

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA
ENSEÑANZA DE LA NORMA API-579 FITNESS-FOR-SERVICE (EVALUACIÓN
DE LA APTITUD PARA EL SERVICIO)**

ALBERTO GAMBOA COTTE

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2011

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA
ENSEÑANZA DE LA NORMA API-579 FITNESS-FOR-SERVICE (EVALUACIÓN
DE LA APTITUD PARA EL SERVICIO)**

ALBERTO GAMBOA COTTE

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Metalúrgico y Ciencia de Materiales**

**Director
M.Sc. IVÁN URIBE PÉREZ
Ingeniero Metalúrgico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2011

DEDICATORIA

A la **memoria de mi hermano Luis Fernando**, que siempre estará en mis pensamientos con una gran admiración y orgullo. Siempre nos inculcó lo importante que es el estudio para la vida.

A **mi Mamá**: que nunca pierde la esperanza en sus hijos ni deja de creer en ellos, lo cual es de admirar. Mamita este título es para ti.

A **mi Papá**: un incansable trabajador con un corazón enorme con buenos sentimientos, siempre confiando, apoyando y ayudando sin condiciones a sus hijos.

A **mi hermana Luz Amparo**: el pilar de la familia, la hermanita más linda del mundo, siempre colaborándome y apoyándome sin condiciones. Si a alguien le debo mucho es a ella.

A **mi hermana Jakeline**: una mujer que se siente orgullosa de su familia, dándome siempre su apoyo y voz de aliento, haciéndome sentir lo importante que es la familia y para que esta echa.

A **mi hermana Norma**: una mujer luchadora, más que una hermana una amiga, a mi lado apoyándonos mutuamente en esos momentos difíciles y de crisis que se han dado tratando de edificar nuestras vidas.

A **mi hermano Julián**: el más inteligente de la familia. Posee una forma de pensar envidiable que ve todo lo bueno de la vida así sean los momentos más difíciles y críticos, lo cual lo hace salir avante en cualquier situación.

A **mi esposa Leidy**, por su enorme paciencia, colaboración y virtuosa dedicación a su hogar. Espero poder pagarle su sacrificio. Te amo negrita.

Y, a la persona más importante de mi vida y que amo con toda mis fuerzas **mi hijo David Fernando**. El motor de mi vida y mi fuente de inspiración.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por ser mi guía y ponerme en el camino la solución para todos mis problemas.

A Sergio Medina Castillo, Ingeniero de Sistemas UIS, profesor UCC, asesor en la programación.

A Iván Uribe Pérez, M.Sc. A. Ingeniero Metalúrgico, profesor UIS, director de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. MARCO TEÓRICO	17
1.1. NORMA API 579-1/ASME FITNESS-FOR-SERVICE	17
1.2. DISEÑO ESTRUCTURADO DE LA NORMA	18
1.3. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN	20
1.4. NIVELES DE EVALUACIÓN	21
1.5. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN	22
1.5.1. Tensión Admisible	22
1.5.2. Factor de Esfuerzo Remanente	23
1.5.3. Diagrama de Evaluación de Falla (FAD)	24
1.6. MECANISMOS DE DAÑO	26
1.6.1. FRACTURA FRÁGIL	26
1.6.1.1. CET: “Critical exposition temperature”	27
1.6.1.2. MAT: “minimum allowable temperature”	27
1.6.1.3. Determinación del MAT	27
1.6.2. PÉRDIDA GENERAL / LOCALIZADA DE METAL	31
1.6.2.1. Localización y caracterización de la zona con la pérdida de metal	31
1.6.2.2. PTR–“point thickness readings”	32
1.6.2.3. Calculo del coeficiente de variación (COV)	32
1.6.2.4. CTP–“critical thickness profile”	34
1.6.3. CORROSIÓN POR PICADO	38
1.6.4. DAÑOS POR HIDROGENO	45
1.6.4.1. (HIC) - Hydrogen induced cracking	45
1.6.4.2. (SOHIC) - Stress Oriented hydrogen Cracking	45
1.6.4.3. Ampollas	45
1.6.4.4. Criterios de Evaluación HIC	48
1.6.4.5. Criterios de Evaluación Ampollas	48

1.6.5. DESALINEACIÓN DE SOLDADURA Y DISTORSIONES	49
1.6.6. GRIETAS	52
1.6.6.1. Aplicabilidad	52
1.6.6.2. Cálculo Temperatura de referencia	54
1.6.7. DAÑOS POR FUEGO	57
1.6.7.1. Descripción de las zonas de exposición al calor	58
1.6.7.2. Niveles de exposición al calor (admisibles)	58
1.6.8. LAMINACIONES	59
1.6.8.1. Criterios de Evaluación Laminaciones	61
2. DISEÑO DEL SOFTWARE (SOFINT*) PARA LA ENSEÑANZA DE LA NORMA API-579 FITNESS-FOR-SERVICE	62
2.1. REQUERIMIENTOS DEL USUARIO	62
2.2. SECCIONES PRINCIPALES DEL SOFTWARE	62
2.2.1. Descripción de las secciones del software	63
2.3. REQUERIMIENTOS TÉCNICOS	65
2.4. DISEÑO LÓGICO	66
3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	69
BIBLIOGRAFÍA	71
ANEXOS	72

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Procedimiento de Evaluación para varias Clases de Daño	19
Figura 2. Diagrama de Evaluación de Falla	25
Figura 3. Curvas de exención para calcular el MAT	29
Figura 4. Procedimiento de Evaluación - Fractura Frágil	30
Figura 5. Planos de Inspección y el Perfil de Espesor Crítico	34
Figura 6. Procedimiento de Evaluación – Pérdida de Metal	36
Figura 7. Procedimiento de evaluación – Corrosión por Picado	39
Figura 8. Gráficas estándar 6.3 a 6.10 del API 579-1/ASME FFS-1	40
Figura 9. Daños por Hidrógeno	45
Figura 10. Procedimiento de Evaluación – Daños por Hidrógeno	47
Figura 11. Desalineación de Soldadura y Distorsiones	49
Figura 12. Desalineación angular	50
Figura 13. Abombamiento	50
Figura 14. Procedimiento de Evaluación - Desalineamiento de Soldadura y Distorsiones	51
Figura 15. Procedimiento de Evaluación – Grietas	53
Figura 16. Grieta paralela a la soldadura en una placa plana	55
Figura 17. Procedimiento de Evaluación-Daños por fuego	57
Figura 18. Medidas del defecto, laminaciones	59
Figura 19. Procedimiento de Evaluación – Laminaciones	60
Figura 20. Ingreso de datos	63
Figura 21. Ventana de información	64
Figura 22. Acceso directo al manual de usuario	64
Figura 23. Resultado de la evaluación	64
Figura 24. Botón limpiar pantalla	65
Figura 25. Gráficas	65

Figura 26. Ventana de presentación	66
Figura 27. Menú principal	67
Figura 28. Mecanismos de daño	67
Figura 29. Secciones del software	68

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Asignación de materiales a las curvas de exención	28
Tabla 2. Calculo del COV	33
Tabla 3. Tabla usada para calcular la Temperatura de referencia	56
Tabla 4. Zonas de exposición al calor	58
Tabla 5. Niveles de exposición al calor	58

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Manual De Usuario	58
ANEXO B. Herramienta de Desarrollo	82
ANEXO C. Tablas de Tolerancias de Fabricación	84

RESUMEN

TITULO:

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA ENSEÑANZA DE LA NORMA API-579 FITNESS-FOR-SERVICE (EVALUACION DE LA APTITUD PARA EL SERVICIO)*

AUTOR:

Alberto Gamboa Cotte**

PALABRAS CLAVES:

Integridad Estructural, Norma API 579, Mecanismos de Daño, Métodos de Evaluación

DESCRIPCIÓN:

El presente proyecto hace un estudio de la Norma API 579, para desarrollar una herramienta computacional para la enseñanza de la misma.

El software está dividido en 9 secciones, cada sección evalúa un mecanismo de daño: Fractura Frágil, Perdida General de Metal, Perdida Localizada de Metal, Corrosión por Picado, Daños por Hidrogeno, Desalineación de Soldadura y Distorsiones, Daños por Fuego, Grietas, Laminaciones, y Daños por Creep. Cada sección contiene un formato de entrada de datos del usuario para el análisis de Recipientes a Presión, Tuberías y Tanques de Almacenamiento; dispone de los fundamentos teóricos y ejemplos de aplicación que hacen un correcto manejo del software y por lo tanto de una eficaz enseñanza de la norma.

Se desarrollo el software de carácter didáctico con el fin de explicar con mayor facilidad el concepto de la norma a través de ejemplos y variaciones en los mismos de una manera más práctica y eficiente. Las directrices dispuestas en la norma fueron usadas para el desarrollo del software; lo cual permitió que la plataforma me arroje resultados que me permiten garantizar que los equipos que contienen defectos que han sido identificados durante una inspección puedan seguir operando de manera segura.

Con el software se permite seguir la secuencia lógica de la metodología de evaluación que usa la norma para cada mecanismo de daño. Logrando que el estudiante tenga una visión clara y objetiva del concepto de la norma.

El estudio de la norma establece que en la integridad de equipos es importante tener un amplio conocimiento en el diseño, operación y mantenimiento, ya que son de vital importancia para un correcto análisis de resultados y así garantizar que los equipos que contienen defectos que han sido identificados durante una inspección puedan seguir operando de manera segura.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ciencias Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Director: MSc. Iván Uribe Pérez

ABSTRACT

TITLE:

DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL TOOL TO INSTRUCTION OF THE STANDARD API-579 FITNESS-FOR-SERVICE*

AUTHOR:

Alberto Gamboa Cotte**

KEY WORDS:

Structural Integrity, Standard API-579, Damage Mechanisms, Assessment Methods

DESCRIPTION:

This project is a study of the norm API 579 to develop a computational tool for teaching it. The software is divided into 9 sections, each one of them evaluate a mechanism of damage: brittle fracture, general metal loss, local metal loss, pitting corrosion, hydrogen damage, weld misalignment and shell distortions, fire damage, crack-like flaws, laminations, and creep damage. Each section contains an input format of the user data to analyze Pressure Vessels, Piping Systems and Storage Tanks; it has the theoretical basis and application examples for the correct operation of the software and therefore for the effective teaching of the norm.

It was didactically developed to explain more easily the concept of the norm through examples and variations with a useful and efficient way. The guidelines provided in the norm were used for software development allowing the platform to yield results and ensure the continued operation of damaged equipment.

With the software can follow the logical sequence of the evaluation methodology used by the standard for each damage mechanism. Making the student has a clear vision and objective of the concept of the rule.

The study of the rule states that the integrity of equipment is important to have a broad knowledge in the design, operation and maintenance, as they are of vital importance for a proper analysis of results and thus ensure that equipment containing defects that have been identified during an inspection can continue to operate safely.

* Work Degree

** Faculty of Engineering physics-chemical, School of Metallurgical Engineering and Science Materials, Directress: MSc. Iván Uribe Pérez

INTRODUCCIÓN

La integridad como propiedad de un equipo que conteniendo uno o más defectos puede mantenerse en operación con un riesgo aceptable de pérdida de funcionalidad; implica un gerenciamiento en el diseño, fabricación-instalación, operación, inspección, mantenimiento y remplazo oportuno; con el fin de prevenir fallas, accidentes o riesgos para las instalaciones y al medio ambiente.

La norma API-579 Fitness for Service proporciona evaluaciones cuantitativas de ingeniería, que se realizan para demostrar la integridad estructural de un componente en servicio que contiene un daño o defecto. Ha sido desarrollada para ofrecer una orientación para la realización de evaluaciones de defectos comúnmente encontrados en la industria, como ocurre con los recipientes a presión, tuberías y tanques.

Las directrices dispuestas en la norma son usadas en la toma de decisiones de reparación-reemplazo, para garantizar que los equipos que contienen defectos que han sido identificados durante una inspección pueda seguir operando de manera segura.

El interés de la industria por garantizar la seguridad del personal de planta, además de optimizar la operación y mantenimiento de las instalaciones existentes para mantener su disponibilidad y mejorar la viabilidad económica a largo plazo; son factores que hacen que el estudio de la norma API 579 sea fundamental e importante para la formación de un ingeniero metalúrgico.

Por lo tanto se desarrolló un software de carácter didáctico con el fin de explicar con mayor facilidad el concepto de la norma a través de ejemplos y variaciones en los mismos de una manera más práctica y eficaz.

Los conocimientos metalúrgicos fueron indispensables en el desarrollo del software ya que se debieron aplicar conceptos de vital importancia que son la base de la norma como lo son los mecanismos de daño.

Se trabajo con la herramienta de desarrollo Microsoft Visual Basic 6.0 dado que permite realizar operaciones complejas con facilidad y en poco tiempo además está orientado a la realización de programas para Windows, pudiendo incorporar todos los elementos de este entorno informático: ventanas, botones, cajas de diálogo y de texto, botones de opción y de selección, gráficos, menús, etc. De esta manera permitiendo seguir la secuencia lógica de la metodología de evaluación que usa la norma para cada mecanismo de daño. Logrando que el estudiante tenga una visión clara y objetiva del concepto de la norma.

1. MARCO TEORICO

1.1. NORMA API 579-1/ASME FITNESS-FOR-SERVICE

La aptitud para el servicio (Fitness-For-Service, FFS) es un conjunto de evaluaciones cuantitativas que sirven para demostrar la integridad estructural de un determinado equipo, que contiene un daño o defecto, y también para determinar bajo qué nuevas condiciones puede continuar operando, para ello el Instituto Americano del Petróleo ha desarrollado la norma API 579¹.

Cualquier elemento de cualquier equipo al estar operando sufre una degradación de su estado original de fabricación como consecuencia de algún mecanismo de daño. Esta degradación puede ser encontrada durante las respectivas inspecciones que se le hagan al equipo.

Al realizar un programa de evaluaciones de aptitud para el servicio (FFS), se pretende analizar el estado integral del componente conociendo el mecanismo de daño. Las técnicas empleadas para evaluar la integridad del elemento incluyen los siguientes mecanismos de daño: fractura frágil, corrosión general, corrosión localizada, corrosión por picado, daños por hidrogeno, irregularidades geométricas, creep, daños por fuego, grietas y laminaciones.

Las evaluaciones FFS consisten en métodos de análisis para evaluar fallas y daños, que por lo general requieren un enfoque interdisciplinario que consiste en lo siguiente:

- Conocimiento de los mecanismos de daño/comportamiento del material.
- Conocimiento del pasado y futuro de las condiciones operacionales e interacción con el personal operativo.
- Ensayos no destructivos (NDE) localización y tamaño de la falla.
- Propiedades de los materiales (efectos ambientales).

¹International Journal of Pressure Vessels and Piping 77 (2000) 953-963

- Análisis de esfuerzos (análisis de elementos finitos).
- Análisis de datos (ingeniería de modelos de fiabilidad)

Los procedimientos de evaluación de esta Norma se pueden utilizar para equipos diseñados y construidos por los siguientes códigos:

- a) ASME B&PV Code, Section VIII, Division 1
- b) ASME B&PV Code, Section VIII, Division 2
- c) ASME B&PV Code, Section I
- d) ASME B31.1 Piping Code
- e) ASME B31.3 Piping Code
- f) API 650
- g) API 620

También se ofrecen directrices para la aplicación de la norma a recipientes a presión construidos con otros códigos y estándares reconocidos.

1.2. DISEÑO ESTRUCTURADO DE LA NORMA:

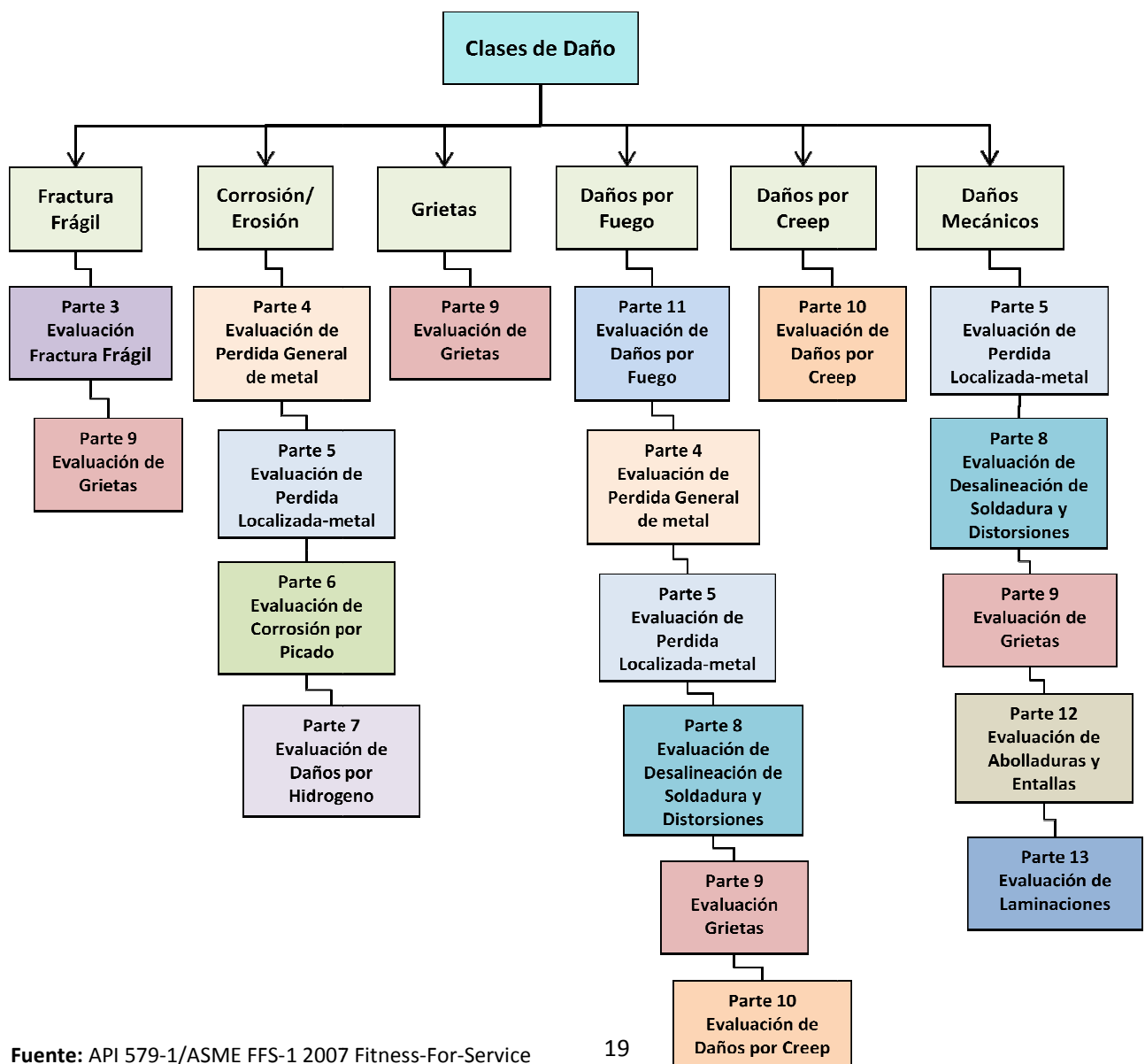
- **Parte 1** - Introducción
- **Parte 2** - FFS Procedimiento de Evaluación de Ingeniería (Esquema general del procedimiento de evaluación común para todos los mecanismos de daño)
- **Parte 3** - Evaluación de Equipos por Fractura Frágil
- **Parte 4** - Evaluación de Pérdida General de Metal
- **Parte 5** - Evaluación de Pérdida Local de Metal
- **Parte 6** - Evaluación de Corrosión por Picado
- **Parte 7** - Evaluación de Daños por Hidrogeno
- **Parte 8** - Evaluación de Desalineación de Soldadura y Distorsiones
- **Parte 9** - Evaluación de Grietas
- **Parte 10** - Evaluación de Equipos Operando en Rango de Creep
- **Parte 11** – Daños por Fuego

- **Parte 12** – Evaluación de Abolladuras y Entallas
- **Parte 13** – Evaluación de Laminaciones
- Apéndices

Si varios mecanismos de daño y fallas están presentes deben ser evaluados para determinar la Aptitud para el servicio de un componente.

La siguiente figura hace referencia a cómo llevar a cabo una evaluación cuando en una clase de daño están presentes múltiples mecanismos de daño.

Figura 1. Procedimiento de Evaluación para varias Clases de Daño



1.3. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN

La metodología usada para cada mecanismo de daño (parte 3 a parte 13) está prevista en los siguientes ocho pasos:

Paso 1 - Identificación de fallas y mecanismos de daño: El primer paso dentro de una evaluación de aptitud para el servicio, consiste en identificar el tipo de defecto y la causa de daño. La evaluación no debe realizarse a menos que la causa del daño pueda ser identificada. El diseño original, material de fabricación, el historial de servicio y las condiciones ambientales pueden ser útiles para determinar la causa probable de daños.

Paso 2 - Aplicabilidad y las limitaciones de los procedimientos de evaluación: es decir debe determinarse si el equipo o elemento que va a ser analizado está dentro de lo estudiado por la norma.

Paso 3 - Requerimientos de datos: dependen del tipo de defecto o mecanismo de daño que se está evaluando. Los datos requeridos pueden incluir: datos de diseño del equipo, información del mantenimiento e historia operativa y datos específicos como tamaño de defecto, estado de esfuerzos del componente en la localización de la falla y propiedades del material.

Paso 4 - Técnicas de evaluación y criterios de aceptación: Aquí se emplean los niveles de evaluación (nivel 1, nivel 2, nivel 3) con los criterios de aceptación, los mismos que son empleados para determinar si el equipo puede o no volver a operar.

Paso 5 - Evaluación de la vida remanente: es importante conocer la vida remanente de un determinado elemento ya que ésta es usada para establecer los adecuados intervalos de inspección.

Paso 6 - Remediación: determinada la vida remanente de un determinado elemento, la norma sugiere adecuados métodos de reparación para cada nivel de evaluación, en algunos casos las técnicas de reparación pueden ser utilizadas para el control de daños futuros asociados con el crecimiento de fallas y / o degradación del material.

Paso 7 - Monitoreo en servicio: esto es necesario debido a que con un adecuado sistema de monitoreo, se puede incrementar el tiempo de vida del elemento; puede ser usado en todos los casos en que, la vida remanente y el intervalo de inspección no pueden ser establecidos adecuadamente debido a la complejidad asociada al mecanismo de daño y ambiente de servicio.

Paso 8 - Documentación: debe incluir un registro de todos los datos y las decisiones tomadas en cada uno de los pasos previos para calificar el componente para la operación continua.

1.4. NIVELES DE EVALUACIÓN

Existen tres niveles de evaluación empleados para cuantificar la integridad de un componente en relación al estado de daño. En general, cada nivel de evaluación provee un balance entre lo conservador, la cantidad de información requerida para la evaluación, la destreza del personal que está realizando la evaluación y la complejidad del análisis que está siendo realizado.

Nivel 1: es el más conservador que puede emplearse. Los procedimientos de evaluación empleados en este nivel proveen criterios que pueden ser empleados para evaluar el componente con una mínima cantidad de inspecciones o

información del componente; haciendo cálculos simples utilizando datos de diseño y registros de planta (histórico)

Nivel 2: los procedimientos empleados en este nivel intentan proveer una evaluación más efectiva que los resultados que se pueden obtener de una evaluación nivel 1. En la evaluación nivel 2, se emplea información de inspección similar a la requerida en una evaluación nivel 1, sin embargo, se utilizan cálculos más detallados; como lo son condiciones de operación y hojas de cálculo.

Nivel 3: proporciona la más detallada evaluación que produce resultados más precisos que los que se pueden obtener con una evaluación nivel 2. En una evaluación nivel 3 se requiere la más minuciosa inspección y la mayor información sobre el componente que se está analizando. El análisis recomendado está basado en técnicas numéricas como el método de elementos finitos.

1.5. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN

Cada una de las metodologías de evaluación utiliza uno o más de los siguientes criterios de aceptación

1.5.1. Tensión Admisible (Allowable Stress):

Este criterio de aceptación se basa en el cálculo de las tensiones resultantes en diferentes condiciones de carga, la clasificación y la superposición de los esfuerzos resultantes

$$\text{Tensión Admisible} = \text{Resistencia del Material} / \text{Factor de seguridad}$$

1.5.2. Factor de Resistencia Mecánica Remanente:

Este concepto se utiliza para medir la aceptabilidad de un componente para continuar en servicio. Se define con la siguiente relación:

$$RSF = \frac{L_{DC}}{L_{UC}}$$

RSF = Factor de Resistencia Mecánica Remanente

L_{DC} = Carga límite o de colapso plástico de componentes con defectos

L_{UC} = Carga límite o de colapso de componentes sin defectos

Tenemos que:

RSF_a = Factor de Esfuerzo Remanente Permissible; por lo tanto si:

$$RSF \geq RSF_a$$

El componente dañado puede ser devuelto al servicio, y si:

$$RSF < RSF_a$$

El componente dañado puede ser reparado y re-evaluado

A partir del RSF calculamos:

$MAWPr$ = máxima presión de operación admisible con defectos

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

Donde:

$MAWP$ = máxima presión de operación admisible determinada por el código de proyecto

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

1.5.3. Diagrama de Evaluación de Falla (FAD):

Proporciona una medida de aceptabilidad de un componente comparando en primer lugar el factor de intensidad de tensiones con la tenacidad a fractura del material y, en segundo lugar, la carga aplicada con la que produce el colapso plástico. Dichas condiciones son sin embargo insuficientes, ya que al no tener en cuenta la interacción fractura-colapso plástico nos encontramos con situaciones que, consideradas aceptables, corresponden a situaciones reales en las que se produce la rotura de la estructura.

Queda por lo tanto establecida la necesidad de tener en cuenta la interacción entre fractura y colapso. Para ello necesitamos una relación entre las variables

$L_r = \sigma_{ref}/\sigma_{ys}$ relación de carga; y

$K_r = K_i/K_{MAT}$ relación de tenacidad

Evaluadoras de la seguridad frente a colapso plástico y fractura respectivamente, donde:

σ_{ref} : esfuerzo de referencia

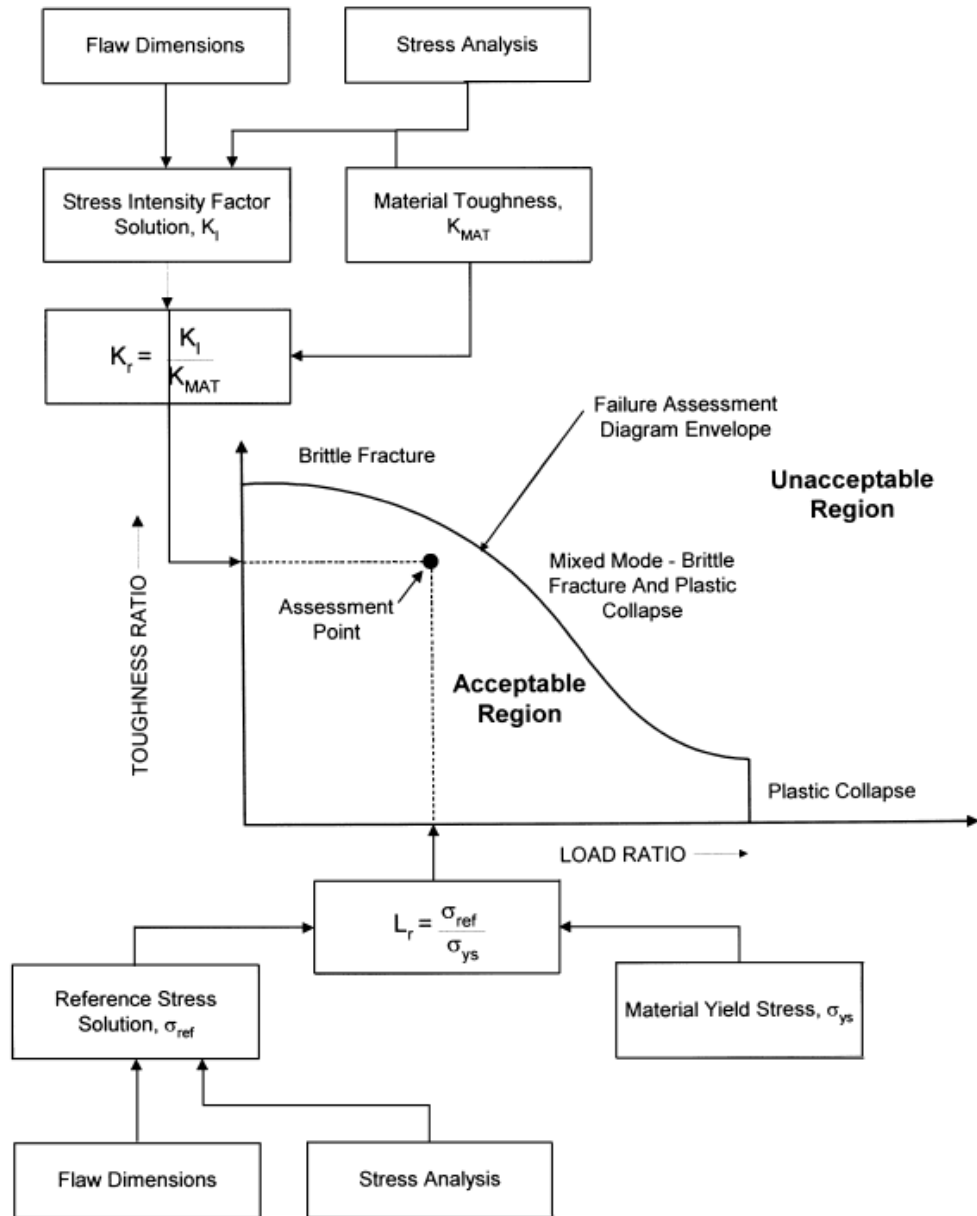
σ_{ys} : esfuerzo de fluencia del material

K_i : factor de intensidad de esfuerzos

K_{MAT} : tenacidad a la fractura del material

Relación que, además, ha de representar una situación crítica, es decir, ha de separar situaciones aceptables de no aceptables como se representa en la Fig. 2

Figura 2. Diagrama de Evaluación de Falla



Fuente: API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service

1.6. MECANISMOS DE DAÑO

1.6.1. FRACTURA FRÁGIL

Esta evaluación se requiere:

- Cuando algún cambio en el proceso aumenta la posibilidad de tener bajas temperaturas del metal.
- Cuando un análisis de riesgo indica la posibilidad de que temperaturas más bajas y/o presiones más altas que aquellas esperadas en el proyecto puedan acontecer (en el arranque, operación, parada o situación anómala – Ej.: un derrame)
- Posibilidad de reducción del factor de seguridad
- La condición del equipo garantiza la evaluación
- Cuando es necesario determinar la temperatura mínima para la realización del test hidrostático

En esta parte se proporcionan directrices para la evaluación de la resistencia a la fractura frágil de recipientes a presión de aceros de baja aleación, tuberías y tanques de almacenamiento.

Otros materiales que podrían ser susceptibles a la fractura frágil, como ferríticos, martensíticos y aceros inoxidable dúplex, no se abordan en esta Norma. Calderas y tubería externa de las calderas no están incluidas en el ámbito de aplicación de la presente parte.

El propósito de esta evaluación es evitar una falla catastrófica de fractura frágil de acuerdo al Código ASME, Sección VIII filosofía de diseño. Su objetivo es prevenir el inicio de la fractura frágil.

A diferencia de otras partes de la presente norma, ésta se utiliza para detectar la propensión a la fractura frágil. Si una grieta se encuentra, la parte de grietas (parte 9) se debe utilizar para la evaluación.

1.6.1.1. CET: “Critical exposition temperature” Temperatura Crítica de Exposición

Es la menor temperatura que el metal pueda experimentar durante su exposición al ambiente y durante el arranque, parada, operación continua (o en situación anómala causada por un derrame) donde la tensión actuante sea >55 MPa.

Temperatura a la cual sucede auto refrigeración o enfriamiento brusco (shock-chilling)

Un promedio de temperaturas o la CET está definido por los códigos de diseño.

1.6.1.2. MAT: “minimun allowable temperature” Temperatura mínima admisible

Es la temperatura mínima admisible para un material dado, teniendo en consideración su espesor y su resistencia a la fractura frágil.

1.6.1.3. Determinación del MAT:

A partir de los ensayos de impacto considerando las temperaturas requeridas por el ASME 1 o 2; se usan las curvas de exención de estos ensayos:

1. Determinar la curva (A, B, C o D) del material a través de la tabla 3.2 del API/ASME 579; Tabal 1.

Tabla 1. Asignación de materiales a las curvas de exención

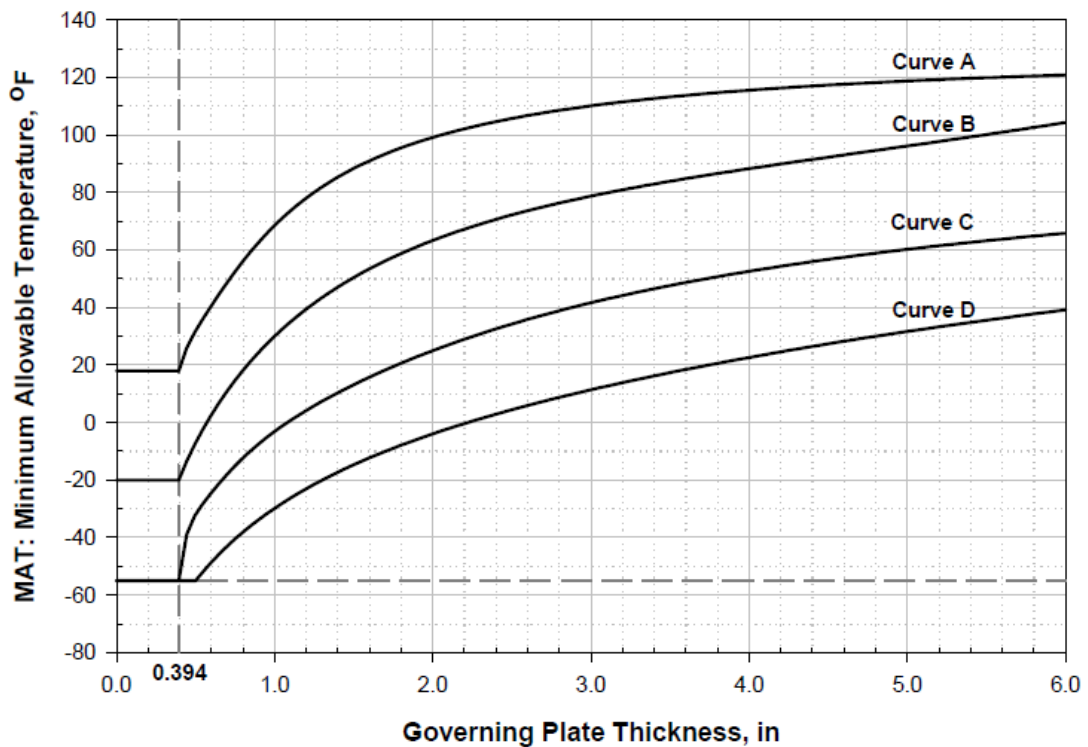
Curve	Material (1), (2), (6)
A	<ol style="list-style-type: none"> 1. All carbon and all low alloy steel plates, structural shapes and bars not listed in Curves B, C, and D below. 2. SA-216 Grades WCB and WCC if normalized and tempered or water-quenched and tempered; SA -217 Grade WC6 if normalized and tempered or water-quenched and tempered 3. The following specifications for obsolete materials: A7, A10, A30, A70, A113, A149, A150 (3). 4. The following specifications for obsolete materials from the 1934 edition of the ASME Code, Section VIII: S1, S2, S25, S26, and S27 (4). 5. A201 and A212 unless it can be established that the steel was produced by a fine-grain practice (5)
B	<ol style="list-style-type: none"> 1. SA-216 Grades WCA if normalized and tempered or water-quenched and tempered SA-216 Grades WCB and WCC for thicknesses not exceeding 2 inches if produced to a fine grain practice and water-quenched and tempered SA -217 Grade WC9 if normalized and tempered SA-285 Grades A and B SA-414 Grade A SA-442 Grade 55>1 in. if not to fine grain practice and normalized SA-442 Grade 60 if not to fine grain practice and normalized SA-515 Grades 55 and 60 SA-516 Grades 65 and 70 if not normalized SA-612 if not normalized SA-662 Grade B if not normalized 2. Except for cast steels, all materials of Curve A if produced to fine grain practice and normalized which are not listed for Curve C and D below; 3. All pipe, fittings, forgings, and tubing not listed for Curves C and D below; 4. Parts permitted from paragraph UG-11 of the ASME Code, Section VIII, Division 1, shall be included in Curve B even when fabricated from plate that otherwise would be assigned to a different curve. 5. A201 and A212 if it can be established that the steel was produced by a fine-grain practice.
C	<ol style="list-style-type: none"> 1. SA-182 Grades 21 and 22 if normalized and tempered. SA-302 Grades C and D SA-336 Grades F21 and F22 if normalized and tempered SA-387 Grades 21 and 22 if normalized and tempered SA-442 Grades 55 < 1 in. if not to fine grain practice and normalized SA-516 Grades 55 and 60 if not normalized SA-533 Grades B and C SA-662 Grade A 2. All material of Curve B if produced to fine grain practice and normalized and not listed for Curve D below
D	<p>SA-203 SA-442 if to fine grain practice and normalized SA-508 Class 1 SA-516 if normalized SA-524 Classes 1 and 2 SA-537 Classes 1 and 2 SA-612 if normalized SA-662 if normalized SA-738 Grade A</p>

Fuente: API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service Table 3.2

Assignment of Materials to the Material Temperature Exemption Curves in Figure 3.4

- Determinar el MAT de la figura 3.4 del API/ASME 579; figura 3, usando la curva del material y el espesor gobernante (t_g) del componente en cuestión.

Figura 3. Curvas de exención para calcular el MAT



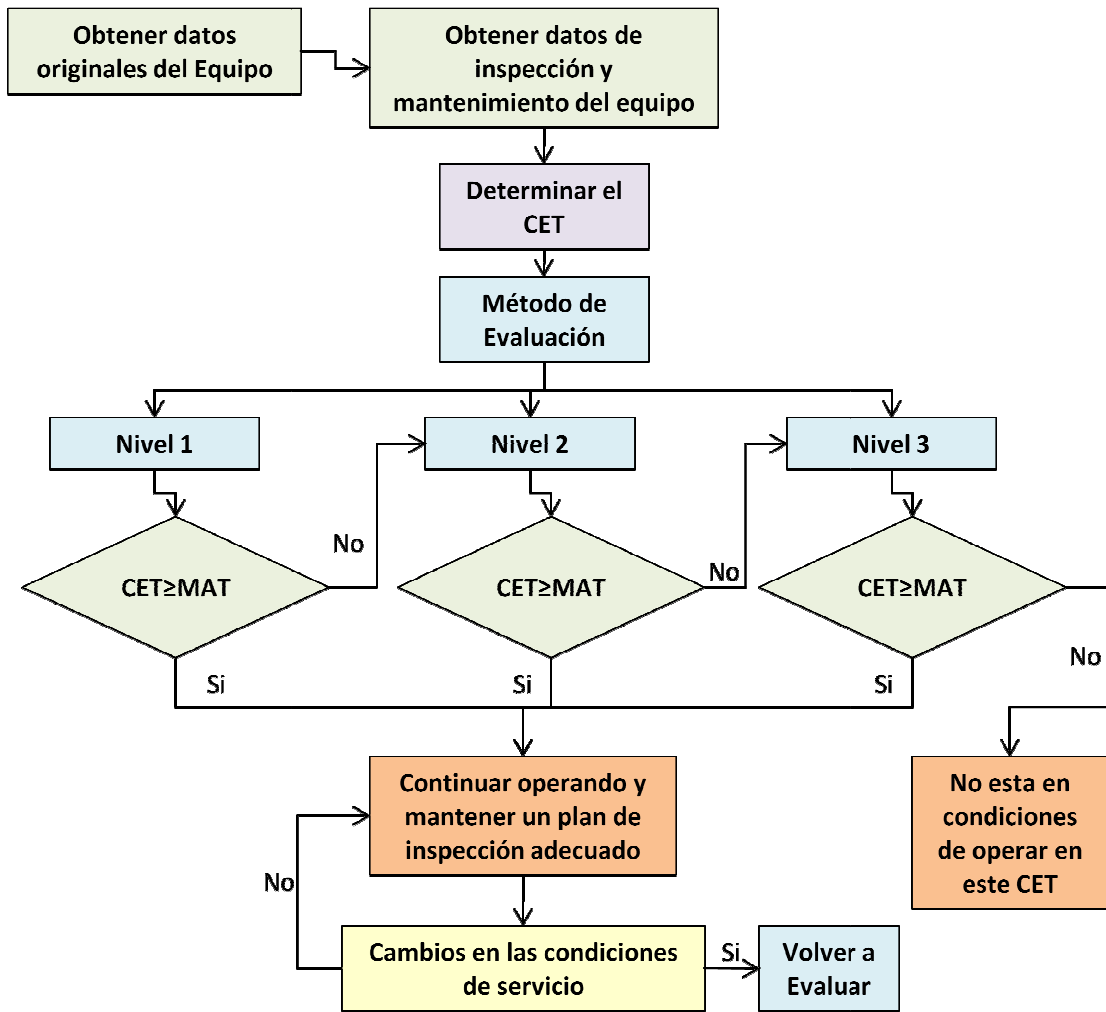
Fuente: API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service Figure 3.4 – Minimum Allowable Metal Temperature

- Reducción del MAT: es posible reducir el MAT en 17°C (30°F) sí:
 - El componente fue fabricado con materiales P1, grupo 1 o 2 - ASME IX
 - t (espesor) < 38mm(1,5 pulg)
 - PWHT realizado y sin alteración estructural posterior

Componentes que tengan un CET mayor o igual al MAT pueden continuar operando de una forma segura, siempre y cuando no cambien las condiciones de operación. Si se realizan cambios en las condiciones de operación una nueva

evaluación debe realizarse. Una descripción de la evaluación se muestra en la figura 4.

Figura 4. Procedimiento de Evaluación - Fractura Frágil



Fuente: Autor. Adaptado de API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service

1.6.2. PÉRDIDA GENERAL / LOCALIZADA DE METAL

Esta parte se usa principalmente para evaluar pérdidas de material producto de la corrosión y erosión, y permitir así que un componente pueda seguir operando o no.

El procedimiento para la evaluación en esta sección se basa principalmente en tomar valores de espesor del componente para luego hacer un promedio que proporciona un resultado conveniente para la evaluación.

Para el procedimiento de evaluación se toman aspectos como medidas de espesores tanto internos como externos ya que la pérdida de material puede ocurrir de esa manera y dependiendo de la cantidad de datos que se tomen será la precisión de los resultados.

Se aplica a equipos diseñados de acuerdo a los códigos reconocidos.

El área de estudio debe estar libre de concentradores de esfuerzos: muescas, ranura, abolladuras, deformaciones mecánicas.

Los esfuerzos cíclicos del componente deben estar por debajo de 150 ciclos.

La sección debe estar libre de grietas.

1.6.2.1. Localización y caracterización de la zona con la pérdida de metal

Dos opciones para la obtención de datos de espesor:

PTR–“point thickness readings”: Lecturas de puntos de espesor

Medición punto a punto sin levantar un perfil - se basa en simples cálculos estadísticos para determinar si la pérdida de espesor es generalizada y uniforme.

Uso de la inspección visual para comprobar la pérdida de espesor uniforme y localizar los puntos para sus mediciones. Tome la lectura en un mínimo de 15 puntos para las regiones de interés.

CTP–“critical thickness profile”: Perfil de espesores

Un perfil de la región crítica con la pérdida de espesor se realiza.

Espacio mínimo entre los puntos de medición de espesor y número mínimo de medidas:

Mínimo de 5 puntos para cada dirección dentro de una malla situada en la región de interés.

Se establece un espaciamiento máximo entre puntos donde no es posible la inspección visual de los puntos de mayor interés.

1.6.2.2. PTR–“point thickness readings”:

Si el coeficiente de variación (COV) de las lecturas de espesor es superior al 10%, entonces, los *perfiles de espesor (CTP)* deberán ser considerados para su uso en la evaluación.

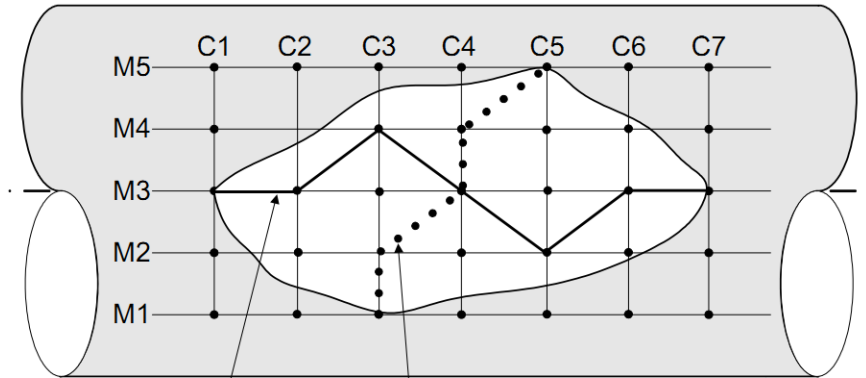
El COV se define como la desviación estándar dividida por el promedio de espesores.

1.6.2.3. Calculo del coeficiente de variación (COV)

Plantilla para calcular el coeficiente de variación (COV) para la lectura de puntos de espesor; Tabla 2

1.6.2.4. CTP—"critical thickness profile":

Figura 5. a) Planos de Inspección y el Perfil de Espesor Crítico:



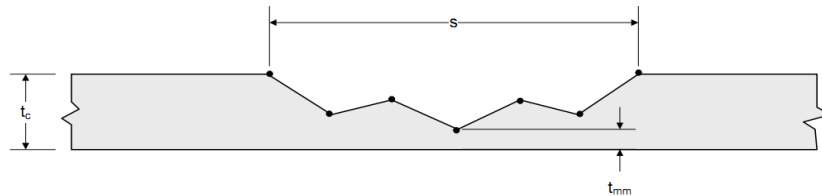
Línea M –Trayectoria de la lectura de espesores mínimos en la dirección longitudinal

Línea C –Trayectoria de la lectura de espesores mínimos en la dirección circunferencial

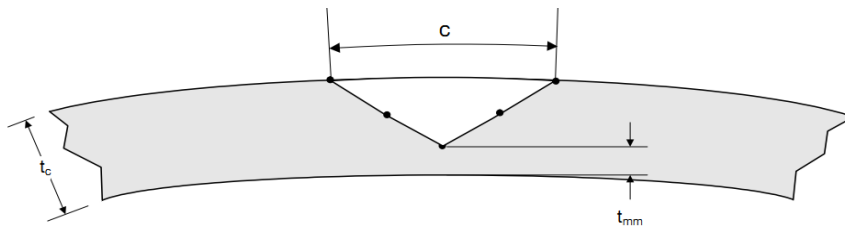
M1-M5 son planos de inspección longitudinal

C1-C7 son planos de inspección circunferencial

b) (CTP) - Plano Longitudinal (Proyección de la Línea M):



c) (CTP) Plano Circunferencial (Proyección de la Línea C):



Fuente: API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service Figure 4.6 – Method for Determining the Plane of Maximum Metal Loss (Critical Thickness Profile)

Calculo del Espesor mínimo requerido (t_{min}): parámetro que se necesita para la evaluación

$$t_{min}^C = \frac{PR}{SE - 0.6P}$$

$$t_{min} = \max \left[t_{min}^C, t_{min}^L \right]$$

$$t_{min}^L = \frac{PR}{2SE + 0.4P}$$

Donde:

t_{min} : espesor mínimo requerido

$t_{min,c}$: espesor mínimo calculado según la tensión que actúa en la dirección circunferencial

$t_{min,L}$: espesor mínimo calculado según la tensión que actúa en la dirección longitudinal

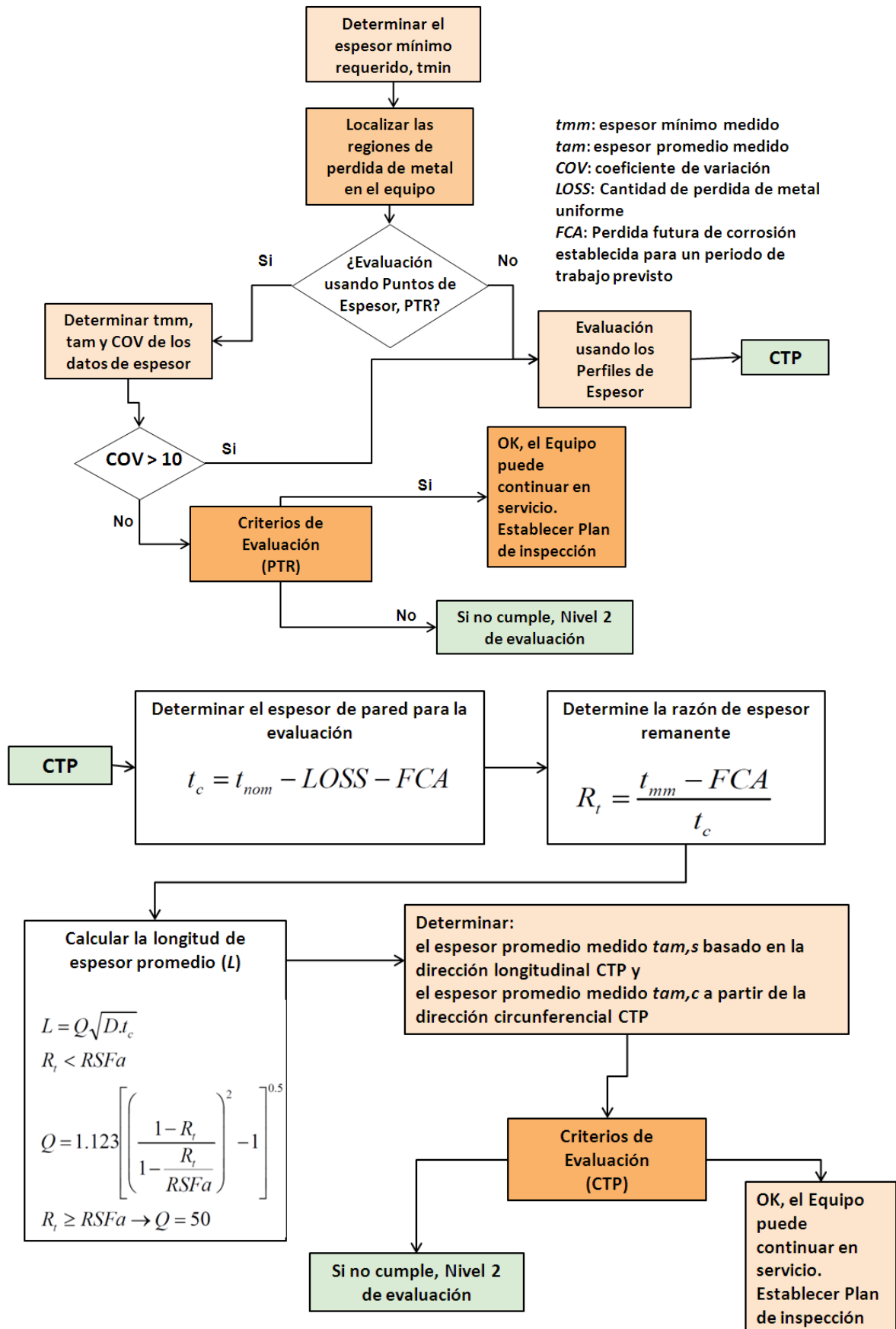
P : presión de diseño

R : radio interno corregido

S : tensión admisible

E : eficiencia de la junta soldada

Figura 6. Procedimiento de Evaluación – Pérdida de Metal



Fuente: El Autor. Adaptado de API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service

RSF: Factor de esfuerzo remanente

RSFa: Factor de esfuerzo remanente permisible

Q: Factor utilizado para determinar la longitud de espesor promedio

Criterios de Evaluación (PTR):

- Recipientes Cilíndricos, Cónicos, y Codos

$$t_{am} - FCA \geq t_{\min}$$

- Recipientes esféricos y tapas

$$t_{am} - FCA \geq t_{\min}$$

- Tanques de almacenamiento de baja presión y atmosféricos

$$t_{am} - FCA \geq t_{\min}$$

Criterios de Evaluación (CTP):

- Recipientes Cilíndricos y Cónicos, y Codos

$$t_{am}^s - FCA \geq t_{\min}^c \quad t_{am}^c - FCA \geq t_{\min}^L$$

- Recipientes Esféricos y Tapas

$$\min [t_{am}^s, t_{am}^c] - FCA \geq t_{\min}$$

- Tanques de Almacenamiento de baja Presión y Atmosféricos

$$t_{am}^s - FCA \geq t_{\min}$$

Si se cumplen estos criterios el equipo puede continuar operando, de lo contrario se requiere una evaluación nivel 2.

1.6.3. CORROSIÓN POR PICADO

El picado se define como regiones localizadas de pérdida de metal caracterizadas geoméricamente por tener un diámetro de pit igual o menor que el espesor de la placa, y una profundidad menor que el espesor de la placa.

Sólo se aplica a:

- Componentes sometidos a la presión interna
- Colonias de defectos pitiformes los cuales están presentes en forma dispersa o concentrada
- Aplicable a las colonias de pits que pertenecen a la misma superficie, y no a la combinación de la superficie interna y externa

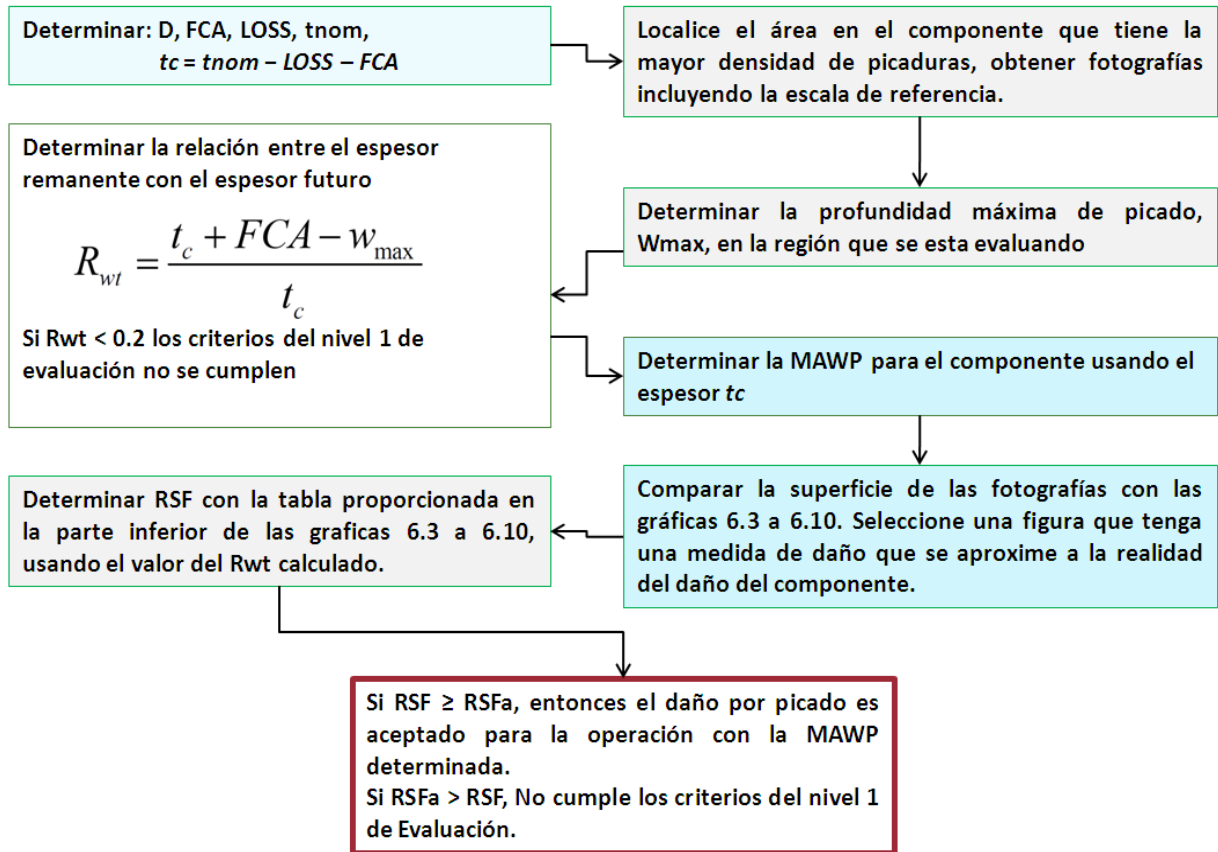
Información necesaria:

Seleccione un patrón de distribución de los pits que mejor represente el daño del componente

Determinar la mayor profundidad de pit

Registrar la información de campo por fotografía con una escala de referencia

Figura 7. Procedimiento de evaluación – Corrosión por Picado



Fuente: El Autor. Adaptado de API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service

D: Diámetro interno

Wmax: Profundidad máxima de picadura

tnom: Espesor nominal

LOSS: Pérdida de metal

FCA: Corrosión permitida a futuro

tc: Espesor Corroído a Futuro

MAWP: Máxima presión de operación admisible

RSF: Factor de esfuerzo remanente

RSFa: Factor de esfuerzo remanente permisible

MAWP: Máxima presión de operación admisible

$$MAWP = \frac{SEt_c}{R + 0.6t_c}$$

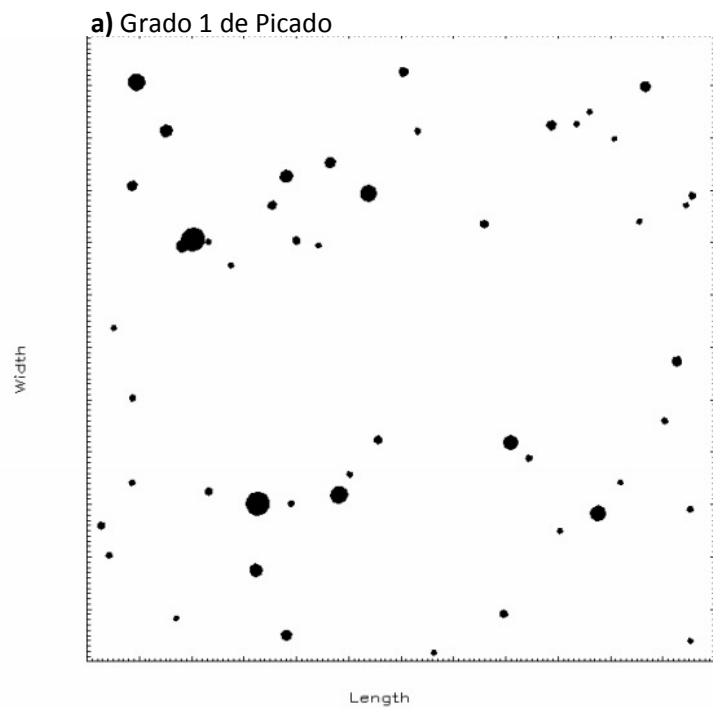
S: Tensión Admisible

E: Eficiencia de la junta soldada

R: Radio interno corregido (radio interno + FCA + LOSS)

tc: Espesor Corroído a Futuro

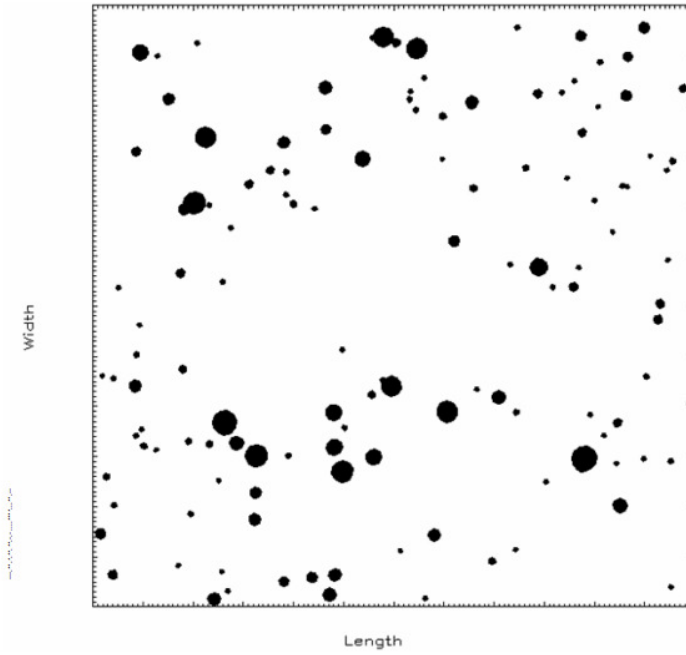
Figura 8. Gráficas estándar 6.3 a 6.10 del API 579-1/ASME FFS-1 utilizadas para compararlas con el daño real:



Note: The scale of this figure is 150 mm by 150 mm (6 in by 6 in)

R_{ref} , see Equation (6.3)	Level 1 RSF	
	Cylinder	Sphere
0.8	0.97	0.96
0.6	0.95	0.91
0.4	0.92	0.87
0.2	0.89	0.83

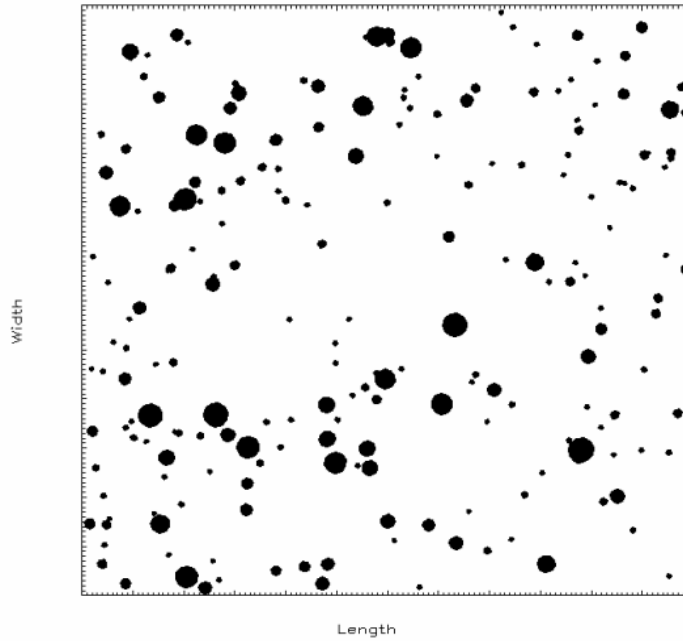
b) Grado 2 de Picado



Note: The scale of this figure is 150 mm by 150 mm (6 in by 6 in)

R_{net} , see Equation (6.3)	Level 1 RSF	
	Cylinder	Sphere
0.8	0.97	0.96
0.6	0.95	0.91
0.4	0.92	0.87
0.2	0.89	0.83

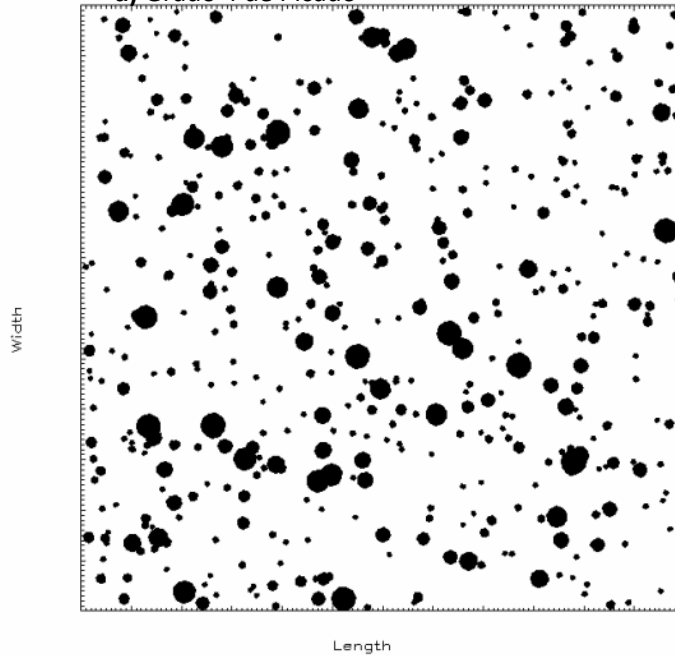
c) Grado 3 de Picado



Note: The scale of this figure is 150 mm by 150 mm (6 in by 6 in)

R_{net} , see Equation (6.3)	Level 1 RSF	
	Cylinder	Sphere
0.8	0.96	0.95
0.6	0.93	0.89
0.4	0.89	0.84
0.2	0.86	0.79

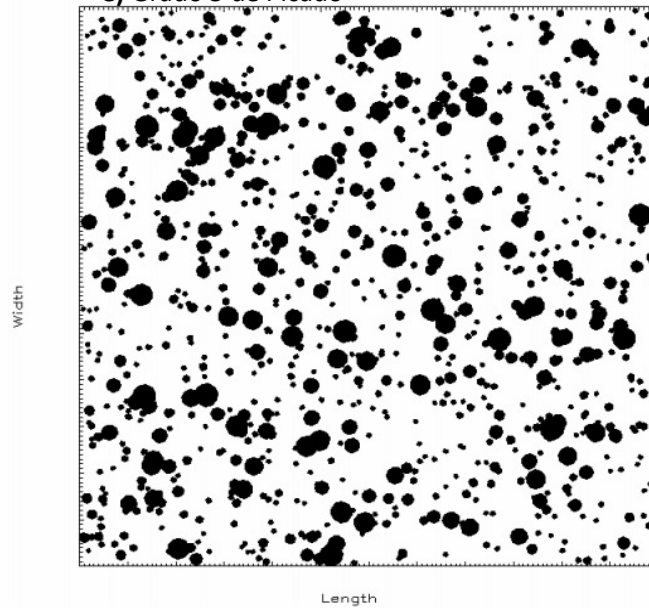
d) Grado 4 de Picado



Note: The scale of this figure is 150 mm by 150 mm (6 in by 6 in)

R_{rel} , see Equation (6.3)	Level 1 RSF	
	Cylinder	Sphere
0.8	0.95	0.93
0.6	0.90	0.86
0.4	0.85	0.79
0.2	0.79	0.72

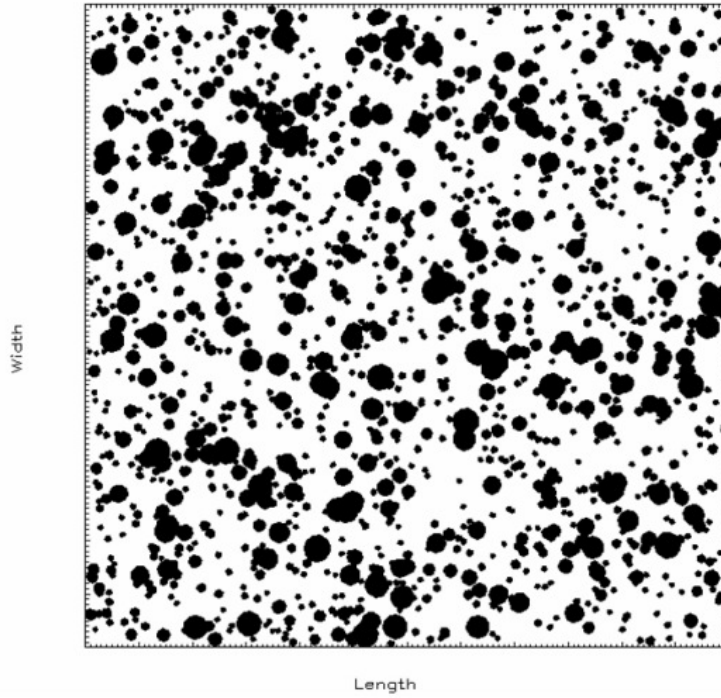
e) Grado 5 de Picado



Note: The scale of this figure is 150 mm by 150 mm (6 in by 6 in)

R_{rel} , see Equation (6.3)	Level 1 RSF	
	Cylinder	Sphere
0.8	0.93	0.91
0.6	0.85	0.81
0.4	0.78	0.72
0.2	0.70	0.62

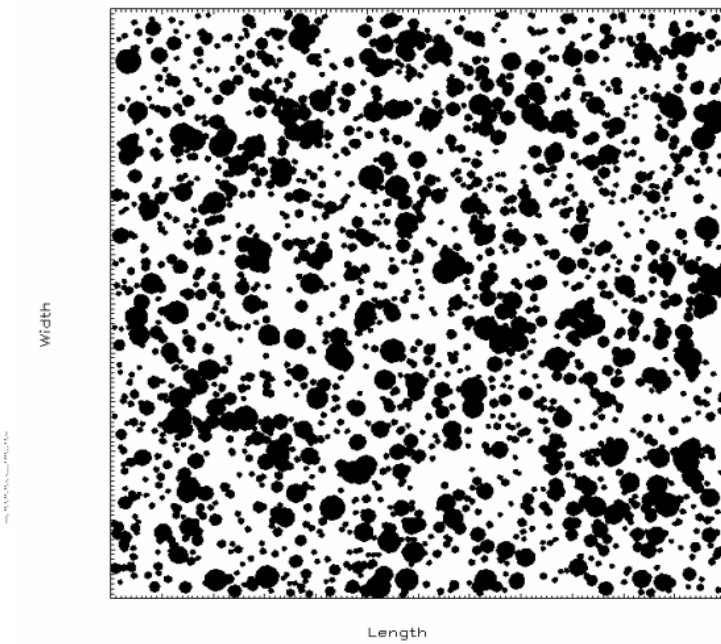
f) Grado 6 de Picado



Note: The scale of this figure is 150 mm by 150 mm (6 in by 6 in)

R_{rel} , see Equation (6.3)	Level 1 RSF	
	Cylinder	Sphere
0.8	0.91	0.89
0.6	0.82	0.78
0.4	0.73	0.67
0.2	0.64	0.56

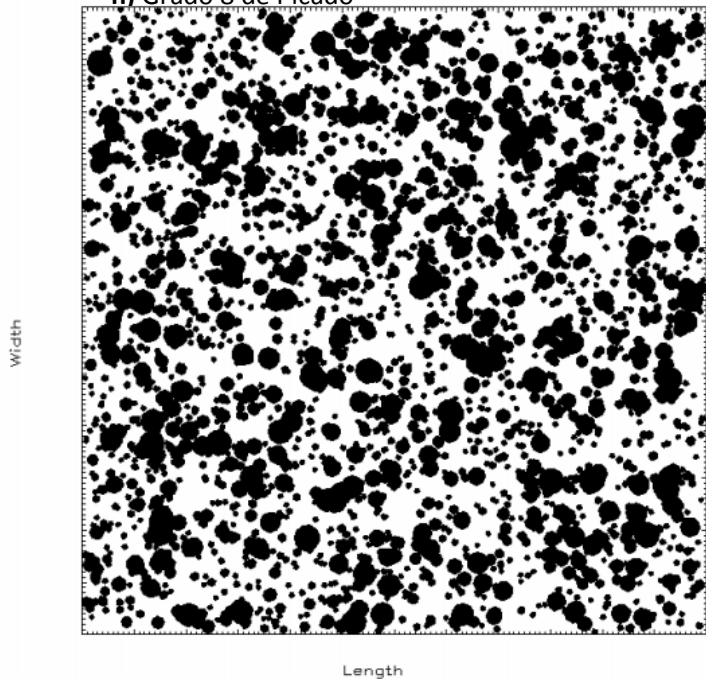
g) Grado 7 de Picado



Note: The scale of this figure is 150 mm by 150 mm (6 in by 6 in)

R_{rel} , see Equation (6.3)	Level 1 RSF	
	Cylinder	Sphere
0.8	0.89	0.88
0.6	0.79	0.76
0.4	0.68	0.63
0.2	0.58	0.51

h) Grado 8 de Picado



Note: The scale of this figure is 150 mm by 150 mm (6 in by 6 in)

R_{ms} , see Equation (6.3)	Level 1 RSF	
	Cylinder	Sphere
0.8	0.88	0.87
0.6	0.77	0.74
0.4	0.65	0.60
0.2	0.53	0.47

Fuente: API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service Figure 6.3-Figure 6.10

1.6.4. DAÑOS POR HIDRÓGENO

Procedimiento de evaluación para aceros ferríticos de baja resistencia con agrietamiento inducido por hidrogeno (HIC) y ampollas.

No es aplicable a la fragilización por hidrógeno de aceros de alta resistencia.

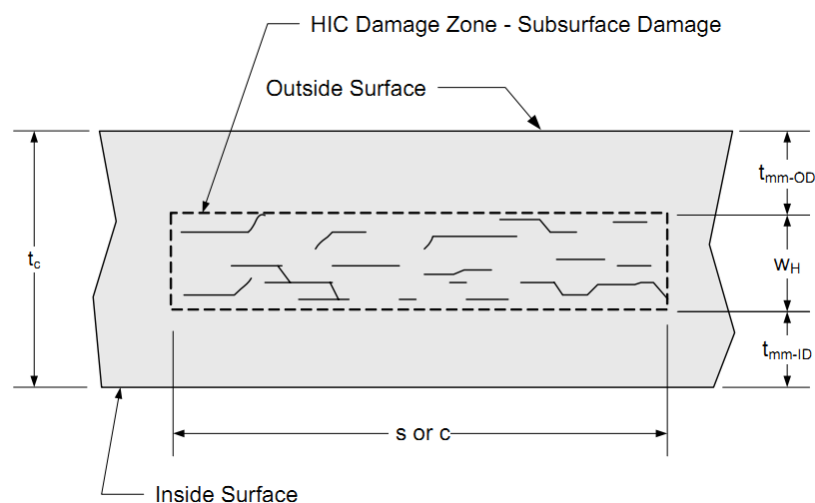
1.6.4.1. (HIC) - Hydrogen induced cracking: el hidrogeno atómico se combina en las inclusiones no metálicas u otras imperfecciones para formar moléculas de hidrogeno que son demasiado grandes para difundir en el acero.

Esta acumulación de hidrógeno interno puede dar lugar a HIC

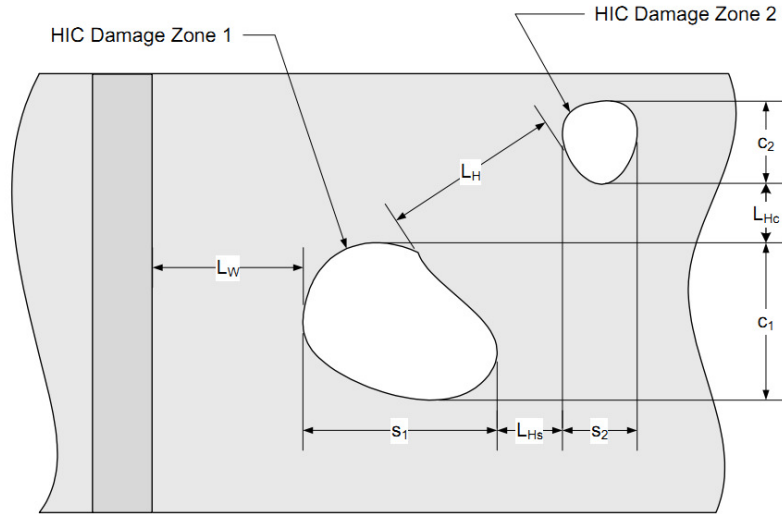
1.6.4.2. (SOHIC) - Stress Oriented hydrogen Cracking: conjunto de grietas orientadas de acuerdo a los planos de esfuerzos que se originan en regiones que han sufrido HIC

1.6.4.3. Ampollas: difusión de H dentro del metal generado por la corrosión (sulfhídrica) que se produce en la superficie del componente en contacto con soluciones acuosas. El H difunde y forma burbujas de H_2 en las discontinuidades y las impurezas. La molécula H_2 es demasiado grande para la difusión y la presión puede causar ampollas e incluso grietas.

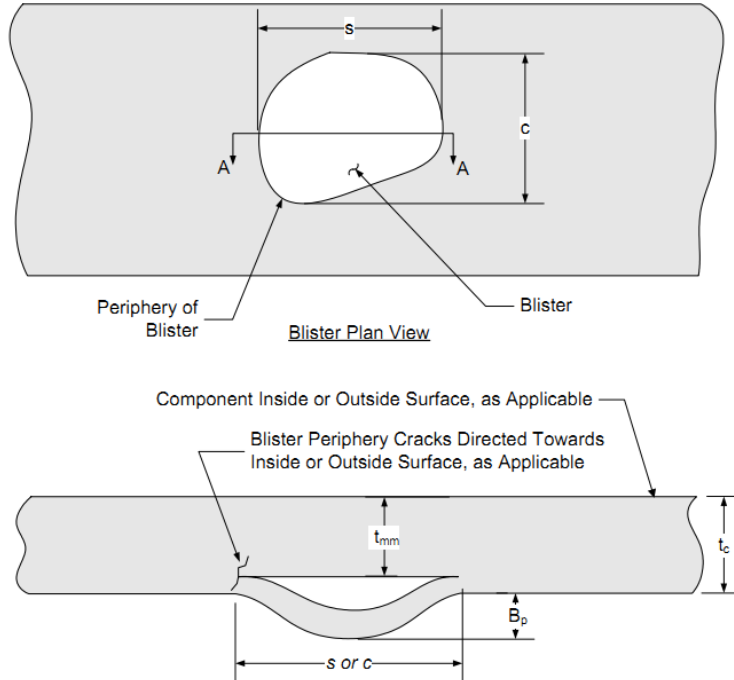
Figura 9. a) Daños HIC



b) Daños HIC en la proximidad de una soldadura



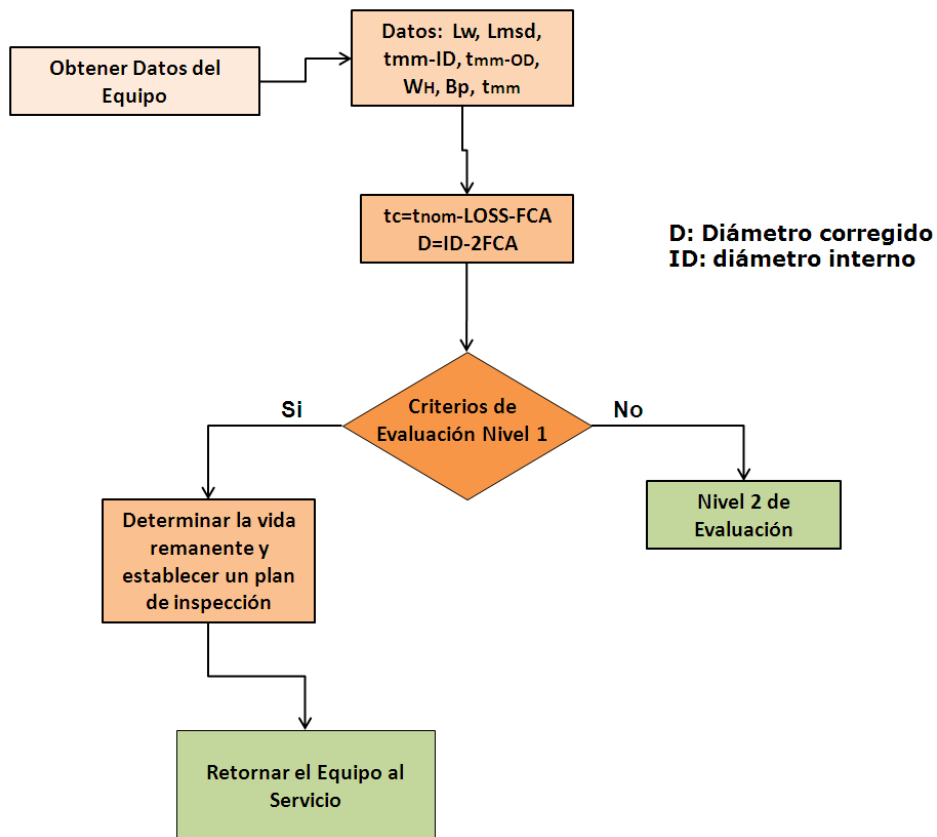
c) Ampollas



Fuente: API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service HIC-Blister

- s:** dimensión longitudinal de HIC
- c:** dimensión circunferencial de HIC
- Lw:** distancia de HIC o ampolla al cordón de soldadura
- Lmsd:** distancia de HIC o ampolla a la discontinuidad principal
- tmm-ID:** distancia de HIC a la superficie interna
- tmm-OD:** distancia de HIC a la superficie externa
- WH:** espesor de HIC
- Bp:** proyección de la ampolla
- tmm:** espesor mínimo medido sin daño

Figura 10. Procedimiento de Evaluación – Daños por Hidrógeno



Fuente. El Autor. Adaptado de API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service

1.6.4.4. Criterios de Evaluación HIC

$$c \leq 0.6\sqrt{Dt_c}$$

$$s \leq 0.6\sqrt{Dt_c}$$

$$t_{mm-ID} \geq 0.20t_c$$

$$w_H \leq \min\left[\frac{t_c}{3}, 13mm(0.5in)\right]$$

$$L_w \leq \max[2t_c, 25mm(1.0in)]$$

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

1.6.4.5. Criterios de Evaluación Ampollas

$$\max[s, c] \leq 0.6\sqrt{Dt_c}$$

$$\max[s, c] \leq 2.0 pu lg$$

$$t_{mm} - FCA \geq 0.5t_c$$

$$B_p \leq 0.10 \cdot \min[s, c]$$

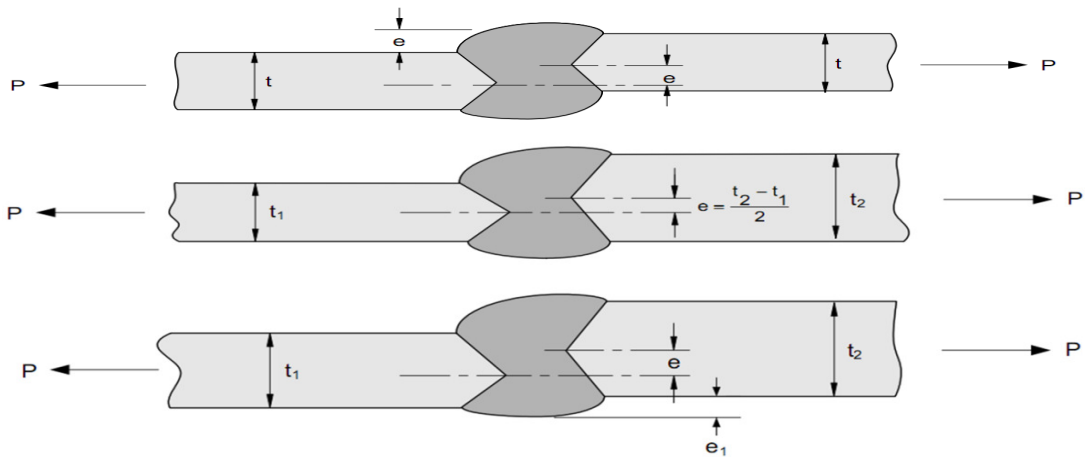
$$L_w \leq \max[2t_c, 25mm(1.0in)]$$

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

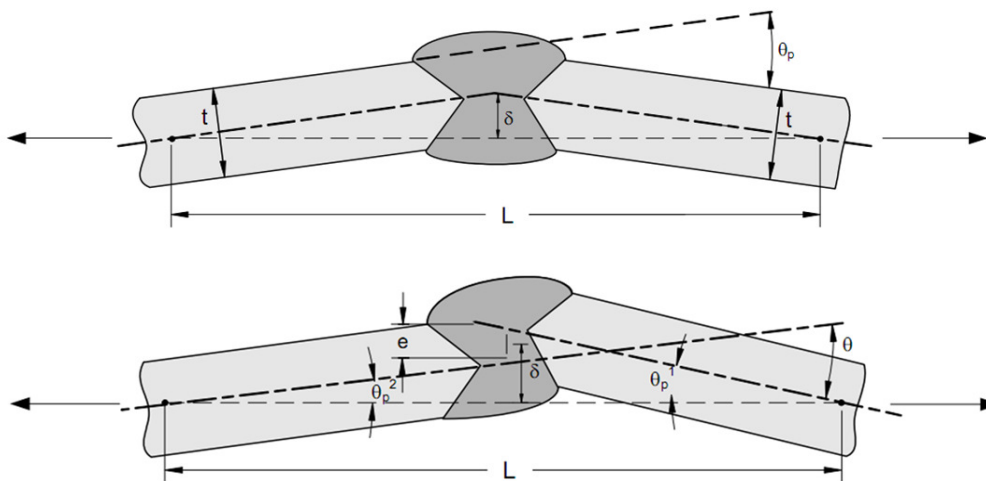
1.6.5. DESALINEACIÓN DE SOLDADURA Y DISTORSIONES

Las irregularidades incluyen desalineación de juntas soldadas y distorsiones geométricas tales como abombamientos y protuberancias

Figura 11. a) Desalineamiento del eje central de soldadura en las uniones soldadas a tope en placas planas

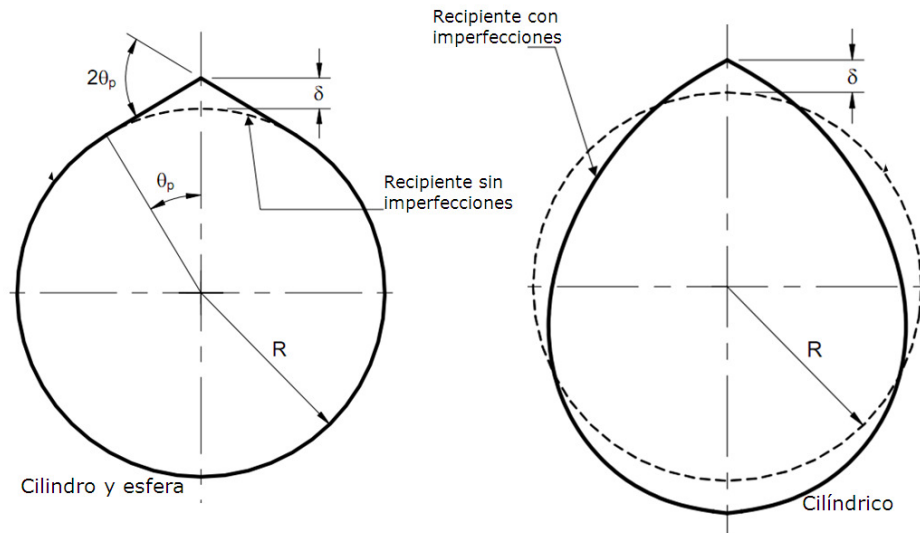


b) Desalineación angular en juntas soldadas a tope en placas planas



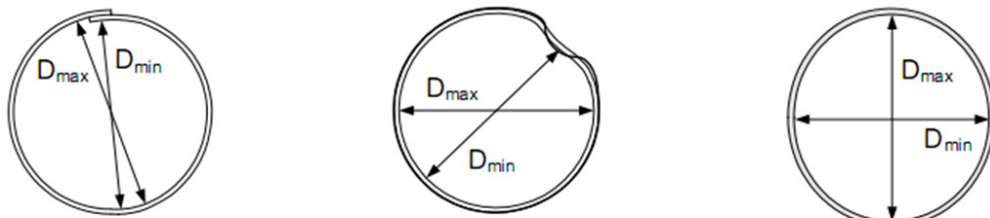
Fuente: API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service figure 8.2-figure 8.4

Figura 12. Desalineación angular en un recipiente cilíndrico de soldadura longitudinal y soldadura circunferencial en un recipiente esférico

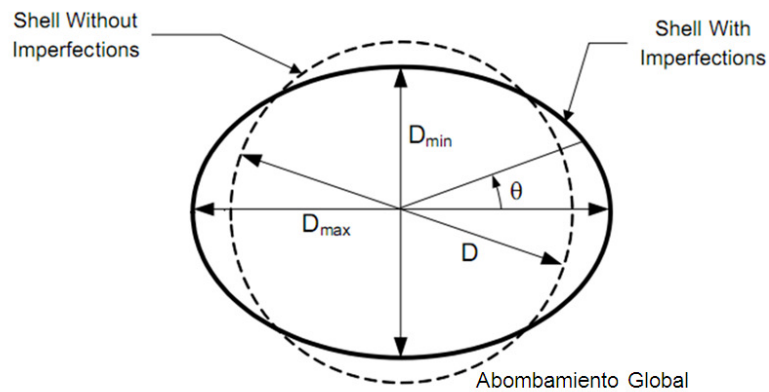


Fuente. Figure 8.5 – Angular Misalignment in a Cylindrical Shell Longitudinal Weld and Spherical Shell Circumferential Weld

Figura13. Abombamiento

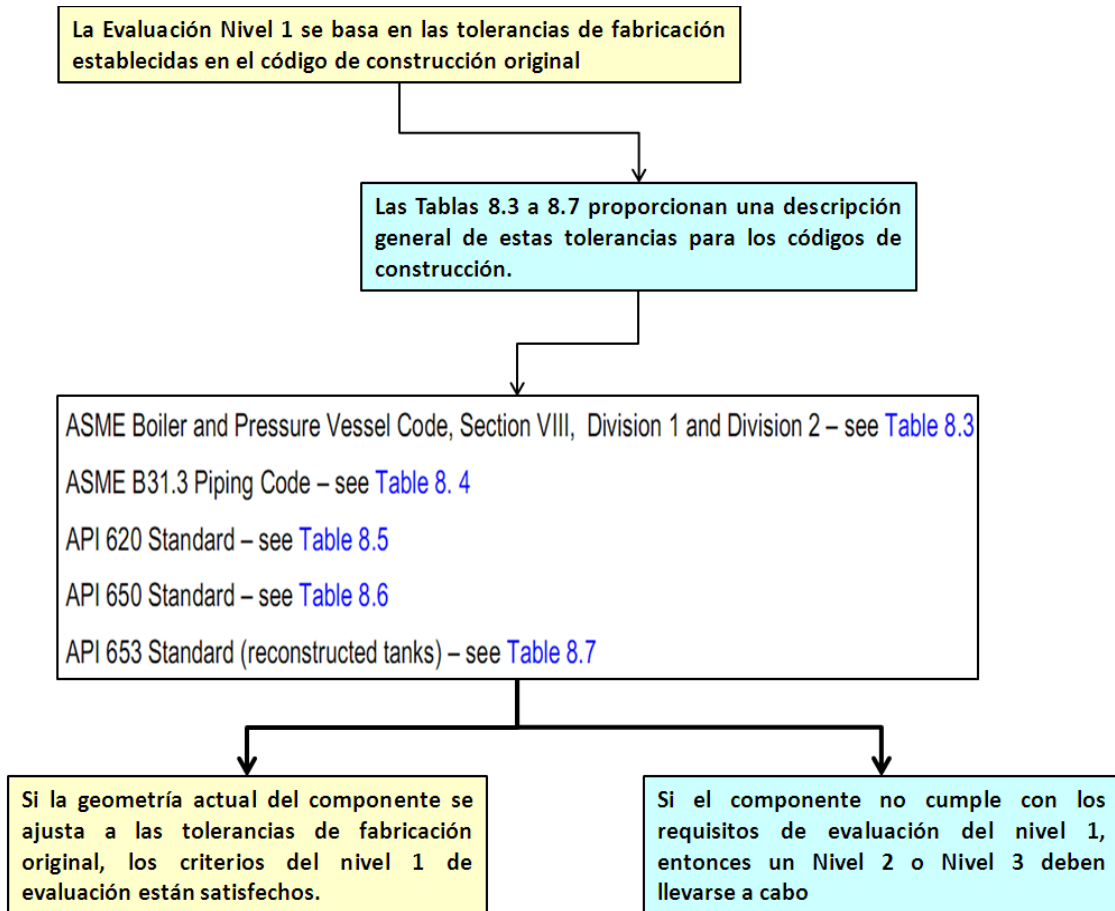


Ejemplos de las diferencias entre el diámetro máximo y mínimo en los recipientes cilíndricos, cónicos y esféricos



Fuente: API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service Global Circumferential Out-Of-Roundness

Figura 14. Procedimiento de Evaluación - Desalineamiento de Soldadura y Distorsiones



Fuente. El Autor. Adaptado de API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service

Tablas 8.3, 8.4, 8.5, 8.6 y 8.7 (Anexo C)

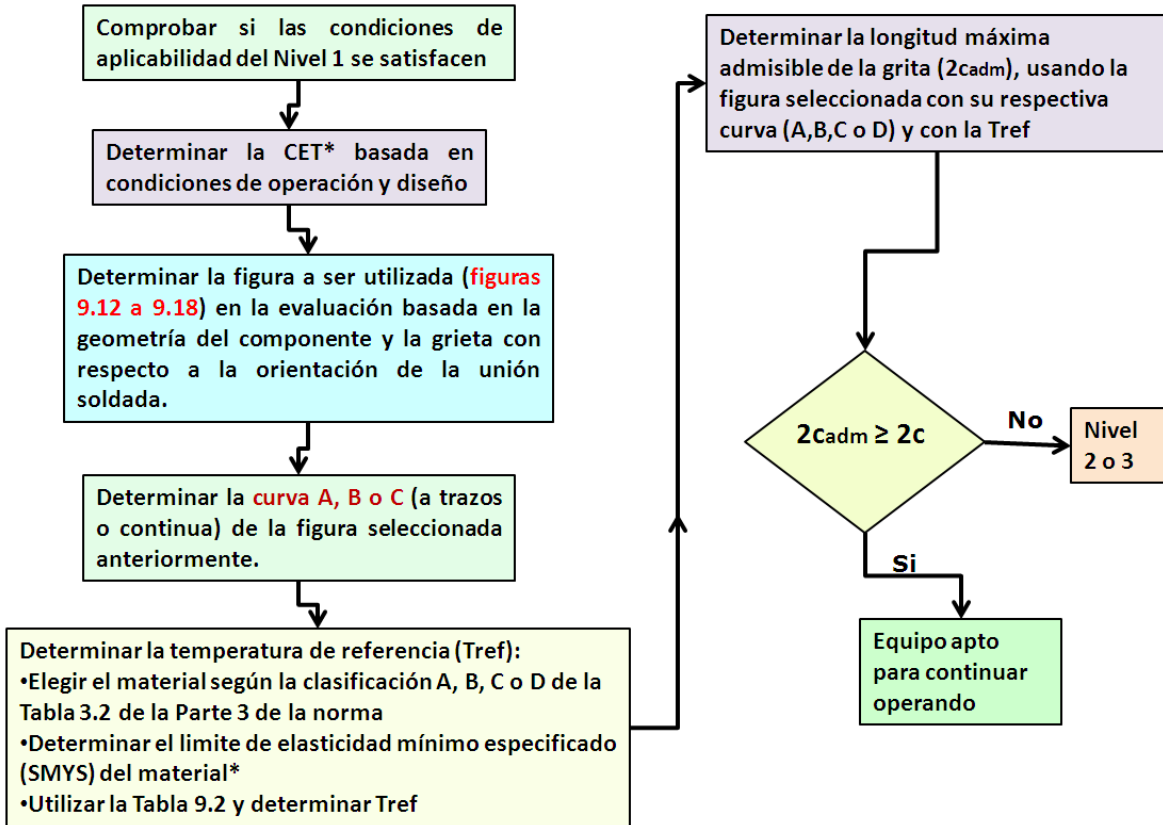
1.6.6. GRIETAS

Esta sección proporciona directrices para evaluar si los equipos: recipientes a presión, tuberías y tanques, sometidos a presión interna, construidos con aceros al carbono o aceros de baja aleación, que contienen grietas, puede fallar frágilmente debido al colapso plástico de la sección donde la grieta está localizada.

1.6.6.1. Aplicabilidad:

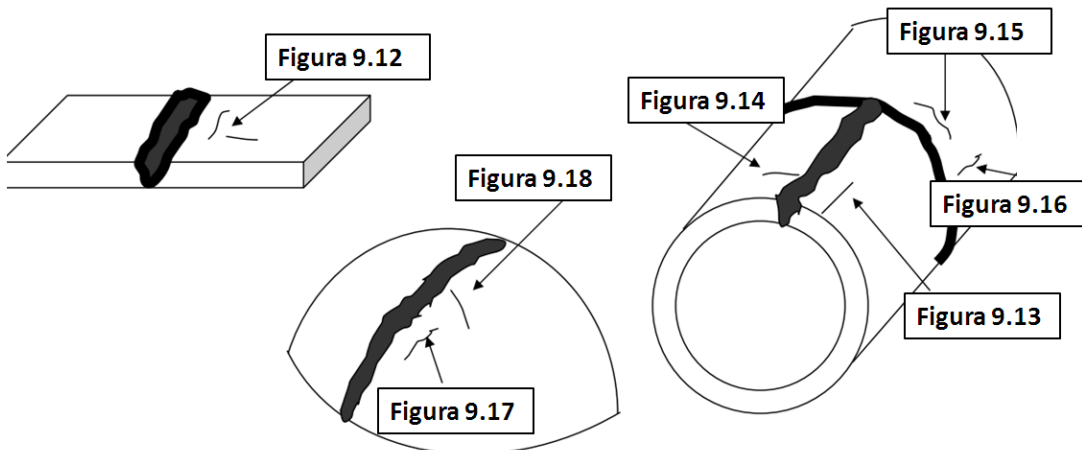
- El espesor del componente en la ubicación de la falla debe ser menor de 38 mm (1.5 pulg)
- La longitud máxima admisible de la grieta es de 200 mm
- La grieta se debe encontrar a una distancia mayor o igual a $1,8\sqrt{D \cdot t}$ de cualquier discontinuidad estructural importante en donde D es el diámetro interior y t es el espesor actual de los componentes.
- La relación $R/T \geq 5$ en donde R es el radio interior y t es el espesor de los componentes.
- Los materiales deben tener una tensión admisible de diseño menor 172MPa (25kpsi), los límites mínimos especificados de elasticidad (S_y) y de resistencia a la tracción (S_u) deben ser menor o igual a 276 MPa (40 ksi) y menor o igual a 483 MPa (70 ksi) respectivamente.

Figura 15. Procedimiento de Evaluación - Grietas



* Datos del Equipo
2c: Longitud de la grieta medida

- Grieta paralela a la soldadura en una placa plana (Figura 9.12)
- Grieta paralela a la soldadura longitudinal en una concha cilíndrica (Figura 9.13)
- Grieta perpendicular a la soldadura longitudinal en una concha cilíndrica (Figura 9.14)
- Grieta paralela a la soldadura circunferencial en una concha cilíndrica (Figura 9.15)
- Grieta perpendicular a la soldadura circunferencial en una concha cilíndrica (Figura 9.16)
- Grieta paralela a la soldadura circunferencial en una concha esférica (Figura 9.17)
- Grieta perpendicular a la soldadura circunferencial en una concha esférica (Figura 9.18)



Curvas Contenidas en las Figuras 9.12 a 9.18 de la norma:

Curva A: Grieta en el metal base

Curva B: Grieta en el metal de soldadura sujeto a PWHT

Curva C: Grieta en el metal de soldadura sin PWHT

Para $t \leq 25$ mm (1 pulg)

Para $25 \text{ mm} < t \leq 38$ mm

Curva continua:

Curva continua:

$a \leq t/4$

$a \leq 6$ mm

Curva discontinua (trazos):

Curva discontinua (trazos):

$a > t/4$

$a > 6$ mm

Donde:

t: espesor del equipo

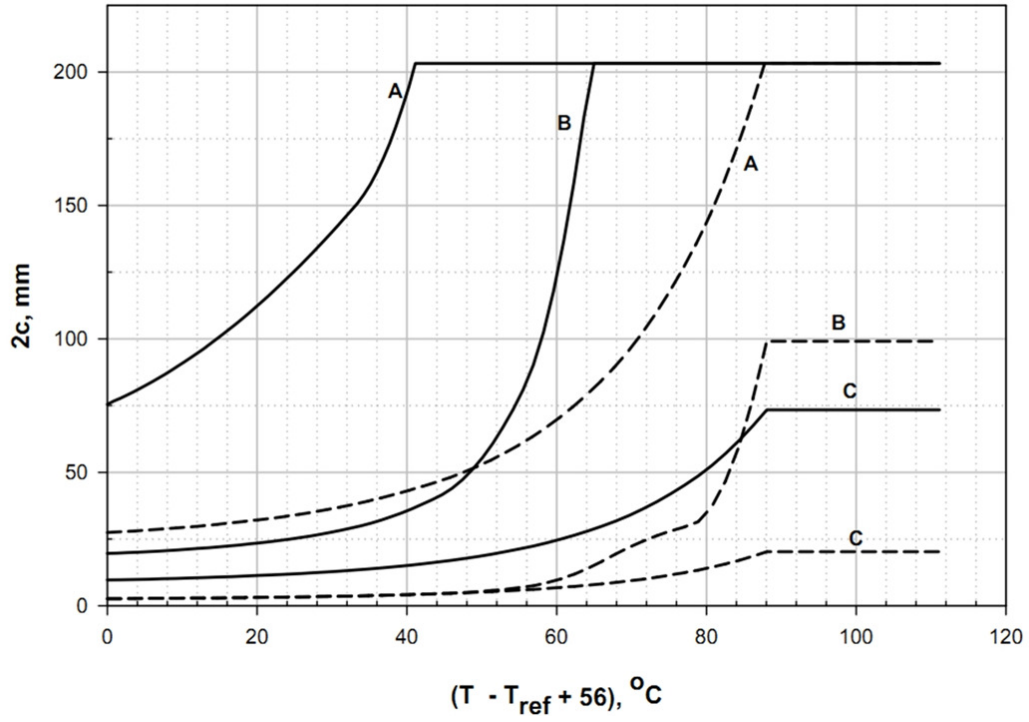
a: profundidad de la grieta

1.6.6.2. Cálculo Temperatura de referencia:

1. Elegir el tipo de material A, B, C o D con la tabla 3.2 de la norma. Figura 1
2. Conociendo el tipo de material y el límite de elasticidad mínimo especificado (MYS) ir a la tabla 9.2 de la norma y hallar la temperatura de referencia. Tabla 3.

Con la temperatura de referencia y el tipo de material, determinamos la longitud máxima admisible de la grieta (**2c**) en la figura seleccionada para la evaluación (figura 9.12 a 9.18 de la norma). Un ejemplo de estas gráficas es la figura 16.

Figura 16. Ejemplo de las figuras usadas para la evaluación: *Grieta paralela a la soldadura en una placa plana*



Fuente: API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service Figure 9.12 M – Level 1 Assessment – Flat Plate

Tabla 3. Tabla usada para calcular la Temperatura de referencia

Carbon Steels – 20 Joule or 15 ft-lb Transition Temperature for Each ASME Exemption Curve				
MYS (MPa)	ASME Exemption Curve			
	A (°C)	B (°C)	C (°C)	D (°C)
200	42	21	0	-15
210	38	17	-4	-18
220	36	15	-7	-21
230	33	12	-9	-23
240	31	10	-11	-26
260	27	6	-15	-29
280	24	3	-18	-32
300	22	1	-21	-35
320	19	-2	-23	-37
340	17	-4	-25	-39
360	15	-6	-27	-41
Low Alloy Steels – 27 Joule or 20 ft-lb Transition Temperature for Each ASME Exemption Curve				
MYS (MPa)	ASME Exemption Curve			
	A (°C)	B (°C)	C (°C)	D (°C)
200	55	33	12	-2
210	50	29	8	-7
220	46	25	4	-11
230	43	22	1	-14
240	40	19	-2	-16
250	38	17	-4	-19
260	36	15	-6	-21
270	34	13	-8	-23
280	32	11	-10	-24
290	31	10	-11	-26
300	30	8	-13	-27
310	28	7	-14	-28
320	27	6	-15	-30
330	26	5	-16	-31
340	25	4	-17	-32
360	23	2	-19	-34
380	21	0	-21	-36
400	19	-2	-23	-37
420	18	-3	-24	-39
440	16	-5	-26	-40
460	15	-6	-27	-42
480	14	-7	-28	-43
500	13	-8	-29	-44
520	12	-9	-30	-45
540	11	-10	-31	-46
560	10	-11	-32	-47

Fuente: API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service Table 9.2M – Reference Temperature

1.6.7. DAÑOS POR FUEGO

Procedimiento de evaluación que emplea la observación visual de la degradación estructural causada por el fuego y el calor radiante en los componentes, y el deterioro menos evidente de sus propiedades mecánicas como resistencia, ductilidad y dureza.

Formas de daños a inspeccionar:

- Distorsión mecánica y daños estructurales
- Degradación de las propiedades mecánicas
- Degradación de la microestructura metalúrgica
- Degradación de la resistencia a la corrosión
- Susceptibilidad a la fragilización causada por el medio ambiente y agrietamiento
- Daños causados por fluencia
- Presencia de grietas en los muros de contención
- Modificación de la distribución de tensiones residuales

Figura 17. Procedimiento de Evaluación-Daños por fuego

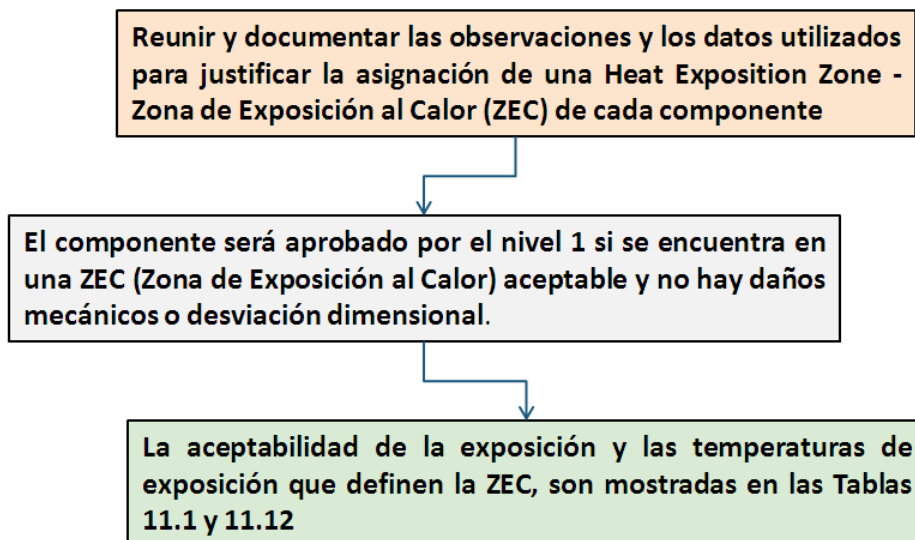


Figura 19. El Autor. Adaptado de API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service

1.6.7.1. Descripción de las zonas de exposición al calor para evaluar daños por fuego

Tabla 4. Zonas de exposición al calor

Heat Exposure Zone	Description
I	Ambient temperature during fire event, no fire exposure
II	Ambient to 65°C (150 °F); smoke and water exposure
III	65°C to 205°C (150 °F to 400°F); light heat exposure
IV	> 205°C to 425°C (>400 °F to 800°F); moderate heat exposure
V	> 425°C to 730°C (>800 °F to 1350°F); heavy heat exposure
VI	> 730°C (>1350 °F); severe heat exposure

Fuente. API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service

1.6.7.2. Niveles de exposición al calor (admisibles) para materiales de construcción

Tabla 5. Niveles de exposición al calor

Materials	Typical ASTM Specifications For Pressurized Components	Levels Which Satisfy The Level 1 Assessment Criteria
Carbon Steels	A36, A53, A105, A106, A131, A139, A181, A216, A234, A266, A283, A285, A333, A350, A352, A420, A515, A516, A537, A671, A672, API 5L	I, II, III, IV
Low Alloy Steels	A182, A217, A234, A335, A336, A387, A691	I, II, III, IV
Austenitic Stainless Steels (1)	A312, A358, A240, A403, A351	I, II, III, IV
Alloy 20	B366, B462, B463, B464, B729, B744	I, II, III, IV
Alloy 400	B127, B164, B165, B366, B564, A494	I, II, III
Duplex Stainless Steels (2) Alloy 2205 Alloy 2507	A182, A240, A789, A790, A815 (UNS S31803, UNS J92205) (2507 – UNS S39275)	I, II
Alloy 800, 800H	B163, B366, B407, B409, B564	I, II, III, IV
Alloy 825	B163, B366, B423, B424, B704, B705	I, II, III, IV
Alloy 600	B163, B168, B366, B564	I, II, III, IV
Alloy 625	B167, B366, B443, B444, B564, A494	I, II, III, IV
Alloy C-276	B366, B575, B622	I, II, III, IV
Copper Alloys	B68, B96, B111, B169, B171, B395, B584	I, II
Aluminum Alloys	B209, B210, B241, B247	I, II
Precipitation Hardened Alloy Steels (3)	17-4PH, 17-7PH	I, II, III

Fuente. API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service

1.6.8. LAMINACIONES

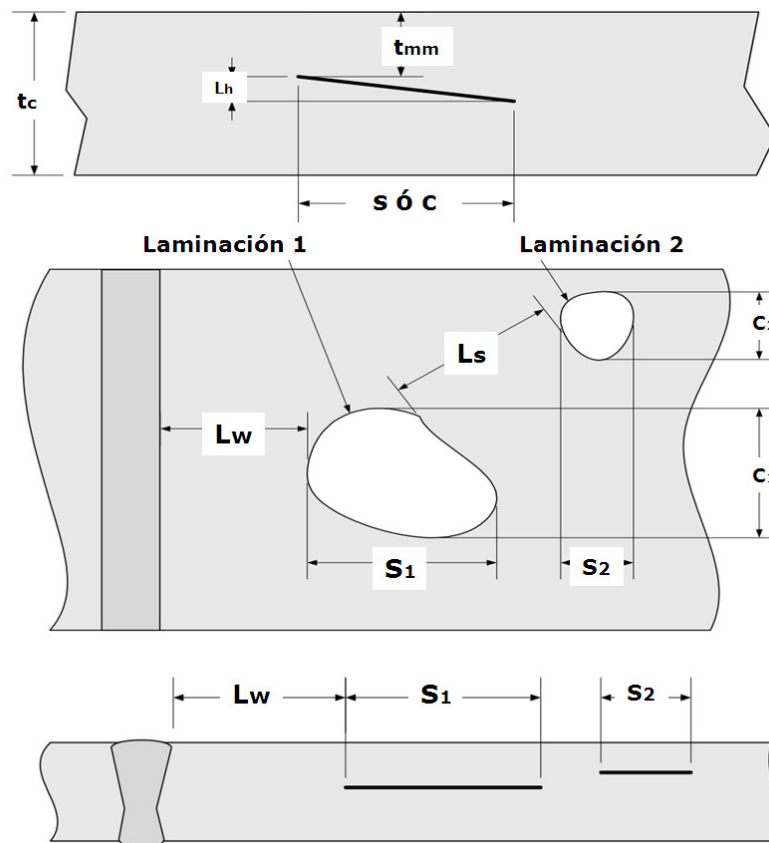
Las laminaciones son planos formados por la falta de fusión dentro de una placa metálica, por lo general paralelos a sus superficies, y como resultado de su proceso de fabricación

Las laminaciones reducen la resistencia de la placa cuando se somete a esfuerzos de flexión, compresión o tracción normales al plano de la laminación.

Por lo general no disminuyen la resistencia de la placa cuando:

- Se encuentran lejos de las discontinuidades geométricas y estructurales.
- Los planos son paralelos a las superficies de las placas

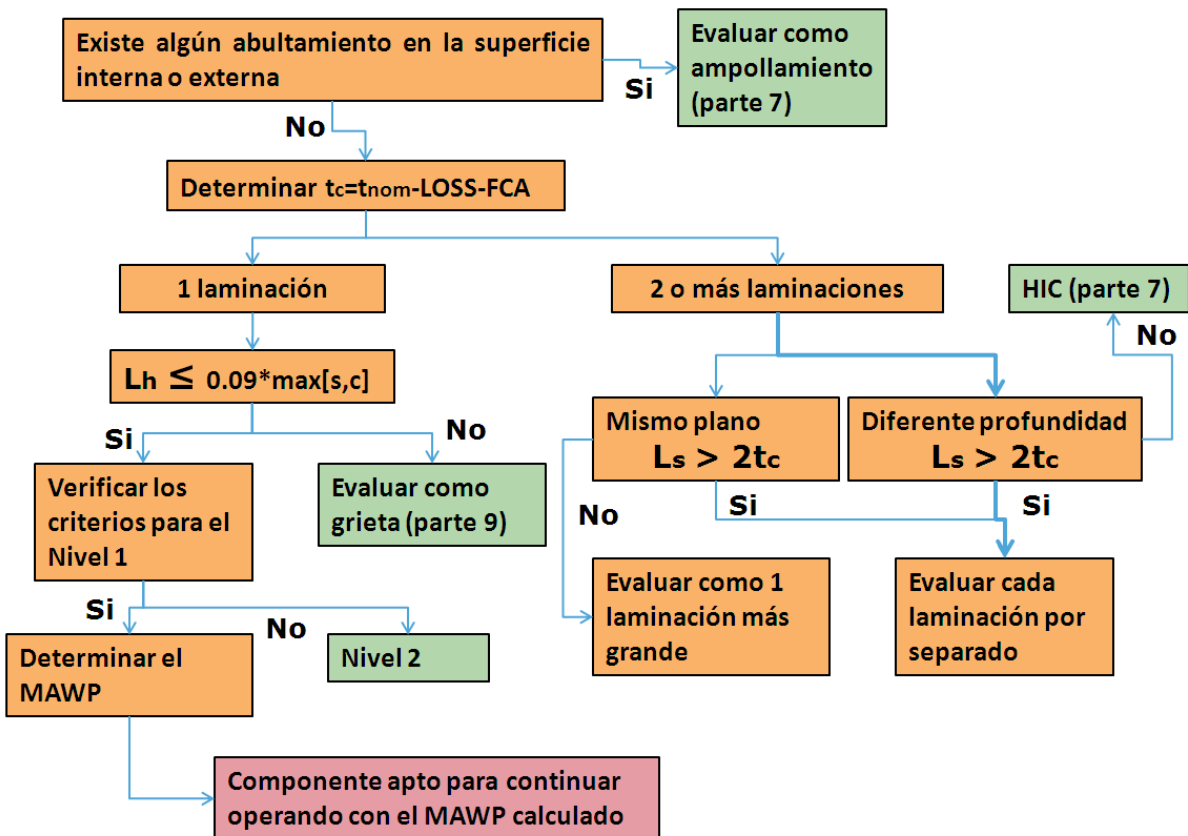
Figura 18. Medidas del defecto, laminaciones



Fuente: API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service Figure 13.2 – Typical Lamination

- s:** dimensión longitudinal de la laminación
- c:** circunferencial de la laminación
- Ls:** distancia entra la laminación 1 y la laminación 2
- Lh:** altura de la laminación
- Lw:** distancia de la laminación al cordón de soldadura
- Lmsd:** distancia de la laminación a la discontinuidad principal
- tmm:** espesor mínimo remanente sin daño

Figura 19. Procedimiento de Evaluación - Laminaciones



Fuente. El Autor. Adaptado de API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service

1.6.8.1. Criterios de Evaluación Laminaciones

$$L_w \leq \max[2t_c, 25\text{mm}(1.0\text{in})]$$

$$L_h \leq 0.09 \cdot \max[s, c]$$

$$t_{mm} \geq 0.10t_c$$

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

En ambiente con hidrogeno, también se debe cumplir:

$$s \leq 0.6\sqrt{Dt_c}$$

$$c \leq 0.6\sqrt{Dt_c}$$

2. DISEÑO DEL SOFTWARE (SOFINT*) PARA LA ENSEÑANZA DE LA NORMA API-579 FITNESS-FOR-SERVICE

2.1. REQUERIMIENTOS DEL USUARIO

Es necesario cumplir con unos requisitos que se refieren a las habilidades, destrezas y los conocimientos que los estudiantes deben poseer antes de hacer uso de esta herramienta computacional, se debe identificarlos y asegurarse que se cumplen para lograr que la utilización de este sea óptima y así poder obtener los objetivos planteados con el uso del software.

Los requisitos necesarios para iniciar la interacción con el software son:

Conocimiento Básico de la Norma: el estudiante requiere estar cursando como mínimo la asignatura Análisis e Integridad de Equipos, o tener conocimiento básico de la estructura y desarrollo de la norma.

Experiencia mínima en el manejo del computador: el estudiante debe tener nociones básicas en el manejo del hardware y sus periféricos.

2.2. SECCIONES PRINCIPALES DEL SOFTWARE

Las secciones principales que contiene el software (mecanismos de daño) son cubiertos por la asignatura Análisis e Integridad de Equipos a través de la enseñanza de la norma API 579-2/ASME Fitness-For-Service.

*Nombre del software

Secciones del Software – SOFINT

Secciones de SOFINT (Software de Integridad)
Fractura Frágil
Corrosión General/Localizada
Corrosión localizada
Daños por Hidrogeno
Desalineación de Soldadura y Distorsiones
Daños por Fuego
Grietas
Laminaciones
Daños por Creep

2.2.1. Descripción de las secciones del software

- Cada sección contiene un formato de entrada de datos del usuario para el análisis de Recipientes a Presión, Tuberías y Tanques de Almacenamiento

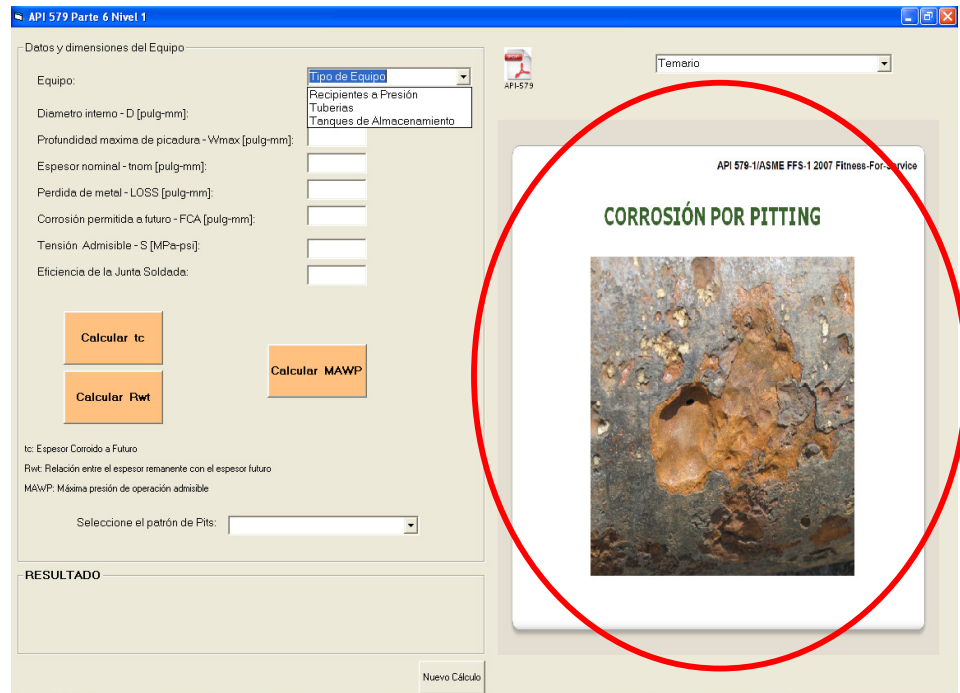
Figura 20. Ingreso de datos

The screenshot shows a software window titled "API 579 Parte 6 Nivel 1". The main content area is titled "Datos y dimensiones del Equipo". It contains the following fields and controls:

- Equipo:** A dropdown menu labeled "Tipo de Equipo" with a list of options: "Recipientes a Presión", "Tuberías", and "Tanques de Almacenamiento".
- Diametro interno - D [pulg-mm]:** A text input field.
- Profundidad maxima de picadura - Wmax [pulg-mm]:** A text input field.
- Espesor nominal - tnom [pulg-mm]:** A text input field.
- Perdida de metal - LOSS [pulg-mm]:** A text input field.
- Corrosión permitida a futuro - FCA [pulg-mm]:** A text input field.
- Tensión Admisible - S [MPa-psi]:** A text input field.
- Eficiencia de la Junta Soldada:** A text input field.

- Una ventana que contiene los fundamentos teóricos e información básicos para la evaluación y ejemplos de aplicación.

Figura 21. Ventana de información



- Un botón de enlace directo al manual de usuario (anexo A) para cualquier consulta del usuario respecto al software.

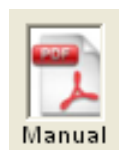
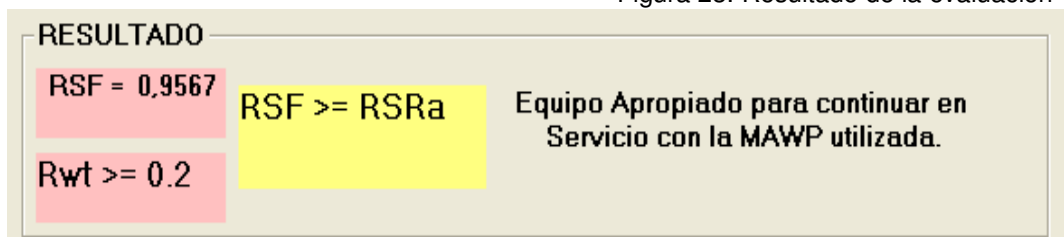


Figura 22. Acceso directo al manual de usuario

- Un cuadro donde se muestra el resultado de la evaluación generado por el software.

Figura 23. Resultado de la evaluación



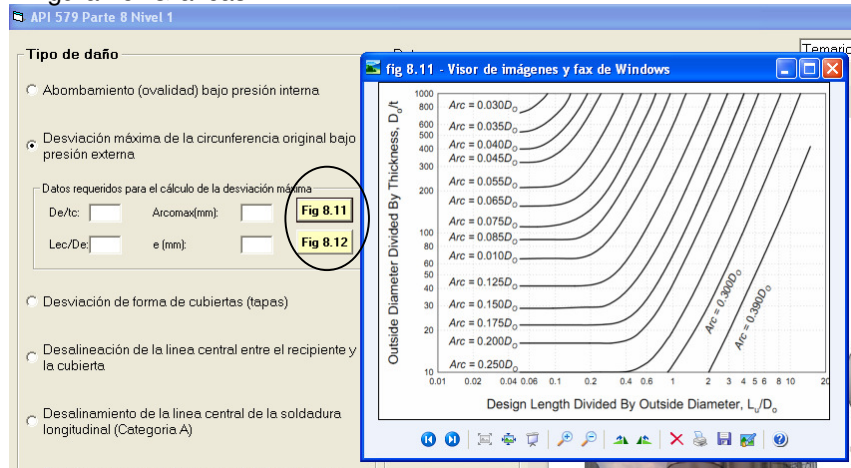
- Un botón de enlace que me permite limpiar pantalla para la realización de una nueva evaluación.



Figura 24. Botón limpiar pantalla

- Adicional la sección de corrosión por picado, desalineación de soldadura y distorsiones, y grietas tienen acceso directo a gráficas que son indispensables para la evaluación.

Figura 25. Gráficas



2.3. REQUERIMIENTOS TÉCNICOS

Las características mínimas del equipo y soporte lógico con lo que se debe contar para la utilización del software:

- Procesador Intel Pentium de 200 MHz o procesadores equivalentes que corran Windows 98 SE, NT 4.0, ME, 2000, XP o 7.
- RAM 128 MB
- Disco duro 16 GB (espacio libre 85MB)

- Unidad CD ROM
- Tarjeta de sonido 16 bits
- Tarjeta de video de 32 megas
- Monitor con resolución de 1152 x 864, con color de 16 bits.

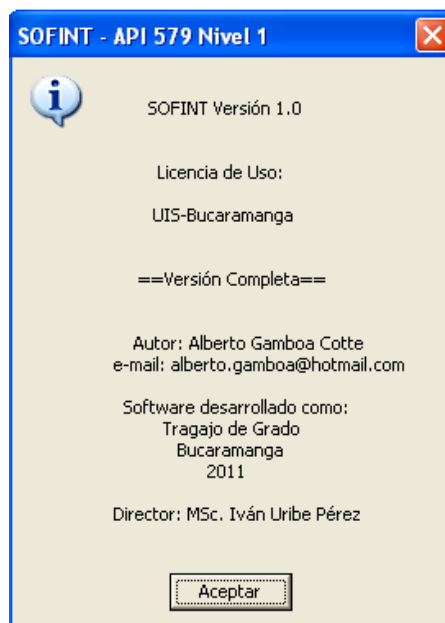
2.4. DISEÑO LÓGICO

La estructura lógica del software expresa los procedimientos que el programa debe tener y sus interrelaciones de modo que cumpla con las funciones definidas, de manera que permita al usuario recorrer la estructura completa del software.

El software de integridad estructural (SOFINT), desarrollado en este proyecto muestra la siguiente estructura lógica:

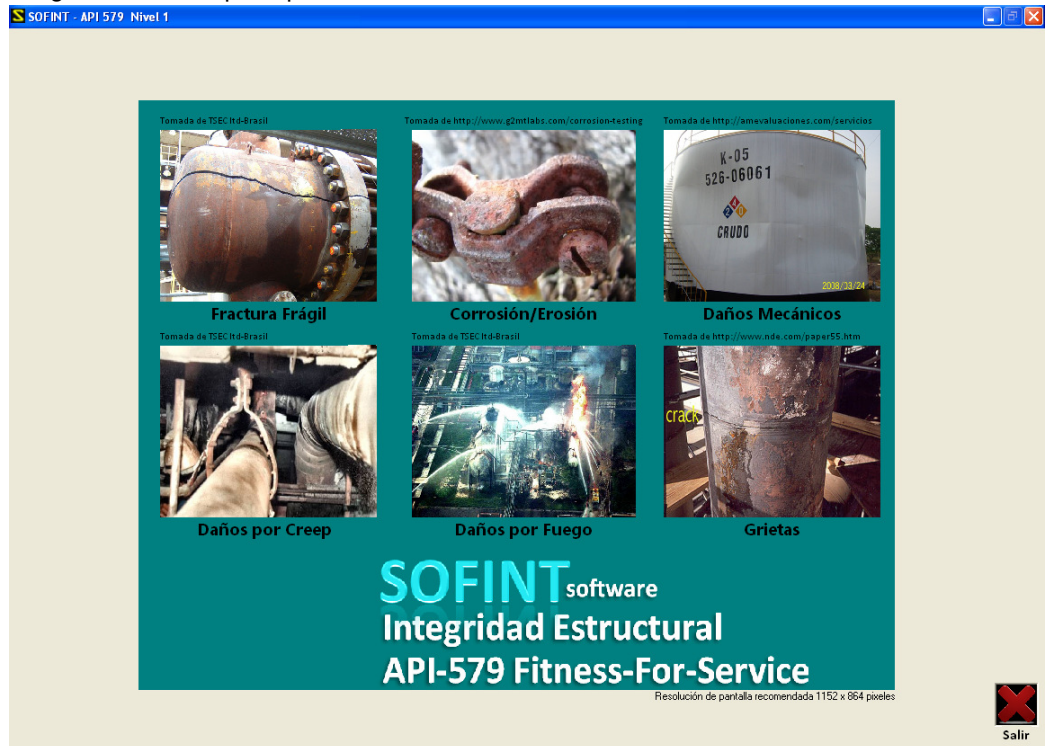
- Inicia con una ventana de presentación donde indica información básica del proyecto como el nombre del software, autor, director y fecha. En la parte inferior aparece el botón “Aceptar” que da acceso al material.

Figura 26. Ventana de presentación



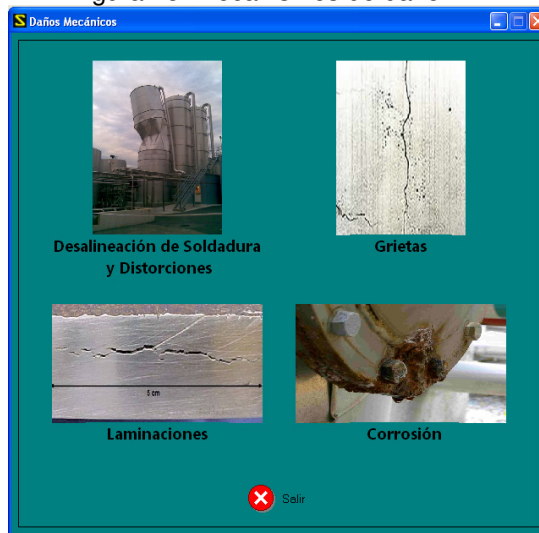
- Una vez picado este botón encontramos el menú principal en donde aparecen los 6 vínculos a cada una de las clases de daño que se puedan encuentran en una evaluación: Fractura frágil, corrosión/erosión, grietas, daños por fuego, daños por creep y daños mecánicos.

Figura 27. Menú principal



- Al acceder a cualquiera de los vínculos aparece una ventana con los posibles mecanismos de daño a encontrar en la evaluación de esta clase de daño

Figura 28. Mecanismos de daño



- Al acceder a cualquiera de las secciones (mecanismos de daño) aparece el formato para la entrada de datos del usuario, además de los botones con las funciones descritas anteriormente.

Figura 29. Secciones del software

- Para salir del multimedia: en la parte superior derecha aparece el botón SALIR “X” el cual nos permite salir de la aplicación.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Con la realización de este trabajo se demostró como la programación de computadores puede servir para la enseñanza y aplicación de la integridad estructural de una forma más sencilla. En este caso se analiza la norma API 579 en el software desarrollado.
- Se realizo con éxito la herramienta computacional para la enseñanza de la norma de una forma didáctica de fácil comprensión. Con esto se obtienen mejores resultados en la instrucción de la norma y se aplicaron conceptos y conocimientos metalúrgicos en la elaboración de un programa computacional.
- Por medio del software se pueden evaluar los siguientes mecanismos de daño:

Fractura frágil

Pérdida general/localizada de espesor

Corrosión por picado

Daños por hidrogeno

Desalineación de soldadura y distorsiones

Daños por fuego

Grietas

Daños por creep

Laminaciones

- Se estudio la norma API 579 y se puede establecer que en la integridad de equipos es importante tener un amplio conocimiento en el diseño, operación y mantenimiento, ya que son de vital importancia para un correcto análisis de resultados y así garantizar que los equipos que contienen defectos que

han sido identificados durante una inspección pueda seguir operando de manera segura.

- Se recomienda que la persona que utilice el software este por lo menos cursando la materia Análisis e Integridad de Equipos o tenga conocimiento básico de la estructura y desarrollo de la norma.
- Se espera que este trabajo sea el primer paso para la realización de nuevos software de Integridad Estructural dentro de la universidad con el propósito que el aprendizaje del estudiante metalúrgico vaya de la mano con la programación de computadores.

BIBLIOGRAFÍA

- ASME, API 579-1/ASME FFS-1, in Fitness-For-Service. 2007, American Society of Mechanical Engineers.
- British Energy. Assessment of the integrity of structures containing defects. British Energy R-6, 1999.
- INSTITUTE, A. P. (2001). Piping Inspection Code. Inspection, Repair, Alteration, and Rerating of in- service Piping Systems API579 . Washington. D.C, U.S.A.: API Publishing Services.
- Method of assessment for flaws in fusion welded joints with respect to brittle fracture and fatigue crack growth, WES 2805, 1997.
- MPC. Fitness-for-service evaluation procedures for operating pres-sure vessels, tanks, and piping in refinery and chemical service, FFS-26. New York, NY: The Materials Properties Council, October, 1995.
- OTEGUI JOSE LUIS RUBERTIS ESTEBAN, CAÑERIAS Y RECIPIENTES DE PRESION, Editorial EUDEM, 2008.
- Ted L. Anderson, David A. Osage. API 579: a comprehensive fitness-for-service guide. International Journal of Pressure Vessels and Piping 77 (2000) 953-963

ANEXO A. MANUAL DE USUARIO SOFINT



El software SOFINT se concibió como una herramienta que permite evaluar de una forma ágil y ordenada los siguientes mecanismos de daño:

- Fractura Frágil
- Pérdida General/Localizada de Espesor
- Corrosión por Picado
- Daños por Hidrogeno
- Desalineación de Soldadura y Distorsiones
- Daños por Fuego
- Grietas
- Daños por Creep
- Laminaciones

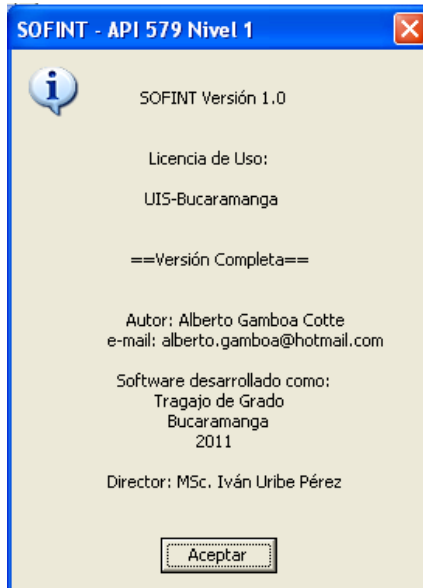
Este software es una aplicación desarrollada bajo ambiente Windows, de fácil manejo para el usuario, bajo la plataforma de programación Visual Basic, versión 6.0, con acceso a un fundamento teórico el cual es elemental para las evaluaciones.

Ingreso a SOFINT

Haciendo click en el archivo ejecutable del software se visualiza la presentación del programa como el siguiente cuadro de dialogo:

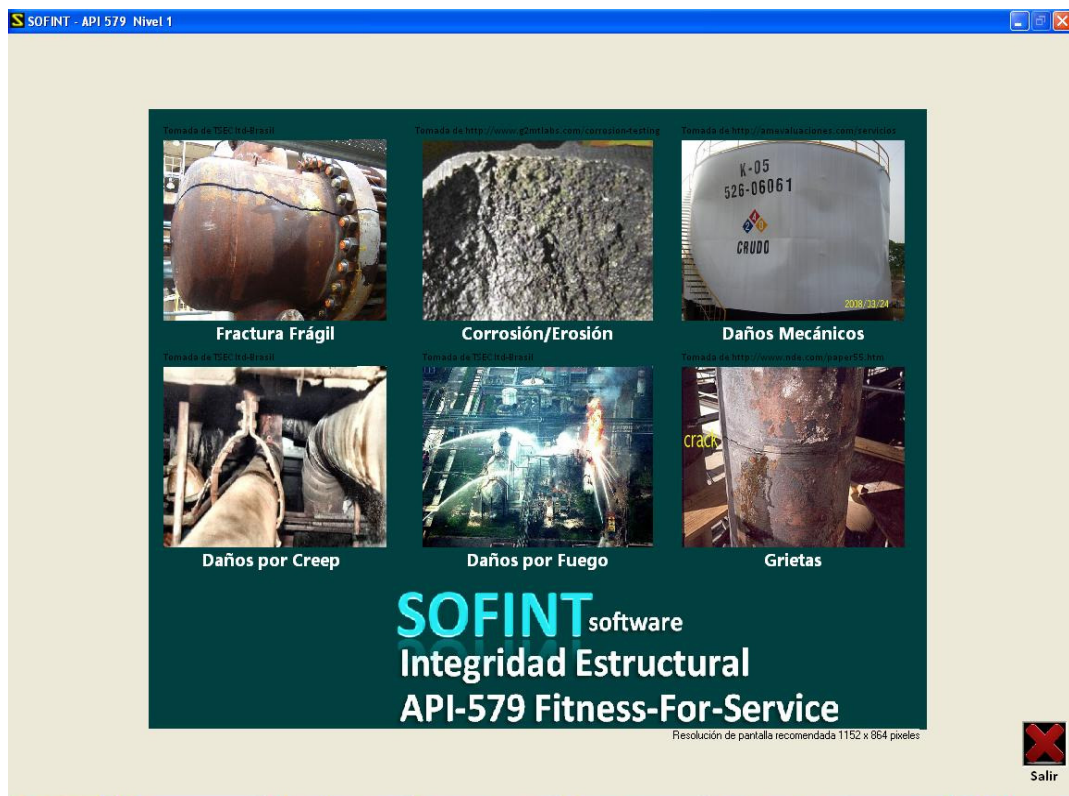


Figura. Ingreso al software.



Al hacer click en “Aceptar” aparece la siguiente ventana

Figura. Menú de entrada

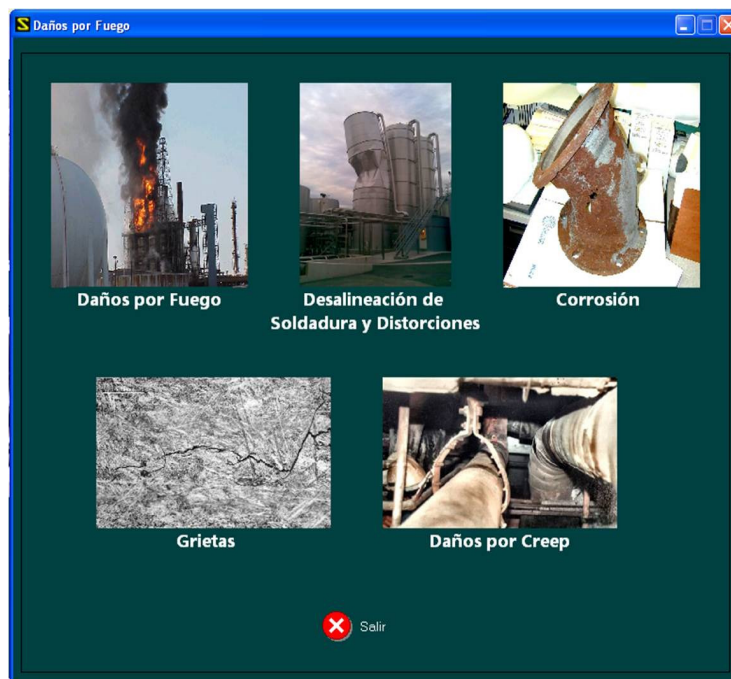


Como se aprecia en la figura anterior, el usuario encuentra los ítems de las diferentes clases de daño que se pueden encontrar en una evaluación:

- Fractura frágil
- Corrosión erosión
- Daños mecánicos
- Daños por creep
- Daños por fuego
- Grietas

El usuario se puede ubicar sobre cada ítem hacer click en el tipo de daño a evaluar; se muestra una ventana con los mecanismos de daños que podemos encontrar en la inspección. Por ejemplo si vamos a evaluar un incendio, es posible encontrar los siguientes mecanismos de daño:

Figura. Mecanismos de daño



Cuando el usuario haga click en uno de los vínculos, directamente se muestra el formato de entrada de datos de la sección correspondiente al mecanismo de daño.

FORMATO DE ENTRADA DE DATOS DEL USUARIO

Las 9 secciones presentan un formato similar, sin embargo se explicara los tipos de datos que el usuario puede introducir, y los datos que el programa genera a partir de estos.

Sección Fractura Frágil

Figura. Fractura frágil

The screenshot shows the 'API 579 Parte 3 Nivel 1' software interface. It features a top navigation bar with 'Recipientes a Presión', 'Tuberías', and 'Tanques'. Below this, there's a field for 'Ingresar el valor del CET (°F):' with a value of 20. The main area is split into two columns: 'Cálculo del MAT' and 'Reducción de MAT'. The 'Cálculo del MAT' section includes input fields for 'tg (pulg.):' (1.0) and 'Material:' (B), a 'Calcular' button, and a resulting 'MAT (°F):' of 30,602. The 'Reducción de MAT' section includes checkboxes for 'Fabricado con materiales P1 Grupo 1 o 2 de ASME', 'Se le realizó un PWHT', and 'Con un espesor nominal <= 1.5 pulg. (38 mm)', a 'Calcular' button, and a resulting 'MAT Reducida (°F):' of 0,602. Below these are two confirmation questions: '¿Desea reducir el MAT?' (Yes/No) and '¿Desea utilizar el nuevo valor reducido del MAT?' (Yes/No). A 'RESULTADO' section shows 'CET >= MAT' and 'Componente apropiado para continuar en servicio'. On the right, a graph titled 'Curvas de Exención' plots 'MAT: Minimum Allowable Temperature, °F' against 'Governing Plate Thickness, in', showing four curves (A, B, C, D). The API 579 logo is also visible.

Numeral 1. Selección Tipo de Equipo:

El usuario puede escoger entre estas tres pestañas: Recipientes a presión, Tuberías y Tanques de almacenamiento dependiendo del equipo a evaluar.

Numeral 2. Valor del CET:

Del código de diseño del equipo se da ingreso a esta temperatura

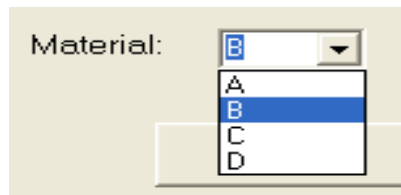
Numeral 3. Espesor Nominal del Equipo t_g :

De los datos del equipo ingresamos su espesor nominal

Numeral 4. Tipo de Material

Dependiendo del material de construcción del equipo le asignamos una curva (A, B, C o D) de acuerdo con la tabla 3.2 de la norma.

Figura. Tipo de material

**Numeral 5. Calcular**

Muestra el resultado de la temperatura MAT, conociendo el espesor y el tipo de materia; esto con base en la figura 3.4 de la norma

Numeral 6. Casillas de verificación

Son usadas para reducir la temperatura MAT, siempre y cuando se cumplan las 3 condiciones.

Numeral 7. Calcular

Muestra la temperatura MAT reducida si cumplió las condiciones, de lo contrario su valor sigue siendo el hallado en el numeral 5.

Numeral 8. Botón de opción

El usuario está en libertad de usar el MAT reducido si lo considera necesario.

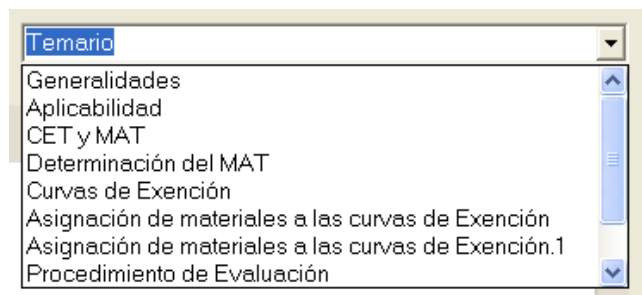
Numeral 9. Ventana de información

En esta ventana es posible ver los fundamentos teóricos para realizar la evaluación, así como gráficas y ejemplos.

Numeral 10. Recuadro de exploración

Con este recuadro podemos explorar los fundamentos teóricos que aparecen en la ventana de información

Figura. Recuadro de exploración



Numeral 11. Vinculo

Pinchando este vínculo accedemos de manera directa al manual de usuario, para cualquier consulta y en cualquier momento que el usuario lo crea necesario.

Numeral 12. Cuadro de resultado

Cuadro donde se muestra el resultado de la evaluación generado por el software

Sección Corrosión General / Localizada

Figura. Pérdida de metal

The screenshot displays the 'API 579 Parte 4 Nivel 1' software interface. On the left, the 'Datos y dimensiones del Equipo' section is active, showing a dropdown menu for 'Equipo' set to 'Recipientes a Presión'. Below this are three images of different vessel types: 'Recipientes Cilíndricos', 'Recipientes Esféricos o Cubiertas hemisféricas', and 'Cubiertas Elípticas'. A table of equipment data is shown, with a red circle '1' highlighting the 'Eficiencia de la Junta Soldada (E) = 1' row. Below the table, the 'Datos de Espesores' section has a radio button for 'Lecturas de puntos de espesor' selected, with a red circle '2' next to it. The 'Resultado' section shows 'tam = 12.0666', 'tmin,c = 10.128', 'tmin,l = 4.9826', and 'tmin = 10.1287'. A green box indicates 'tam - FCA >= tmin Falso, Nivel 2 de Evaluación'. On the right, a flowchart titled 'Procedimiento de Evaluación' details the process: 'Determinar el espesor mínimo requerido, tmin' leads to 'Localizar las regiones de pérdida de metal en el equipo'. A decision diamond asks '¿Evaluación usando Puntos de Espesor, PTR?'. If 'No', it goes to 'Evaluación usando los Perfiles de Espesor' and then 'CTP'. If 'Si', it goes to 'Determinar tmm, tam y COV de los datos de espesor'. A second decision diamond asks 'COV > 10'. If 'Si', it goes to 'OK, el Equipo puede continuar en servicio. Establecer Plan de inspección'. If 'No', it goes to 'Criterios de Evaluación (PTR)'. From 'Criterios de Evaluación (PTR)', a 'Si' path leads to 'OK, el Equipo puede continuar en servicio. Establecer Plan de inspección', and a 'No' path leads to 'Si no cumple, Nivel 2 de evaluación'. A 'Nuevo Analisis' button is at the bottom left of the flowchart area.

Numeral 1. Ingreso de datos

Entrada de datos del equipo. Datos de diseño, mantenimiento e historia operativa.

Numeral 2. Botón de opción

Tenemos 2 opciones de entrada de lecturas de espesor:

- Lecturas de Puntos de Espesor (PTR):

Ubicación	Espesores
1	13
2	12
3	11
4	13
5	10
6	12
7	11
8	12
9	13
10	13
11	11
12	12
13	12
14	13
15	13

Ingreso de Espesores

Ubicación: 5 Espesor: 10 Ingresar

Calcular

tam = 12.0666 COV = 8.03020

tam: Espesor promedio medido
COV: Coeficiente de variación

Figura. Lecturas de puntos de espesor

Numeral 3. Ingreso de espesores

Se ingresan los 15 datos de los espesores a la tabla mostrada, de la zona afectada por corrosión.

Numeral 4. Calcular

Muestra el resultado del coeficiente de variación y el promedio de espesores.

- Perfil de Espesores (CPT):

Figura. Lecturas del perfil crítico de espesor

Datos de Inspección

Planos de Inspección Longitudinal	Planos de Inspección Circunferencial					
	C1	C2	C3	C4	C5	PCE Circ.
M1						
M2						
M3						
M4						
M5						
PCE Long.						

Ingreso de Espesores

Punto Longitudinal-M: Punto Circunferencial-C: Espesor: Ingresar

tmm = tam,s =

Calcular tam,c =

tmm = Espesor mínimo medido
tam,s = Espesor promedio medido basado en el perfil longitudinal
tam,c = Espesor promedio medido basado en el perfil circunferencial

Numeral 5. Ingreso de espesores

Se completa el cuadro con la lectura de del perfil de espesores levantado en la inspección.

Numeral 6. Calcular

Se muestra el cálculo del espesor mínimo medido, y los espesores promedio longitudinal y circunferencial.

Sección Corrosión por Picado

Figura. Corrosión por picado

The screenshot displays the 'API 579 Parte 6 Nivel 1' software interface. The main window is titled 'Ejemplo 1.1'. On the left, under 'Datos y dimensiones del Equipo', there are input fields for: Equipo (Recipientes a Presión), Diámetro interno - D [pulg-mm] (60), Profundidad máxima de picadura - Wmax [pulg-mm] (0.3), Espesor nominal - tnom [pulg-mm] (0.75), Pérdida de metal - LOSS [pulg-mm] (0.05), Corrosión permitida a futuro - FCA [pulg-mm] (0.07), Tensión Admisible - S [MPa-psi] (17500), and Eficiencia de la Junta Soldada (0.85). A red circle '1' highlights these input fields. Below the inputs are three calculation buttons: 'Calcular tc' (result: 0.63), 'Calcular Rwt' (result: 0.6349), and 'Calcular MAWP' (result: 307.2742). A red circle '2' highlights these calculation buttons and their results. Below the results, there are definitions for tc, Rwt, and MAWP, and a dropdown menu for 'Seleccione el patrón de Pits' set to 'Figura 6.4 - Grado 2 de Picado'. A red circle '3' highlights this dropdown. At the bottom, the 'RESULTADO' section shows 'RSF = 0.9535' (highlighted in pink), 'RSF >= RSRa' (highlighted in yellow), and 'Equipo Apropiado para continuar en Servicio con la MAWP utilizada.' Below this, 'Rwt >= 0.2' is also highlighted in pink. A 'Nuevo Cálculo' button is at the bottom right. On the right side of the interface, there is a photograph of a metal surface with pitting and a yellow measuring tape, labeled 'Figure E6.1-1 Example Problem E6.1 Pitting Damage'.

Numeral 1. Ingreso de datos

Se ingresan los datos de diseño y dimensiones del equipo

Numeral 2. Botones de cálculo

Permite que después de que el usuario ingresa los datos, muestre los cálculos de: espesor corroído a futuro (tc), relación entre el espesor remanente con el espesor futuro (Rwt) y la máxima presión de operación admisible (MAWP).

Numeral 3. Gráficas patrón

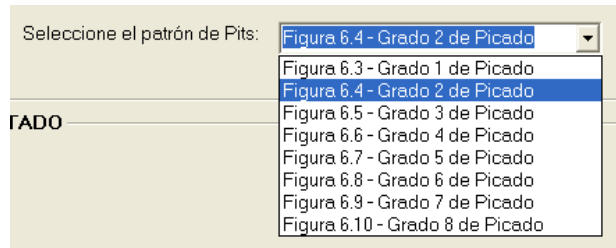


Figura. Patrón de pits

Comparar la superficie de las fotografías de la inspección con las gráficas 6.3 a 6.10 de la norma. Seleccione una figura que tenga una medida de daño que se aproxime a la realidad del daño del componente.

Sección Daños por Hidrogeno

Figura. Daños por hidrogeno

Numeral 1. Ingreso de datos

Se ingresan los datos de diseño y dimensiones del equipo

Numeral 2. Botones de opción

Se elige el tipo de daño por hidrogeno a analizar:

- Agrietamiento inducido por hidrogeno
- Ampollamiento por hidrogeno
- Agrietamiento inducido por hidrogeno orientado por esfuerzos

Numeral 3. Datos del daño

Dependiendo del tipo de daño de ingresan los datos del daño de acuerdo a la inspección.

Numeral 4. Cuadro de resultados

Muestra el resultado de la evaluación, si es apto para continuar operando o de lo contrario no cumple con los criterios de evaluación nivel 1.

Sección Desalineación de Soldadura y Distorsiones

Figura. Desalineación de Soldadura y Distorsiones

Tipo de daño

Abombamiento (ovalidad) bajo presión interna

Desviación máxima de la circunferencia original bajo presión externa

Datos requeridos para el cálculo de la desviación máxima

De/tc: 152 Arcmax(mm): 0.200 Fig 8.11

Lec/De: 35 e (mm): 0.4 Fig 8.12

Desviación de forma de cubiertas (tapas)

Desalineación de la línea central entre el recipiente y la cubierta

Desalineamiento de la línea central de la soldadura longitudinal (Categoría A)

Desalineamiento de la línea central de la soldadura circunferencial (Categoría B, C y D)

Datos

Di (mm): 228

De (mm): 232

Dmax (mm): 222

Dmin (mm): 222

tc (mm): 1.5

dc (mm):

Lec (mm): 800

Di (mm):

tt (mm):

RESULTADO

Desviación Máx. de la circunferencia < e

Componente apropiado para continuar en Servicio

Abombamiento

Ejemplos de las diferencias entre el diámetro máximo y mínimo en los recipientes cilíndricos, cónicos y esféricos

Shell Without Imperfections

Shell With Imperfections

Abombamiento Global

Numeral 1. Tipo de daño

Se elige el tipo de daño a evaluar de acuerdo a la inspección

- Abombamiento (ovalidad) bajo presión interna
- Desviación máxima de la circunferencia original bajo presión externa
- Desviación de la línea central entre el recipiente y la tapa
- Desalineamiento de la línea central de la soldadura longitudinal
- Desalineamiento de la línea central de la soldadura circunferencial

Numeral 2. Datos del daño

Se ingresan las dimensiones del daño de acuerdo a la inspección

Numeral 3. Botones

Son accesos directos a 2 gráficas usadas para evaluar la “Desviación máxima de la circunferencia original bajo presión externa”

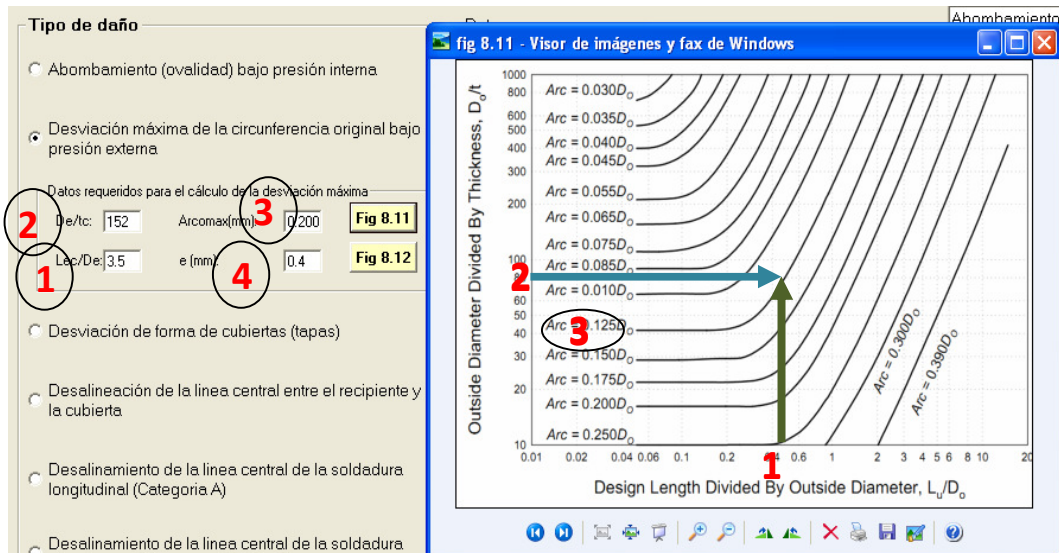


Figura. Análisis de gráficas para la desviación bajo presión externa

Numera 1. Valor Lec / De

Este valor es la abscisa de la grafica (eje x), se usa para determinar el valor “Arcomax (mm)”

Numeral 2. Valor De / tc

Este valor es la ordenada de la grafica (eje y), se usa para determinar el valor “Arcomax (mm)”

Numeral 3. Valor Arcomax (mm)

Parámetro generado por la figura 8.11 el cual se usa en los criterios de aceptación.

De la misma manera se analiza la figura 8.12 para generar el parámetro e (mm).
Numeral 4.

Sección Daños por Fuego

Figura. Daños por fuego

API 579 Parte 11 Nivel 1

¿Existen daños mecánicos o desviación dimensional? Si No

Seleccionar el material de construcción del equipo
Aleación 400

Se puede evaluar el equipo mediante tres formas, seleccione la más apropiada:

- Ingresar la temperatura máxima que alcanzó el equipo o parte de este
- Determinar la temperatura máxima según las evidencias de los materiales propios del equipo o de la vecindad próxima
- Determinar directamente la zona a que el equipo pertenece

Ingresar la temperatura máxima que alcanzó el equipo o parte de este

T máx. (°C):

Evaluar

RESULTADO

API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service

DAÑOS POR FUEGO

Nuevo Análisis Manual

Numeral 1. Botón de opción

Es el primer requisito que debe cumplir ya que si no lo cumple no es posible continuar con la evaluación.

Numeral 2. Opciones de material

Aceros de baja aleación

Aceros de baja aleación

Aceros inoxidables austeníticos

Aleación 400

Aceros inoxidables Duplex

Aleaciones 20, 800, 800H, 825, 600, 625, C-276

Aleaciones de cobre

Aleaciones de aluminio

Aceros aleados endurecidos por precipitación

Figura. Selección del material

Se elige el material de construcción del componente que se está analizando.

Numeral 3

Dependiendo de la información que se tiene a partir de la inspección se puede elegir la manera más apropiada como se seguirá la evaluación:

Figura. Opciones de evaluación

Se puede evaluar el equipo mediante tres formas, seleccione la más apropiada:

- Ingresar la temperatura máxima que alcanzó el equipo o parte de este
- Determinar la temperatura máxima según las evidencias de los materiales propios del equipo o de la vecindad próxima
- Determinar directamente la zona a que el equipo pertenece

Al elegir la forma de evaluar tenemos un cuadro con sus respectivos requisitos:

Figura. Temperatura máxima

Se puede evaluar el equipo mediante tres formas, seleccione la más apropiada:

- Ingresar la temperatura máxima que alcanzó el equipo o parte de este
- Determinar la temperatura máxima según las evidencias de los materiales propios del equipo o de la vecindad próxima
- Determinar directamente la zona a que el equipo pertenece

Ingresar la temperatura máxima que alcanzó el equipo o parte de este

T máx. (°C):

4

Numeral 4. Temperatura máxima

Hay varias formas de determinar esta temperatura.

Temperaturas asociadas con el fuego se puede determinar mediante las lecturas del instrumento durante el curso del fuego. Si se dispone de cintas de vídeo, las temperaturas pueden ser estimadas con base en los colores de radiación observada en las superficies de acero durante el incendio. Colores de radiación correspondiente a un rango de temperaturas de presentan en la tabla 11.8 de la norma.

El conocimiento de la naturaleza del combustible en un incendio y la fuente de ignición pueden ser útil en el establecimiento de esta temperatura.

Figura. Evidencias de materiales

Se puede evaluar el equipo mediante tres formas, seleccione la más apropiada:

- Ingresar la temperatura máxima que alcanzó el equipo o parte de este
- Determinar la temperatura máxima según las evidencias de los materiales propios del equipo o de la vecindad próxima
- Determinar directamente la zona a que el equipo pertenece

- Equipo limpio. Pintura, plásticos y elementos elastómeros sin ser afectados
- Equipo sucio, hollín y humedad. Sin efectos en la pintura, plásticos y elastómeros
- Ampollas en pintura y recubrimientos, pintura oscurecida a negra, elastómeros endurecidos o quemados, plásticos quemados o fundidos, plomo y estaño de soldadura derretidos
- Recubrimientos orgánicos quemados o con ampollas. Plásticos y caucho derretidos o carbonizados. El aislamiento del cableado eléctrico destruido
- No metales destruidos o consumidos. Derretimiento de algunas soldaduras de plata y aluminio. Inicio de oxidación del acero
- Cobre y aleaciones de cobre fundidos o destruidos

5

Numeral 5. Evidencias

De la inspección se pueden obtener evidencias que las podemos relacionar con estas opciones. La norma se encarga a través de unos cuadros clasificatorios asignarles una temperatura máxima aproximada.

Figura. Zona de exposición al calor

Se puede evaluar el equipo mediante tres formas, seleccione la más apropiada:

- Ingresar la temperatura máxima que alcanzó el equipo o parte de este
- Determinar la temperatura máxima según las evidencias de los materiales propios del equipo o de la vecindad próxima
- Determinar directamente la zona a que el equipo pertenece

Zona de Exposición al Calor

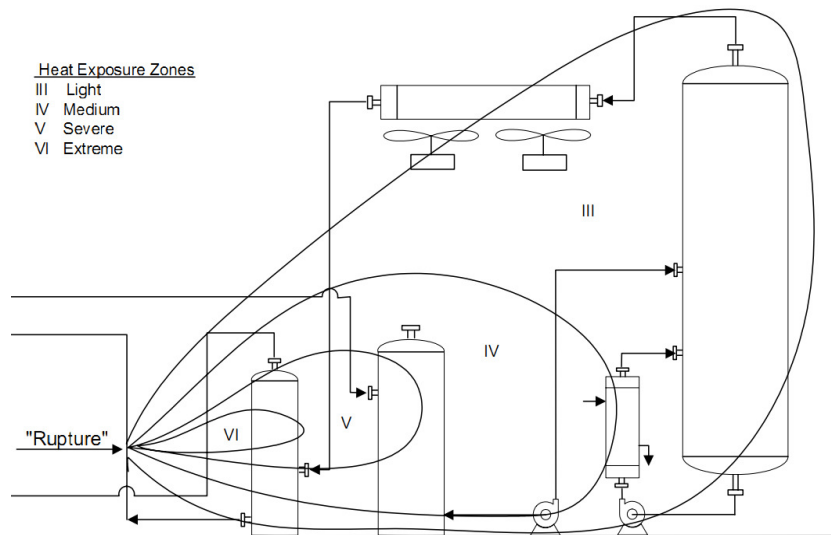
- ZONA I. No hay evidencia de contacto con el calor, las llamas o el humo
- ZONA II. Contacto con el agua y el humo pero no a la exposición al calor
- ZONA III. Exposición al calor del fuego
- ZONA IV. Exposición mederada al calor
- ZONA V. Exposición severa al calor. Exposición directa a las llamas
- ZONA VI. Exposición extrema al calor. Cerca a la fuente del fuego

6

Numeral 6. Zona de exposición al calor (ZEC)

El componente será aprobado por el nivel 1 si se encuentra en una ZEC (Zona de Exposición al Calor) aceptable y no hay daños mecánicos o desviación dimensional.

La aceptabilidad de la exposición y las temperaturas de exposición que definen la ZEC, son mostradas en las Tablas 11.1 y 11.12 de la norma



Fuente: API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service Figure 11.12 Idealized Representation of Plant Equipment Exposed To Different Fire (Heat) Zones III through VI

Sección Grietas

API 579 Parte 9 Nivel 1

Datos del Equipo
 Equipo: Recipientes a Presión
 D (mm): 2400
 T. CET (°C): 30

Datos del Material y Cálculo de la Tref
 Material: Curva B
 Tipo de Acero: Aceros al Carbono
 SMYS (Mpa): 260
 Tref (°C): 6

Ubicación de la Grieta
 Posición de la Grieta con respecto a la soldadura
 En la Soldadura
 Metal Base
 ¿La junta soldada recibió tratamiento térmico después de la soldadura?
 Grieta perpendicular a la soldadura circunferencial en una concha esférica (Figura 9.18)

Datos del defecto
 t (mm): 27.5
 2c (mm): 30
 a (mm): 10

Características de la Figura
 Figura 9.18 Línea discontinua (trazos)
 Curva B Abscisa: 80

RESULTADO
 $2c_{adm} > 2c$
 Los criterios de evaluación para el nivel 1 están satisfechos. El equipo está apto para continuar operando.

Figura 9.18 - Esfera, Grieta Perpendicular a Junta Circunferencial
 Gráfico de $2c$ (mm) vs $(T - T_{ref} + 56)$ (°C). Curvas A, B y C.

para continuar operando

* Datos del Equipo
 2c: Longitud de la grieta medida

Figura. Grietas

Numeral 1. Datos del material y cálculo de la temperatura de referencia

Figura. Tipo de Material

Datos del Material y Cálculo de la Tref
 Material: Curva B
 Tipo de Acero: Curva B
 SMYS (Mpa): 260

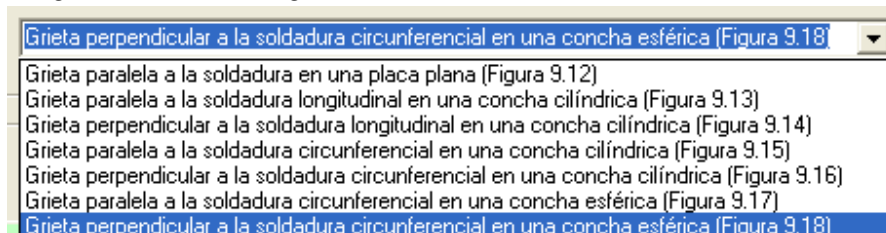
Elegir el material según la clasificación A, B, C o D de la Tabla 3.2 de la Parte 3 de la norma.

Numeral 2. Calcular temperatura de referencia

Con el material elegido en el numeral 1 y con el límite de elasticidad mínimo especificado (SMYS) del material Utilizar la Tabla 9.2 de la norma y determinar la T_{ref} .

Numeral 3. Posición de la grieta con respecto a la soldadura

Figura. Posición de la grieta

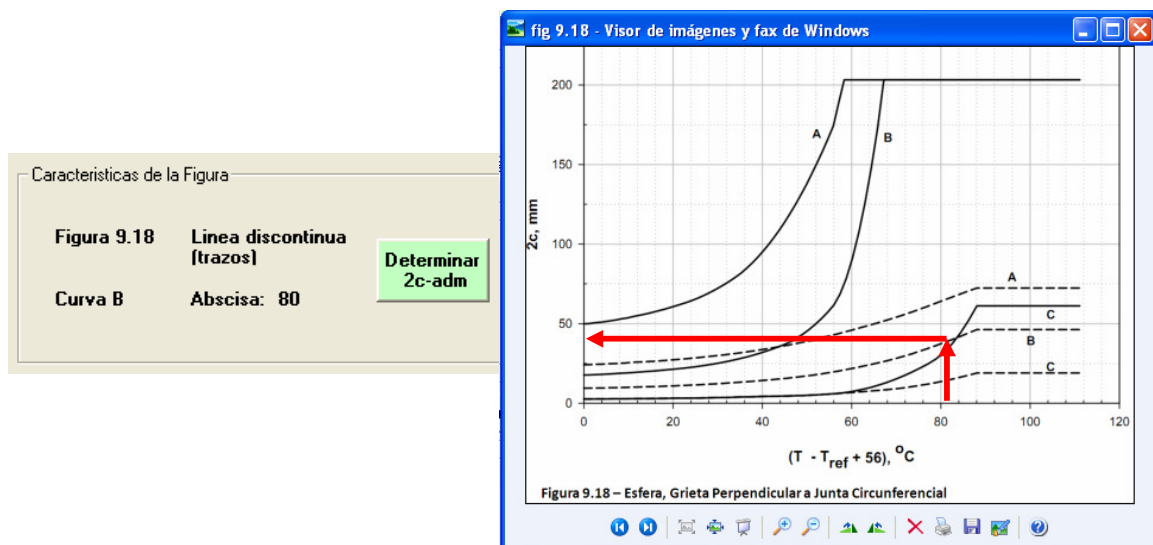


Determinar la figura a ser utilizada (figuras 9.12 a 9.18 de la norma) en la evaluación basada en la geometría del componente y la grieta con respecto a la orientación de la unión soldada.

Numeral 4. Características de la figura

Determinar la longitud máxima admisible de la grieta ($2c_{adm}$), usando la figura seleccionada con su respectiva curva (A,B,C o D) y con la T_{ref} .

Figura. Longitud máxima admisible de la grieta



Sección Laminaciones

Figura. Laminaciones

API 579 Parte 13 Nivel 1

Evaluación preliminar del daño

Existe abultamiento (bulging) en la superficie interna o externa del componente en la ubicación de la laminación? No

La laminación está en servicio de carga de hidrogeno? No

Las laminaciones se encuentran a diferentes profundidades? Si

Existe mas de una laminación? Si

Cálculo del espesor, tc, que será usado

tc (mm-pulg) = tnom (mm-pulg) - LOSS (mm-pulg) - FCA (mm-pulg)

tc (mm-pulg) = 0.50 - 0.0 - 0.0625

Distancia entre las dos laminaciones (Ls) = 11 2tc = 0.875

Ls > 2tc Evaluar cada laminación por separado

Datos del equipo y del daño

D (mm): 120 Lmsd (mm): 42 Lw (mm): 10

S (Mpa-psi): 17500 S (mm): 4.5 Lh (mm): 0.125

tmm (mm): 0.325 C (mm): 3.25

Evaluar

RESULTADO

El componente con la laminación es aceptable para continuar operando con el MAWP calculado usando el valor de tc. Los criterios para los valores admisibles son cumplidos

$L_w \geq \max [2t_c, 25 \text{ mm } (1.0 \text{ in})]$

$L_{msd} \geq 1.8 \sqrt{Dt_c}$ $t_{mm} \geq 0.10t_c$

$L_h \leq 0.09 \cdot \max [s, c]$

tc = 0.4375

MAWP = 126,9167 (Mpa-psi)

Ejemplo 1.1

STEP 1 – Determine if there is any surface bulging on either the inside or the outside surface of the component at the location of the lamination. If there is surface bulging, then evaluate the lamination as a blister using the Level 1 Assessment method in Part 7.

The inspection report indicates no surface bulging on either the inside or outside surface of the component at the location of the lamination.

STEP 2 – Determine the information in paragraph 13.3.3.1.

t_{nom} : 0.500 in

LOSS: 0.000 in

FCA: 0.0625 in

t_c : 0.500 in

Data Required for Level 1 and Level 2 Assessment			
Lamination Identification	1	2	
Dimension s (1)	4.5 in	3.0 in	
Dimension c (1)	3.25 in	6.5 in	
Lamination Height L_h (1)	0.125 in	0.100 in	
Edge-To-Edge Spacing to the nearest lamination L_s (2)	11.0 in	11.0 in	
Minimum Measured Thickness t_{mm} (1)	0.325 in	0.350 in	
Spacing to the Nearest Weld Joint L_w (2)	10.0 in	25.5 in	
Spacing to the Nearest Major Structural Discontinuity L_{msd}	42 in	28 in	
Through-Wall Cracking (Yes/No)	No	No	

Numeral 1. Evaluación preliminar

Características que fueron observadas o no durante la inspección, de estas depende que podamos seguir con la evaluación por esta sección o también los criterios que se usaran.

Numeral 2. Espesor tc

Calculo de espesor tc que será usado en la evaluación. Es un espesor corregido por la corrosión permitida a futuro y por pérdida de metal uniforme.

Numeral 3. Más de una laminación

Este cuadro se activa si existe más de una laminación en el daño. De lo contrario no aparece.

Su función es determinar si existiendo más de una laminación se evalúan por separado o como una sola laminación más grande.

Numeral 4. Datos del Equipo y del Daño

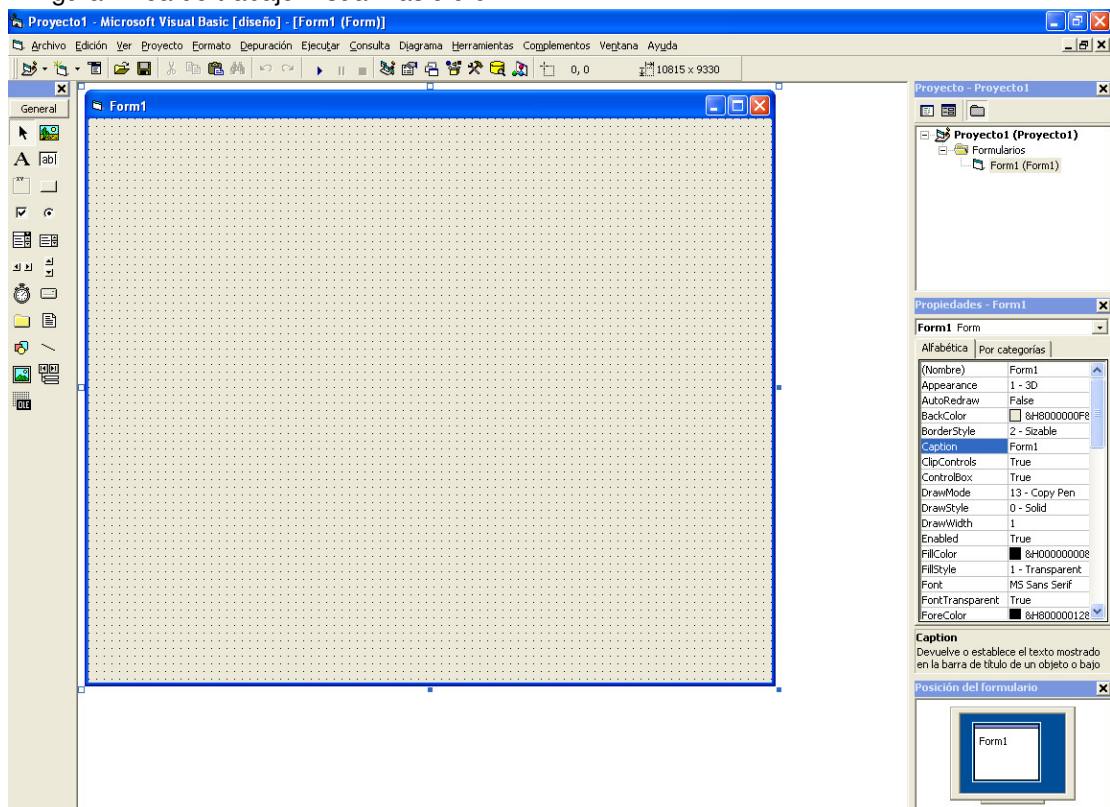
Se ingresan los datos de diseño y dimensiones del daño.

ANEXO B. HERRAMIENTA DE DESARROLLO

Para la realización de esta multimedia se utilizó la herramienta Visual Basic 6.0

Visual Basic 6.0

Figura. Área de trabajo Visual Basic 6.0



Cuando se inicia Visual Basic 6.0 aparece en la pantalla una configuración similar a la mostrada en la Figura. En ella se pueden distinguir los siguientes elementos:

- La *barra de títulos*, la barra de menús y la barra de herramientas de **Visual Basic 6.0** en modo **Diseño** (parte superior de la pantalla).
- *Caja de herramientas (toolbox)* con los controles disponibles (a la izquierda de la ventana).

- *Formulario (form)* en gris, en que se pueden ir situando los controles (en el centro). Está dotado de una rejilla (*grid*) para facilitar la alineación de los controles.
- Ventana de *proyecto*, que muestra los formularios y otros módulos de programas que forman parte de la aplicación (arriba a la derecha).
- Ventana de *Propiedades*, en la que se pueden ver las propiedades del objeto seleccionado o del propio formulario (en el centro a la derecha). Si esta ventana no aparece, se puede hacer visible con la tecla <F4>.
- Ventana *FormLayout*, que permite determinar la forma en que se abrirá la aplicación cuando comience a ejecutarse (abajo a la derecha).

Existen otras ventanas para edición de código (*Code Editor*) y para ver variables en tiempo de ejecución con el depurador o *Debugger* (ventanas *Immediate*, *Locals y Watch*). Todo este conjunto de herramientas y de ventanas es lo que se llama un entorno integrado de desarrollo o IDE (*Integrated Development Environment*).

ANEXO C. TABLAS DE TOLERANCIAS DE FABRICACIÓN. Desalineación de Soldadura y Distorsiones

Table 8.3
Overview Of Fabrication Tolerances – ASME B&PV Code, Section VIII, Division 1 And Division 2

Fabrication Tolerance	Requirement	Code Reference										
Out-Of-Roundness In Cylindrical Shells Under Internal Pressure	$(D_{max} - D_{min})$ shall not exceed 1% of D where: D_{max} Maximum measured internal diameter D_{min} Minimum measured internal diameter D Nominal internal diameter At nozzle openings, this tolerance is increased by 2% of the inside diameter of the opening.	UG-80(a) {AF-130.1}										
Out-Of-Roundness In Cylindrical Shells Under External Pressure	The diameter tolerance for internal pressure shall be satisfied. Using a chord length equal to twice the arc length determined from Figure 8.11, the maximum deviation from true circle shall not exceed the value e determined from Figure 8.12. Take measurements on the unwelded plate surface. For shells with a lap joint, increase tolerance by t . Do not include future corrosion allowance in t .	UG-80(b) {AF-130.2}										
Shape Of Formed Heads	The inside surface shall not deviate outside the shape by more than 1.25% of the inside diameter nor inside the shape by more than 0.625% of the inside diameter.	UG-81 {AF-135}										
Cylindrical Shell-To-Head Attachment Weld	The centerline (radial) misalignment between the shell and the head shall be less than one-half the difference between the actual shell and head thicknesses.	UW-13(b)(3) {AD-420}										
Centerline Offset Weld Misalignment – Longitudinal Joints (Category A)	<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;">For $t \leq 13$ mm (1/2 in)</td> <td style="width: 50%; text-align: right;">$e = t/4$</td> </tr> <tr> <td>For 13 mm (1/2 in) < $t \leq 19$ mm (3/4 in)</td> <td style="text-align: right;">$e = 3$ mm (1/8 in)</td> </tr> <tr> <td>For 19 mm (3/4 in) < $t \leq 38$ mm (1-1/2 in)</td> <td style="text-align: right;">$e = 3$ mm (1/8 in)</td> </tr> <tr> <td>For 38 mm (1-1/2 in) < $t \leq 51$ mm (2 in)</td> <td style="text-align: right;">$e = 3$ mm (1/8 in)</td> </tr> <tr> <td>For $t > 51$ mm (2 in)</td> <td style="text-align: right;">$e = \min(t/16, 10$ mm) or $e = \min(t/16, 3/8$ in)</td> </tr> </table> Where t plate thickness and e allowable centerline offset.	For $t \leq 13$ mm (1/2 in)	$e = t/4$	For 13 mm (1/2 in) < $t \leq 19$ mm (3/4 in)	$e = 3$ mm (1/8 in)	For 19 mm (3/4 in) < $t \leq 38$ mm (1-1/2 in)	$e = 3$ mm (1/8 in)	For 38 mm (1-1/2 in) < $t \leq 51$ mm (2 in)	$e = 3$ mm (1/8 in)	For $t > 51$ mm (2 in)	$e = \min(t/16, 10$ mm) or $e = \min(t/16, 3/8$ in)	UW-33 {AF-142}
For $t \leq 13$ mm (1/2 in)	$e = t/4$											
For 13 mm (1/2 in) < $t \leq 19$ mm (3/4 in)	$e = 3$ mm (1/8 in)											
For 19 mm (3/4 in) < $t \leq 38$ mm (1-1/2 in)	$e = 3$ mm (1/8 in)											
For 38 mm (1-1/2 in) < $t \leq 51$ mm (2 in)	$e = 3$ mm (1/8 in)											
For $t > 51$ mm (2 in)	$e = \min(t/16, 10$ mm) or $e = \min(t/16, 3/8$ in)											
Centerline Offset Weld Misalignment - Circumferential Joints (Category B, C and D)	<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 50%;">For $t \leq 19$ mm (3/4 in)</td> <td style="width: 50%; text-align: right;">$e = t/4$</td> </tr> <tr> <td>For 19 mm (3/4 in) < $t \leq 38$ mm (1-1/2 in)</td> <td style="text-align: right;">$e = 5$ mm (3/16 in)</td> </tr> <tr> <td>For 38 mm (1-1/2 in) < $t \leq 51$ mm (2 in)</td> <td style="text-align: right;">$e = t/8$</td> </tr> <tr> <td>For $t > 51$ mm (2 in)</td> <td style="text-align: right;">$e = \min(t/8, 19$ mm) or $e = \min(t/8, 3/4$ in)</td> </tr> </table> Where t plate thickness and e allowable centerline offset.	For $t \leq 19$ mm (3/4 in)	$e = t/4$	For 19 mm (3/4 in) < $t \leq 38$ mm (1-1/2 in)	$e = 5$ mm (3/16 in)	For 38 mm (1-1/2 in) < $t \leq 51$ mm (2 in)	$e = t/8$	For $t > 51$ mm (2 in)	$e = \min(t/8, 19$ mm) or $e = \min(t/8, 3/4$ in)	UW-33 {AF-142}		
For $t \leq 19$ mm (3/4 in)	$e = t/4$											
For 19 mm (3/4 in) < $t \leq 38$ mm (1-1/2 in)	$e = 5$ mm (3/16 in)											
For 38 mm (1-1/2 in) < $t \leq 51$ mm (2 in)	$e = t/8$											
For $t > 51$ mm (2 in)	$e = \min(t/8, 19$ mm) or $e = \min(t/8, 3/4$ in)											
Angular Weld Misalignment	None stated in Division 1 or Division 2											
Peaking Of Welds (Category A)	The inward or outward peaking dimension, d , shall be measured using a template and included in the fatigue analysis of Division 2 vessels as required. The Manufacturer's Design Report shall stipulate the permitted value.	(AF-136)										

Table 8.4
Overview Of Fabrication Tolerances – ASME B31.3

Fabrication Tolerance	Requirement	Code Reference
Out-Of-Roundness In Piping Under Internal Pressure	<p>Default ASTM Standard the pipe was purchased to, for example:</p> <ul style="list-style-type: none"> • ASTM 530 – For thin wall pipe, the difference in extreme outside diameter readings (ovality) in any one cross-section shall not exceed 1.5% of the specified outside diameter. Thin wall pipe is defined as having a wall thickness of 3% or less of the outside diameter. • ASTM 358 – Difference between major and minor outside diameters, 1% of specified diameter. • ASTM 671 – Difference between major and minor outside diameters, 1% of specified diameter. • ASTM 672 – Difference between major and minor outside diameters, 1% of specified diameter. • ASTM 691 – Difference between major and minor outside diameters, 1% of specified diameter. <p>For wrought steel butt-welding fittings (e.g. elbows, tees, reducers, weld caps), requirements are provided in ASME B16.9.</p>	---
Out-Of-Roundness In Piping Under External Pressure	Same as for internal pressure	---
Centerline Offset Weld Misalignment – Longitudinal Joints	The tolerance defaults to the tolerance of ASTM standard pipe as purchased, or requirement stipulated for centerline offset misalignment of circumferential joints.	328.4.3(b)
Centerline Offset Weld Misalignment - Circumferential Joints	Inside surfaces of components at ends to be joined in girth or miter groove welds shall be aligned within dimensional limits in the WPS and the engineering design.	328.4.3(a)
Angular Weld Misalignment	An angular offset of three degrees (3°) or less is considered acceptable without additional design considerations.	304.2.3

Table 8.5
Overview Of Fabrication Tolerances – API Standard 620

Fabrication Tolerance	Requirement	Code Reference
Out-Of-Plumbness For Tank Shells	Out of plumbness from top of shell to bottom of shell shall not exceed 1/200 of the total tank height.	4.5.2
Out-Of-Roundness For Tank Shells	<p>Maximum allowable out-of-roundness for tank shells, measured as the difference between the maximum and minimum diameters, shall not exceed 1% of average diameter or 300 mm (12 in), whichever is less, except as modified for flat bottom tanks for which the radii measured at 300 mm (12 in) above the bottom corner weld shall not exceed the tolerances shown below.</p> <p>$D < 12 \text{ m (40 ft)}$ $Tol = 13 \text{ mm (1/2 in)}$</p> <p>$12 \text{ m (40 ft)} \leq D < 46 \text{ m (150 ft)}$ $Tol = 19 \text{ mm (3/4 in)}$</p> <p>$46 \text{ m (150 ft)} \leq D < 76 \text{ m (250 ft)}$ $Tol = 25 \text{ mm (1 in)}$</p> <p>$D > 76 \text{ m (250 ft)}$ $Tol = 32 \text{ mm (1-1/4 in)}$</p> <p>Where D diameter of the tank in meters or feet and Tol tolerance on the radius.</p> <p>Skirts or cylindrical ends of formed tops shall have a maximum difference between maximum and minimum diameters of 1% of the nominal diameter.</p>	4.5.3
Centerline Offset Weld Radial Misalignment – All Butt Joints	<p>For $t \leq 6 \text{ mm (1/4 in)}$ $e = 2 \text{ mm (1/16 in)}$</p> <p>For $t > 6 \text{ mm (1/4 in)}$ $e = \min [t/4, 3 \text{ mm}]$ or</p> <p style="text-align:right">$e = \min [t/4, 1/8 \text{ in}]$</p> <p>Where t plate thickness and e allowable radial misalignment or offset.</p>	4.14
Local Deviations Such As Angular Weld Misalignment (Peaking) And Or Flat Spots	<p>Using a 910 mm (36 in) horizontal sweep board with a radius equal to the nominal radius of the tank, peaking at vertical joints shall not exceed 13 mm (1/2 in) for steel shells and 25 mm (1 in) for aluminum shells (see API 620, Appendix Q).</p> <p>Using a 910 mm (36 in) vertical straight sweep board, banding at horizontal joints shall not exceed 13 mm (1/2 in) for steel shells and 25 mm (1 in) for aluminum shells (see API 620, Appendix Q).</p> <p>Flat spots shall not exceed appropriate flatness and waviness requirements specified in ASTM A6 or ASTM A20 for carbon and alloy steels, ASTM A480 for stainless steels, and Table 3.13 of ANSI H35.2 for aluminum.</p>	4.5.4

**Table 8.6
Overview Of Fabrication Tolerances – API Standard 650**

Fabrication Tolerance	Requirement	Code Reference
Out-of-Plumbness	The maximum out of plumbness of the top of the shell of revolution to the bottom of the shell shall not exceed 1/200 of the total tank height.	5.5.2
Out-Of-Roundness For Tank Shells	Radii measured at 300 mm (12 in) above the bottom corner weld shall not exceed the tolerances shown below. $D < 12 \text{ m (40 ft)}$ $Tol = 13 \text{ mm (1/2 in)}$ $12 \text{ m (40 ft)} \leq D < 46 \text{ m (150 ft)}$ $Tol = 19 \text{ mm (3/4 in)}$ $46 \text{ m (150 ft)} \leq D < 76 \text{ m (250 ft)}$ $Tol = 25 \text{ mm (1 in)}$ $D > 76 \text{ m (250 ft)}$ $Tol = 32 \text{ mm (1-1/4 in)}$ Where D diameter of the tank in meters or feet and Tol tolerance on the radius.	5.5.3
Centerline Offset Weld Misalignment – Longitudinal Joints	For $t \leq 16 \text{ mm (5/8 in)}$ $e = 2 \text{ mm (1/16 in)}$ For $t > 16 \text{ mm (5/8 in)}$ $e = \min [t/10, 3 \text{ mm}]$ or $e = \min [t/10, 1/8 \text{ in}]$ Where t plate thickness and e allowable radial misalignment or offset.	5.2.3.1
Centerline Offset Weld Misalignment - Circumferential Joints	The upper plate shall not project by more than 20 percent of the thickness of the upper plate, with a maximum projection of 3mm (1/8 in); however, for upper plates less than 8 mm (5/16 in) thick, the maximum projection shall be limited to 2 mm (1/16 in).	5.2.3.2
Local Deviations Such As Angular Weld Misalignment (Peaking) And Or Flat Spots	Using a 910 mm (36 in) horizontal sweep board with a radius equal to the nominal radius of the tank, peaking at vertical joints shall not exceed 13 mm (1/2 in). Using a 910 mm (36 in) vertical straight sweep board, banding at horizontal joints shall not exceed 13 mm (1/2 in). Flat spots shall not exceed appropriate flatness and waviness requirements specified in ASTM A6 or ASTM A20.	5.5.4

**Table 8.7
Overview Of Fabrication Tolerances For Reconstructed Tanks – API Standard 653**

Fabrication Tolerance	Requirement	Code Reference								
Out-of-Plumbness	The maximum out of plumbness of the top of the shell of revolution to the bottom of the shell shall not exceed 1/100 of the total tank height, with a maximum deviation of 130 mm (5 in).	8.5.2.1								
Out-Of-Roundness For Tank Shells	<p>Radii measured at 304 mm (12 in) above the bottom corner weld shall not exceed the tolerances shown below.</p> <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;">$D < 12 \text{ m (40 ft)}$</td> <td style="width: 50%;">$Tol = 13 \text{ mm (1/2 in)}$</td> </tr> <tr> <td>$12 \text{ m (40 ft)} \leq D < 46 \text{ m (150 ft)}$</td> <td>$Tol = 19 \text{ mm (3/4 in)}$</td> </tr> <tr> <td>$46 \text{ m (150 ft)} \leq D < 76 \text{ m (250 ft)}$</td> <td>$Tol = 25 \text{ mm (1 in)}$</td> </tr> <tr> <td>$D > 76 \text{ m (250 ft)}$</td> <td>$Tol = 32 \text{ mm (1-1/4 in)}$</td> </tr> </table> <p>Where D diameter of the tank in meters or feet and Tol tolerance on the radius.</p>	$D < 12 \text{ m (40 ft)}$	$Tol = 13 \text{ mm (1/2 in)}$	$12 \text{ m (40 ft)} \leq D < 46 \text{ m (150 ft)}$	$Tol = 19 \text{ mm (3/4 in)}$	$46 \text{ m (150 ft)} \leq D < 76 \text{ m (250 ft)}$	$Tol = 25 \text{ mm (1 in)}$	$D > 76 \text{ m (250 ft)}$	$Tol = 32 \text{ mm (1-1/4 in)}$	8.5.3
$D < 12 \text{ m (40 ft)}$	$Tol = 13 \text{ mm (1/2 in)}$									
$12 \text{ m (40 ft)} \leq D < 46 \text{ m (150 ft)}$	$Tol = 19 \text{ mm (3/4 in)}$									
$46 \text{ m (150 ft)} \leq D < 76 \text{ m (250 ft)}$	$Tol = 25 \text{ mm (1 in)}$									
$D > 76 \text{ m (250 ft)}$	$Tol = 32 \text{ mm (1-1/4 in)}$									
Centerline Offset Weld Misalignment – Longitudinal Joints	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 50%;">$\text{For } t \leq 16 \text{ mm (5/8 in)}$</td> <td style="width: 50%;">$e = 2 \text{ mm (1/16 in)}$</td> </tr> <tr> <td>$\text{For } t > 16 \text{ mm (5/8 in)}$</td> <td>$e = \min[t/10, 3 \text{ mm}]$ or $e = \min[t/10, 1/8 \text{ in}]$</td> </tr> </table> <p>Where t plate thickness and e allowable radial misalignment or offset.</p>	$\text{For } t \leq 16 \text{ mm (5/8 in)}$	$e = 2 \text{ mm (1/16 in)}$	$\text{For } t > 16 \text{ mm (5/8 in)}$	$e = \min[t/10, 3 \text{ mm}]$ or $e = \min[t/10, 1/8 \text{ in}]$	8.4.4.1				
$\text{For } t \leq 16 \text{ mm (5/8 in)}$	$e = 2 \text{ mm (1/16 in)}$									
$\text{For } t > 16 \text{ mm (5/8 in)}$	$e = \min[t/10, 3 \text{ mm}]$ or $e = \min[t/10, 1/8 \text{ in}]$									
Centerline Offset Weld Misalignment - Circumferential Joints	The upper plate shall not project by more than 20 percent of the thickness of the upper plate, with a maximum project of 3 mm (1/8 in); however, for upper plates less than 8 mm (5/16 in) thick, the maximum projection shall be limited to 2 mm (1/16 in).	8.4.4.2								
Local Deviations Such As Angular Weld Misalignment (Peaking) And Or Flat Spots	<p>Using a 910 mm (36 in) horizontal sweep board with a radius equal to the nominal radius of the tank, peaking at vertical joints shall not exceed 25 mm (1 in).</p> <p>Using a 910 mm (36 in) vertical straight sweep board, banding at horizontal joints shall not exceed 25 mm (1 in).</p>	8.5.4 & 8.5.5								