicas y catódicas, acelerando la disolución del material.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

1. Los resultados de las pruebas propuestas muestran que el flujo de la solución salina inhibe la generación de los patrones de corrosión localizada, desarrollándose únicamente corrosión uniforme, específicamente en forma de canal, con variaciones cualitativas en función de las características metalúrgicas del acero.
2. El análisis estadístico de los resultados de las pruebas de flujo muestra que el contenido de carbono y la distribución de microconstituyentes son los parámetros que determinan la presencia de productos de corrosión en los aceros expuestos, donde: contenidos inferiores a 0.125%wt de carbono promueven la formación de productos de corrosión, mientras que a partir de contenidos de carbono iguales o superiores a 0.160% wt disminuyen la presencia de estos productos; y siendo mínimos en contenidos mayores al 0.200%wt de carbono.
3. La proporción de microconstituyentes es altamente influyente en el desarrollo de productos de corrosión, determinando que contenidos menores al 86% wt de ferrita disminuye la formación de productos de corrosión.
4. Se encontró que el bandeamiento y la orientación microestructural no modifican el tipo de corrosión ni la porción de productos de corrosión depositados.
5. Al comparar los resultados obtenidos en las pruebas de inmersión con las pruebas de flujo dinámico, se observó que éstas no tienen ninguna relación directa entre sí.

6. La prueba de resistencia a la polarización no es capaz de determinar la cantidad de productos de corrosión adheridos para la prueba de flujo propuesta.

CAPÍTULO 7. REFERENCIAS

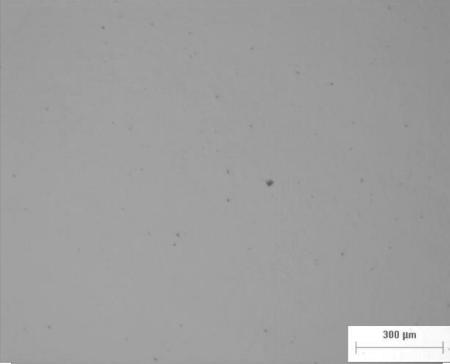
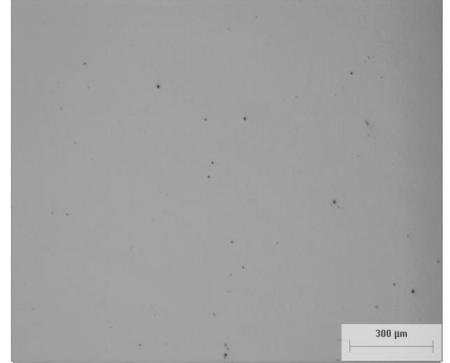
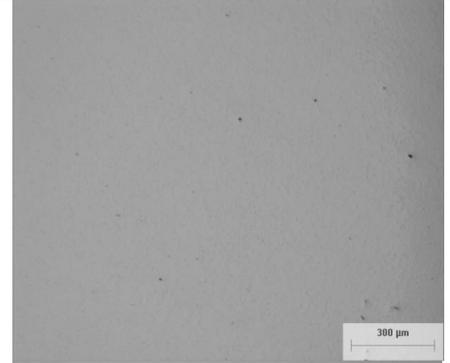
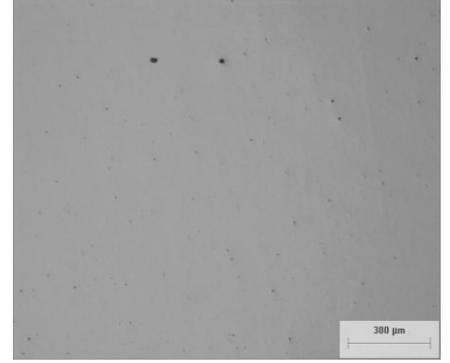
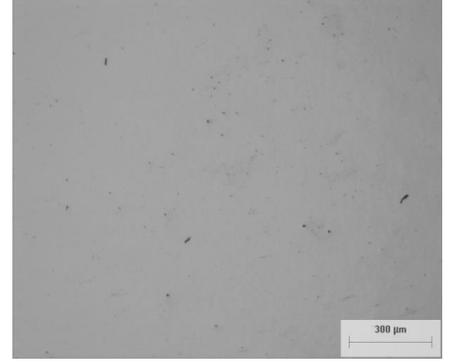
- [1] G. H. Koch, M. P. H. Brongers, N. G. Thompson, Y. P. Virmani, and J. H. Payer, “CORROSION COSTS AND PREVENTIVE STRATEGIES Publication No . FHWA-RD-01-156,” *Corrosion*, 2001.
- [2] G. V. Chilingar, R. Mourhatch, and G. D. Al-Qahtani, *The Fundamentals of Corrosion and Scaling for Petroleum and Environmental Engineers*. 2013.
- [3] Rosalux, *Más allá del desarrollo*. 2011.
- [4] Z. Ahmad, *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*. 2006.
- [5] M. G. Fontana, “Corrosion,” *Ind. Eng. Chem.*, 1947, doi: 10.1021/ie50456a786.
- [6] R. W. Revie and H. H. Uhlig, *Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering: Fourth Edition*. 2008.
- [7] G. S. Frankel and N. Sridhar, “Understanding localized corrosion,” *Materials Today*. 2008, doi: 10.1016/S1369-7021(08)70206-2.
- [8] CartoCrítica, “Industrias extractivas y concesiones,” *CartoCrítica*. 2015.
- [9] F. Caleyó, L. Alfonso, J. Alcántara, and J. M. Hallen, “On the estimation of failure rates of multiple pipeline systems,” in *Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME*, 2008, doi: 10.1115/1.2894292.
- [10] American Petroleum Institute, “API 5L Specification for line pipe,” *Api Spec 5L*. 2004.
- [11] International, ASTM. *Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*. 2015.
- [12] International, ASTM. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. 2013.
- [13] International, ASTM. *Standard Test Methods for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry*. 2014.
- [14] International, ASTM. *Standard Test Methods for Preparation of Metallographic Specimens*”. 1995.
- [15] International, ASTM. *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*. 2013

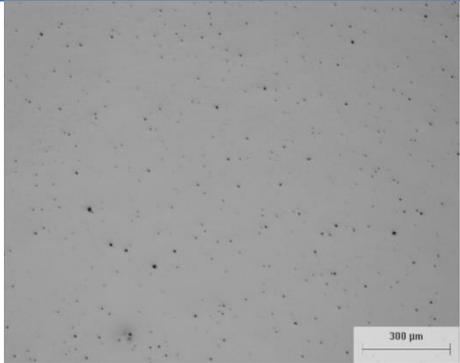
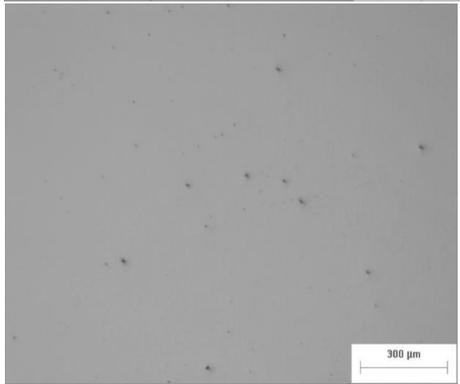
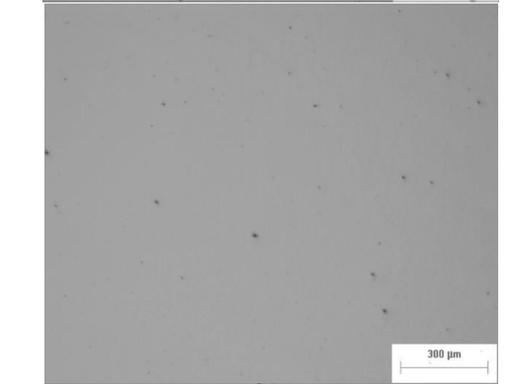
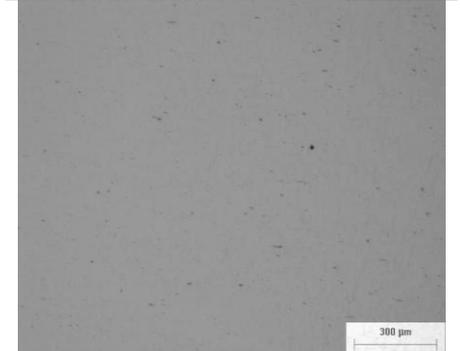
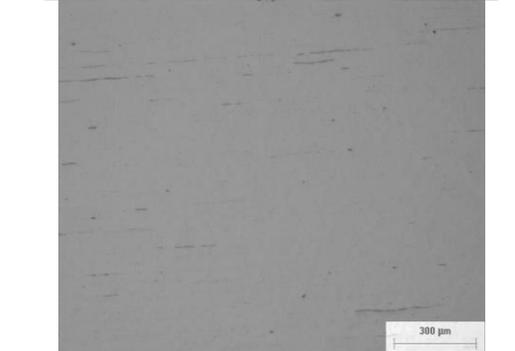
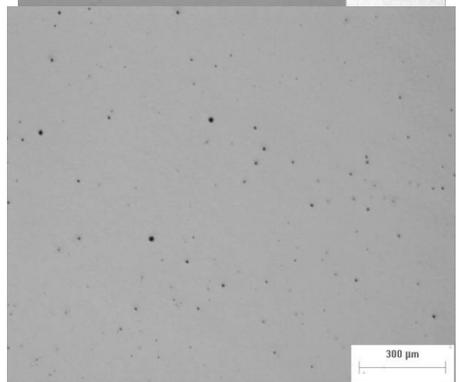
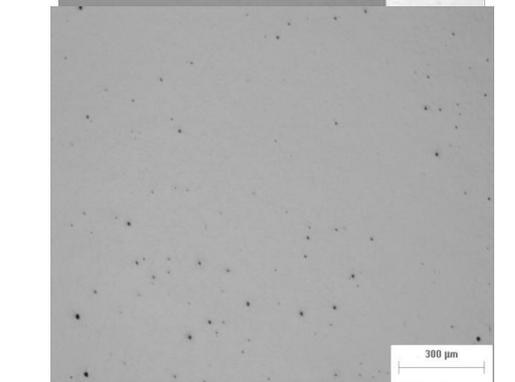
- [16] International, ASTM. *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size Using Semiautomatic and Automatic Image Analysis*. 2015.
- [17] International, ASTM. *Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel*. 2002.
- [18] International, ASTM. *Standard Test Methods for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements*. 2003.
- [19] Morales, B., Domiguez, C. (2017). *Influencia de parámetros Metalúrgicos en la incidencia de corrosión uniforme o localizada de acero API 5L en un medio acuoso*. Instituto Politécnico Nacional (ESIQIE).

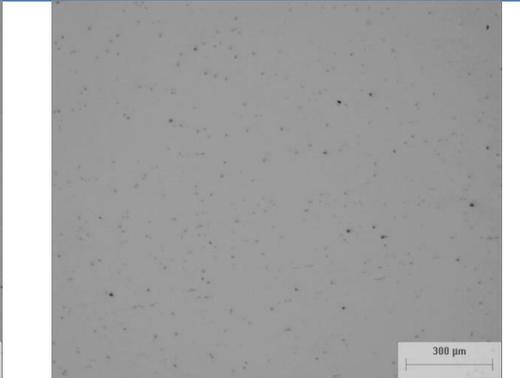
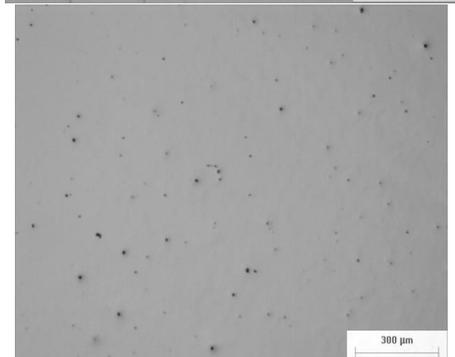
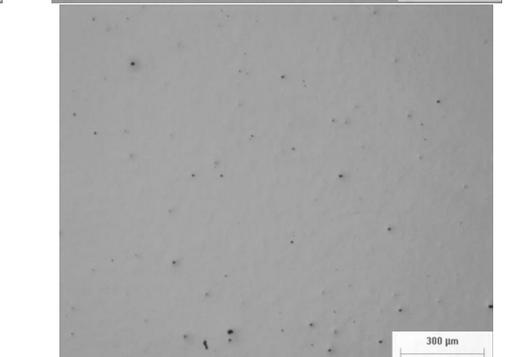
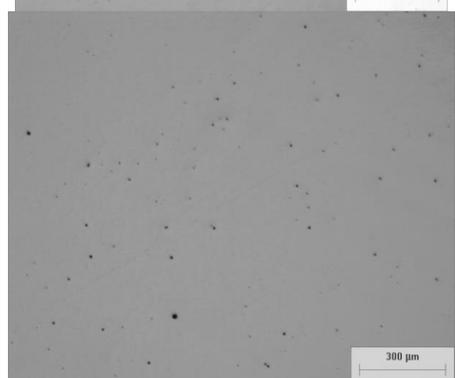
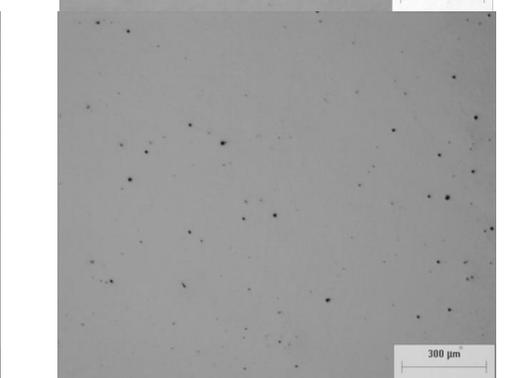
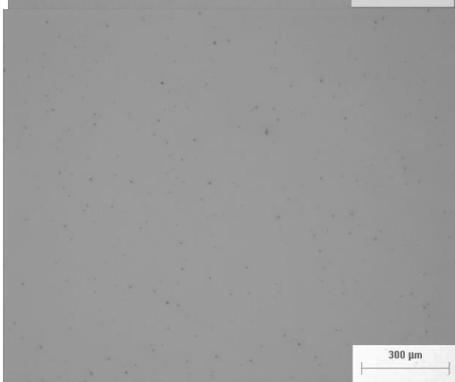
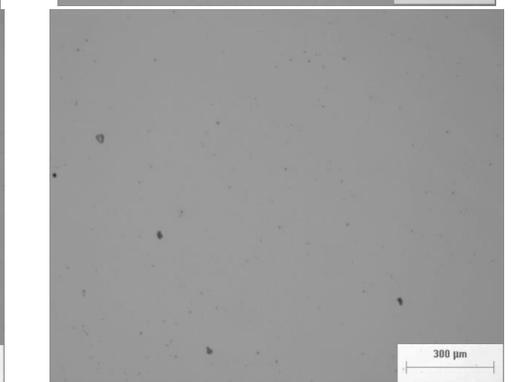
ANEXO 1. MICROGRAFIAS DE INCLUSIONES.

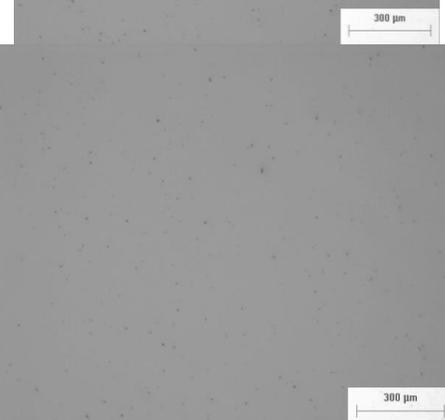
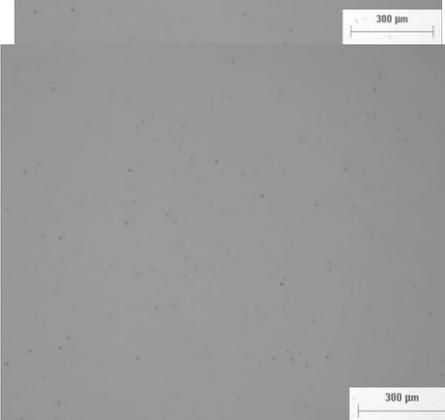
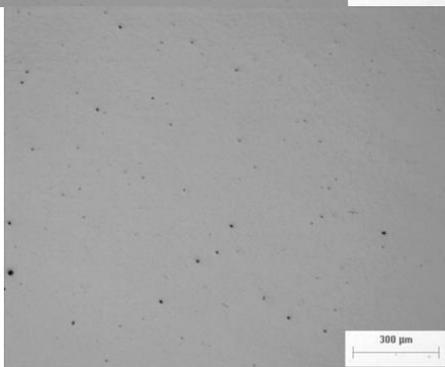
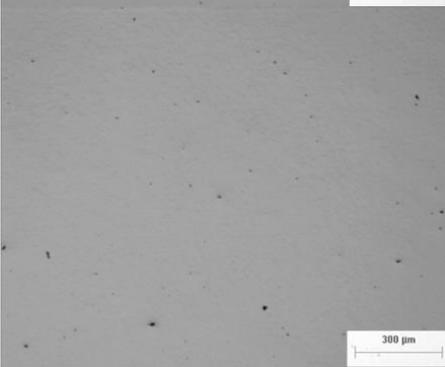
A continuación, en la **Tabla 1** se muestran las micrografías de inclusiones presentes en los diferentes aceros en las direcciones longitudinal y transversal.

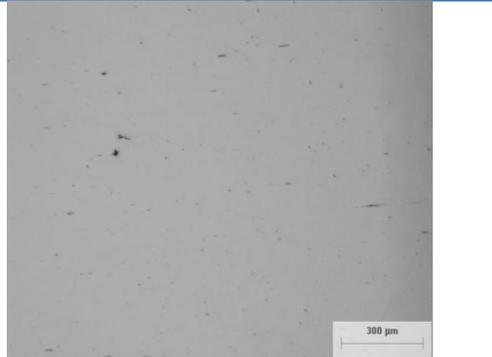
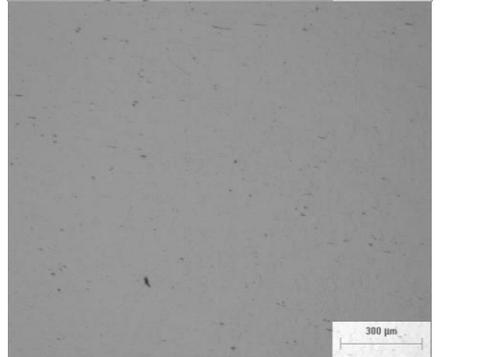
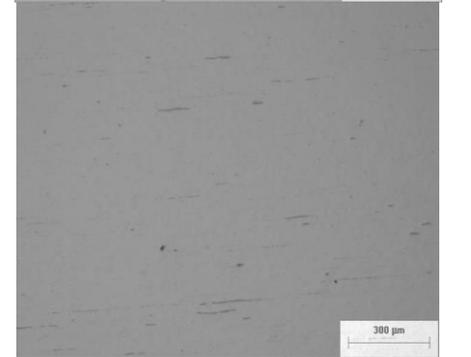
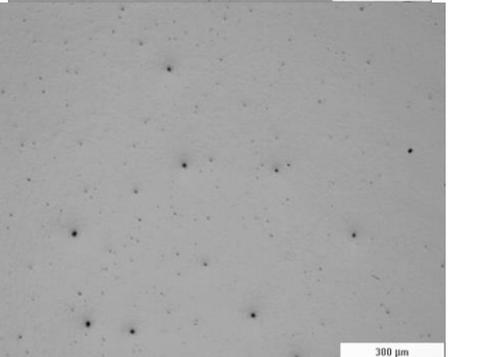
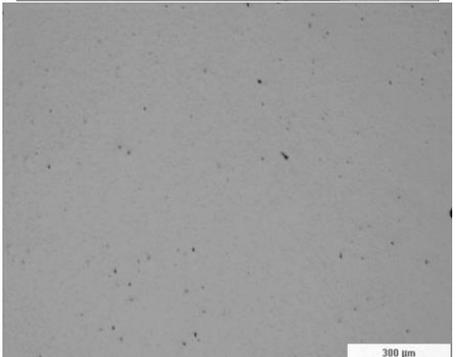
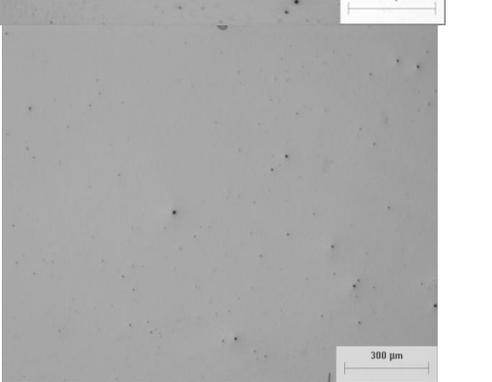
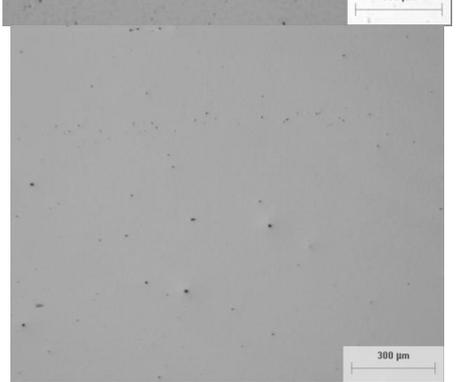
Tabla 1. Micrografía de inclusiones no metálicas presentes en muestras. Microscopio metalográfico campo claro, sin ataque.

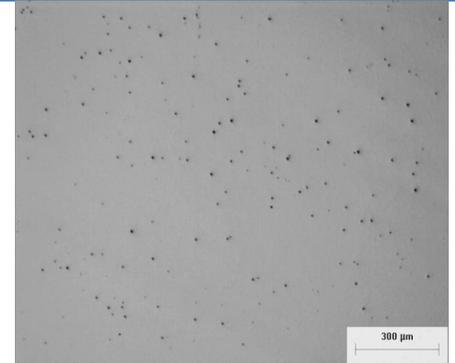
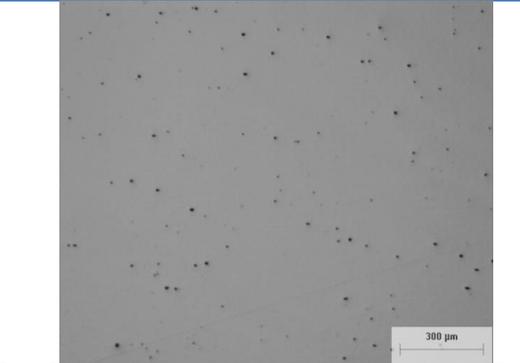
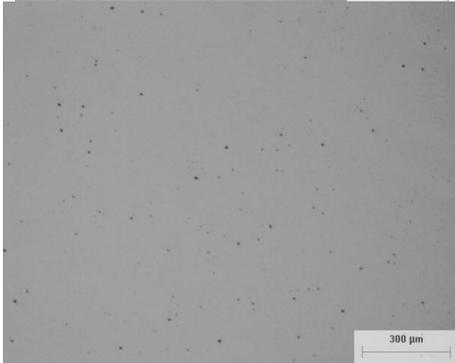
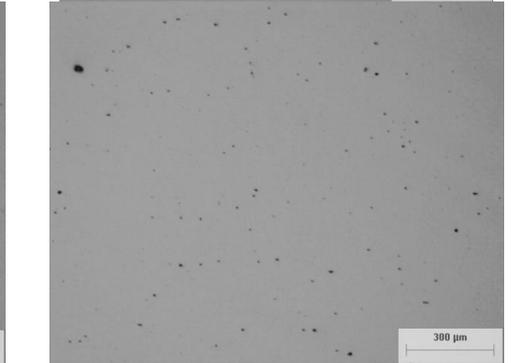
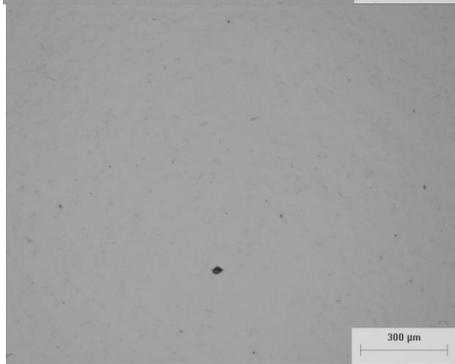
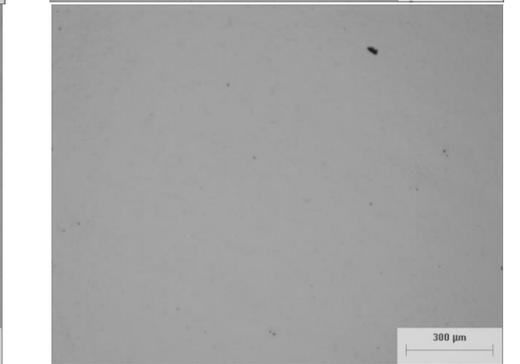
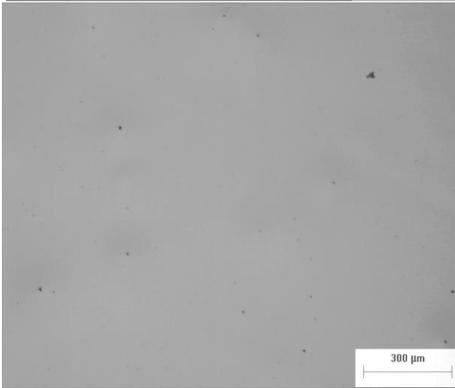
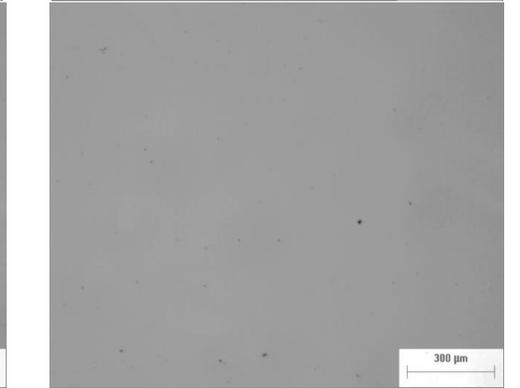
ID Muestra campo	Dirección transversal	Dirección longitudinal
A1	 300 µm	 300 µm
A2	 300 µm	 300 µm
A3	 300 µm	 300 µm

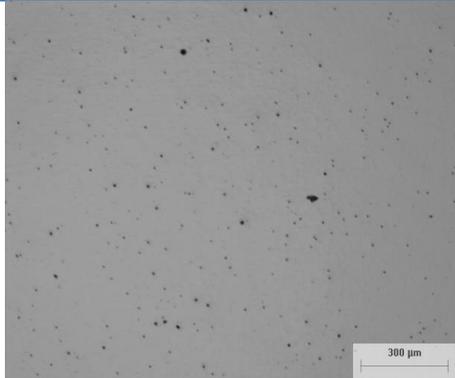
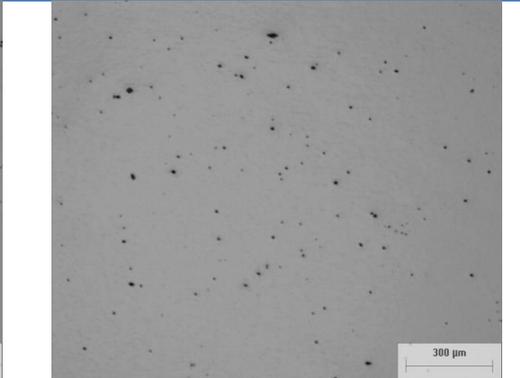
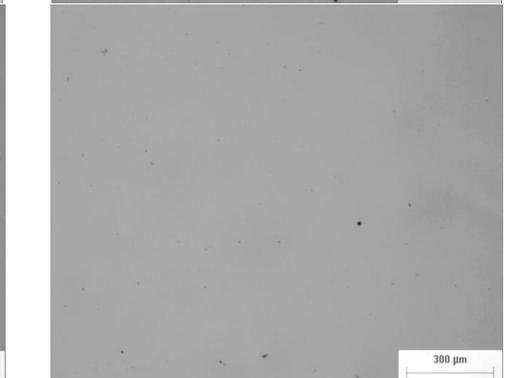
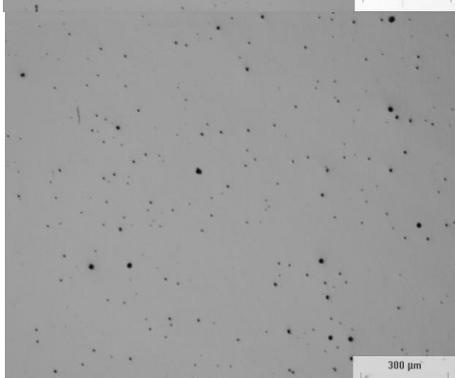
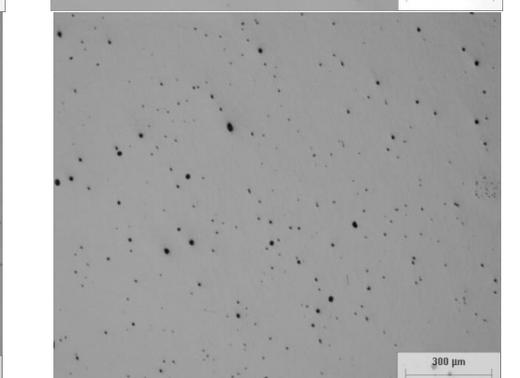
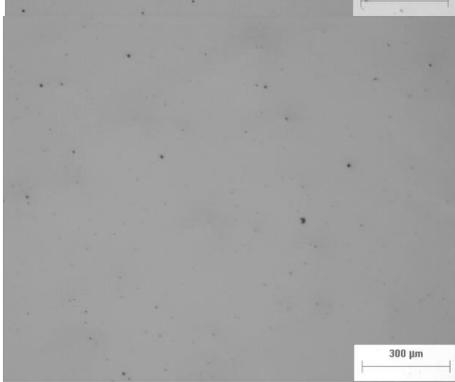
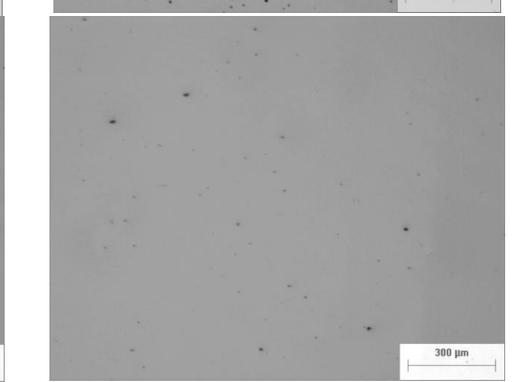
ID Muestra campo	Dirección transversal	Dirección longitudinal
A4		
A5		
A6		
A7		

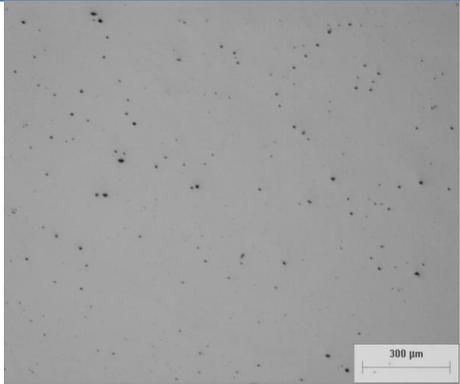
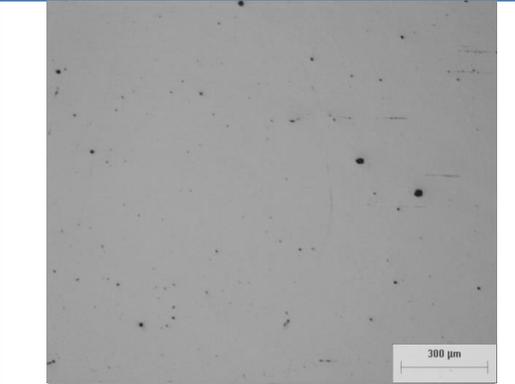
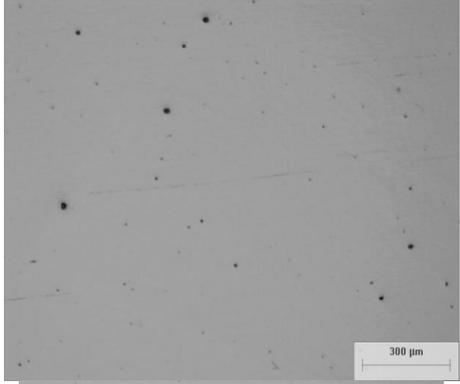
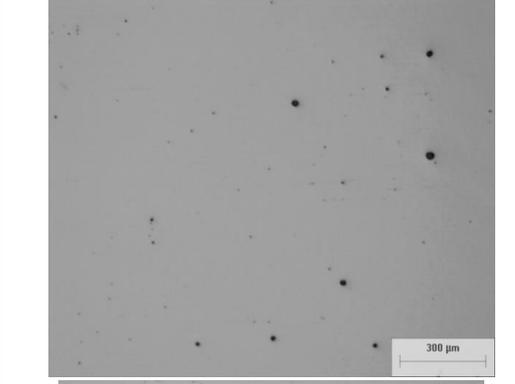
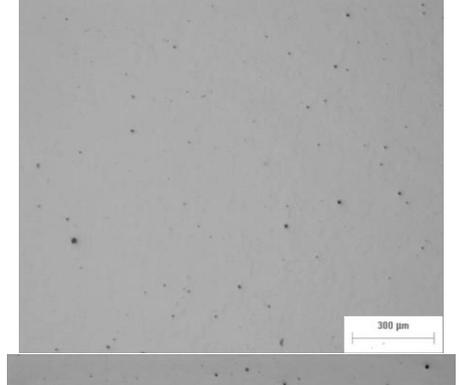
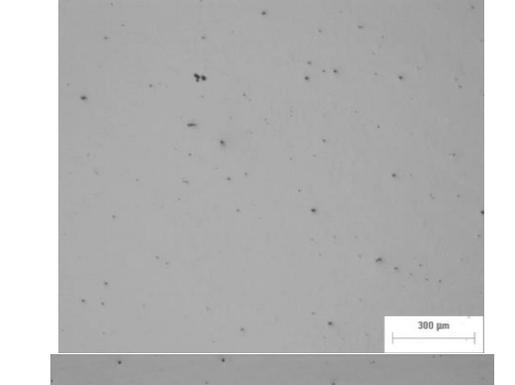
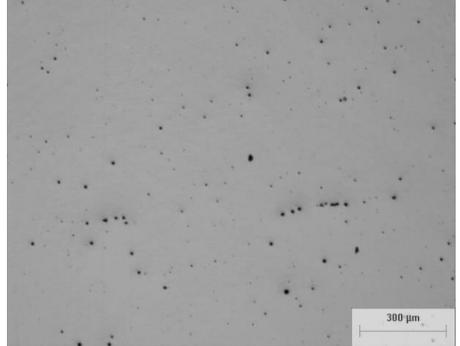
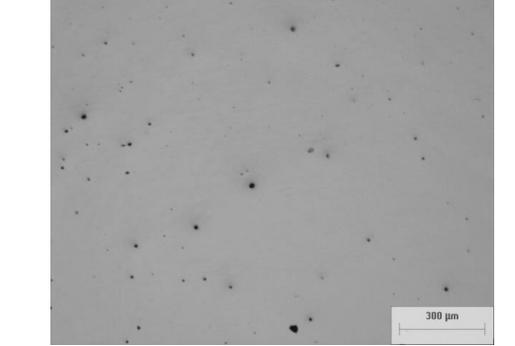
ID Muestra campo	Dirección transversal	Dirección longitudinal
A8		
A9		
A10		
A11		

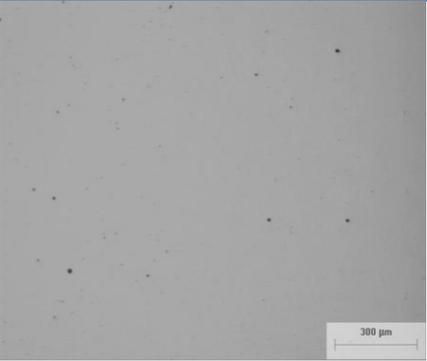
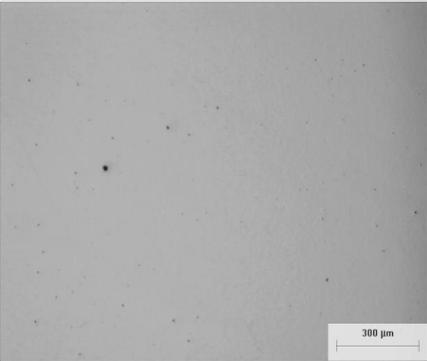
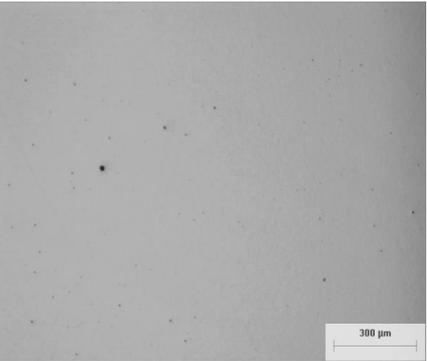
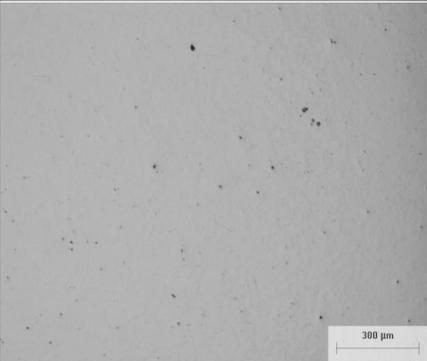
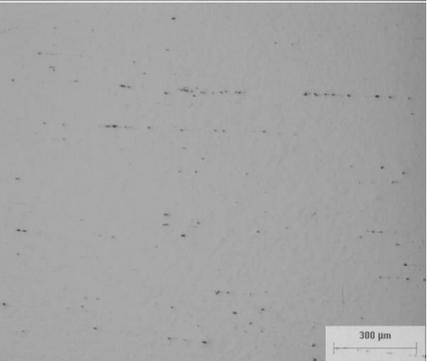
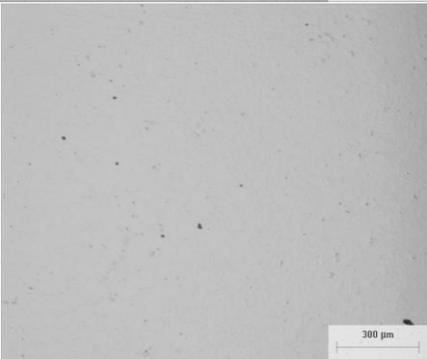
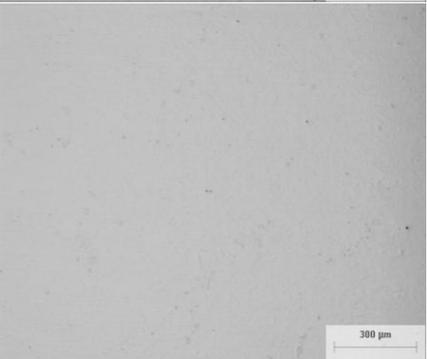
ID Muestra campo	Dirección transversal	Dirección longitudinal
A12		
A13		
A14		
A15		

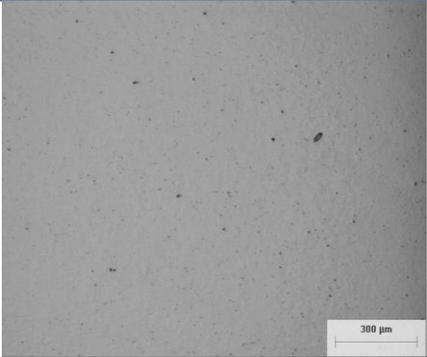
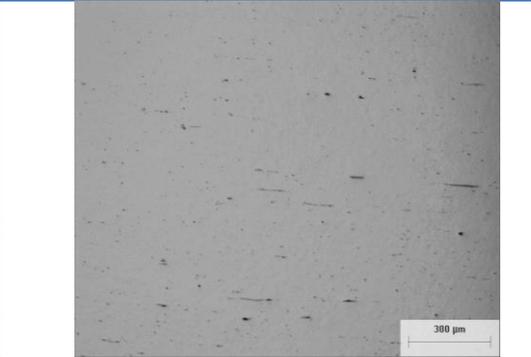
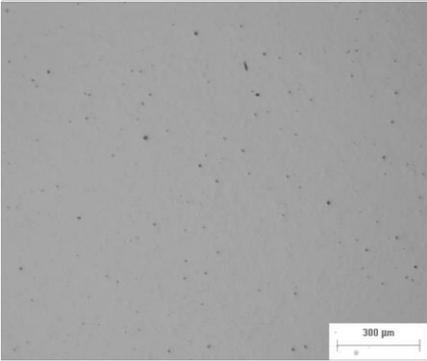
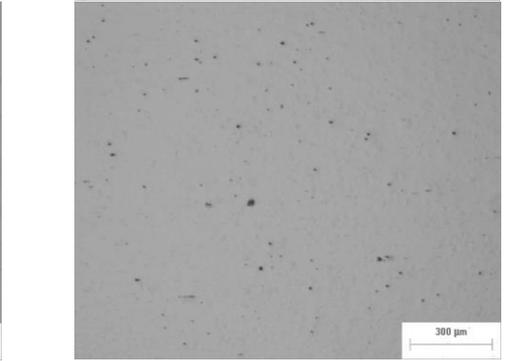
ID Muestra campo	Dirección transversal	Dirección longitudinal
A16		
A17		
A18		
A19		

ID Muestra campo	Dirección transversal	Dirección longitudinal
A20		
A21		
A22		
A23		

ID Muestra campo	Dirección transversal	Dirección longitudinal
A24		
A25		
A26		
A27		

ID Muestra campo	Dirección transversal	Dirección longitudinal
A28		
A29		
A30		
A31		

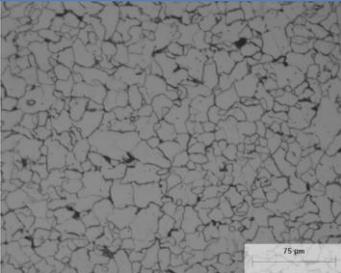
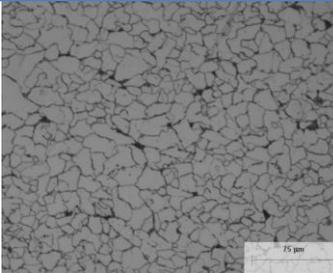
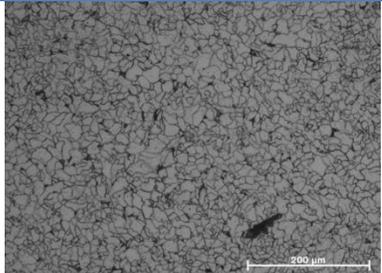
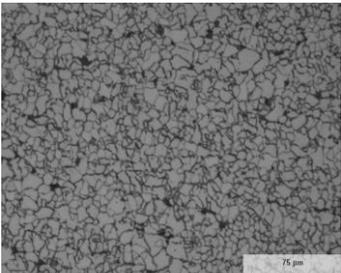
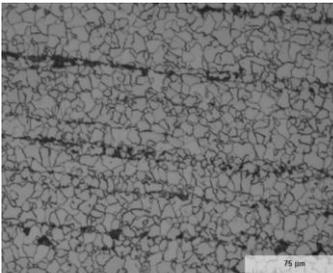
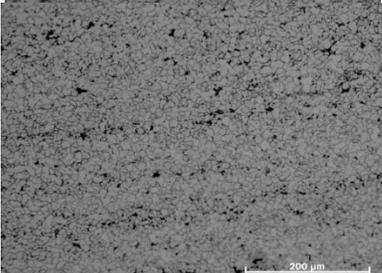
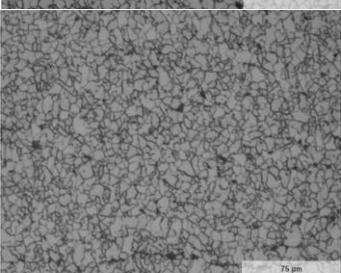
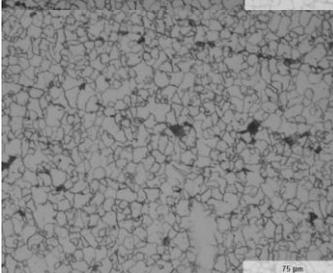
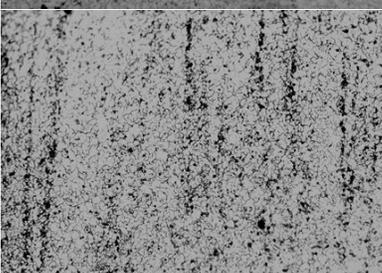
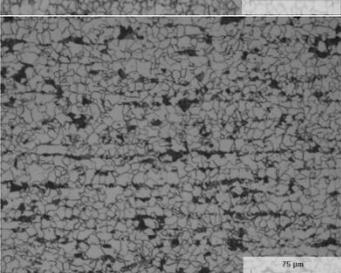
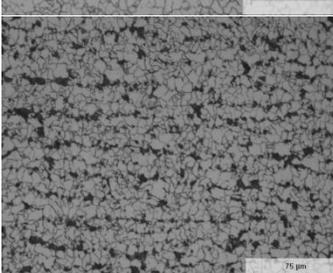
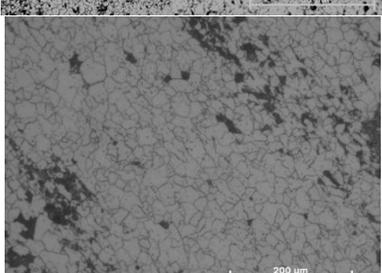
ID Muestra campo	Dirección transversal	Dirección longitudinal
A32		
A33		
A34		
A35		

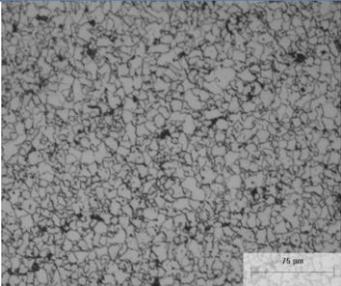
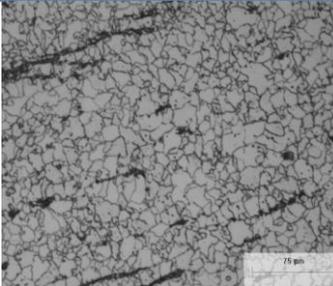
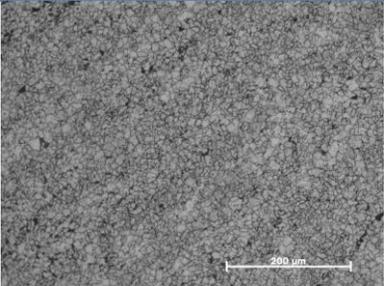
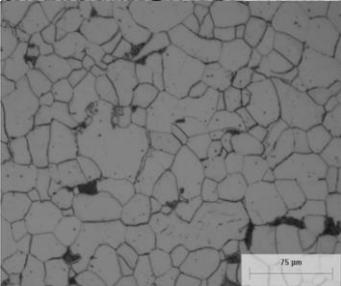
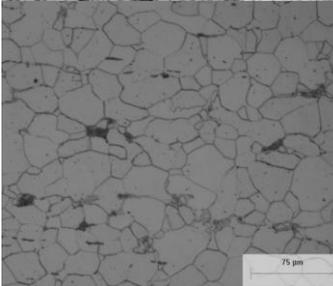
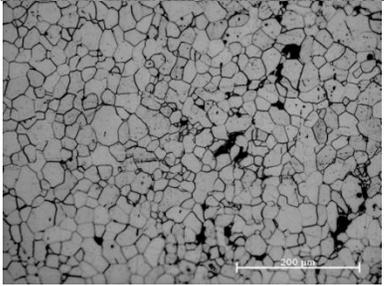
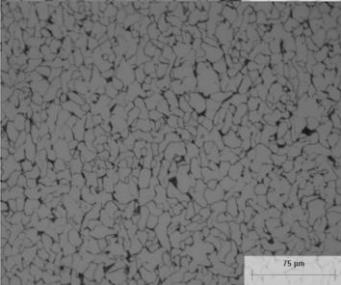
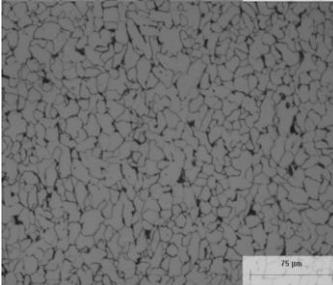
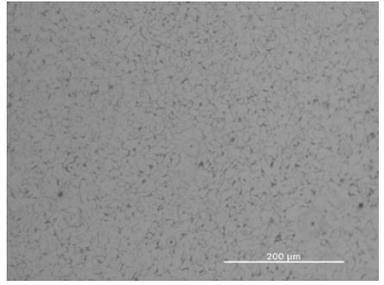
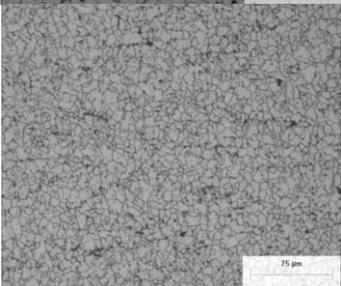
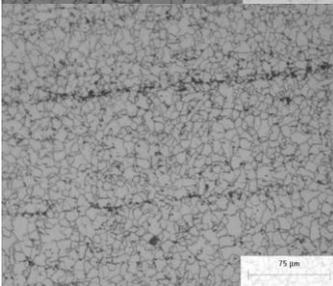
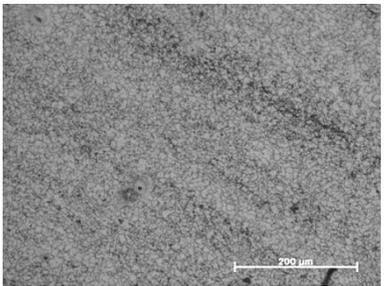
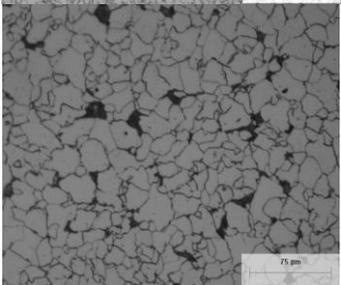
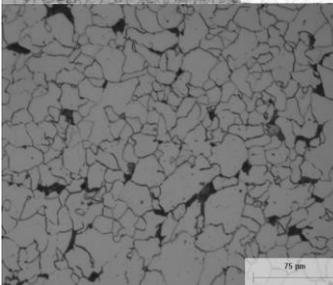
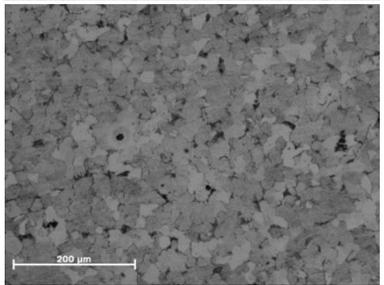
ID Muestra campo	Dirección transversal	Dirección longitudinal
A36		
A37		

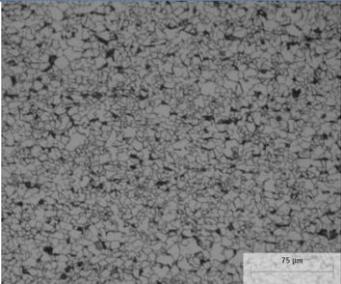
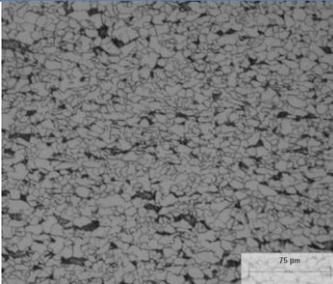
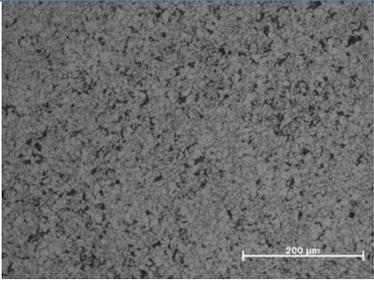
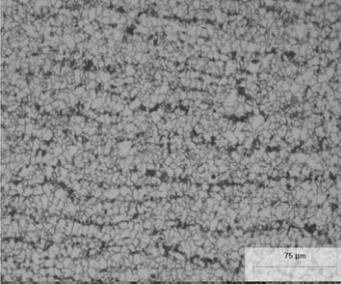
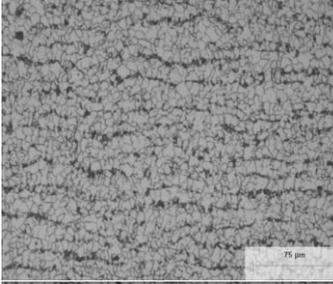
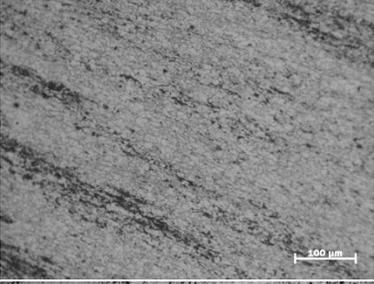
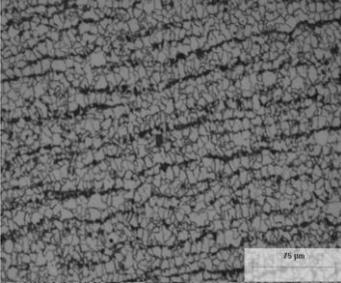
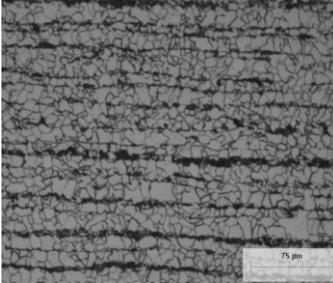
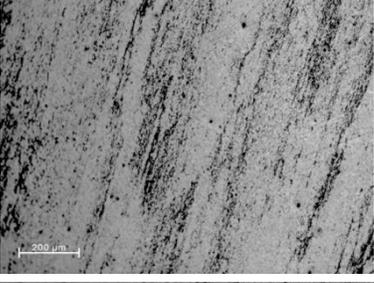
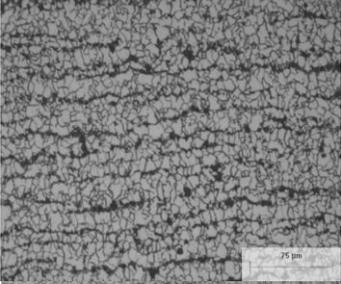
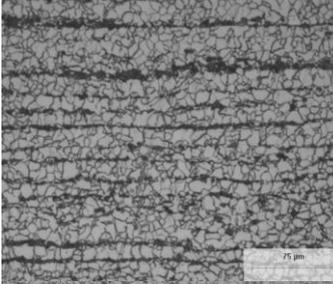
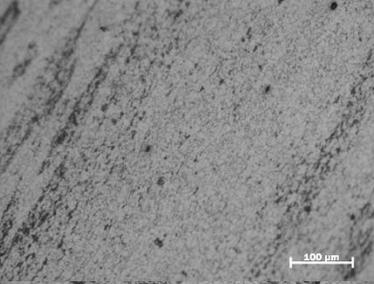
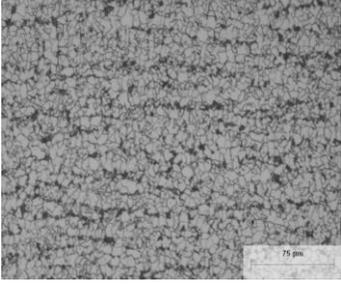
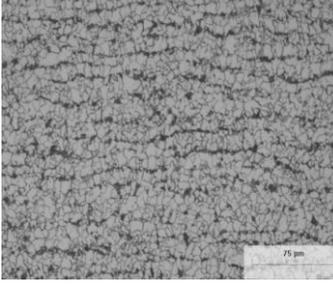
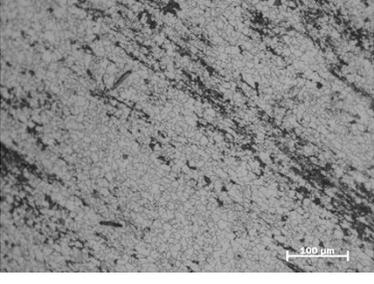
ANEXO 2. MICROESTRUCTURAS

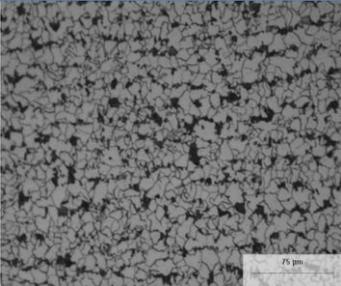
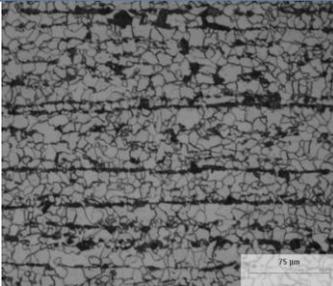
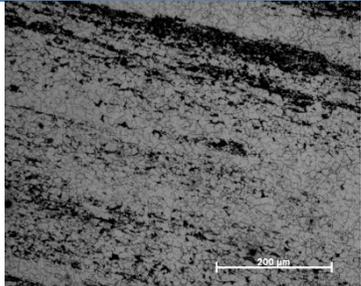
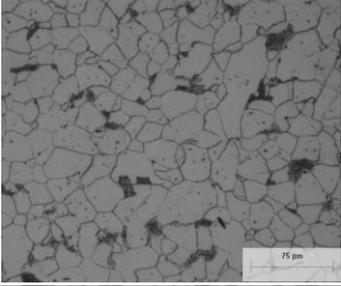
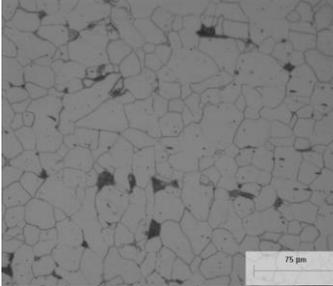
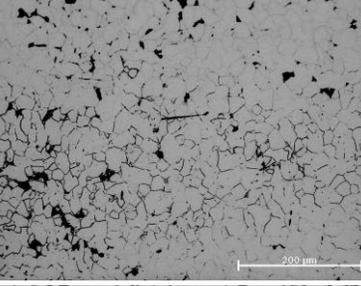
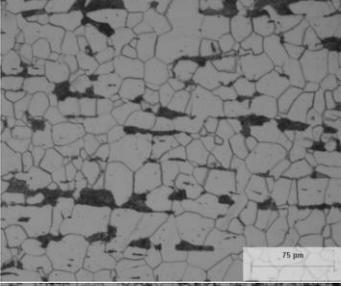
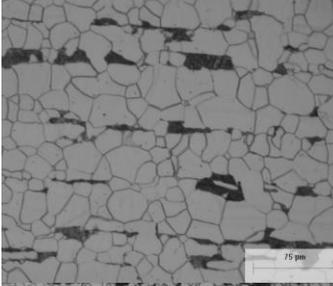
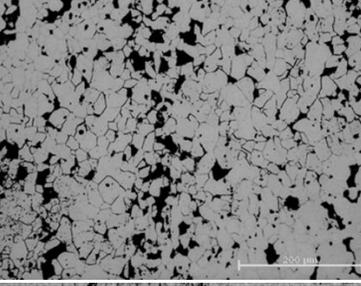
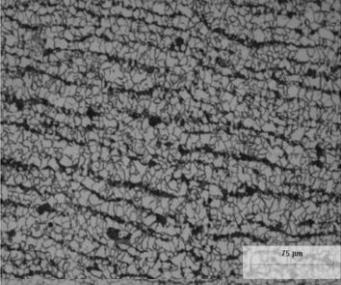
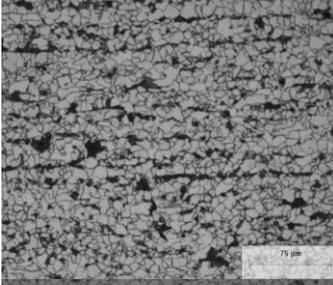
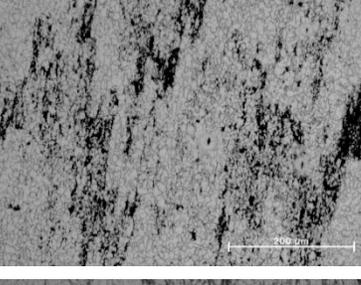
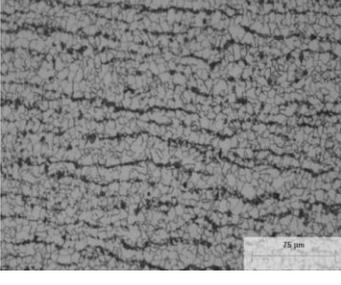
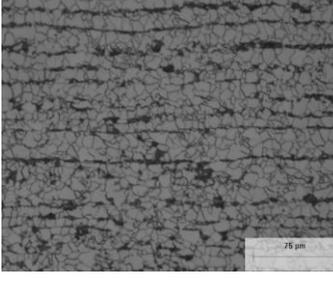
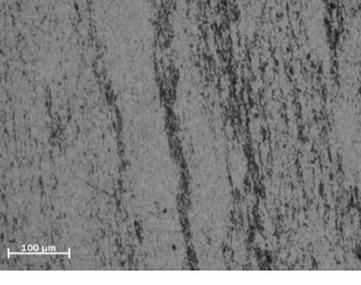
En la **Tabla 2** se muestran las microestructuras observadas, las cuales corresponden a la vista longitudinal, transversal y superficial interna de los tubos.

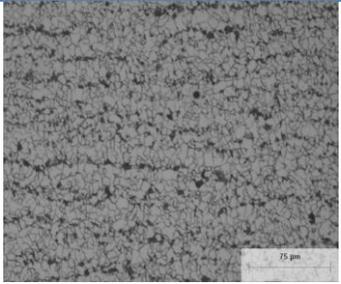
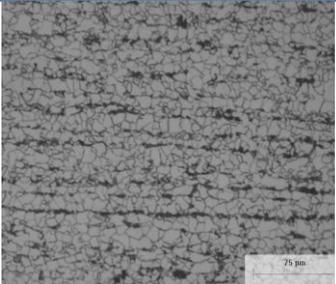
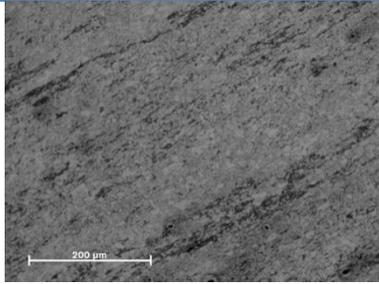
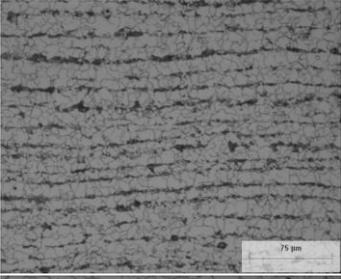
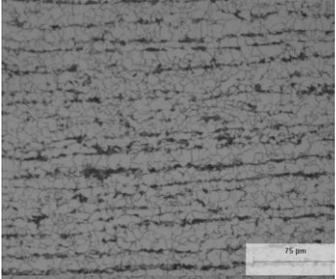
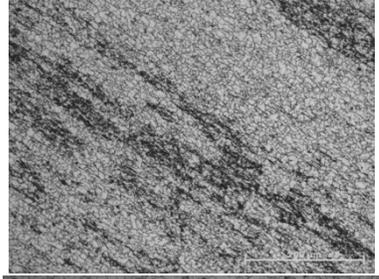
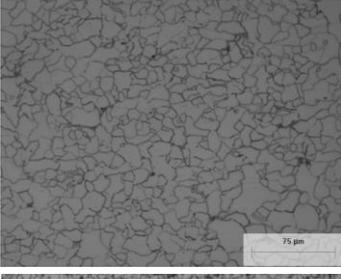
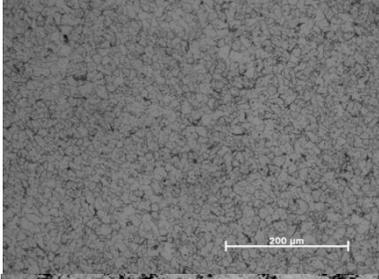
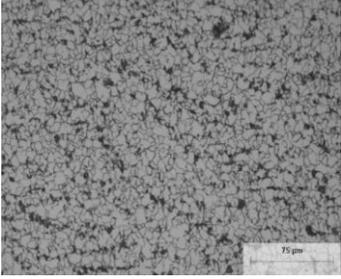
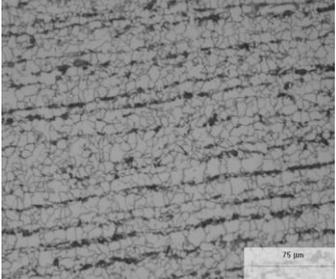
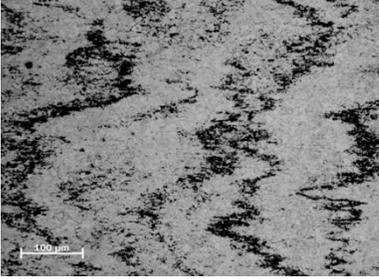
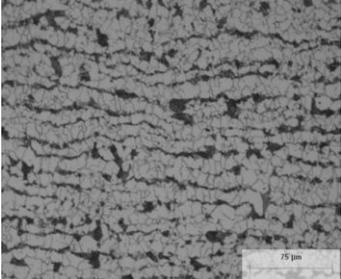
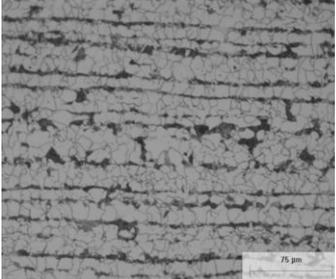
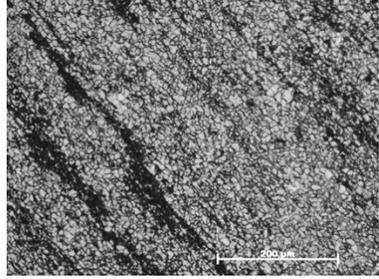
Tabla 2. Microestructura de muestras en secciones transversal, longitudinal y superficial. Microscopio metalográfico campo claro.

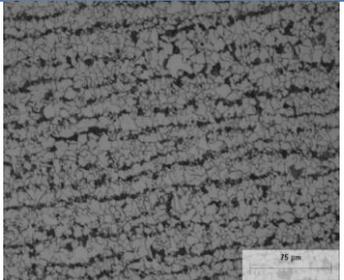
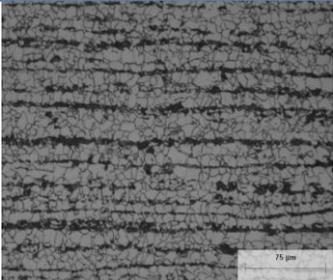
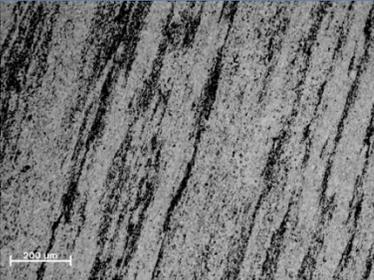
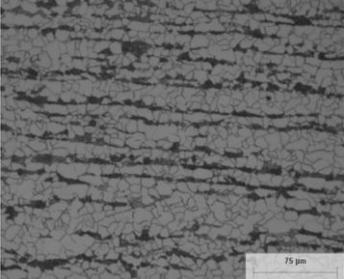
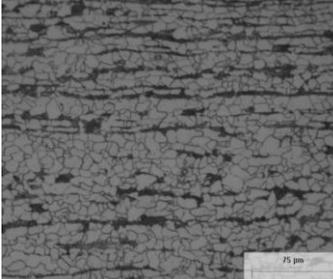
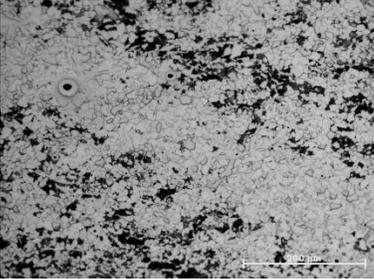
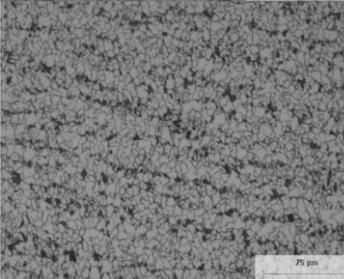
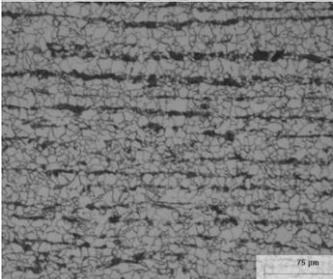
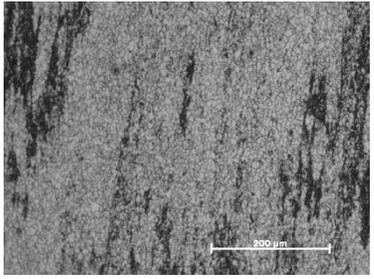
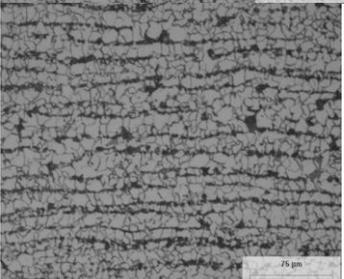
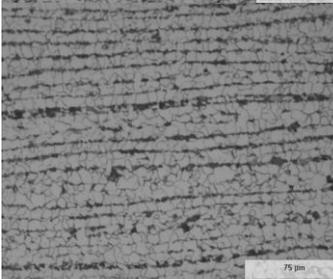
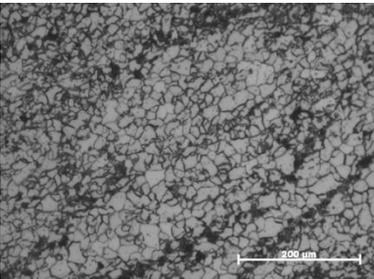
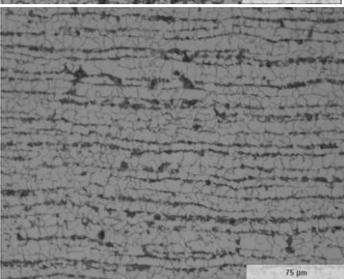
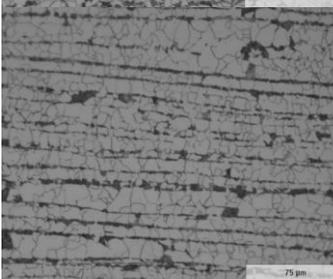
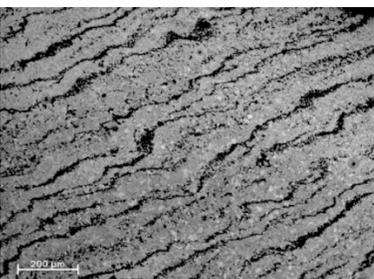
ID	Dirección Transversal(G)	Dirección Longitudinal (F)	Dirección Superficial (S)
A1			
A2			
A3			
A4			

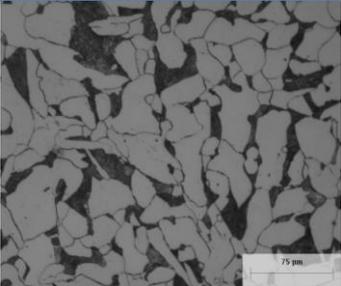
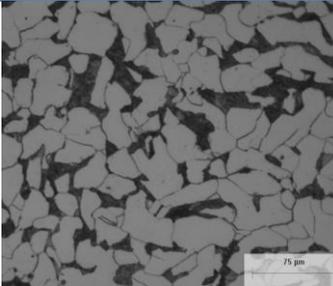
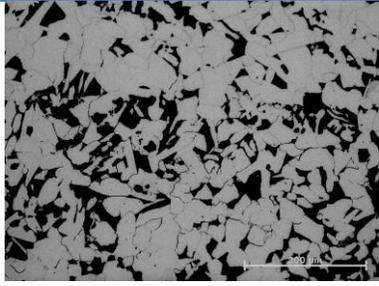
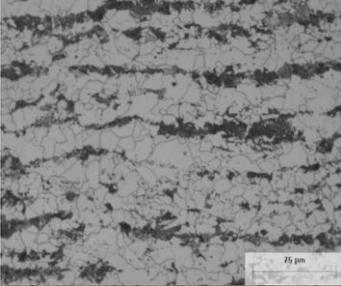
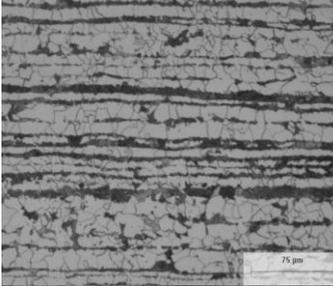
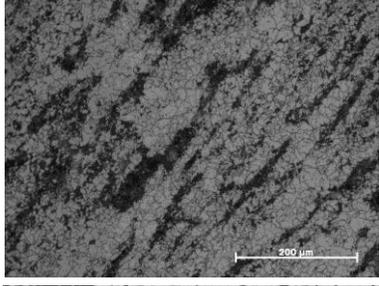
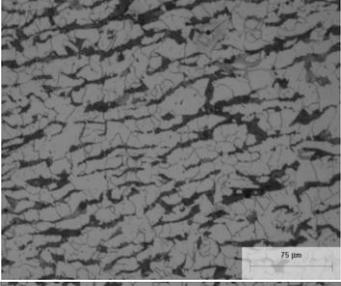
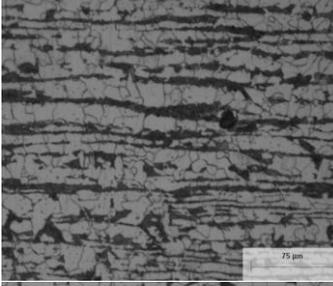
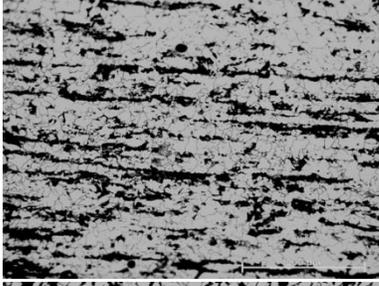
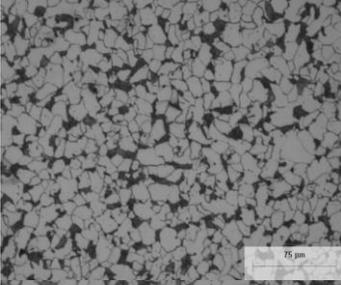
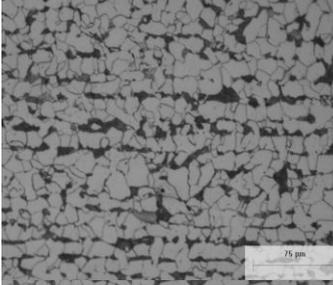
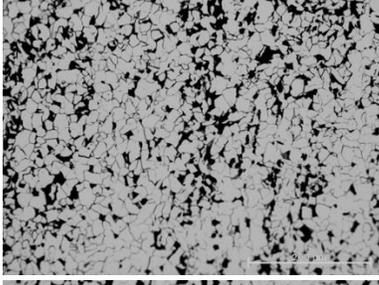
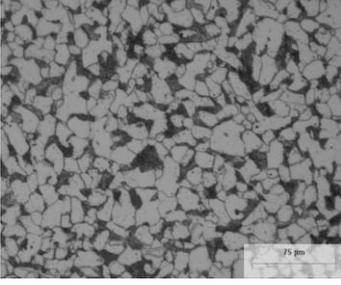
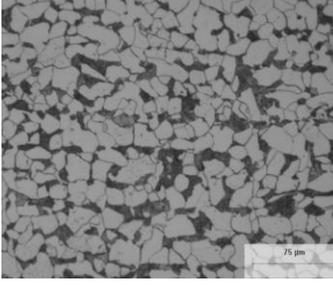
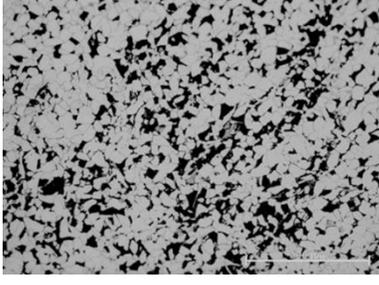
ID	Dirección Transversal(G)	Dirección Longitudinal (F)	Dirección Superficial (S)
A5			
A6			
A7			
A8			
A9			

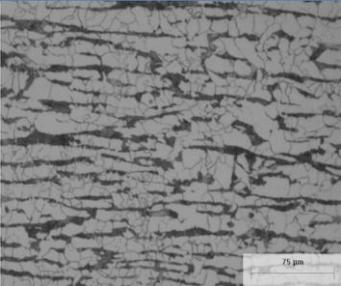
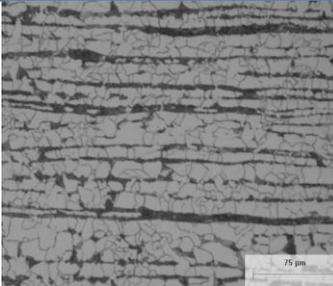
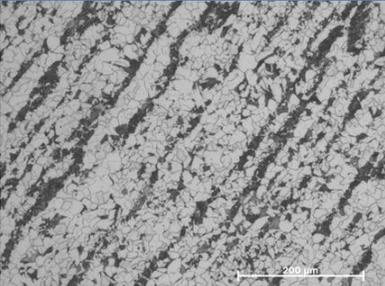
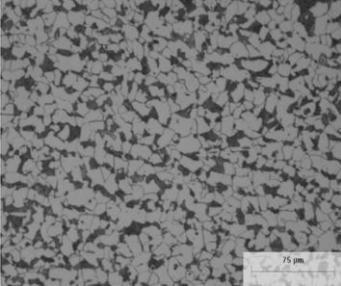
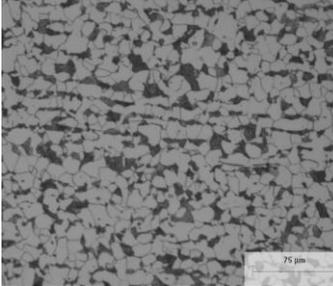
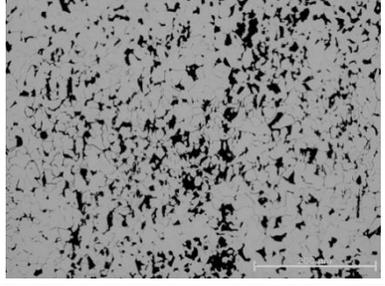
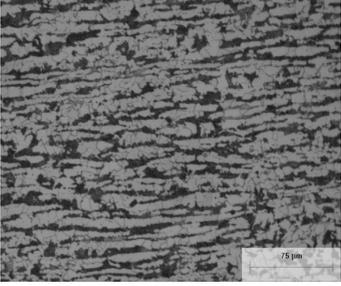
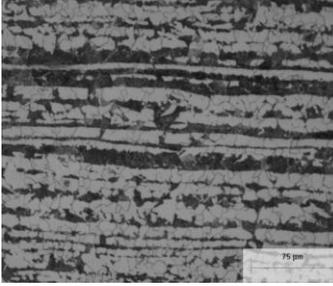
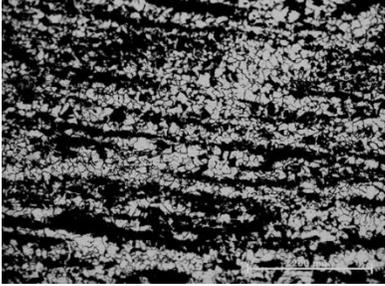
ID	Dirección Transversal(G)	Dirección Longitudinal (F)	Dirección Superficial (S)
A10			
A11			
A12			
A13			
A14			

ID	Dirección Transversal(G)	Dirección Longitudinal (F)	Dirección Superficial (S)
A15			
A16			
A17			
A18			
A19			

ID	Dirección Transversal(G)	Dirección Longitudinal (F)	Dirección Superficial (S)
A20			
A21			
A22			
A23			
A24			

ID	Dirección Transversal(G)	Dirección Longitudinal (F)	Dirección Superficial (S)
A25			
A26			
A27			
A28			
A29			

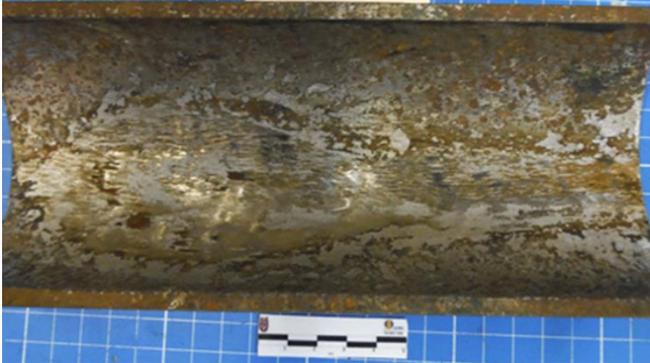
ID	Dirección Transversal(G)	Dirección Longitudinal (F)	Dirección Superficial (S)
A30			
A31			
A32			
A33			
A34			

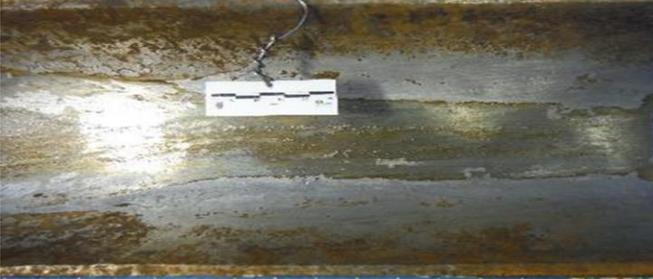
ID	Dirección Transversal(G)	Dirección Longitudinal (F)	Dirección Superficial (S)
A35			
A36			
A37			

ANEXO 3. PATRONES DE CORROSIÓN.

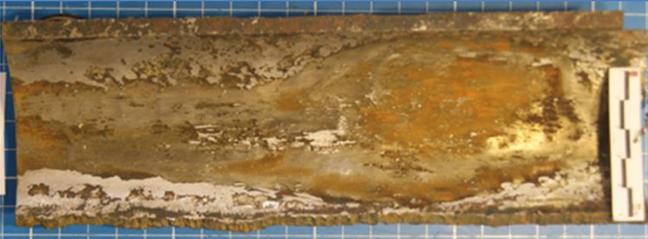
La **Tabla 3** muestra los patrones de corrosión obtenidos como resultado de la prueba de flujo dinámico, el tipo de corrosión los productos de corrosión encontrados.

Tabla 3. Patrón de corrosión de muestras desarrollados durante la prueba de flujo dinámico.

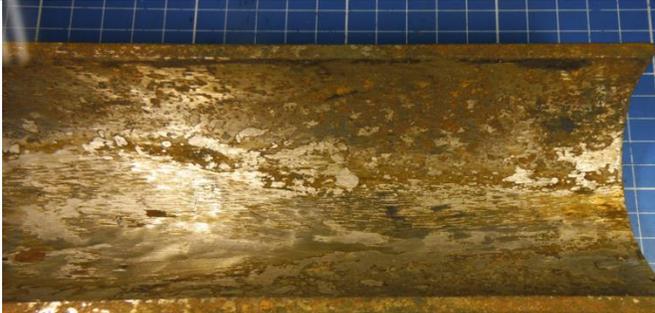
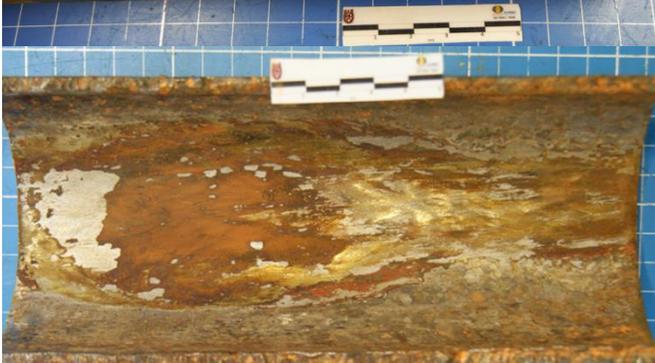
ID muestra	Patrón de corrosión	Tipo de corrosión	Presencia de productos de corrosión
A1		Uniforme	Alta
A2		Uniforme	Alta
A3		Uniforme	Baja

ID muestra	Patrón de corrosión	Tipo de corrosión	Presencia de productos de corrosión
A4		Uniforme	Baja
A5		Uniforme	Alta
A6		Uniforme	Baja
A7		Uniforme	Baja
A8		Uniforme	Baja

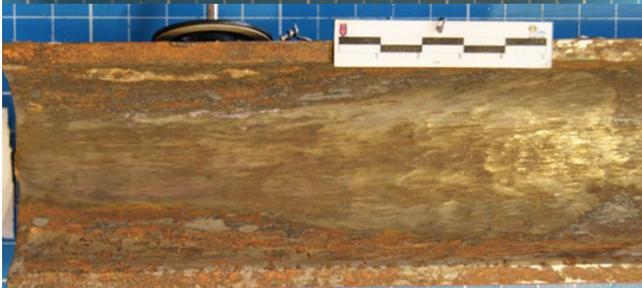
ID muestra	Patrón de corrosión	Tipo de corrosión	Presencia de productos de corrosión
A9		Uniforme	Baja
A10		Uniforme	Alta
A11		Uniforme	Alta
A12		Uniforme	Alta

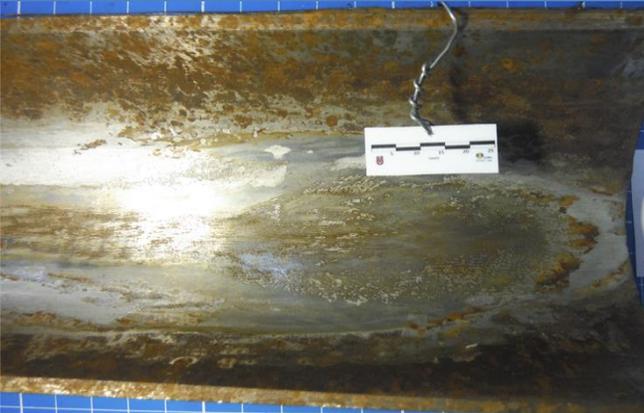
ID muestra	Patrón de corrosión	Tipo de corrosión	Presencia de productos de corrosión
A13		Uniforme	Alta
A14		Uniforme	Alta
A15		Uniforme	Baja
A16		Uniforme	Baja
A17		Uniforme	Alta

ID muestra	Patrón de corrosión	Tipo de corrosión	Presencia de productos de corrosión
A18		Uniforme	Baja
A19		Uniforme	Baja
A20		Uniforme	Alta
A21		Uniforme	Alta

ID muestra	Patrón de corrosión	Tipo de corrosión	Presencia de productos de corrosión
A22		Uniforme	Baja
A23		Uniforme	Alta
A24		Uniforme	Alta
A25		Uniforme	Alta

ID muestra	Patrón de corrosión	Tipo de corrosión	Presencia de productos de corrosión
A26		Uniforme	Baja
A27		Uniforme	Baja
A28		Uniforme	Baja
A29		Uniforme	Alta

ID muestra	Patrón de corrosión	Tipo de corrosión	Presencia de productos de corrosión
A30		Uniforme	Alta
A31		Uniforme	Alta
A32		Uniforme	Alta
A33		Uniforme	Alta

ID muestra	Patrón de corrosión	Tipo de corrosión	Presencia de productos de corrosión
A34		Uniforme	Alta
A35		Uniforme	Alta
A36		Uniforme	Alta
A37		Uniforme	Baja