

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**ANÁLISIS DEL PROCESO DE CORROSIÓN PRODUCIDA EN  
LA JUNTA DE SOLDADURA DE TUBERÍA API 5L X70,  
POR EL TRANSPORTE DE CRUDO**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MASTER (MSc)  
EN SISTEMAS DE TRANSPORTE DE PETRÓLEO Y DERIVADOS**

**AUTORES:**

**Ing. Adolfo Luis Ballesteros Medina**

**Ing. Luis Guillermo Cahueñas Cotacachi**

**DIRECTOR:**

**Ing. Patricio Estupiñán MSc.**

**Quito, Febrero 2012**

## **DECLARACIÓN**

Nosotros, Ing. Luis Cahueñas e Ing. Adolfo Ballesteros declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o certificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

**Ing. Luis Cahueñas**

---

**Ing. Adolfo Ballesteros**

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por:  
Luis Cahueñas y Adolfo Ballesteros bajo mi supervisión

---

**Ing. Patricio Estupiñán, MSc**  
**DIRECTOR DE PROYECTO**

## **DEDICATORIA**

Dedico el presente trabajo a mi querida esposa Sonia que sabe comprenderme y respaldarme en mis planes, a mis padres Adolfo y Ruth por su ejemplo y dedicación, a mis hermanos Hipatia, Fanny y David por su apoyo y a mis sobrinitos que siempre están en mi corazón.

Adolfo

A Livia, mi esposa; Edgar y Nathalie, mis hijos; por su comprensión y aliento permanente en lograr que se cumpla el objetivo.

Luis

## **AGRADECIMIENTO**

Al concluir el presente trabajo, deseamos expresar nuestro sincero agradecimiento al Ing. Patricio Estupiñán MSc, nuestro Director de Tesis por el apoyo brindado para el desarrollo de este trabajo, así como también al Ing. Homero Barragán MSc, por su valiosa cooperación y asesoría.

Desearíamos además agradecer a Escuela Politécnica Nacional y particularmente a la Facultad de Ingeniería Mecánica por la oportunidad de adquirir una excelente formación académica de cuarto nivel.

Finalmente a nuestros familiares, compañeros y amigos, que han contribuido de una y otra manera a la culminación de esta importante etapa académica en nuestras vidas.

## **RESUMEN**

En el presente tema de tesis se analiza la velocidad y la resistencia a la corrosión producida por el agua sedimentada de crudo en la zona interna del cordón de soldadura de una tubería API 5L X70 con electrodos E6010 y E7018.

Se utiliza el método experimental mediante una cámara de niebla salina desarrollada para simular el medio corrosivo sobre los que se encuentra trabajando la tubería de oleoducto y soldadura, según los estándares internacionales para la prueba de corrosión como la NACE TMO-284 y ASTM B117.

Se realiza un ensayo complementario utilizando una cámara de inmersión que simula condiciones de operación de un oleoducto que transporta un fluido bifásico: líquido-gas.

Se presentan análisis comparativos en ensayos de doblado y tracción para estos dos métodos: cámara de niebla salina y de inmersión.

Utilizando el registro fotográfico del avance de la corrosión durante el periodo de prueba se indican los efectos de la corrosión sobre las juntas soldadas, especialmente en cordones con defectos de soldadura.

Finalmente este estudio presenta conclusiones que puedan ser utilizadas en el trabajo que desarrolla la industria para los sistemas de transporte de crudo y derivados.

## **SUMMARY**

This present topic of thesis examines the speed and resistance to corrosion by crude, due to settled water in the inner zone of the weld on pipe API 5L X70 using E6010 and E7018 electrodes.

Experimental method uses a salt spray chamber developed to simulate the corrosive medium on which the pipe and the weld zone are working, according to international standards for corrosion testing such as NACE TMO-284 and ASTM B117.

An additional test is performed using an immersion chamber that simulates operation conditions of a pipeline that carries a two-phase fluid: liquid-gas.

Comparative analysis are presented in bending and tensile tests for these two methods: salt spray chamber and immersion chamber.

Using the photographic record of the corrosion progress during the test period indicates the effects of corrosion on the welded joints, especially in weld beads with defects.

Finally, this study presents conclusions that can be used in the work that the industry develops for systems of transport crude and derivatives.

## **PRESENTACION**

La zona más sensible a la corrosión en una tubería, es la soldadura, este es un efecto permanente e ineludible que se debe considerar en los Sistemas de Transporte de Crudo y Derivados mediante oleoductos, por esta razón es necesario realizar un análisis de esta problemática considerando los materiales y procedimientos más usuales en la industria petrolera del país.

Este estudio será útil en la búsqueda de nuevas técnicas y selección de materiales que mejoren la durabilidad y resistencia a la corrosión de juntas soldadas en el transporte de crudo, que permitirá reducir los efectos de posibles amenazas al medio ambiente por roturas imprevistas.

El presente trabajo de investigación se ha desarrollado en el primer capítulo los antecedentes, justificación y alcance del proyecto, y especialmente los objetivos generales y específicos.

En el capítulo dos se presenta un estudio teórico de los materiales utilizados en oleoducto, procedimientos e inspecciones de soldadura, además de los principios, factores y tipos de corrosión. Además de una breve descripción de la Integridad de oleoductos.

En el capítulo tres se describe el desarrollo experimental respecto a construcción y preparación de cámaras de ensayo, preparación de probetas, la metodología de toma de resultados y preparación de resultados.

El capítulo cuatro corresponde a la presentación de resultados, análisis y evaluación de los mismos.

Finalmente en el capítulo cinco se desarrollan las conclusiones y recomendaciones que se ha obtenido en el presente trabajo de investigación.



## **CONTENIDO**

### **CAPÍTULO 1**

#### **JUSTIFICACION Y OBJETIVOS DEL TEMA**

---

1.1	ANTECEDENTES	1
1.2	JUSTIFICACIÓN	2
1.3	ALCANCE DEL PROYECTO	3
1.4	OBJETIVOS	4
	1.4.1 Objetivo general	4
	1.4.2 Objetivos específicos	5

### **CAPÍTULO 2**

#### **ESTUDIO TEORICO**

---

2.1	INTRODUCCIÓN	6
2.2	MATERIALES UTILIZADOS PARA TUBERÍA DE OLEODUCTOS	6
	2.2.1 Generalidades de la tubería de acero al carbono	6
	2.2.2 Proceso de fabricación	7
	2.2.3 Composición química	7
	2.2.4 Extremos de tubería	9

2.3	PROCEDIMIENTO GENERAL DE SOLDADURA EN OLEODUCTOS	10
2.3.1	Alcance	10
2.3.2	Consumibles de soldadura	11
2.3.2.1	Compra	11
2.3.2.2	Almacenamiento y manipulación de electrodos / alambre de relleno	12
2.3.3	Inspección del procedimiento de soldadura	14
2.3.4	Inspección en la preparación de las soldaduras de ajuste	15
2.3.5	Proceso de inspección de la soldadura	17
2.3.6	Precauciones durante la soldadura de tubería revestida	18
2.3.7	Inspección visual	18
2.3.8	Procedimiento de pruebas no destructivas	20
2.3.9	Registros	21
2.3.10	Reparación de soldadura	22
2.3.11	Calificación del soldador	23
2.4	INSPECCIÓN DE SOLDADURA EN OLEODUCTOS	25
2.4.1	Defectos De Soldadura	28
2.4.1.1	Tipos de discontinuidades	29
2.5	PRINCIPIOS DE CORROSIÓN	33
2.5.1	Generalidades	33
2.5.2	Factores que intervienen en la corrosión electroquímica	34
2.5.2.1	Metal	34
2.5.2.2	Electrolito	34
2.5.2.3	Oxígeno	35
2.5.3	Factores que estimulan la corrosión	35
2.5.4	Velocidad de corrosión	36

2.5.5	Tipos de corrosión	37
2.5.5.1	Corrosión selectiva	37
2.5.5.2	Corrosión inter granular	38
2.5.5.3	Corrosión bajo tensión	39
2.5.5.4	Picadura	39
2.6	FACTORES DE CORROSIÓN EN SOLDADURA DE OLEODUCTOS	41
2.7	ANÁLISIS DE INTEGRIDAD DE OLEODUCTOS	42
2.7.1	Análisis de falla por tenacidad	42
2.7.2	Materiales dúctiles y frágiles	42

## **CAPÍTULO 3**

### **DESARROLLO EXPERIMENTAL**

---

3.1	CONSTRUCCIÓN Y PREPARACIÓN DE CÁMARAS DE ENSAYO	44
3.1.1	Sistema de cámara de niebla salina	44
3.1.1.1	Diseño de la cámara de niebla salina	45
3.1.1.2	Sistemas complementarios al sistema de cámara salina	46
3.1.1.3	Esquema y consideraciones de operación	47
3.1.2	Sistema de cámara de inmersión	49
3.1.2.1	Esquema y consideraciones de operación	50
3.2	SOLUCIÓN SALINA	51
3.2.1	Preparación de la solución salina	51

3.3	PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS DE ENSAYO	53
3.3.1	Dimensiones recomendadas	53
3.3.2	Procedimiento de soldadura manual	54
3.3.3	Numeración, localización y orientación	54
3.3.4	Esquemas de corte de probetas	54
3.3.5	Probetas para ensayo de doblado y tracción	56
3.4	METODOLOGÍA DE TOMA DE RESULTADOS	57
3.4.1	Toma de resultados, macro y micrografías	57
3.4.2	Limpieza y toma de resultados finales	58
3.5	PREPARACIÓN DE MUESTRAS Y RESULTADOS	59

## **CAPÍTULO 4**

### **RESULTADOS Y ANALISIS**

---

4.1	INTRODUCCIÓN	60
4.2	CONSIDERACIONES	61
4.3.	EVALUACIÓN DE RESULTADOS	62
4.3.1	Evaluación de pesos	62
4.3.2	Evaluación de espesores	64
4.3.3	Cálculo de fisuras (cracks)	66
4.3.3.1	Análisis de fisuras para probetas de cámara salina	66
4.3.3.2	Análisis de fisuras para probetas en inmersión	70
4.3.4	Evaluación del análisis de falla en probetas a tracción	74
4.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	76

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSIONES**

---

5.1	CONCLUSIONES	87
5.2	RECOMENDACIONES	89
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

## ÍNDICE DE TABLAS

### CAPÍTULO II

---

2.1 - Espesores de pared y ángulos máximos	9
2.2 - Características de electrodos	14
2.3 - Mínima separación entre cordones de suelda	19
2.4 - Plan de pruebas e inspección	25
2.5 - Principales métodos de inspección no destructiva	26

### CAPÍTULO III

---

3.1 - Materiales utilizados para la cámara de niebla salina	45
3.2 - Porcentajes permisibles de impurezas en la solución salina	51
3.3 - Concentraciones medidas para el agua utilizada en el ensayo	52
3.4 - Características de la tubería para extraer las probetas	53
3.5 - Esquema adoptado para numeración de probetas	56

### CAPÍTULO IV

---

4.1 - Evaluación de pesos de probetas de inmersión	62
4.2 - Evaluación de pesos de probetas de cámara salina	63
4.3 - Evaluación de espesores de probetas de cámara salina	64
4.4 - Evaluación de espesores de probetas en inmersión	65
4.5 - Medición de fisuras en probetas con soldadura SMAW de cámara salina	69

4.6 - Medición de fisuras en probetas con soldadura automática de cámara salina	70
4.7 - Medición de fisuras en probetas con soldadura SMAW en inmersión	73
4.8 - Medición de fisuras en probetas con Soldadura automática en inmersión	74
4.9 - Mediciones para áreas, originales y reducidas en tracción	74
4.10 - Resultados de carga y resistencia de ensayo a tracción	75
4.11 - Variación del peso en probetas de cámara salina	78
4.12 - Variación del peso en probetas en inmersión	79

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO II

---

2.1 - Esquema de la velocidad de corrosión	36
2.2 - Principales tipos de corrosión	37
2.3 - Microestructura de corrosión inter granular de tubería	38
2.4 - Corrosión bajo tensión en tubería	39
2.5 - Corrosión por picadura debido a la presencia de CO <sub>2</sub>	40
2.6 - Curvas de transición frágil-dúctil para aceros	43

### CAPÍTULO III

---

3.1 - Distancias recomendadas para elementos de cámara de niebla salina	44
3.2 - Dimensiones principales para la cámara de niebla salina	45
3.3 - Esquema y equipos complementarios para la cámara de niebla salina	46
3.4 - Esquema de operación para la cámara de niebla salina	47
3.5 - Cámara de niebla salina operando	48
3.6 - Dimensiones principales para la cámara de inmersión	49
3.7 - Esquema de operación para la cámara de inmersión	50
3.8 - Cámara de inmersión operando	50
3.9 - Distribución del corte para probetas con soldadura automática	55
3.10 - Distribución del corte para probetas con soldadura manual (SMAW)	55
3.11 - Distribución del corte para muestras	59



## CAPÍTULO IV

---

4.1 - Esquema para el cálculo de fisuras en probetas	66
4.2 - Medición de fisuras en probeta a.2	67
4.3 - Medición de fisuras en probeta b.1	68
4.4 - Medición de fisuras en probeta C.1	71
4.5 - Medición de fisuras en probeta D.1	72
4.6 - Comparación de avance de corrosión en probetas a 10X	76
4.7 - Variación del peso en probetas de cámara salina	78
4.8 - Variación del peso en probetas en inmersión	79
4.9 - Tamaño de grano de probetas de cámara salina a 100X	81
4.10 - Tamaño de grano de probetas en inmersión a 100X	82
4.11 - Diagrama de Potencial del Hierro en Agua a 25° C	83
4.12 - Micrografías de probetas de doblado a 100X	85
4.13 - Sección de falla en probetas a tracción	86

# **CAPITULO 1**

## **JUSTIFICACION Y OBJETIVOS DEL TEMA**

### **1.1 ANTECEDENTES**

Los efectos de la corrosión sobre instalaciones y equipos industriales producen anualmente pérdidas que llegan a cifras muy importantes, en los países industrializados se ha valorado en el 3% del PBI. Este porcentaje puede tomarse sobre la valoración equivalente de la industria petrolera y del gas, para llegar a una cuantificación aproximada de sus efectos económicos. <sup>[17]</sup>

De todas las fallas que ocurren en las operaciones de la industria del gas y del petróleo la más importante es la corrosión con el 33% de los casos como puede verse en la tabla siguiente:

FALLAS EN LA INDUSTRIA PETROLERA <sup>[17]</sup>

<b>Tipos de fallas</b>	<b>%</b>
Corrosión	33
Fatiga	18
Daño mecánico	14
Fractura frágil	9
Defecto de fabricación	9
Defectos de soldadura	7
Otros	10

La soldadura es una de las zonas más sensible a la corrosión en una tubería, este es un efecto permanente que se debe considerar en los Sistemas de Transporte de Crudo y Derivados mediante oleoductos.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

En el país existen actualmente sistemas de transporte de crudo por oleoductos que están operando en condiciones favorables para que se desarrolle la corrosión en las tuberías. El tipo de corrosión que ocurre se distribuye aproximadamente de la siguiente forma

### CORROSIÓN EN LA INDUSTRIA PETROLERA <sup>[17]</sup>

<b>Tipos de fallas</b>	<b>%</b>
Por CO <sub>2</sub>	28
Por H <sub>2</sub> S	18
En soldadura	18
Picadura (pitting)	12
Corrosión erosión	9
Galvánica	6
Hendidura (Crevice)	3
Impacto	3
Corrosión a tensión (Stress corrosion)	3

Actualmente la industria petrolera del país requiere mayores estudios sobre la velocidad de corrosión y resistencia de la tubería en un oleoducto. De esta manera, es posible planificar en forma eficiente las acciones preventivas, especialmente respecto al tiempo de servicio.

Este estudio será útil en la búsqueda de nuevas técnicas, selección de materiales e inspección de soldadura, que mejoren la durabilidad y resistencia a la corrosión de juntas de soldadura en el transporte de crudo, esto permitirá reducir los efectos de posibles amenazas al medio ambiente por roturas imprevistas.

Por estas razones es necesario realizar un análisis de esta problemática considerando los materiales y procedimientos utilizados en la industria petrolera del país.

### **1.3 ALCANCE DEL PROYECTO**

Todas las actividades correspondientes a construcción de la cámara salina y preparación de las probetas, de este proyecto, se desarrollarán de acuerdo a las siguientes consideraciones:

- a) Se estudiará los cordones de soldadura únicamente con proceso SMAW, por ser el más utilizado en la industria petrolera del país.
- b) Se considerará solamente la soldadura producida utilizando electrodos E-6010 con E-7018, según el procedimiento de soldadura utilizado en el medio.
- c) Se soldará tubería de acero API 5L X70, que es utilizada en uno de los sistemas de oleoductos más grandes del país.
- d) Se construirá la cámara de niebla salina, tomando como referencia la norma ASTM B117.
- e) Se realizará la preparación de probetas y la solución salina tomando como referencia la norma NACE TMO-284.

- f) Se analizará únicamente la corrosión producida en el interior del tubo, producida en el cordón de soldadura, por ser el área más sensible al proceso corrosivo.
- g) Se registrarán a los parámetros y a la calidad de los cordones de soldadura bajo estudio de acuerdo a procedimientos normalizados (API 1104).
- h) No se considerarán en el análisis los efectos específicos producidos por inclusiones en el material de oleoducto.

## **1.4 OBJETIVOS**

La presente investigación, tiende a simular y analizar el proceso de corrosión que se produce en las juntas de soldadura en un oleoducto, debido al transporte de petróleo o sus derivados, por medio de mediciones y registros periódicos de parámetros que será útil para la determinación de la velocidad de corrosión.

### **1.4.1 OBJETIVO GENERAL**

Analizar el proceso de corrosión producida en la junta de soldadura de tubería API 5L X70, por el transporte de crudo.

#### **1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Obtener los resultados de la simulación del proceso corrosivo producido por el agua sedimentada de crudo en el cordón de soldadura de acuerdo a NACE TMO-284 “Evaluación de oleoductos y recipientes a presión de acero para resistencia a la fractura de Hidrógeno inducido”
- Medir, registrar y analizar la velocidad y la resistencia de la corrosión producida en la simulación, dentro de parámetros normalizados en la norma ASTM B117 “Práctica normalizada para operación de cámara de niebla salina”
- Determinar esfuerzo de tracción y tenacidad de las probetas NACE TMO-284 posterior al ensayo experimental del proceso corrosivo.

## **CAPITULO 2**

### **ESTUDIO TEORICO**

#### **2.1 INTRODUCCIÓN**

La presencia de corrosión en instalaciones, equipos petroleros y especialmente en sistemas de transporte de crudo y derivados producen pérdidas muy importantes, como se indica en los antecedentes del presente trabajo.

El CO<sub>2</sub> y el H<sub>2</sub>S son los compuestos corrosivos más importantes que se forman en el crudo y que se deben prevenir utilizando revestimientos internamente, resistentes a diferentes temperaturas, presiones, también a la abrasión y al impacto que en una medida u otra están involucrados en el sistema de tuberías y equipos.

La corrosión en la soldadura también se ubica entre los tipos de fallas, mas representativas, por ser la soldadura una de las zonas más sensible a la corrosión en una tubería, este es un efecto permanente e ineludible que se debe considerar en los Sistemas de Transporte de Crudo mediante oleoductos, por esta razón es necesario realizar un análisis de esta problemática considerando los materiales y procedimientos constructivos e inspección de acuerdo a las especificaciones del API.

#### **2.2 MATERIALES UTILIZADOS PARA TUBERÍA DE OLEODUCTOS** <sup>[12, 14]</sup>

##### **2.2.1 GENERALIDADES DE LA TUBERÍA DE ACERO AL CARBONO**

La especificación según API 5L, establece los requisitos para dos niveles de especificaciones de productos (PSL 1 y PSL 2). Estas designaciones definen diferentes niveles que la norma técnica requiere. El PSL 2 tiene requerimientos

obligatorios para carbono equivalente, de tenacidad, máximo esfuerzo de fluencia, y resistencia a la tracción máxima. Estas y otras diferencias se resumen en el Apéndice J de API 5L, donde están designados los requisitos que se aplican sólo a PSL 1 o sólo PSL 2. Aquellos que no sean designados para un determinado PSL se aplican tanto a PSL 1 y PSL 2.

Los grados referidos por las especificaciones del API SPEC 5L son estandarizados; Grados A25, A, B, X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70 y X80.

### **2.2.2 PROCESO DE FABRICACIÓN**

La tubería suministrada con la especificación API 5L deberá soldarse o no tener cordón de soldadura y se limitará al nivel de especificación del producto, grado, tipos de tuberías, y tamaño especificado.

Los procesos de fabricación y los tipos de tubería para oleoducto, son aquellos especificados en el estándar API 5L.

### **2.2.3 COMPOSICIÓN QUÍMICA**

La composición del acero utilizado para la fabricación de tubería suministrada con especificación API 5L se ajustará a los requisitos químicos que figuran en la Tabla 2A (para PSL 1) o 2B (para PSL 2) de la especificación API, en referencia. La composición de los grados intermedios (superior a X42) se ajustará a los requisitos químicos del próximo grado más alto estándar. Para los grados X42 y superior, por acuerdo entre el comprador y el fabricante, otros elementos que figuran en los cuadros 2A y 2B (los cuales incluyen columbium [niobium], vanadio y titanio, considerar las notas en las tablas), debe tenerse cuidado en la determinación del contenido de aleación para cualquier tamaño y espesor de pared de la tubería, debido a la adición de tales elementos puede afectar a la capacidad de soldadura (soldabilidad) de la tubería.

*Elementos analizados.* Como mínimo, cada análisis requerido, deberá incluir los siguientes elementos



- a. Carbón, manganeso, fósforo, azufre, cromo, columbium [niobium], cobre, molibdeno, níquel, silicio, titanio y vanadio.
- b. Boro. (Pero si el análisis térmico indica que el contenido en boro es menos del 0,001%, entonces la determinación del boro no es necesaria para el análisis del producto).
- c. Cualquier otro elemento de aleación añadidos durante la fabricación de acero con otro propósito que de desoxidación.

*Carbono equivalente (solamente PSL 2).*

Cálculo del carbono equivalente.

Para tubería PSL 2, los cálculos del carbono equivalente (CE), se basarán en el análisis de productos y se evaluará como sigue.

- a. Cuando el contenido de carbono es menor o igual a 0,12%, el equivalente de carbono se calcula utilizando la siguiente fórmula para el CE ( $P_{cm}$ ):

$$CE (P_{cm}) = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5*B$$

Si el análisis térmico indica un contenido de boro inferior a 0,001%, el análisis del producto no necesita incluir el boro y el contenido de boro puede ser considerado como cero para el cálculo de CE ( $P_{cm}$ ).

- b. Cuando el contenido de carbono es superior a 0,12%, el Equivalente de Carbono se calcula utilizando la siguiente fórmula para CE(IIW):

$$CE(IIW) = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$$

*Máximo Carbono Equivalente.*

El Carbono Equivalente no deberá superar lo siguiente:

- a. Para tubería Grado X80, para todos los grados de tubos sin costura con un espesor de pared especificado mayor de 0.800 pulgadas (20.3 mm), y para la tubería designada por el comprador con el máximo carbono equivalente de los tubos, el valor final será acordado entre el comprador y el fabricante.
- b. Para tuberías que no se tratan en el punto anterior, un CE ( $P_{cm}$ ) de 0,25% o CE (IIW) de 0,43%, según el caso.

## 2.2.4 EXTREMOS DE TUBERÍA

Los extremos de los tubos serán lisos, roscados, acampanados o preparados para acoplamiento especiales, (tubo con costura helicoidal no debe ser roscada).

Los extremos, internos y externos, deben estar libre de rebabas.

### *Extremos Planos.*

A menos que se especifique lo contrario, los tubos con extremos planos deberán ser suministrados con extremos biselados a un ángulo de 30 grados (+ 5 grados, - 0 grados) medido desde una línea perpendicular al eje de la tubería, y con la cara de raíz de  $1/16 \pm 1/32$  ( $1,6 \pm 0,8$  mm). Para tubos sin costura donde se requiere mecanizado interior para mantener la tolerancia de la cara de la raíz, el ángulo de la inclinación interna, medida desde el eje longitudinal, no deberá ser mayor que el siguiente:

**Tabla 2.1 - Espesores de pared y ángulos máximos**

<b>Espesor de pared especificado pulgadas (mm)</b>	<b>Máximo Ángulo de inclinación [°]</b>
Menos de 0.418 (10,6)	7
0.418 hasta 0.555 (10.6 hasta 14.1)	9 1/2
0.556 hasta 0.666 (Mayor que 14,1 hasta 16,9)	11
Mayor que 0.666 (16,9)	14

En el ANEXO 1 se realiza una breve descripción de las propiedades del material de la tubería.

## **2.3 PROCEDIMIENTO GENERAL DE SOLDADURA DE OLEODUCTOS**

### **2.3.1 ALCANCE <sup>[11]</sup>**

Todo trabajo debe cumplir con los requerimientos de API 1104, de acuerdo a las Especificaciones del Procedimiento de Soldadura y planos de construcción aprobados. Estas especificaciones cubren a la Línea de Tubería.

La Gerencia de Calidad en consulta con la Gerencia de Construcciones seleccionará el procedimiento de soldadura requerido para el proyecto, si un procedimiento no esta disponible, se preparará uno nuevo de acuerdo con los estándares y requerimientos del proyecto.

Antes de iniciar cualquier operación de soldadura, el procedimiento deberá ser calificado aprobado por Ingeniería de Proyectos y aprobado por el Cliente.

La Gerencia de Calidad deberá revisar el Procedimiento de soldadura y verificar que este de acuerdo con las últimas versiones de Códigos y Normas.

Todas las soldaduras de campo y taller se llevaran a cabo de acuerdo con el API 1104, según corresponda.

Ninguna soldadura se llevará a cabo antes de la emisión, por el Cliente, de la autorización de trabajo, una copia de su calificación deberán estar disponibles en la oficina de campo y el original deberá estar con el soldador. El Supervisor de Soldadura estará en constante vigilancia de la competencia de los soldadores y la Gerencia de Control de Calidad deberá asegurar la calidad.

Todas las uniones con soldadura en el oleoducto deberán llevar el código del soldador y se irán numerando progresivamente para permitir su identificación y localización en cualquier momento. Se utiliza distinta codificación o identificación para la soldadura en Línea Regular, Soldadura de interconexiones (tie-in), Cruces Especiales.

La posición de la soldadura deberá ser marcada sobre los planos y/o registrados para propósitos de identificación. La soldadura también deberá cumplir los requisitos detallados en el Alcance de las Obras.

### **2.3.2 CONSUMIBLES DE SOLDADURA <sup>[11]</sup>**

#### **2.3.2.1 Compra**

Los electrodos de soldadura y el alambre de relleno a ser usados en un proyecto deberán ser comprados, solamente después de haber consultado al Ingeniero de Calidad. Estos consumibles deberán estar conforme a los requerimientos de ASME Boiler and Pressure vessel code, sección II, parte C, y deberán ser comprados solamente a distribuidores autorizados. Cada caja de electrodos deberá contener la siguiente información:

- Nombre del Fabricante
- Especificación confirmada para clase AWS
- Diámetro
- Lote N°:
- Cantidad

Cada electrodo deberá tener la clase de electrodo, estampado claramente, a 2 pulgadas desde la parte inferior del electrodo.

Los gases protectores se deben comprar de un fabricante confiable, con la certificación que indica la calidad del gas. El gas de protección se ajustará al nivel de pureza requerido según el AWS. Los gases protectores se ajustarán a las siguientes especificaciones:

Gas Argon : Compressed Gas Association specification G-11.1,  
Grade A.  
CO2 : Compressed Gas Association specification G-6.2, Type  
F, or Federal Specification BC-C-101 Type B.

### 2.3.2.2 Almacenamiento y manipulación de electrodos / alambre de relleno <sup>[11]</sup>

Los consumibles de soldadura deberán ser almacenados y mantenidos en condición seca de acuerdo con los requerimientos de AWS A5.1 y A5.5 o ASME SFA 5.1. Los electrodos deberán ser almacenados en contenedores sellados. Cualquier electrodo que haya sido humedecido o mojado no será usado y será descartado. Los electrodos que no son de bajo hidrógeno, tales como aquellos con revestimiento celulósico no deberán ser almacenados en hornos, más bien almacenarlos en un lugar seco.

Especial cuidado se tendrá en el almacenamiento y manipulación de los electrodos de bajo hidrógeno como se indica a continuación:

- 1       **Secado:** Antes del uso de los electrodos de bajo hidrógeno, conforme a ANSI/AWS A5.1 serán secados a 260 - 430°C (500 - 800°F), mínimo por dos horas. Los electrodos de bajo hidrógeno conforme a ANSI/AWS A5.5 se secarán a menos de una hora a temperaturas entre 370°C (700°F) y 430°C (800°F) antes de comenzar a usarse. Las etapas de secado pueden ser retardadas si los electrodos son suministrados en condición seca en un contenedor herméticamente sellado.
  
- 2       **Almacenamiento:** Después de secado, el electrodo debe ser almacenado en un horno a 120°C (250°F) mínimo. Un medidor de temperatura y un termostato será necesario sobre el horno para medición y control de la temperatura.
  
- 3       **Exposición:** Los electrodos no deben ser expuestos a condiciones ambientales por más de dos horas. La exposición puede extenderse a cuatro horas si los electrodos son almacenados continuamente en un horno calentado porta electrodos a 65 ° C (150 ° F) mínimo. Los soldadores se

abastecerán con electrodos, los mismos que pueden ser usados dentro de 2 horas ó cuatro horas, dependiendo de la disponibilidad del horno porta electrodos.

- 4 **Re-secado:** Los electrodos expuestos a la atmósfera (calentados o no) por periodos menores a los permitidos, pueden ser retornados al horno, mantenido a 120°C (250°F) mínimo. Después de un periodo mínimo de cuatro horas a 120° C (250°F) mínimo, los electrodos pueden ser re-usados. Este ciclo de recalentamiento puede ser repetido más de una vez. Después de cualquier exposición en exceso del periodo permitido, los electrodos deben ser re-secados a la temperatura especificados en la Tabla 2.2. Los electrodos pueden ser resecados solamente una vez, después de ser expuestos a la atmósfera bajo 120°C (250°F), para periodos mas largos que el tiempo permitido, referirse al párrafo 3.
- 5 **Alambre de relleno para GTAW / GMAW:** Todos los alambres deben ser almacenados en contenedores sellados en un ambiente seco. Cualquier alambre que haya sido contaminado no se debe usar y debe ser desechado.
- 6 En el sitio de trabajo, el supervisor de soldadura será responsable por la emisión de electrodos al soldador. El restringirá el abastecimiento de electrodos de bajo hidrógeno al mínimo, la cantidad requerida, la cual debe ser usada dentro de cuatro horas.

**Tabla 2.2 - Características de electrodos**

<b>Norma</b>	<b>Tipo de Electrodo</b>	<b>Temperatura de Re-secado [°C]</b>	<b>Tiempo de re-secado [hs]</b>
AWS A 5.1	Bajo Hidrógeno	250 a 430	2 a 10
AWS A 5.5	Bajo Hidrógeno	370 a 430	2 a 10

### 2.3.3 INSPECCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA <sup>[11]</sup>

Los siguientes puntos deben ser chequeados por el Inspector de Soldadura, antes de iniciar la soldadura y durante la soldadura para asegurar el procedimiento, proceso y especificaciones.

- 1) Confirmación de la calificación del soldador y posesión del documento o carné de habilitación como tal.
- 2) Cumplimiento de las especificaciones del procedimiento de soldadura.
- 3) Proceso y posición de soldadura, especificados en el procedimiento y adecuados para el trabajo a realizarse.
- 4) Material base y dimensiones (diámetro, espesor).
- 5) Material de relleno y sequedad de los electrodos, temperatura de almacenamiento recomendada.
- 6) Pre-calentamiento de la tubería, en caso de requerir el material especificado.
- 7) Equipo y máquina de soldadura, calibración de parámetros y condiciones de operación adecuadas.

- 8) Tratamiento térmico Post soldadura, en caso de lo exija el procedimiento.

Todo procedimiento de soldadura deberá ser revisado, regularmente, por el Supervisor Qa/Qc, para asegurar que están actualizados.

#### **2.3.4 INSPECCIÓN EN LA PREPARACIÓN DE LAS SOLDADURAS DE AJUSTE <sup>[11]</sup>**

Antes de la producción de soldadura, la inspección debe hacerse en lo siguiente:

- 1) Preparación del Borde/Unión y chequeo de la limpieza.
- 2) El ángulo de la ranura, indicado en los planos deberá proporcionar y permitir desviaciones de  $+5^\circ$  y  $-0^\circ$ , El tamaño y ángulo de la ranura debe ser medido con la galga de ranura para suelda.
- 3) Los defectos de soldadura, tales como grietas, falta de penetración y otras discontinuidades deben ser examinadas y evaluadas, las reparaciones de ciertos defectos deben ser ejecutadas solamente por soldadores calificados.
- 4) Las abrazaderas internas se usarán solo para tuberías mayores a 16" de diámetro, excepto para interconexiones (tie-ins), donde se puede usar abrazaderas externas. Para tuberías menores a 16", se puede utilizar abrazaderas internas o externas, en soldadura de línea principal.
- 5) El máximo desalineamiento en la superficie interna de la tubería, para uniones circunferenciales debe ser menor a  $1/8"$  (3 mm) según el API 1104 item 7.2, donde t es el espesor de la sección más



delgada de la junta. Los desalineamientos pueden ser chequeadas con el uso de plantillas o galgas de desalineamientos (HI-LO).

- 6) Solamente accesorios que son re-cortados o re-biselados tendrán superficie de corte examinadas para laminación, antes de la soldadura, los Ensayos No Destructivos serán Pruebas con Penetrantes secos o Inspección con Partículas Magnéticas.
- 7) La masa de la abrazadera deberá ser diseñada, construida y ajustarse de tal manera que evite los quemones (Arc burns). Este debe ser una abrazadera elástica o fabricada de un material de placa delgada, la cual debe ser compatible con el material que se suelda.

### 2.3.5 PROCESO DE INSPECCIÓN DE LA SOLDADURA <sup>[11]</sup>

Durante el progreso de ejecución de la soldadura real, los siguientes puntos- deben ser inspeccionados:

- 1) Limpieza de la ranura.- El área debe soldarse libre de aceite, óxido, y otros materiales extraños más pequeños que 50 mm, asegurar una suelta sana en el área de soldadura.
- 2) Los requerimientos de pre-calentamiento deben ser confirmados, revisando las temperaturas de pre-calentamiento como es aplicado en el procedimiento de soldadura.
- 3) Asegurarse que el tratamiento térmico post suelta es llevado a cabo según lo especificado en el procedimiento de soldadura.
- 4) La ocurrencia de defectos no aceptables, tales como: grietas, agujeros, etc. Con respecto a cada capa de soldadura.
- 5) Remover la escoria con respecto a cada capa de soldadura.
- 6) Condiciones de penetración de raíz.
- 7) Identificación apropiada del soldador y número de la soldadura. El código de los soldadores debe estar ubicado en el lado del soldador que ha hecho el trabajo.

La soldadura no debe ser realizada cuando el viento es fuerte, ya que puede afectar la estabilidad del arco o la protección del gas protector. La velocidad del viento en el área de suelta para GTAW no debe exceder de 8 Kph (2.2 m/s).

La soldadura no debe ser hecha cuando las superficies estén húmedas o mojadas o expuestas al la lluvia o nieve o cuando el soldador este expuesto a condiciones desfavorables. Cualquier superficie mojada debe ser secada y calentada, antes de la soldadura.

La contaminación desde el ambiente tales como viento con arena, debe ser prevenida con adecuada protección.

Todas las precauciones y seguridades, deben ser consideradas para cada método de inspección.

### **2.3.6 PRECAUCIONES DURANTE LA SOLDADURA DE TUBERÍA REVESTIDA**

- 1) Asegurar que la manta cobra apropiadamente alrededor de la tubería cubriendo el área revestida en ambos lados de la suelda.
- 2) Asegurar que la manta este firme contra el área revestida, por medio de un apropiado ajuste, como un elástico, que no dañe el revestimiento durante la soldadura.
- 3) Monitorear la temperatura, usando pirómetros de contacto, para las dos primeras pulgadas del área revestida. Asegurarse que la temperatura no exceda de 232 °C (450 °F) durante la soldadura.
- 4) Cualquier tubería revestida, tendida junto a la unión de soldadura deberá ser protegida de salpicaduras durante la soldadura, usando mantas.

### **2.3.7 INSPECCIÓN VISUAL <sup>[11]</sup>**

Después de completar la soldadura, la inspección visual debe ser aplicada a lo siguiente:

- Al final de la suelda de una junta, esta deberá ser marcada, para identificación con un número de suelda y código del soldador.
- La soldadura de ranura preferentemente será hecha con una pequeña o mínima cara de reforzamiento (cap), excepto cuando se prevé de otra manera. En el caso de suelda extrema la cara de reforzamiento no excederá de 3 mm (1/8") para ascendente y 1.6 mm (1/16") para descendente.
- La soldadura debe ser libre de traslape.
- Al encender el arco fuera del área de suelda permanente se deberá evitar, si es posible, sobre cualquier metal base.
- Las escorias deben ser removidas siempre, hasta completar la suelda, por medio de diferentes métodos apropiados.
- Cuando se usa soldadura automática o semiautomática, el alambre alimentador debe sobresalir en el interior de la tubería y se debe mantener en un mínimo, de acuerdo al API 1104, ítem 6.4, Visual Examination.
- La tubería con soldadura debe ser bien alineada al cordón longitudinal, será localizado en la parte superior de la línea con 30° respecto a la vertical. Las uniones sucesivas de la tubería deben rotar el cordón longitudinal de dos juntas sucesivas de tubería, y no alinearán una con otra. La mínima separación entre cordón de sueldas será de 20°.

**Tabla 2.3 - Mínima separación entre cordones de suelda**

<b>Diámetro externo (Pulgadas)</b>	<b>Mínima separación entre cordones de suelda (mm)</b>
24"	106
32"	142
34"	151
36"	160

### 2.3.8 PROCEDIMIENTO DE PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS

Los procedimientos de END deben ser remitidos al Cliente para la aprobación.

El equipo de Radiografía consistirá de al menos de dos radiólogos con calificación y certificación.

Todo el personal de END debe ser ASNT-TC-1A, Nivel II o equivalente aprobado para el método en particular a ser usado. Los Procedimientos de END y las calificaciones y certificaciones del personal sub-contratado de END deben ser emitidos a Inspección de Proyectos del Cliente para su revisión y aprobación.

Para juntas de soldadura a tope se requiere el 100% de radiografía.

Las interconexiones con soldadura (Tie-in's) que no van a ser probadas con presión deben ser realizadas en presencia del Cliente y radiografiadas al 100%.

La inspección de todas las sueldas incluirá una banda del metal base al menos de 25 mm (1") de ancho a cada lado de la suelda.

Para la interpretación radiográfica se debe usar la edición última de API 1104.

Los alambres Identificadores de calidad de imagen (I.Q.I.) se usarán de acuerdo con ASTM E747, para las aplicaciones radiográficas.

Si resultara un deterioro de la calidad de la soldadura en más del 15% de soldadura rechazada, se deberá tomar acciones apropiadas, para detectar las causas y aislarla de tal deterioro. Si esto es atribuible al soldador esta debe ser prevenida y se someterá a una re-aprobación. Es necesario considerar una tarjeta individual del rendimiento de cada soldador a lo largo del proyecto, la cual incluye:

- Total de pulgadas lineales de suelda realizadas.
- Total de pulgadas lineales de suelda rechazada.
- Razones para el rechazo.
- Porcentaje de rechazo.

El inspector de calidad deberá marcar cada suelda con el código del soldador, quien haya realizado la junta. El código del soldador deberá ser marcado en el mismo lado de la tubería donde el soldador haya trabajado.

Por ejemplo:

<u>RP</u>	<u>HP</u>	<u>FP</u>			<u>CP</u>

Donde,

RP	1°	Paso de Raíz
HP	2°	Paso Caliente
FP	3° a n	Paso de Relleno
CP	(n+1)	Paso de Capa

Esto identificará a cada soldador, con la porción de suelda que él ha hecho.

De encontrarse fallas, no es atribuible sólo a una pobre habilidad, si no que deben llevarse a cabo, pruebas de soldadura, de la varilla/ metal de aporte, metales base y condiciones de campo, para determinar las causas de las fallas en la suelda. En el ANEXO 1 se describe alguno de los defectos que se presentan en las radiografías.

### 2.3.9 REGISTROS

Un reporte de soldadura diario, se debe entregar al Cliente o su representante. En este se identificará el diámetro de la tubería, espesor, longitud de la tubería, grados de curvado, número del tubo o número de la junta doble, número de suelda, código del soldador, proceso y WPS, temperatura de precalentamiento, fecha de la inspección visual aceptada y fecha de la soldadura. Esto debe ser incluido en el documento final emitido (As built) .

### **2.3.10 REPARACIÓN DE SOLDADURA <sup>[11]</sup>**

Todos los defectos inaceptables, tales como: agujeros, escoria, falta de penetración o fusión y otros, los cuales hayan excedido los límites especificados en el API 1104 serán removidos, reparados y nuevamente se deben soldar.

La reparación de la soldadura debe ser realizada usando un procedimiento apropiadamente calificado y aprobado.

El procedimiento debe ser el siguiente:

- Esmerilar a la profundidad del defecto
- Inspección visual
- Re-soldar y re-chequear por inspección visual y END.

Toda suelda reparada, como mínimo debe ser inspeccionada usando métodos de ensayo original. El método de ensayo, adicionalmente, puede requerir más profundidad, y debe ser autorizado por el inspector del Cliente.

Cualquier suelda que no reúna los criterios de aceptación de la norma o código aplicable deberá ser cortada o reparada.

Un defecto de suelda puede ser reparada solamente una vez, en la misma área. Es permitido reparar más de una reparación en una soldadura cuando es en diferente localización en la misma soldadura.

Las sueldas que contienen una o más grietas NO son permitidas ser reparadas. Al remover una sección de tubería que contiene una soldadura y colocar un nuevo carrito (spool), este no debe ser menor que un diámetro de longitud para ser insertado.

### **2.3.11. CALIFICACIÓN DEL SOLDADOR<sup>[11]</sup>**

La Calificación de un Procedimiento de Soldadura y Calificación del Soldador para Tuberías e Instalaciones, deben ser calificados por ensayos destructivos antes de la construcción y de acuerdo con los requerimientos del API 1104, última edición.

Todo soldador se someterá a un entrenamiento preliminar y pruebas. La lista de soldadores y de procedimientos en los que ellos van a ser probados, deberán ser preparados. El procedimiento de prueba debe ser el siguiente:

- 1) Preparar la pieza de prueba y fijar en la posición requerida sobre un soporte estable.
- 2) Seleccionar la máquina soldadora, de las características eléctricas como la aprobada en el procedimiento de soldadura.
- 3) El calificador chequeará y confirmará el ensamble de la pieza de prueba, las características eléctricas y los electrodos a ser usados según lo aprobado en el procedimiento de soldadura.
- 4) La junta debe ser calentado, si el procedimiento establece y la temperatura debe ser monitoreada con pirómetro u otro instrumento.
- 5) El soldador comenzará la soldadura, solamente después de la aprobación del Inspector.
- 6) Cada operación de la prueba debe ser presenciada por el Inspector.
- 7) Al final de la prueba, la pieza de la prueba será inspeccionada por el Inspector, y si es aceptada, esta irá a ser radiografiada.



- 8) Si la pieza de prueba es rechazada, al soldador se le dará una oportunidad más para que pruebe su habilidad.
- 9) Si el resultado de la radiografía es aceptable de acuerdo a lo especificado en el código, el examinador o calificador expedirá el carne de calificación al soldador y unan certificación indicando todos los parámetros de la prueba firmado y estampado por la autoridad de inspección.

El resultado de la prueba deberá ser monitoreado y registrado por la Gerencia de Qa/Qc del constructor o su representante. En el plano de calificación de soldadores se indicará todos los parámetros de la prueba de calificación del soldador.

Cada uno de los soldadores deberá ser identificado por un código. La gerencia de Qa/Qc deberá asegurarse de que cada soldador tenga su código único.

Toda calificación de soldadores deberá ser revisada por la Gerencia de Qc en una forma regular, para asegurarse que el plano se mantiene vigente.

Ningún trabajo de soldadura se llevará a cabo, sin primero tener el carne de Trabajo Limpio de Inspección de proyectos del Cliente.

Los registros de pruebas de calificaciones de todos los soldadores deberá ser mantenidas en el lugar de trabajo, todo el tiempo para que revise la Inspección del Proyecto del Cliente.

Un soldador, quien pase satisfactoriamente la prueba de calificación a tope, en una posición fija con el eje inclinado 45° respecto a la horizontal, será calificado para hacer suelda a tope y filete en todas las posiciones, de acuerdo al API 1104, punto 6.2.2 alcance f.

## 2.4 INSPECCIÓN DE SOLDADURA EN OLEODUCTOS

Tabla 2.4 - Plan de pruebas e inspección

PLAN DE PRUEBAS E INSPECCIÓN								
SECCION		SOLDADURA (GENERAL)						
No .	Descripción de Inspección y Pruebas	Documento de Referencia	Criterio de Aceptación	Forma de Certificación	Involucrados			
					S	Q	C	L
1	Calificación del Procedimiento de Soldadura	API 1104	API 1104	PQR	P	W	H	W
	Especificación del Procedimiento de Soldadura	API 1104	Por Cliente	WPS	P	H	H	
2	Resumen del WPS	Plan Qc	N/A		P	W	R	
3	Calificación del Soldador	API 1104	API 1104	Calificación. Carne de Certificación	P	H	H	
4	Plano de Prueba de Calificación del Soldador	Plan Qc			P	W	R	
5	Inspección de Consumibles de soldadura	ASME SEC.II			P	W	S	
6	Almacenamiento de consumibles	Plan Qc			P	W	W	
7	Preparación de la junta/Fit Up	API 1104	API 1104		P	W	S	
8	E.N.D.	ASME SEC.V	API-1104	Por Subcontratado				
	Inspección Radiográfica	API-1104				W	R	P
	Inspección con Tintas Penetrantes					W	R	P
	Inspección con Partículas Magnéticas					W	R	P
	Inspección con Ultrasonido					W	R	P
9	Calificación del Personal de E.N.D	ASNT-TC-1A	ASNT-TC-1A	Certificados de Nivel I y Nivel II		H	H	P
<b>LEYENDA</b>				<b>Código de intervención</b>				
Involucrados				P - Ejecutor				
S – Sub Contratista de Construcción				W - Presencia				
Q – Inspector Qc del Constructor				C - Certificado				
C - Cliente				H - Hold Point				
L – Laboratorio / Tercera Parte				R - Revisión				
				S - Vigilancia				

**Tabla 2.5 - Principales métodos de inspección no destructiva** <sup>[9]</sup>

<b>METODO DE INSPECCIÓN</b>	<b>EQUIPO QUE SE REQUIERE</b>	<b>PERMITE LA DETECCION DE</b>	<b>VENTAJAS</b>	<b>LIMITACIONES</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
<b>VISUALES</b>	Lente de aumento Calibrador de tamaños de soldadura Metro de bolsillo Regla de acero Normas de mano de obra de aplicación	Fallas superficiales – grietas, porosidad, cráteres no rellenados, inclusiones de escoria, alabeo, socavamiento, sobresoldadura, cordones de formación deficiente, desalineamientos, adaptación incorrecta.	Bajo costo Pueden aplicarse estando en proceso la pieza de trabajo, lo cual permite corregir las fallas. Da indicación de los procedimientos incorrectos.	Aplicables a defectos superficiales Únicamente. No proporcionan registros permanentes.	Deben ser siempre los métodos primarios de inspección, sin importar que otras técnicas se requieran. Constituyen el único tipo de inspección “en producción”. Es la función necesaria de todo el que contribuya en alguna forma a la ejecución de la soldadura.
<b>RADIOGRAFICOS</b>	Unidades comerciales de rayos X o rayos gamma, construidas especialmente para inspección de soldadura, piezas fundidas y forjadas. Facilidades fotográficas y de procesamiento. Equipo fluoroscópico visor	Fallas macroscópicas interiores – grietas, porosidad, huecos cargados de gas, inclusiones no metálicas, penetración incompleta en la raíz, socavamiento y áreas quemadas pasantes.	Cuando las indicaciones son registradas en película, se cuentan con un registro permanente. Cuando se ven en una pantalla fluoroscópica, se tiene un método de inspección interna de bajo costo.	Requieren destreza para escoger los ángulos de exposición, el equipo de trabajo y para interpretar las indicaciones. Requieren precauciones de seguridad. No son adecuados en general para la inspección de soldaduras de filete.	Muchos códigos y especificaciones requieren la inspección por rayos X. Son útiles para la calificación de soldadores y procesos de soldadura. A causa de su costo, su utilización tiene que limitarse a aquellas zonas en las que no se logre por otros métodos la seguridad deseada.
<b>DE PARTICULAS MAGNETICAS</b>	Equipo comercial especial Polvos magnéticos- en forma seca o húmeda; pueden ser fluorescentes a la luz ultravioleta	Excelentes para detectar discontinuidades superficiales y en particular grietas.	Más simples de realizar que la inspección radiográfica. Permite sensibilidad controlada. Son métodos de costo relativamente bajo.	Aplicables sólo a materiales ferromagnéticos. Requiere destreza en la interpretación de las indicaciones y en el reconocimiento de los dibujos irrelevantes. Son difíciles de usar en superficies rugosas.	Los defectos alargados paralelo al campo magnético pueden no dar dibujo; por tal razón debe aplicarse el campo desde dos direcciones cercanas a los 90° entre ambas

<p><b>DE LIQUIDOS PENETRANTES</b></p>	<p>Conjuntos comerciales de componentes, que contienen líquidos penetrantes fluorescentes o colorantes y reveladores. Equipo de aplicación para el revelador. Una fuente de luz ultravioleta si se aplica el método fluorescente.</p>	<p>Grietas superficiales no apreciables a simple vista. Excelentes para localizar fugas en los conjuntos con soldadura.</p>	<p>Aplicables a materiales magnéticos y no magnéticos. Fáciles de usar. Bajo costo.</p>	<p>Son sólo detectables los defectos superficiales. No pueden usarse con eficacia en los ensambles calientes</p>	<p>En recipiente de pared delgada revela fugas que no se detectan de ordinario por las pruebas usuales con aire. Las condiciones superficiales (humo, escoria) pueden dar indicaciones falsas.</p>
<p><b>ULTRASONICAS</b></p>	<p>Equipo comercial especial del tipo de pulsación eco o del tipo de transmisión. Dibujos estándares de referencia para la interpretación de dibujos de RF. o de video</p>	<p>Fallas superficiales y subsuperficiales, inclusive las que son demasiado pequeñas para ser detectadas por otros métodos. Especialmente para detectar defectos similares a los de laminación subsuperficial</p>	<p>Muy sensibles. Permite el sondeo de juntas inaccesibles a la radiografía.</p>	<p>Requieren un alto grado de destreza para la interpretación de los dibujos de pulsación-eco. No se obtiene con facilidad un registro permanente.</p>	<p>El equipo de pulsación – eco esta altamente desarrollado para fines de inspección de soldaduras. El equipo del tipo de transmisión simplifica la interpretación de dibujos cuando es aplicable.</p>

### 2.4.1 DEFECTOS DE SOLDADURA <sup>[9]</sup>

Para que una junta de soldadura tenga una determinada confiabilidad durante su vida útil, es necesario que la soldadura tenga un nivel de calidad apropiado. La calidad de una soldadura implica consideraciones de diseño, fabricada con los materiales especificados en los procedimientos correspondientes. De esta forma, para cada soldadura se deberá especificar el nivel de calidad requerido, el mismo que dependerá de las condiciones de servicio de cada junta en particular.

La calidad de una soldadura se relaciona directamente con la integridad de la junta. La calidad depende de la forma como se ejecutan las etapas de fabricación e inspección de tal manera que aseguren el óptimo comportamiento de la soldadura durante el ciclo de vida especificado.

La calidad de una soldadura se debe verificar mediante ensayos no destructivos. Los estándares de aceptación de las soldaduras son generalmente relacionados con cada método de inspección. Durante la inspección se evalúan todas las desviaciones y los criterios de aceptación o rechazo se determinan sobre bases muy bien definidas. En el caso de que una soldadura sea rechazada, normalmente se especifican procedimientos de reparación que permiten elevar la calidad de la soldadura y su ulterior aceptación.

La calidad de una soldadura es a veces muy difícil de definir apropiadamente, está frecuentemente gobernada por códigos, estándares, especificaciones o regulaciones soportadas en un balance racional entre economía y seguridad.

Las soldaduras son normalmente inspeccionadas considerando su geometría, integridad y otros aspectos. Así, el aspecto más importante de la calidad de una soldadura es conocer los factores que producen defectos, las técnicas más adecuadas de inspección y los procedimientos apropiados de reparación.

#### 2.4.1.1 Tipos de discontinuidades <sup>[10]</sup>

**Porosidad.** La formación de poros en la soldadura se produce debido a gases que quedan atrapados en el metal durante la solidificación. Los gases atrapados en el metal a soldarse forman poros esféricos aunque a veces también pueden ser alargados. Los poros pueden presentarse uniformemente distribuidos en la soldadura, en este caso la formación de estos poros se debe casi siempre a una falla del proceso, de los materiales, o de los dos. Porosidad agrupada, aparece generalmente debido a condiciones inadecuadas de inicio o terminación de los cordones de soldadura. La porosidad alineada es causada por la evolución de gases disueltos en el metal de soldadura. Este tipo de porosidad suele aparecer a lo largo de la intercara de la soldadura, en la raíz de la soldadura y entre pasadas. La formación de poros alargados se presenta desde la raíz hasta la parte superior del cordón de soldadura. Cuando estos poros aparecen en la parte exterior es una indicación de que seguramente habrán muchos más dispersos en el interior del cordón.

**Inclusiones.** Las inclusiones de escoria son materiales sólidos no metálicos que quedan atrapados en la zona de fusión en la intercara de las soldaduras.

- **Inclusiones de escoria.** Las inclusiones de escoria son defectos característicos producidos durante la soldadura por arco. Estas inclusiones resultan de una inapropiada técnica de soldadura, de la dificultad de acceso a la junta o de ambas. Cuando se usa una técnica apropiada de soldadura, las escorias fluyen dentro del pozo de soldadura y flotan en la superficie del metal fundido.

- **Inclusiones de tungsteno.** Las inclusiones de tungsteno se producen durante la soldadura TIG cuando el electrodo de tungsteno es sumergido en el pozo de soldadura o también cuando partículas de este metal son arrastradas por el gas protector y depositadas en el metal fundido de las soldaduras.

**Falta de fusión.** La falta de fusión en la soldadura se produce a causa del uso de una técnica inadecuada de soldadura, del diseño incorrecto de las juntas o de una inapropiada preparación de las partes a soldar. El uso de niveles muy bajos de energía de soldadura, falta de acceso a las superficies de la junta que deben ser fundidas durante la soldadura y la falta de limpieza son las causas más comunes de falta de fusión durante la soldadura de metales y aleaciones.

**Falta de penetración.** Se caracteriza como defecto cuando la extensión de la penetración hacia la raíz de una soldadura es menor que la especificada en el diseño. Este defecto se presenta cuando se aplican bajos niveles de energía de soldadura, inadecuada preparación de los bordes, la misma que resulta en un espesor demasiado grande para que el arco de soldadura pueda penetrar o un defectuoso control de la energía del arco de soldadura. La capacidad de penetración de una soldadura depende en gran parte de la fuente de calor utilizada. Hay procesos cuya característica principal es producir soldaduras de gran penetración; sin embargo, la penetración de la soldadura debe guardar un estrecho margen con la penetración especificada en el diseño. De lo contrario, las soldaduras resultantes podrían tener defectos de falta o exceso de penetración.

**Mordeduras de borde.** Las mordeduras de borde son defectos visibles que aparecen paralelamente al cordón de soldadura. Este tipo de defecto es producido por una inapropiada técnica de soldadura, por el uso de muy elevadas intensidades de corriente del arco, o por ambas causas. Las mordeduras de borde son ranuras en la zona de unión entre el metal fundido y el metal base. De esta manera, dependiendo del tamaño y profundidad pueden resultar altamente perjudiciales para las propiedades mecánicas de la junta. En la práctica, en la mayoría de las soldaduras se pueden observar mordeduras de borde pero debido a su reducido tamaño y profundidad no son consideradas de riesgo para la seguridad de la junta.

**Falta de relleno.** Este defecto ocurre debido a una falla del soldador en aportar la cantidad necesaria de metal para rellenar la junta de soldadura. El relleno apropiado está generalmente especificado en el diseño de la junta y en los procedimientos de soldadura. La falta de relleno es un defecto que causa reducción de la sección de soldadura y por lo tanto reducción de la resistencia mecánica de la soldadura. La falta de relleno es un defecto superficial que se reconoce fácilmente por lo tanto se puede solucionar ejecutando pasadas adicionales que permitan obtener el perfil apropiado.

**Grietas.** Las grietas son defectos que pueden presentarse en el metal de soldadura y en el metal base cuando los esfuerzos localizados exceden el esfuerzo de rotura del metal. El agrietamiento de la soldadura es frecuentemente asociado con el fenómeno de amplificación de tensiones en la vecindad de discontinuidades o regiones de concentración de tensiones presentes en la soldadura o en el metal base. La presencia de hidrógeno en la soldadura es otro factor que puede ser causa de agrietamiento. Las grietas pueden producirse longitudinal o transversalmente con respecto a la dirección de la soldadura. Los dos tipos principales de agrietamiento pueden ser producidos en frío o en caliente. El agrietamiento en frío ocurre después de la solidificación en las soldaduras por fusión. Este tipo de agrietamiento es casi siempre asociado con la presencia de hidrógeno y puede producirse luego de varias horas o días después de que la soldadura ha sido completada. El agrietamiento en caliente, por el contrario, se produce a elevadas temperaturas, durante la solidificación. Las grietas en frío pueden producirse tanto a través de los granos, trans granulares, como también a lo largo de los límites de grano, inter granulares. Mientras tanto, las grietas en caliente son casi siempre inter granulares.

Las fisuras son discontinuidades lineales que se forman a lo largo de los límites de grano. La fisuración ocurre en la mayoría de los procesos de soldadura, pero son más frecuentes en soldaduras producidas mediante



procesos en los que el sobrecalentamiento del metal base produce gran crecimiento del grano.

### **Irregularidades superficiales.**

**Poros superficiales.** En ciertas ocasiones se forman poros en la superficie de la soldadura. En algunos casos pueden ser poros bastante aislados pero en otros casos puede ser de varios poros por centímetro cuadrado. La porosidad superficial puede ser causada por el uso de excesiva corriente de soldadura, inadecuado suministro o selección de gas protector, o por el uso de polaridad inapropiada. La eliminación de los poros superficiales es importante porque ellos pueden contribuir a la retención de escorias en soldaduras de varias pasadas, lo que resulta en la pérdida de integridad de la soldadura.

**Otras irregularidades superficiales.** En las capas superficiales de las soldaduras se pueden producir depresiones, variaciones de altura de los cordones, irregularidad de la forma del cordón y otras irregularidades que no son consideradas discontinuidades. Sin embargo, estas discontinuidades superficiales indican que el proceso de soldadura no fue ejecutado bajo condiciones controladas o que la técnica utilizada no fue satisfactoria. Perturbaciones magnéticas, técnicas inapropiadas de soldadura e inadecuadas condiciones eléctricas pueden influir en la formación de irregularidades superficiales. Estas condiciones son el producto de inexperiencia, inaccesibilidad de la zona durante la soldadura y otros factores específicos para cada soldadura. En términos generales, la superficie de una soldadura refleja la experiencia y capacidad del soldador. La formación de soldaduras de buen aspecto superficial es necesaria no solo por apariencia sino también por razones estructurales.

## 2.5 PRINCIPIOS DE CORROSIÓN

### 2.5.1 GENERALIDADES <sup>[8]</sup>

La corrosión es un ataque destructivo de los metales que puede ser tanto de naturaleza química como electroquímica.

La corrosión química directa solo se verifica en condiciones extraordinarias que comprenden medios altamente corrosivos, una elevada temperatura o las dos condiciones. Son ejemplos los metales en contacto con ácidos o álcalis fuertes y la formación de óxido de hierro por disociación de agua en contacto con tubos de caldera sobrecalentados.

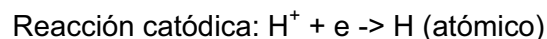
La mayoría de fenómenos corrosivos son por lo tanto de naturaleza electroquímica, el ejemplo más común son los metales que contienen agua, están sumergidos en ella o son afectadas por películas de humedad atmosférica.

El mecanismo de la corrosión electroquímica se evidencia en el caso de dos materiales que formen el ánodo y el cátodo. La reacción producida se verifica en dos partes:

- 1) la reacción anódica, durante la cual se disuelve el metal en el electrolito en forma de iones cargados positivamente



- 2) la reacción catódica, en la cual los iones cargados positivamente cubren con una capa de hidrógeno atómico la superficie catódica. Los electrones liberados por la reacción anódica circulan por el circuito metálico hasta el cátodo, donde neutralizan un número exactamente equivalente de iones de hidrógeno.



## **2.5.2 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA** <sup>[4]</sup>

### **2.5.2.1 Metal** <sup>[4]</sup>

La tendencia de un metal a disolverse en agua, conocida como presión de solución, puede medirse por el potencial eléctrico (sin corriente) que tiene que ser aplicado para evitar toda acción, cuando el metal se sumerge en una solución de una de sus sales a la concentración estándar (1 molar).

Se establece una tabla comparativa donde se clasifica a los metales en el orden de sus presiones de solución, siendo el Hidrógeno el valor 0, estando el Hierro sobre este, pero bajo el cromo, el zinc, o el magnesio que pueden convertirse en materiales de sacrificio o anódicos.

Cuando dos metales que están en contacto se sumergen en agua, el que esté arriba del otro en esta serie se vuelve anódico, sufre la corrosión y protege al otro metal, porque lo convierte en catódico.

### **2.5.2.2 Electrolito** <sup>[4]</sup>

Es el factor dominante controlable. Normalmente el agua, que está en contacto con los metales contiene impurezas, como sales, gases y vapores. Su actividad electrolítica es una función de los iones que aumentan su conductividad; por tanto, una salinidad elevada promueve la corrosión electroquímica. Mas importante es el hecho de que el agua rara vez es neutra o con un pH = 7.0, sino que es ácida o alcalina con pH superior o inferior a 7.0 respectivamente.

El exceso de iones hidrógeno que acompaña un pH decreciente aumenta la fuerza impulsora y la reacción de la corrosión electroquímica; por tanto, los ácidos y las sales ácidas producen un medio ambiente corrosivo. A la inversa un aumento en la concentración de iones hidroxilo (pH alto) abate la corrosión electroquímica y puede suministrar una excelente protección, incluso sin la formación de película.

### 2.5.2.3 Oxígeno <sup>[4]</sup>

El oxígeno gaseoso disuelto en agua reacciona con el hidrógeno atómico que se encuentra sobre las zonas catódicas de las superficies metálicas, destruye la película por despolarización y permite que continúe la corrosión. La rapidez de la corrosión se limita, en general, por la velocidad de difusión del oxígeno disuelto hacia la superficie metálica y, como consecuencia, se produce un amplio ataque del oxígeno al nivel del agua o cerca de él.

En la gran mayoría de los problemas de corrosión, el oxígeno disuelto es el que domina, y muchos de ellos pueden resolverse por completo mediante la desaireación del agua por medios mecánicos, térmicos o químicos, ya que este es el agente iniciador de la corrosión.

### 2.5.3 FACTORES QUE ESTIMULAN LA CORROSIÓN <sup>[7]</sup>

Los principales factores que estimulan la corrosión son consecuencia directa de los problemas de los factores que intervienen en la corrosión, como el oxígeno, metal y electrolito.

Cualquier condición de falta de uniformidad dentro del metal, como la que puede generar un recocido o un trabajo en frío inadecuado, puede aumentar la heterogeneidad y la intensidad de las diferencias en polaridad, el uso de metales de diferente composición puede producir la corrosión en uno de ellos.

La falta de uniformidad de las concentraciones en el electrolito produce células de concentración y, por lo tanto, favorece el ataque corrosivo. Es conocido que la falta de uniformidad en la distribución del oxígeno hace que las zonas expuestas a una baja concentración de oxígeno sean anódicas, en relación con las que están con una concentración más elevada de oxígeno.

La corrosión atmosférica se estimula con una atmósfera húmeda porque se mantiene una película de agua sobre el metal y suministra el electrolito esencial. Otros factores son gases ácidos en la atmósfera o compuestos de azufre con escorias, como los de la soldadura, coque, polvo de carbón, sales que se disocian para producir una reacción ácida y oxígeno disuelto en la película de agua.

Las medidas de protección incluyen el uso de ánodos de sacrificio, como zinc o magnesio, la aplicación de una fuerza contraelectromotriz, mediante diversos dispositivos de protección catódica y la pasivación de metales (es decir, tratarlos para reducir su solubilidad en los ácidos y la rapidez de precipitación a partir de otros iones metálicos de las soluciones). El contacto con el electrolito se evita utilizando diversos revestimientos protectores, aplicados o precipitados de la solución, como ocurre en el caso del carbonato de calcio, el cromo hidratado y los óxidos de hierro.

#### 2.5.4 VELOCIDAD DE CORROSIÓN <sup>[6]</sup>

Cuando la velocidad de corrosión es lineal o decrece con el tiempo, es posible hacer proyecciones del daño por corrosión. Cuando la velocidad de corrosión se incrementa con el tiempo (de manera exponencial) su predicción a lo largo tiempo es mucho más difícil.

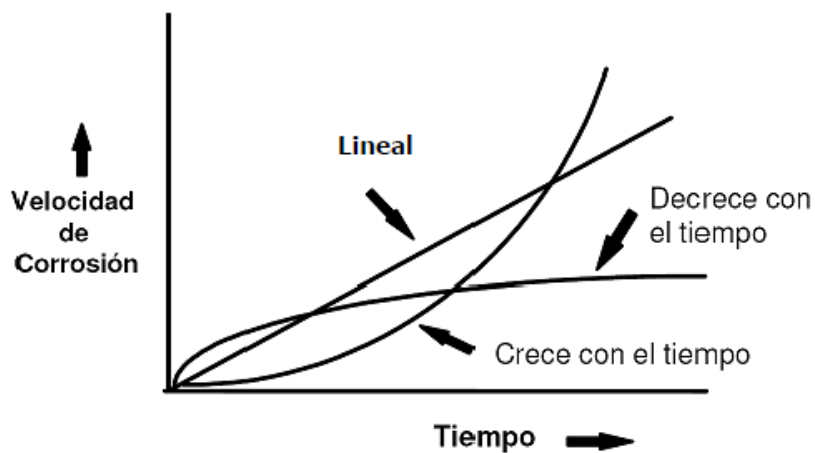
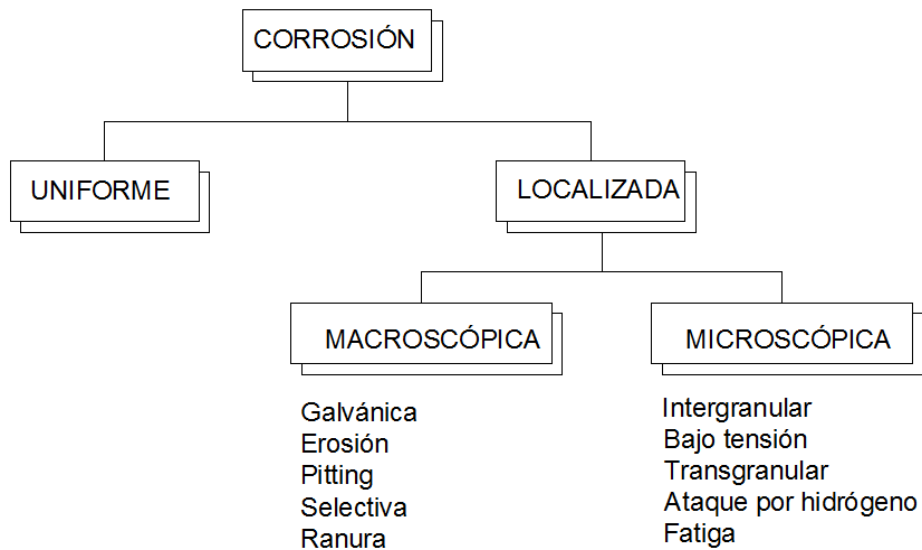


Figura 2.1 - Esquema de la velocidad de corrosión

## 2.5.5 TIPOS DE CORROSIÓN <sup>[3]</sup>

En el siguiente diagrama se muestran los principales tipos de corrosión:



*Figura 2.2 - Principales tipos de corrosión*

El presente trabajo de investigación se espera encontrar los siguiente tipos de corrosión:

- Corrosión selectiva
- Corrosión inter granular
- Corrosión bajo tensión
- Picadura

### 2.5.5.1 Corrosión selectiva <sup>[16]</sup>

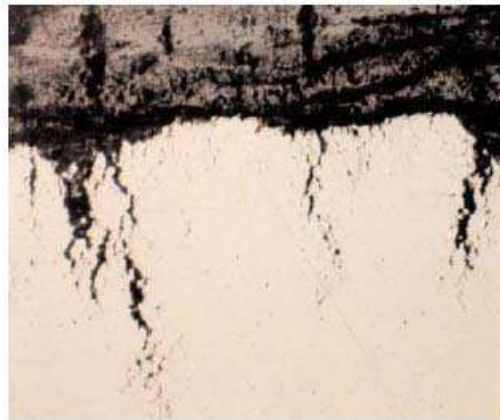
Conocida también como corrosión por placas. Consiste en un ataque que no se distribuye de forma homogénea, localizándose en determinadas zonas de la superficie metálica. El ataque en placas puede considerarse como un caso

intermedio entre la corrosión uniforme y la corrosión por picadura, donde se produce la máxima localización del fenómeno.

#### 2.5.5.2 Corrosión inter granular <sup>[16]</sup>

Cuando existe corrosión inter granular el ataque se localiza en los límites de grano del metal, producido en el empaquetamiento molecular durante la fundición de la aleación, debido a que ciertos granos de la aleación no encajaron correctamente y éstos son los puntos más susceptibles de ataque.

Como consecuencia de esto, pierde la coherencia entre granos y el material ve alteradas sus propiedades mecánicas.



*Figura 2.3- Microestructura de corrosión inter granular de tubería*

El ataque inicialmente ocurre en la superficie del metal y continúa hacia dentro como una celda de corrosión local. El metal se vuelve susceptible al ataque inter granular debido a un tratamiento térmico que puede ocasionarse en los trabajos de soldadura, éste fenómeno puede corregirse mediante otro tratamiento térmico adecuado.

### 2.5.5.3 Corrosión bajo tensión <sup>[16]</sup>

Se conoce también como corrosión fisurante y se da cuando una aleación (es poco habitual en metales puros) está sometida a tensión mecánica de tracción y se encuentra en un medio agresivo.

Se caracteriza por la aparición de grietas o fisuras que avanzan en la dirección normal a la de aplicación de la tensión.

Cuando la tensión aplicada es cíclica, el proceso se conoce como corrosión-fatiga. Es una fractura causada por la presencia simultánea de tracción en un medio corrosivo en éste se producen finas rajaduras que se van incrementando en el interior del metal, esto se deberá a esfuerzos residuales.



*Figura 2.4- Corrosión bajo tensión en tubería*

### 2.5.5.4 Picadura <sup>[16]</sup>

Es una forma de corrosión localizada y ocurre cuando un metal es protegido por una película que es parcialmente resistente, o también por el contacto directo con aguas corrosivas, éste tipo de corrosión es muy peligrosa por ser la más destructiva, pues los picaduras son difíciles de detectar y cuantificar, producen fallas repentinas además que el proceso de desarrollo es auto catalítico, pues



dentro de las picaduras se producen condiciones que estimulan la actividad de formación de nuevas picaduras.

El ataque se localiza en zonas aisladas de la superficie que no suelen superar más de uno o dos milímetros cuadrados por picadura. Éstas se propagan hacia el interior del metal formando pequeños túneles que avanzan habitualmente con bastante rapidez, ya que su superficie es muy pequeña.

Las fallas por Picadura se presentan en medios que contienen cloro cloruros y la mayoría de estas aguas están presentes en los fluidos de producción de los pozos de agua de formación.

Para prevenir éste tipo de corrosión se recomienda mantener el PH alto, tratar las aguas con hidróxidos, cromatos o silicatos, incrementar la velocidad de flujo y el uso de recubrimientos.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de corrosión por picadura, debido a la presencia de CO<sub>2</sub>:



*Figura 2.5- Corrosión por picadura debido a la presencia de CO<sub>2</sub>*

## **2.6 FACTORES DE CORROSIÓN EN SOLDADURA DE OLEODUCTOS <sup>[8]</sup>**

La composición química del fluido a transportarse es fundamental para determinar el grado y el tipo de corrosión que tendrá una tubería, así los fluidos de tipo ácido provocan una corrosión del mismo tipo.

Otro factor importante que interviene es el material de la tubería, durante la etapa de diseño se selecciona el material (material base y soldadura) adecuados para resistir, la presión de trabajo a un rango de temperatura. Además siempre se debe considerar la composición química del material (elementos aleantes) para que la corrosión sea la mínima posible, en caso contrario se establece un sobre espesor equivalente a la pérdida de material en período de vida establecido para su operación.

La combinación de corrosión y erosión ocasionan una pérdida de material significativamente más alta del efecto que existiría por separado. Además tiende a aumentar en caudales que tengan elevada cantidad de partículas sólidas circulando a altas velocidades. Este fenómeno se puede presentar en oleoductos cercanos a estaciones de bombeo y estaciones reductoras.

Es importante insistir en el compromiso que existe entre el tamaño de grano y las propiedades mecánicas, conociendo que a un menor tamaño de grano el efecto corrosivo aumenta pero las propiedades mecánicas mejoran respecto a condiciones contrarias.

La calidad de la soldadura es determinante para establecer la intensidad con que la corrosión afecta al material de aporte y al material base, en la práctica es posible clasificar todos los defectos de soldadura en función del daño que pueden ocasionar, Ver ANEXO 1.

## **2.7 ANÁLISIS DE INTEGRIDAD DE OLEODUCTOS <sup>[13]</sup>**

### **2.7.1 ANÁLISIS DE FALLA POR TENACIDAD**

La tenacidad de la tubería es un parámetro que permite determinar un diseño más resistente a fenómenos de la operación del transporte de crudo y derivados, esto se debe a que se trabajan con valores altos de presiones (sobre los 5000 kPa) y diámetros entre 16 in y 36 in en nuestro medio.

Los efectos de los concentradores de tensión, iniciados por un golpe, o por fenómenos de corrosión pueden agravarse con el transcurso del tiempo, para ello es necesario establecer cuál es el valor de rotura catastrófica que puede tolerar el material, previniendo en todo caso la falla por fractura frágil.

Para ello se debe revisar la composición química del material, así como los valores de resistencia y tenacidad del material, estableciendo además un criterio de normalización para el análisis.

### **2.7.2 MATERIALES DÚCTILES Y FRÁGILES**

Los dos tipos básicos de materiales que existen son dúctiles y frágiles, en los últimos se tiene planos de clivaje, no existe reducción de área al presentarse la elongación y se tiene puntos brillantes en el área luego de producirse la fractura.

En los materiales dúctiles se encuentra lo contrario una superficie transversal de fractura opaca o gris y existen cambios significativos en la sección. Para determinar si se trata de un material dúctil o de uno frágil es necesario observar los porcentajes de elongación.

El porcentaje de elongación se determina mediante la fórmula:

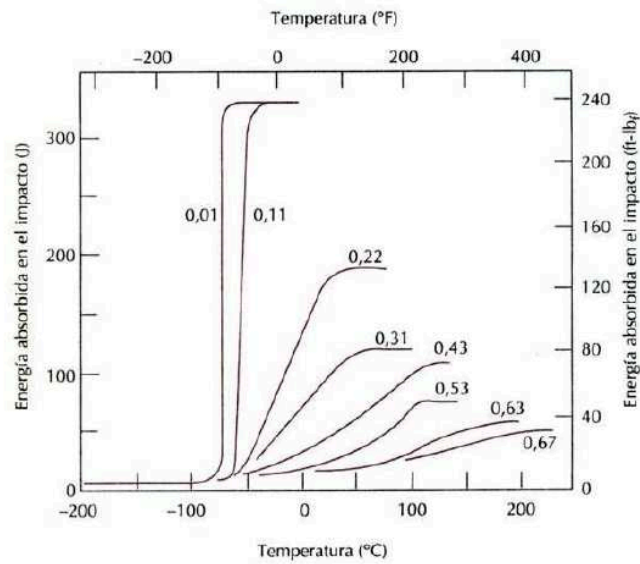
$$\%E = \frac{A_o - A_r}{A_o}$$

Donde:

$A_o$  : Área transversal original (in<sup>2</sup>)

$A_r$  : Área transversal reducida (in<sup>2</sup>)

Los materiales dúctiles poseen un porcentaje de deformación sobre el 20% mientras que los materiales frágiles se encuentran bajo el 8%.



**Figura 2.6** - Curvas de transición frágil-dúctil para aceros

## CAPITULO 3

### DESARROLLO EXPERIMENTAL

#### 3.1 CONSTRUCCIÓN Y PREPARACIÓN DE CÁMARAS DE ENSAYO

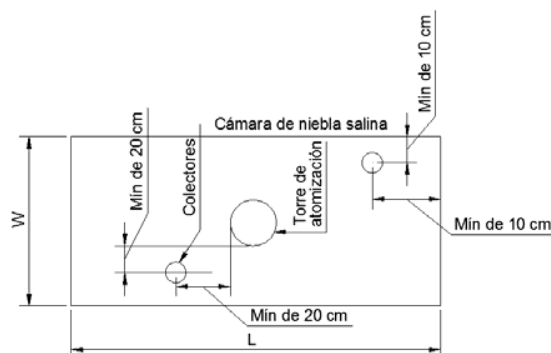
Se trabaja en función de dos sistemas de medición, el uno correspondiente a una cámara de niebla salina con atomizador que realiza un ataque intermitente a las probetas según los estándares y el otro mediante una cámara de inmersión que realiza un ataque permanente y más severo a las probetas.

##### 3.1.1 SISTEMA DE CÁMARA DE NIEBLA SALINA <sup>[2]</sup>

El sistema de cámara de niebla salina consta de una cámara que mantiene cerradas herméticamente a las probetas que deben colgarse dentro de esta, para recibir un ataque corrosivo de la solución salina durante 5 minutos durante 8 horas al día en un periodo de 3 meses (90 días). Además la zona de exposición de la cámara de niebla debe mantenerse a  $35 \pm 1.1 - 1.7^\circ \text{C}$ .

Para la atomización y definir la cantidad de niebla se deben colocar al menos dos colectores de niebla por torre de atomización con la zona de exposición para que no existan caídas de solución se deben recolectar de las probetas u otra fuente.

La posición de los colectores en la proximidad de la probetas, una cercana a cualquier boquilla y la otra lo más lejana a las boquillas.



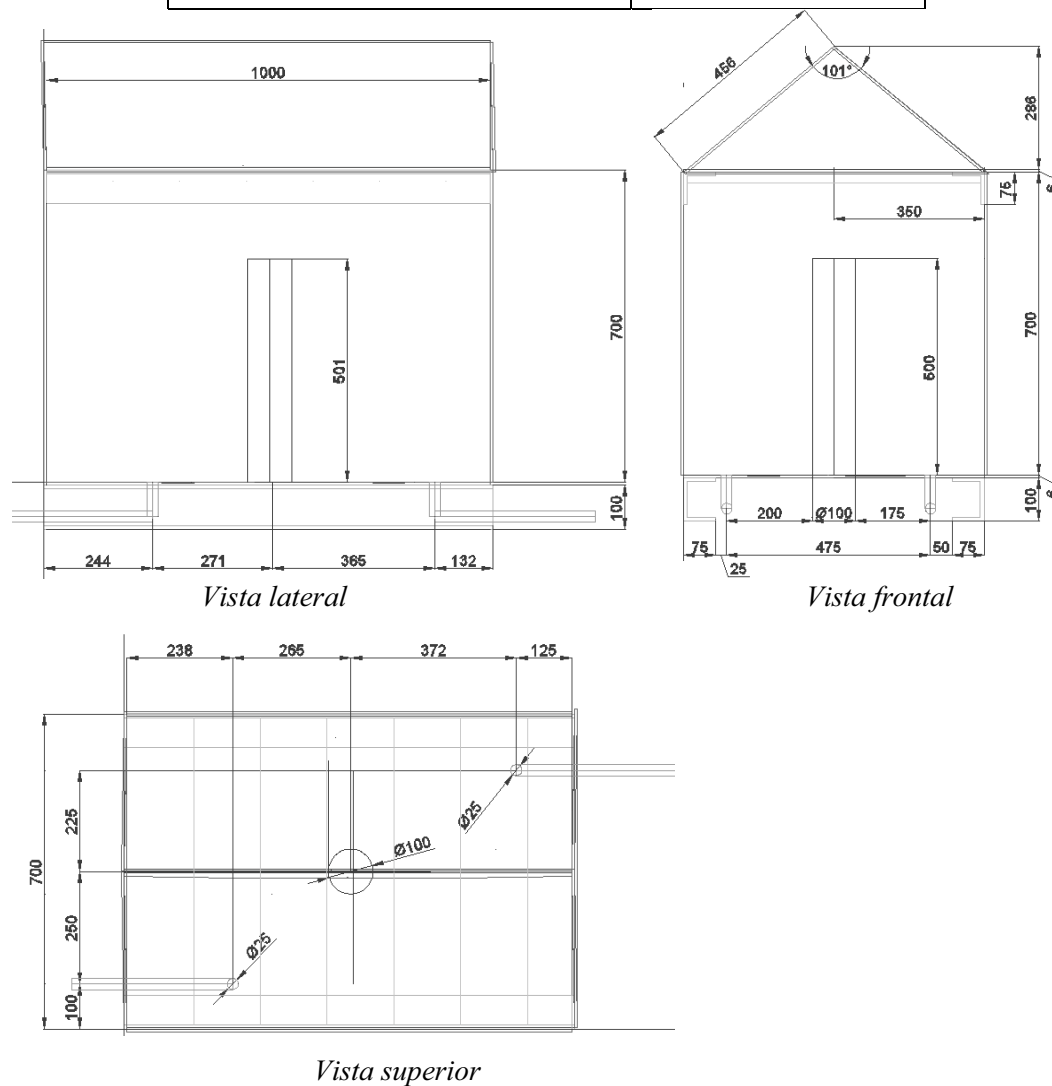
*Figura 3.1 - Distancias recomendadas para elementos de cámara de niebla salina.*

### 3.1.1.1 Diseño de la cámara de niebla salina <sup>[2]</sup>

Con las consideraciones de la norma ASTM B117 y para este estudio se utilizan las siguientes dimensiones de la zona de exposición de la cámara de niebla salina 1000 mm x 700 mm x 700 mm (largo, ancho, alto).

**Tabla 3.1 - Materiales utilizados para la cámara de niebla salina**

Elemento	Material
Techo/ Cuerpo /Fondo/ Soportes:	Acrílico
Tubería:	PVC, Bronce
Cables de sujeción de probetas:	Nylon



**Figura 3.2 - Dimensiones principales para la cámara de niebla salina**

### 3.1.1.2 Sistemas complementarios al sistema de cámara salina <sup>[6]</sup>

- *Sistema de alimentación de agua*  
Consta de una bomba que se activa en base a los parámetros del sistema de control, además de tuberías y mangueras que permiten la recirculación de la solución salina dentro de la cámara.  
Se encuentra conectado al compresor del sistema de compresión de aire.
- *Sistema de compresión de aire*  
Consta de un compresor que se activa de manera conjunta al sistema de bombeo para producir la dispersión de manera volátil de la solución dentro de la cámara, necesaria para cumplir los requerimientos de este ensayo.
- *Sistema de drenaje*  
Permite el drenado y evita la acumulación de solución salina contaminada al interior de la cámara, mediante un sistema de purgas de agua.
- *Sistema de control*  
El sistema de control permite mantener en funcionamiento el sistema de cámara salina dentro del tiempo requerido. Consta de controladores y actuadores de tipo electrónico que trabajan de manera automática.

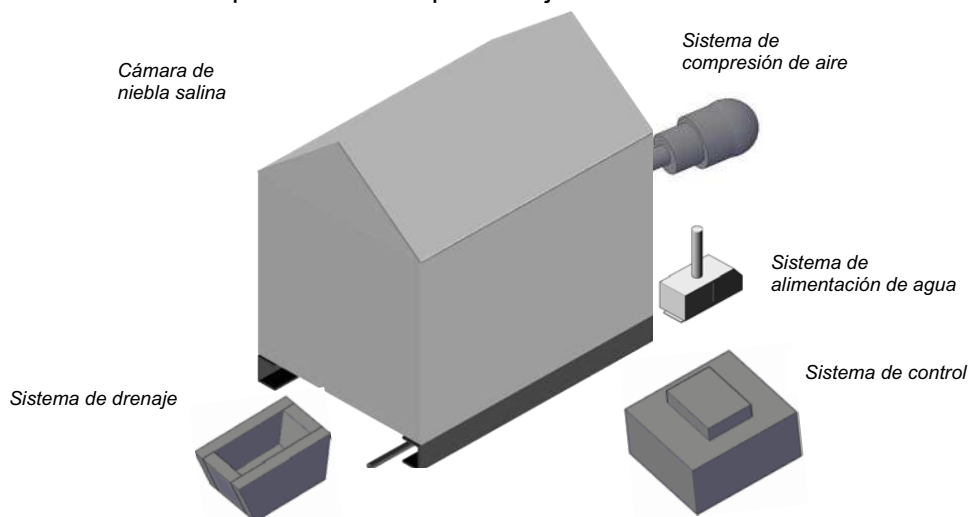
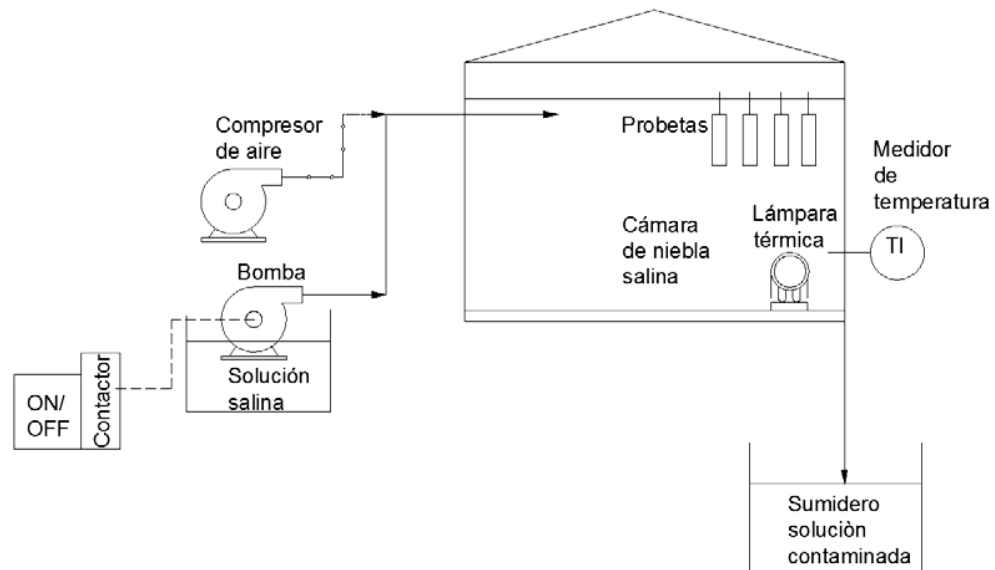


Figura 3.3 - Esquema y equipos complementarios para la cámara de niebla salina

### 3.1.1.3 Esquema y consideraciones de operación <sup>[5]</sup>

Se presenta un esquema básico, de operación de la cámara de niebla salina:



**Figura 3.4 - Esquema de operación para la cámara de niebla salina**

El funcionamiento del sistema de cámara salina, se basa en un sistema de bombeo/compresión de aire, con el fin de lograr un fluido salino presurizado y atomizado, en el que no se presenten pérdidas a través de las paredes de la cámara.

El sistema de control cumple un papel importante en el control que ejecuta al momento de encender/apagar la cámara, los parámetros de operación, establecen un funcionamiento de tipo intermitente, con paradas programadas tras encender el sistema durante cinco minutos, luego se detiene hasta la siguiente hora durante el tiempo que establece el código (90 días).

Es importante que exista un contactor de respaldo para evitar que el funcionamiento del sistema se aparte de los parámetros establecidos en el código.



El sistema de bombeo, consta de una bomba de 1/4 Hp que trabaja succionando directamente desde el contenedor de líquido salino, la bomba debe tener suficiente provisión de líquido para evitar cavitación. Se recomienda al menos un recipiente de 0.25 m<sup>3</sup>.



*Figura 3.5 - Cámara de niebla salina operando*

El compresor se conecta directamente a la línea de descarga de la bomba, por lo que este debe tener una presión lo suficientemente baja (se recomienda 60 a 65 psig) para producir la niebla salina, una vez que el fluido salga a la cámara que se encuentra a presión atmosférica.

Las probetas deben encontrarse suspendidas con una cuerda no metálica desde el techo o vigas transversales de la cámara, para evitar que sean contaminadas por otro elemento que sea la niebla salina, utilizar alambres en este procedimiento producirá pares galvánicos y corrosión adicional.

La lámpara térmica debe tener capacidad de producir condiciones de temperatura lo suficientemente severas para que la prueba tenga validez, se considera la temperatura media de 29° C ± 1° C, esta temperatura debe registrarse por lo menos una vez al día mediante un medidor de temperatura (TI).

Para el sistema de drenajes o purga del líquido contaminado se emplea un recipiente de capacidad suficiente (igual o mayor 0.125 m<sup>3</sup>) para mantener un contingente de solución salina contaminada, la misma que debe ser desechada.

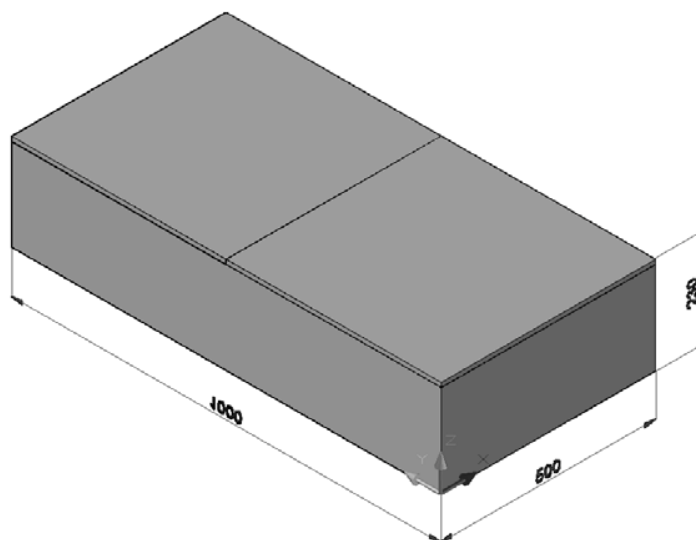
### 3.1.2 SISTEMA DE CÁMARA DE INMERSIÓN

El sistema de inmersión consta de una cámara en la cual se produce un llenado parcial de la solución salina con el fin de producir un interfase de esta con aire, simulando las condiciones de una tubería en condiciones de trabajo donde opera con dos fases: líquida y gaseosa.

El objetivo de este ensayo es verificar los efectos que produce la corrosión en estas condiciones superiores al estándar, para esto se utilizaron tiempos de ataque permanentes a diferencia del ensayo de cámara de niebla salina donde se usaron tiempos cortos programados.

El material para esta cámara es un polímero transparente que permite visualizar los efectos corrosivos, no consta de sistemas de control, ni de compresión, el drenaje se realiza cambiando manualmente la solución salina de la cámara.

Las dimensiones principales de este sistema son las siguientes:



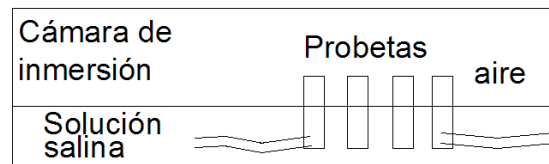
*Figura 3.6 - Dimensiones principales para la cámara de inmersión*

Como elemento de inspección y limpieza la cámara de inmersión debe constar de una tapa en su parte superior, la cual debe permitir el ingreso y salida de las probetas.

### 3.1.2.1 Esquema y consideraciones de operación

Este sistema, a diferencia del sistema de cámara de niebla salina no requiere condiciones especiales que establezca las norma NACE ya que su objetivo es tratar de reproducir las condiciones al interior de una tubería para la soldadura.

El siguiente es el esquema básico de operación para la cámara de inmersión:



*Figura 3.7 - Esquema de operación para la cámara de inmersión*

Se recomienda que la solución salina sea removida lo más periódicamente posible (a diario), para evitar la presencia de partículas contaminantes en la solución.



*Figura 3.8 - Cámara de inmersión operando*

## 3.2 SOLUCIÓN SALINA <sup>[2]</sup>

La solución salina es un elemento que sirve como agente regulador para la corrosión tanto en la cámara de niebla salina como en la de inmersión según establece el procedimiento estándar.

### 3.2.1 PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN SALINA

La solución salina debe prepararse disolviendo  $5 \pm 1$  partes por masa de cloruro de sodio en 95 partes de agua, conforme a la especificación D 1193 Tipo IV de agua, esto se consigue en la práctica mezclando 1.5 litros de agua en condiciones estándares con 2.25 kg de sal de mesa o su proporción.

Se debe prestar atención especial para los químicos que contengan sales. La sal usada debe ser cloruro de sodio con no más del 0.3% por masa de impurezas. Haluros (como el Bromuro, Fluoruro y Ioduro) otros que Cloruro deben constituir menos que el 0.1% de masa de el contenido de sal. El cobre debe contener menos 0.3 ppm por masa. El cloruro de sodio debe contener agentes anti-fraccionamiento que no debe ser usado debido a que estos pueden actuar como inhibidores de corrosión.

La *Tabla 3.2* indica una lista de restricciones de impureza permisible para la solución salina del ensayo:

**Tabla 3.2 - Porcentajes permisibles de impurezas en la solución salina**

<b>Descripción de impurezas</b>	<b>Cantidad permisible</b>
Impurezas totales	$\leq 0.3\%$
<i>Haluro (Bromuro, Fluoruro, Ioduro)</i> excluyendo Cloruro	$\leq 0.1\%$
Cobre	$< 0.3$ ppm
Agentes <i>anti-crackeo</i>	0.0%

El pH de la solución salina debe ser tal que cuando se atomice a 35° C (95° F) la solución recogida se encuentre en un rango de pH entre 6.5 a 7.2. Este valor fue verificado con la ayuda de medidores de pH.

Para evitar variaciones en la toma de datos debido a la contaminación de la solución salina con óxidos o elementos ambientales se realizó un cambio periódico de la solución salina en las dos cámaras de ensayo.

Se indican las propiedades del agua utilizada en el ensayo, con las concentraciones de sal permitidas por la norma:

**Tabla 3.3 - Concentraciones medidas para el agua utilizada en el ensayo**

<b>PARÁMETRO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>RESULTADO</b>	<b>LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE</b>	<b>PROCEDIMIENTO</b>
Cloruros, Cl	Mg/l	71,9	250	2/04/2011
Conductividad	µs/cm	117,2		APHA 2510 B
Dureza total (CaCO <sub>3</sub> )	Mg/l	56	300	APHA 2340 C
Sodio, Na	Mg/l	10,83	200	Absorción atómica

El análisis de agua permite establecer la concentración adecuada de Cloruro de Sodio para producir una mezcla adecuada de solución salina, como se indicó el valor adecuado tanto para la cámara de niebla salina como para la cámara de inmersión se obtiene mezclando 1.5 litros de agua con 2.25 kg de sal de mesa.

### 3.3 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS DE ENSAYO <sup>[1]</sup>

Como el elemento más importante del ensayo, las probetas se extrajeron de una tubería utilizada en la construcción del proyecto de crudos pesados del Ecuador (OCP), de las siguientes características:

**Tabla 3.4 - Características de la tubería para extraer las probetas**

<b>Material:</b>	API 5L X 70
<b>Diámetro</b>	34 in
<b>Espesor:</b>	1/2" (variable)

Para realizar los cortes se consideró que la tubería presenta una soldadura automática circunferencial, en cambio para las soldaduras manuales (SMAW) se realizó un corte longitudinal de la tubería con procedimiento de oxicorte para proceder a realizar las soldaduras requeridas en este ensayo.

#### 3.3.1 DIMENSIONES RECOMENDADAS

Las dimensiones de la probeta o espécimen de pruebas para tubería deben tener dimensiones mínimas de  $100 \pm 1$  mm de longitud por  $100 \text{ mm} \pm 1$  mm de ancho. El espesor debe ser el mismo espesor de pared de tubería, se acepta un valor máximo de 1 mm para remoción de superficie interna o externa. Se puede realizar el "aplanamiento de la superficie" considerando sin embargo que se puede producir la inclusión de esfuerzos residuales.

Para tuberías de diámetros pequeños: con costura (ERW) y sin costura (seamless), el espesor de la probeta debe ser al menos de un 80% del espesor completo de la tubería, en ese caso no es aceptable realizar el "aplanamiento" de las probetas.

### **3.3.2 PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA MANUAL <sup>[11]</sup>**

La soldadura de la tubería se realiza utilizando un procedimiento SMAW estándar con un soldador API calificado, el WPS utilizado para la soldadura de las probetas de cámara de niebla salina y de cámara de inmersión se indica en el ANEXO 7 de este documento.

### **3.3.3 NUMERACIÓN, LOCALIZACIÓN Y ORIENTACIÓN <sup>[1]</sup>**

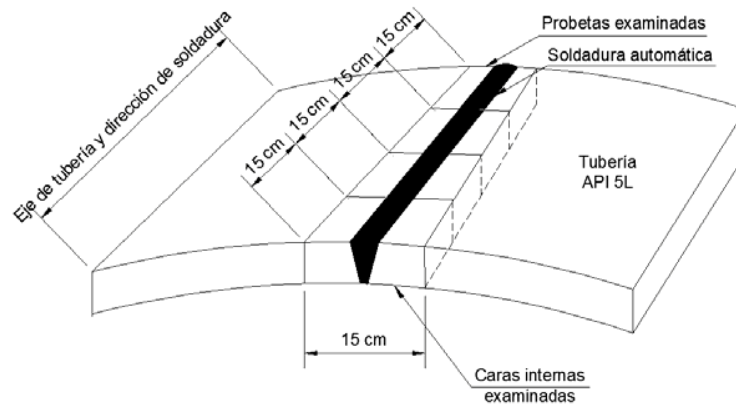
Se consideran tres probetas de cada sección de tubería a analizar, en el caso de tuberías sin costura, las probetas deben ser tomadas cada 120 grados alrededor de la circunferencia de la soldadura.

Las probetas deben ser tomadas desde la tubería con el eje longitudinal de las probetas:

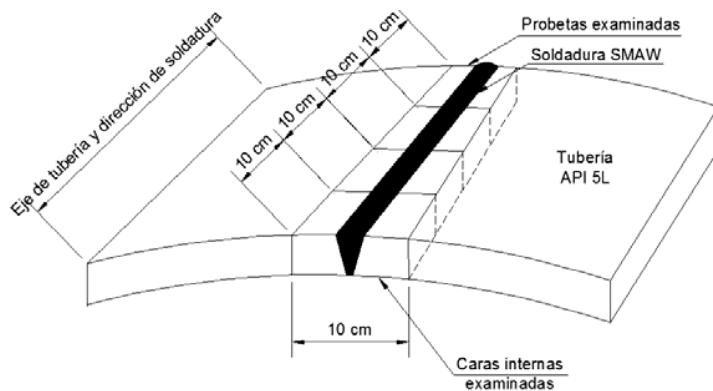
- a) paralelo al eje longitudinal de la tubería para soldadura sin costura
- b) Para el caso de las tuberías con soldadura longitudinal se debe considerar los diferentes arreglos mencionados por la norma NACE TMO-284 (1996).

### **3.3.4 ESQUEMAS DE CORTE DE PROBETAS**

Según estas recomendaciones los cortes de las probetas se realiza utilizando un esquema similar tanto para las probetas de soldadura SMAW como para las probetas de soldadura automática, se utilizó discos de corte y de desbastado, utilizando los siguientes esquemas de corte:



**Figura 3.9 - Distribución del corte para probetas con soldadura automática**



**Figura 3.10 - Distribución del corte para probetas con soldadura manual (SMAW)**

El corte de las probetas se realiza utilizando un disco de numeración 4 mm (3/16 in) de espesor para cortes generales y de 3 mm (1/8 in) para los cortes en zonas cercanas a la soldadura, esto para evitar rebabas en los filos de las probetas que podrían ocultar información importante.

Una vez obtenidas las probetas, se procede inmediatamente a su marcado respectivo utilizando el siguiente esquema de numeración:



**Tabla 3.5 - Esquema adoptado para numeración de probetas**

Ítem	Probeta	Tipo	Ensayo
1	a.1	Soldadura Manual	Cámara de niebla salina
2	a.2	Soldadura Manual	Cámara de niebla salina
3	b.1	Soldadura Manual	Cámara de niebla salina
4	b.2	Soldadura Manual	Cámara de niebla salina
5	c.1	Soldadura Manual	Cámara de niebla salina
6	c.2	Soldadura Manual	Cámara de niebla salina
7	d.1	Soldadura Manual	Cámara de niebla salina
8	d.2	Soldadura Manual	Cámara de niebla salina
9	e.1	Soldadura automática	Cámara de niebla salina
10	e.2	Soldadura automática	Cámara de niebla salina
11	A.1	Soldadura Manual	Cámara de inmersión
12	A.2	Soldadura Manual	Cámara de inmersión
13	B.1	Soldadura Manual	Cámara de inmersión
14	B.2	Soldadura Manual	Cámara de inmersión
15	C.1	Soldadura Manual	Cámara de inmersión
16	C.2	Soldadura Manual	Cámara de inmersión
17	D.1	Soldadura Manual	Cámara de inmersión
18	D.2	Soldadura Manual	Cámara de inmersión
19	E.1	Soldadura automática	Cámara de inmersión
20	E.2	Soldadura automática	Cámara de inmersión

### 3.3.5 PROBETAS PARA ENSAYO DE DOBLADO Y TRACCIÓN <sup>[11]</sup>

Se realiza el corte y la preparación de probetas de tracción y doblado necesarias para elaborar ensayos complementarios, y atacarlas utilizando los sistemas de cámara de niebla salina e inmersión.

La prueba de doblado de las probetas preparadas según el estándar API 1104 determina el agrietamiento a un ángulo máximo de doblado bajo las condiciones especificadas.

La prueba de tracción determina la resistencia mínima a la tensión del material en base al ensayo que se realiza a las probetas preparadas según el estándar ASTM B1.1.

Estas pruebas se realizan con las probetas expuestas a las cámaras de niebla salina y de inmersión en las mismas condiciones ambientales y de período de prueba que las probetas de ensayo.

Después de realizar la prueba de tracción es necesario realizar un análisis de falla en la sección de rotura en las probetas bajo ensayo.

### **3.4 METODOLOGÍA DE TOMA DE RESULTADOS**

Las probetas deben ser limpiadas satisfactoriamente. El método de limpieza debe ser opcional dependiendo de la naturaleza de la superficie y de los contaminantes, Se debe tener cuidado que las probetas no se recontaminen después de limpiezas por una manipulación excesiva.

#### **3.4.1 TOMA DE RESULTADOS, MACRO Y MICROGRAFÍAS**

En primera instancia, se realizó la selección de las probetas a ser expuestas en las cámaras de neblina y de inmersión, en base al tipo de defectos de soldadura, luego se fotografía las probetas a una magnificación de 10X, previa la elección de las áreas a ser consideradas para hacer el seguimiento, en cada probeta. El pesaje inicial de las probetas es importante para nuestro objetivo, esta actividad se lo hará en una balanza electrónica con capacidad de 1000 gr. y apreciación de 0,001 gr. Las probetas son colocadas apropiadamente en las cámaras correspondientes, a saber: Las probetas en la cámara salina se suspenden de tal forma que no se interfieran entre ellas y las de la cámara de inmersión se colocan de tal manera que la mitad, aproximadamente esté sumergida y la otra mitad se encuentre expuesta al aire, con el fin de exponerla a dos fases.

Cada 7 días (1 semana) las probetas serán retiradas de las cámaras, para luego del lavado con agua corriente y cepillo hacer el secado de las probetas. Completada esta operación se procede a realizar el pesaje de cada probeta y registrar este valor para observar el avance cuantitativo semanal del proceso de corrosión. Igualmente se toma fotografías de las áreas seleccionadas en el material base y en la soldadura a 10X y siempre será necesario hacer una macrografía de todas las probetas a 1X, con la finalidad de tener un avance cualitativo de la corrosión en periodos de una semana durante el tiempo que se mantenga la prueba (90 días).

### 3.4.2 Limpieza y toma de resultados finales <sup>[15]</sup>

Terminado el periodo de prueba se realiza la última medición del peso, para lo cual primero las probetas se someten al lavado con solución, de acuerdo a SSPC-SP1 <sup>[15]</sup>, compuesta de:

Detergente + Fosfato de sodio en las siguientes proporciones:

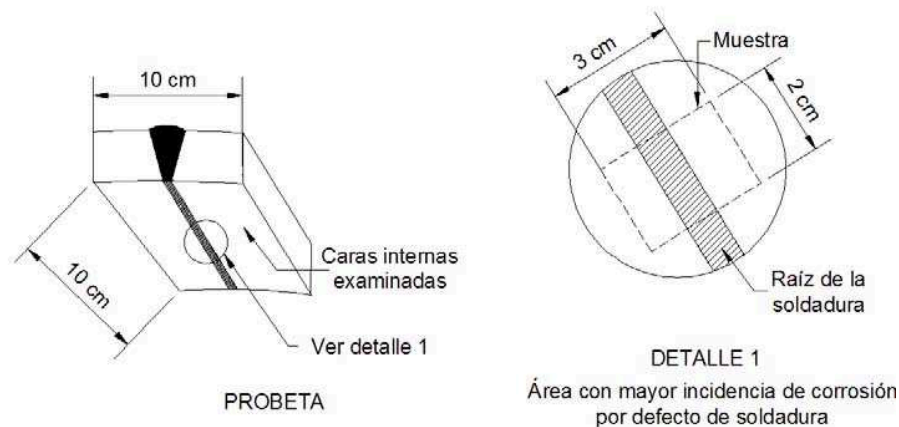
- 15 gr. de  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  / litro
- 15 gr. de detergente / litro
- 20 litros de volumen de la solución
  - 300 gr. de  $\text{Na}_3\text{PO}_4$
  - 300 gr. de detergente

Es importante anotar que se seleccionó algunas probetas tanto de la cámara salina cuanto de la cámara de inmersión para ser lavadas con desoxidante para hierro con FOSFATIZANTE H-30, en estas probetas se midió el espesor de óxido.

### 3.5 PREPARACIÓN DE MUESTRAS Y RESULTADOS

Para el análisis cuantitativo y cualitativo necesario se prepara muestras metalográficas de las probetas más significativas. Este procedimiento se realiza de acuerdo a la norma ASTM E-3 correspondiente a la preparación de muestras metalográficas.

El corte de las muestras se realiza considerando la cara interna de las probetas, dando prioridad al área cercana a la raíz de la soldadura, las dimensiones de las muestras se indican en la siguiente figura:



**Figura 3.11 - Distribución del corte para muestras**

Luego de atacar las muestras con Nital, se analiza y se registra fotográficamente la profundidad de la corrosión a una magnificación de 100X y 200X en las zonas de mayor interés.

A una magnificación de 100X, se mide la profundidad de la corrosión, considerando especialmente las áreas donde existen defectos de soldadura, tales como: falta de fusión, falta de penetración, grietas, socavaciones, porosidades, inclusiones, etc.

Se considera algunas mediciones representativas de profundidad para los defectos tanto internos (raíz del cordón) como en la parte externa del cordón, donde la corrosión se acentúa.

## **CAPITULO 4**

### **RESULTADOS Y ANÁLISIS**

#### **4.1 INTRODUCCIÓN**

Los resultados de la presente investigación se fundamenta básicamente en la determinación de la pérdida del peso de los especímenes en estudio, y del análisis macro y microscópico de las muestras seleccionadas en las probetas.

Las probetas en estudio se clasifican en grupos de análisis. El primer grupo corresponde a las que se encontraban expuestas en la cámara salina y un segundo grupo se localizaban en inmersión, igualmente en un medio salino de idéntica concentración. Luego del lapso de 90 días las probetas fueron sometidas a un tratamiento especificado en el procedimiento utilizado en la investigación.

La medición de la profundidad corrosiva y de la penetración de este fenómeno en los defectos de soldadura permite realizar cálculos y estimaciones en la velocidad de corrosión así como calcular el CRT o relación de longitud de fisuras respecto al espesor, para cada muestra de las probetas consideradas.

Los pesos de las probetas determinan la pérdida de masa durante el ataque corrosivo, comparando los valores iniciales y finales.

La diferencia de espesores en las probetas indica el ataque de la corrosión a nivel superficial en el material, lo que establece el período de vida de una tubería a nivel operativo.

La velocidad de corrosión es un parámetro que establece la pérdida de espesor y masa en función del tiempo según los estándares utilizados.

La longitud de fisuras, es el porcentaje que relaciona la profundidad total afectado por la corrosión y el espesor de la tubería después del ensayo.

## 4.2 CONSIDERACIONES

- Se realiza la evaluación de una menor cantidad de probetas con soldadura automática, debido a la mayor uniformidad y menor presencia de defectos respecto a la soldadura SMAW.
- El tiempo de vida para tuberías en nuestro medio está entre 20 y 30 años, en ese tiempo se considera un espesor perdido por corrosión de 3 mm, valor que se utilizará para comparar con los resultados.
- Se considera una variación lineal para estimar las velocidades de corrosión en largos períodos (20, 30 años, etc.)
- Se consideran las probetas de cámara salina e inmersión, con valores de peso medidos de mayor representatividad.
- En la evaluación de los pesos se consideran los valores al inicio y al final del ensayo para evitar desviaciones debido a la acumulación de sales.
- Para determinar el espesor final de las probetas se realizó un cálculo en base al peso perdido de cada probeta.
- La corrosión de las probetas se considera en la dirección de la cara interna de la probeta, que permitirá estimar el espesor final.
- Las áreas críticas para el análisis son aquellas que presentan mayores defectos de soldadura
- Para las profundidades de corrosión se consideran los promedios en las áreas definidas como críticas en cada probeta.

### 4.3 EVALUACIÓN DE RESULTADOS

#### 4.3.1 EVALUACIÓN DE PESOS

Luego de realizar la prueba de corrosión por el período que establece la norma NACE TMO-284 <sup>[1]</sup> y determinados los pesos de las probetas en intervalos de una semana, se establece la velocidad de corrosión.

*Tabla 4.1 - Evaluación de pesos de probetas en inmersión*

PROBETA	PESO INICIAL (Gramos)	PESO FINAL (Gramos)	DIFERENCIA (Gramos)	DIFERENCIA PORCENTUAL (%)	VELOCIDAD DE CORROSIÓN		PORCENTAJE DE PÉRDIDA (%/año)
					Gramos/día	Gramos/año	
A.1	848,249	843,916	4,33	0,511	0,048	17,573	2,072
A.2	924,631	921,020	3,61	0,391	0,040	14,645	1,584
B.1	908,717	906,434	2,28	0,251	0,025	9,259	1,019
B.2	954,408	951,091	3,32	0,348	0,037	13,452	1,409
D.1	922,354	918,965	3,39	0,367	0,038	13,744	1,490
D.2	1000,015	996,159	3,86	0,386	0,043	15,638	1,564
<b>PROMEDIO</b>			3,465	0,376	0,038	14,052	1,523

En las probetas en inmersión el promedio de pérdida de peso es de aproximadamente 3,465 gramos en el período de prueba. Esta diferencia se obtiene restando el peso inicial del final.

Entre los valores obtenidos para cada probeta se observa que la pérdida de peso es variable debido a la calidad de la soldadura manual.

La diferencia porcentual promedio es de 0,376%, esta indica la relación porcentual entre el peso perdido y el peso inicial de las probetas en inmersión.

En cuanto a las velocidades de corrosión se estimó el valor de la pérdida diaria promedio en 0.038 gramos/día en las probetas de 10 cm x 10 cm, mientras que la pérdida anual promedio es de 14,052 gramos/año.

El porcentaje de pérdida anual promedio de material, comparando la pérdida de peso anual con el peso inicial de las probetas, es de 1,523% del material.

**Tabla 4.2 - Evaluación de pesos de probetas de cámara salina**

PROBETA	PESO INICIAL (Gramos)	PESO FINAL (Gramos)	DIFERENCIA (Gramos)	DIFERENCIA PORCENTUAL (%)	VELOCIDAD DE CORROSIÓN		PORCENTAJE DE PÉRDIDA (%/año)
					Gramos/día	Gramos/año	
<b>a.1</b>	981,844	979,142	2,70	0,275	0,030	10,958	1,116
<b>b.1</b>	909,197	908,292	0,90	0,100	0,010	3,670	0,404
<b>b.2</b>	853,708	853,354	0,35	0,041	0,004	1,436	0,168
<b>c.1</b>	947,347	945,104	2,24	0,237	0,025	9,097	0,960
<b>d.1</b>	857,006	855,568	1,44	0,168	0,016	5,832	0,680
<b>d.2</b>	878,366	873,724	4,64	0,528	0,052	18,826	2,143
<b>PROMEDIO</b>			2,047	0,225	0,023	8,303	0,912

En las probetas de la cámara salina el promedio de pérdida de peso se encuentra alrededor de 2,047 gramos. La diferencia porcentual promedio es de 0,225%. Estos valores son aproximadamente 40% menores que los valores obtenidos en las probetas en inmersión.

Esto es resultado del par galvánico que forman las probetas en inmersión al estar en contacto simultáneamente con el fluido salino y el oxígeno del ambiente. Este efecto es mucho menor en las probetas que se encuentran en la cámara.

En cuanto a las velocidades de corrosión se estimó el valor de la pérdida diaria promedio en 0,023 gramos/día en las probetas de 10 cm x 10 cm, mientras que la pérdida anual promedio es de 8,303 gramos/año.

La velocidad de corrosión en este caso es igualmente menor a las de las probetas en inmersión en una proporción similar a las de la pérdida de peso.

El porcentaje de pérdida anual promedio de material, comparando la pérdida de peso anual con el peso inicial de las probetas, es de 0,912% del material.



### 4.3.2 EVALUACIÓN DE ESPESORES

Para efectos de cálculo se considera despreciables las pérdidas por corrosión en los lados de las probetas. Además las pérdidas en un lado de las probetas se consideran despreciables al estar protegidas por recubrimientos.

Si se considera que las probetas tienen dimensiones promedio de 100 mm por 100 mm y espesor variable medido y un peso inicial determinado.

Se procede con estos datos a calcular una densidad promedio del material. Esta sirve para determinar el espesor final de la probeta, considerando que la pérdida por corrosión se produce solamente en el lado de interés.

Los valores obtenidos bajo estas consideraciones se indican en el siguiente cuadro:

**Tabla 4.3 - Evaluación de espesores de probetas de cámara salina**

PROBETA	ESPESORES INICIALES (mm)	ESPESORES FINALES (mm)	DIFERENCIA DE ESPESOR (mm)	VELOCIDAD DE CORROSIÓN		PÉRDIDA DE ESPESOR EN 10 AÑOS (mm)	PÉRDIDA DE ESPESOR EN 20 AÑOS (mm)	PÉRDIDA DE ESPESOR EN 30 AÑOS (mm)
				Micras /día	mm /año			
a.1	12,58	12,545	0,035	0,385	0,140	1,404	2,808	4,212
b.1	12,23	12,218	0,012	0,135	0,049	0,494	0,987	1,481
b.2	12,30	12,295	0,005	0,057	0,021	0,207	0,414	0,621
c.1	12,27	12,241	0,029	0,323	0,118	1,178	2,356	3,535
d.1	12,24	12,219	0,021	0,228	0,083	0,833	1,666	2,499
d.2	12,80	12,732	0,068	0,752	0,274	2,743	5,487	8,230
<b>PROMEDIO</b>			0,028	0,313	0,114	1,143	2,286	3,430

Para las probetas de la cámara salina el promedio de pérdida de espesor es de aproximadamente 0,028 milímetros (28 micras) en el período de prueba. Esta diferencia se obtiene restando el peso inicial del final.

Se estimó el valor de la pérdida diaria promedio en 0,313 micras/día en las probetas de 10 cm x 10 cm, esta velocidad es equivalente a 0,114 milímetros/año (114 micras/año).

En base a esta información es posible conocer la velocidad de corrosión en milímetros por año.

Extrapolando estos valores a 10 años, 20 años y 30 años se obtienen las siguientes pérdidas de espesor en promedio de 1,143, 2,286 y 3,430 mm respectivamente.

**Tabla 4.4 - Evaluación de espesores de probetas en inmersión**

PROBETA	ESPEORES INICIALES (mm)	ESPEORES FINALES (mm)	DIFERENCIA DE ESPESOR (mm)	VELOCIDAD DE CORROSIÓN		PÉRDIDA DE ESPESOR EN 10 AÑOS (mm)	PÉRDIDA DE ESPESOR EN 20 AÑOS (mm)	PÉRDIDA DE ESPESOR EN 30 AÑOS (mm)
				Micras /día	mm /año			
A.1	12,23	12,168	0,062	0,694	0,253	2,534	5,067	7,601
A.2	12,25	12,202	0,048	0,532	0,194	1,940	3,880	5,821
B.1	12,25	12,219	0,031	0,342	0,125	1,248	2,496	3,744
B.2	12,13	12,088	0,042	0,468	0,171	1,710	3,419	5,129
D.1	12,21	12,165	0,045	0,498	0,182	1,819	3,639	5,458
D.2	12,34	12,292	0,048	0,529	0,193	1,930	3,859	5,789
<b>PROMEDIO</b>			0,046	0,511	0,186	1,863	3,727	5,590

Para las probetas en inmersión el promedio de pérdida de espesor es de aproximadamente 0,046 milímetros (46 micras) en el período de prueba. El valor de la pérdida diaria promedio por corrosión en estas probetas es de 0,511 micras/día equivalente a 0,186 milímetros/año (186 micras/año). Los valores de velocidad por corrosión obtenidos en las probetas en inmersión superan a los de la cámara salina en aproximadamente un 60%. Los valores por pérdida de espesor a 10 años, 20 años y 30 años son de 1,863, 3,727 y 5,590 mm respectivamente.

### 4.3.3 CÁLCULO DE FISURAS (CRACKS) <sup>[1]</sup>

Según la norma NACE Standard TM0284-96 en la sección 7.3 las fisuras en las probetas se deben medir a una amplificación de 100X y la separación entre fisuras debe ser al menos de 0,5 mm.

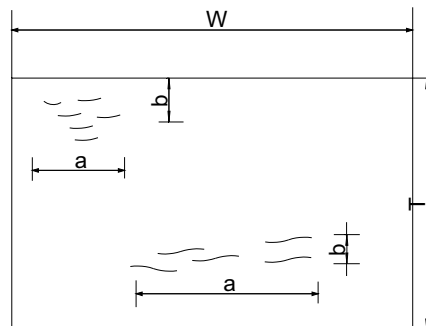
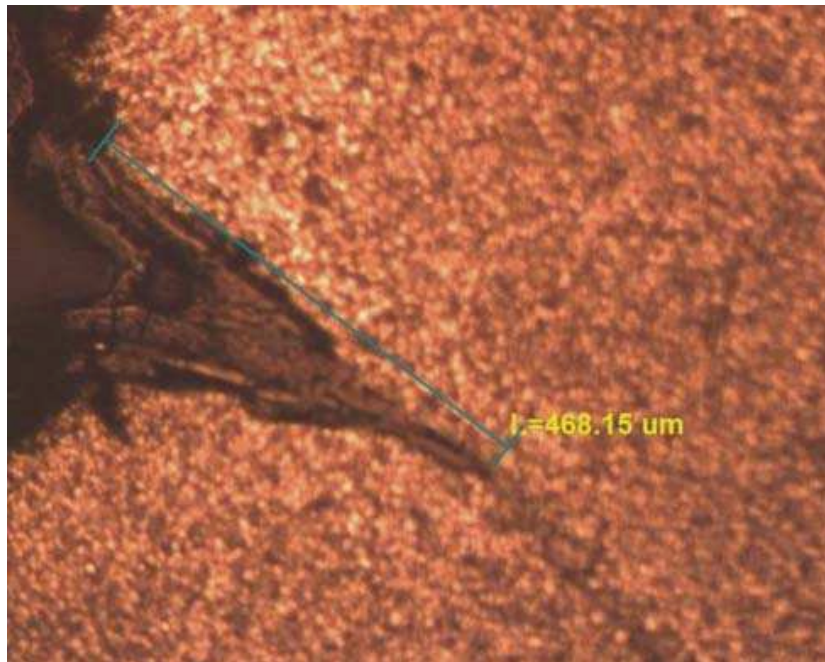


Figura 4.1 - Esquema para el cálculo de fisuras en probetas

#### 4.3.3.1 Análisis de fisuras para probetas de cámara Salina

##### Probeta a.2



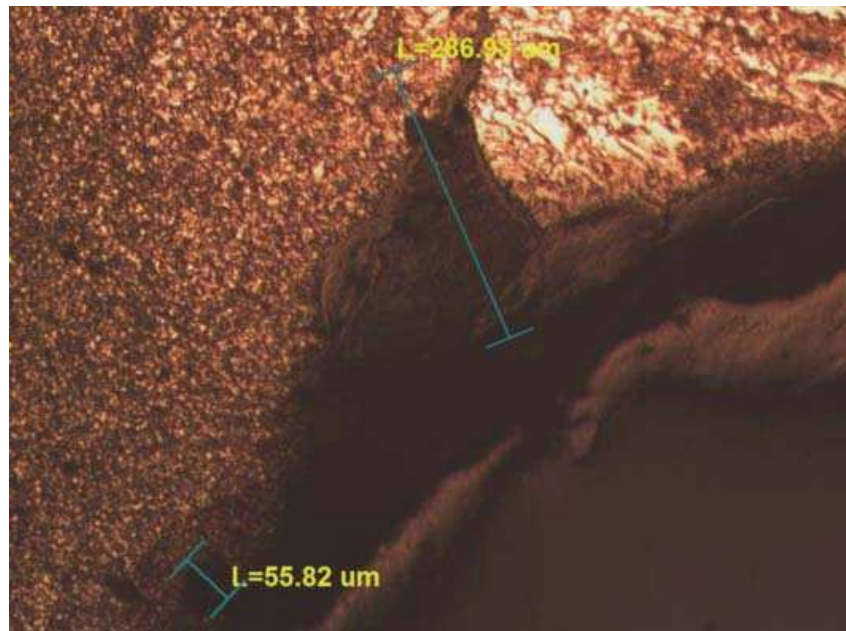


Figura 4.2 - Medición de fisuras en probeta a.2

Cara interna

L1=0,468 mm (468,15 micras)

Cara externa

L2=0,286 mm (286,93 micras)

Porcentaje de Espesor del Crack,  $CRT = \frac{\sum b}{T} \times 100\%$

$$CRT = \frac{0,465 \text{ mm} + 0,286 \text{ mm} \times 100\%}{11,95 \text{ mm}} = 6,28\%$$

En esta probeta de cámara salina la relación entre las fisuras y el espesor del material es del 6,28%, se considera que este porcentaje representa la profundidad media de la corrosión después del análisis.

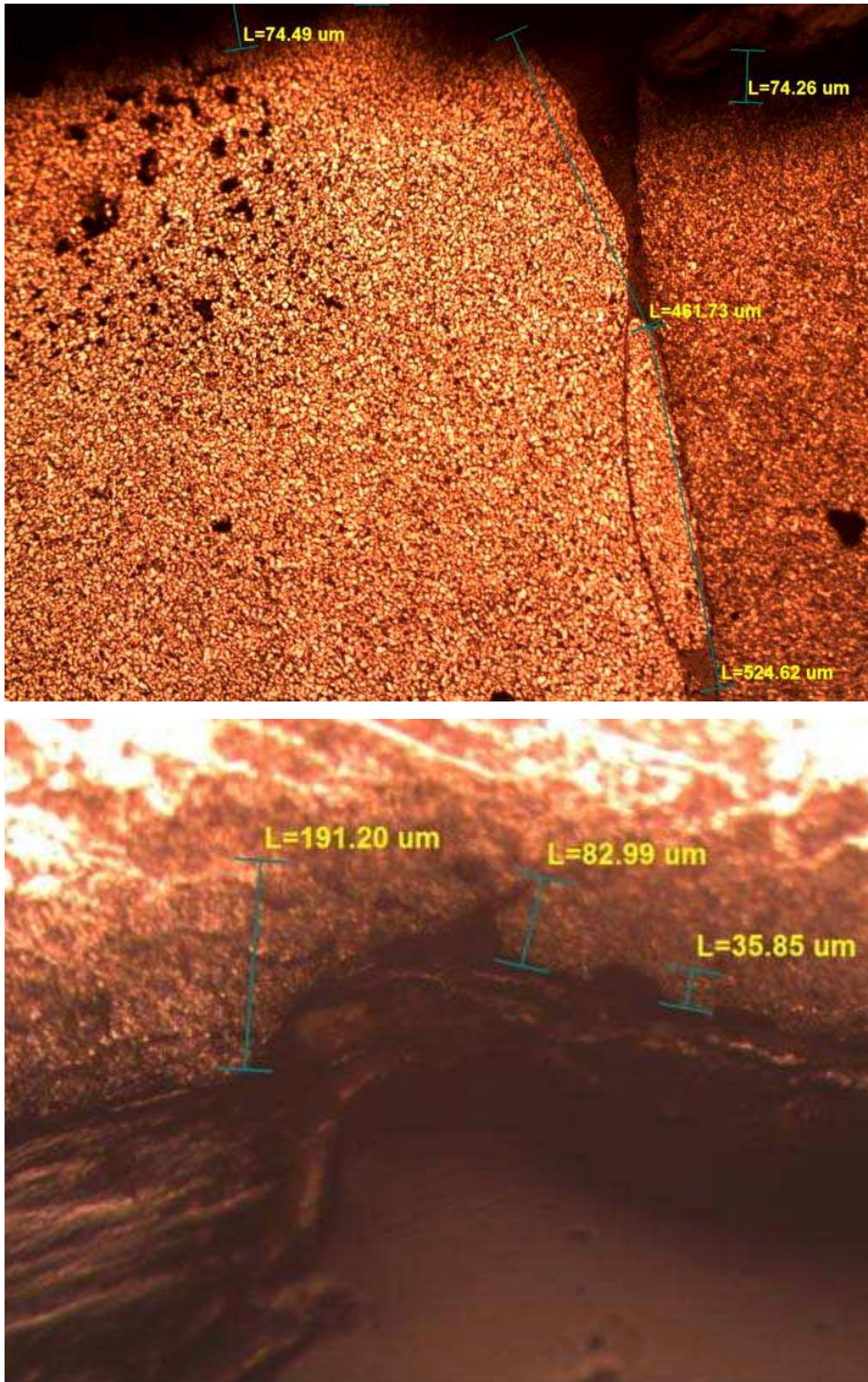
**Probeta b.1**

Figura 4.3 - Medición de fisuras en probeta b.1

Cara interna

L1=0,986 mm (986,35 micras)

Cara externa

L2=0,083 mm (82,99 micras)

$$\text{Porcentaje de Espesor del Crack, CRT} = \frac{\sum b}{T} \times 100\%$$

$$\text{CRT} = \frac{0,986 \text{ mm} + 0,083 \text{ mm} \times 100\%}{12,218 \text{ mm}} = 8,75\%$$

En esta probeta de cámara salina la relación entre las fisuras y el espesor del material es del 8,75%, este valor es relativamente significativo en comparación a los resultados obtenidos en la probeta a1 de cámara salina y se produce por un defecto crítico de soldadura SMAW.

A continuación se indican los valores obtenidos para las probetas con soldadura SMAW en probetas de cámara salina:

**Tabla 4.5 - Medición de fisuras en probetas con soldadura SMAW de cámara salina**

PROBETA	L1 (interna) (mm)	L2 (externa) (mm)	Espesor (mm)	CTR (%)
a.1	0,370	0,136	12,545	4,04
a.2	0,465	0,286	11,950	6,28
b.1	0,986	0,083	12,218	8,75
b.2	0,489	0,172	12,295	5,37
c.1	0,182	0,168	12,241	2,87
c.2	0,967	0,124	12,450	8,76
d.1	0,145	0,104	12,219	2,04
d.2	0,388	0,188	12,732	4,53
<b>PROMEDIOS</b>	0,499	0,158	12,331	5,33

El promedio CTR de fisuras es de 5,33% que es un valor que no presenta desviación significativa con la mayoría de probetas de cámara salina con soldadura SMAW.

Para las probetas con soldadura automática los resultados son los siguientes:

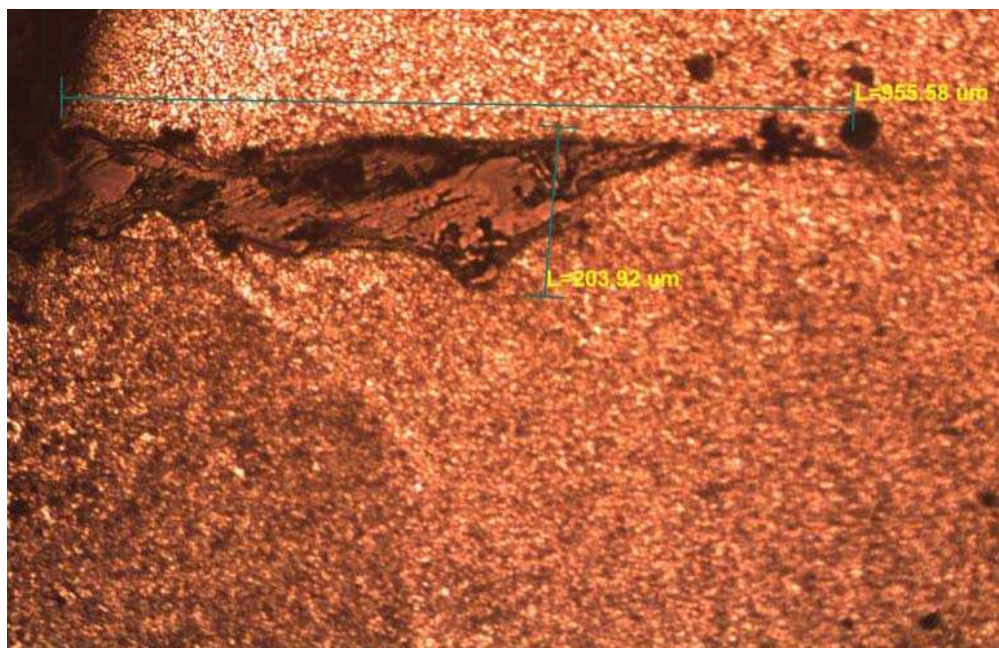
**Tabla 4.6 - Medición de fisuras en probetas con soldadura automática de cámara salina**

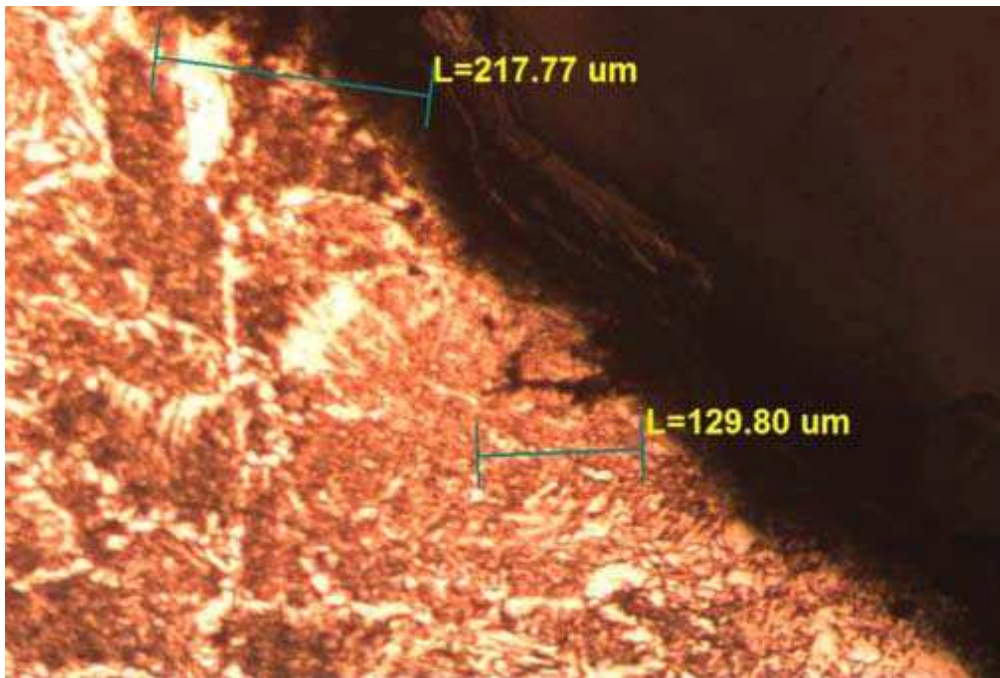
PROBETA	L1 (interna) (mm)	L2 (externa) (mm)	Espesor (mm)	CTR (%)
e.1	0,341	0,094	12,150	3,58
e.2	0,276	0,120	12,200	3,25
<b>PROMEDIOS</b>	0,309	0,107	12,175	3,42

El promedio CTR de fisura en las probetas con soldadura automática es de 3,42%, este valor es menor al obtenido para las probetas de soldadura SMAW.

#### 4.3.3.2 Análisis de fisuras para probetas en inmersión

##### Probeta C.1





*Figura 4.4 - Medición de fisuras en probeta C.1*

Cara interna

L1=0.956 mm (955,58 micras)

Cara externa

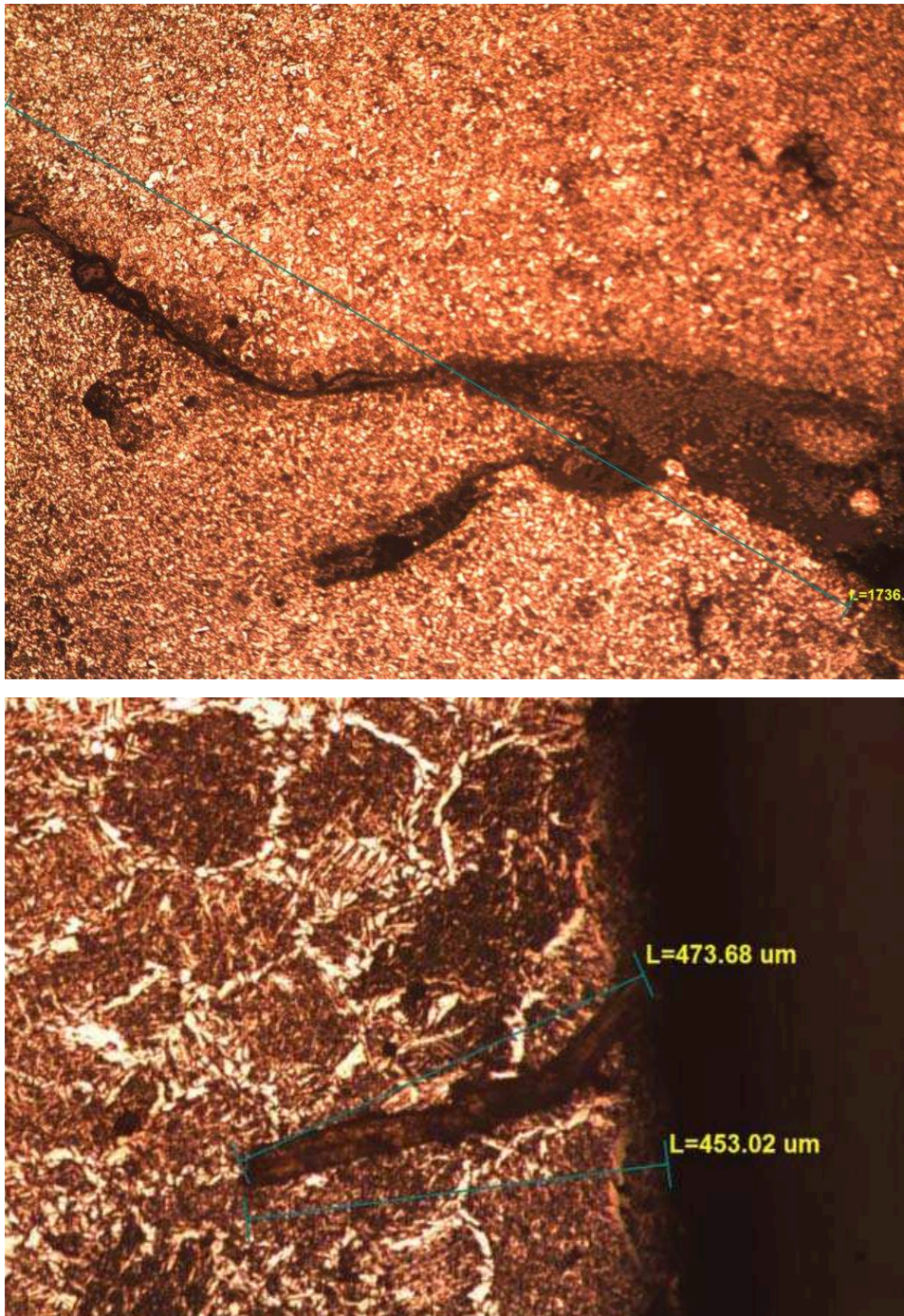
L2=0.129 mm (128,90 micras)

Porcentaje de Espesor del Crack,  $CRT = \frac{\sum b}{T} \times 100\%$

$$CRT = \frac{0,956 \text{ mm} + 0,129 \text{ mm} \times 100\%}{12,23 \text{ mm}} = 8,87\%$$

En esta probeta de inmersión, la relación entre las fisuras y el espesor del material es de 8,87%, este valor es relativamente significativo, siendo un defecto crítico en soldadura SMAW.



**Probeta D.1**

*Figura 4.5 - Medición de fisuras en probeta D.1*

Cara interna

L1=1,737 mm (1736,5 micras)

Cara externa

L2=0,474 mm (473,68 micras)

$$\text{Porcentaje de Espesor del Crack, CRT} = \frac{\sum b}{T} \times 100\%$$

$$\text{CRT} = \frac{1,737 \text{ mm} + 0,474 \text{ mm} \times 100\%}{12,165 \text{ mm}} = 18,17\%$$

En esta probeta sumergida la relación entre las fisuras y el espesor del material es del 18,17%, este valor es bastante significativo, ya que representa prácticamente la quinta parte del espesor remanente de la tubería.

Esto refuerza el criterio de buscar el menor número de defectos en la soldadura como primera medida para reducir el efecto y el avance la corrosión.

A continuación se indican los valores obtenidos para las probetas con soldadura SMAW en probetas en inmersión:

**Tabla 4.7 - Medición de fisuras en probetas con soldadura SMAW en inmersión**

PROBETA	L1 (interna) (mm)	L2 (externa) (mm)	Espesor (mm)	CTR (%)
A.1	0,647	0,123	12,168	6,32
A.2	0,148	0,113	12,202	2,14
B.1	0,647	0,077	12,219	5,92
B.2	0,131	0,132	12,088	2,17
C.1	0,956	0,129	12,230	8,87
C.2	0,448	0,104	12,070	4,57
D.1	1,737	0,474	12,165	18,18
D.2	0,109	0,107	12,292	1,76
PROMEDIOS	0,603	0,157	12,179	6,24

El promedio CTR de fisuras es de 6,24%, el cual resulta ser mayor que el obtenido para las probetas de cámara salina con soldadura SMAW que fue de 5,33%.

Para las probetas con soldadura automática los resultados son los siguientes:

**Tabla 4.8 -** *Medición de fisuras en probetas con Soldadura automática en inmersión*

PROBETA	L1 (interna) (mm)	L2 (externa) (mm)	Espesor (mm)	CTR (%)
E.1	0,102	0,145	12,050	2,05
E.2	0,087	0,119	12,010	1,71
<b>PROMEDIOS</b>	0,094	0,132	12,030	1,88

El promedio CTR de fisura en las probetas con soldadura automática es de 1,88%, este valor es el doble del obtenido en probetas de cámara salina, que fue de 3,42%.

#### 4.3.4 EVALUACIÓN DEL ANÁLISIS DE FALLA EN PROBETAS A TRACCIÓN

[13]

Para la evaluación del análisis de falla en las probetas del ensayo a tracción se consideran las dimensiones de las probetas originales y después del ensayo (reducidas).

**Tabla 4.9 -** *Mediciones para áreas, originales y reducidas en tracción*

	IDENTIFICACIÓN	EN INMERSIÓN		CÁMARA DE NIEBLA SALINA	
		ORIGINALES	REDUCIDAS	ORIGINALES	REDUCIDAS
<b>Ancho (mm)</b>	Medida 1		18,4		16,94
	Medida 2		17,47		16,02
	Medida 3		16,7		16,04
	Medida 4		16,99		15,52
	Promedio	<b>19,45</b>	<b>17,39</b>	<b>19,43</b>	<b>16,13</b>
<b>Espesor (mm)</b>	Medida 1		10,67		9,84
	Medida 2		10,55		9,86
	Medida 3		10,26		9,63
	Medida 4		10,38		9,72
	Promedio	<b>12,05</b>	<b>10,465</b>	<b>12,12</b>	<b>9,762</b>

Se calcula el porcentaje de deformación para determinar la ductilidad o fragilidad del material, con la fórmula:

$$\%E = \frac{A_o - A_r}{A_o}$$

Los resultados de deformación obtenidos para las probetas en inmersión son los siguientes:

$$\%E = \frac{(19,45 \text{ mm} \cdot 12,05 \text{ mm}) - (17,39 \text{ mm} \cdot 10,465 \text{ mm})}{(19,45 \text{ mm} \cdot 12,05 \text{ mm})} \cdot 100 = 22,35\%$$

De acuerdo al resultado obtenido, se considera a este material dúctil por tener un porcentaje de deformación superior al 20%.

Siguiendo el mismo procedimiento se obtiene el valor de deformación para la probeta de cámara de niebla salina

$$\%E = \frac{(19,43 \text{ mm} \cdot 12,12 \text{ mm}) - (16,13 \text{ mm} \cdot 9,762 \text{ mm})}{(19,43 \text{ mm} \cdot 12,12 \text{ mm})} \cdot 100 = 33,13\%$$

De igual manera se considera a este material dúctil por tener un porcentaje de deformación superior al 20%.

Se indican los resultados de carga a la rotura y resistencia a la tracción obtenidos durante el ensayo:

**Tabla 4.10 - Resultados de carga y resistencia de ensayo a tracción**

IDENTIFICACIÓN	Carga a la rotura (lbf)	Resistencia a la tracción (ksi)	Observación
EN INMERSIÓN	30800	84,7	Falla en el cordón de soldadura
CÁMARA DE NIEBLA SALINA	30200	82,7	Falla en el cordón soldadura

Las curvas obtenidas en los ensayos a tracción indican un comportamiento dúctil del material de soldadura, ver ANEXO 10.



Al comienzo de la toma de mediciones se observa un aumento gradual en los pesos registrados debido a la acumulación de sales la cual es difícil de desprender con un método de limpieza estándar.

Las mediciones finales de peso en todos los casos indican pérdida de material debido a la corrosión del orden del 0,376% en las probetas en inmersión y del 0,225% en las probetas de cámara salina, existe una diferencia del 40% adicional en la pérdida de peso en las probetas en inmersión, siendo este el sistema de prueba más crítico para ensayos de corrosión en solución salina.

La norma ASTM establece que la condición de niebla salina es suficiente para probar la condición corrosiva en una probeta metálica, pero siendo las condiciones de operación de un oleoducto más exigentes por trabajar de manera continua transportando: agua, residuos sólidos (sales, lodo, etc.), crudo en distintas fases.

El análisis en inmersión es importante para simular condiciones más reales de operación en oleoductos comparada con el análisis de cámara salina que proyecta resultados menores en cuanto a la pérdida de peso por corrosión.

Po tanto, la corrosión provoca la pérdida de material y peso en la probeta, mientras que la acumulación de sales en las cavidades de las probetas provoca un aumento aparente en el peso de las mismas.

La evolución de la pérdida de peso del proceso corrosivo tanto en probetas de cámara salina como en probetas en inmersión se indica siguientes tablas, que se representan en las curvas de las figuras adjuntas:

Tabla 4.11- Variaciones del peso en probetas de cámara salina

PROBETA	CONDICIÓN INICIAL	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 5	SEMANA 6	SEMANA 7	SEMANA 8	SEMANA 9	SEMANA 10	SEMANA 11	CONDICIÓN FINAL
a.1	981,844	981,201	981,126	981,340	981,121	981,290	981,915	981,993	982,263	982,235	981,176	981,432	979,142
b.1	909,197	909,384	908,698	909,642	909,811	910,050	910,455	910,627	911,144	910,920	910,330	910,562	908,292
b.2	853,708	853,733	853,388	853,785	854,080	853,892	854,327	854,618	854,839	854,948	853,796	854,304	853,354
c.1	947,347	947,137	947,067	947,694	948,039	948,652	949,415	949,320	949,885	949,625	946,929	947,284	945,104
d.1	857,006	857,180	856,625	857,028	857,184	857,592	858,115	858,261	858,586	858,459	856,605	857,228	855,568
d.2	878,366	877,878	876,793	876,878	876,868	877,513	877,705	877,547	877,701	877,467	874,306	874,578	873,724

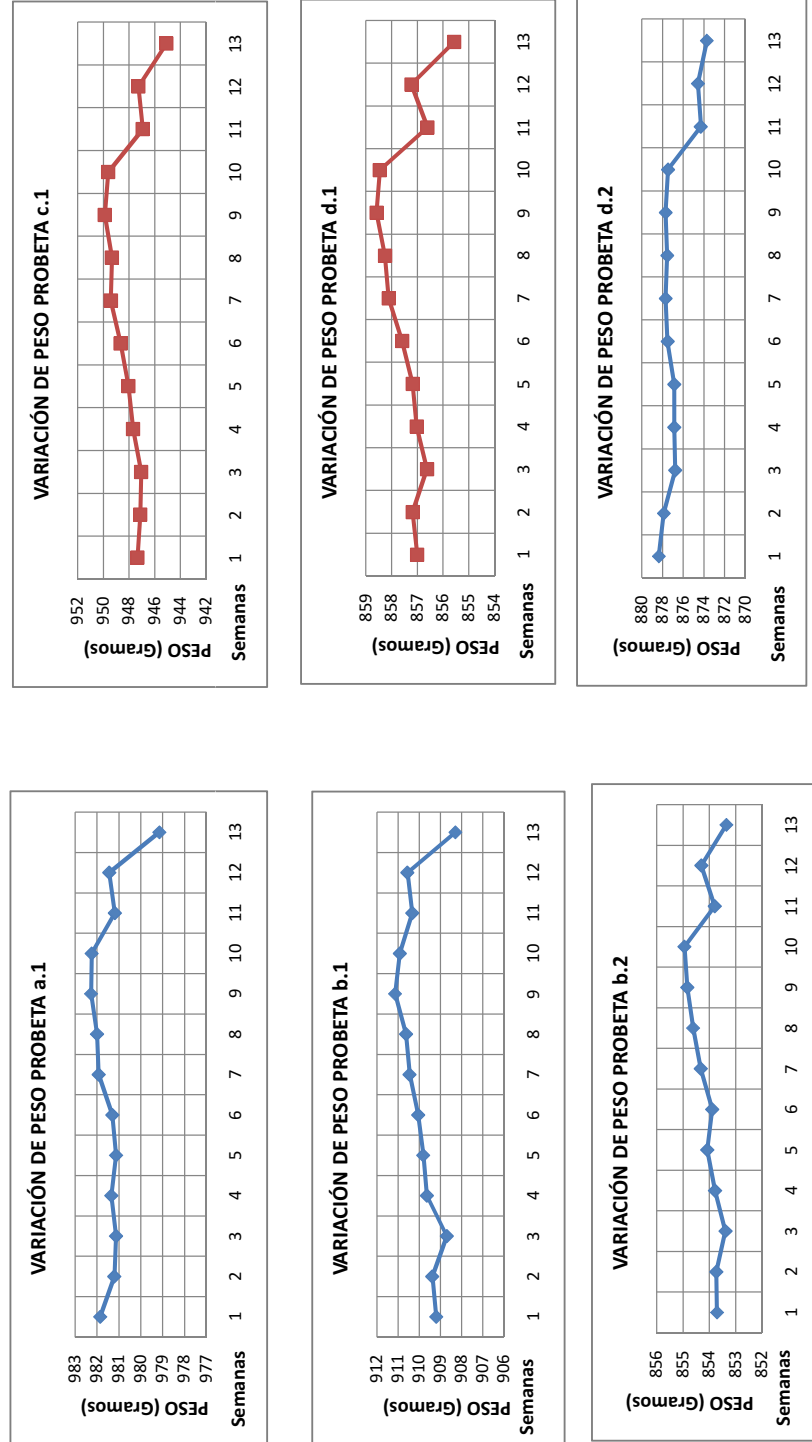
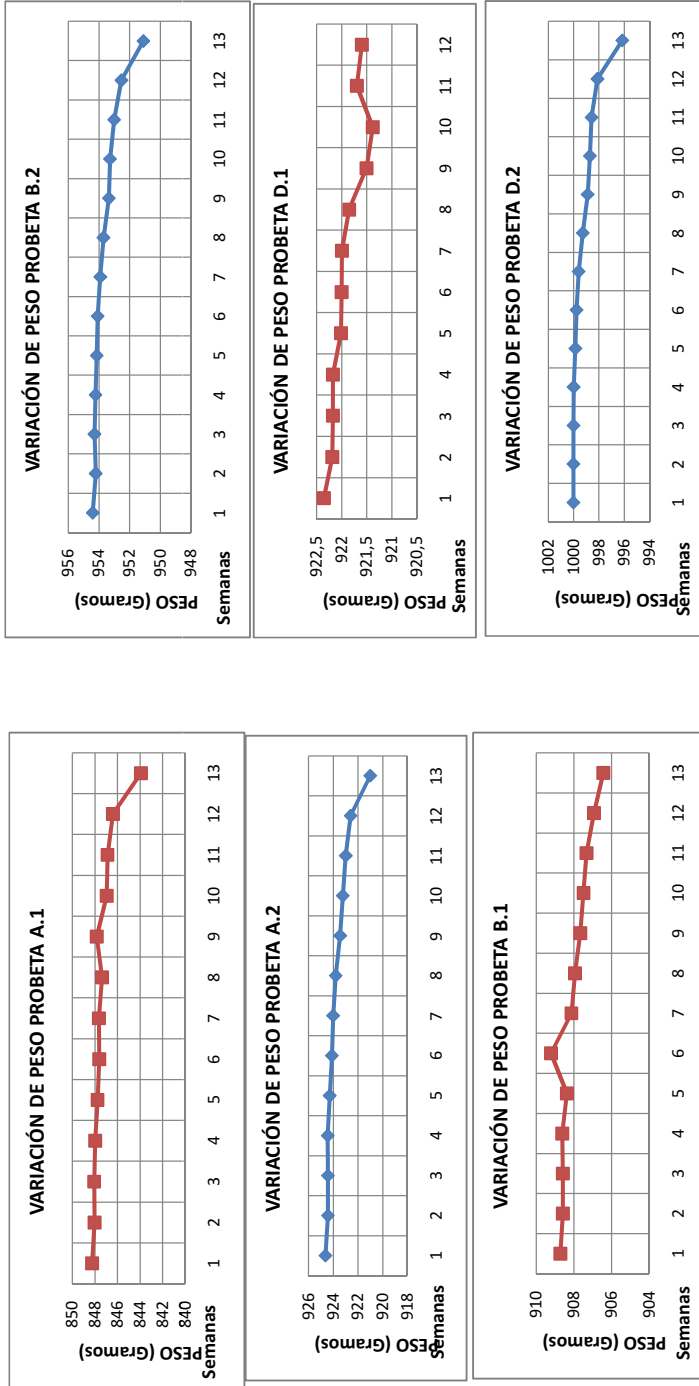


Figura 4.7 - Variaciones del peso en probetas de cámara salina

**Tabla 4.12 - Variación del peso en probetas en inmersión**

PROBETA	CONDICIÓN INICIAL	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4	SEMANA 5	SEMANA 6	SEMANA 7	SEMANA 8	SEMANA 9	SEMANA 10	SEMANA 11	CONDICIÓN FINAL
A.1	848,249	848,028	848,065	847,974	847,763	847,610	847,642	847,373	847,830	846,941	846,879	846,406	843,916
A.2	924,631	924,431	924,430	924,453	924,285	924,114	924,009	923,802	923,449	923,235	922,994	922,600	921,020
B.1	908,717	908,581	908,574	908,614	908,369	909,208	908,125	907,930	907,651	907,484	907,321	906,924	906,434
B.2	954,408	954,207	954,289	954,226	954,139	954,083	953,910	953,699	953,350	953,277	953,006	952,531	951,091
D.1	922,354	922,187	922,175	922,175	922,015	921,999	921,996	921,848	921,506	921,379	921,694	921,595	918,965
D.2	1000,015	1000,015	1000,010	999,999	999,862	999,767	999,603	999,277	998,896	998,713	998,584	998,119	996,159



**Figura 4.8 - Variación del peso en probeta en inmersión**



Analizando otro parámetro que corresponde a la pérdida de peso de material o disminución de su espesor en un tiempo determinado por el efecto corrosivo, se lo denomina como velocidad de corrosión, el cual se analiza considerando los valores iniciales y las variaciones de estos en el transcurso del ensayo.

El desarrollo de la velocidad de corrosión en el período de prueba de esta investigación, para probetas de cámara salina y en inmersión es bastante similar al comienzo del ensayo pero luego tiende a cambiar siendo mayor en las probetas en inmersión. Al final de la toma de mediciones existe un descenso brusco del peso por la eliminación de material corroído con sales acumuladas.

La velocidad de corrosión calculada para las probetas de cámara salina es 0,313 micras/día ó 0,114 mm/año, en las probetas en inmersión la velocidad de corrosión calculada es de 0,515 micras/día ó 0,186 mm/año lo que incide en los resultados de espesores finales.

La corrosión es por lo tanto más agresiva en probetas en inmersión por la presencia de dos fases: líquido y gas que es el oxígeno de la cámara, este provoca que el efecto corrosivo se acentúe en la interfase sumergida y aérea de la probeta por la diferencia de potencial que tiene este respecto al agua.

Un efecto similar de mayor corrosión existe en el transporte por poliductos respecto al transporte por oleoductos, debido a la mayor presencia de interfases líquido - gas en el primero respecto al último.

En el análisis de probetas en inmersión la corrosión supera el valor de sobre espesor considerado de 3 mm en 20 años, mientras que en el análisis de las probetas de cámara salina supera este valor en 30 años. Se debe considerar en este punto que para un oleoducto la cuestión no es si el derrame se producirá en 30 años, 20 años o un mes, lo importante es que no ocurra.

En este contexto, en el país existe oleoductos y poliductos construidos con materiales diferentes a los ensayados en el presente trabajo (API 5L X70), desde

el punto de vista estructural, y con tiempo de vida cercano a los 30 años, siempre considerando la velocidad de corrosión más agresiva, obtenida en esta investigación, el tiempo de vida útil deberá reducirse o incrementar el sobre espesor por corrosión.

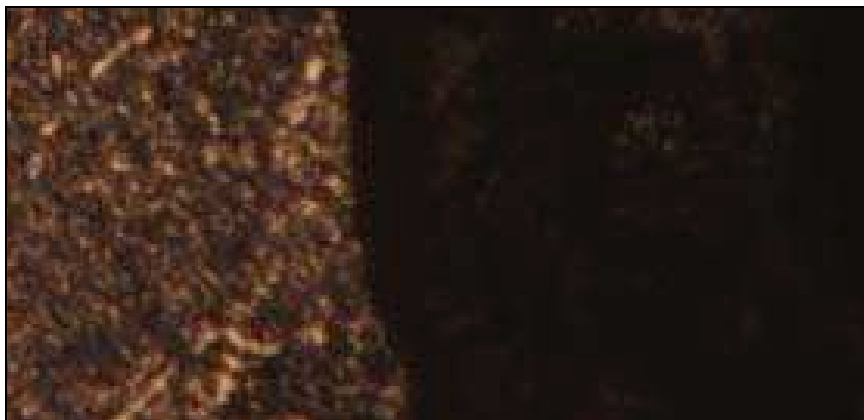
Respecto al tamaño de grano que se observa en las micrografías a 100X (Ver ANEXO 5), que en las muestras de soldadura SMAW en cámara salina existe una diferencia no significativa entre el tamaño de grano en la zona de material y la zona cercana a la soldadura. Se debe considerar que la corrosión de tipo intergranular tiende a aumentar en la medida que el tamaño de grano disminuya.

Un efecto semejante se aprecia en las micrografías de las muestras de soldadura automática.

*Probeta c.2*



*Probeta e.1*

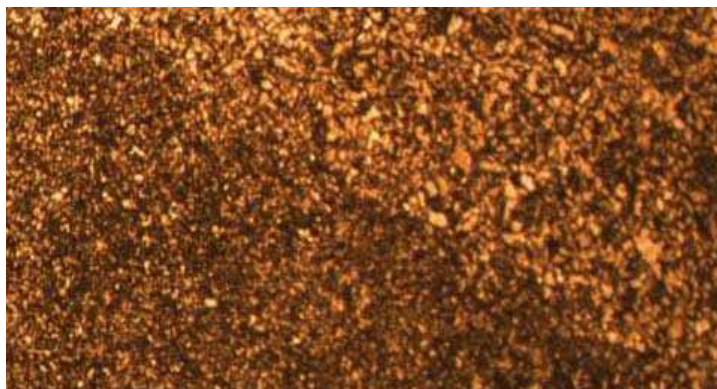


**Figura 4.9 -** *Tamaño de grano de probetas de cámara salina a 100X*

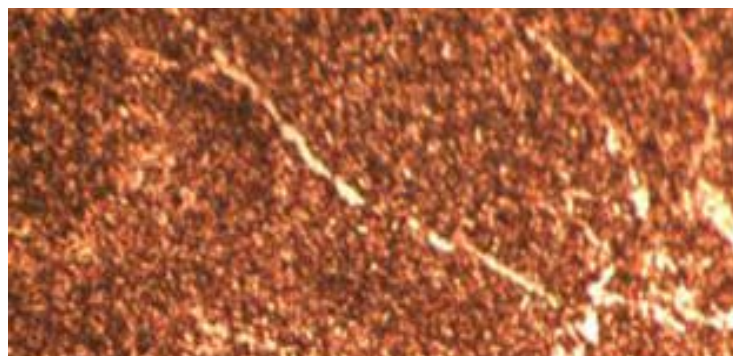
En las probetas de inmersión se aprecia un efecto similar respecto al tamaño de grano tanto en las micrografías de las muestras de soldadura SMAW como en las probetas de soldadura automática.

El tamaño de grano es un parámetro importante en la velocidad del proceso corrosivo ya que mientras menor sea el tamaño de grano existe mayor corrosión pero a la vez las propiedades mecánicas mejoran con tamaños de grano pequeños, por lo que se debe encontrar un balance en este contexto.

*Probeta A.1*



*Probeta E.2*



**Figura 4.10 -** *Tamaño de grano de probetas en inmersión a 100X*

Además en las micrografías del ANEXO 5, se observa defectos internos de la soldadura SMAW tales como inclusiones, porosidades, falta de fusión, falta de penetración que son muy significativas. En las micrografías a 100X de las probetas de cámara salina la profundidad de corrosión está en el orden de 0,5 mm en la cara interior y 0,158 mm en la cara exterior.

Mientras que en las micrografías a 100X de las probetas en inmersión la profundidad de corrosión está alrededor de 0,603 mm en la cara interior y 0.,157 mm en la cara exterior.

En el porcentaje de fisuras entre las probetas de cámara salina y las probetas en inmersión presenta una diferencia significativa a favor de las últimas, esto se debe a que las probetas en inmersión crean un par galvánico fuerte en la interfase aire / líquido.

Como se indicó anteriormente el oxígeno del aire con el agua de la solución tiene un diferencial de potencial mayor respecto al diferencial de potencial del oxígeno con la niebla salina, lo que provoca una mayor corrosión en el ensayo de inmersión. Como referencia se utiliza la figura de potencial del Hierro en agua [7] en el que a mayor presencia de oxígeno se produce mayor diferencia de potencial y por lo tanto mayor corrosión en un partícula metálica.

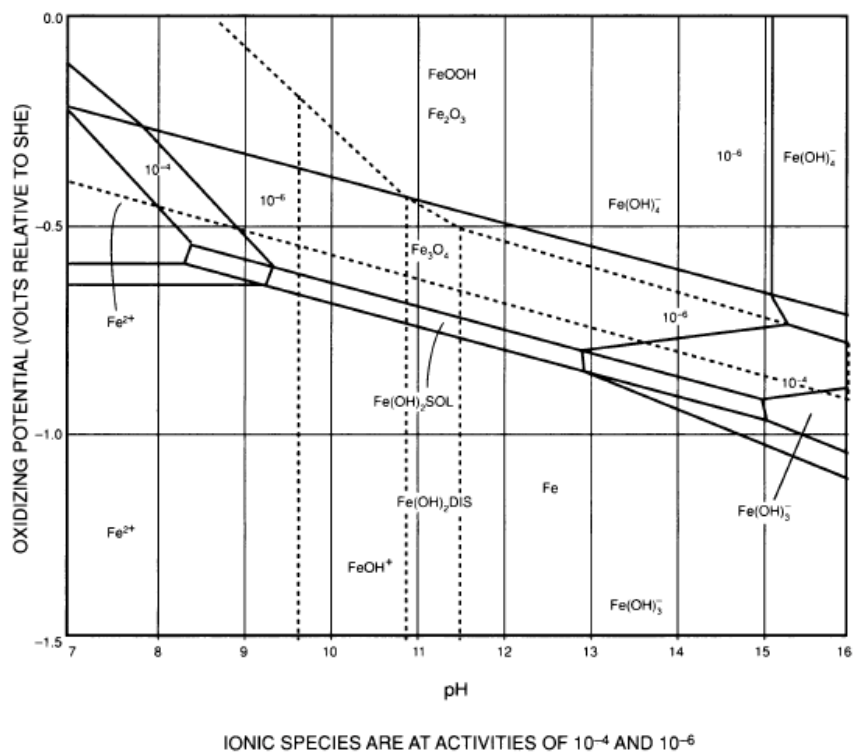


Figura 4.11 - Diagrama de Potencial del Hierro en Agua a 25° C [7]

Las probetas con soldadura SMAW (para cámara salina y en inmersión) presentan defectos mayores que las probetas con soldadura automática (probetas E y e), esto implica un porcentaje mayor de discontinuidades en las primeras.

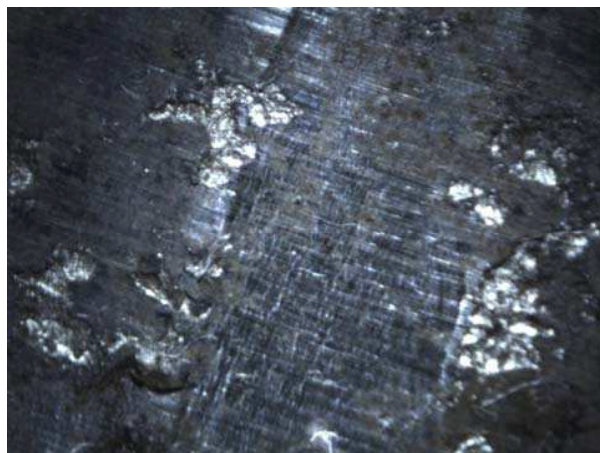
Si en verdad no se puede eliminar la presencia de los defectos, pero se debe hacer el mejor esfuerzo para reducir al máximo el riesgo que representa la presencia de esta variable para igualmente disminuir los focos de inicio y propagación del proceso corrosivo y la velocidad de corrosión.

La calidad de la soldadura es entonces el factor más influyente en el avance de la corrosión, por lo que a mejor calidad de soldadura existe menor velocidad del proceso corrosivo provocados por los defectos de soldadura.

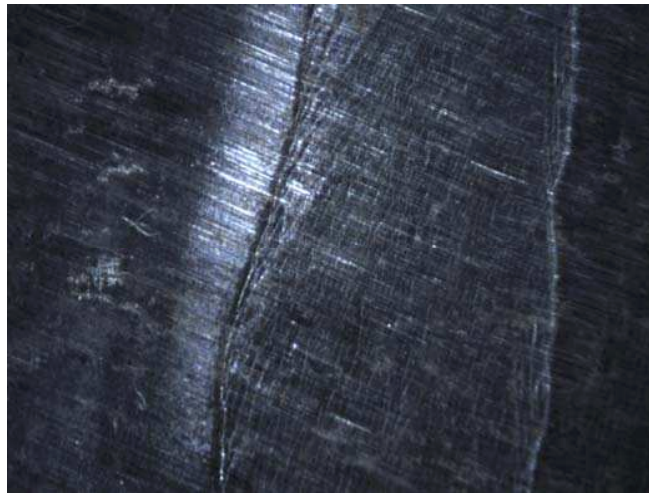
Las probetas preparadas para la prueba de doblado de raíz, realizada bajo norma API, tanto la expuesta en inmersión cuanto la de cámara salina no presentan agrietamientos que limiten su aprobación, más aún, la presencia de corrosión en áreas con defectos de soldadura como inclusiones, porosidades se observa mayor severidad en la expuesta en la cámara salina especialmente superficial según se muestra en las fotografías de avance de la corrosión.

Los defectos presentes en la soldadura de raíz son por tanto concentradores de tensiones y puntos de inicio y propagación del proceso de corrosión.

*Probeta de doblado cámara*



*Probeta de doblado inmersión*



*Figura 4.12 - Micrografías de probetas de doblado a 100X*

Para el ensayo a tracción se obtuvieron porcentajes de deformación superiores al 20%, para las probetas de cámara de nieblas salina y de inmersión. Lo que indica que el material de soldadura tiene un comportamiento dúctil luego del período corrosión establecido en esta investigación.

Las fotografías de las secciones de falla en las probetas a tracción presentan superficies transversales de color gris opaco. Además se aprecian cambios significativos en la sección, los mismos que sirven para determinar el porcentaje de deformación indicado en la evaluación del análisis de falla.





*Figura 4.13 - Sección de falla en probetas a tracción*

De acuerdo a los resultados de carga a la rotura y resistencia a la tracción es posible notar una acción corrosiva más severa en la soldadura de las probetas de la cámara de niebla salina debido a que sus valores son menores en un porcentaje alrededor del 2% respecto a la probeta de la cámara de inmersión.

La zona adyacente a la soldadura es afectada por la corrosión originada en ese sector, y al ser este, el de menor tamaño de grano tiene mayor acción corrosiva. La corrosión influye entonces en la disminución de la resistencia mecánica de la soldadura por presencia de los defectos de la misma y es un factor determinante en la falla del material.

## **CAPITULO 5**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1 CONCLUSIONES**

1. Los defectos de soldadura son permitidos por las normas pero la investigación muestra que deben reducirse al máximo. Las normas y códigos toleran la presencia de ciertos defectos en los cordones de soldadura, desde el punto de vista estructural, pero se muestra que la presencia de estos acelera el proceso de corrosión y por supuesto disminuye el tiempo de vida y las propiedades mecánicas del oleoducto. La presente investigación demuestra que las normas y códigos son un mínimo a cumplir y que los requerimientos para la aceptación deben ser más exigentes.

2. En el diseño, las normas y códigos consideran un sobre espesor determinado por corrosión, de 3 mm. La pérdida promedio de espesor proyectada, en base a los resultados supera este valor en un periodo de 20 años, por lo tanto para un período de vida útil de diseño superior deberá incrementarse el sobre espesor por corrosión, superando las recomendaciones de normas y códigos.

3. En el interior de la tubería se requiere que la calidad de la soldadura en la raíz sea óptima ya que está en contacto permanente con el fluido corrosivo. Esto implica que en la raíz de la soldadura no deben existir defectos y se debe evitar al máximo abrir la soldadura para reparaciones, como por ejemplo en un caso de falta de penetración.

4. En el transporte de crudo o sus derivados a través de tubería, el fluido tiende a presentar dos o más fases, que bajo las condiciones analizadas son las que producen una mayor incidencia del proceso corrosivo, esto



significa que para reducir la velocidad de corrosión se debe procurar que el fluido sea transportado en una sola fase.

5. En las probetas que se colocaron en inmersión, se observa que la pérdida de peso es mayor que en aquellas que se colocaron en la cámara, considerando siempre periodos iguales. Además, la velocidad de corrosión es mayor en la primera aproximadamente en un 40%, lo que indica que la corrosión en inmersión es más fuerte que la del proceso de cámara salina, siendo la presencia de oxígeno en el ambiente lo que acelera el proceso corrosivo.

6. Los focos de inicio y propagación del proceso corrosivo serán siempre los cordones de soldadura por ser las zonas más sensibles, mucho más si están en permanente contacto con fluidos o medios corrosivos, especialmente en áreas que tengan defectos de soldadura. Por lo tanto, la presente investigación contribuye en gran medida a la comprensión de los procesos de corrosión en las juntas de soldadura.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- Realizar este tipo de investigación sobre corrosión en tuberías de transporte de crudo, especialmente en las zonas cóncavas del oleoducto.
- Se debería continuar con un estudio de la velocidad de corrosión por tipo de defecto de soldadura para obtener valores reales para nuestro medio.
- Por seguridad se recomienda mantener un espesor por corrosión de al menos 3 mm para una vida útil de tubería proyectada a 20 años.
- Se recomienda evitar el transporte de fluido en dos fases, debido al mayor desarrollo de la corrosión en interfaces aire - líquido.
- Para minimizar los efectos corrosivos en la soldadura y zonas cercanas se recomienda realizar un proceso de suelda con la menor cantidad de defectos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NACE TMO-284 (1996), "Standard test method, Evaluation of Pipeline and Pressure Vessel Steels for Resistance to Hydrogen-Induced Cracking", Houston, Texas.
- [2] ASTM B117 (2002), "Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus", ASTM International.
- [3] FONTANA, M. G. Corrosion Engineering. Singapur, Editorial Mc. Graw-Hill, 1987,p. 39-50.
- [4] GONZALES F. (1989) "Control de la corrosión: Estudio y medida por técnicas electroquímicas". GRAFIPREN, S.A. Madrid, España.
- [5] ARÍSTIDES S, BARBOZA J.F., (2001) "Influencia de los cordones de soldadura sobre la resistencia a la corrosión del acero APIL 5LX – 52, en agua sedimentada de crudo de petróleo", Universidad Nacional de Trujillo, Perú.
- [6] BABOIAN Robert (2002), "NACE CORROSION ENGINEER'S REFERENCE BOOK", 3ra. Edición.
- [7] POURBAIX M. (1987) "Lecciones de corrosión electroquímica" CEBELCOR, Bruselas.
- [8] BACON Hilary, Yorgiadis Strati, (1995), "Corrosión - Manual del ingeniero Mecánico de MARKS", Tomo 1, McGraw-Hill, México.
- [9] HORWITZ, (1996), "Manual de Soldadura", Tomo I, Edit. Alfaomega, Colombia, 200pp.

- [10] LANDCASER J.F, (1999), "Metallurgy of Welding", Abington Publishing.
- [11] API 1104. Welding of pipelines and Related Facilities.
- [12] API 5L. Specification for Line pipe.
- [13] API 1160. Managing System Integrity for Hazardous Liquid Pipelines
- [14] ASME B31.4 Pipeline transportation systems for liquids hydrocarbons and other liquids.
- [15] SSPC-The Society for Protective Coatings- Surface Preparation Specification N°1, SSPC- SP1, Editorial Revisions, November 1, 2004.
- [16] ASM Metals Handbook, Vol. 13, Corrosion
- [17] KERMANY M.B.and D. Harrop, BP International, SPE 29784,1995
- [18] GEVAERT N.V, Radiographer's Welds Interpretation Reference, AGFA, B-2640. Mortsel – Belgium, NDQ6G GB00 199510.
- [19] CROLET J.L., & Bonis M.R., pH Measurement in CO<sub>2</sub> Aqueous solutions under high pressure and Temperature, Corrosion, 1983

## **ANEXOS**

**ANEXO 1**

## DEFECTOS COMUNES EN SOLDADURA E INTERPRETACIÓN DE RADIOGRAFÍAS

Sin importar la configuración de la junta o el procedimiento de aplicación, deben calificarse los procedimientos de soldadura antes de aplicarse.

Un defecto que invariablemente buscará un inspector es el **socavamiento**. Por lo general este no ofrece dificultades. Casi siempre prevalece en cierto grado en el cateto vertical de los cordones de filete, grandes y horizontales. Pero el solo hecho de existir tal defecto no significa que la soldadura sea totalmente inaceptable.

El *socavamiento* debe eliminarse o al menos reducirse al mínimo. El mayor control radica generalmente en el área de detalles del procedimiento o en la destreza del soldador. A pesar de su naturaleza indeseable, la presencia del *socavamiento*, excepto bajo carga de fatiga no es tan perjudicial como pudiera pensarse, incluso si se llegara a aumentar el *socavamiento*, la resistencia de la junta en condiciones de carga estática no puede ser afectada, por esta razón no siempre se requiere reparar un *socavamiento* pequeño en las soldaduras ordinarias.

Otro defecto que se considera regularmente es el de **cráteres** en la soldadura. Todo proceso de soldadura de arco produce un cráter de soldadura, la habilidad para rellenar este *cráter* al terminar de soldar varía considerablemente con la corriente utilizada, el tamaño de la soldadura y otros factores. Si se comprenden estas limitaciones, y se consideran los requerimientos de servicio de la junta, no debe ser difícil decidir si debe o no rellenarse un *cráter*.

La mayoría de los códigos hacen una indicación general relativa al rellenado de *cráteres*. El Código Estructural de la AWS indica que *“todos los cráteres deben rellenarse al tamaño de la sección completa del cordón”*.

### ***Porosidad***

Se utiliza para describir los huecos globulares, libres de todo material sólido, que se encuentra con frecuencia en los cordones de soldadura. En realidad, los huecos son una forma de inclusión que resulta de las reacciones químicas que

tienen lugar durante la aplicación de la soldadura. Difieren de las inclusiones de escoria en que contienen gases y no materia sólida.

Los gases que forman los huecos se derivan de los gases liberados por el enfriamiento del metal de la soldadura, como consecuencia de la reducción de solubilidad al descender la temperatura y de las reacciones químicas que tienen lugar dentro de la propia soldadura.

La porosidad puede restringirse evitando que la corriente sea excesiva o que la longitud del arco lo sea. Puede tener lugar un consumo elevado de los elementos desoxidantes del recubrimiento del electrodo durante la formación del depósito de soldadura, si se emplean corrientes o longitudes de arco excesivas, que dejen disponible en cantidades insuficientes para combinarse con los gases existentes en el metal fundido durante su enfriamiento.

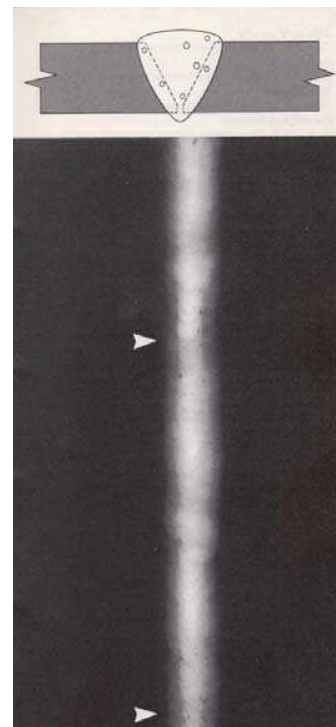
Dentro de este tipo de defectos se encuentran los siguientes con su respectiva imagen radiográfica:

### **POROSIDAD DISPERSA**

**CARACTERISTICA.** Vacíos redondeados de tamaños diversos y distribución irregular.

**IMAGEN RADIOGRAFICA.** Puntos redondeados de densidades más oscuras, tamaños diversos y distribución irregular.

**PROCESO DE SOLDADURA:** SMAW



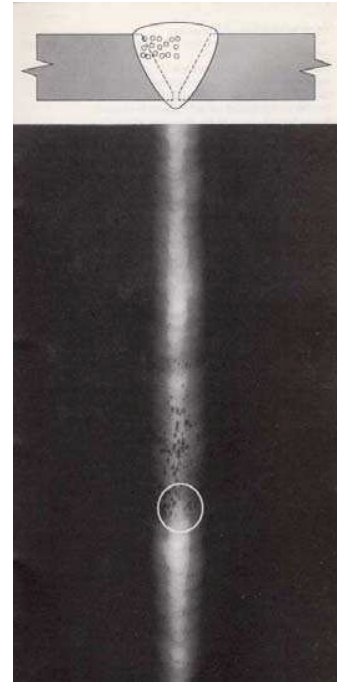


### **POROSIDAD AGRUPADA**

**CARACTERISTICA.** Vacíos redondeados o ligeramente alargados y agrupados.

**IMAGEN RADIOGRAFICA.** Puntos redondeados o ligeramente alargados de una densidad más oscura, agrupados pero irregularmente espaciados.

**PROCESO DE SOLDADURA:** SMAW

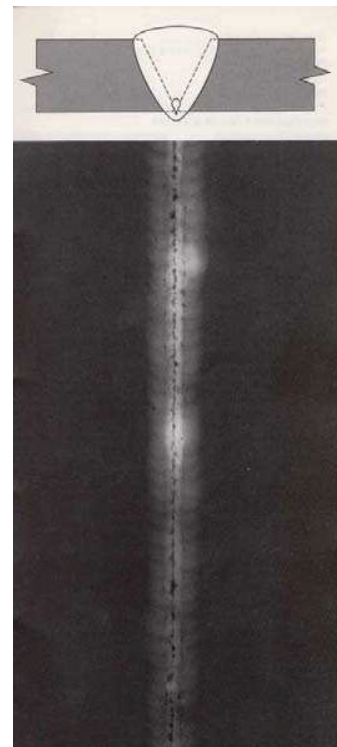


### **POROSIDAD ALINEADA EN EL CORDON DE LA RAIZ**

**CARACTERISTICA.** Vacíos redondeados y alargados en el fondo de la soldadura, alineados a lo largo de la línea central de la soldadura.

**IMAGEN RADIOGRAFICA.** Puntos redondeados y alargados de una densidad más oscura, que pueden estar conectados y que forman una línea recta en el centro del ancho de la imagen.

**PROCESO DE SOLDADURA:** GMAW



### ***Inclusiones no metálicas***

Esta corresponde a los óxidos y otros sólidos no metálicos que se encuentran en forma de inclusiones alargadas y globulares en los cordones de soldadura. Durante la formación del depósito y la subsiguiente solidificación del metal de la soldadura, tienen lugar muchas reacciones químicas entre los materiales (fundente) o con la escoria producida. Algunos de los productos de dichas reacciones son compuestos no metálicos, solubles sólo en cierto grado en el metal fundido. Debido a su menor densidad tienden a buscar la superficie exterior del metal fundido, salvo que se encuentren restricciones para ello.

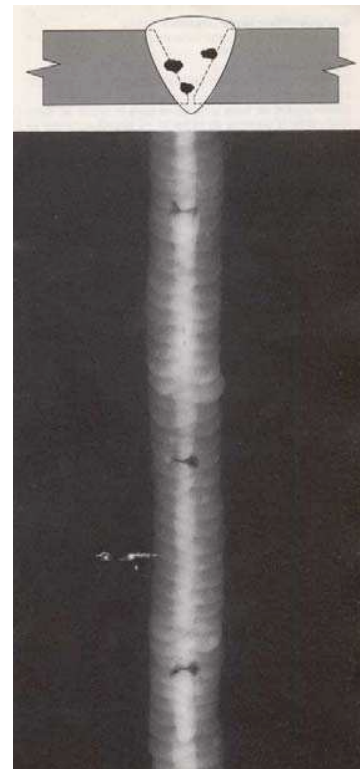
En este grupo tenemos los siguientes ejemplos, representadas con sus respectivas imágenes radiográficas.

#### **INCLUSIONES DE ESCORIA ENTRE LOS CORDONES**

**CARACTERISTICA.** Generalmente impurezas no metálicas que se solidifican en la superficie de la soldadura al no ser removida de entre los cordones de soldeo.

**IMAGEN RADIOGRAFICA.** Un punto de forma irregular y de una densidad más oscura, generalmente ligeramente alargado y aleatoriamente espaciado.

**PROCESO DE SOLDADURA:** SMAW



## **LINEA DE ESCORIA ALARGADAS**

CARACTERISTICA. Impurezas que se solidifican en la superficie después del soldeo y que no fueron removidos de entre los cordones.

IMAGEN RADIOGRAFICA. Líneas alargadas, paralelas o simples, de una densidad más obscura, de ancho irregular y con curvas ligeras en dirección longitudinal

PROCESO DE SOLDADURA: SMAW



### ***Agrietamiento***

El agrietamiento de las juntas soldadas ocurre por la presencia de esfuerzos multidireccionales localizados que en algún punto rebasan la resistencia máximo del metal. Cuando se abren grietas durante la soldadura o como resultado de ésta, generalmente solo es aparente una ligera deformación de la pieza de trabajo. Aunque las grietas que aparecen en las juntas soldadas durante la aplicación de la soldadura son producidas raras veces por esfuerzos multidireccionales solamente, la experiencia ha indicado que en el caso de estructuras pesadas (como bases de máquinas) se ocasionan fallas con poca o ninguna deformación cuando se aplica una carga adicional. Para evitar esta condición indeseable, generalmente se especifica un tratamiento térmico de relevado de esfuerzos para las secciones gruesas.

Una zona sin fundir en la raíz de una soldadura puede dar lugar a grietas sin deformación apreciable, si dicha zona se somete a esfuerzo de tensión. Al soldar dos placas, la raíz de la soldadura queda sujeta a esfuerzos de tensión al depositarse las capas sucesivas, y una raíz parcialmente fundida permite con

frecuencia que se inicie una grieta que puede progresar a través de prácticamente todo el espesor de la soldadura.

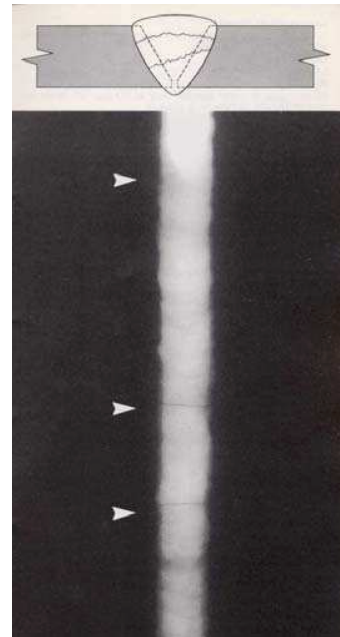
En estos defectos de agrietamientos podemos encontrar los siguientes tipos de grietas.

### **GRIETA TRASVERSAL**

**CARACTERISTICA.** Una fractura del metal de soldeo a través de la soldadura. GMAW / GTAW

**IMAGEN RADIOGRAFICA.** Línea retorcida y ondulada de una densidad más oscura a través de todo el ancho de la imagen.

**PROCESO DE SOLDADURA:** GMAW / GTAW

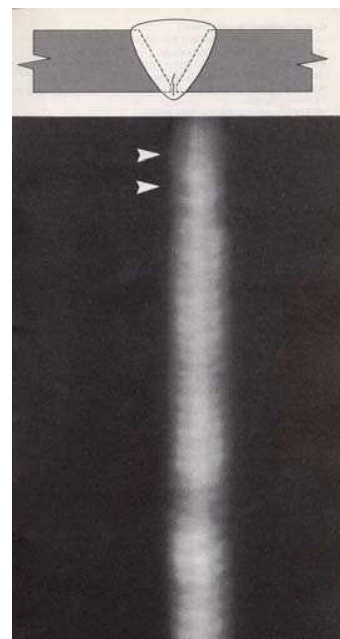


### **GRIETA LONGITUDINAL**

**CARACTERISTICA.** Una fractura del metal de soldeo que se extiende a través de la longitud de la suelda en dirección de la soldadura.

**IMAGEN RADIOGRAFICA.** Líneas retorcidas y onduladas de una densidad más oscura en cualquier lugar a través del largo de la imagen.

**PROCESO DE SOLDADURA:** GMAW / SMAW

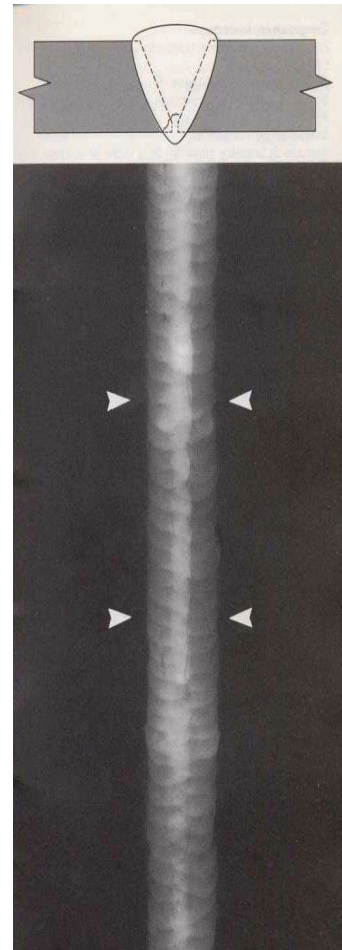


## GRIETA LONGITUDINAL EN LA RAIZ

CARACTERISTICA. Una fractura del metal de soldeo en el borde del cordón de la raíz.

IMAGEN RADIOGRAFICA. Líneas retorcidas y onduladas de una densidad más oscura a lo largo del borde de la imagen del cordón de la raíz. El retorcimiento ayuda a distinguir entre las grietas de la raíz y la penetración incompleta en la raíz.

PROCESO DE SOLDADURA: SMAW



### *Fusión incompleta*

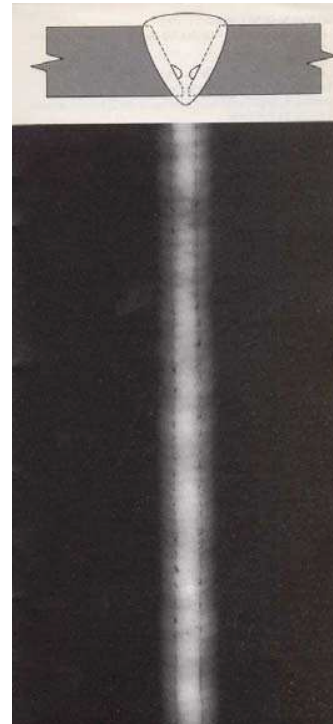
Indica a una falta de fusión entre las capas adyacentes del metal de la soldadura, o entre éste y el metal base. Esta se produce debido a que no se eleva la temperatura del metal base en la zona de la soldadura y en la zona adyacente a ésta, ni la temperatura del metal de soldadura depositado previamente hasta el punto de fusión, o bien por no disolverse (por fundente incorrecto) los óxidos y otros materiales extraños presentes en las superficies a las que debe integrarse por fusión el metal depositado.

**FALTA DE FUSION DE LA PARED LATERAL.  
(LOF)**

CARACTERISTICA. Vacíos alargados entre los cordones de la soldadura y las superficies de las juntas.

IMAGEN RADIOGRAFICA. Líneas alargadas, paralelas o simples de una densidad más oscura, a veces con puntos dispersos a lo curva como la línea largo de la línea de fusión (LOF), que es una recta en dirección longitudinal y no alargada de escoria.

PROCESO DE SOLDADURA: GMAW

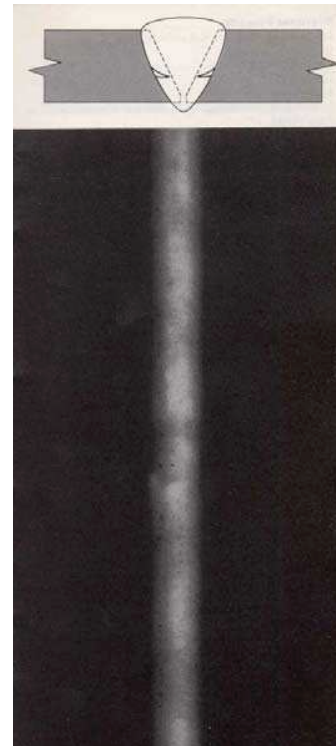


**SOLDEO EN FRIO DE LOS CORDONES  
(INTERPASS COLD LAP)**

CARACTERISTICA. Áreas con falta de fusión a lo largo de la superficie superior y el borde de los cordones inferiores.

IMAGEN RADIOGRAFICA. Pequeños puntos de densidades más oscuras, algunos con prolongaciones ligeramente alargadas, alineados en la dirección de la soldadura y no en el centro del ancho de la imagen.

PROCESO DE SOLDADURA: GMAW



### ***Penetración incompleta***

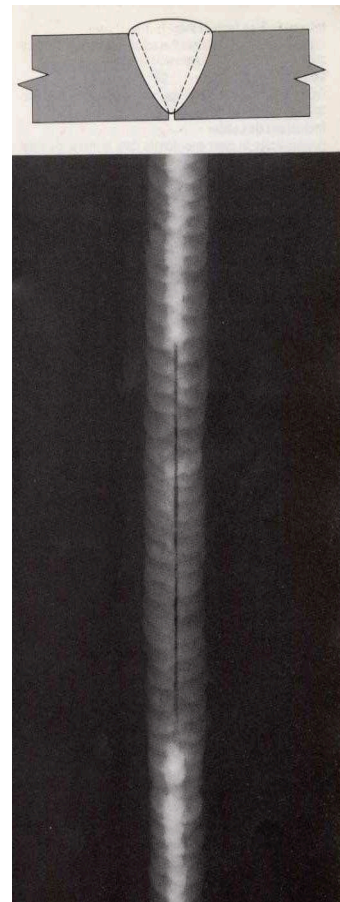
Indica que el metal depositado y el metal base no se funden en forma integral en la raíz de la soldadura. Puede ser ocasionada porque la cara de la raíz de la soldadura de ranura no alcance la temperatura de fusión a toda su altura, o porque el metal de soldadura no llegue a la raíz de una soldadura de filete y deje un agujero ocasionado el punteo del metal de la soldadura desde un miembro a otro.

### **FALTA DE PENETRACIÓN O PENETRACION INCOMPLETA (LOP)**

**CARACTERISTICA.** Los bordes de las piezas, generalmente en el fondo de las soldaduras de ranura en V sencilla, no se unieron al soldarse.

**IMAGEN RADIOGRAFICA.** Una banda de densidad más oscura, con bordes paralelos muy rectos, en el centro del ancho de la imagen.

**PROCESO DE SOLDADURA: SMAW**



### **TIPOS DE INSPECCIONES**

#### ***Inspección visual***

Este es el método más utilizado de inspección, por ser fácil de aplicar, rápido y de un costo relativamente bajo, así porque proporciona información muy

importante en relación con el cumplimiento general del conjunto soldado con los requerimientos de la especificación. Esta inspección se puede realizar antes de aplicar la soldadura, durante la labor de aplicación y después de haberla terminado.

Antes de comenzar a soldar, el inspector revisa el material por soldar, en busca de defectos tales como costras, costuras, escamas, laminaciones en placa y dimensiones de la placa. Después de ensamblar las partes que han de soldarse, el inspector puede notar si hay aberturas de raíz incorrectas, preparación inadecuada de los bordes y demás características de preparación de la junta que pudieran afectar la calidad de la junta soldada.

Durante la aplicación de la soldadura, el inspector comprueba que se esté cumpliendo con todos los requerimientos del procedimiento.

### ***Inspección radiográfica***

Este método de prueba aprovecha la posibilidad que ofrecen las radiaciones de onda corta, como son los rayos X y rayos gamma, de penetrar a través de objetos opacos a la luz ordinaria...

### ***Inspección por partículas magnéticas***

La inspección por partículas magnéticas es un método para localizar y definir discontinuidades en los materiales magnéticos. Es excelente para detectar defectos superficiales en soldaduras, porque revela discontinuidades que son demasiado finas para apreciarse a simple vista. Con equipo especial también puede usarse para detectar defectos que estén cercanos a la superficie (sub-superficiales)...

### ***Inspección con líquido penetrante***

La inspección con líquido penetrante es un método no destructivo para localizar grietas superficiales y pequeños poros invisibles a simple vista. Es una técnica favorecida para localizar fallas en soldaduras, y puede aplicarse en donde no



es útil la inspección por partículas magnéticas, como en los aceros inoxidables austeníticos o en los metales no ferrosos. Se utilizan dos tipos de inspección de penetración, que se definen por la sustancia penetrante a usar, el de la sustancia fluorescente y el de la sustancia colorante.

### ***Inspección ultrasónica***

La inspección ultrasónica es un método supersensible para detectar, localizar y medir defectos tanto superficiales como sub superficiales en los metales. Las fallas que no pueden descubrirse por otros métodos, y hasta las grietas suficientemente pequeñas para clasificarse como micro separaciones, pueden detectarse por éste. En la inspección práctica de soldaduras la sensibilidad del proceso se restringe a menudo por diseño, o ajustando el equipo para dar una respuesta equivalente a una sensibilidad del 2% del espesor del metal, para obtener así resultados comparables con los obtenidos por inspección radiográfica.

### ***Otros métodos no destructivos de prueba de soldaduras***

Dentro de estos métodos se incluyen las siguientes pruebas:

- a) Químicas
- b) Metalográficas
- c) De dureza
- d) Mecánicas

Estas pruebas no se realizan comúnmente dentro del medio y serán siempre complementarias a los métodos indicados anteriormente

## **Propiedades de los metales soldados**

### ***Resistencia mecánica***

Es la capacidad de un metal para oponerse a su destrucción bajo la acción de cargas externas. El valor de la resistencia indica la fuerza que se requiere para

vencer los ligamentos que mantienen unidas las moléculas que forman las estructuras de los cristales. Dos de estas cargas (las de tensión y compresión) se determinan por medio de una máquina universal de pruebas.

La resistencia del metal a la tensión, puede calcularse dividiendo la carga máxima (en libras) para el área de sección transversal (en pulgadas cuadradas).

### ***Elasticidad***

Esta propiedad de los metales indican que al estirarlos no se rompen de manera repentina, sino que tienden a regresar a su tamaño original tan pronto se deja de aplicar una fuerza. Al tensionarlos con más fuerza se produce una rotura.

### ***Ductilidad***

Un material dúctil es aquel que puede deformarse permanentemente sin romperse o sin fallar.

### ***Fragilidad***

Es la propiedad contraria a la ductilidad. Los materiales frágiles fallan sin deformación permanente apreciable. Además tienen baja resistencia al choque o al impacto, es decir a la aplicación rápida de fuerzas.

### ***Tenacidad***

Es la propiedad que le permite soportar esfuerzo considerable aplicado lenta o súbitamente, en forma continua o intermitente y deformarse antes de hallar. La prueba utilizada con más frecuencia para determinar la tenacidad de los materiales es la prueba de impacto o Charpy.

## ***Dureza***

Desde el punto de vista metalúrgico, la dureza indica mayor resistencia a la tracción, menor ductilidad y mayor resistencia al desgaste abrasivo. La dureza elevada indica también una baja resistencia a los impactos aunque un tratamiento térmico puede modificar esto.

Las pruebas de dureza se utilizan para verificar la uniformidad del material de las partes metálicas durante la producción. Cualquier falta de uniformidad en el material es revelada por excesiva dureza o por su excesiva blandura.

Existen varios tipos de escalas de durezas dadas por diferentes pruebas, tales como la Brinell y la Rockwell.

## **ANEXOS**

**ANEXO 1**

## DEFECTOS COMUNES EN SOLDADURA E INTERPRETACIÓN DE RADIOGRAFÍAS

Sin importar la configuración de la junta o el procedimiento de aplicación, deben calificarse los procedimientos de soldadura antes de aplicarse.

Un defecto que invariablemente buscará un inspector es el **socavamiento**. Por lo general este no ofrece dificultades. Casi siempre prevalece en cierto grado en el cateto vertical de los cordones de filete, grandes y horizontales. Pero el solo hecho de existir tal defecto no significa que la soldadura sea totalmente inaceptable.

El *socavamiento* debe eliminarse o al menos reducirse al mínimo. El mayor control radica generalmente en el área de detalles del procedimiento o en la destreza del soldador. A pesar de su naturaleza indeseable, la presencia del *socavamiento*, excepto bajo carga de fatiga no es tan perjudicial como pudiera pensarse, incluso si se llegara a aumentar el *socavamiento*, la resistencia de la junta en condiciones de carga estática no puede ser afectada, por esta razón no siempre se requiere reparar un *socavamiento* pequeño en las soldaduras ordinarias.

Otro defecto que se considera regularmente es el de **cráteres** en la soldadura. Todo proceso de soldadura de arco produce un cráter de soldadura, la habilidad para rellenar este *cráter* al terminar de soldar varía considerablemente con la corriente utilizada, el tamaño de la soldadura y otros factores. Si se comprenden estas limitaciones, y se consideran los requerimientos de servicio de la junta, no debe ser difícil decidir si debe o no rellenarse un *cráter*.

La mayoría de los códigos hacen una indicación general relativa al rellenado de *cráteres*. El Código Estructural de la AWS indica que *“todos los cráteres deben rellenarse al tamaño de la sección completa del cordón”*.

### ***Porosidad***

Se utiliza para describir los huecos globulares, libres de todo material sólido, que se encuentra con frecuencia en los cordones de soldadura. En realidad, los huecos son una forma de inclusión que resulta de las reacciones químicas que

tienen lugar durante la aplicación de la soldadura. Difieren de las inclusiones de escoria en que contienen gases y no materia sólida.

Los gases que forman los huecos se derivan de los gases liberados por el enfriamiento del metal de la soldadura, como consecuencia de la reducción de solubilidad al descender la temperatura y de las reacciones químicas que tienen lugar dentro de la propia soldadura.

La porosidad puede restringirse evitando que la corriente sea excesiva o que la longitud del arco lo sea. Puede tener lugar un consumo elevado de los elementos desoxidantes del recubrimiento del electrodo durante la formación del depósito de soldadura, si se emplean corrientes o longitudes de arco excesivas, que dejen disponible en cantidades insuficientes para combinarse con los gases existentes en el metal fundido durante su enfriamiento.

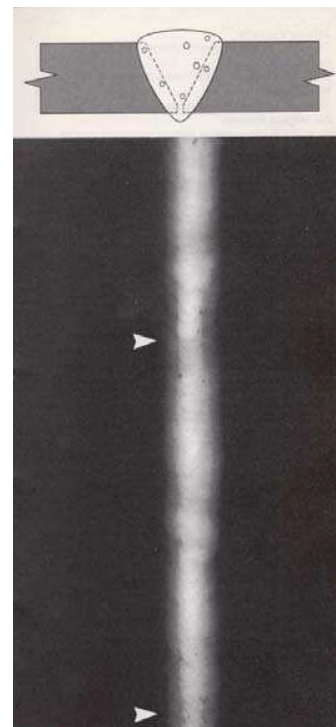
Dentro de este tipo de defectos se encuentran los siguientes con su respectiva imagen radiográfica:

### **POROSIDAD DISPERSA**

**CARACTERISTICA.** Vacíos redondeados de tamaños diversos y distribución irregular.

**IMAGEN RADIOGRAFICA.** Puntos redondeados de densidades más oscuras, tamaños diversos y distribución irregular.

**PROCESO DE SOLDADURA:** SMAW

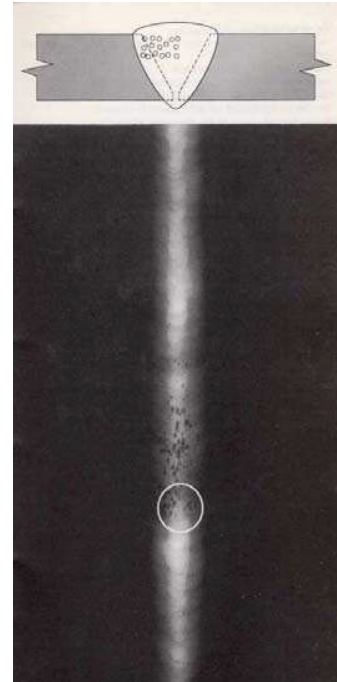


### **POROSIDAD AGRUPADA**

**CARACTERISTICA.** Vacíos redondeados o ligeramente alargados y agrupados.

**IMAGEN RADIOGRAFICA.** Puntos redondeados o ligeramente alargados de una densidad más oscura, agrupados pero irregularmente espaciados.

**PROCESO DE SOLDADURA:** SMAW

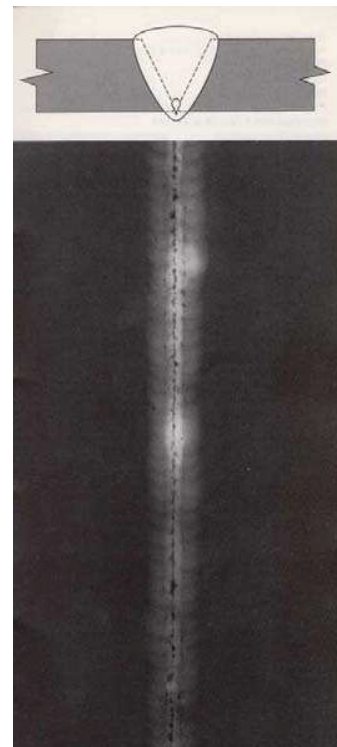


### **POROSIDAD ALINEADA EN EL CORDON DE LA RAIZ**

**CARACTERISTICA.** Vacíos redondeados y alargados en el fondo de la soldadura, alineados a lo largo de la línea central de la soldadura.

**IMAGEN RADIOGRAFICA.** Puntos redondeados y alargados de una densidad más oscura, que pueden estar conectados y que forman una línea recta en el centro del ancho de la imagen.

**PROCESO DE SOLDADURA:** GMAW





### ***Inclusiones no metálicas***

Esta corresponde a los óxidos y otros sólidos no metálicos que se encuentran en forma de inclusiones alargadas y globulares en los cordones de soldadura. Durante la formación del depósito y la subsiguiente solidificación del metal de la soldadura, tienen lugar muchas reacciones químicas entre los materiales (fundente) o con la escoria producida. Algunos de los productos de dichas reacciones son compuestos no metálicos, solubles sólo en cierto grado en el metal fundido. Debido a su menor densidad tienden a buscar la superficie exterior del metal fundido, salvo que se encuentren restricciones para ello.

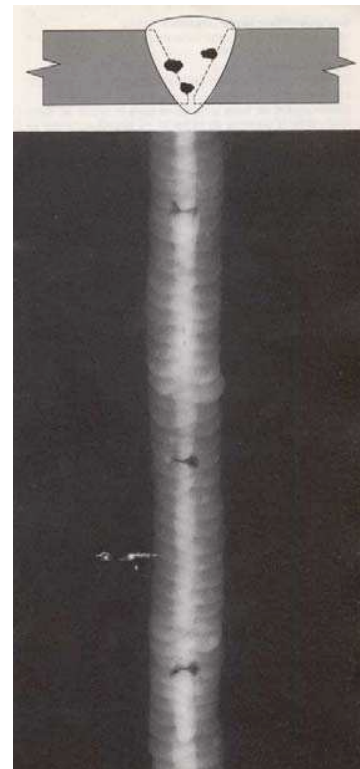
En este grupo tenemos los siguientes ejemplos, representadas con sus respectivas imágenes radiográficas.

#### **INCLUSIONES DE ESCORIA ENTRE LOS CORDONES**

**CARACTERISTICA.** Generalmente impurezas no metálicas que se solidifican en la superficie de la soldadura al no ser removida de entre los cordones de soldeo.

**IMAGEN RADIOGRAFICA.** Un punto de forma irregular y de una densidad más oscura, generalmente ligeramente alargado y aleatoriamente espaciado.

**PROCESO DE SOLDADURA:** SMAW



## **LINEA DE ESCORIA ALARGADAS**

**CARACTERISTICA.** Impurezas que se solidifican en la superficie después del soldeo y que no fueron removidos de entre los cordones.

**IMAGEN RADIOGRAFICA.** Líneas alargadas, paralelas o simples, de una densidad más obscura, de ancho irregular y con curvas ligeras en dirección longitudinal

**PROCESO DE SOLDADURA:** SMAW



### ***Agrietamiento***

El agrietamiento de las juntas soldadas ocurre por la presencia de esfuerzos multidireccionales localizados que en algún punto rebasan la resistencia máximo del metal. Cuando se abren grietas durante la soldadura o como resultado de ésta, generalmente solo es aparente una ligera deformación de la pieza de trabajo. Aunque las grietas que aparecen en las juntas soldadas durante la aplicación de la soldadura son producidas raras veces por esfuerzos multidireccionales solamente, la experiencia ha indicado que en el caso de estructuras pesadas (como bases de máquinas) se ocasionan fallas con poca o ninguna deformación cuando se aplica una carga adicional. Para evitar esta condición indeseable, generalmente se especifica un tratamiento térmico de relevado de esfuerzos para las secciones gruesas.

Una zona sin fundir en la raíz de una soldadura puede dar lugar a grietas sin deformación apreciable, si dicha zona se somete a esfuerzo de tensión. Al soldar dos placas, la raíz de la soldadura queda sujeta a esfuerzos de tensión al depositarse las capas sucesivas, y una raíz parcialmente fundida permite con

frecuencia que se inicie una grieta que puede progresar a través de prácticamente todo el espesor de la soldadura.

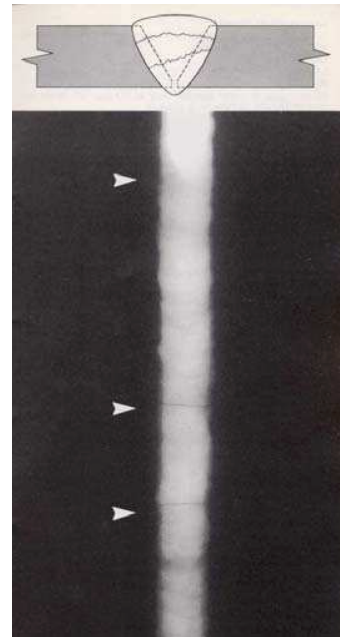
En estos defectos de agrietamientos podemos encontrar los siguientes tipos de grietas.

### **GRIETA TRASVERSAL**

**CARACTERISTICA.** Una fractura del metal de soldeo a través de la soldadura. GMAW / GTAW

**IMAGEN RADIOGRAFICA.** Línea retorcida y ondulada de una densidad más oscura a través de todo el ancho de la imagen.

**PROCESO DE SOLDADURA:** GMAW / GTAW

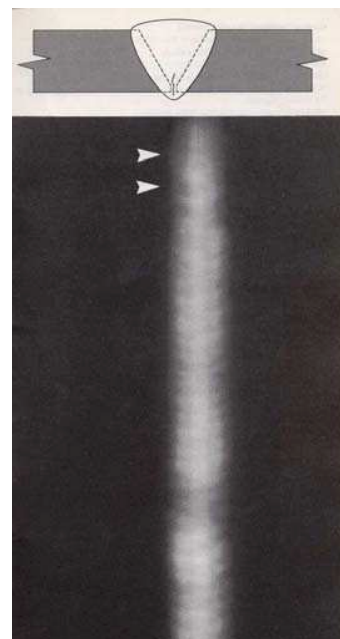


### **GRIETA LONGITUDINAL**

**CARACTERISTICA.** Una fractura del metal de soldeo que se extiende a través de la longitud de la suelda en dirección de la soldadura.

**IMAGEN RADIOGRAFICA.** Líneas retorcidas y onduladas de una densidad más oscura en cualquier lugar a través del largo de la imagen.

**PROCESO DE SOLDADURA:** GMAW / SMAW

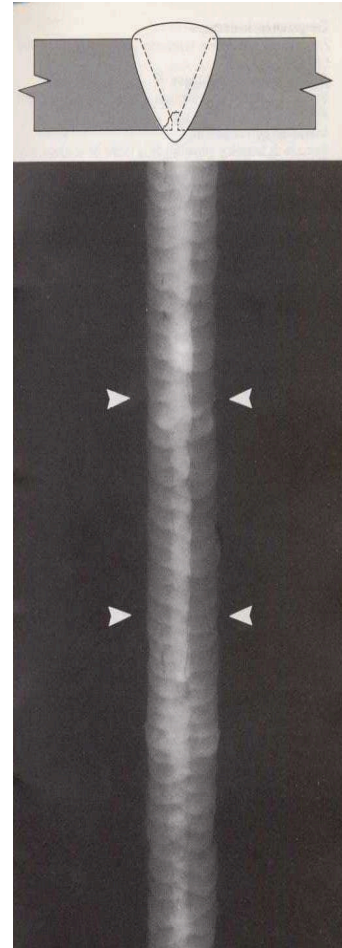


## GRIETA LONGITUDINAL EN LA RAIZ

CARACTERISTICA. Una fractura del metal de soldeo en el borde del cordón de la raíz.

IMAGEN RADIOGRAFICA. Líneas retorcidas y onduladas de una densidad más oscura a lo largo del borde de la imagen del cordón de la raíz. El retorcimiento ayuda a distinguir entre las grietas de la raíz y la penetración incompleta en la raíz.

PROCESO DE SOLDADURA: SMAW



### *Fusión incompleta*

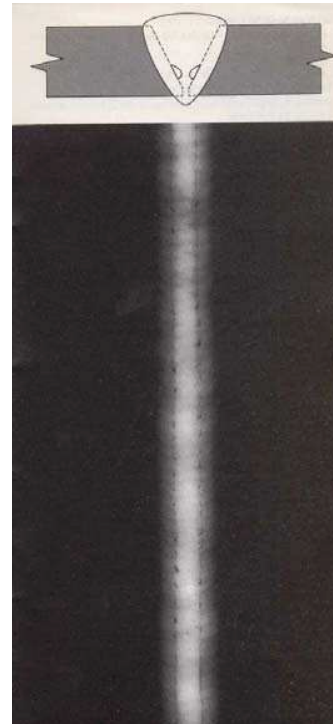
Indica a una falta de fusión entre las capas adyacentes del metal de la soldadura, o entre éste y el metal base. Esta se produce debido a que no se eleva la temperatura del metal base en la zona de la soldadura y en la zona adyacente a ésta, ni la temperatura del metal de soldadura depositado previamente hasta el punto de fusión, o bien por no disolverse (por fundente incorrecto) los óxidos y otros materiales extraños presentes en las superficies a las que debe integrarse por fusión el metal depositado.

**FALTA DE FUSION DE LA PARED LATERAL.  
(LOF)**

CARACTERISTICA. Vacíos alargados entre los cordones de la soldadura y las superficies de las juntas.

IMAGEN RADIOGRAFICA. Líneas alargadas, paralelas o simples de una densidad más oscura, a veces con puntos dispersos a lo curva como la línea largo de la línea de fusión (LOF), que es una recta en dirección longitudinal y no alargada de escoria.

PROCESO DE SOLDADURA: GMAW

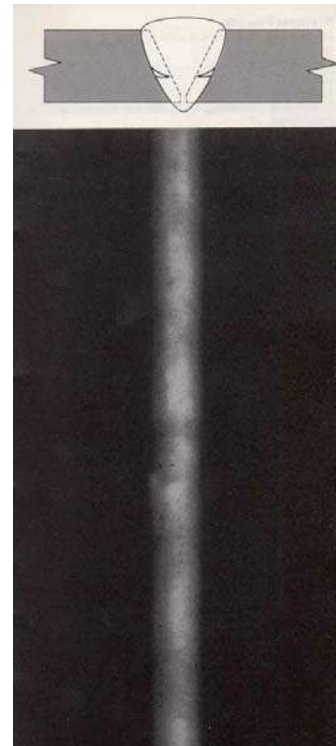


**SOLDEO EN FRIO DE LOS CORDONES  
(INTERPASS COLD LAP)**

CARACTERISTICA. Áreas con falta de fusión a lo largo de la superficie superior y el borde de los cordones inferiores.

IMAGEN RADIOGRAFICA. Pequeños puntos de densidades más oscuras, algunos con prolongaciones ligeramente alargadas, alineados en la dirección de la soldadura y no en el centro del ancho de la imagen.

PROCESO DE SOLDADURA: GMAW



### ***Penetración incompleta***

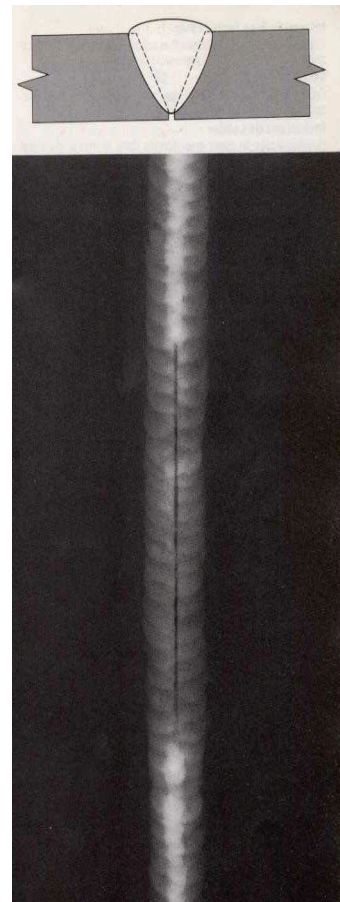
Indica que el metal depositado y el metal base no se funden en forma integral en la raíz de la soldadura. Puede ser ocasionada porque la cara de la raíz de la soldadura de ranura no alcance la temperatura de fusión a toda su altura, o porque el metal de soldadura no llegue a la raíz de una soldadura de filete y deje un agujero ocasionado el punteo del metal de la soldadura desde un miembro a otro.

### **FALTA DE PENETRACIÓN O PENETRACION INCOMPLETA (LOP)**

**CARACTERISTICA.** Los bordes de las piezas, generalmente en el fondo de las soldaduras de ranura en V sencilla, no se unieron al soldarse.

**IMAGEN RADIOGRAFICA.** Una banda de densidad más oscura, con bordes paralelos muy rectos, en el centro del ancho de la imagen.

**PROCESO DE SOLDADURA: SMAW**



### **TIPOS DE INSPECCIONES**

#### ***Inspección visual***

Este es el método más utilizado de inspección, por ser fácil de aplicar, rápido y de un costo relativamente bajo, así porque proporciona información muy

importante en relación con el cumplimiento general del conjunto soldado con los requerimientos de la especificación. Esta inspección se puede realizar antes de aplicar la soldadura, durante la labor de aplicación y después de haberla terminado.

Antes de comenzar a soldar, el inspector revisa el material por soldar, en busca de defectos tales como costras, costuras, escamas, laminaciones en placa y dimensiones de la placa. Después de ensamblar las partes que han de soldarse, el inspector puede notar si hay aberturas de raíz incorrectas, preparación inadecuada de los bordes y demás características de preparación de la junta que pudieran afectar la calidad de la junta soldada.

Durante la aplicación de la soldadura, el inspector comprueba que se esté cumpliendo con todos los requerimientos del procedimiento.

### ***Inspección radiográfica***

Este método de prueba aprovecha la posibilidad que ofrecen las radiaciones de onda corta, como son los rayos X y rayos gamma, de penetrar a través de objetos opacos a la luz ordinaria...

### ***Inspección por partículas magnéticas***

La inspección por partículas magnéticas es un método para localizar y definir discontinuidades en los materiales magnéticos. Es excelente para detectar defectos superficiales en soldaduras, porque revela discontinuidades que son demasiado finas para apreciarse a simple vista. Con equipo especial también puede usarse para detectar defectos que estén cercanos a la superficie (sub-superficiales)...

### ***Inspección con líquido penetrante***

La inspección con líquido penetrante es un método no destructivo para localizar grietas superficiales y pequeños poros invisibles a simple vista. Es una técnica favorecida para localizar fallas en soldaduras, y puede aplicarse en donde no

es útil la inspección por partículas magnéticas, como en los aceros inoxidable austeníticos o en los metales no ferrosos. Se utilizan dos tipos de inspección de penetración, que se definen por la sustancia penetrante a usar, el de la sustancia fluorescente y el de la sustancia colorante.

### ***Inspección ultrasónica***

La inspección ultrasónica es un método supersensible para detectar, localizar y medir defectos tanto superficiales como sub superficiales en los metales. Las fallas que no pueden descubrirse por otros métodos, y hasta las grietas suficientemente pequeñas para clasificarse como micro separaciones, pueden detectarse por éste. En la inspección práctica de soldaduras la sensibilidad del proceso se restringe a menudo por diseño, o ajustando el equipo para dar una respuesta equivalente a una sensibilidad del 2% del espesor del metal, para obtener así resultados comparables con los obtenidos por inspección radiográfica.

### ***Otros métodos no destructivos de prueba de soldaduras***

Dentro de estos métodos se incluyen las siguientes pruebas:

- a) Químicas
- b) Metalográficas
- c) De dureza
- d) Mecánicas

Estas pruebas no se realizan comúnmente dentro del medio y serán siempre complementarias a los métodos indicados anteriormente

## **Propiedades de los metales soldados**

### ***Resistencia mecánica***

Es la capacidad de un metal para oponerse a su destrucción bajo la acción de cargas externas. El valor de la resistencia indica la fuerza que se requiere para



vencer los ligamentos que mantienen unidas las moléculas que forman las estructuras de los cristales. Dos de estas cargas (las de tensión y compresión) se determinan por medio de una máquina universal de pruebas.

La resistencia del metal a la tensión, puede calcularse dividiendo la carga máxima (en libras) para el área de sección transversal (en pulgadas cuadradas).

### ***Elasticidad***

Esta propiedad de los metales indican que al estirarlos no se rompen de manera repentina, sino que tienden a regresar a su tamaño original tan pronto se deja de aplicar una fuerza. Al tensionarlos con más fuerza se produce una rotura.

### ***Ductilidad***

Un material dúctil es aquel que puede deformarse permanentemente sin romperse o sin fallar.

### ***Fragilidad***

Es la propiedad contraria a la ductilidad. Los materiales frágiles fallan sin deformación permanente apreciable. Además tienen baja resistencia al choque o al impacto, es decir a la aplicación rápida de fuerzas.

### ***Tenacidad***

Es la propiedad que le permite soportar esfuerzo considerable aplicado lenta o súbitamente, en forma continua o intermitente y deformarse antes de hallar. La prueba utilizada con más frecuencia para determinar la tenacidad de los materiales es la prueba de impacto o Charpy.

## ***Dureza***

Desde el punto de vista metalúrgico, la dureza indica mayor resistencia a la tracción, menor ductilidad y mayor resistencia al desgaste abrasivo. La dureza elevada indica también una baja resistencia a los impactos aunque un tratamiento térmico puede modificar esto.

Las pruebas de dureza se utilizan para verificar la uniformidad del material de las partes metálicas durante la producción. Cualquier falta de uniformidad en el material es revelada por excesiva dureza o por su excesiva blandura.






Existen varios tipos de escalas de durezas dadas por diferentes pruebas, tales como la Brinell y la Rockwell.

## **ANEXO 2**

## REGISTRO FOTOGRÁFICO DE PROBETAS DE CÁMARA SALINA A 1X



### Probeta a.1






				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4




				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9

		
Semana 10	Semana 11	Condición final

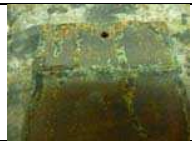



### Probeta a.2




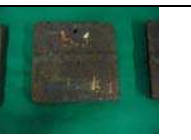

				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4

				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9

		
Semana 10	Semana 11	Condición final

**Probeta b.1**



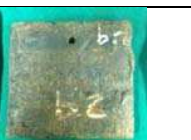


				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4

				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9

		
Semana 10	Semana 11	Condición final

**Probeta b.2**






				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4

				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9

		
Semana 10	Semana 11	Condición final

**Probeta c.1**






				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4

				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9

		
Semana 10	Semana 11	Condición final

**Probeta c.2**






				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4

				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9

		
Semana 10	Semana 11	Condición final

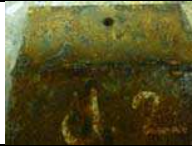
**Probeta d.1**






				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4

				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9

		
Semana 10	Semana 11	Condición final

**Probeta d.2**


				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4

				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9

		
Semana 10	Semana 11	Condición final

**Probeta e.1**






				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4

				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9

		
Semana 10	Semana 11	Condición final

**Probeta e.2**

				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4




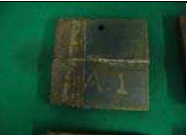

				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9

		
Semana 10	Semana 11	Condición final



**REGISTRO FOTOGRÁFICO DE PROBETAS EN INMERSIÓN A 1X**  
**Probeta A.1**

				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4

				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9

		
Semana 10	Semana 11	Condición final

**Probeta A.2**


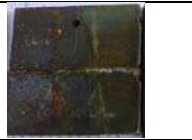

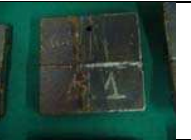

				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4



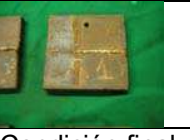
				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9

		
Semana 10	Semana 11	Condición final

**Probeta B.1**

				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4

				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9

		
Semana 10	Semana 11	Condición final

**Probeta B.2**

				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4

				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9

		
Semana 10	Semana 11	Condición final

**Probeta C.1**

				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4

				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9

		
Semana 10	Semana 11	Condición final

**Probeta C.2**

				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4



				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9

		
Semana 10	Semana 11	Condición final

**Probeta D.1**

				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4

				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9

		
Semana 10	Semana 11	Condición final

**Probeta D.2**

				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4


				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9

		
Semana 10	Semana 11	Condición final

**Probeta E.1**

				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4

				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9

		
Semana 10	Semana 11	Condición final

**Probeta E.2**

				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4













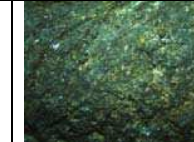
				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9

		
Semana 10	Semana 11	Condición final









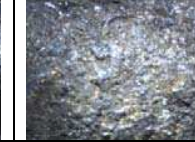




## **ANEXO 3**

## REGISTRO FOTOGRÁFICO DE PROBETAS EN CÁMARA SALINA

### Probeta a.1







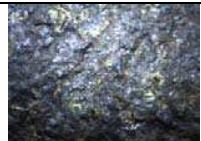

				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9
				
Semana 10	Semana 11	Condición final		

### Probeta a.2













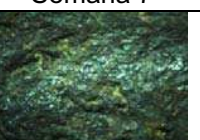
				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9
				
Semana 10	Semana 11	Condición final		

### Probeta b.1


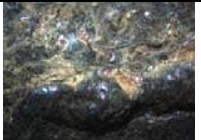

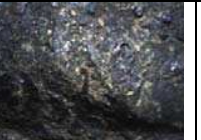






				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4

				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9
				
Semana 10	Semana 11	Condición final		

**Probeta b.2**

				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9
				
Semana 10	Semana 11	Condición final		




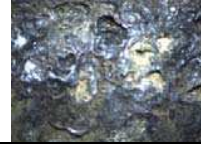





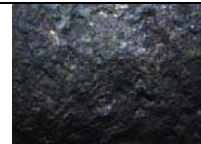

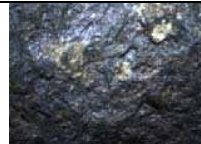
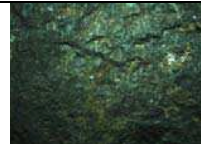
**Probeta c.1**

				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9

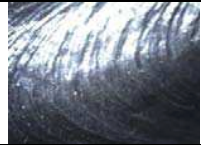


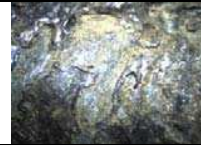






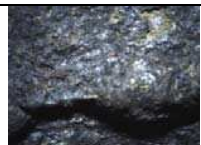

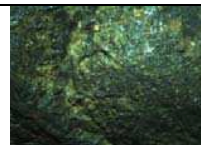


		
Semana 10	Semana 11	Condición final



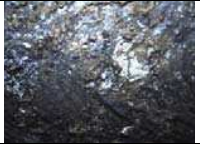









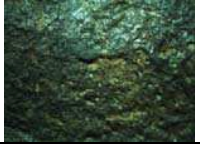
**Probeta c.2**

				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9
				
Semana 10	Semana 11	Condición final		


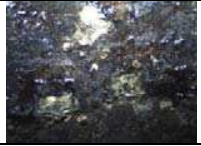

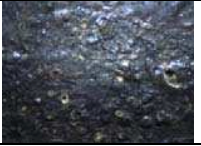
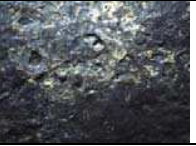
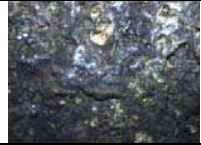


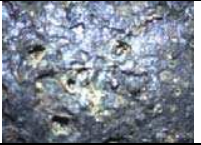
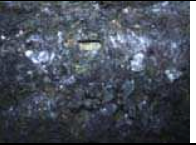
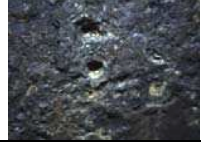
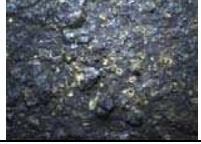
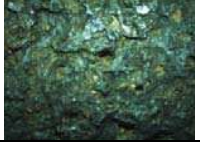
**Probeta d.1**

				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9
				
Semana 10	Semana 11	Condición final		



**Probeta d.2**



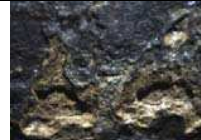
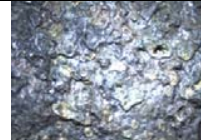


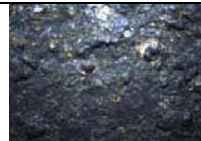
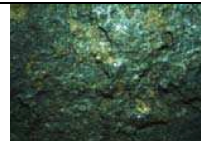
				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9
				
Semana 10	Semana 11	Condición final		

**Probeta e.1**











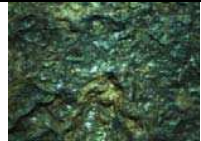
				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9
				
Semana 10	Semana 11	Condición final		

**Probeta e.2**






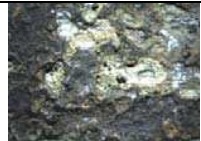


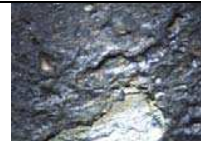


				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4

				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9
				
Semana 10	Semana 11	Condición final		

**Probeta para doblado**



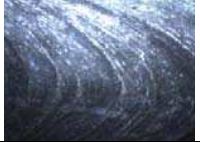










				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 4	Semana 6
				
Semana 7	Semana 8	Semana 9	Semana 10	Semana 11
				
Condición final				

**Probeta para tracción**

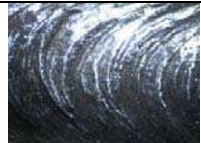

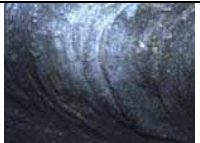










				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 4	Semana 6
				
Semana 7	Semana 8	Semana 9	Semana 10	Semana 11
				
Condición final				

## REGISTRO FOTOGRÁFICO DE PROBETAS EN INMERSIÓN

### Probeta A.1









				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9
				
Semana 10	Semana 11	Condición final		

### Probeta A.2












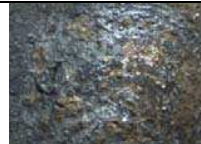
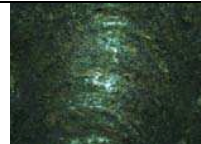
				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9
				
Semana 10	Semana 11	Condición final		

### Probeta B.1

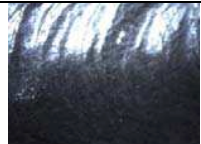




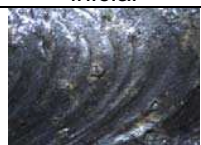




				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4


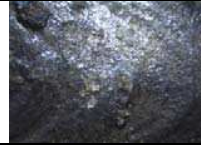
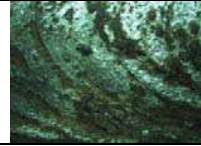
				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9
				
Semana 10	Semana 11	Condición final		

**Probeta B.2**

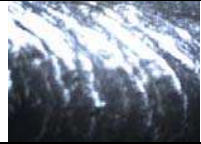

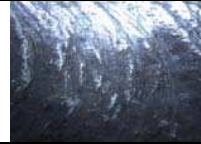









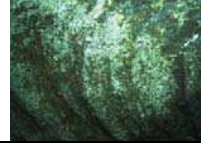
				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9
				
Semana 10	Semana 11	Condición final		

**Probeta C.1**

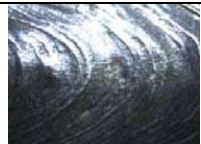




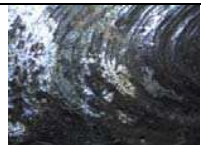





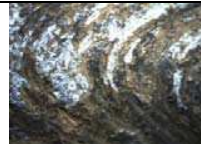

				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9

		
Semana 10	Semana 11	Condición final












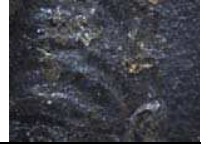

**Probeta C.2**

				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9
				
Semana 10	Semana 11	Condición final		


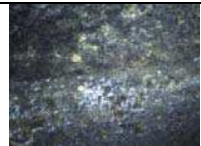
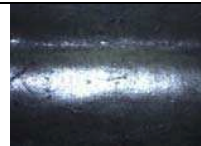










**Probeta D.1**

				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9
				
Semana 10	Semana 11	Condición final		

### Probeta D.2





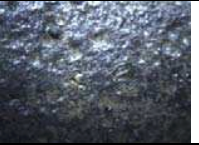



				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9
				
Semana 10	Semana 11	Condición final		

### Probeta E.1













				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9
				
Semana 10	Semana 11	Condición final		

### Probeta E.2








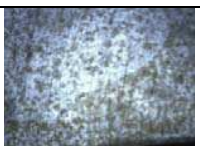


				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4

				
Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9
				
Semana 10	Semana 11	Condición final		

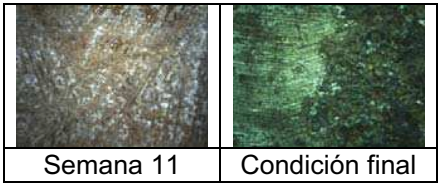
**Probeta para doblado**

				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 4	Semana 5
				
Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9	Semana 10
				
Semana 11	Condición final			

**Probeta para tracción**

				
Condición inicial	Semana 1	Semana 2	Semana 4	Semana 5
				
Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9	Semana 10





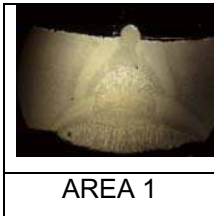
## **ANEXO 4**

**REGISTRO FOTOGRÁFICO DE MUESTRAS METALOGRAFICAS  
DE LAS SECCIONES DE LA SOLDADURA EN LA CÁMARA  
SALINA A 10X**

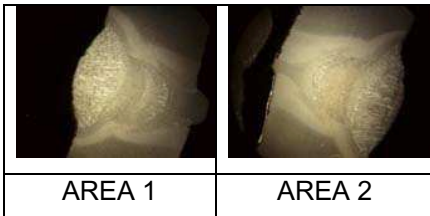
**Probeta a.1**



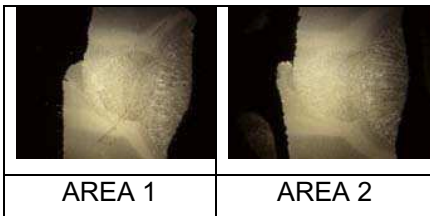
**Probeta a.2**



**Probeta b.1**



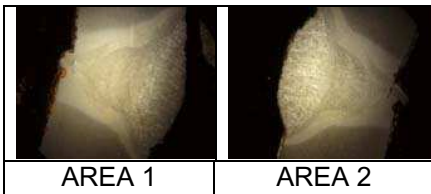
**Probeta b.2**



**Probeta c.1**



**Probeta c.2**



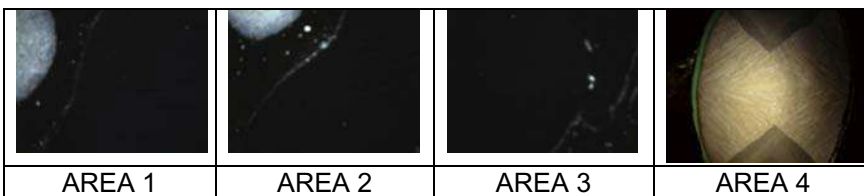
**Probeta d.1**



**Probeta d.2**



**Probeta e.1**



**Probeta e.2**



AREA 1

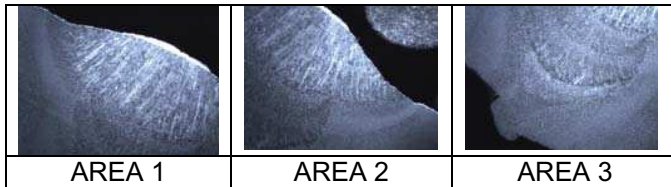
**Probeta para doblado**



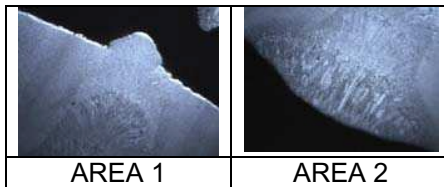
AREA 1

**REGISTRO FOTOGRÁFICO DE MUESTRAS METALOGRAFICAS  
DE SECCIONES DE LA SOLDADURA DE PROBETAS EN  
INMERSIÓN A 10X**

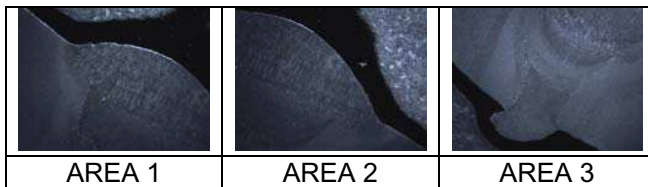
**Probeta A.1**



**Probeta A.2**



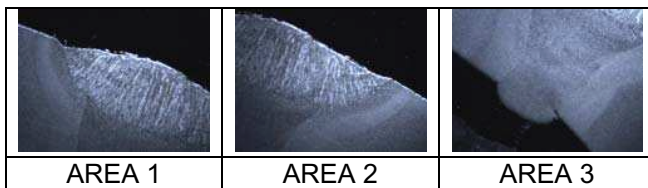
**Probeta B.1**



**Probeta B.2**



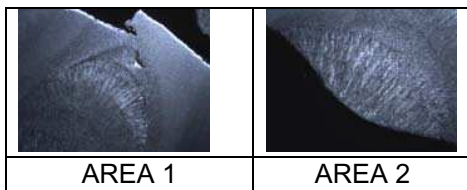
**Probeta C.1**



**Probeta C.2**



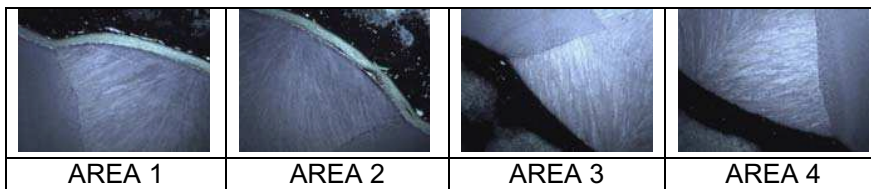
**Probeta D.1**



**Probeta D.2**



**Probeta E.2**



**Probeta para doblado**



## **ANEXO 5**

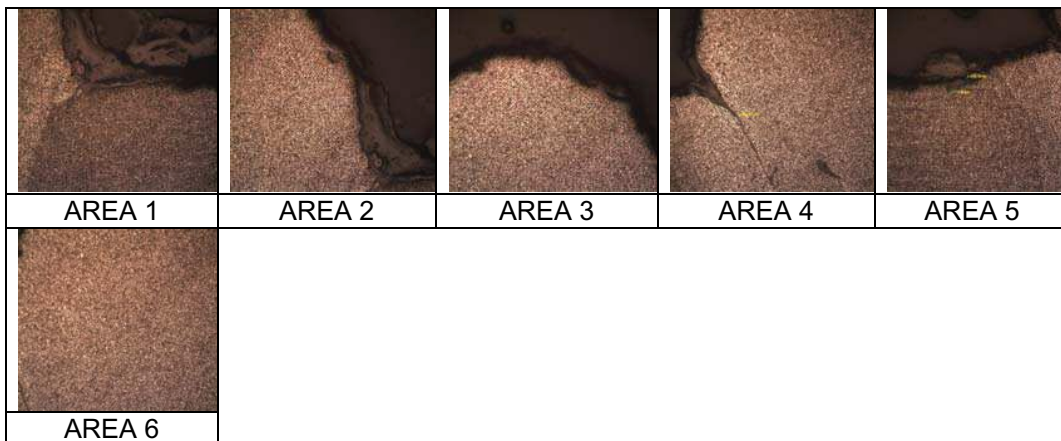


**REGISTRO FOTOGRÁFICO DE MUESTRAS METALOGRAFICAS  
DE PROBETAS EN LA CÁMARA SALINA A 100X**

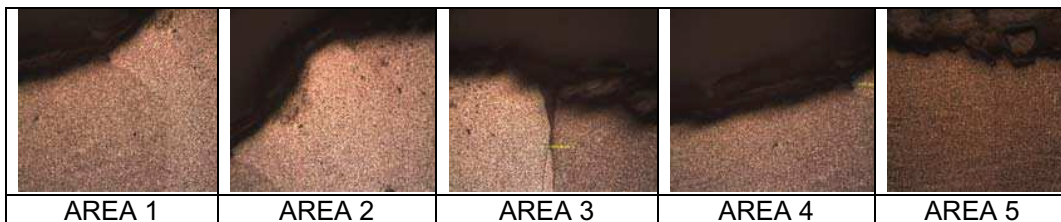
**Probeta a.1**

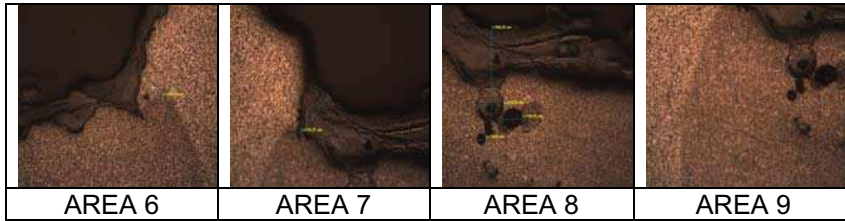


**Probeta a.2**

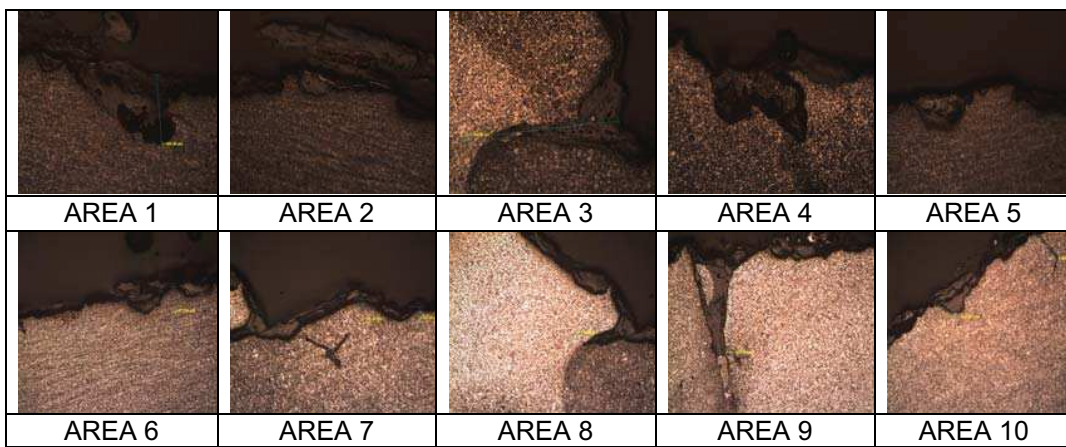


**Probeta b.1**

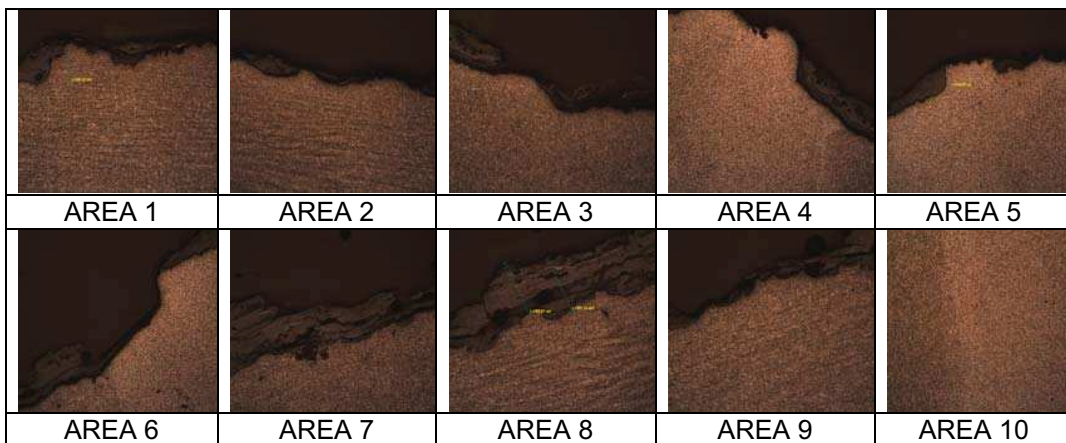




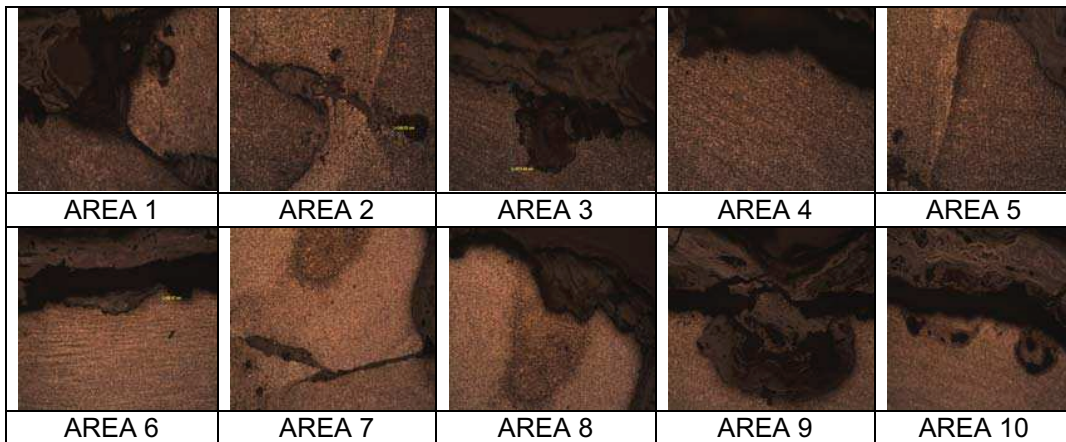
**Probeta b.2**



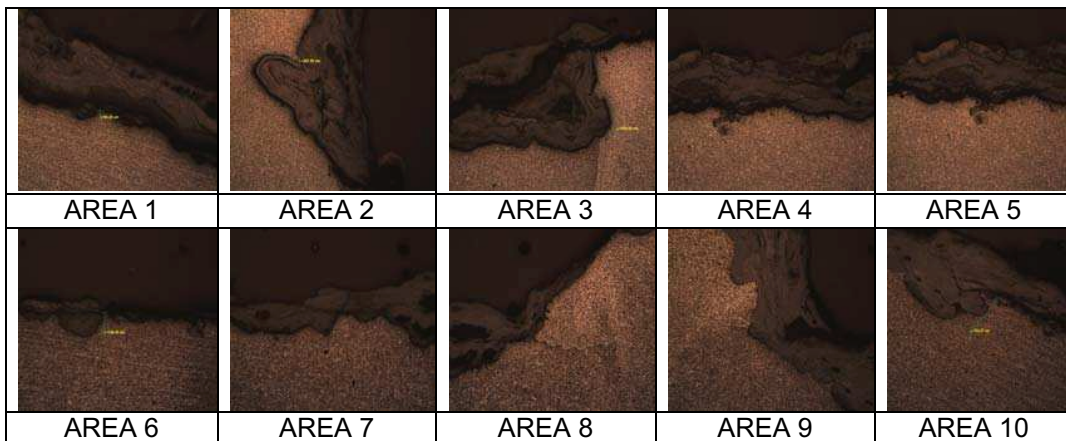
**Probeta c.1**



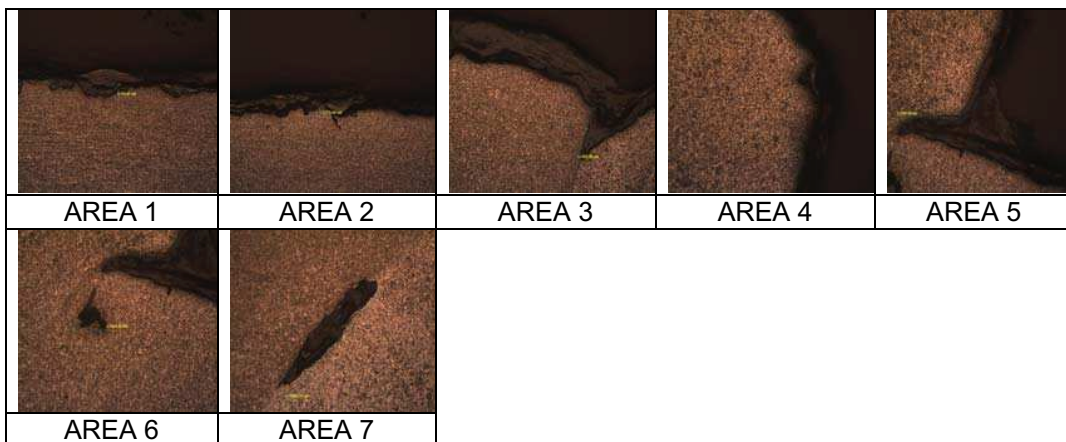
**Probeta c.2**



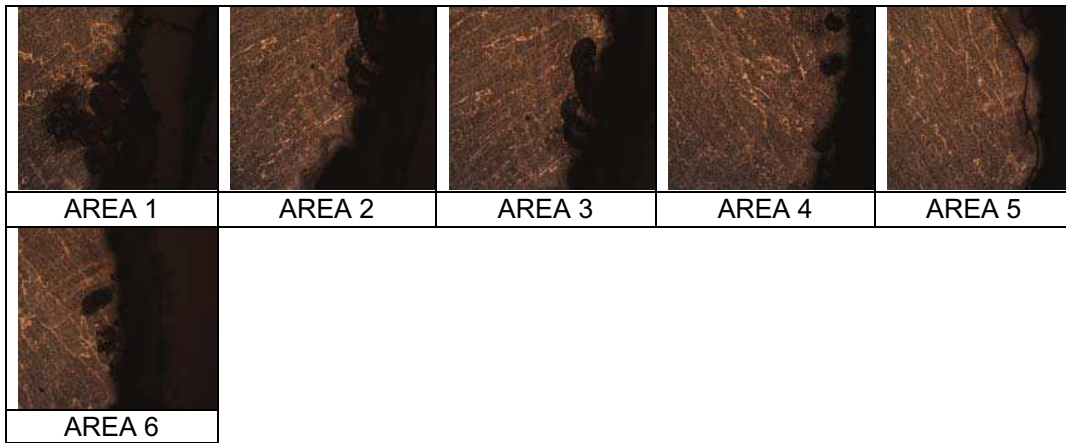
**Probeta d.1**



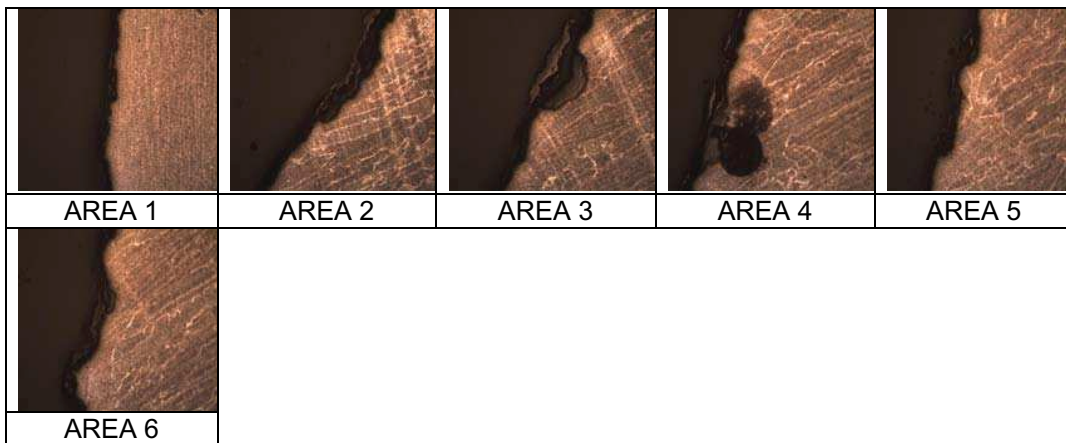
**Probeta d.2**



**Probeta e.1**



**Probeta e.2**

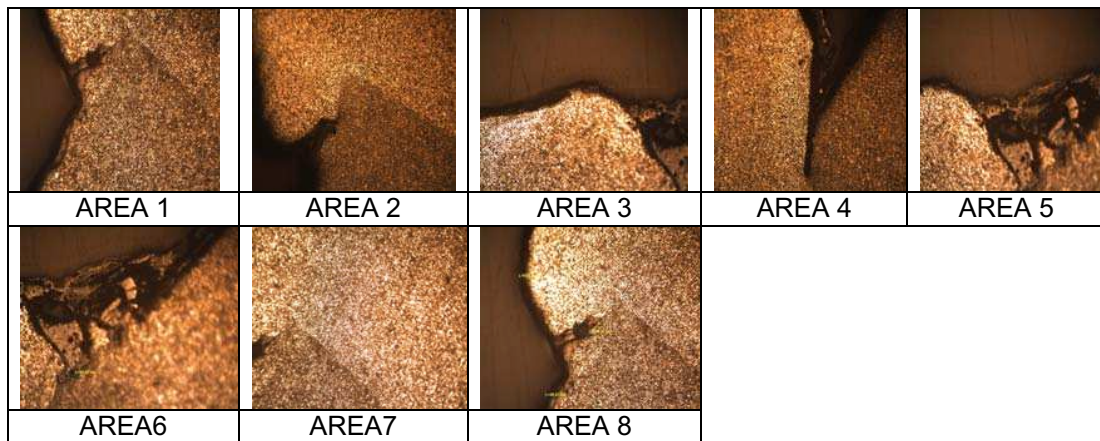


**Probeta para doblado**

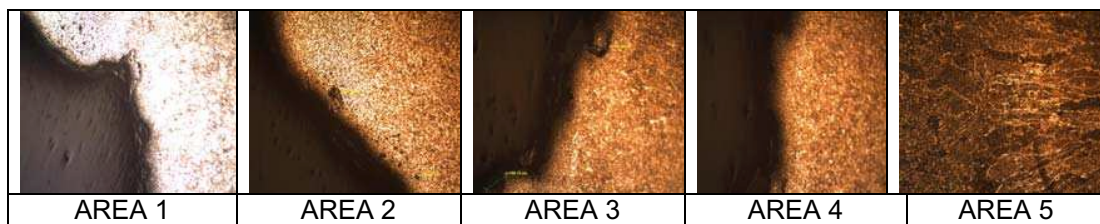


**REGISTRO FOTOGRÁFICO DE MUESTRAS METALGRÁFICAS  
DE LAS PROBETAS EN INMERSIÓN A 100X**

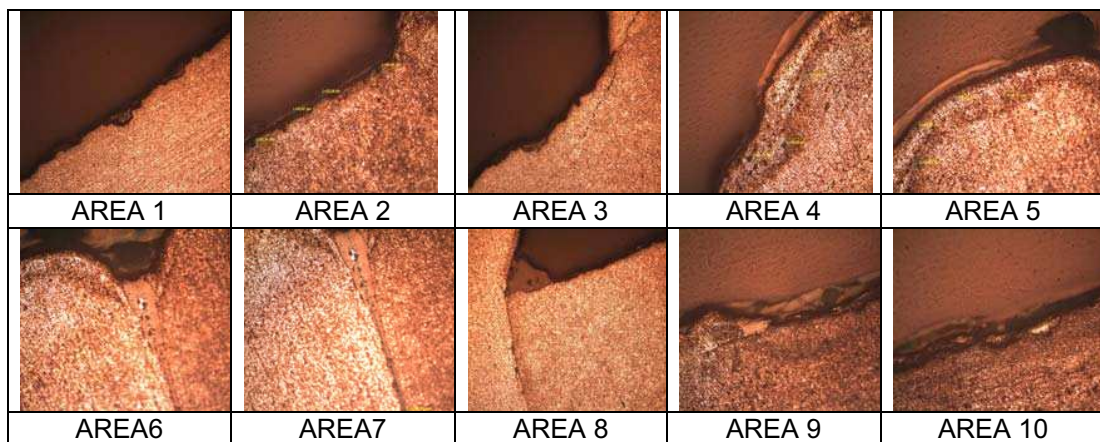
**Probeta A.1**



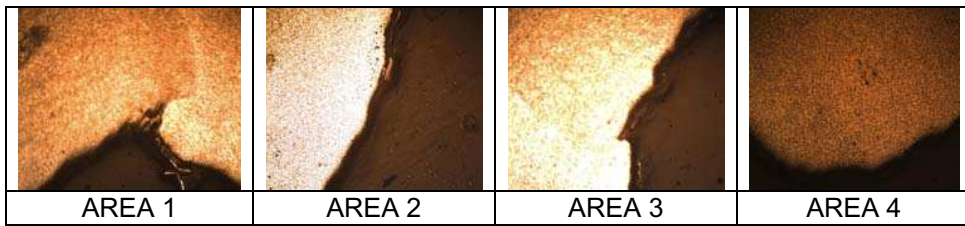
**Probeta A.2**



**Probeta B.1**



**Probeta B.2**



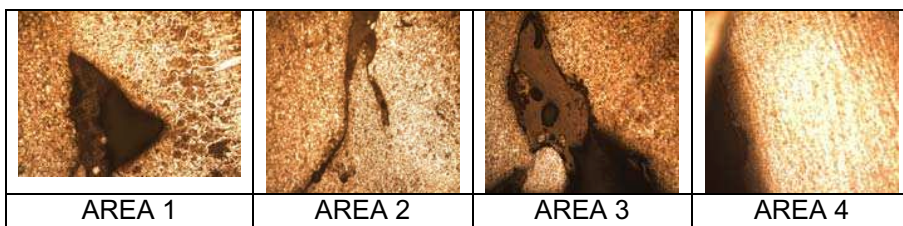
**Probeta C.1**



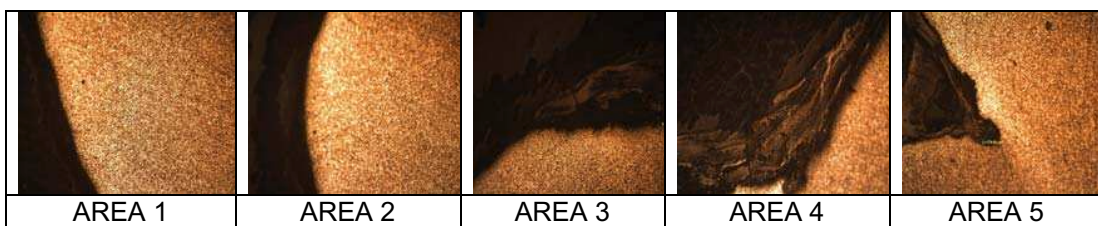
**Probeta C.2**



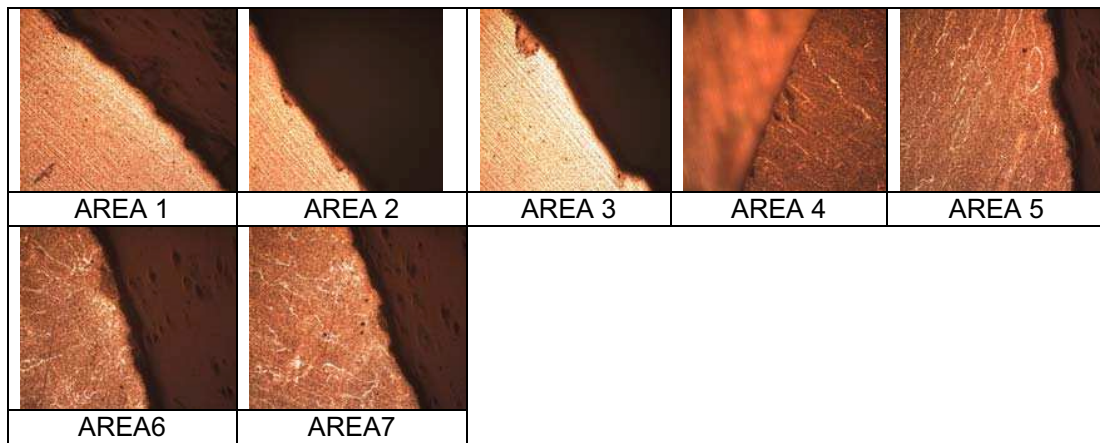
**Probeta D.1**



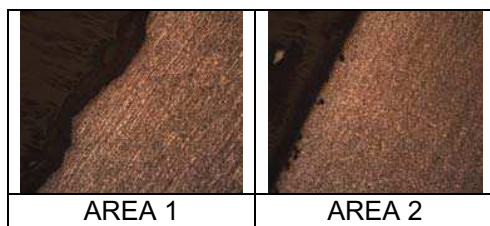
**Probeta D.2**



**Probeta E.2**



**Probeta para doblado**

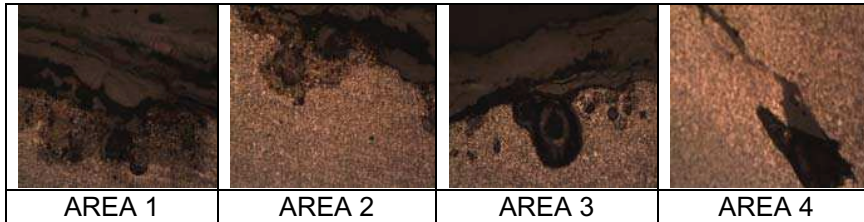


## **ANEXO 6**



**REGISTRO FOTOGRÁFICO DE MUESTRAS METALOGRAFICAS  
DE LAS PROBETAS EN LA CÁMARA SALINA A 200X**

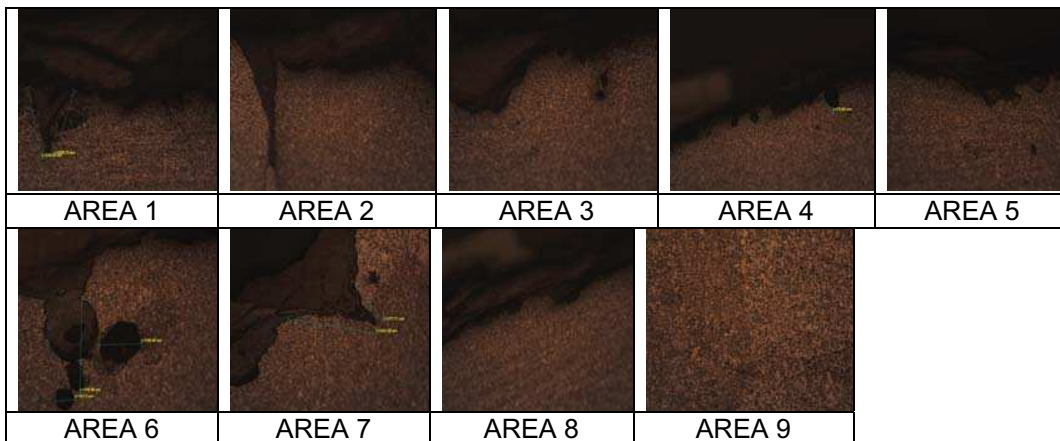
**Probeta a.1**



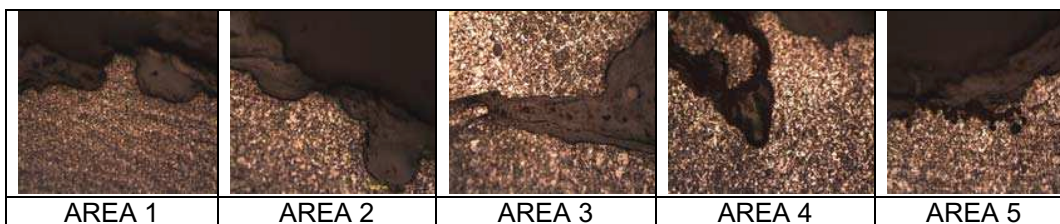
**Probeta a.2**

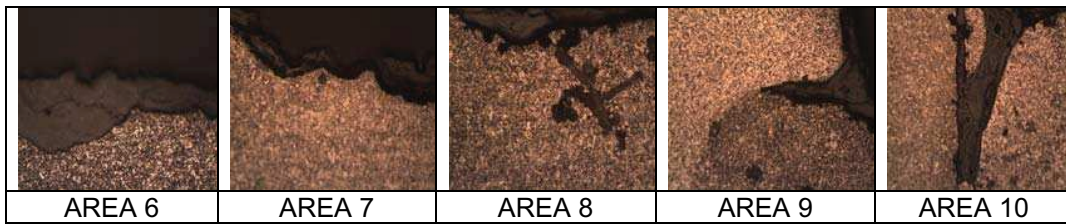


**Probeta b.1**

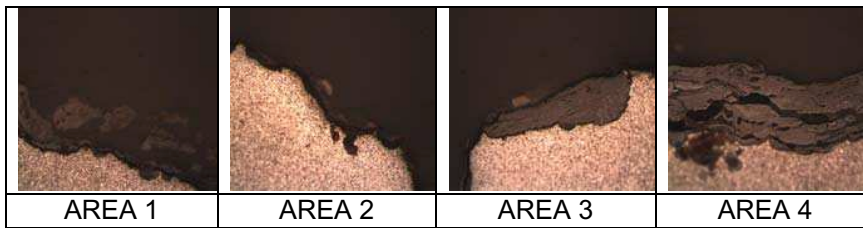


**Probeta b.2**

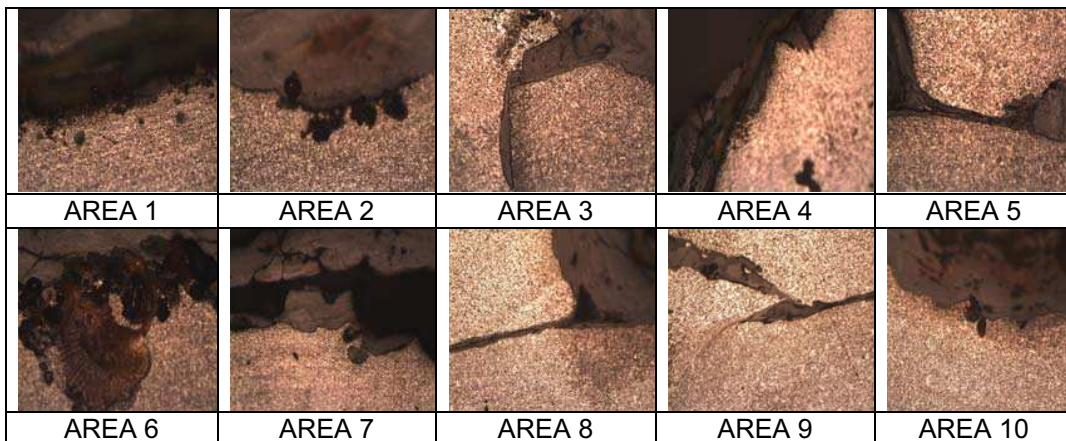




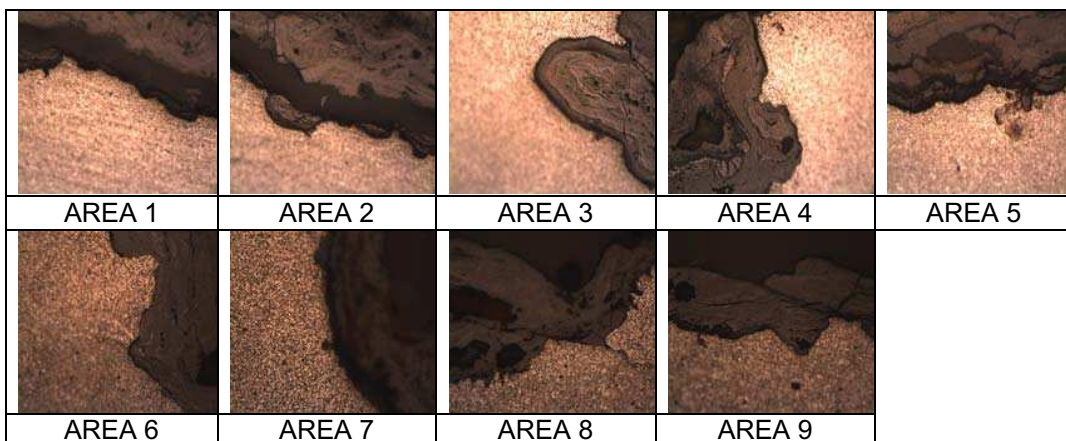
**Probeta c.1**



**Probeta c.2**



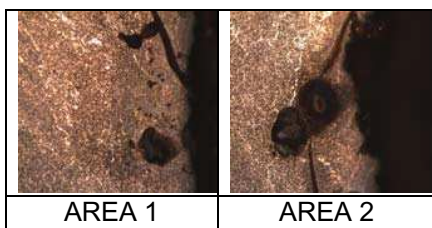
**Probeta d.1**



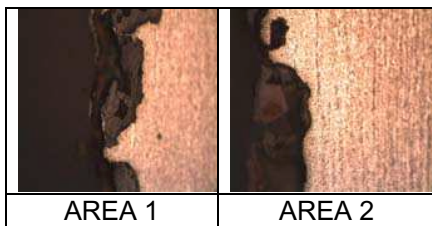
**Probeta d.2**



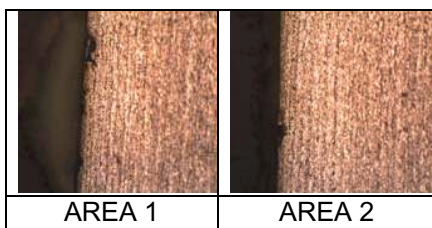
**Probeta e.1**



**Probeta e.2**

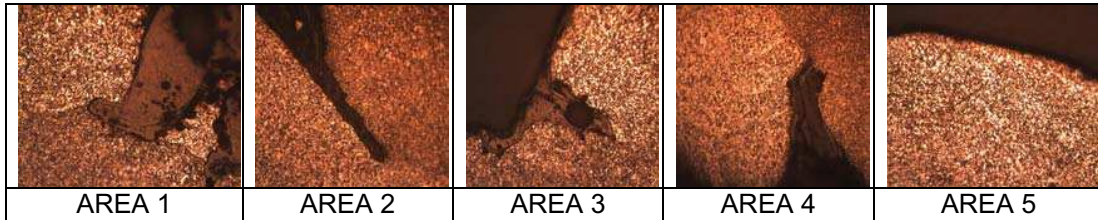


**Probeta para doblado**

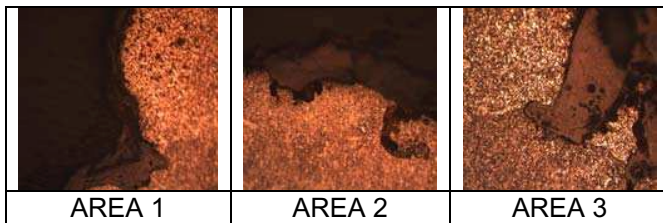


**REGISTRO FOTOGRÁFICO DE MUESTRAS METALOGRAFICAS  
DE PROBETAS DE INMERSIÓN A 200X**

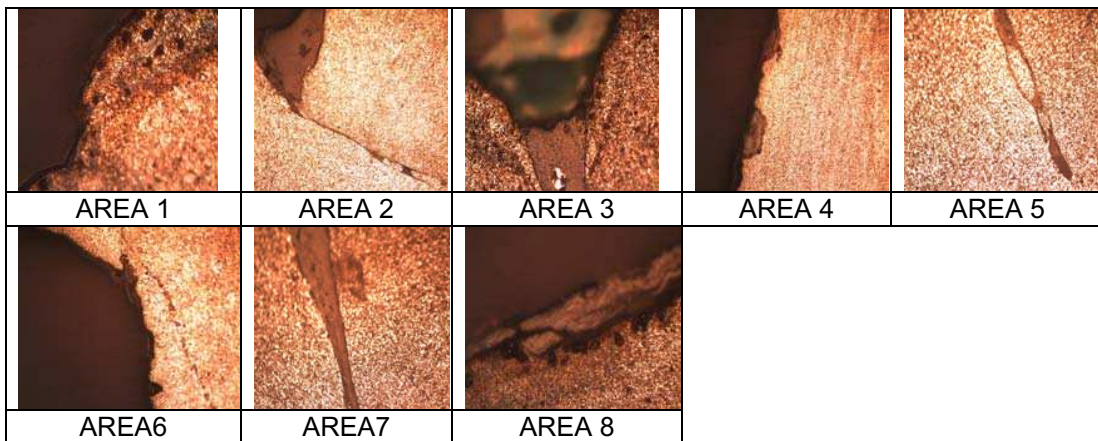
**Probeta A.1**



**Probeta A.2**



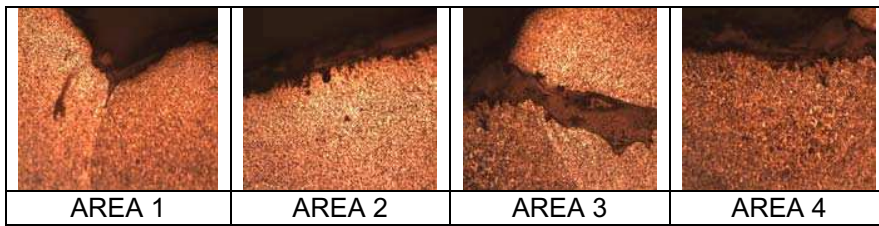
**Probeta B.1**



**Probeta B.2**



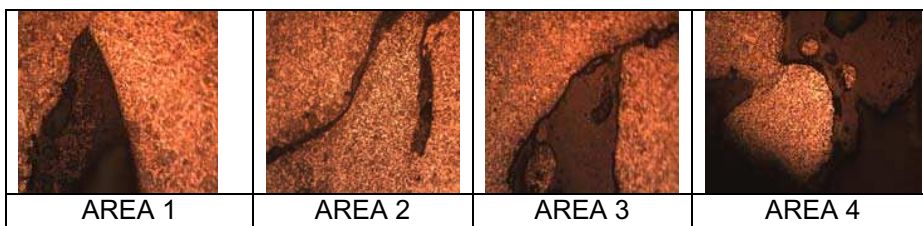
**Probeta C.1**



**Probeta C.2**



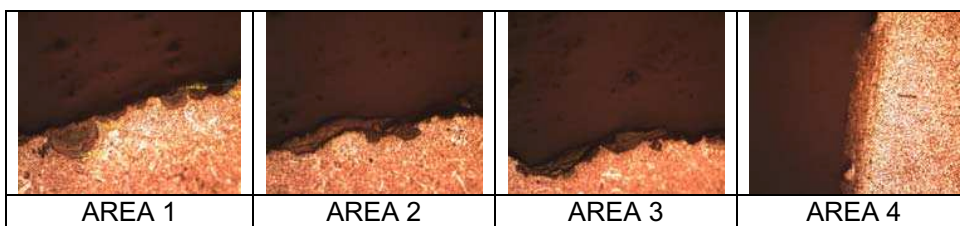
**Probeta D.1**



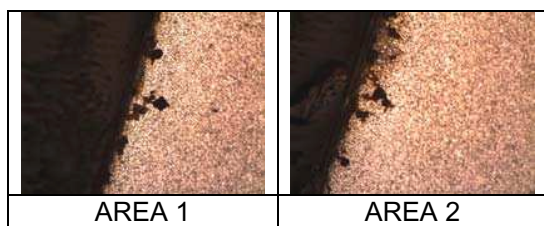
**Probeta D.2**



**Probeta E.2**



**Probeta para doblado**



**ANEXO 7**

## PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA MANUAL (WPS) UTILIZADO PARA PROBETAS DE PRUEBA

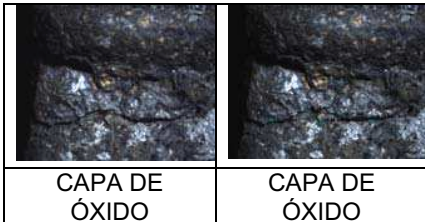
GENERAL SPECIFICATIONS											
APPLICATIONS	<input checked="" type="checkbox"/> BUTT WELD		<input type="checkbox"/> FILLET WELD		<input type="checkbox"/> BRANCH CONNECTION WELD						
	<input type="checkbox"/> INTERNAL REPAIR		<input type="checkbox"/> EXTERNAL REPAIR								
WELDING PROCESS	<input checked="" type="checkbox"/> MANUAL		<input checked="" type="checkbox"/> SEMI-AUTOMATIC		<input type="checkbox"/> AUTOMATIC		<input type="checkbox"/> GTAW				
	<input checked="" type="checkbox"/> SMAW		<input type="checkbox"/> GTAW		<input type="checkbox"/> SAW		<input type="checkbox"/> FCAW-S		<input type="checkbox"/> OTHERS:		
MATERIAL	<input checked="" type="checkbox"/> PIPE		<input type="checkbox"/> PLATE		TYPE: API 5L Gr.X 70						
DIAMETER	<input type="checkbox"/> LESS THAN 2-3/8" O.D.		<input type="checkbox"/> 2-3/8" O.D.-12-3/4" O.D.		<input checked="" type="checkbox"/> OVER 12-3/4" O.D.						
WALL THICKNESS	<input type="checkbox"/> LESS THAN .188"		<input checked="" type="checkbox"/> .188" THRU .750"		<input type="checkbox"/> OVER .750						
FILLER METAL	GROUP: 1 SFA:A5.1		MANUFACTURER: LINCOLN		TRADE NAME: Fleetweld 5P+						
	GROUP: 8 SFA:A5.29		MANUFACTURER: LINCOLN		TRADE NAME: NR207H						
JOINT DESIGN	<input checked="" type="checkbox"/> V BEVEL OF 30° ± 5°		LAND: 1,6 ± 0,8 mm		GAP: 2,4 ± 0,8 mm						
	<input type="checkbox"/> OTHER (DESCRIBE)										
POSITION	<input type="checkbox"/> ROLL		<input checked="" type="checkbox"/> FIXED		<input type="checkbox"/> HORIZONTAL		<input checked="" type="checkbox"/> VERTICAL		<input checked="" type="checkbox"/> OTHER: fixed 45°		
PREHEAT	PIPE: MINIMUM 120 °C		FITTING: MINIMUM 120 °C								
LINE-UP CLAMP	<input checked="" type="checkbox"/> INTERNAL		<input type="checkbox"/> EXTERNAL		<input type="checkbox"/> TACKING						
LINE-UP CLAMP REMOVAL	AFTER MINIMUM OF		<input type="checkbox"/> 50%		<input checked="" type="checkbox"/> 100%		<input type="checkbox"/> OTHER: %				
DIRECTION	<input type="checkbox"/> UPHILL		<input checked="" type="checkbox"/> DOWNHILL								
SHIELDING	<input type="checkbox"/> GAS		<input type="checkbox"/> FLUX		TYPE:		<input type="checkbox"/> FLOW RATE lts./h				
CLEANING	<input checked="" type="checkbox"/> POWER TOOLS		<input type="checkbox"/> HAND TOOLS								
TIME LAPSE	ROOT BEAD TO SECOND BEAD: less than 8 minute		SECOND BEAD TO SUCCEEDING BEADS: maximum 24 hrs.								
POST HEAT	<input checked="" type="checkbox"/> NOT APPLICABLE		<input type="checkbox"/> YES		METAL TEMPERATURE RANGE: °C						
	HOLDING TIME: min./mm		MINIMUM TIME: hr		COOLING RATE: °C /hr						
<b>SKETCH</b>											
<b>ELECTRICAL CHARACTERISTIC</b>											
PASS	N°	AWS DESIGNATION	DIAMETER [mm]	CURRENT [amper]	VOLTAGE [volt]	AC	DC		DIRECTION		SPEED TRAVEL [cm/min.]
							STR	REV	DH	UH	
ROOT	1 <sup>st</sup>	E 6010	4	105/161	24/37		-		X		25/38,1
HOT	2 <sup>nd</sup>	E 7018	2	149/269	18/25		-		X		30/60
FILL	3 <sup>th</sup> thru (n-1)	E 7018	2	150/291	17/24		-		X		20/40
STRIPPER	n	E 7018	2	150/291	17/24		-		X		18/40
COVER	n+1	E 7018	2	152/269	17/24		-		X		18/30
REMARKS:											
Main line welding specification for thickness .188" thru .750"											
Std: API 1104											



## **ANEXO 8**

**REGISTRO FOTOGRÁFICO DE PROBETAS DE CÁMARA SALINA  
E INMERSIÓN, LAVADAS CON DESOXIDANTE A10X**

**Probeta a.2**



**Probeta c.2**



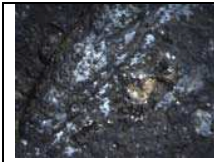
**Probeta d.2**



**Probeta D.2**



**Probeta C.1**



CAPA DE  
ÓXIDO

**Probeta B.2**




















CAPA DE  
ÓXIDO

**ANEXO 9**

**PROBETAS DE CÁMARA SALINA**

FOTO	ID. PROBETA	MEDICIONES DE PROFUNDIDAD DE CORROSIÓN [µm]							PROMEDIO [µm]	PROMEDIO GENERAL
		MEDICIÓN 1	MEDICIÓN 2	MEDICIÓN 3	MEDICIÓN 4	MEDICIÓN 5	MEDICIÓN 6	MEDICIÓN 7		
	<b>a1</b>	162.96	113.99	125.87	161.91	227.83	210.69	144.69	<b>163.99</b>	149.15
	<b>a1</b> externo	120.91	94.79	173.65	46.28	98.58			106.84	
	<b>a2</b>	104.06	158.06	120.33	133.69	77.83	468.15		<b>177.02</b>	
	<b>a2</b> externo	55.82	286.93	57.45	338.28				184.62	
	<b>b1</b>	97.24	102.90	99.88	87.97	164.62	122.30	65.13	<b>105.72</b>	
	<b>b1</b> externo	162.81	247.09	150.84	283.42	165.58	212.12		203.64	
	<b>b1*</b>	74.49	74.26	139.14	158.34	98.58	121.92	182.22	<b>121.28</b>	
	<b>b1*</b> externo	191.20	82.99	35.85	110.96				105.25	
	<b>b2</b>	177.36	93.80	202.55	112.52	93.44	256.94	241.18	<b>168.26</b>	
	<b>b2</b> externo	363.30	164.84	179.52					235.89	
	<b>b2*</b>	151.65	149.26	136.72	255.11	274.56	334.74	65.48	<b>195.36</b>	
	<b>b2*</b> externo	79.10	187.36	157.63	263.99	144.71			166.56	
	<b>c1</b>	184.12	121.04	57.03	47.12	63.13	47.70	152.57	<b>96.10</b>	
	<b>c1</b> externo	85.04	136.85	114.83	119.89	112.14	107.19	180.83	122.40	
	<b>c2</b>	91.53	113.55	127.26	82.34	74.55	73.47	566.25	<b>161.28</b>	
	<b>c2</b> externo	145.84	59.13	89.88	124.26				104.78	
	<b>c2*</b>	110.41	183.82	104.33	238.19	313.56	84.35	73.94	<b>158.37</b>	
	<b>c2*</b> externo	179.85	182.87	153.07	268.13	144.55	254.84	363.47	220.97	
	<b>d1</b>	104.14	111.86	105.45	124.03	113.03	142.29	148.69	<b>121.36</b>	
	<b>d1</b> externo	126.58	117.86	118.75	78.94	80.44	73.56		99.36	
	<b>d1*</b>	61.44	162.12	81.43	124.22	107.76	182.52	53.18	<b>110.38</b>	
	<b>d1*</b> externo	53.41	98.49	106.54	205.48				115.98	
	<b>d2</b>	53.18	81.43	81.15	84.21	262.15	358.15	53.18	<b>139.06</b>	
	<b>d2</b> externo	228.78	121.9	114.98	315.5	254.73			207.18	
	<b>e1</b>	571.85	218.04	111.7	319.99	229.55	76.45	362.93	<b>270.07</b>	
	<b>e1</b> externo	88.86	91.9	93.78	99.25	48.49			84.46	
	<b>e2</b>	56.86	58.18	100.51	211.7	119.96	77.38	74.78	<b>99.91</b>	
	<b>e2</b> externo	60.2	75.78	43.03	164.21	144.74	329.7		136.28	

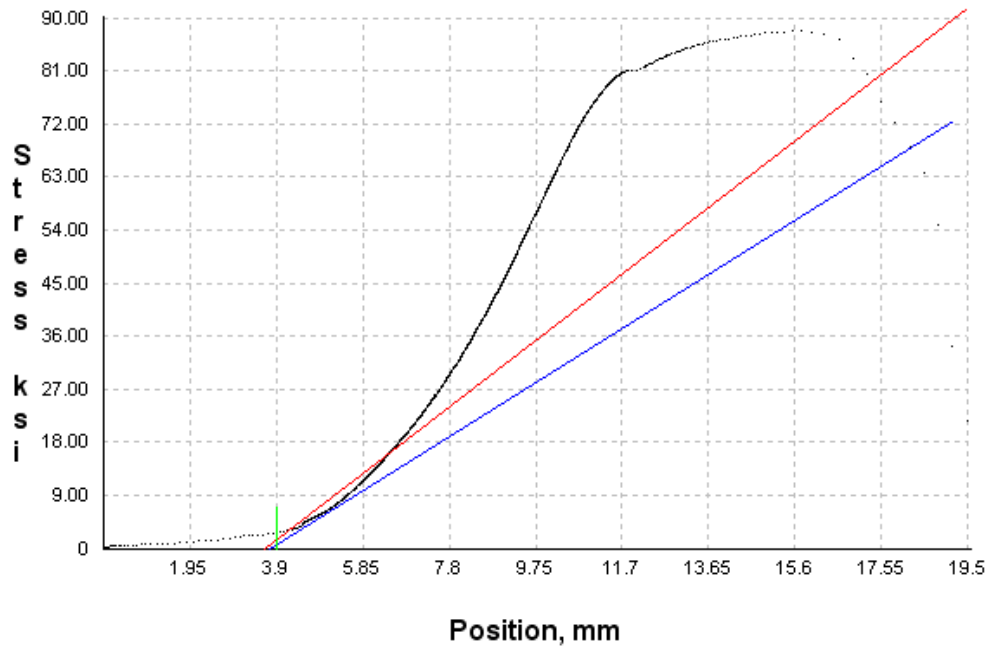
**PROBETAS EN INMERSIÓN**

FOTO	ID. PROBETA	MEDICIONES DE PROFUNDIDAD DE CORROSIÓN [µm]							PROMEDIO [µm]	PROMEDIO GENERAL[
		MEDICIÓN 1	MEDICIÓN 2	MEDICIÓN 3	MEDICIÓN 4	MEDICIÓN 5	MEDICIÓN 6	MEDICIÓN 7		
	<b>A1</b>	927.07	96.45	328.70	366.69	135.47	95.08	44.15	<b>284.80</b>	<b>138.00</b>
	<b>A1 externo</b>	167.07	141.44	85.50	104.01	180.89	120.07		<b>133.16</b>	
	<b>A1*</b>	97.81	138.22	98.89	220.02	118.56	272.59	160.05	<b>158.02</b>	<b>131.77</b>
	<b>A1* externo</b>	86.03	222.10	125.33	141.62				<b>143.77</b>	
	<b>A2</b>	110.47	150.78	185.73	74.62	130.53	88.87	169.55	<b>130.08</b>	<b>131.77</b>
	<b>A2 externo</b>	94.59	205.31	372.45	130.51	143.51	230.01		<b>196.06</b>	
	<b>B1</b>	62.45	120.16	64.69	67.16	103.91	99.08	54.60	<b>81.72</b>	<b>131.77</b>
	<b>B1 externo</b>	29.19	41.45	30.47					<b>33.70</b>	
	<b>B1*</b>	89.16	121.83	104.40	139.59	127.18	93.39	87.95	<b>109.07</b>	<b>131.77</b>
	<b>B1* externo</b>	76.17	86.82	99.33	41.82	111.86			<b>83.20</b>	
	<b>B2</b>	71.82	99.99	76.60	70.18	86.84	103.45	83.13	<b>84.57</b>	<b>131.77</b>
	<b>B2 externo</b>	113.26	130.45	113.91	116.57	113.55	149.46	101.32	<b>119.79</b>	
	<b>C1</b>	233.59	42.50	80.07	203.51	99.22	114.09	197.60	<b>138.65</b>	<b>131.77</b>
	<b>C1 externo</b>	129.80	217.77	96.41	131.48				<b>143.87</b>	
	<b>C2</b>	100.13	81.88	68.70	114.99	155.66	152.73	104.40	<b>111.21</b>	<b>131.77</b>
	<b>C2 externo</b>	126.68	73.44	80.47	68.01	164.25	78.91		<b>98.63</b>	
	<b>D1</b>	350.14	231.06	195.01	190.4	184.51			<b>230.22</b>	<b>131.77</b>
	<b>D1 externo</b>	241.87	127.96	453.02	473.68	206.25			<b>300.56</b>	
	<b>D2</b>	50.84	238.58	167.2	84.41	75.78	86.75	86.78	<b>112.91</b>	<b>131.77</b>
	<b>D2 externo</b>	86.61	125.51	165.82	53.96	43.03	89.12	70.75	<b>90.69</b>	
	<b>E2</b>	53.61	76.85	78.94	101.59	53.13	86.82	85.97	<b>76.70</b>	<b>131.77</b>
	<b>E2 externo</b>	145.14	78.94	83.96	123.19	88.28	118.77	103.91	<b>106.03</b>	

## **ANEXO 10**

## RESULTADOS DE ENSAYO DE TRACCIÓN

### Probeta de cámara de inmersión



### Probeta de cámara de niebla salina

