

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

**EVALUACIÓN DE LA APTITUD PARA EL SERVICIO DE UNA  
TUBERÍA, SUJETA A PRESIÓN, CON PRESENCIA DE  
CORROSIÓN POR PICADURA, SEGÚN NORMA API 579-1/ASME  
FFS-1A**

**Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico,  
que presenta el bachiller:**

**RENATO CÁRDENAS POSTIGO**

**ASESOR: Ing. Aníbal Rozas Gallegos**

**Lima, diciembre del 2015**

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. Descripción general	4
1.1 Tuberías a presión	4
1.1.1 Esfuerzos en tuberías a presión	5
1.1.2 Análisis de los esfuerzos en tuberías a presión	6
1.1.3 Presión de diseño	7
1.1.4 Presión de Servicio	7
1.1.5 Máxima presión de trabajo admisible	8
1.2 Tipos de defectos	9
1.2.1 Defectos mecánicos	11
1.2.2 Defectos por soldadura	11
1.2.3 Defectos por corrosión	12
1.2.4 Falla del componente	15
1.3. Corrosión por picadura	18
1.3.1 Capa pasivante	18
1.3.2 Corrosión por picadura	19
1.3.3 Métodos de identificación de corrosión por picaduras	23
1.3.3.1 Inspección Visual	23
1.3.3.2 Ensayos No Destructivos	24
1.3.3.2.1 Radiografía	24
1.3.3.2.2 Partículas Magnéticas	25
1.3.3.2.3 Ultrasonido	26
1.3.3.2.4 Líquidos Penetrantes	26
1.4 Aptitud para el Servicio	27
1.5 Niveles de Evaluación	30
1.5.1 Evaluación Nivel 1	30
1.5.2 Evaluación Nivel 2	30
1.5.3 Esfuerzo admisible	32
1.5.4 Factor del Esfuerzo Remanente	32
2. Desarrollo del método de evaluación	
2.1 Normalización	35
2.2 Aplicabilidad y limitaciones	36

2.3 Datos requeridos	41
2.3.1 Datos originales de diseño del equipo	41
2.3.2 Datos requeridos para la evaluación de la aptitud para el servicio	43
2.4 Futura corrosión admisible	46
2.5 Perdida de metal	46
2.6 Desarrollo de la metodología en los niveles de evaluación	48
2.5.1 Nivel 1	48
2.5.2 Nivel 2	54
2.7 Evaluación de vida remanente	72
2.7.1 Aplicación de los resultados de la evaluación de la vida remanente.	74
3. Ensayos y resultados	75
3.1 Probeta de ensayo	75
3.1.1 Descripción de la probeta	75
3.1.2 Preparación de la probeta	76
3.2 Aplicación y resultados de la metodología	78
3.2.1 Nivel de evaluación 1	78
3.2.1.1 Vida remanente	82
3.2.2 Nivel de evaluación 2	85
3.3 Prueba hidrostática	
3.3.1 Presión hidrostática	93
3.3.2 Procedimiento para la preparación de la prueba hidrostática	94
3.3.3 Sistema de pruebas	95
3.3.4 Resultados de la prueba hidrostática	96

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

OBSERVACIONES

BIBLIOGRAFÍA

## RESUMEN

El efecto de la corrosión por picadura empieza en la superficie de la tubería llegando a perforarla y ocasionar fugas. Debido a ello en el presente proyecto se definen los conceptos de este tipo de corrosión, la metodología de evaluación de las picaduras en tuberías a presión, y el desarrollo de ejemplos prácticos para evitar los efectos de la corrosión por picadura. En la evaluación se tiene como base el capítulo 6 de la Norma API 579, la cual permite determinar la integridad física de la tubería y además la Norma ASME B31.3 que aporta las condiciones para el desarrollo del ensayo hidrostático y con ello validar los cálculos realizados.

La evaluación de la corrosión por picadura se realiza mediante dos niveles de evaluación. Estos se basan según el tipo de picadura como son el de picadura generalizada, picadura localizada, picadura localizada en un área local delgada o picadura generalizada con un área local delgada. Cada nivel cuenta con limitaciones para realizar la evaluación. Para el dimensionamiento de las picaduras se tienen los procesos de inspección visual y de ensayos no destructivos, teniendo cada uno como objetivo la definición de las dimensiones de la picadura. Los niveles de evaluación se enfocan en determinar los nuevos parámetros de operación de la tubería dañada como es la Máxima Presión de Trabajo, la cual debe ser mayor a la de Presión de Diseño o de Operación, y a su vez el daño ocasionado en la tubería que debe de cumplir con los criterios que aprueban la fisonomía de la picadura.

Los resultados de la evaluación determinarán si se tiene la aptitud para continuar en servicio conteniendo el daño encontrado. Para luego con el cálculo de la vida remanente, la cual tiene como variable la velocidad de corrosión por el medio al cual está expuesta la tubería, tiene como fin calcular el tiempo de operación o el tiempo de una próxima inspección o la reparación o cambio de la sección dañada y tener como objetivo una visión acertada del estado del componente y confirmar la fiabilidad del componente dañado durante su uso.





# PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

## FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

### TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO : **EVALUACIÓN DE LA APTITUD PARA EL SERVICIO DE UNA TUBERÍA, SUJETA A PRESIÓN, CON PRESENCIA DE CORROSIÓN POR PICADURA SEGÚN NORMA API 579-1/ASME FFS-1A**

ÁREA : Materiales # 118

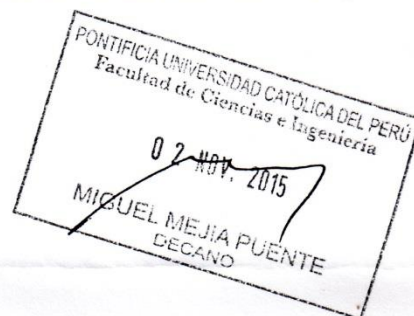
PROPUESTO POR : Ing. Aníbal Rozas Gallegos

ASESOR : Ing. Aníbal Rozas Gallegos

TESISTA : Renato Cárdenas Postigo

CÓDIGO : 20092310

FECHA : 12/10/2015



#### DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

Dentro de la gran diversidad de metales usados en ingeniería se encuentran aquellos que están recubiertos por una capa pasivante. Esta capa protege a los metales de los medios corrosivos, pero cuando esta capa falla el metal comienza a corroerse. Por ello se evalúa un tipo particular de corrosión conocido como corrosión por picaduras. El daño por picadura es uno de los mecanismos de daño más graves por la rapidez con que se genera la perforación en la superficie metálica. Este mecanismo en combinación con el efecto de la presión genera en la estructura el incremento del riesgo de falla.

El objetivo del presente trabajo es evaluar una tubería, sujeta a presión, con presencia de daño de corrosión por picadura en base a la a la norma API 579-1/ASME FFS-1, permitiendo determinar la presión admisible de trabajo.

Los objetivos específicos son:

- Reconocer el mecanismo de daño de corrosión por picadura
- Definir el procedimiento de evaluación para una tubería, sujeta a presión, con presencia de corrosión por picadura
- Desarrollar prueba hidrostática para validar la evaluación del mecanismo de daño por corrosión por picadura

*JSV*

*[Handwritten signature]*



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

**TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**EVALUACIÓN DE LA APTITUD PARA EL SERVICIO DE UNA  
TUBERÍA, SUJETA A PRESIÓN, CON PRESENCIA DE  
CORROSIÓN POR PICADURA SEGÚN NORMA API 579-1/ASME  
FFS-1A**

Introducción

1. Descripción General
2. Desarrollo del método de evaluación
3. Ensayos y resultados

Conclusiones

Bibliografía

Anexos

*Máximo: 100 páginas*

Ing. Anibal Rozas Gallegos

Asesor

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1</b> Principales Causas de Fallas en tuberías	10
<b>Tabla 1.2</b> Influencia de elementos y compuestos sobre la resistencia a la corrosión	22
<b>Tabla 1.3</b> Factor recomendado del esfuerzo remanente admisible basado en el código de diseño	34
<b>Tabla 2.1</b> Temperatura límite para definir el rango de fluencia lenta.	37
<b>Tabla 2.2</b> Coeficiente del espesor de pared. [ASME B31.3-2013]	50
<b>Tabla 2.3</b> Datos requeridos para la evaluación.	55
<b>Tabla 2.4</b> Propiedades de la sección con daño	68
<b>Tabla 3.1</b> Coeficiente del espesor de pared	80
<b>Tabla 3.2</b> Velocidad de corrosión según el tipo de ambiente	83
<b>Tabla 3.3</b> Tabulación para determinar $w_f$ y el <i>MAPW</i>	83
<b>Tabla 3.4</b> Datos requeridos para la evaluación.	85
<b>Tabla 3.5</b> Datos obtenidos para el RSF de cada par de picadura	87
<b>Tabla 3.6</b> Aceptabilidad de las dimensiones de las picaduras	90
<b>Tabla 3.7</b> Características de picaduras en 7 años	91
<b>Tabla 3.8</b> Cálculo del <i>MAPW</i>	91
<b>Tabla 3.9</b> Limitación de las dimensiones de las picaduras	92
<b>Tabla 3.10</b> Evaluación de picadura localizada	92

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Fig. 1.1</b> Estado de esfuerzos en la tubería	7
<b>Fig. 1.2</b> Comparación de incidentes en tuberías destinadas al transporte de diferentes fluidos.	10
<b>Fig. 1.3</b> Corrosión uniforme	12
<b>Fig. 1.4</b> Corrosión por picadura	13
<b>Fig. 1.5</b> Ejemplo de corrosión en resquicio. Ataque en la zona de solape donde se da baja concentración de oxígeno	14
<b>Fig. 1.6</b> Detalle de grieta transgranular originada por corrosión bajo tensión en acero inoxidable austenítico.	14
<b>Figura 1.7</b> Oleoducto averiado por corrosión	15
<b>Fig. 1.8</b> Crecimiento de corrosión por picadura	16
<b>Fig. 1.9</b> Daño a través de la superficie	16
<b>Fig. 1.10</b> Crecimiento de defecto	16
<b>Fig. 1.11</b> Ruptura de la tubería	17
<b>Fig. 1.12</b> Propagación de daño	17
<b>Fig. 1.13</b> Arresto del daño	17
<b>Fig.1.14</b> Ruptura capa pasivante	18
<b>Fig. 1.15</b> Diagrama potencial -pH para el Hierro (Fe).	19
<b>Fig. 1.16</b> Corrosión por picadura externa e interna	20
<b>Fig. 1.17</b> Factor de picadura	20
<b>Fig. 1.18</b> Tipos de forma de picaduras	21
<b>Fig. 1.19</b> Ejemplo de fotografía con escala de referencia	23
<b>Fig. 1.20</b> Ejemplo de medición de picaduras	24
<b>Fig. 1.21</b> Proceso de toma de radiografía	25
<b>Fig. 1.22</b> Inspección por partículas magnéticas usando campo magnético longitudinal y circunferencial	25
<b>Fig. 1.23</b> Medición de corrosión por ultrasonido	26
<b>Fig. 1.24</b> Proceso de inspección por partículas magnéticas	27
<b>Fig. 1.25</b> Procedimiento de evaluación para diferentes tipos de daño.	28
<b>Fig. 1.26</b> Diagrama de flujo para realizar los niveles de evaluación 1 y 2	31
<b>Fig. 2.1</b> Corrosión por picadura en la superficie externa	39
<b>Fig. 2.2</b> Dispersión de picaduras en una superficie para evaluación Nivel 1	39
<b>Fig. 2.3</b> Picadura localizada	40
<b>Fig. 2.4</b> Picadura localizada dentro de un área local delgada	40
<b>Fig. 2.5</b> Daño por picadura en ambas superficies de una pared sin superponerse	40



<b>Fig. 2.6</b> Daño por picadura superpuesta no aceptable para la evaluación Nivel 2	41
<b>Fig. 2.7</b> Medición de la distancia entre par de picadura ( $p$ ) y el ángulo ( $\theta$ ) del par con respecto al eje longitudinal de la tubería	44
<b>Fig. 2.8</b> Medición del diámetro ( $d$ ) y profundidad ( $w$ ) de los diferentes tipos de formación de picaduras	44
<b>Fig. 2.9</b> Picadura localizada y Picadura localizada en una región de área delgada	45
<b>Fig. 2.10</b> Cuadro comparativo 1.	51
<b>Fig. 2.11</b> Cuadro comparativo 2	51
<b>Fig. 2.12</b> Cuadro comparativo 3.	52
<b>Fig. 2.13</b> Cuadro comparativo 4	52
<b>Fig. 2.14</b> Cuadro comparativo 5	53
<b>Fig. 2.16</b> Cuadro comparativo 6.	53
<b>Fig.2.16</b> Trazado de la capas en el espesor de pared	59
<b>Fig.2.17</b> Picaduras superpuestas	60
<b>Fig. 2.18</b> Gráfica para aceptación del daño por picadura	62
<b>Fig. 2.19</b> Gráfico de la Máxima extensión circunferencial admisible	64
<b>Fig. 2.20</b> Representación de la división longitudinal	70
<b>Fig. 3.1</b> Tubería de Evaluación	75
<b>Fig.3.2</b> Preparación de la tubería para realizar daño	77
<b>Fig.3.3</b> Taladrado de picaduras en la superficie de la tubería	77
<b>Fig.3.5</b> Probeta con picaduras, área dañada de $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$	79
<b>Fig. 3.6</b> Gráfica de la vida remanente de la presión vs tiempo	84
<b>Fig. 3.7</b> Gráfica de vida remanente del $R_{wt}$ vs tiempo	84
<b>Fig. 3.8</b> Pérdida de área localizada equivalente	85
<b>Fig. 3.9</b> Resultado de Prueba Hidrostática para Evaluación Nivel 1	97
<b>Fig. 3.10</b> Resultado de Prueba Hidrostática para Evaluación Nivel 2	97

## NOMENCLATURA

$H_f$ , factor por el tipo de carga

$D_0$ , diámetro externo

$E_c, E_L$ , eficiencia de soldadura circunferencial y longitudinal

$F_{he}$ , esfuerzo por pandeo elástico.

$F_{ic}$ , esfuerzo de pandeo inelástico

$L_{msd}$ , distancia a la mayor discontinuidad más cercana

$MAWP^L$ , máxima presión de trabajo admisible longitudinal

$MAWP^c$ , presión máxima de trabajo admisible circunferencial

$MAWP_{r,e}$ , máxima presión admisible de trabajo por cargas externas

$MAWP_r$ , máxima presión admisible de trabajo reducida

$M_t$ , factor folias

$M_t$ , momento torsor

$PPR_{diam}$ , tasa estima del cambio de la característica de diámetro

$PPR_{prof}$ , tasa estima del cambio de la característica de profundidad

$P_{T,1}$ , presión de prueba hidrostática para picadura generalizada

$P_{T,2}$ , presión de prueba hidrostática para picadura localizada

$P_a$ , presión externa admisible

$P_i$ , presión interna

$P_k$ , distancia entre el par de picaduras

$P_k$ , distancia entre par de picaduras

$RSF_{LTA}$ , factor del esfuerzo remanente en un LTA

$RSF_a$ , factor del esfuerzo remanente admisible

$RSF_{comb}$ , factor del esfuerzo remanente para picadura generalizada con LTA y picadura localizada en un LTA

$RSF_t$ , factor del esfuerzo remanente según el tipo de picadura evaluado

$R_m$ , radio significativo, corregido por el  $LOSS$  y  $FCA$ .

$R_{td}$ , porcentaje del espesor remanente límite

$R_{wt}$ , porcentaje del espesor de pared remanente

$S_a$ , esfuerzo admisible calculado en el diseño original, en caso que no se tenga calcular el esfuerzo con algún código para el diseño de sistemas de tubería.

$S_y$ , esfuerzo admisible a la temperatura de diseño

$Y_{B31}$ , coeficiente del espesor de pared



$d_c$ , actual diámetro de picadura  
 $d_f$ , futuro diámetro de picadura  
 $d_{i,k}, d_{j,k}$  diámetro de cada picadura del par de picadura medida  
 $d_{i,k}, d_{j,k}$ , diámetro de la picadura  
 $t_L$ , espesor de la capa evaluada  
 $t_{am}$ , promedio de espesor medido  
 $t_c$ , espesor de pared corroído  
 $t_{eq}$ , espesor equivalente  
 $t_{mm}$ , espesor equivalente para picadura localizada a  $LTA$   
 $t_{nom}$ , espesor nominal de pared de la tubería  
 $t_{rd,i}$ , espesor medido con la pérdida de metal  
 $t_{sl}$ , espesor adicional por cargas externas  
 $w_{avg,k}$ , profundidad promedio del par de picadura  
 $w_c$ , actual profundidad de picadura  
 $w_f$ , futura profundidad de picadura  
 $w_{i,k}, w_{j,k}$  profundidad de cada picadura del par de picadura medida  
 $\sigma_{cm}$ , esfuerzo máximo circunferencial  
 $\sigma_e$ , esfuerzo equivalente  
 $\sigma_{lm}$ , esfuerzo máximo longitudinal  
 $\sigma_m^C$ , esfuerzo circunferencial  
 $\sigma_m^L$ , esfuerzo longitudinal  
 $A$ , área transversal  
 $COV$ , coeficiente variación de espesor  
 $D$ , diámetro interior  
 $E$ , eficiencia de la junta soldada  
 $F$ , fuerza axial en la sección  
 $FCA$ , futura corrosión admisible  
 $FS$ , del factor de servicio  
 $H$ , diámetro interno  
 $L$ , longitud de la sección de la tubería  
 $l$ , número de capas  
 $LOSS$ , pérdida de metal  
 $Ldc$ , límite de carga del componente dañado donde comienza la deformación plástica.

$L_{uc}$ , límite de carga sin daños donde comienza la deformación plástica.

$M$ , momento flector en la sección

$MA$ , prestaciones mecánicas para componentes roscados, la profundidad de la rosca nominal debe aplicar con la dimensión  $h$  de la ASME B.1.20.1.

$MAWP$ , máxima presión admisible de un componente que no presenta daños

$Ma$ , momento flector

$N$ , número de mediciones

$Q$ , reacción por el peso del componente

$RSF$ , factor del esfuerzo remanente

$s$ , desviación estándar

$S$ , esfuerzo admisible del material a la temperatura de diseño

$TSF$ , factor del esfuerzo a la tracción

$V$ , fuerza de cizalladura

$c$ , ancho de la región con picadura

$k$ , es la numeración del par de picadura

$s$ , largo de la región con picadura

$\beta$ , parámetro de daño longitudinal

$\theta$ , ángulo entre el par de picaduras y el eje longitudinal de la tubería

$\tau$ , esfuerzo máximo de cizalladura

## INTRODUCCIÓN

El siguiente trabajo se enfoca en la presencia de corrosión por picadura en tuberías bajo presión que inicia a partir de la ruptura de la capa pasivante. Esta es una capa que protege a los metales de la corrosión del medio al cual están expuestos. La corrosión por picadura es una corrosión localizada que ocasiona el daño a las secciones de los sistemas de tubería debido a la rapidez con que se propaga el efecto de perforado dentro la sección dañada. Por otra parte, dada la dificultad de evitar la aparición y el control de la velocidad de propagación durante su formación, la evaluación continua de la tubería dañada es importante para monitorear las condiciones de trabajo.

En el año 2000, el American Petroleum Institute (API) publicó API RP 579, que presenta una práctica recomendada para la evaluación de la aptitud para el servicio de elementos sujetos a presión. Este documento es usado actualmente en la industria petrolera siguiendo los procedimientos descritos en la evaluación para analizar la integridad estructural de las tuberías que son usadas para el traslado de los hidrocarburos.

Por esto, con la metodología desarrollada se evaluará el daño en tuberías sujetas bajo presión que presente corrosión por picadura, el cual debilita el material y reduce la vida útil. En este sentido, se procederá a determinar los nuevos parámetros de operación que la tubería afectada debe adoptar y a la vez determinar la vida remanente del componente para optar por el recambio de la sección dañada o realizar algún tipo de remediación.

## JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo se lleva a cabo para desarrollar la metodología adecuada para la evaluación de sistemas de tubería, sujetos bajo presión, que presenten daños por corrosión por picadura debido a que un procedimiento adecuado no se tiene al alcance de todas las industrias. Los sistemas de tubería operan a merced de diferentes tipos de ambientes donde se genera el daño a evaluar. Por lo que determinar un procedimiento que permita el reconocimiento del daño, la recolección de los parámetros de daño y desarrolle la metodología adecuada de realizar la evaluación permitirá obtener los resultados que definan si el componente está en condiciones para continuar en servicio.

## IMPORTANCIA

Este proyecto de tesis plantea una metodología de evaluación que permite un monitoreo continuo de las tuberías, sujetos a presión, con daños por corrosión por picadura. Esta evaluación puede ser usada por diferentes tipos de industrias que usen sistemas de tuberías y así poder tomar la decisión adecuada luego de realizar la inspección de la tubería, esto permite evitar posibles accidentes ocasionados por fugas ya que un seguimiento adecuado alarga la vida en servicio y disminuye pérdidas materiales como demoras por el cambio de secciones dañadas. Este tipo de evaluación ayuda a recolectar la información necesaria y poder documentarla para que las secciones dañadas tengan una supervisión hasta finalizar la vida útil en servicio determinada con el daño detectado.

## OBJETIVOS

El siguiente trabajo tiene como objetivo establecer el procedimiento para la evaluación de la aptitud para el servicio de una tubería, sujeta a presión, con presencia de corrosión por picadura, según norma API 579-1/ASME FFS-1A; teniendo como caso práctico la tubería API A53 grado B, a la cual se le determinara los parámetros de operación y la estimación de la vida remanente para diferentes tipos de corrosión por picadura

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Definir el mecanismo de daño y obtener los parámetros que se requieren para la evaluación.
- Desarrollar la metodología de evaluación para la aptitud para el servicio de tuberías bajo presión en presencia del daño de corrosión por picadura basándose en la NORMA API 579-1/ASME FFS-1A
- Evaluar los daños simulados de corrosión por picadura a una tubería API A53 grado B schedule 40 y validar los resultados con una prueba hidrostática según el código ASME B31G
- Presentar los resultados de los daños evaluados para determinar si la tubería es apta para continuar en servicio y a la vez estimar la vida remanente.

## CAPÍTULO 1

### 1. DESCRIPCIÓN GENERAL

#### 1.1 TUBERÍAS A PRESIÓN

Las tuberías son un sistema formado por tubos, están construidos de acero o plástico y cumplen la función de transportar líquidos, gases o sólidos en suspensión, de forma eficiente. Para el diseño de sistemas de tuberías se utiliza normas estandarizadas de construcción y la selección del material de acuerdo a las necesidades del trabajo.

La presión es uno de los parámetros con los que se trabaja en las tuberías, ya que ellas transportan los diferentes tipos de fluido. Esta presión se descompone en esfuerzos producidos de forma circunferencial, longitudinal y radial. Esto genera, en las paredes de la tubería, fuerzas que ponen en juego la integridad estructural del componente en el caso de que no se haya realizado el diseño adecuado o no se haya realizado una evaluación preventiva de los componentes puedan generar accidentes.



### 1.1.1 ESFUERZOS EN TUBERÍAS A PRESIÓN

Las tuberías a presión operan con diversas cargas, que causan diferentes intensidades de esfuerzos a lo largo de ellas. Estos esfuerzos dependen de la naturaleza de la cargas, de la geometría de los recipientes y del diseño de construcción.

El análisis de esfuerzos consiste en determinar la relación entre las fuerzas externas aplicadas al sistema de tuberías y los esfuerzos debido a la presión interna. El análisis de esfuerzos es necesario para determinar los espesores requeridos del material y tamaños de las secciones de la tubería. No se necesita encontrar todos los esfuerzos pero se recomienda conocer los que gobiernan y del mismo modo, como se relacionan a los componentes, accesorios y soportes de sistemas de tubería.

El primer punto para realizar un análisis de esfuerzos es determinar todas las condiciones de diseño para un proyecto y fijar todas las fuerzas externas relacionadas. Se debe relacionar las fuerzas externas a las partes del recipiente que debe resistir y conseguir los esfuerzos correspondientes. Separando las causas de las cargas, los efectos de los esfuerzos pueden ser más precisos determinarlos.

En el diseño se debe resaltar los tipos de cargas y si todas afectan al recipiente como un todo. Estos esfuerzos son interpretados y combinados, buscando el significado que tienen en la seguridad de la estructura del componente y cuáles son los esfuerzos admisibles, determinados por tres criterios:

- La fuerza, utilizada en teoría de falla
- Los tipos y categorías de cargas
- Los peligros que representan los esfuerzos para el recipiente

### 1.1.2 ANÁLISIS DE LOS ESFUERZOS EN TUBERÍAS A PRESIÓN

Las ecuaciones empleadas en el diseño de tuberías a presión se basan en la teoría de los esfuerzos de membrana que se producen en las paredes. El principal propósito de las tuberías es contener un medio sometido a presión y/o temperatura diferentes a las del medio ambiente; sin embargo, en el cumplimiento de su función están sujetos a la acción de cargas estáticas y dinámicas, conexiones de tuberías, expansión térmica y presión interna y/o externa, que requieren el conocimiento general de los esfuerzos impuestos por estas condiciones, para obtener un diseño seguro, confiable y con larga vida útil. Al estar sometidos a presión, el material del cual está hecho el sistema de tuberías debe soportar una carga desde todas las direcciones. Cuando estos equipos se construyen de placas en las que el espesor es pequeño en comparación con otras dimensiones se pueden considerar como estructuras de pared delgada, las cuales resisten a la flexión perpendicular con respecto a la superficie, por lo cual, en este caso los esfuerzos que se calculan son obviando dichas flexiones, estos se conocen como esfuerzos de membrana.

Estas membranas son bastante resistentes a las fuerzas que actúan en el plano formado por ellas, pero no ofrecen mucha resistencia a la flexión que se puede generar en el plano perpendicular a la pared; esta condición es un hecho deseable en el sentido de que estas membranas permiten al recipiente deformarse tranquilamente en esta dirección, sin que se generen grandes esfuerzos en los puntos de discontinuidad.

De acuerdo a la relación entre el espesor de sus paredes y diámetro, los recipientes pueden ser clasificados como: pared delgada o de pared gruesa. Según el Código ASME, se consideran recipientes de pared delgada, cuando el cociente entre el espesor de la pared y el diámetro interior sea igual o menor a 0.1, mientras menor sea esta relación, menor será el error que hay entre el esfuerzo que se predice por esta teoría y el esfuerzo máximo real. Los recipientes de pared delgada constituyen una aplicación importante del análisis de esfuerzo plano. Como sus paredes oponen poca resistencia a la flexión, puede suponerse que las fuerzas internas ejercida sobre una parte de la pared son tangentes a la superficie del recipiente, es decir, las paredes se comportan como membranas sometidas a tensión.

En cualquier recipiente sujeto a presión interna o externa, los esfuerzos ocurren en la pared del cuerpo. El estado de esfuerzos es triaxial (ver figura 1.1) y los principales esfuerzos son los longitudinales y circunferenciales.

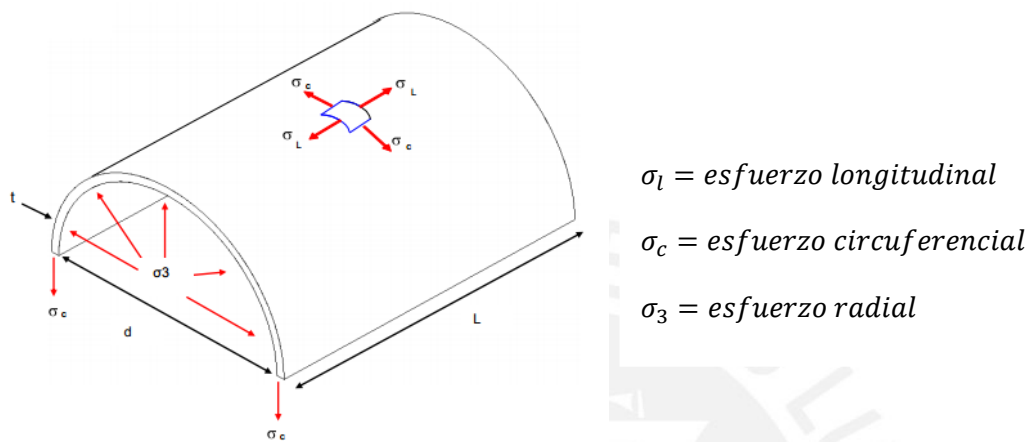


Fig. 1.1 Estado de esfuerzos en la tubería

### 1.1.3 PRESIÓN DE DISEÑO

Es la presión máxima, interna o externa, utilizada para determinar los espesores mínimos de un recipiente. Es recomendada para el diseño de un sistema de tubería y sus accesorios, ya que es una presión superior a la de operación. La presión de diseño es superior a la de trabajo en un 10%. La presión del fluido que maneje el sistema de tuberías debe ser tomada en cuenta para determinar la presión de diseño.

### 1.1.4 PRESIÓN DE SERVICIO

Es identificada como la presión de operación, se define como la presión manométrica a la cual estará sometido un equipo en condiciones normales de operación. La presión de operación puede llegar a ser máxima, siendo ésta la presión prevista en el sistema debido a desviaciones de la operación normal. La máxima presión de operación debe ser al menos 5% mayor y la presión de operación mínima es la presión más baja que

puede tener el sistema, basada en las condiciones esperadas, incluyendo arranque y parada.

### 1.1.5 MÁXIMA PRESIÓN DE TRABAJO ADMISIBLE (MAPW)

Es la máxima presión que el recipiente puede soportar en condiciones seguras, normalmente coincide con la presión de diseño. Es la máxima presión permisible en un sistema de tuberías colocado en una posición de operación con una temperatura establecida.

La presión máxima admisible de trabajo no se determina normalmente para recipientes nuevos, pero se usa en recipientes que van a ser redimensionados. Cuando no se realizan cálculos de dicha presión, la presión de diseño puede ser usada como la presión de trabajo máximo permisible.

La máxima presión admisible de trabajo se establece a partir de la mayor presión donde el punto más débil del componente puede soportarla a una temperatura específica, durante la operación normal. Este es un importante factor que se identifica en los componentes a lo largo de la tubería para poder determinar la presión interna y cargas suplementarias que deben soportar durante el funcionamiento. La presión interna a la que está sujeta el elemento puede ser afectada por los siguientes factores:

- a) El estado de desgaste por corrosión.
- b) Por una temperatura determinada.
- c) La posición normal de trabajo; horizontal, vertical o inclinada.
- d) Bajo el efecto de otras cargas (cargas de viento, presión externa, presión hidrostática, entre otros) adicionales a la presión interna.

## 1.2 TIPOS DE DEFECTOS

Las tuberías son una de las formas más seguras y confiables para el transporte de diferentes tipos de fluidos como el petróleo, gas, agua, etc. Debido a que los sistemas de tuberías pueden prolongarse por varios kilómetros, deben ser monitoreadas de forma regular para poder prolongar su vida útil. Determinar la evaluación es una forma confiable de conocer la integridad estructural y poder programar el mantenimiento preventivo o correctivo.

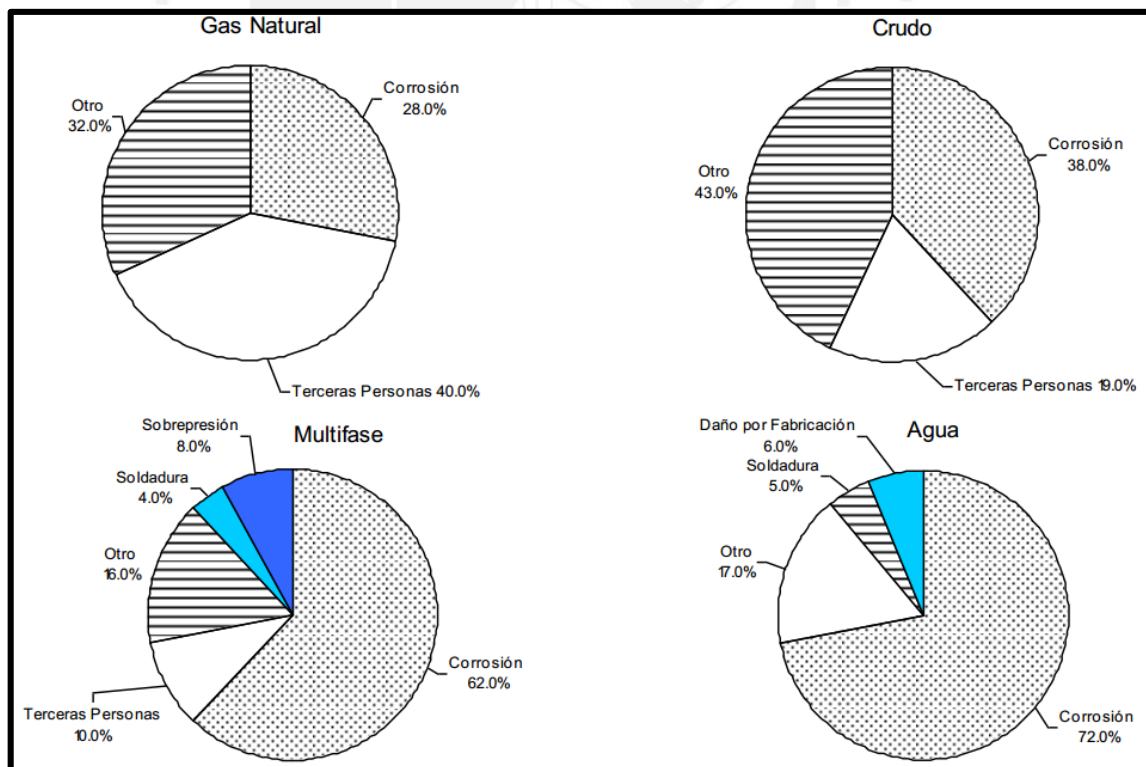
Para mantener la integridad estructural de una tubería se debe evaluar e identificar los motivos que ocasionan la falla. Los motivos más comunes de falla son las siguientes:

- Causas naturales, eventos asociados con la acción de la naturaleza como erosión, deslizamiento de tierra y movimientos de suelos.
- Acción de terceros, eventos asociados con perforaciones no intencionales de las tuberías, actos de vandalismo, entre otros.
- Fallas operacionales, fallas de los operadores debido a las actividades inadecuadas durante su funcionamiento.
- Fallas mecánicas, defectos por el mal funcionamiento de válvulas, bridas, juntas, o por desgaste o por fatiga de material.
- Fallas de mantenimiento, un mantenimiento correctivo realizado de forma incorrecta o durante periodos inadecuados.
- Corrosión, eventos asociados a la acción de la corrosión.

En la tabla A.1 y figura A.1 se resume algunas de las principales causas de falla de sistemas de tubería destinados al transporte de diferentes productos.

**Tabla 1.1** Principales Causas de Fallas en tuberías. [2]

País	Principal causa de falla	Velocidad de falla (1000 km/año)
USA (Gasoducto terrestre)	Interferencia Externa	0.16
USA (Gasoducto marino)	Corrosión	0.70
USA (Oleoducto terrestre)	Interferencia Externa	0.56
USA (Oleoducto marino)	Interferencia Externa	0.56
Europa (Gasoducto terrestre)	Interferencia Externa	0.60
Europa (Oleoducto terrestre)	Corrosión	0.80
Hungría (Gasoducto terrestre)	Defectos en Soldadura Circunferencial	0.10
Polonia (Gasoducto terrestre)	Corrosión	0.08
CIS (Gasoducto terrestre)	Construcción/Material con Defecto	0.33
Checoslovaquia (Gasoducto terrestre)	Construcción/Material con Defecto	0.13



**Figura 1.2** Comparación de incidentes en tuberías destinadas al transporte de diferentes fluidos. [2]



Para determinar si una tubería se encuentra apta para seguir trabajando en condiciones favorables, se debe analizar el tamaño de los defectos; estos son discontinuidades o irregularidades del material o de su geometría, son evaluados por códigos y normas que limitan sus características, previniendo sus efectos negativos en la estructura, estos pueden ser agrupados en tres diferentes categorías: Defectos mecánicos, por soldadura o debido a la corrosión.

### 1.2.1 DEFECTOS MECÁNICOS

- a) Muesca o hendiduras: Muesca causada por un evento que produce una variación visible en la curvatura de la pared de la tubería o un componente, sin que ocurra variación en el espesor de la pared.
- b) Daños superficiales: Imperfecciones en la superficie causada por la remoción mecánica del material deformaciones, lo que provoca reducción en el espesor de la pared de la tubería.
- c) Grietas: Pueden causar concentración de tensiones en un determinado punto y, por eso, pueden ser consideradas como un defecto.
- d) Huecos superficiales: Son aquellos generados en la superficie del ducto.

### 1.2.2. DEFECTOS POR SOLDADURA

- a) Penetración incompleta: Se origina cuando la raíz de la junta, al ser soldada, no es fundida completamente.
- b) Fusión incompleta: Se refiere a la ausencia de la unión entre el metal base o entre pases y la soldadura, por falta de fusión.

- c) Inclusiones: Ocurren cuando partículas de óxido y otros sólidos no metálicos se encuentran atrapados entre los cordones de soldadura o entre metal base y la soldadura.
- d) Porosidad: Se produce por los gases en la parte posterior del cordón de soldadura, durante la solidificación del mismo.
- e) Mordeduras: Son socavaciones agudas formadas por la acción de la fuente de calor de la soldadura por arco, entre un cordón de soldadura y el metal base o entre cordones adyacentes.

### 1.2.3 DEFECTOS POR CORROSIÓN

Se clasifican en cuatro grupos:

- a) Corrosión uniforme o generalizada: Es un proceso de remoción uniforme de la superficie del metal como se aprecia en la figura y su forma es uniforme o gradual. La corrosión uniforme es la más común y la que genera mayores pérdidas de material, sin embargo, al ser superficial es también la más fácil de controlar y la que menos accidentes provoca. Cuando ocurre este tipo de corrosión se puede estimar fácilmente la vida útil del material, ya que existe una relación directa entre pérdida de material, reducción de espesor, gravedad fenómeno y el tiempo.



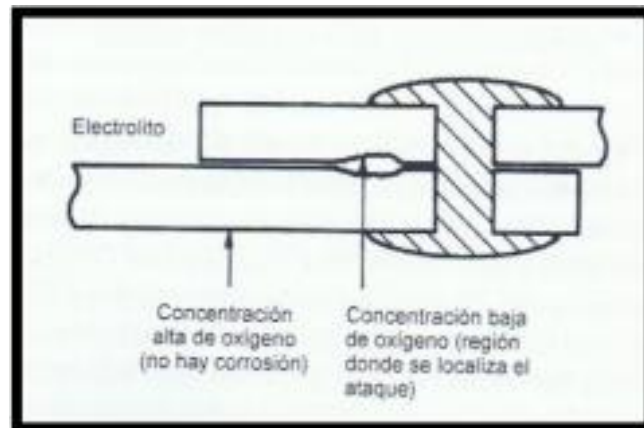
Fig. 1.3 Corrosión uniforme [14]

- b) Corrosión por picadura: Es un fenómeno localizado en zonas aisladas de la superficie que afecta una pequeña área (ver figura 1.4); se propaga hacia el interior el metal y disminuye considerablemente el espesor del componente. Esto causa que los equipos fallen, con solo una poca pérdida de material por las perforaciones. Las picaduras pueden contribuir de manera importante a una falla general en componentes sujetos a esfuerzos muy altos. En la figura 1.4 observamos zonas afectadas en la superficie afectada en pequeña áreas.



Fig. 1.4 Corrosión por picadura. [14]

- c) Corrosión en resquicio: Aparece en zonas de unión, intersticios, zonas de solape, zonas roscadas y, en general, en aquellas zonas mal aireadas (ver figura 1.4). La causa principal de este tipo de corrosión es la formación de pilas de aireación diferencial originadas como consecuencia de la existencia de distintas presiones parciales de oxígeno en zonas distintas de la superficie metálica. El ataque, como podemos ver en la siguiente imagen, se localiza en las regiones mal aireadas, pobres en oxígeno.



**Fig. 1.5** Ejemplo de corrosión en resquicio. Ataque en la zona de solape donde se da baja concentración de oxígeno. [15]

- d) Corrosión bajo tensión: Acontece en aleaciones cuando son sometidas simultáneamente a tensiones de tracción y colocado en contacto con un medio corrosivo; cuando esto ocurre da lugar a la aparición de grietas que avanzan en la dirección normal a la de aplicación de la tensión como se ve en la figura 1.6. La corrosión bajo tensión es típica de aleaciones pasivables.



**Fig. 1.6** Detalle de grieta transgranular originada por corrosión bajo tensión en acero inoxidable austenítico. [16]

#### 1.2.4. FALLA DEL COMPONENTE

De los diferentes tipos de defectos, se tiene que la corrosión es una de las más frecuentes y con mayor presencia. Una de sus principales causas es la diversidad de ambientes hostiles en que trabajan estos sistemas (Ver figura 1.17). La corrosión puede ocurrir de forma externa o interna de la tubería, y desarrollarse de diferentes modos como: La corrosión uniforme, por picaduras, corrosión bajo tensión y agrietamiento por hidrógeno. Esto no significa que una tubería falle generalmente por la misma corrosión, sino debido a un deficiente sistema de control.



**Figura 1.7** Oleoducto averiado por corrosión

**Fuente:** CABRAL, H.L; Oleoducto roto por corrosión en Campinas-Sao Pablo, (2007),  
VIRTURS IMPAVIDA

Los defectos que se encuentran presente en la pared de la tubería pueden fallar de la siguiente forma:

- En el caso del daño en el espesor de la pared debido a la corrosión por picadura, se desarrolla hasta alcanzar su tamaño crítico debido al trabajo con presión interna. Y como el espesor de la pared de la tubería esta disminuido, debe soportar los mismos esfuerzos siendo de mayor intensidad debido al



espesor reducido, generando grietas. El crecimiento de una grieta se desarrolla por el incremento de la presión interna y se desarrolla a través del espesor de la pared.



**Fig. 1.8** Crecimiento de corrosión por picadura

- Si el esfuerzo alcanza el valor crítico, el espesor remanente bajo el defecto parcial de pared puede fallar y producir un defecto que atraviese el espesor de pared.



**Fig. 1.9** Daño a través de la superficie

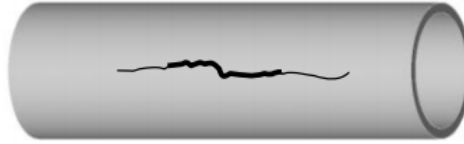
- El defecto atraviesa el espesor de pared en la tubería, lo que origina las siguientes fallas:
  - Si el defecto no incrementa su longitud y se realiza una disminución de la presión de trabajo, ocurre la fuga del fluido



**Fig. 1.10** Crecimiento de defecto



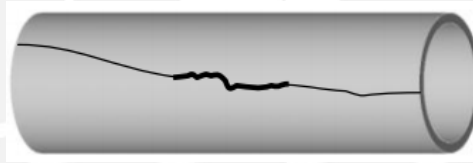
- Si el defecto sigue creciendo o se incrementa la presión interna, se produce la ruptura de la tubería.



**Fig. 1.11** Ruptura de la tubería

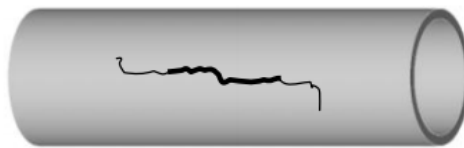
El defecto por ruptura puede desarrollarse de las siguientes maneras:

- a. Tiende a propagarse, cuando la presión es mayor o el material de la tubería es de baja tenacidad.



**Fig. 1.12** Propagación de daño

- b. Se da el arresto, cuando la presión interna disminuye o el material de la tubería es de alta tenacidad.



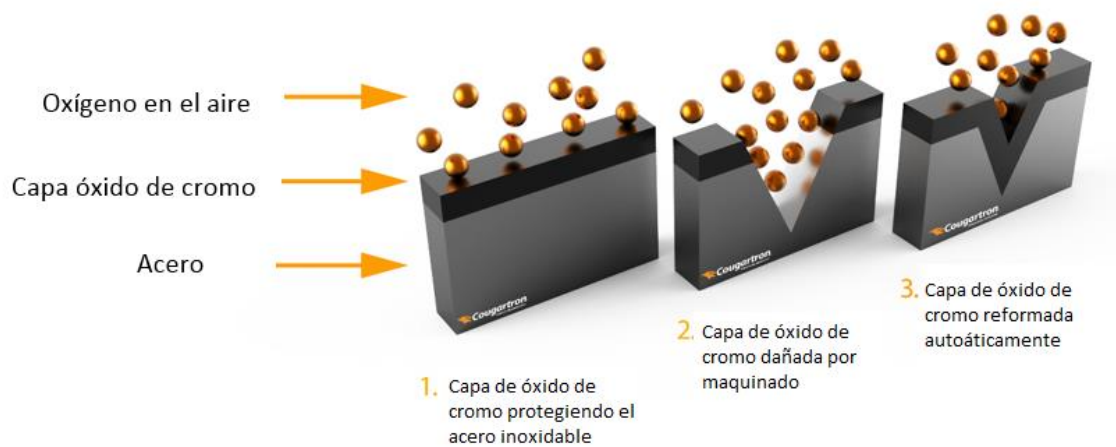
**Fig. 1.13** Arresto del daño

### 1.3 CORROSIÓN POR PICADURA

#### 1.3.1 CAPA PASIVANTE

La pasivación es la formación de capas superficiales sobre un metal, el cual queda protegido de los agentes químicos agresivos; por lo general, esta capa está formada por óxidos del metal que se está protegiendo.

Existe el peligro de que estas capas pasivas se rompan (Ver figura 1.14), ya sea mecánicamente o por la acción de agentes químicos agresivos; en este caso, siendo el más común el ion de cloruro el que rompe la capa pasivante, creando en la superficie una serie de orificios, destruyendo la pasividad y generando una corrosión por picaduras.



**Fig.1.14** Ruptura capa pasivante

El picado se presenta por encima de un cierto potencial, que se conoce como potencial de ruptura o potencial de picado y es el valor del potencial donde se inician las picaduras en el electrodo pasivo; es siempre más positivo que el potencial corrosivo. Se tiene como ejemplo en la figura 1.15 el hierro.

La transición actividad-pasividad se da cuando se llega a un potencial en el cual la corriente ya no aumenta y se tiene una corriente crítica de pasivación; posteriormente aumenta y llega a la zona de pasivación.

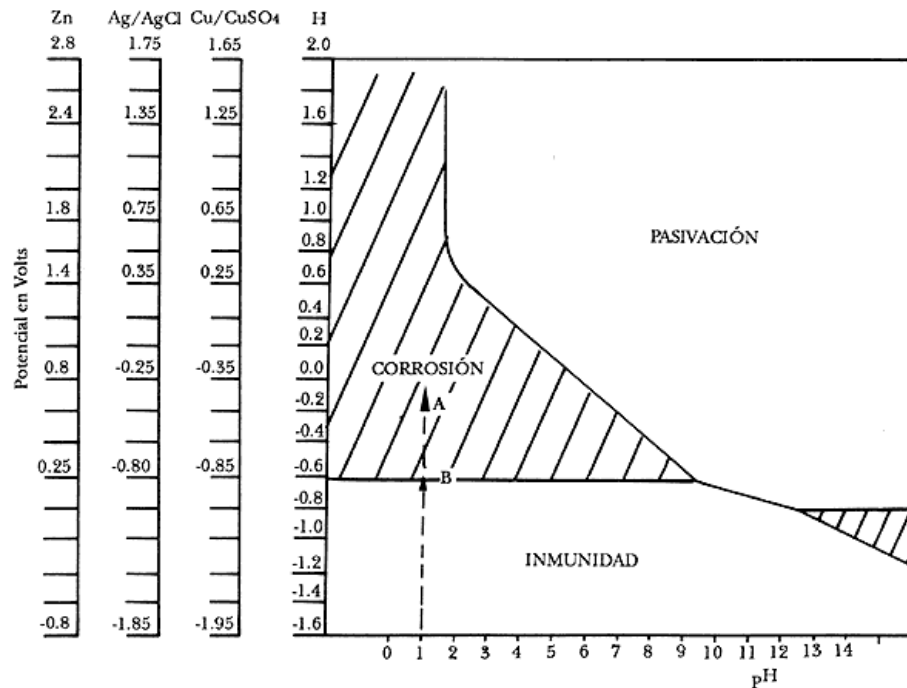


Figura 1.15 Diagrama potencial -pH para el Hierro (Fe).

### 1.3.2 CORROSIÓN POR PICADURA

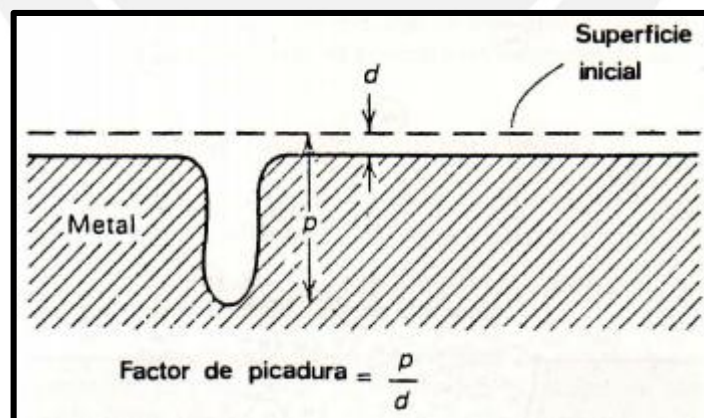
Ciertos metales y aleaciones, que deben su estabilidad a la delgada capa pasivante de óxido, son los más propensos a desarrollar picaduras. Estas se originan en las imperfecciones superficiales y en los lugares expuestos a daño mecánico, bajo condiciones en que la película es incapaz de regenerarse. Por lo general, las zonas mal aireadas son más susceptibles a este tipo de corrosión, también puede producir fallas estructurales en componentes por perforación y por debilitamiento.



**Fig. 1.16** Corrosión por picadura externa e interna

**Fuente:** Mantenimiento Industrial, Sintraconsulting 2012.

Las picaduras, que pueden ser de forma superficial o profunda (Ver figura 1.16), comienzan a desarrollarse en las zonas donde el metal produce un aumento local de su velocidad de corrosión. Si se produce corrosión sobre un área de metal relativamente pequeña que actúa como ánodo, el ataque progresa en profundidad, y la picadura resultante se describe como profunda, si por el contrario, el área de ataque es más amplia, y no tan profunda, la picadura se denomina superficial. La magnitud de las picaduras se expresa generalmente por medio del término factor de picadura, el cual relaciona la profundidad media de las picaduras y el promedio perdido por corrosión generalizada (Ver figura 1.17).

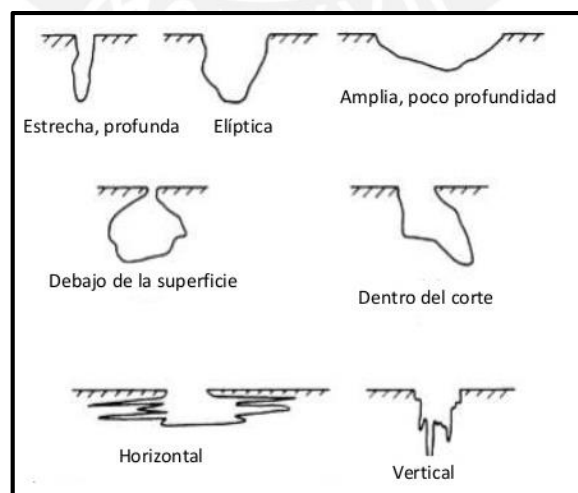


**Fig. 1.17** Factor de picadura [6]

Las picaduras constituyen una forma muy perjudicial de corrosión; a pesar de que el daño producido en la superficie del metal atacado es pequeño, las probabilidades de

falla son mayores, en particular cuando el metal está destinado a contener fluidos (Tubos de intercambiadores, tuberías enterradas, recipientes de la industria química, etcétera), ya que existe el riesgo de una rápida perforación. Una de las primeras cuestiones a ser planteadas es determinar dónde se originan las picaduras y qué elementos o defectos en la superficie proporcionan los lugares para su iniciación. A veces, la predisposición es mayor en los bordes de grano y se tiene cierta relación entre los puntos de formación de dislocaciones (Defectos lineales en la estructura cristalina) y formación de picaduras. Otras veces, está comprobada la intervención de naturaleza química, tales como inclusiones de óxidos, sulfuros y compuestos diversos, y partículas metálicas y no metálicas que contaminan la superficie, así como la de naturaleza geométrica, tales como rayas y señales dejadas por acciones mecánicas.

Los medios corrosivos particularmente temibles desde el punto de vista del desarrollo de picaduras son con soluciones que contienen iones cloruro, aunque el fenómeno se manifiesta también en presencia de iones bromuro, hipoclorito y otros como se muestra en la tabla 1.2. Muchos de los medios que las producen son casi neutros. La picadura compone una pila local en la que la corriente fluye a través del electrolito desde la región anódica (Fondo de la picadura) a la región catódica colindante. Como el área anódica central es pequeña, la densidad de corriente es elevada, lo que explica las altas velocidades de penetración, que forman diferentes tipos de picadura como se esquematiza en la figura 1.18.



**Fig. 1.18** Tipos de forma de picaduras

Fuente: ASTM G1

**Tabla 1.2** Influencia de elementos y compuestos sobre la resistencia a la corrosión

Fuente: Fundamentos de la Corrosión para Ingenieros. 2004.

	<b>EFEECTO</b>	<b>RAZONES</b>
<b>C</b>	Negativo	Causa precipitación de carburos provocando empobrecimiento de Cr
<b>Si</b>	Positivo	Estabiliza la película pasiva de la aleación
<b>Mn</b>	Negativo	MnS son puntos de inicio de picaduras. Mn desestabiliza la capa pasiva
<b>S</b>	Negativo	Sulfuros favorecen la formación de picaduras
<b>Cr</b>	Positivo	Estabiliza la capa pasiva
<b>Ni</b>	Positivo Negativo	Mejora resistencia en inoxidable austenítico. Diluye N en fase $\gamma$ con lo que reduce su resistencia a la picadura en inoxidable dúplex
<b>Mo</b>	Positivo	Estabiliza la capa pasiva y mejora la resistencia a la picadura
<b>N</b>	Positivo	Incrementa significativamente la resistencia a la picadura de inoxidable austenítico y dúplex
<b>W</b>	Positivo	Efecto similar al Mo
<b>%Ferrita</b>	Positivo Negativo	Incrementa el % de N, Cr y Mo de la fase $\gamma$ mejorando la resistencia a la corrosión en inoxidable dúplex. Reduce la resistencia a la corrosión en inoxidables austeníticos
<b>Carburos y nitruros de Cr</b>	Negativo en medios oxidantes y con cloruros	Producen empobrecimiento en Cr favoreciendo la corrosión por picaduras
<b>Fases <math>\sigma</math>, <math>\chi</math>, R, G,...</b>	Negativo	Producen empobrecimiento en Cr y Mo y reducen la resistencia a la corrosión.



### 1.3.3 MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE LA CORROSIÓN POR PICADURA

#### 1.3.3.1 INSPECCIÓN VISUAL

Para identificar la corrosión por picadura mediante la inspección visual se puede realizar en ambientes bien iluminados para determinar la localización y severidad de la picadura. La toma de fotografías, como se muestra en la figura 1.19, puede ser usada para documentar la diferencia por la apariencia de picaduras anteriores y posteriores; y además dimensionar la picadura con una escala de referencia.



Fig. 1.19 Ejemplo de fotografía con escala de referencia. [4]

La inspección visual es la técnica más fácil a emplear ya que no requiere equipamiento especial. Podemos seguir las siguientes recomendaciones

- a) Si el metal estuvo expuesto a un ambiente conocido, la composición del producto de la corrosión puede ser evaluada determinando la causa de la corrosión. Seguir el procedimiento recomendado para la futura identificación con la *National Association of Corrosion Engineers Standard NACE RP-01-73*.
- b) Para exponer la picadura, usar la limpieza recomendada para remover la corrosión y evadir la solución que ataca la base de metal siguiendo el procedimiento por la ASTM G1 de *la Práctica para la preparación, limpieza y evaluación de especímenes de corrosión*.

- c) Examinar la superficie limpia bajo luz normal para determinar el tamaño aproximado y distribución de la picadura con instrumentos que nos permitan dimensionar la picadura. (Ver figura 1.20)



Fig. 1.20 Ejemplo de medición de picaduras. [4]

### 1.3.3.2 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Los Ensayos No Destructivos son herramientas de control de calidad con diferentes tipos de procesos que permiten diagnosticar preventivamente las condiciones de un componente; su deterioro o mal funcionamiento; realizando el análisis de piezas recién fabricadas o reparadas.

#### 1.3.3.2.1 RADIOGRAFÍA

La radiografía utiliza rayos X que atraviesan el objeto para determinar la magnitud del daño en este caso por picadura. La intensidad emergente varía de acuerdo al espesor del material, siendo detectadas según la absorción de los rayos X por el componente inspeccionado. Las picaduras deben ser tan largas como el 50 % del espesor de pared para ser detectadas. La radiografía ayudara a determinar la extensión en la subsuperficie y reconocer picaduras bajo la superficie. (Ver figura 1.21)

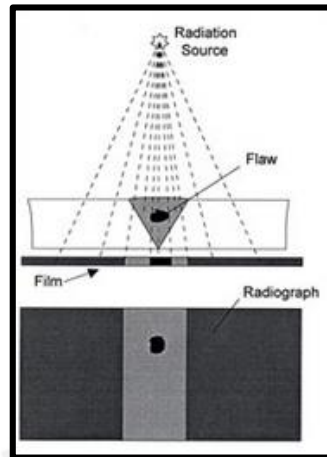


Fig. 1.21 Proceso de toma de radiografía

Fuente: IHS Engineering 360. Nondestructive testing. 2015

### 1.3.3.2.2 PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

La inducción de un campo magnético en materiales ferromagnéticos es usado para determinar discontinuidades transversales a la dirección del campo magnético siendo de forma longitudinal o circunferencial (Ver figura 22). Partículas ferromagnéticas son dispersadas sobre la superficie para detectar la fuga del campo magnético y con ello remarcar el tamaño de la discontinuidad.

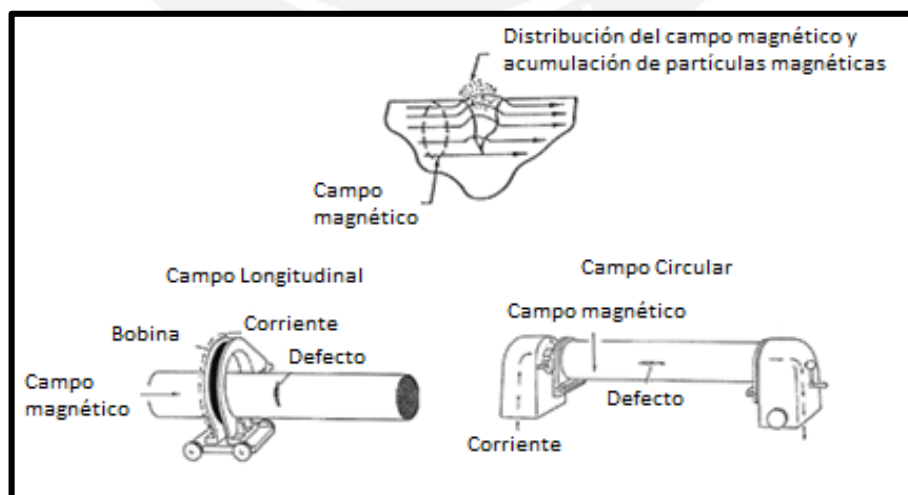


Fig. 1.22 Inspección por partículas magnéticas usando campo magnético longitudinal y circunferencial

Fuente: IHS Engineering 360. Nondestructive testing. 2015

### 1.3.3.2.3 ULTRASONIDO

El uso de ondas dentro de la superficie metálica dañada, refleja y se convierte en señales eléctricas que son interpretadas dando la locación de la picadura. La sensibilidad del ultrasonido es buena y provee información instantánea acerca del tamaño y posición de la picadura (Ver figura 1.23).

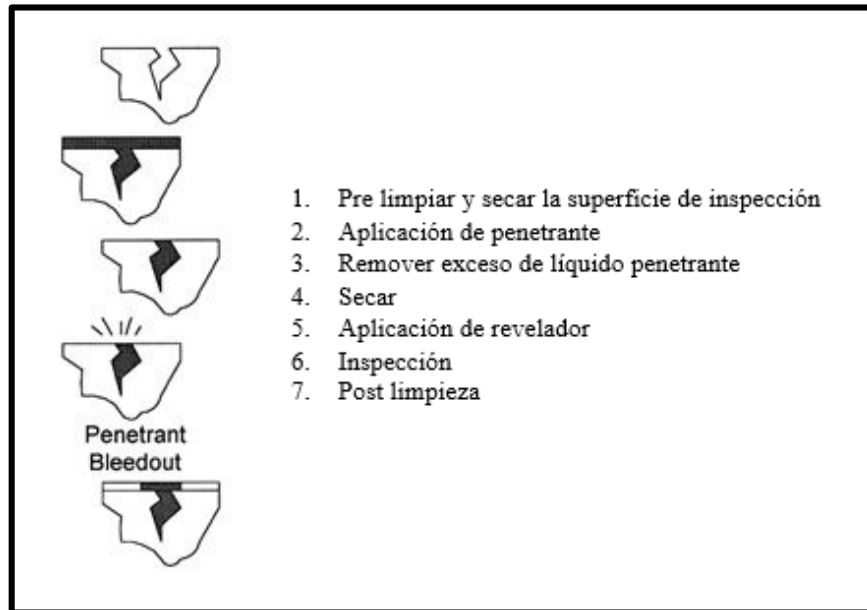


**Fig. 1.23** Medición de corrosión por ultrasonido

**Fuente:** Olympus. Medición por ultrasonidos: Corrosión. 2015

### 1.3.3.2.4 LÍQUIDOS PENETRANTES

La función de los líquidos penetrantes es de exponer los defectos en la superficie dañada. Estos son localizados recubriendo la superficie con un revelador, el mismo cuya mezcla con el líquido penetrante que contiene material contrastante, revele el daño. Esto nos permite determinar un diámetro y profundidad aproximada. (Ver figura 1.24)



**Fig. 1.24** Proceso de inspección por partículas magnéticas

**Fuente:** IHS Engineering 360. Nondestructive testing

#### 1.4 APTITUD PARA EL SERVICIO

El análisis de aptitud para el servicio evalúa la integridad estructural de un componente en servicio con defectos, los cuales pueden provenir de la fabricación o haberse generado por diferentes mecanismos de daño. A través de criterios de evaluación cuantitativos se determina si el componente es apto para continuar en operación normal, o debe adoptarse alguna medida para recalificar el mismo como, por ejemplo, establecer nuevos límites de presión/temperatura de operación, llevar a cabo reparaciones, mitigación de los mecanismos de daño, etc.

El procedimiento para el análisis de la aptitud para el servicio de un componente es el siguiente

- a. Identificar el defecto y mecanismo daño: El diseño original, las prácticas de fabricación, el material de construcción, la historia del servicio y las condiciones ambientales pueden ser usados para determinar la causa probable del daño. Se puede definir los siguientes daños y como son desarrollados por la Norma API 579 en la figura 1.25.

- Fractura Frágil.
- Corrosión/Erosión.
- Grietas como defecto.
- Daño por fuego.
- Daño por Creep.
- Daño mecánico.

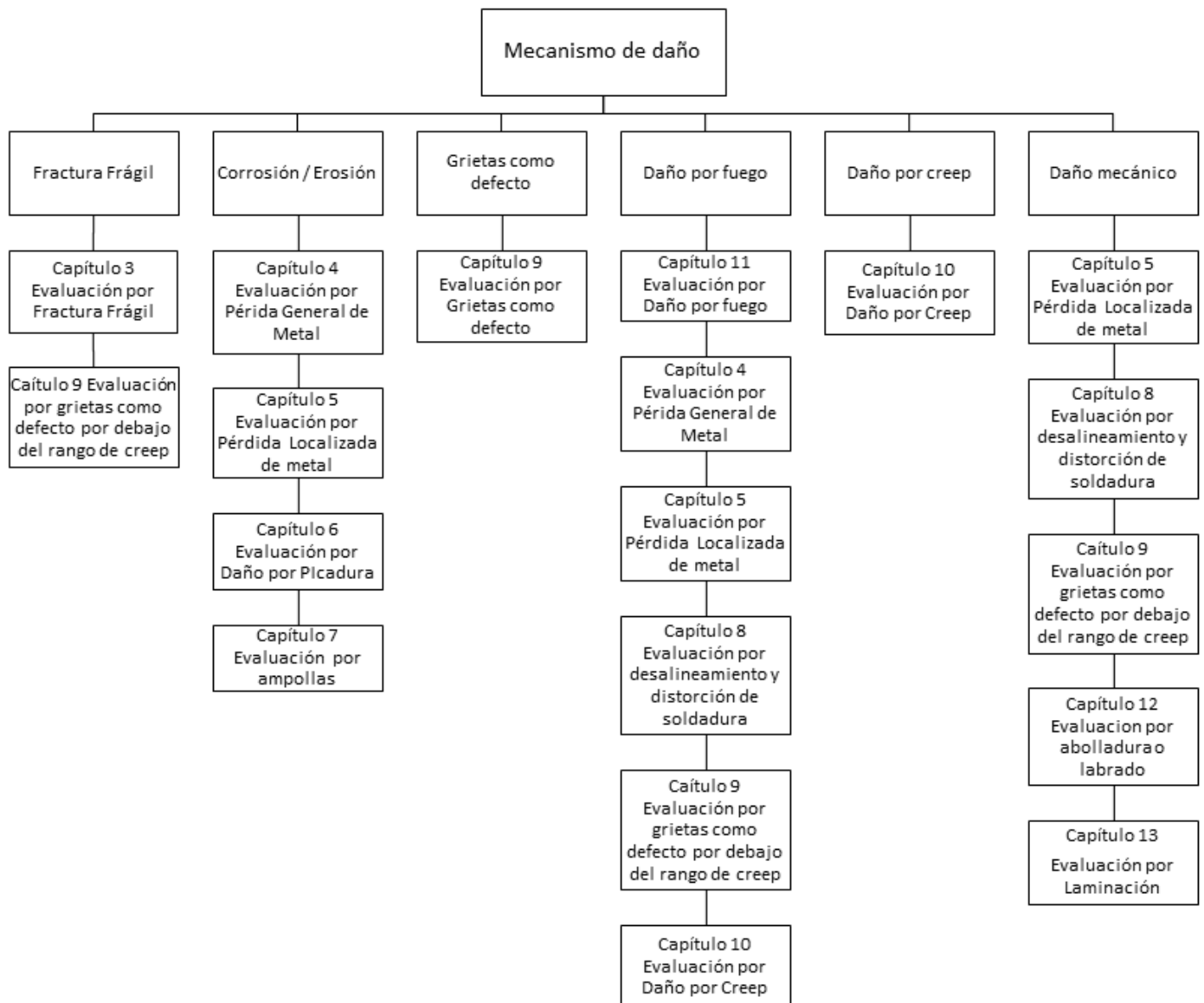


Fig. 1.25 Procedimiento de evaluación para diferentes tipos de daño. [4]



- b. Aplicación y Limitación del procedimiento para la evaluación de la Aptitud para el Servicio: La aplicación y limitaciones para el procedimiento de la evaluación son descritas en cada Capítulo de la Norma API 579.
- c. Recolección de datos: Los datos requeridos para desempeñar la evaluación depende de cada tipo de defecto o mecanismo de daño. Los datos pueden incluir los datos originales del equipo, información pertinente de mantenimiento e historial de operación, datos específicos como el tamaño del defecto, la presión del componente en la localización del defecto y propiedades del material.
- d. Determinar las técnicas de Evaluación y Criterios de Aceptación: En caso de múltiples daños se debe evaluar cada uno de ellos.
- e. Evaluar la vida remanente: Un estimado de la vida remanente debe ser realizado estableciendo el intervalo de crecimiento del defecto.
- f. Métodos de reparación basada en el mecanismo de daño o tipo de defecto para alargar el tiempo de funcionamiento y a su vez detener el crecimiento del daño.
- g. Monitoreo en Servicio: El servicio de monitoreo puede ser usado para los casos donde la vida remanente y el intervalo de inspección no puede ser establecido por la complejidad asociada con el entorno de servicio.
- h. Documentación: La documentación debe incluir un record de toda la información y decisiones hechas en cada uno de los pasos anteriores para calificar el componente apto para continuar su operación.

## 1.5 NIVELES DE EVALUACIÓN

Tres niveles de evaluación son provistos en la Norma API 579 que establecen los procedimientos para la evaluación por Aptitud para el Servicio, en este caso se desarrollaran los dos primeros niveles de evaluación. En la figura 1.26 se muestra el diagrama de flujo para demostrar como los niveles de evaluación se relacionan. En general, cada nivel de evaluación provee un balance entre tendencia conservativa, la cantidad de información requerida para la evaluación y la complejidad del análisis siendo desarrollado. El nivel 1 es el más conservador pero es el más fácil para usar.

### 1.5.1 EVALUACIÓN NIVEL 1

Los procedimientos de evaluación incluidos en este nivel son destinados a proveer una proyección crítica conservativa que se realiza con una mínima cantidad de inspección o información del componente.

### 1.5.2 EVALUACIÓN NIVEL 2

Los procedimientos de evaluación incluidos en este nivel son destinados a realizar una evaluación detallada que obteniendo resultados más precisos que los obtenidos de una Evaluación Nivel 1. En la Evaluación Nivel 2, la información de inspección es similar a la requerida para la Evaluación Nivel 1; sin embargo, los cálculos son de mayor detalle.

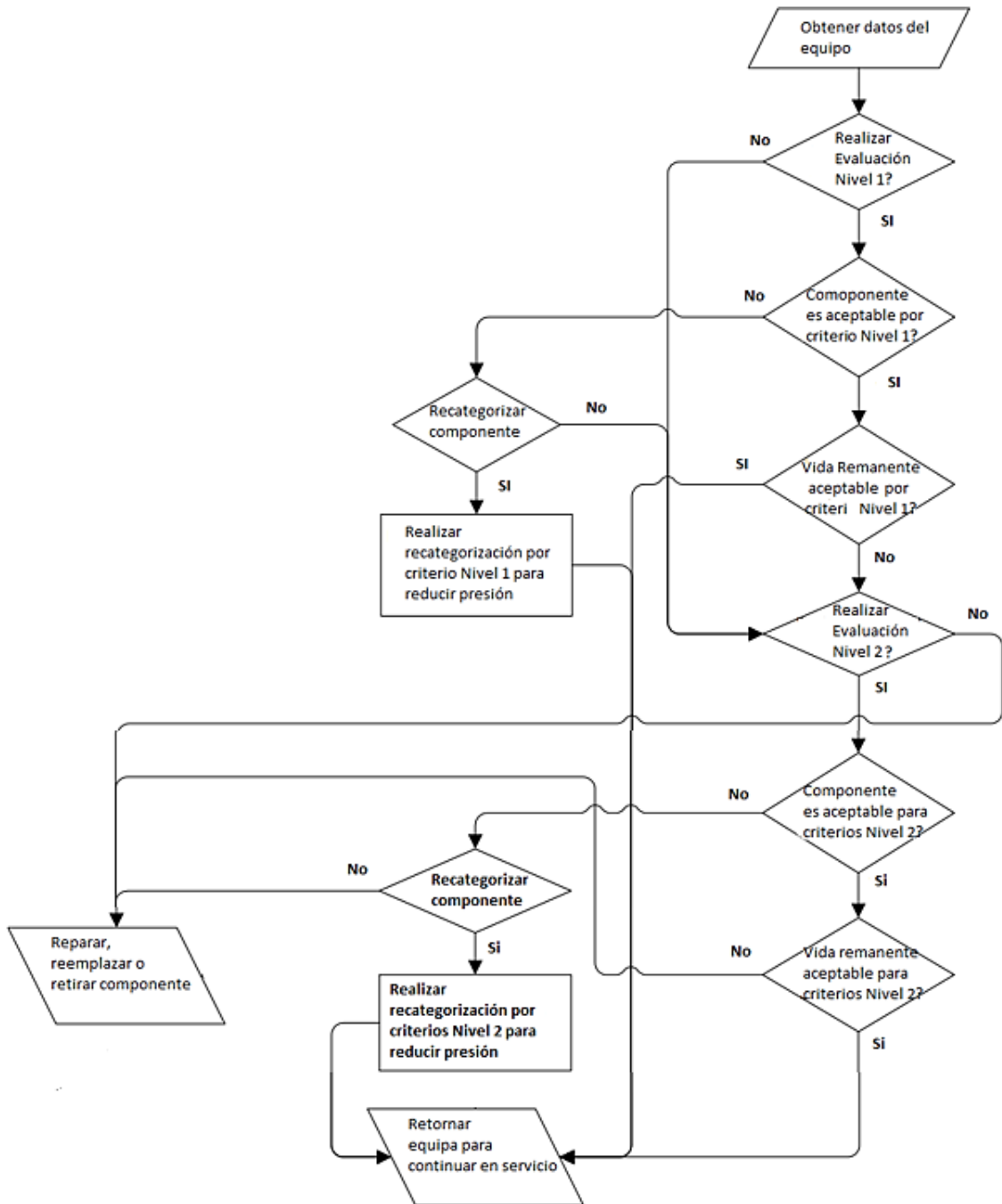


Fig. 1.26 Diagrama de flujo para realizar los niveles de evaluación 1 y 2. [4]

### 1.5.3 ESFUERZO ADMISIBLE

Este criterio de aceptación es basado sobre cálculos de esfuerzos resultantes de diferentes condiciones de carga, clasificación y superposición del resultado de esfuerzos; y comparación de los esfuerzos calculados en una categoría asignada o clase para un valor de esfuerzo admisible. El valor del esfuerzo admisible es típicamente establecido como una fracción de rendimiento a la tracción o esfuerzo de ruptura en el tiempo de servicio y la temperatura de servicio. Esta fracción puede ser asociada con un margen de diseño. Este método de criterio de aceptación es actualmente utilizado en la mayoría de diseño en códigos de construcción. En la aplicación de la aptitud para el servicio, este método limita la aplicabilidad del componente por la dificultad de establecer la clasificación de la tensión adecuada, para componentes conteniendo defectos.

### 1.5.4 FACTOR DEL ESFUERZO REMANENTE

Los procedimientos de evaluación que utilizan el análisis lineal de tensión elástica y los criterios de aprobación esfuerzo admisible sólo proporcionan una aproximación de las cargas que un componente puede soportar sin presentar fallas. La estimación de la capacidad de carga que un componente puede soportar, se proporciona mediante el uso del análisis de tensión no lineal, desarrollando el límite donde el componente comienza a presentar deformación plástica, evaluar las características de deformación del componente, por ejemplo: Deformación límite asociados a la operatividad componente; y evaluar los daños ocasionados por fatiga o fluencia.

a. En la presente norma, el concepto de “Factor del esfuerzo remanente” se utiliza para definir la aceptabilidad de un componente para continuar operando. El factor del esfuerzo remanente (*RSF*) se define como:

$$RSF = \frac{Ldc}{Luc}$$

Donde:

$Ldc$  , límite de carga del componente dañado donde comienza la deformación plástica.

$Luc$ , límite de carga sin daños donde comienza la deformación plástica.

I. Con esta definición del  $RSF$ , para los criterios de aceptación se pueden establecer mediante cálculos del análisis de la tensión elástica, teoría de la carga límite o del análisis elástico - plástico. Para evaluar las áreas con picadura, los procedimientos de evaluación para la aptitud para el servicio, proporcionan un medio para calcular el  $RSF$ . Si el  $RSF$  calculado es mayor al  $RSF$  admisible el componente dañado puede ser colocado de nuevo en servicio. Si el  $RSF$  calculado es menor que el valor permitido, el componente deberá ser reparado, recalificado o de alguna forma se deberá remediar su condición de tal forma de que se pueda reducir la severidad de las condiciones de operación. La nueva presión de operación se puede calcular a partir del  $RSF$  de la siguiente forma:

$$MAWP_r = MAWP \left( \frac{RSF}{RSF_a} \right) \quad \text{para} \quad RSF < RSF_a$$

$$MAWP_r = MAWP \quad \text{para} \quad RSF \geq RSF_a$$

Donde

$MAWP$ , máxima presión admisible de un componente que no presenta daños.

$MAWP_r$ , nueva presión máxima admisible del componente dañado.

$RSF$ , factor del esfuerzo remanente

$RSF_a$ , factor del esfuerzo remanente admisible

II. Los valores recomendados para los RSF, (Ver tabla 1.3) estos valores pueden ser reducidos en base al tipo de carga, por ejemplo: Cargas normales de funcionamiento, cargas ocasionales, o altas cargas de corta duración; también la consecuencia del daño.

**Tabla 1.3** Factor recomendado del esfuerzo remanente admisible basado en el código de diseño. [4]

Código de diseño	Factro del Esfuerzo Admisible Recomendado $RSF_r$
ASME Section 1	0.90
ASME Section VIII, Division 1 (pre 1999)	0.90
ASME Section VIII, Division 1 (post 1999)	0.90
ASME Section VIII, Division 2	0.90
AS 1210	0.90
BS PD 5500	0.90
CODAP	0.90
ASME B31.1	0.90
ASME B31.3	0.90
API 620	0.90
API 650	0.90



## CAPÍTULO 2

### 2. DESARROLLO DEL MÉTODO DE EVALUACIÓN

#### 2.1 NORMALIZACIÓN

En la construcción de sistemas nuevos de tubería se busca estandarizar el procedimiento de construcción y proporcionar la información necesaria para su correcto funcionamiento. Debido a que el mercado se vuelve más exigente existen entidades que se dedican a normalizar los procedimientos garantizando el uso adecuado de los componentes según los parámetros de diseño y a su vez permitir la evaluación del sistema durante su funcionamiento.

Las siguientes instituciones proporcionan metodologías relacionadas a la fabricación y evaluación de los mecanismos de daño en tuberías.

- a. API American Petroleum Institute
  - API 510 de Inspección de recipientes a presión
  - API 570 de inspección de tuberías en servicio
  - API 571 Mecanismos de daño que afectan equipos reparados
  - API 579 Aptitud para el servicio
  - API 581 Inspección basada en el riesgo
  
- b. ASME American Society of Mechanical Engineer
  - ASME B&PV Code, Section VIII, Division 1
  - ASME B&PV Code, Section VIII, Division 2

ASME B&PV Code, Section I  
ASME B31.1 Piping Code  
ASME B31.3 Piping Code

- c. ASTM American Society for Testing and Materials  
Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion

## 2.2 APLICABILIDAD Y LIMITACIONES DE LA EVALUACIÓN

A continuación se detalla la aplicabilidad y limitaciones de la metodología

- a. La metodología se limita a evaluar el mecanismo de daño por corrosión por picadura en sistemas de tubería, siendo los siguientes tipos:
- Picadura dispersa
  - Picadura localizada
  - Picadura confinada en área local delgada
  - Picadura dispersa con área local delgada
- b. EL componente no debe trabajar en servicio cíclico. Si el componente está sujeto a variaciones de presión y/o temperatura incluyendo cambios operacionales, encendidos y apagados a lo largo de su funcionamiento, el componente puede ser evaluado con el procedimiento en el Anexo B1, párrafo B1.5.2, de la Norma API 579.
- c. El componente no debe trabajar dentro de los rangos de fluencia lenta (creep). En la siguiente tabla 2.1 se presenta materiales con la temperatura límite a la cual se ocasiona el daño por fluencia lenta.

**Tabla 2.1** Temperatura límite para definir el rango de fluencia lenta. [4]

Material	Temperatura límite
Carbon Steel ( $UTS \leq 414MPa$ (60 ksi))	343°C (650°F)
Carbon Steel ( $UTS > 414MPa$ (60 ksi))	371°C (700°F)
Carbon Steel – Graphitized	371°C (700°F)
C-1/2Mo	399°C (750°F)
1-1/4Cr-1/2Mo – Normalized & Tempered	427°C (800°F)
1-1/4Cr-1/2Mo – Annealed	427°C (800°F)
2-1/4Cr-1Mo – Normalized & Tempered	427°C (800°F)
2-1/4Cr-1Mo – Annealed	427°C (800°F)
2-1/4Cr-1Mo – Quenched & Tempered	427°C (800°F)
2-1/4Cr-1Mo – V	441°C (825°F)
3Cr-1Mo-V	441°C (825°F)
5Cr-1/2Mo	427°C (800°F)
7Cr-1/2Mo	427°C (800°F)
9Cr-1Mo	427°C (800°F)
9Cr-1Mo – V	454°C (850°F)
12 Cr	482°C (900°F)
AISI Type 304 & 304H	510°C (950°F)
AISI Type 316 & 316H	538°C (1000°F)
AISI Type 321	538°C (1000°F)
AISI Type 321H	538°C (1000°F)
AISI Type 347	538°C (1000°F)
AISI Type 347H	538°C (1000°F)
Alloy 800	565°C (1050°F)
Alloy 800H	565°C (1050°F)
Alloy 800HT	565°C (1050°F)
HK-40	649°C (1200°F)

d. Los siguientes tipos de componentes podrán ser evaluados según la categorización para cada el nivel de evaluación

- Componente tipo A

El diseño del componente se relaciona específicamente a la presión con el espesor requerido. Se muestran los siguientes ejemplos.

- Tanques presurizados cilíndricos y cónicos.
- Tanques esféricos presurizados y atmosféricos.
- Secciones rectas de sistemas de tubería
- Los codos de tuberías.
- Cilíndricos de almacenamiento atmosféricos.

- Componente tipo B

Este tipo de componente para la ecuación de diseño la presión no se relaciona con el espesor requerido. Estos componentes deben tener el procedimiento de diseño según el código usado. Los componentes tipo B contienen discontinuidades estructurales donde se realizan refuerzos. Los parámetros de diseño se relacionan a las dimensiones del componente por lo que el diseño de este se independiza del espesor.

- Inyectores para recipientes a presión, boquillas de tanques y ramales en tuberías.
- El refuerzo en la zona de transiciones cónicas.
- Cilindro de tapa plana.
- Placa porta tubos.
- Bidas
- Sistemas de tuberías.

e. La futura corrosión admisible debe ser basada en la proyección de la pérdida de metal futura en una región con picadura.

f. Para los niveles de evaluación se requiere lo siguiente

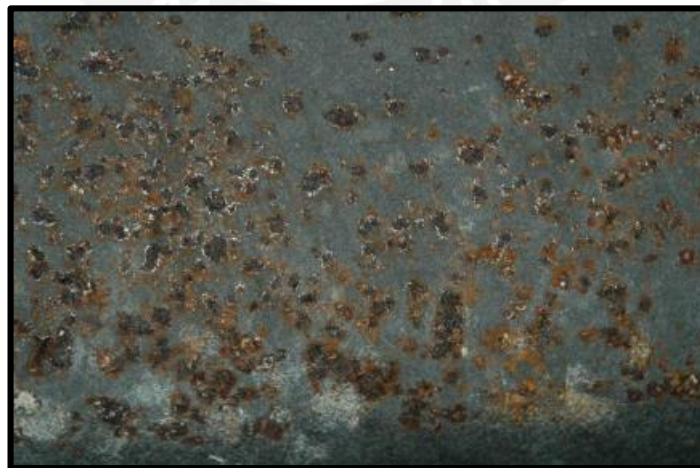
I. Nivel 1

- Se evaluarán componentes tipo A
- El daño por picadura se encuentra solo en la superficie externa de la tubería de forma directa o indirecta. Ver figura 2.1



**Fig. 2.1** Corrosión por picadura en la superficie externa. [13]

- El tipo de picadura a evaluar es el de picadura generalizada Ver figura 2.2



**Fig. 2.2** Dispersión de picaduras en una superficie para evaluación Nivel 1

**Fuente:** Chemical & Process Technology. Pitting Corrosion. 2007

## II. Nivel 2

- El daño de corrosión por picadura para el siguiente nivel se caracteriza por:
  - Picadura generalizada
  - Picadura localizada. Ver figura 2.3
  - Picadura dispersa con un área local delgada.
  - Picadura localizada dentro de un área local delgada. Ver figura 2.4



**Fig. 2.3** Picadura localizada. [4]



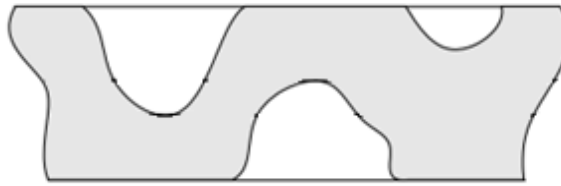
**Fig. 2.4** Picadura localizada dentro de un área local delgada. [4]

- La corrosión por picadura puede localizarse en ambas superficies de la pared de la tubería (Ver figura 2.5) pero no deben estar superpuesta una de la otra como se muestra en la figura 2.6



**Fig. 2.5** Daño por picadura en ambas superficies de una pared sin superponerse. [4]





**Fig. 2.6** Daño por picadura superpuesta no aceptable para la evaluación Nivel 2. [4]

## 2.3 DATOS REQUERIDOS

### 2.3.1 DATOS ORIGINALES DE DISEÑO DEL EQUIPO

La recolección de datos es importante para poder realizar una evaluación correcta de la aptitud para el servicio de una forma más precisa. Los datos requeridos dependen del daño y nivel de evaluación.

La siguiente lista muestra los datos requeridos acerca del componente a ser evaluado para su identificación y desarrollo de la metodología

- Código de identificación del componente en el sistema de tuberías
- Tipo de componente y localización
- Código de diseño
- Material de construcción
- Máxima presión admisible de trabajo
- Mínimo espesor requerido de pared
- Temperatura de trabajo
- Si el componente se encuentra en trabajo cíclico
- Tipo de daño
- Localización del daño (interna, externa, cerca de una soldadura, orientación)
- Exposición
- Reparación e historial de inspección
- Historial de operación

Además los sistemas de tuberías deben incluir algunos o todos los siguientes documentos:

- I. El código de fabricación para el diseño del sistema de tuberías. En caso de que el sistema no haya sido construido bajo un código certificado, obtener los documentos de diseño o documentos que contengan las especificaciones del diseño de construcción. Estos deben contener la lista de las líneas de tubería y la descripción de la clase de tubería incluyendo especificación del material, dimensiones, espesor de la pared de tubería, evaluación de la temperatura versus presión y los cálculos en caso de presentar cargas suplementarias.
- II. Los planos de fabricación y dibujos isométricos de la tubería donde se muestre la cantidad suficiente de detalles que permitan desarrollar los cálculos de la máxima presión admisible de trabajo del componente. En caso contrario obtener bocetos con detalles que contengan los datos suficientes para realizar el cálculo.
- III. Los registros de inspección del control de calidad del componente en el momento de fabricación.
- IV. Reportes de prueba realizados al material.
- V. Registro original de la prueba hidrostática realizada que incluya los parámetros de presión y temperatura de servicio.

### 2.3.2 DATOS REQUERIDOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA APTITUD PARA EL SERVICIO

Para cada nivel de evaluación se requiere los siguientes parámetros:

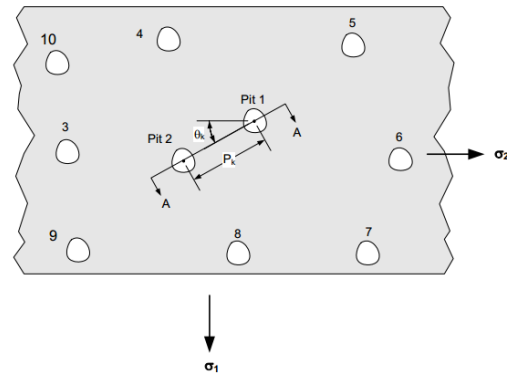
#### a. Nivel de Evaluación 1

- Profundidad de picadura máxima
- Espesor pared de la tubería
- Diámetro externo de la tubería
- Futura tolerancia de corrosión
- Pérdida de metal
- Presión y temperatura de diseño
- Esfuerzo admisible del material a la temperatura de diseño
- Eficiencia de la junta de soldadura

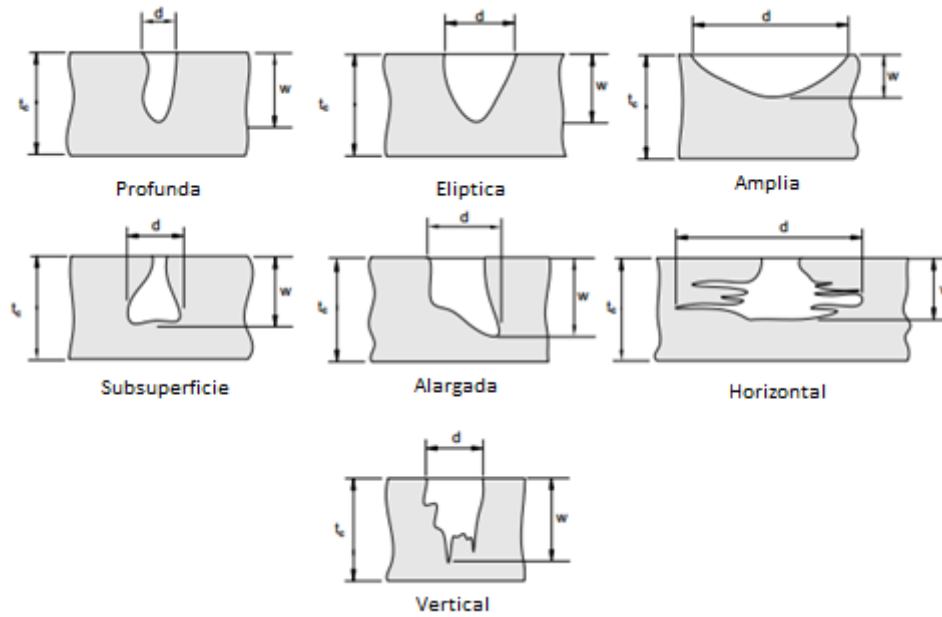
#### b. Nivel de Evaluación 2

Para el nivel de evaluación 2 se necesita además de los datos recopilados en el nivel 1 los siguientes parámetros:

- La distancia a la mayor discontinuidad estructural más cercana
- Eficiencia de soldadura longitudinal y circunferencial
- Determinar las cargas suplementarias (peso, presión externa, etc.)
- Definir el diámetro, profundidad, distancia entre picadura y ángulo con referencia al eje longitudinal de la tubería de los ejemplos de par de picadura. Ver figura 2.7 y 2.8

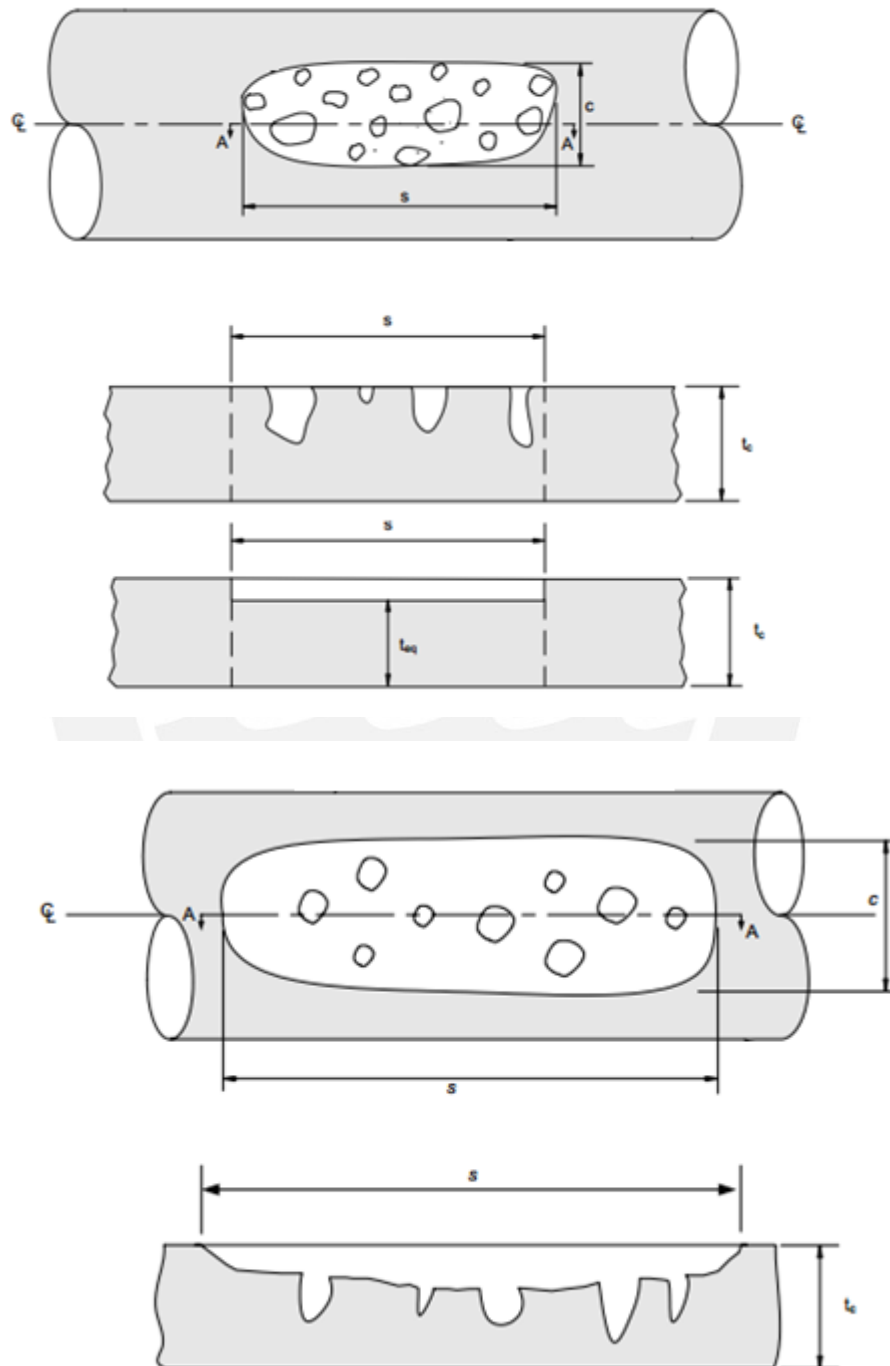


**Fig. 2.7** Medición de la distancia entre par de picadura ( $p$ ) y el ángulo ( $\theta$ ) del par con respecto al eje longitudinal de la tubería. [4]



**Fig. 2.8** Medición del diámetro ( $d$ ) y profundidad ( $w$ ) de los diferentes tipos de formación de picaduras. [4]

- En caso de encontrarse el daño en una región local delgada se debe medir el Ancho y largo de la región de corrosión por picaduras. Ver figura 2.9



**Fig. 2.9** Picadura localizada y Picadura localizada en una región de área delgada. [4]

## 2.4 FUTURA CORROSIÓN ADMISIBLE

La futura corrosión admisible debe ser establecida para el periodo destinado de operación. La corrosión permitida debe ser establecida en base a mediciones previas de espesor, a tasas de corrosión en equipos de similar servicio o de información obtenida en curvas de diseño de corrosión.

## 2.5 PERDIDA DE METAL

Para determinar la pérdida de metal se debe realizar lecturas puntuales de espesor. Estas mediciones de espesores permitirán determinar la pérdida de metal.

Los pasos para realizar la medida son las siguientes:

- I. Una inspección visual previa para detectar una posible pérdida de metal en la superficie. Luego realizar una evaluación volumétrica con ultrasonido o radiografía.
- II. Una vez detectada la pérdida se debe de tomar un mínimo de 15 lecturas de espesores, tomando en cuenta la exactitud del método de medición, y así afirmar que se tiene una pérdida general de metal. En algunos casos, las lecturas adicionales pueden ser necesarias dependiendo del tamaño del componente, los detalles de construcción y la naturaleza del medio en el que opera el componente.
- III. Si el coeficiente de variación (COV) de los espesores obtenidos es inferior al 10% se procederá a evaluar con el siguiente método. Para determinar el COV se debe evaluar con las siguientes ecuaciones.

$$t_{am} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{rd,i}$$



Donde,

$t_{rd,i}$ , espesor medido con la pérdida de metal

$t_{am}$ , promedio de espesor medido

$N$ , número de mediciones

$$S = \sum_{i=1}^N (t_{rd,i} - t_{am})^2$$

Donde,

$s$ , desviación estándar

$$COV = \frac{1}{t_{am}} \left[ \frac{S}{N-1} \right]^{0.5}$$

Donde,

$COV$ , coeficiente variación de espesor

$$LOSS = t_{nom} - t_{am}$$

Donde,

$LOSS$ , pérdida de metal

$t_{nom}$ , espesor nominal de pared de la tubería

## 2.6 DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA EN LOS NIVELES DE EVALUACIÓN

A continuación se identificarán las variables necesarias para la metodología y a su vez los pasos necesarios para el desarrollo de la misma

### 2.6.1 NIVEL DE EVALUACIÓN 1

La metodología de Evaluación del Nivel 1 utiliza tablas de picaduras estandarizadas y la profundidad máxima de picadura para obtener el factor del esfuerzo remanente (RSF). La superficie dañada se caracteriza al realizar una comparación visual entre el daño y el cuadro de picadura estandarizado. Basado en el cuadro de picadura que mejor aproxime la dispersión de picaduras, el RSF puede ser determinado usando el porcentaje de la espesor remanente de pared.

Para este nivel de evaluación se describe la siguiente metodología:

Paso 1, verificar y revisar la documentación y códigos de fabricación. Inspeccionar el área de evaluación utilizando los métodos desarrollados en el párrafo 1.3.3 para obtener los datos requeridos de evaluación. Verificar las limitaciones del nivel de evaluación.

Paso 2, determinar el espesor de pared a ser usado durante la evaluación

$$t_c = t_{nom} - LOSS - FCA$$

Donde:

$t_c$ , espesor de pared corroído

$t_{nom}$ , espesor de la tubería nominal

$LOSS$ , espesor por pérdida de material

$FCA$ , futura corrosión admisible

Paso 3, tomar fotos del área afectada incluyendo una escala de referencia para comparar la dispersión de picaduras con los cuadros comparativos

Paso 4, determinar la Máxima Profundidad de Picadura ( $w_{m\acute{a}x}$ ) con los métodos de inspección revisados.

Paso 5, determinar el porcentaje del espesor de pared remanente ( $R_{wt}$ )

$$R_{wt} = \frac{t_c + FCA - w_{m\acute{a}x}}{t_c}$$

- Si el  $R_{wt} < 0.2$ , entonces el componente es rechazado.

Paso 6, determinar la máxima presión admisible de trabajo.

- Por efecto de los esfuerzos circunferenciales

$$MAWP^c = \frac{2 \times S \times E \times (t_c - MA)}{D_0 - 2Y_{B31} \times (t_c - MA)}$$

Donde,

$MAWP^c$ , presión máxima de trabajo admisible circunferencial

$S$ , esfuerzo admisible del material a la temperatura de diseño

$E$ , eficiencia de la junta soldada

$MA$ , prestaciones mecánicas para componentes roscados, la profundidad de la rosca nominal debe aplicar con la dimensión  $h$  de la ASME B.1.20.1.

$D_0$ , diámetro externo

$Y_{B31}$ , coeficiente del espesor de pared

Para determinar el coeficiente  $Y_{B31}$  utilizar la siguiente tabla 2.2

**Tabla 2.2** Coeficiente del espesor de pared. [ASME B31.3-2013]

Materiales	Valor del $Y_{B31}$					
	Temperatura °C (°F)					
	≤ 482 (≤ 900)	510 (950)	538 (1000)	566 (1050)	593 (1100)	≥ 621 (≥ 1150)
Aceros ferríticos	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7
Aceros austeníticos	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7
Otros metales dúctiles	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Aceros de fundición	0.4	---	---	---	---	---

- Por efecto de los esfuerzos longitudinales

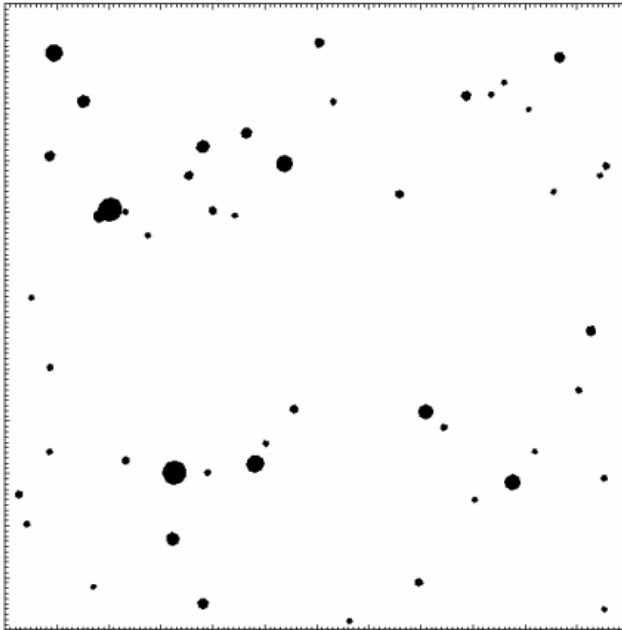
$$MAWP^L = \frac{4 \times S \times E \times (t_c - MA)}{D_0 - 4 \times Y_{B31} \times (t_c - MA)}$$

Donde,

$MAWP^L$ , máxima presión de trabajo admisible longitudinal

Por lo que el  $MAWP = \min[MAWP^c; MAWP^L]$

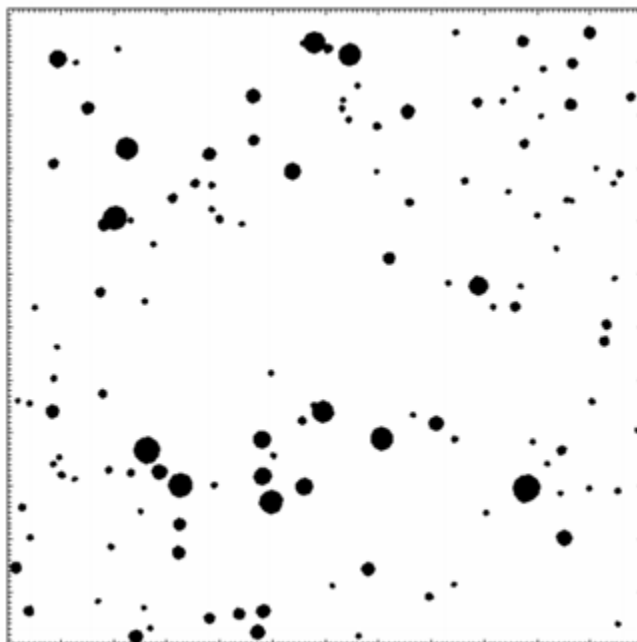
Paso 7, revisar el área dañada o las fotografías tomadas y comparar con los cuadros estandarizados de picadura. Seleccionar el cuadro que se acerque más a la superficie dañada. Ver figuras 2.10 a la 2.15



Nota: La escala de la figura es 150 mm por 150 mm

Fig. 2.10 Cuadro comparativo 1. [4]

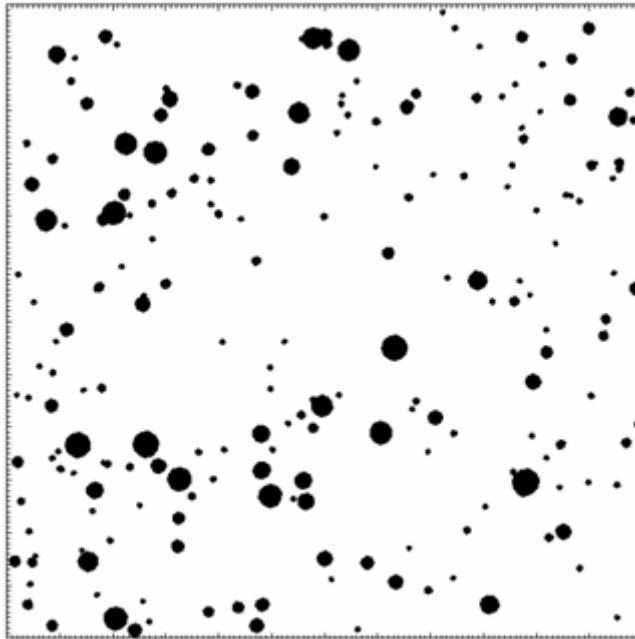
$R_{wt}$	$RSF$
0.8	0.97
0.6	0.95
0.4	0.92
0.2	0.89



Nota: La escala de la figura es 150 mm por 150 mm

Fig. 2.11 Cuadro comparativo 2. [4]

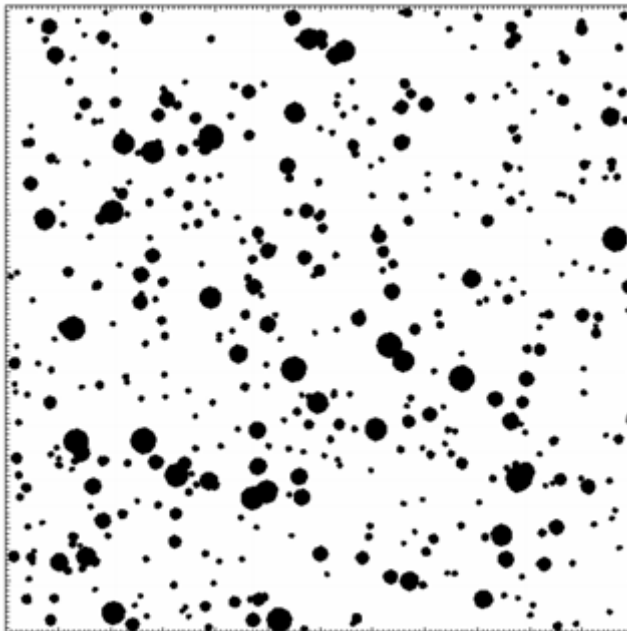
$R_{wt}$	$RSF$
0.8	0.97
0.6	0.95
0.4	0.92
0.2	0.89



Nota: La escala de la figura es 150 mm por 150 mm

$R_{wt}$	$RSF$
0.8	0.96
0.6	0.93
0.4	0.89
0.2	0.86

Fig. 2.12 Cuadro comparativo 3. [4]

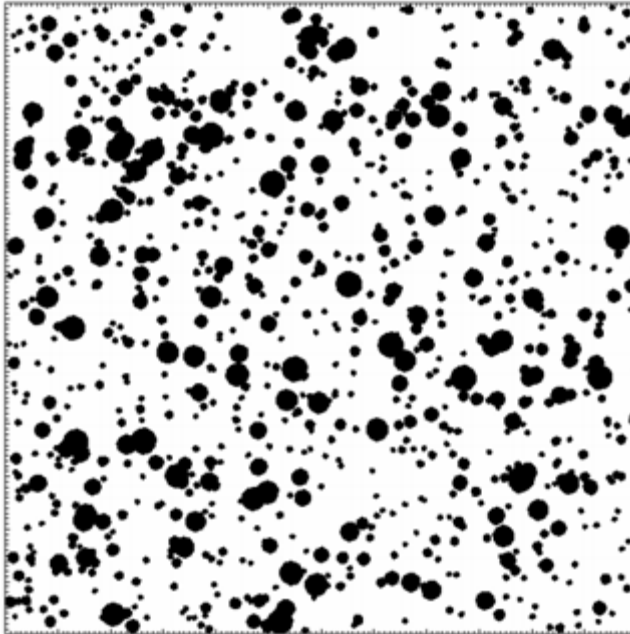


Nota: La escala de la figura es 150 mm por 150 mm

$R_{wt}$	$RSF$
0.8	0.95
0.6	0.90
0.4	0.85
0.2	0.79

Fig. 2.13 Cuadro comparativo 4. [4]

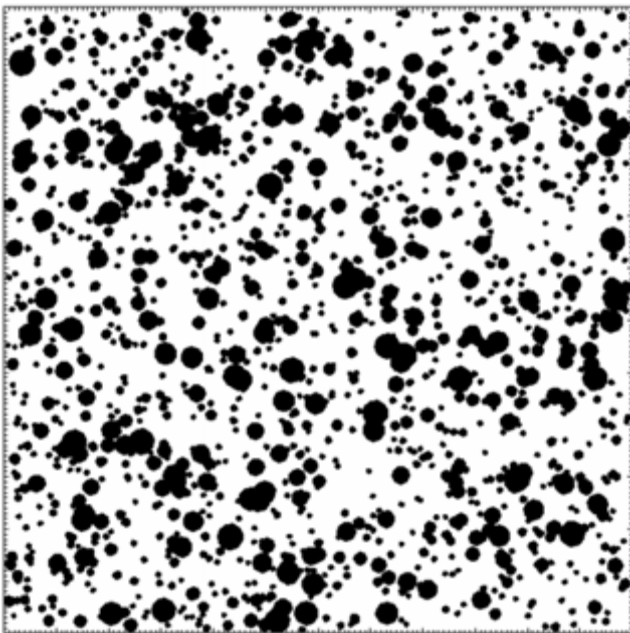




Nota: La escala de la figura es 150 mm por 150 mm

$R_{wt}$	$RSF$
0.8	0.93
0.6	0.85
0.4	0.78
0.2	0.70

Fig. 2.14 Cuadro comparativo 5



Nota: La escala de la figura es 150 mm por 150 mm

$R_{wt}$	$RSF$
0.8	0.91
0.6	0.82
0.4	0.73
0.2	0.64

Fig. 2.16 Cuadro comparativo 6. [4]

Paso 8, calcular el RSF con las tablas anexas del cuadro comparativo escogido en el paso anterior. Interpolarse el RSF con el  $R_{wt}$  calculado en el paso 5.

Paso 9, determinar la máxima presión admisible de trabajo considerando las siguientes condiciones. Seleccionar el  $RSF_a$  de la tabla 1.3

- Si el  $RSF \geq RSF_a$ , entonces el daño por picadura para el componente es aceptable y operar a la presión hallada en el paso 6.
- Si el  $RSF < RSF_a$ , se debe calcular la Presión Máxima de Trabajo Reducida

$$MAPW_r = \frac{RSF}{RSF_a} \times MAPW$$

- Si la presión de diseño u operación es menor a la presión máxima de trabajo reducida entonces el componente es rechazado.

## 2.6.2 NIVEL DE EVALUACIÓN 2

La metodología de evaluación del nivel 2 realiza el cálculo del factor del esfuerzo remanente para daños por picadura en un componente sujeto a cargas de presión y/o cargas externas. El procedimiento permite determinar la aceptabilidad de los esfuerzos debido a las cargas a que está sujeta la sección de la tubería en evaluación.

La evaluación se realiza de la siguiente manera:

Paso 1, verificar la documentación y códigos de fabricación. Inspeccionar el área de evaluación utilizando los métodos desarrollados en el párrafo 1.3.3 para obtener los datos requeridos de evaluación. Verificar las limitaciones del nivel de evaluación.

Paso 2, determinar el espesor de pared a ser usado durante la evaluación

$$t_c = t_{nom} - LOSS - FCA$$

Paso 3, determinar los ejemplos de par de picadura para la evaluación con los parámetros de diámetro, profundidad, la distancia entre sus centro y la orientación del par de picadura con referencia a la orientación longitudinal de la tubería. Ver tabla 2.3

**Tabla 2.3** Datos requeridos para la evaluación. [4]

Pit-Couple	$P_k$	$\theta_k$	$d_{i,k}$	$w_{i,k}$	$d_{j,k}$	$w_{j,k}$

Los datos de la tabla 2.3 son los siguientes

$P_k$ , distancia entre el par de picaduras

$\theta$ , ángulo entre el par de picaduras y el eje longitudinal de la tubería

$d_{i,k}, d_{j,k}$  diámetro de cada picadura del par de picadura medida

$w_{i,k}, w_{j,k}$  profundidad de cada picadura del par de picadura medida

Paso 4, determinar la profundidad promedio de cada par de picadura para luego obtener el promedio de la profundidad de picadura de la zona dañada

$$w_{avg,k} = \frac{(w_{i,k} + w_{j,k})}{2}$$

Donde,

$w_{avg,k}$ , profundidad promedio del par de picadura

$k$ , es la numeración del par de picadura

Paso 5, calcular los esfuerzos circunferenciales y longitudinales en la tubería

a. Esfuerzo circunferencial

$$\sigma_m^c = \frac{P_i}{E} \times \left( \frac{D_0}{2 \times (t_c - t_{sl} - MA)} - Y_{B31} \right)$$

b. Esfuerzo longitudinal

$$\sigma_m^L = \frac{P_i}{E} \times \left( \frac{D_0}{4 \times (t_c - t_{sl} - MA)} - Y_{B31} \right)$$

Donde,

$\sigma_m^c$ , esfuerzo circunferencial

$\sigma_m^L$ , esfuerzo longitudinal

$t_{sl}$ , espesor adicional por cargas externas

$P_i$ , presión interna

$E$ , eficiencia de junta soldada

$D_0$ , diámetro externo

- Para el cálculo del  $t_{sl}$  se tiene los siguientes casos según la estructura y lugar del daño

a. Sin anillo de refuerzo

$$t_{sl} = Z_t \left[ \frac{\pi \left( \frac{\text{seno}\Delta}{\Delta} - \cos\Delta \right)}{\Delta + \text{seno}\Delta \times \cos\Delta - 2 \frac{\text{seno}^2\Delta}{\Delta}} \right]$$

Donde,

$$Z_t = \frac{QL}{4SE\pi R_m^2} \left[ \frac{4A}{L} \left( 1 - \frac{1 - \frac{A}{L} + \frac{R_m^2 - H^2}{2AL}}{1 + \frac{4H}{3L}} \right) \right]$$

$$\Delta = \frac{\pi}{180} \left( \frac{5\theta}{12} + 30 \right)$$

$Q$ , reacción por el peso del componente

$L$ , longitud de la sección de la tubería

$R_m$ , radio significativo, corregido por el *LOSS* y *FCA*.

$A$ , área transversal

$H$ , diámetro interno

$\theta$ , ángulo de la tubería

b. Con anillos de refuerzo en la sección de la tubería

$$t_{sl} = Z_t$$

c. En mitad de la tubería

$$t_{sl} = \frac{QL}{4SE\pi R_m^2} \left[ \frac{1 + \frac{2(R_m^2 - H^2)}{L^2}}{1 + \frac{4H}{3L}} - \frac{4A}{L} \right]$$

d. Para tuberías verticales

$$t_{sl} = \frac{F}{2SE\pi R_m} + \frac{M}{SE\pi R_m^2}$$

Donde,

$F$ , fuerza axial en la sección

$M$ , momento flector en la sección

Paso 6, determinar el  $MAWP$  para el componente con el espesor de pared del Paso 2

a. Esfuerzos circunferenciales

$$MAWP_2^C = \frac{2 \times S \times E \times (t_c - MA)}{D_0 - 2Y_{B31} \times (t_c - MA)}$$

b. Esfuerzos longitudinales

$$MAWP_2^L = \frac{4 \times S \times E \times (t_c - t_{sl} - MA)}{D_0 - 4 \times Y_{B31} \times (t_c - t_{sl} - MA)}$$

- Por lo que debe el  $MAWP_2 = \min[MAWP_2^C; MAWP_2^L]$

Paso 7, según la localización y el tipo de picadura, calcular para cada par de picadura el factor de esfuerzo remanente

- Corrosión por picadura en una superficie, se determina de la siguiente manera

$$RSF_k = 1 - \frac{w_{avg,k}}{t_c} \times (1 - E_{avg,k})$$

Siendo las variables para el  $RSF_k$  las siguientes

$$E_{avg,k} = \min \left[ \frac{\vartheta_k}{\sqrt{\varphi_k}}, 1 \right]$$

$$\vartheta_k = \mu_{avg,k} \times \max[|\rho_{1,k}|, |\rho_{2,k}|, |\rho_{1,k} - \rho_{2,k}|]$$

$$\varphi_k = \left( (\cos^4 \theta_k + \text{seno}^2 2\theta_k)(\rho_{1,k})^2 - \frac{3(\text{seno}^2 2\theta_k)\rho_{1,k}\rho_{2,k}}{2} + (\text{seno}^4 \theta_k + \text{seno}^2 2\theta_k)(\rho_{2,k})^2 \right)$$



$$\rho_{1,k} = \frac{\sigma_m^C}{\mu_{avg,k}}$$

$$\rho_{2,k} = \frac{\sigma_m^L}{\mu_{avg,k}}$$

$$\mu_{avg,k} = \frac{P_k - d_{avg,k}}{P_k}$$

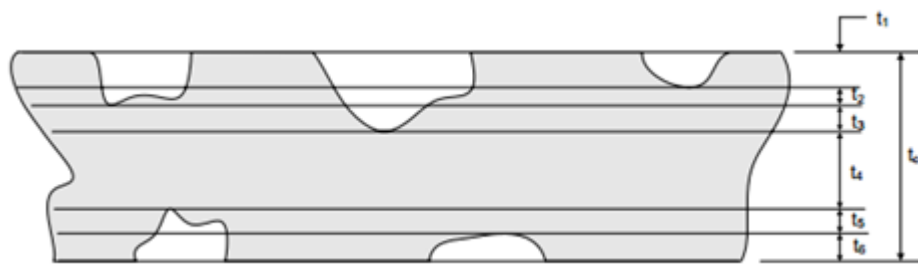
$$d_{avg,k} = \frac{d_{i,k} + d_{j,k}}{2}$$

Donde,

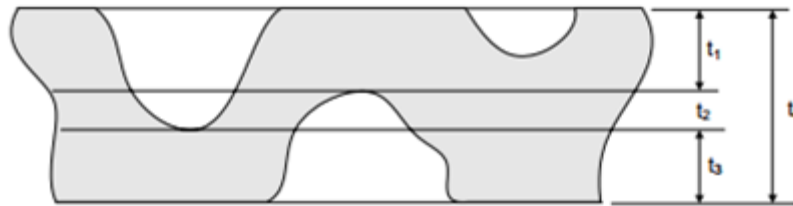
$d_{i,k}, d_{j,k}$ , diámetro de la picadura

$P_k$ , distancia entre par de picaduras

- Corrosión por picadura en ambas superficies de la tubería, en este análisis el  $E_{avg,k}$  es calculado para cada par de picadura usando la misma ecuación para picaduras en una sola superficie. El valor de  $E_{avg,k}$  es luego usado junto con el espesor de todas las capas definidas de los pares de picadura para hallar el valor del  $RSF_k$ . La selección del número de capas se basa en la profundidad de la picadura en ambas superficies, ver figura 2.16. Verificar que las picaduras no estén superpuestas, ver figura 2.17.



**Fig.2.16** Trazado de la capas en el espesor de pared



**Fig.2.17** Picaduras superpuestas

$$RSF_k = 1 - \sum_{L=1}^n \left( \frac{t_L}{t_c} \right) (1 - E_{avg,k})_L$$

Donde,

$l$ , número de capas

$t_L$ , espesor de la capa evaluada

Paso 8, repetir el paso anterior para cada par de picadura medido. Luego determinar el valor promedio del  $RSF_k$ , encontrados en el Paso 7 y designar el valor resultante como  $RSF_{pit}$  para la región de picadura.

$$RSF_{pit} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n RSF_k$$

Paso 9, según el tipo de picadura detectada evaluar los resultados

a. Picadura generalizada

Cuando la picadura se propaga sobre una región significativa del componente, entonces si el  $RSF_{pit} \geq RSF_a$ , el daño por picadura es aceptable para operaciones con el  $MAWP$  determinado en el paso 6. Si  $RSF_{pit} < RSF_a$ , la región de daño por picadura es aceptable para operar en  $MAWP_r$ .

## b. Picadura localizada

El área dañada es evaluada como una región equivalente de pérdida local de metal (ver figura 2.9) para el cual se debe realizar una evaluación adicional.

- El equivalente de espesor,  $t_{mm}$ , para el *LTA* puede ser establecido usando la siguiente ecuación.

$$t_{mm} = RSF_{pit} \times t_c$$

- Determinar el porcentaje del espesor remanente y la medida del parámetro de daño longitudinal

$$R_t = \frac{t_{mm} - FCA}{t_c}$$

$$\beta = \frac{1.285s}{\sqrt{Dt_c}}$$

Donde,

$D$ , diámetro interno

$s$ , largo de la región con picadura

$\beta$ , parámetro de daño longitudinal

- Verificar que las dimensiones del daño estén dentro de los criterios descritos a continuación.

$$R_t \geq 0.2$$

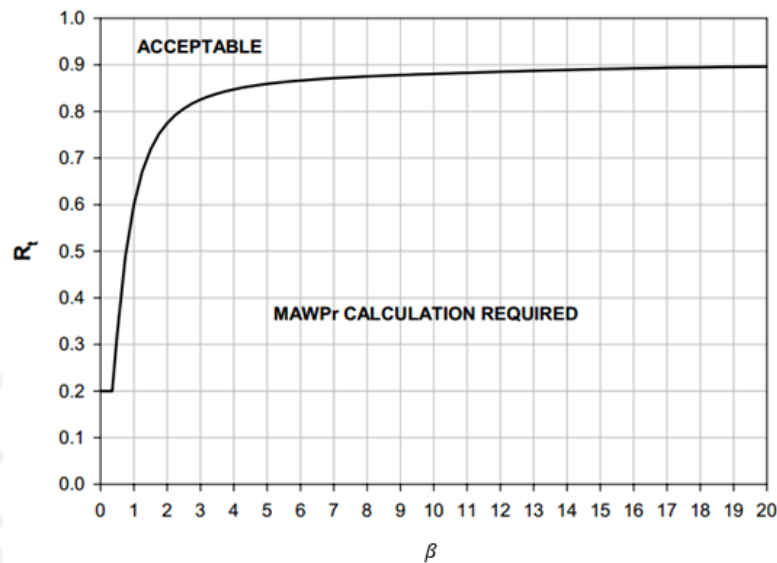
$$t_c - FCA \geq 2.5 \text{ mm}$$

$$L_{msd} \geq 1.8\sqrt{Dt_c}$$

Donde,

$L_{msd}$ , distancia a la mayor discontinuidad más cercana

- ❖ Si el siguiente requerimiento es satisfactorio proseguir con la evaluación sino el daño no es aceptable para la evaluación en proceso.
- Con la gráfica de la figura 2.18 se determina la aceptabilidad del daño con el  $\beta$  y  $R_t$ .



**Fig. 2.18** Gráfica para aceptación del daño por picadura. [4]

- ❖ Si el punto hallado en la gráfica está por encima de la curva entonces el daño es aceptado para trabajar a la  $MAWP$  determinada anteriormente. Si el punto está por debajo es necesario determinar el  $RSF_{LTA}$  con la siguiente ecuación y evaluar nuevamente el  $MAWP$ .

$$RSF_{LTA} = \frac{R_t}{1 - \frac{1}{M_t}(1 - R_t)}$$

$$M_t = (1.0010 - 0.014195\beta + 0.29090\beta^2 - 0.096420\beta^3 + 0.020890\beta^4 - 0.0030540\beta^5 + 2.9570(10^{-4})\beta^6 - 1.8462(10^{-5})\beta^7 + 7.1553(10^{-7})\beta^8 - 1.5631(10^{-8})\beta^9 + 1.4656(10^{-10})\beta^{10})$$

Donde,

$RSF_{LTA}$ , factor del esfuerzo remanente en un LTA

$M_t$ , factor folias

Entonces comprobar los siguientes criterios

- ❖ Si  $RSF_{LTA} \geq RSF_a$ , el componente con daño puede trabajar con el  $MAWP$  calculado.
- ❖ Si  $RSF_{LTA} < RSF_a$ , se debe calcular el  $MAWP_r$  al cual debe trabajar el componente.
- Por último evaluar la extensión circunferencial del daño con el siguiente procedimiento

- Determinar el parámetro de daño circunferencial ( $\beta_c$ )

$$\beta_c = \frac{1.285c}{\sqrt{Dt_c}}$$

Donde

$c$ , ancho de la región con picadura

$D$ , diámetro interior

- La región evaluada debe de cumplir con los siguientes criterios

$$\beta_c \leq 9$$

$$\frac{D}{t_c} \geq 20$$

$$0.7 \leq RSF_{LTA} \leq 1$$

$$0.7 \leq E_c \leq 1$$

$$0.7 \leq E_L \leq 1$$

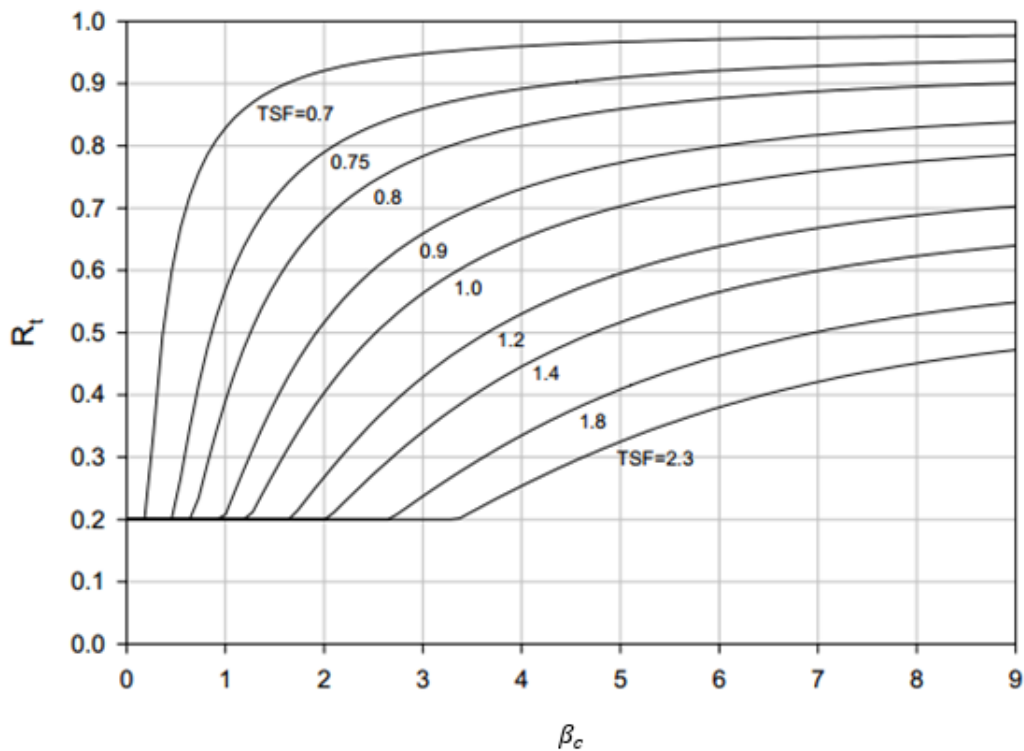
Donde,

$E_c, E_L$ , eficiencia de soldadura circunferencial y longitudinal

- Determinar el factor del esfuerzo a la tracción ( $TSF$ )

$$TSF = \frac{E_c}{2 \times RSF_{LTA}} \left( 1 + \frac{\sqrt{4 - 3E_L^2}}{E_L} \right)$$

- Por último evaluar el  $TSF$  con la gráfica de la figura 2.19, ingresando los datos del  $\beta_c$  y  $R_t$ . El punto hallado debe cumplir que el  $TSF_{graf} < TSF$ .



**Fig. 2.19** Gráfico de la Máxima extensión circunferencial admisible. [4]

- c. Picadura generalizada con una región con pérdida localizada de metal y picadura confinada dentro de un área local delgada.

Si se encuentra una región de pérdida de metal localizada en un área de picadura generalizada, el factor del esfuerzo remanente se determina con la siguiente ecuación.



$$RSF_{comb} = RSF_{pit} \times RSF_{lta}$$

Cuando el  $RSF_{comb} \geq RSF_a$ , el daño por picadura es aceptable para operar con el  $MAWP$  determinado en el paso 6. Si el  $RSF_{pit} \geq RSF_a$ , luego la región de daño por picadura es aceptable para operar en  $MAWP_r$ .

Paso 10, por último revisar las limitaciones en las dimensiones del daño por picadura

- Diámetro de Picadura

Si la siguiente ecuación no es satisfactoria para una picadura individual, luego la picadura debe ser evaluada como un área local delgada. El tamaño del área local delgada es definido por el diámetro de picadura y el porcentaje del espesor remanente. Esta revisión es requerida para picaduras alargadas y poder asegurar que no ocurra una falla en el componente por ligamento local en la base de la picadura.

$$d \leq Q\sqrt{Dt_c}$$

El valor de Q se determina con la siguiente ecuación que está en función del porcentaje del espesor remanente límite,  $R_{td}$ , para cada picadura evaluada.

$$Q = 1.123 \left[ \left( \frac{1 - R_{td}}{1 - \frac{R_{td}}{RSF_a}} \right)^2 - 1 \right]^{0.5} \quad \text{para } R_{td} < RSF_a$$

$$Q = 50 \quad \text{para } R_{td} \geq RSF_a$$

Siendo,

$$R_{td} = \frac{t_c + FCA - w_{i,k}}{t_c}$$

- Profundidad de la picadura

El siguiente límite está en razón al porcentaje del espesor remanente para prevenir una falla local caracterizada como daño por fuga.

$$R_t \geq 0.2$$

## EVALUACIÓN DE LOS ESFUERZOS

El siguiente procedimiento determina la aceptabilidad de los esfuerzos para tuberías con daño por picadura sujetos a presión y que contengan cargas suplementarias

### a. Evaluación para picadura generalizada

El siguiente procedimiento evaluará el esfuerzo de flexión o cizalladura resultante de la presión y cargas suplementarias.

Paso 1, definir los parámetros siguientes:  $D$ ,  $D_0$ ,  $FCA$ ,  $\tau_{nom}$  y  $LOSS$ .

Paso 2, determinar el espesor de pared para ser usado durante la evaluación

$$t_c = t_{nom} - LOSS - FCA$$

Paso 3, usar el  $RSF$ ,  $RSF_a$  y el  $MAWP_r$  calculado en el paso 9 de la evaluación nivel 2 y determinar las cargas suplementarias.

Paso 4, calcular el espesor equivalente de la tubería con el daño por picadura.

$$t_{eq} = B \times t_c$$

$$B = \min \left[ \frac{RSF_t}{RSF_a}, 1.0 \right]$$

Donde,

$t_{eq}$ , espesor equivalente

$RSF_t$ , factor del esfuerzo remanente según el tipo de picadura evaluado

Paso 5, para las cargas suplementarias determinadas en el Paso 3, calcular la componente de la resultante del momento flector y torsión. Considerar las influenciadas del efecto de la temperatura en las cargas.

Paso 6, calcular el esfuerzo máximo circunferencial.

$$\sigma_{cm} = \frac{MAWP_r}{RSF} \left( \frac{D}{D_0 - D} + 0.6 \right)$$

Paso 7, calcular los máximos esfuerzos longitudinales y de cizalladura. Las propiedades de la sección en evaluación para el cálculo son provistas en la siguiente tabla 2.4.

**Tabla 2.4** Propiedades de la sección con daño. [4]

Daño por picadura en la superficie interna	Daño por picadura en la superficie externa
$D_f = D_o - 2t_{eq}$	$D_f = D + 2t_{eq}$
$I_{\bar{x}} = \frac{\pi}{64}(D_o^4 - D_f^4)$	$I_{\bar{x}} = \frac{\pi}{64}(D_f^4 - D^4)$
$A_m = \frac{\pi}{4}(D_o^2 - D_f^2)$	$A_m = \frac{\pi}{4}(D_f^2 - D^2)$
$A_t = \frac{\pi}{16}(D_o + D_f)^2$	$A_t = \frac{\pi}{16}(D_f + D)^2$
$a = \frac{D_o}{2}$	$a = \frac{D_f}{2}$
$A_a = \frac{\pi}{4}D_f^2$	$A_a = \frac{\pi}{4}D^2$

\* $D_f$ , diámetro modificado de la tubería contando el daño por picadura

$$\sigma_{lm} = \frac{1}{E_c} \left[ \frac{A_a}{A_m} (MAWP_r) + \frac{F}{A_m} \pm \frac{Ma}{I_{\bar{x}}} \right]$$

$$\tau = \frac{M_T}{2A_t t_{eq}} + \frac{V}{A_m}$$

Donde

$F$ , fuerza axial

$Ma$ , momento flector

$M_t$ , momento torsor

$V$ , fuerza de cizalladura

$\sigma_{lm}$ , esfuerzo máximo longitudinal

$\tau$ , esfuerzo máximo de cizalladura

Paso 8, calcular el esfuerzo equivalente,  $\sigma_e$

$$\sigma_e = [\sigma_{cm}^2 - \sigma_{cm}\sigma_{lm} + \sigma_{lm}^2 + 3\tau^2]^{0.5}$$

Paso 9, la relación siguiente debe ser satisfecha para cualquier esfuerzo sea por tracción o compresión.

$$\sigma_e \leq H_f \left( \frac{S_a}{RSF_a} \right)$$

$$H_f = 1, \quad \text{para cargas suplementarias}$$

$$H_f = 1.67, \quad \text{para cargas suplementarias con carga térmicas}$$

Donde,

$H_f$ , factor por el tipo de carga

$S_a$ , esfuerzo admisible calculado en el diseño original, en caso que no se tenga calcular el esfuerzo con algún código para el diseño de sistemas de tubería.

- Si el criterio del esfuerzo equivalente del Paso 9 no se satisface, el *MAWP* y/o las cargas suplementarias determinadas en Paso 3 deben ser reducidas, y la evaluación debe ser repetida.
- b. Para los demás tipos de picadura

Si la falla es categorizada como picadura localizada, un *LTA* localizado en una región de picaduras dispersas, o picadura confinada dentro una región *LTA*, el procedimiento de evaluación es el siguiente.

Paso 1, subdividir en forma longitudinal el área que presenta las picaduras tomando diferentes profundidades considerando la máxima para cada tramo de longitud como se muestra en la figura 2.20.

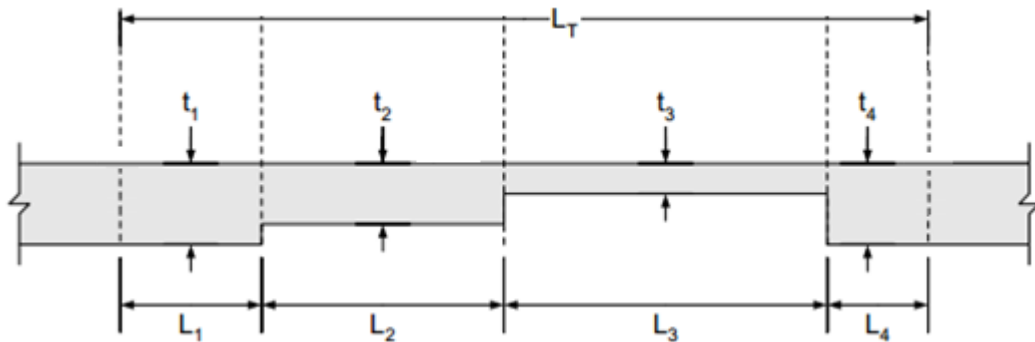


Fig. 2.20 Representación de la división longitudinal. [4]

Paso 2, determinar la presión externa admisible para cada espesor definido,

$t = (t_i - FCA)$ , con cada tramo longitudinal trazado de la siguiente manera.

- Calcular el esfuerzo por pandeo elástico,  $F_{he}$

$$F_{he} = \frac{1.6C_hEt}{D_0}$$

$$M_x = \frac{L_i}{\sqrt{R_o t}}$$

Siendo

$$C_h = 0.55 \left( \frac{t}{D_0} \right) \quad \text{para } M_x \geq 2 \left( \frac{D_0}{t} \right)^{0.94}$$

$$C_h = 1.12M_x^{-1.058} \quad \text{para } 13 < M_x < 2 \left( \frac{D_0}{t} \right)^{0.94}$$

$$C_h = \frac{0.92}{M_x - 0.579} \quad \text{para } 1.5 < M_x < 13$$

$$C_h = 1 \quad \text{para } M_x \leq 1.5$$



- Calcular el esfuerzo de pandeo inelástico,  $F_{ic}$

$$F_{ic} = S_y \quad \text{para } \frac{F_{he}}{S_y} \geq 2.439$$

$$F_{ic} = 0.7S_y \left( \frac{F_{he}}{S_y} \right)^{0.4} \quad \text{para } 0.552 < \frac{F_{he}}{S_y} < 2.439$$

$$F_{ic} = F_{he} \quad \text{para } \frac{F_{he}}{S_y} < 0.552$$

Donde,

$S_y$ , esfuerzo admisible a la temperatura de diseño

- Calcular el valor del factor de servicio,  $FS$

$$FS = 2 \quad \text{para } F_{ic} \leq 0.55S_y$$

$$FS = 2.407 - 0.741 \left( \frac{F_{ic}}{S_y} \right) \quad \text{para } 0.55S_y < F_{ic} < S_y$$

$$FS = 1.667 \quad \text{para } F_{ic} \geq S_y$$

- Calcular el valor de la Presión externa admisible,  $P_a$

$$P_{a,i} = 2F_{ha} \left( \frac{t}{D_0} \right)$$

Siendo,

$$F_{ha} = \frac{F_{ic}}{FS}$$

Paso 3, determinar la presión admisible de la actual tubería

$$MAWP_{r,e} = \frac{L_T}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{P_{a,i}}}$$

- ❖ Por lo que si el  $MAWP_{r,e} \geq MAWP$ , el componente es aceptado para continuar en operación. Pero si el  $MAWP_{r,e} < MAWP$ , el componente es aceptado para trabajar al  $MAWP_{r,e}$  calculado.

## 2.7 EVALUACIÓN DE VIDA REMANENTE

En corrosión por picaduras, estas pueden crecer en tamaño, densidad y tamaño de la región afectada, para lo cual la estimación adecuada de la tasa de propagación debe ser establecida para cada modelo.

- a. Incremento del tamaño de la picadura, un estimado en cuanto a cómo las características del diámetro y profundidad de la picadura incrementan con el tiempo debe ser hecha. Para un par de picadura dado, en el incremento del diámetro y/o profundidad, el *RSF* decrece.
- b. Incremento en la densidad de la picadura, en adición a las picaduras existentes que siguen creciendo, nuevas picaduras pueden formarse, estas incrementan la densidad de picaduras en la superficie por lo que decrece la distancia de separación entre las picaduras y el *RSF*.
- c. Incremento en Tamaño de la Región, si la picadura es localizada, las operaciones futuras pueden ser afectadas en un incremento del área dañada. Este incremento de la región localizada con picaduras tiene similar efectos como el incremento de un *LTA*.

- ❖ Si el estimado de la tasa de propagación no puede ser calculada, métodos de remediación puede ser usado para minimizar los futuros daños por picadura.

El siguiente procedimiento debe ser usado para determinar la vida remanente de un componente con picaduras usando el *MAWP* resultante de la evaluación del nivel usado.

Paso 1, determinar la pérdida de metal uniforme, *LOSS* en la región con picadura.

Paso 2, usando el procedimiento descrito en Nivel 1 y 2, determinar el *MAWP* para una serie de incrementos en el tiempo usando la tasa de propagación de picadura aplicada para la profundidad y diámetro de la picadura.

Paso 3, el tamaño efectivo de picaduras y la tasa de cambio en la característica de las dimensiones son determinadas con lo siguiente:

$$w_f = w_c + PPR_{prof} \times tiempo$$

$$d_f = d_c + PPR_{diam} \times tiempo$$

Donde,

$w_f$ , futura profundidad de picadura

$w_c$ , actual profundidad de picadura

$PPR_{prof}$ , tasa estima del cambio de la característica de profundidad

$PPR_{diam}$ , tasa estima del cambio de la característica de diámetro

$d_f$ , futuro diámetro de picadura

$d_c$ , actual diámetro de picadura

Paso 5, si la región de picadura es localizada, una estimación del incremento de la futura región afectada debe ser hecho e incluido en la estimación del *MAWP* en el paso 2. Si hay una interacción entre picadura y *LTA*, luego esta interacción puede también ser considerado en un *MAWP* frente cálculo de tiempo.

Paso 6, determinar la vida remanente con un gráfico del *MAWP* frente al tiempo. El tiempo en el cual la curva *MAWP* intersecta el *MAWP* de diseño para un componente es definido como la vida remanente del componente. El equipo *MAWP* es tomado como el más pequeño valor del *MAWP* para componentes individuales. A su vez verificar que los criterios definidos por cada nivel de evaluación se cumplan ya que son afectados por el incremento en el tamaño del daño por picadura.

### 2.7.1 APLICACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA VIDA REMANENTE

Con la vida remanente calculada se puede llegar a las siguientes conclusiones:

- a) Continuar en operación, cuando la máxima presión admisible de trabajo determinada en el nivel evaluado es mayor a la presión en servicio, el segmento de tubería pueda seguir operando por el periodo determinado en que esta continúe siendo mayor a la presión de servicio, la cual se visualiza en la gráfica hallada en el resultado de la vida remanente.
- b) Programar una nueva inspección, al determinar la vida remanente y se obtenga que el daño no cumple con los requisitos de fisonomía por el incremento de la picadura en el tiempo, programar una nueva evaluación a mitad del periodo hallado para constatar el incremento del daño por picadura y tomar las medidas necesarias.
- c) Remediación o reemplazo del componente, al verificar que el componente ya no cumple o tiene un periodo corto de vida con respecto a los requisito de presión un cambio o remediación debe ser realizada. En caso de remediación del componente se recomienda utilizar normas que contengan procedimientos adecuados de remediación a tuberías con daño por corrosión por picadura. En el otro caso programar el reemplazo del segmento según la vida remanente estimada del componente afectado.

## CAPÍTULO 3

### 3. ENSAYOS Y RESULTADOS

#### 3.1 PROBETA DE ENASAYO

##### 3.1.1 DESCRIPCIÓN DE LA PROBETA

La probeta fue diseñada para simular el mecanismo de daño causado por la corrosión por picaduras y así poder realizar la evaluación de la Aptitud para el Servicio de una tubería, sujeta bajo presión, en presencia de corrosión por picaduras. Como se muestra en la figura 3.1 la probeta es una tubería A53 Grado B schedule 40 y con dos placas de acero A36 que tienen las siguientes características

Dimensiones:

- I. Tubería:
  - Longitud: 10000 mm
  - Diámetro: 280 mm
  - Espesor: 9.87 mm
  
- II. Placa cuadra superior e inferior
  - Longitud: 500 mm
  - Espesor: 38 mm

Propiedades:

- I. Esfuerzo admisible para la temperatura de diseño
  - $S = 17500 \text{ psi}$  a  $315^\circ\text{C}$
- II. Factor de soldadura
  - Circunferencial:  $E_c = 1$
  - Longitudinal:  $E_L = 1$



Fig. 3.1 Tubería de Evaluación

### 3.1.2 PREPARACIÓN DE LA PROBETA

La preparación de la probeta consta en simular en la superficie de la tubería el daño de corrosión por picadura. Se toma un patrón de dispersión y profundidad de picadura para luego ser taladrado y obtener el daño deseado. El daño producido será evaluado por la metodología desarrollada en el capítulo anterior. A su vez se realizará una prueba hidrostática, la cual ayude a validar la aplicación de la metodología.





Fig.3.2 Preparación de la tubería para realizar daño



Fig.3.3 Taladrado de picaduras en la superficie de la tubería

## 3.2 APLICACIÓN Y RESULTADOS DE LA METODOLOGÍA

### 3.2.1 NIVEL DE EVALUACIÓN 1

Para la probeta del ensayo se procederá a evaluar con el Nivel de Evaluación 1 el área de simulación de picadura generalizada, al cual mediante la metodología desarrollada en el capítulo anterior se determinara la nueva *MAWP*, para verificar que el componente es apto y pueda continuar en servicio. A su vez se determinara la vida remanente del componente.

Paso 1, los datos de diseño para la evaluación son los siguientes

- Material: A53 Grado B
- Condiciones de diseño: 600 psi, 315 °C
- Diámetro externo ( $D_0$ ): 280 mm
- Espesor de pared ( $t_{nom}$ ): 9.8 mm
- Perdida de metal uniforme (*LOSS*): 0 mm
- Futura corrosión admisible (*FCA*): 1 mm
- Eficiencia de soldadura (*E*): 1
- Esfuerzo admisible (*S*): 17500 psi

Paso 2, determinar el espesor de pared de evaluación

$$t_c = t_{nom} - LOSS - FCA$$

$$t_c = 9.8 - 0 - 1$$

$$t_c = 8.8 \text{ mm}$$

Paso 3, inspección del área con el daño por picadura. Fotografías del registro del estado actual del componente como se ve en la figura 3.5.



**Fig.3.5** Probeta con picaduras, área dañada de 15 cm × 15 cm

Paso 4, obtener la Máxima Profundidad de Picadura ( $w_{m\acute{a}x}$ ),

$$w_{m\acute{a}x} = 7.5 \text{ mm}$$

Paso 5, determinar el espesor de pared remanente ( $R_{wt}$ )

$$R_{wt} = \frac{t_c + FCA - w_{m\acute{a}x}}{t_c}$$

$$R_{wt} = \frac{8.8 + 1 - 7.5}{8.8}$$

$$R_{wt} = 0.26 \text{ mm}$$

Cumpliendo con que el  $R_{wt} > 0.2$ , entonces se cumple el criterio solicitado para la evaluación del Nivel 1.

Paso 6, determinar la máxima presión admisible de trabajo ( $MAWP$ )

El coeficiente  $Y_{B31}$  es 0.4 y el  $MA$  es 0 debido a que no se cuenta con rosca en el componente evaluado

**Tabla 3.1** Coeficiente del espesor de pared

Materiales	Valor del $Y_{B31}$					
	Temperatura °C (°F)					
	≤ 482 (< 900)	510 (950)	538 (1000)	566 (1050)	593 (1100)	≥ 621 (≥ 1150)
Aceros ferríticos	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7
Aceros austeníticos	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7
Otros metales dúctiles	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Aceros de fundición	0.4	---	---	---	---	---

a. Por efecto de los esfuerzos circunferenciales

$$MAWP^c = \frac{2 \times S \times E \times (t_c - MA)}{D_0 - 2Y_{B31} \times (t_c - MA)}$$

$$MAWP^c = \frac{2 \times 17500 \times 1 \times (8.8 - 0)}{280 - 2 \times 0.4 \times (8.8 - 0)}$$

$$MAWP^c = 1128.37 \text{ psi}$$

b. Esfuerzos longitudinales

$$MAWP^L = \frac{4 \times S \times E \times (t_c - MA)}{D_0 - 4 \times Y_{B31} \times (t_c - MA)}$$

$$MAWP^L = \frac{4 \times 17500 \times 1 \times (8.8 - 0)}{280 - 4 \times 0.4 \times (8.8 - 0)}$$

$$MAWP^L = \frac{4 \times 17500 \times 1 \times (8.8 - 0)}{280 - 4 \times 0.4 \times (8.8 - 0)}$$

$$MAWP^L = 2316.48 \text{ psi}$$

Por lo que el  $MAWP = \min[MAWP^c; MAWP^L] = 1128.37 \text{ psi}$

Paso 7, seleccionar el cuadro comparativo que se acerque más a la superficie dañada.  
En este caso se tomará el cuadro comparativo 4. (Ver figura 2.13)

Paso 8, calcular el RSF interpolando con la tabla que se encuentra anexa al cuadro comparativo

$$RSF = (RSF_s - RSF_i) \left( \frac{R_{wt} - R_{wt,s}}{R_{wt,s} - R_{wt,i}} \right) + RSF_i$$

$$RSF = (0.85 - 0.79) \left( \frac{0.26 - 0.4}{0.4 - 0.2} \right) + 0.79 = 0.81$$

Paso 9, hallar la máxima presión admisible de trabajo con las siguientes condiciones.

Teniendo en cuenta que el  $RSF_a = 0.9$

- Si el  $RSF \geq RSF_a$ , entonces  $MAPW = 1122.6 \text{ psi}$

$$0.81 \geq 0.9, \text{ no cumple}$$

- Si el  $RSF < RSF_a$ , hallar la Presión Máxima de Trabajo Reducida ( $MAPW_r$ )

$$0.81 < 0.9, \text{ cumple}$$

Entonces

$$MAPW_r = \frac{RSF}{RSF_a} \times MAPW$$

$$MAPW_r = \frac{0.81}{0.9} \times 1128.34$$

$$MAPW_r = 1013.54 \text{ psi}$$

Se tiene como presión de diseño 600 psi

$$MAPW_r = 1013.54 > 600 \text{ psi}$$

**Se concluye que el componente puede continuar trabajando con la presión de diseño.**

### 3.2.1.1 VIDA REMANENTE

Para el cálculo de la vida remanente se debe cumplir con los siguientes criterios del nivel de evaluación 1

- El  $MAPW$  o  $MAPW_r >$  Presión de diseño
- EL  $R_{wt} > 0.2$

Se determina la futura profundidad de picadura para diferentes tiempos, la cual tiene como resultado una nueva  $MAPW$ , con la que se evalúa y verifica la aceptabilidad de la tubería.

$$w_f = w_c + PPR_{prof} \times tiempo$$

Con la siguiente tabla se obtiene algunos casos para determinar la velocidad de corrosión, en caso contrario revisar la Norma *Risk-Based Inspection Technology API 581* donde según al ambiente al que se encuentra expuesto la tubería se determinará la velocidad de la corrosión.



**Tabla 3.2** Velocidad de corrosión según el tipo de ambiente. [11]

Tipos de Ambiente	Velocidad de corrosión (mm por año)
Ambiente marino	0.504
Ambientes industriales	0.127 - 0.254
Ambientes con precipitaciones moderadas	0.0254 – 0.0762
Ambientes secos	< 0.0254

Seleccionamos para este caso un ambiente industrial

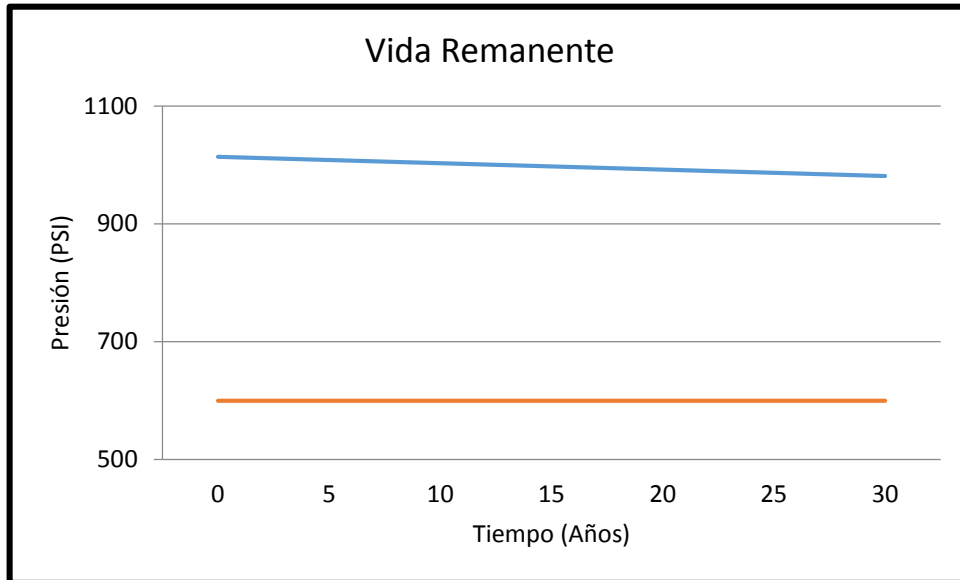
$$PPR_{prof} = 0.0254 \text{ mm/año}$$

Luego tabular según la futura profundidad de picadura y determinar la *MAPW* para cada caso

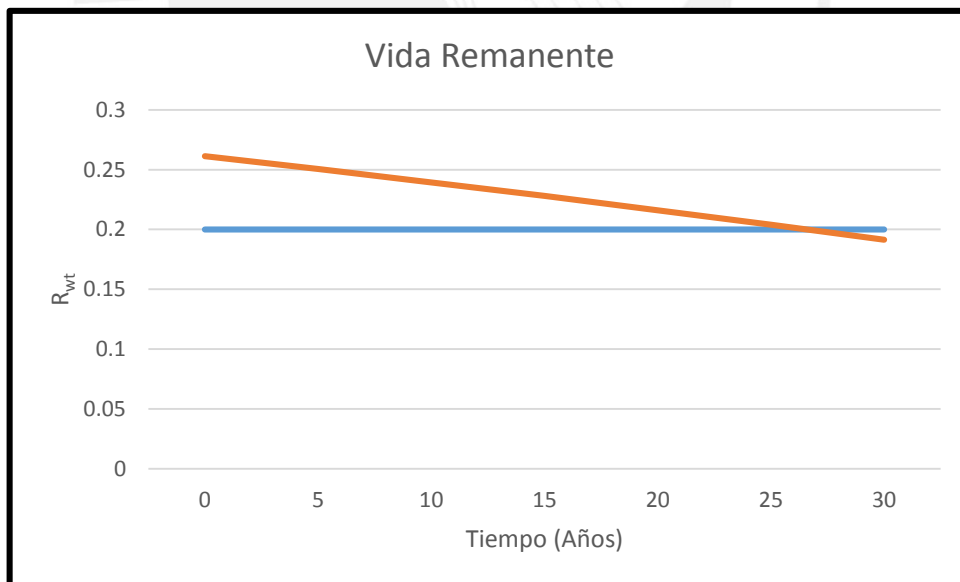
**Tabla 3.3** Tabulación para determinar  $w_f$  y el *MAPW*

Máxima profundidad actual	$w_c$	mm	7.5	7.5	7.627	7.754	7.881	8.008	8.135
Máxima presión de trabajo reducida	<i>MAPW</i>	Psi	1014	1008	1003	997	992	986	981
Espesor remanente	$R_{wt}$		0.26	0.25	0.23	0.22	0.20	0.19	0.17
Futura máxima profundidad de picadura	$w_f$	mm	7.5	7.627	7.754	7.881	8.008	8.135	8.262
Tiempo transcurrido desde la evaluación	T	Años	0	5	10	15	20	25	30

De la anterior tabla podemos obtener las siguientes gráficas:



**Fig. 3.6** Gráfica de la vida remanente de la presión vs tiempo



**Fig. 3.7** Gráfica de vida remanente del  $R_{wt}$  vs tiempo

Con la siguiente evaluación podemos determinar que el componente podrá trabajar con la presión de diseño establecida ya que esta es inferior a la presión máxima de trabajo admisible reducida hallada. Pero el espesor al estar reduciéndose se debe evaluar nuevamente a mitad del periodo de 25 años para comprobar el incremento en la profundidad de las picaduras medidas y así determinar si el cambio de la fisonomía era correcto o calcular nuevamente la vida remanente del componente.

### 3.2.2 NIVEL DE EVALUACIÓN 2

Se procede a analizar con la evaluación nivel 2 para el tipo de picadura localizada evaluada como un área local, como se muestra en la figura 3.8



**Figura 3.8** Pérdida de área localizada equivalente

Paso 1, se utiliza las mismas condiciones tomadas en el paso 1 del nivel de evaluación 1 de este capítulo

Paso 2, determinar el espesor de pared a ser usado durante la evaluación

$$t_c = t_{nom} - LOSS - FCA$$

$$t_c = 9.8 - 0 - 1$$

$$t_c = 8.8 \text{ mm}$$

Paso 3, determinar los ejemplos de par de picadura para la evaluación

**Tabla 3.4** Datos requeridos para la evaluación.

N° Par de picadura	$P_k$	$\theta_k$	$d_{i,k}$	$w_{i,k}$	$d_{j,k}$	$w_{j,k}$
1	6	10	9	6	8	5
2	7	10	11	6	13	7
3	8	30	4	8	7	7
4	6	30	9	7	13	6
5	7	20	9	6	14	5
6	3	20	6	8	7	7
7	9	0	7	6	6	4
8	9	30	16	7	17	7
9	8	20	15	6	10	5
10	4	10	9	5	11	7

Paso 4, determinar la profundidad promedio de cada par de picadura para obtener el promedio de la profundidad de las picaduras medidas. Ver tabla 2.4

$$w_{avg,1} = \frac{(w_{i,1} + w_{j,1})}{2} = \frac{6 + 5}{2} = 5,5 \text{ mm}$$

Paso 5, calcular los esfuerzos circunferenciales y longitudinales en la tubería

a. Esfuerzo circunferencial

$$\sigma_m^c = \frac{P_i}{E} \times \left( \frac{D_0}{2 \times (t_c - t_{sl} - MA)} - Y_{B31} \right)$$

$$\sigma_m^c = \frac{600}{1} \left( \frac{280}{2 \times (8.8 - 0 - 0)} - 0.4 \right)$$

$$\sigma_m^c = 9305.45 \text{ Psi}$$

b. Esfuerzo longitudinal

$$\sigma_m^L = \frac{P_i}{E} \times \left( \frac{D_0}{4 \times (t_c - t_{sl} - MA)} - Y_{B31} \right)$$

$$\sigma_m^L = \frac{600}{1} \left( \frac{280}{4 \times (8.8 - 0 - 0)} - 0.4 \right)$$

$$\sigma_m^L = 4532.73 \text{ Psi}$$

Paso 6, determinar el  $MAWP$  para el componente

a. Esfuerzos circunferenciales

$$MAWP_2^C = \frac{2 \times S \times E \times (t_c - MA)}{D_0 - 2Y_{B31} \times (t_c - MA)}$$

$$MAWP_2^C = \frac{2 \times 17500 \times 1 \times (8.8 - 0)}{280 - 2 \times 0.4 \times (8.8 - 0)} = 1128.37 \text{ Psi}$$

b. Esfuerzos longitudinales

$$MAWP_2^L = \frac{4 \times S \times E \times (t_c - t_{sl} - MA)}{D_0 - 4 \times Y_{B31} \times (t_c - t_{sl} - MA)}$$

$$MAWP_2^L = \frac{4 \times 17500 \times 1 \times (8.8 - 0 - 0)}{280 - 4 \times 0.4 \times (8.8 - 0 - 0)} = 2316.49 \text{ Psi}$$

- Por lo que el  $MAWP_2 = \min[MAWP_2^C; MAWP_2^L] = 1128.37 \text{ Psi}$

Paso 7, calcular para cada par de picadura el factor de esfuerzo remanente

- Corrosión por picadura en una superficie,

$$RSF_k = 1 - \frac{W_{avg,k}}{t_c} \times (1 - E_{avg,k})$$

**Tabla 3.5** Datos obtenidos para el RSF de cada par de picadura

N° Par de picadura	$w_{avg,k}$	$d_{avg,k}$	$\mu_{avg,k}$	$\rho_1$	$\rho_2$	$\gamma$	$\vartheta$	$E_{avg}$	$RSF_k$
1	5,50	8,50	-0,417	-22333,09	-10878,55	468194482	4532,73	0,209	0,506
2	6,50	12,00	-0,714	-13027,64	-6345,82	159316178	4532,73	0,359	0,527
3	7,50	5,50	0,313	29777,45	14504,73	242732685	9305,45	0,597	0,657
4	6,50	10,50	-0,750	-12407,27	-6043,64	42141091	4532,73	0,698	0,777
5	5,50	11,50	-0,643	-14475,15	-7050,91	99280859	4532,73	0,455	0,659
6	7,50	6,50	-1,167	-7976,10	-3885,19	30144001	4532,73	0,826	0,851
7	5,00	6,50	-0,625	-14888,73	-7252,36	221674200	4532,73	0,304	0,605
8	7,00	16,50	-0,833	-11166,55	-5439,27	34134284	4532,73	0,776	0,822
9	5,50	12,50	-0,563	-16543,03	-8058,18	129672959	4532,73	0,398	0,624
10	6,00	10,00	-1,500	-6203,64	-3021,82	38485104	4532,73	0,731	0,82

Paso 8, con lo encontrado en el Paso 7 designar el valor resultante  $RSF_{pit}$  para la región de picadura.

$$RSF_{pit} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n RSF_k = 0.68$$

Paso 9, evaluar los resultados basados para el tipo de picadura de la siguiente manera

- El espesor,  $\tau_{mm}$ , para el *LTA* equivalente es

$$t_{mm} = RSF_{pit} \times t_c = 0.69 \times 8.8 = 6.02 \text{ mm}$$

- Determinar el porcentaje del espesor remanente y la medida del parámetro de daño longitudinal

$$R_t = \frac{t_{mm} - FCA}{t_c} = \frac{6.04 - 1}{8.8} = 0.57$$

$$\beta = \frac{1.285s}{\sqrt{Dt_c}} = \frac{1.285 \times 127}{\sqrt{260.4 \times 8.8}} = 3.41$$



- Verificar los siguientes criterios.

$$R_t = 0.57 \geq 0.2, \text{ si cumple}$$

$$t_c - FCA = 7.8 \text{ mm} \geq 2.5 \text{ mm}, \text{ si cumple}$$

$$L_{msd} = 100 \text{ mm} \geq 1.8\sqrt{Dt_c} = 86.76 \text{ mm}, \text{ si cumple}$$

- De la figura 2.18 se determina con  $\beta$  y  $R_t$  que es necesario calcular el  $MAWP_r$ , para lo que recalculamos el  $RSF$

$$\begin{aligned} M_t &= (1.0010 - 0.014195\beta + 0.29090\beta^2 - 0.096420\beta^3 + 0.020890\beta^4 \\ &\quad - 0.0030540\beta^5 + 2.9570(10^{-4})\beta^6 - 1.8462(10^{-5})\beta^7 \\ &\quad + 7.1553(10^{-7})\beta^8 - 1.5631(10^{-8})\beta^9 + 1.4656(10^{-10})\beta^{10}) \\ &= 2.31 \end{aligned}$$

$$RSF_{LTA} = \frac{R_t}{1 - \frac{1}{M_t}(1 - R_t)} = \frac{0.57}{1 - \frac{1}{2.31}(1 - 0.57)} = 0.701$$

Entonces,

- ❖ Si el  $RSF_{LTA} < RSF_a$ , se debe calcular el  $MAWP_r$  al cual debe trabajar el componente.

$$MAWP_r = \frac{RSF_{LTA}}{RSF_a} MAPW = \frac{0.703}{0.9} 1128.37 = 879.22 \text{ Psi}$$

- Se evalúa la extensión circunferencial
  - El parámetro de daño circunferencial ( $\beta_c$ )

$$\beta_c = \frac{1.285c}{\sqrt{Dt_c}} = \frac{1.285 \times 101.6}{\sqrt{260.4 \times 8.8}} = 2.73$$

- La región a evaluar debe de cumplir todos los siguientes criterios

$$\beta_c = 2.73 \leq 9, \quad \text{si cumple}$$

$$\frac{D}{t_c} = \frac{260.4}{8.8} = 29.59 \geq 20, \quad \text{si cumple}$$

$$0.7 \leq RSF_{LTA} = 0.701 \leq 1, \quad \text{si cumple}$$

$$0.7 \leq E_c = 1 \leq 1, \quad \text{si cumple}$$

$$0.7 \leq E_L = 1 \leq 1, \quad \text{si cumple}$$

- Determinar el factor del esfuerzo a la tracción ( $TSF$ )

$$TSF = \frac{E_c}{2 \times RSF_{LTA}} \left( 1 + \frac{\sqrt{4 - 3E_L^2}}{E_L} \right) = \frac{1}{2 \times 0.703} \left( 1 + \frac{\sqrt{4 - 3}}{1} \right) = 1.42$$

- Al evaluar el  $TSF_{graf} = 0.9 \leq TSF$  de la gráfica de la figura 2.19 ingresando los datos del  $\beta_c$  y  $R_t$ , se tiene que se cumple la condición.

Paso 10, revisar las limitaciones del dimensionamiento de cada picadura individual cumpliendo lo siguiente

- Diámetro de Picadura

$$d \leq Q\sqrt{Dt_c}$$

- Profundidad de la picadura

$$R_t \geq 0.2$$

**Tabla 3.6** Aceptabilidad de las dimensiones de las picaduras

N° Par de picadura	$R_{td,i}$	Q	Picadura aceptable?	$R_{td,j}$	Q	Picadura aceptable?
1	0,43	0,49	Si	0,55	0,65	Si
2	0,43	0,49	Si	0,32	0,38	Si
3	0,20	0,27	Si	0,32	0,38	Si
4	0,32	0,38	Si	0,43	0,49	Si
5	0,43	0,49	Si	0,55	0,65	Si
6	0,20	0,27	Si	0,32	0,38	Si
7	0,43	0,49	Si	0,66	0,89	Si
8	0,32	0,38	Si	0,32	0,38	Si
9	0,43	0,49	Si	0,55	0,65	Si
10	0,55	0,65	Si	0,32	0,38	Si

Se concluye que el componente puede continuar trabajando con la presión de diseño ya que el  $MAWP_r = 879.22 \text{ pis} > 600 \text{ psi}$  y se cumple con los criterios requeridos por el nivel 2

### 3.2.2.1 VIDA REMANENTE

Para determinar la vida remanente se necesita cumplir los siguientes criterios

- Se evalúa el incremento de la profundidad y el diámetro de la picadura con la velocidad de corrosión según el tipo de ambiente en este caso será de 0.0254 mm/año escogido de la tabla 3.2.

$$w_f = w_c + PPR_{prof} \times tiempo$$

$$d_f = d_c + PPR_{diam} \times tiempo$$

- Después de incrementar el tiempo tenemos que para 7 años se obtienen los siguientes parámetros mostrados en la tabla 3.7.

**Tabla 3.7** Características de picaduras en 7 años

N° Par de picadura	$P_k$	$\theta_k$	$d_{i,k}$	$w_{i,k}$	$d_{j,k}$	$w_{j,k}$
1	6	10	9,18	6,18	8,18	5,18
2	7	10	11,18	6,18	13,18	7,18
3	8	30	4,18	8,18	7,18	7,18
4	6	30	9,18	7,18	13,18	6,18
5	7	20	9,18	6,18	14,18	5,18
6	3	20	6,18	8,18	7,18	7,18
7	4	0	7,18	6,18	6,18	4,18
8	9	30	16,18	7,18	17,18	7,18
9	8	20	15,18	6,18	10,18	5,18
10	4	0	9,18	5,18	11,18	7,18

- Realizar la evaluación Nivel 2 para el tiempo de 7 años. En las tablas 3.8, 3.9 y 3.10 se desarrolla la evaluación de la picadura determinando el *MAPW* y verificando que se cumplan los criterios descritos en la evaluación nivel 2.

**Tabla 3.8** Cálculo del MAPW

<b>Cálculo de la MAPW</b>			
Máxima presión permisible circunferencial	$MAPW^C$	1118.35	psi
Máxima presión permisible longitudinal	$MAPW^L$	2295.38	psi
Máxima presión permisible	$MAPW$	1118.35	psi
Esfuerzo circunferencial	$\sigma_1$	9388.83	psi
Esfuerzo longitudinal	$\sigma_2$	4574.42	psi
Factor de esfuerzo remanente por daño de picadura	$RSF_{pit}$	0.68	
Factor de esfuerzo remanente permisible	$RSF_a$	0.90	
Máxima presión de trabajo reducida	$MAPW_R$	856.73	psi

**Tabla 3.9** Limitación del dimensionamiento de las picaduras

N° Par de picadura	$R_{td,i}$	Q	Picadura aceptable?	$R_{td,j}$	Q	Picadura aceptable?
1	0,41	0,47	Si	0,53	0,62	Si
2	0,41	0,47	Si	0,30	0,36	Si
3	0,18	0,26	Si	0,30	0,36	Si
4	0,30	0,36	Si	0,41	0,47	Si
5	0,41	0,47	Si	0,53	0,62	Si
6	0,18	0,26	Si	0,30	0,36	Si
7	0,41	0,47	Si	0,64	0,83	Si
8	0,30	0,36	Si	0,30	0,36	No
9	0,41	0,47	Si	0,53	0,62	Si
10	0,53	0,62	Si	0,30	0,36	Si

**Tabla 3.10** Evaluación de picadura localizada

<b>Picadura Localizada</b>			
Espesor equivalente	tmm	6,01	mm
Espesor remanente	Rt	0,57	
Parámetro de daño longitudinal	$\beta$	3,41	
Verificación N°1:			
$R_t > 0,2$		Cumple	
$t_c - FCA > 2,5$		Cumple	
$L_{msd} > 1,8(D * t_c)^{1/2}$		Cumple	
<b>Determinar aceptabilidad con la Fig. 2.18</b>		Recalcular MAWPr	
Factor de folias	Mt	2,31	
Factor de esfuerzo remanente en un LTA	RSFLTA	0,70	
<b>Máxima Presión admisible de trabajo</b>		878,10	PSI
Verificación N°2:			
Parámetro de daño circunferencial	$\beta_C$	2,73	
$\beta_C < 9$		Cumple	
$(D/t_c) > 20$		Cumple	
$0,7 < RSFLTA < 1$		Cumple	
$0,7 \leq E_c \leq 1$		Cumple	
$0,7 \leq E_L \leq 1$		Cumple	
Factor del esfuerzo a la tracción	TSF	1,43	
<b>Determinar factor de esfuerzo a la tracción con Fig. 2.19</b>		0,90	
$TSF > TSF_{graf}$		Cumple	

Para el periodo de 7 años el componente aún cumple con que el MAPW es mayor a la presión de diseño pero como se observa en la tabla 3.9 la evaluación de la picadura localizada no satisface las condiciones de fisonomía en el tiempo estimado por lo que programar una próxima inspección entre el 3<sup>ro</sup> y 4<sup>to</sup> año para verificar el incremento del daño y luego determinar si el componente aún es apto para continuar en servicio por el periodo establecido inicialmente o recalcularlo.

### 3.3 PRUEBA HIDROSTÁTICA

La aplicación de Pruebas Hidrostáticas se da en la construcción de ductos o líneas de conducción e infraestructura de operación de sistemas de transporte de hidrocarburos, gases, etc.

En la prueba hidrostática se aplica presión al equipo o línea de tuberías que se encuentran en ese momento fuera de operación, con el fin de verificar la hermeticidad de la tubería, sus accesorios y soldaduras presentes, utilizando como elemento principal agua o en su defecto un fluido no corrosivo. Los códigos de diseño de sistemas de tuberías (ASME, API, entre otros), establecen las prácticas recomendadas de cómo realizar las pruebas hidrostáticas, con el fin de garantizar la integridad física de las personas y los equipos.

#### 3.3.1 PRESIÓN HIDROSTÁTICA

Para realizar la prueba hidrostática se debe de calcular la presión a la que debe ser sometida el componente. Esta presión debe garantizar el funcionamiento de la tubería para las condiciones de diseño establecidas.

$$P_T = \frac{1.5 \times MAWP \times S}{S_T}$$

Donde,

$P_T$ , mínima presión de prueba

$MAWP$ , máxima presión admisible de trabajo

$S$ , valor del esfuerzo a la temperatura de prueba

$S_T$ , valor del esfuerzo a la temperatura de diseño



Para la probeta se tiene las siguientes presiones para cada caso evaluado

$$P_{T,1} = \frac{1.5 \times 1013.54 \times 20000}{17500}$$

$$P_{T,1} = 1737.49 \text{ psi}$$

$$P_{T,2} = \frac{1.5 \times 879.22 \times 20000}{17500}$$

$$P_{T,2} = 1507.23 \text{ psi}$$

### 3.3.2 PROCEDIMIENTO PARA LA PREPARACIÓN DE LA PRUEBA HIDROSTÁTICA

Preparar una prueba hidrostática significa que se deben tomar todas las precauciones inherentes a todo el proceso debido al riesgo que presenta la operación.

- Verificar que el sitio sea el adecuado el cual tenga fácil acceso al componente para realizar inspecciones durante la prueba.
- Asegurarse que la tubería que esté bajo prueba no sufra un “impacto accidental”.
- Certificar que el interior de la tubería se encuentre limpio. Se puede usar agua limpia o aire para realizar limpieza
- Se procederá un primer llenado de la tubería para eliminar burbujas de aire dentro de la tubería y el sistema de pruebas.
- La presión será sometido por el equipo de pruebas diseñado para realizar la operación.
- Se incrementará gradualmente la presión. A una presión moderada realizar inspección visual del componente y sistema de pruebas para visualizar probables fugas por los componentes.

### 3.3.3 SISTEMA DE PRUEBAS

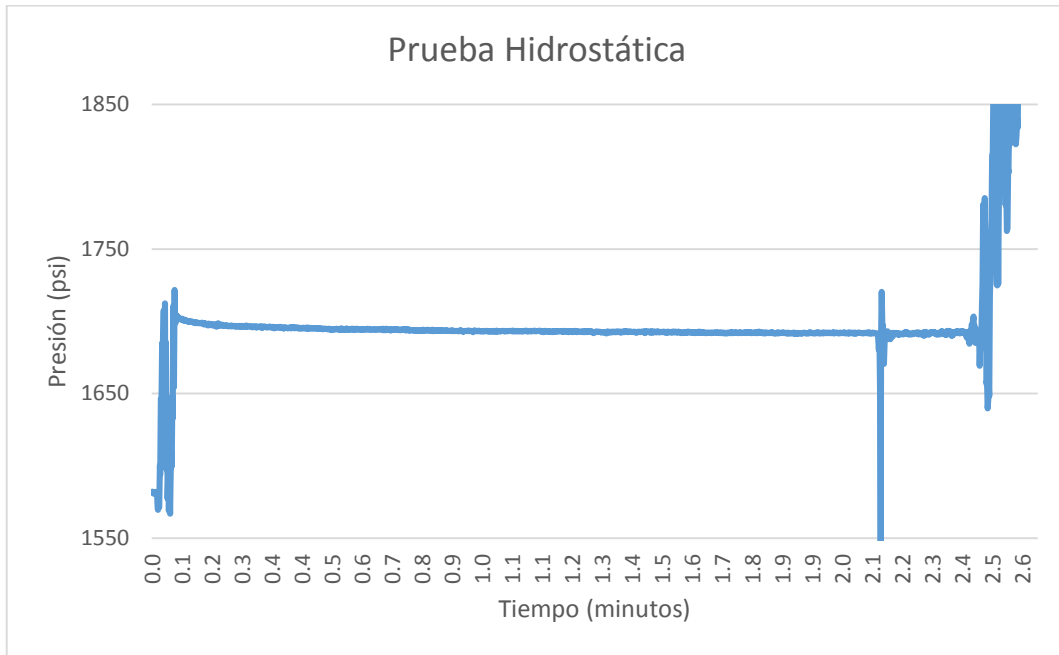
Para realizar la prueba hidrostática se utilizaron los siguiente equipos del laboratorio de la PUCP

- Bomba de alta presión Karcher 9/50-40 con presión de trabajo de 150 bares.
- Sistema de registro de data de presiones vs tiempo Data Chart 600.
- Sistema de control de presión por válvulas, manómetros con diferentes escalas según las presión a evaluar y mangueras de alta presión

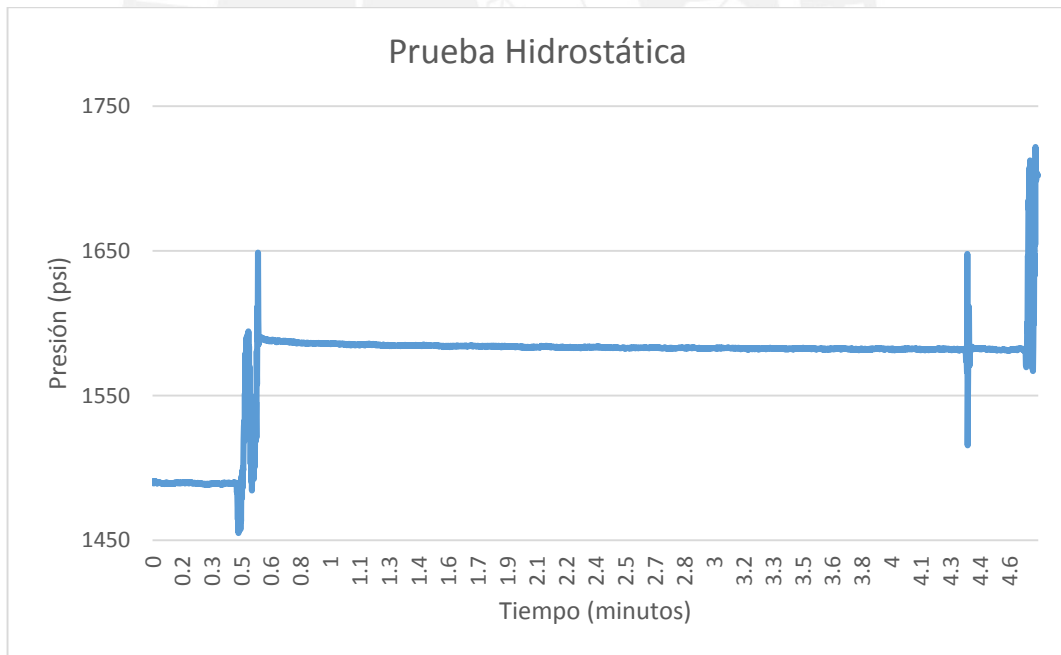
### 3.3.4 RESULTADO DE LA PRUEBA HIDROSTÁTICA

La probeta fue preparada para evaluar diferentes tipos de daño por lo que se presenta en la siguiente gráfica el periodo a la presión calculada para el caso de daño por corrosión por picadura generalizada y localizada. En este caso se mantuvo una presión de 1560 y 1720 psi como se muestran en las figuras 3.1 y 3.12. Los picos presentes en las figuras se deben al manejo de las válvulas de cierre para la regulación de la presión del ensayo hidrostático

Se tuvo como resultado que la tubería puede operar a la máxima presión admisible de trabajo calculada para cada caso evaluado.



**Fig. 3.9** Resultado de Prueba Hidrostática para Evaluación Nivel 1



**Fig. 3.10** Resultado de Prueba Hidrostática para Evaluación Nivel 2

## CONCLUSIONES

- Con la metodología desarrollada se pudo definir que para la tubería A53, a pesar de contar con los daños de corrosión por picadura, puede continuar en operación pasando con éxito los niveles de evaluación para los tipos de picadura simulados.
- La simulación del incremento de los daños ayudo a estimar la vida remanente y a establecer el tiempo de operación con el daño o si se debe realizar un reemplazo o remediación, o conocer el periodo para la próxima inspección.
- Las presiones obtenidas para los casos evaluados son de 1013 psi para el de picadura generalizada y 879 psi para el de picadura localizada. Estas presiones son mayores a la presión de operación confirmando su aceptabilidad en servicio de la tubería. Las presiones fueron validadas por la prueba hidrostática realizada en el laboratorio de la PUCP.
- Para el caso de picadura generalizada se obtiene una vida remanente de 25 años pero se debe realizar una evaluación a la profundidad de las picaduras a mitad del periodo hallado para determinar si la estimación es correcta o recalcular el periodo de servicio y en el caso de la picadura localizada se recomienda una evaluación entre el tercer y cuarto año de servicio a partir de la fecha de evaluación. En ambos casos la vida remanente fue definida por la fisonomía del daño.

## RECOMENDACIONES

- Realizar de forma completa la evaluación de la sección dañada sin excluir ninguna falla.
- Crear un archivo con los datos recolectados y evaluados para mantener un monitoreo continuo.
- Revisar normas que recomienden tipos de remediación para disminuir el efecto del daño de corrosión por picadura.

## OBSERVACIONES

- Los tipos de corrosión por picadura en la tubería evaluada han sido modelados con fines didácticos ya que son los casos más recurrentes.
- Se asumieron las condiciones de trabajo para realizar la evaluación y la estimación de la vida remanente de la tubería.
- Para la picadura localizada se realizó la prueba hidrostática con la región de pérdida localizada de metal equivalente.
- Se asumió el avance de la corrosión de forma lineal.
- En caso de encontrar otro tipo de daño en la superficie evaluada, este debe de ser evaluado con los otros capítulos de la Norma API 579.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Phil Hopkims, Andrew Palmer and Associates, A member of the Penspen Group, "Introduction to Basic Pipeline Engineering Principles", 1996.
- [2] Phil Hopkims, "Ensuring the Safe Operation of Older Pipelines", Int. Pipeline and Offshore Contractors Association, 28th Convention, Acapulco, Mexico, Sept. 1994.
- [3] Eugene F. Megyesy. Manual de Recipientes a Presión Diseño y cálculo. Limusa Noriega Editores. 1999 (pág. 13)
- [4] American Petroleum Institute, Fitness For Service, API 579-1/ASME FFS-1, USA, 2007, 1128 p.
- [5] CRAMER, Stephen. "Pitting Corrosion". ASM International. ASM Handbook: Corrosion. Ohio: Materials Park, pp.236-240. 1990
- [6] G. Fernandez, J. I. Verdeja, J.A. Perosanz, Corrosión por picaduras de una tubería de acero al carbono, RDM Revista de Minas, Asturias, pp 43-48, consulta: 22 de Octubre de 2014  
<http://www.unioviedo.es/sid-met-mat/MATMET/RDM0001.PDF>
- [7] Fosca Pastor, Carlos. Fundamentos de la Corrosión para Ingenieros. 2004
- [8] LEÓN, J. "Diseño y Cálculo de Recipientes a Presión "Editorial Inglesa. Edición 2001.
- [9] MOSS, D. "Pressure Vessel Design Manual" Tercera edición. Editorial Gulf Professional Publishing (2004).
- [10] GUZMÁN, L. "Diseño Mecánico de Recipientes a Presión bajo el Código ASME Sección VIII, División" Tesis de Grado, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela (2006)
- [11] American Petroleum Institute. Pressure Vessel Inspection Code : In-Service Inspection, Rating, Repair and Alteration API 510, 2006.
- [12] American Petroleum Institute. Risk-Based Inspection Technology API 581, 2008
- [13] J.E.I. Metallurgical, Inc. Hurricane surge corrosion failure analysis
- [14] Sevilla, Carlos. Tipos de corrosión, Venezuela. 2012
- [15] Otero Huerta, Enrique. Corrosión y degradación de materiales. España: Síntesis. 2001
- [16] Avila, Jose. Teoría y práctica de la lucha contra la corrosión. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas. 1984