



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO  
DE LOS ESPESORES MÍNIMOS  
REQUERIDOS (LÍMITES DE RETIRO)  
DE RECIPIENTES A PRESIÓN DE  
UNIDADES DE PLANTAS DE  
REFINACIÓN DE PETRÓLEO.**

**TESIS QUE PARA OBTENER EL  
TÍTULO DE INGENIERA QUÍMICA  
P R E S E N T A  
SANDRA CASTRO ESCOBEDO**



**MÉXICO, D.F.**

**2011**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** Profesor: José Antonio Ortiz Ramírez

**VOCAL:** Profesor: Antonio Valiente Barderas

**SECRETARIO:** Profesor: Modesto Javier Cruz Gómez

**1er. SUPLENTE:** Profesor: Mariano Pérez Camacho

**2° SUPLENTE:** Profesor: Néstor Noé López Castillo

## **SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**TORRE DE INGENIERÍA, CIRCUITO EXTERIOR, CIUDAD UNIVERSITARIA  
COYOACÁN.**

**ASESOR DEL TEMA:**

\_\_\_\_\_  
Dr. M. Javier Cruz Gómez

**SUPERVISOR TÉCNICO:**

\_\_\_\_\_  
M. I. Fernando Pérez Lara

**SUSTENTANTE:**

\_\_\_\_\_  
Sandra Castro Escobedo

## **Agradecimientos**

A todas aquellas personitas que han estado presentes a lo largo de mi vida, que me han brindado su amor, amistad, apoyo y confianza incondicional, que me han ayudado a crecer tanto en lo personal como en los aspectos profesionales. Que por nada del mundo ha dudado en darme una mano cuando la necesite.

A mi mamita, mi papá y mis hermanas, en especial a la pequeña Sofí que cada día me sorprende con algo nuevo, a toda la familia, a mis amig@s: los de toda la vida, a los que ya no tengo cerca, a las nuevas amistades que se están en proceso, a los que aunque sólo nos veamos cada año, a los que siempre sacan las fiestas, a los amigos y ahora colegas de generación, a los cuates de la Tower, a todos, que sin ellos no tendría sentido cumplir todas mis metas, por el simple hecho de no tener con quien compartirlas.

Indiscutiblemente a mi Alma máter, la Universidad Nacional Autónoma de México por la gran oportunidad que me brindó al formar parte de su comunidad, y en especial a la Facultad de Química por la preparación académica. Al grupo CEASPA, por permitirme participa en sus proyectos y la formación profesional, además de darme la oportunidad de conocer el verdadero estrés al entregar el reporte final de un proyecto.

Por último, a mi profesor de química del CCH-Sur, porque sin él no hubiera tomado el fabuloso camino de la ingeniería química.

Gracias a todos y cada unos de ustedes por formar parte de mi vida e impulsarme a seguir adelante.

## Índice

1. Introducción .....	7
1.1. Objetivos .....	8
1.2. Alcances.....	8
2. Antecedentes.....	9
2.1. Tipos de recipientes a presión .....	9
2.2. Estándares de construcción de recipientes a presión .....	10
2.3. Métodos de fabricación y materiales de recipientes.....	10
2.4. Inspección en recipientes a presión .....	11
2.5. Límite de retiro y presión permisible de trabajo actual en recipientes a presión.....	12
3. Parámetros para el cálculo de límite de retiro.....	14
3.1. Condiciones de diseño .....	14
3.1.1. Presión de diseño .....	14
3.1.2. Temperatura de diseño.....	16
3.2. Características del material y fabricación del recipiente.....	16
3.2.1. Esfuerzo máximo permisible.....	17
3.2.2. Eficiencia de soldadura.....	20
3.3. Factores geométricos.....	23
3.4. Corrosión.....	26
3.4.1. Corrosión permitida .....	27
3.4.2. Margen de corrosión.....	27
3.5. Metodología de cálculo de límite de retiro para recipientes a presión. 28	
3.5.1. Metodología de cálculo de límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para la envolvente de un recipiente cilíndrico horizontal .....	29
3.5.2. Metodología de cálculo de límite de retiro y presión permisible actual para un recipiente esférico .....	32

3.5.3.	Metodología de cálculo de límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para un casquete elipsoidal.....	35
3.5.4.	Metodología de cálculo de límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para un casquete toriesférico .....	38
3.5.5.	Metodología de cálculo de límite de retiro y presión permisible de de trabajo actual para un casquete hemisférico .....	41
3.5.6.	Metodología de cálculo de límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para un casquete cónico .....	44
4.	Aplicación de la metodología propuesta .....	47
4.1.	Cálculo de límite de retiro de un cambiador de calor .....	47
4.1.1.	Cálculo de límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para la envolvente del carrete del intercambiador de calor EA-14.....	51
4.1.2.	Cálculo de límite de retiro y presión permisible de trabajo actual del casquete del carrete del intercambiador EA-14 .....	53
4.1.3.	Cálculo de límite de retiro y presión permisible de trabajo actual de las boquillas del carrete del cambiador EA-14.....	55
4.1.4.	Límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para EA-14	56
4.2.	Cálculo de límite de retiro de un tanque de almacenamiento esférico	59
4.2.1.	Cálculo de límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para el casquete inferior y el anillo 3 del tanque de almacenamiento esférico TE-14 .....	66
4.2.2.	Cálculo de límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para las boquillas del recipiente esférico TE-14 .....	67
4.1.1.	Límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para TE-1468	
5.	Análisis de resultados .....	71
5.1.	Carrete del cambiador de calor EA-14 .....	71
5.2.	Casquete superior del tanque de almacenamiento esférico.....	76
6.	Conclusiones .....	78

6. Bibliografía.....	80
ANEXOS .....	81
A. Símbolos, abreviaturas y acrónimos .....	81
B. Tabla de esfuerzos máximos permisibles .....	82
C. Tabla de eficiencia de soldadura.....	85
D. Análisis estadístico de la medición de espesores .....	87
E. Expediente de inspección técnica del intercambiador de calor EA-14	89
F. Expediente de inspección técnica del tanque de almacenamiento esférico TE-14 .....	92
G. Tablas de coeficiente de material y eficiencia de soldadura para determinar límite de retiro con base al código ASME B31.3 .....	101

## Índice de tablas

Tabla 1. Tabla de esfuerzos máximos permisibles para los materiales SA-515, SA-516 y SA-387 .....	19
Tabla 2. Eficiencia de soldadura para diferentes tipos de soldadura.....	23
Tabla 3. Factor de proporción $K$ para casquetes elipsoidales .....	25
Tabla 4. Factor de proporción $M$ para casquetes toriesféricos .....	26
Tabla 5. Variables para el cálculo de límite de retiro de un recipiente cilíndrico horizontal.....	30
Tabla 6. Variables para el cálculo de límite de retiro de un recipiente esférico	33
Tabla 7. Variables para el cálculo de límite de retiro de un casquete elipsoidal	35
Tabla 8. Variables para el cálculo de límite de retiro de un casquete toriesférico .....	38
Tabla 9. Variables para el cálculo de límite de retiro de un casquete hemisférico .....	41
Tabla 10. Variables para el cálculo de límite de retiro de un casquete cónico..	44
Tabla 11 Datos de diseño y fabricación del cambiador de calor EA-14 .....	50
Tabla 12 Registro de las dimensiones principales del casquete elipsoidal del cambiador de calor EA-14 .....	53
Tabla 13 Límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para el carrete y el casquete en la primera inspección .....	57
Tabla 14 Límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para el carrete y el casquete en la segunda inspección .....	58
Tabla 15 Límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para el carrete y el casquete en la tercera inspección .....	58
Tabla 16 Resultados del cálculo de límite de retiro para las boquillas del carrete EA-14 .....	59
Tabla 17 Datos de diseño y fabricación de tanque de almacenamiento esférico .....	62
Tabla 18 Boquillas del tanque de almacenamiento esférico TE-14 .....	63
Tabla 19 Altura del fluido dentro de la esfera .....	65
Tabla 20 Densidad del gas LP.....	65
Tabla 21 Límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para el casquete inferior y el anillo 3 en la primera inspección .....	68



Tabla 22 Límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para el casquete inferior y el anillo 3 en la segunda inspección.....	69
Tabla 23 Límite de retiro y presión permisible de trabajo para las boquillas del casquete inferior de TE-14 .....	70

## Índice de figuras

Figura 1. Presión hidrostática en recipientes verticales .....	15
Figura 2. Esfuerzo máximo permisible en función de la temperatura .....	18
Figura 3. Tipos de uniones.....	21
Figura 4. Categorías de uniones.....	22
Figura 5. Dimensiones principales de casquetes típicos .....	25
Figura 6. Tanque acumulador horizontal .....	29
Figura 7 Diagrama de flujo para el cálculo de límite de retiro y presión permisible actual de un recipiente cilíndrico horizontal .....	31
Figura 8. Tanque de almacenamiento esférico.....	32
Figura 9 Diagrama de flujo para el cálculo de límite y presión permisible de trabajo actual de retiro de un recipiente esférico.....	34
Figura 10. Dimensiones principales de un casquete elipsoidal.....	35
Figura 11 Diagrama de flujo para el cálculo de límite y presión permisible de trabajo actual de retiro de un casquete elipsoidal .....	37
Figura 12. Dimensiones principales de un casquete toriesférico.....	38
Figura 13 Diagrama de flujo para el cálculo de límite de retiro y presión permisible de trabajo actual de un casquete toriesférico .....	40
Figura 14. Dimensiones principales de un casquete hemisférico.....	41
Figura 15 Diagrama de flujo para el cálculo de límite de retiro y presión permisible de trabajo actual de un casquete hemisférico .....	43
Figura 16. Dimensiones principales de un casquete cónico.....	44
Figura 17 Diagrama de flujo para el cálculo de límite de retiro y presión permisible de trabajo actual de un casquete cónico .....	46
Figura 18 Secciones de un cambiador de calor .....	49
Figura 19 Secciones en un tanque de almacenamiento esférico .....	60
Figura 20 Vistas de las boquillas de los casquetes de la esfera TE-14 .....	61
Figura 21 Altura del fluido dentro de la esfera .....	64
Figura 22 Límite de retiro del carrete y casquete ( $D/2h=1$ ) .....	73
Figura 23 Límite de retiro del carrete y casquete ( $D/2h=3$ ) .....	73
Figura 24 Análisis de espesores del carrete del cambiador de calor EA-14 .....	75
Figura 25 Análisis de espesores del casquete inferior del a esfera TE-14 .....	77

## 1. Introducción

En las instalaciones de un sistema de refinación de petróleo, se encuentran diferentes tipos de recipientes sujetos a presión. Estos recipientes, debido a las condiciones de operación y el tipo de sustancias corrosivas que manejan, están expuestos a una pérdida de espesor en la pared ya sea por corrosión o por desgaste.

La pérdida de este espesor es inherente, por lo que se debe de evaluar el espesor mínimo de la pared del equipo al cual se puede operar garantizando la integridad física y mecánica del equipo e instalaciones. Además, el riesgo radica en la pérdida de contención del material en los recipientes, debido a las condiciones de operación a las que se encuentran operando los equipos, ya que puede causar daño a la comunidad y al medio ambiente.

El conocer el valor del espesor mínimo requerido o límite de retiro ayudará a llevar un mejor control del mantenimiento de los recipientes, ya que es un indicador de cual es la pieza o equipo que debe ser remplazada o bien tener un estimado de la vida útil del equipo.

Simultáneamente, se debe de hacer una evaluación de la presión máxima a la que puede ser sometido el equipo sin que se afecte su integridad física y mecánica, en donde no presente fugas y se pueda garantizar una operación segura.

Es de suma importancia establecer una metodología en donde se pueda calcular el límite de retiro de un equipo y la presión permisible de trabajo actual para así poder establecer los límites en donde se puede garantizar la operación segura del equipo.

En este documento, se establecen los parámetros necesarios para realizar el cálculo de límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para recipientes a presión diseñados bajo el código American Society of Mechanical Engineers, ASME Sección VIII División 1, edición 2003. Además, se integra el cálculo de límite de retiro según la normatividad vigente, para las plantas de refinación de petróleo en México.

La aplicación de la metodología esta basada en el criterio de establecer un límite de retiro por unidad de control según el procedimiento para el registro, análisis y programación de la medición preventiva de espesores.

### **1.1. Objetivos**

1. Con base al código de diseño más utilizado en las instalaciones de refinación de petróleo en México, recopilar criterios y parámetros utilizados en el cálculo de los límites de retiro para recipientes a presión interna de un sistema de refinación.
2. Evaluar los criterios y parámetros recopilados para proponer una metodología practica para determinar el límite de retiro de los recipientes a presión, y conjuntar con lo establecido en la normatividad vigente aplicable.

### **1.2. Alcances**

1. Determinar los parámetros necesarios para aplicar la metodología de cálculo de límite de retiro para recipientes sujetos a presión, diseñados bajo el Código ASME.
2. Proponer la metodología para los recipientes sujetos a presión interna como: recipientes cilíndricos horizontales, recipientes esféricos y para cuatro tipos de casquetes: elipsoidal, toriesférico, hemisférico y cónico.
3. Aplicar la metodología propuesta para dos equipos existentes en un sistema de refinación de petróleo, el cambiador de calor EA-14 y el tanque de almacenamiento esférico TE-14.

## 2. Antecedentes

Un recipiente es un contenedor diseñado para soportar presión interna o externa. Un recipiente a presión opera a una presión mayor que 15 lb<sub>f</sub>/in<sup>2</sup>; es decir, por encima de la atmosférica<sup>1</sup>. Esta presión puede ser impuesta por una fuente externa, por la aplicación de calor indirecta o directamente.<sup>2</sup>

### 2.1. Tipos de recipientes a presión

Los recipientes a presión se pueden encontrar en diferentes formas geométricas, como cilindros con casquetes de diferentes tipos: elipsoidales, toriesférico, hemisféricos, cónicos o planos, esféricos o tipo cajas con casquetes rectangulares planos o casquetes cuadrados planos. En los recipientes cilíndricos, se incluyen equipos horizontales o verticales.

En un sistema de refinación de petróleo, un equipo es cualquier recipiente sujeto o no a presión. Sin embargo, en este documento se maneja un equipo como un recipiente sujeto a presión.

Tipos de recipientes a presión:

- Cambiadores de calor
- Condensadores
- Columnas (Recipientes cilíndricos verticales)
- Torres de destilación
- Tanques de almacenamiento horizontales
- Reactores
- Tanques de almacenamiento esféricos

---

<sup>1</sup> Inspection of Pressure Vessel (Tower, Drums, Reactors, Heat Exchangers, and Condenser)  
Recommended practice API 572<sup>a</sup> Edition, February 2001

<sup>2</sup> Pressure Vessel Inspection Code: Maintenance Inspection, Rating, Repair, and Alteration, API 510 8<sup>a</sup>  
Edition, June 1997

## **2.2. Estándares de construcción de recipientes a presión**

Debido a la necesidad de estandarizar los criterios para una mejor construcción de recipientes a presión, con la finalidad tener una operación más segura, fue creado el Código ASME para recipientes a presión no sometidos a fuego directo. Como resultado de la unión de diferentes comités se obtuvo el Código ASME Sección VIII División 1, Reglas para la construcción de Recipientes a Presión.

El código ASME enlista una serie de materiales que pueden ser utilizados para la construcción, proporciona ecuaciones para calcular el espesor, proporcionan reglas y métodos para su manufacturación, además de especificar el procedimiento completo para la inspección de recipientes.

El Código ASME, es un vehículo de comunicación para productores y usuarios. Este código funciona como lenguaje común, definiendo la calidad y estableciendo criterios de seguridad. Cuando se maneja un procedimiento estandarizado, se disminuyen los costos e incluso la capacitación. Además, el consumidor puede aceptar más fácilmente el producto si se juzgan características específicas.

El Código ASME no tiene capacidad legislativa, sin embargo, el código esta referenciado en las leyes y reglamentos de organismos responsables por la seguridad pública. Por lo tanto en ciertas ciudades de Estados Unidos de Norte América se ha convertido en un requisito mandatorio.

Existen otro tipo de códigos, como por ejemplo en Alemania la Norma DIN, por sus siglas en alemán Deutsches Institut für Normung, Instituto Alemán de Normalización al diseño de recipiente. Se tiene el DIN EN 13445 Pressure Vessel Design per European Standard. En Canadá las normas a los recipientes a presión están reguladas por CSA B51, Canadian Standard Association.

## **2.3. Métodos de fabricación y materiales de recipientes**

Antes del desarrollo de la soldadura, el remachado era el método más común de fabricación de recipientes a presión. Para la construcción de recipientes a

presión se utilizaban uniones de remache fuertes. En la actualidad existen diferentes métodos de fabricación, pero la gran mayoría de los recipientes a presión son construidos con uniones soldadas.

Respecto al material, el acero al carbón es el material base más utilizado para la construcción de recipientes a presión. Aun que para propósitos específicos, pueden ser utilizadas aleaciones austenítica o ferrítica, aleaciones de níquel o titanio.

#### **2.4. Inspección en recipientes a presión**

Una vez que se ha construido un recipiente a presión con el código seleccionado, y que actualmente se encuentra en operación, debe ser sometido a pruebas de inspección técnica para verificar que el equipo pueda operar de una manera segura.

Los objetivos principales de la inspección son determinar el estado físico del recipiente, establecer la velocidad y la causa del deterioro de de las paredes del recipiente.

Existen dos tipos de inspecciones, la interna y la externa. La inspección interna se realizara cuando el equipo se encuentre fuera de operación y se deberán de efectuar pruebas no destructivas como la inspección interior ocular, la inspección por líquidos penetrantes, la inspección con partículas magnéticas para detectar grietas o fracturas, la inspección radiográfica para evaluar cruces de soldaduras, la inspección por réplicas metalografías y perfiles de dureza para evaluar la estructura del material.

La inspección por pruebas no destructivas únicamente se efectuará cuando los resultados de las pruebas no destructivas indiquen la necesidad de realizar alguna de ellas, para conocer algunas características muy específicas del material o la soldadura.<sup>3</sup>

La inspección externa es una inspección visual en el exterior de todas las partes y accesorios del recipiente. En esta inspección también se verifica el

---

<sup>3</sup> Inspection of Pressure Vessel (Tower, Drums, Reactors, Heat Exchangers, and Condenser)  
Recommended practice API 572 <sup>a</sup> Edition, February 2001

estado físico de la envolvente, los casquetes, las boquillas y accesorios, instrumentación y aislamiento del recipiente a presión. También, se deberá verificar el estado físico de la cimentación, la soportería, las escaleras, barandales y plataformas.

En la inspección externa se debe de incluir la inspección ultrasónica de medición de espesores. Establecer un procedimiento predictivo para detectar y evaluar oportunamente las disminuciones de espesor debajo de los límites permisibles, que puedan afectar la integridad física de los equipos y así tomar las medidas necesarias para prevenir dichas fallas. La periodicidad de esta inspección está en función del análisis estadístico de los datos obtenidos de la medición de espesores.<sup>4</sup>

Se debe de contar con el expediente de registro de medición de espesores de cada uno de los equipos, para así poder hacer la evaluación correspondiente del cálculo de límite de retiro y presión permisible de trabajo actual.

### **2.5. Límite de retiro y presión permisible de trabajo actual en recipientes a presión**

El límite de retiro de un equipo, se refiere al espesor mínimo de la pared de la envolvente, casquete o boquilla de un equipo que, al encontrarse por debajo de este espesor se considera que el equipo no operará de una forma segura.

El límite de retiro estaba basado principalmente en el código de diseño del equipo. Toma en cuenta la geometría del equipo; es decir, sus dimensiones y factores de proporción entre sus dimensiones principales. El límite de retiro esta calculado con base a las condiciones de diseño del recipiente, presión y temperatura.

La mayoría de los recipientes son construidos con uniones soldadas, por lo tanto se debe de tomar en cuenta un parámetro que involucre el método de fabricación como la eficiencia de soldadura. Además, se debe de tomar en

---

<sup>4</sup> Inspection Practices for Piping System Components, Recommended Practices API 574, 2ª Edition, June 1998



cuenta características del material, en este caso será el esfuerzo máximo permisible.

La presión permisible de trabajo actual o la presión máxima de trabajo permisible, es la presión más alta, que según su diseño y con los espesores actuales, puede resistir un equipo sin deformarse permanentemente y sin presentar fugas.

Para la presión permisible de trabajo actual se encuentran involucradas las mismas variables que para el cálculo de límite de retiro. La diferencia radica en que la presión permisible de trabajo está calculada con base al espesor mínimo registrado durante la inspección técnica del equipo.

### **3. Parámetros para el cálculo de límite de retiro**

Para establecer el límite de retiro en recipientes a presión es necesario considerar ciertos parámetros. Estos parámetros, están directamente relacionados con el código de diseño del recipiente, las condiciones de diseño, las dimensiones, características del material y del método de fabricación del recipiente. A continuación se hará una descripción de cada uno de los parámetros a tomar en cuenta en el cálculo del límite de retiro de recipientes sujetos a presión.

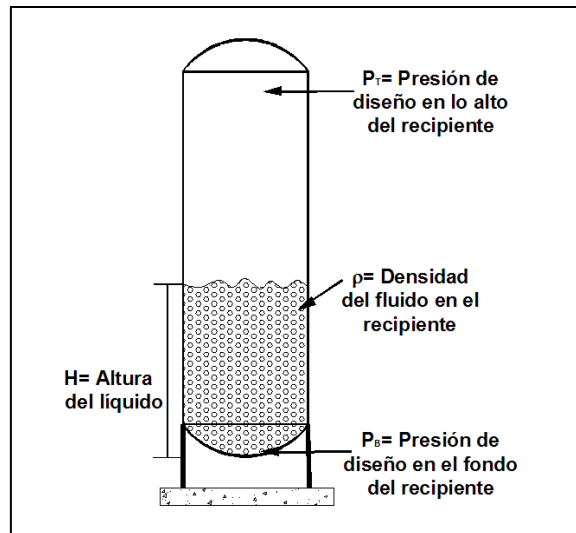
#### **3.1. Condiciones de diseño**

##### **3.1.1. Presión de diseño**

La presión de diseño,  $P_D$ , es la presión máxima a la que se puede encontrar el equipo. Sin embargo no se espera llegar a valores de dicha presión durante la operación diaria. En otras palabras, la presión de diseño es la presión de operación del recipiente adicionando un margen de diseño. En el Código ASME se recomienda utilizar un margen de diseño del 10% de la presión de operación o bien sumar 25 psi, y utilizar la presión que resulte mayor.

Este margen es adicionado, debido a que en el diseño se prevé que en una situación de emergencia se pueda incrementar la presión en el recipiente, ya sea durante un incendio, una falla de servicios, una falla de una válvula o una falla de operación.

En los recipientes verticales sujetos a presión, por ejemplo las torres o las esferas, se debe de tomar en cuenta la presión hidrostática ejercida por el fluido que se encuentra en el interior. Por lo tanto la presión de diseño en el fondo del recipiente será igual a la presión de diseño en la parte superior del recipiente más la presión ejercida por el fluido (presión hidrostática), como se observa en la figura-1.



**Figura 1. Presión hidrostática en recipientes verticales**

La presión hidrostática en recipientes verticales puede expresarse como se indica en la ecuación 1, en donde  $P_B$  es la presión de diseño en el fondo del recipiente,  $P_T$  es la presión en lo alto del recipiente,  $H$  es la altura del fluido dentro del recipiente y  $\rho$  es la densidad del fluido.

$$P_B = P_T + \rho H$$

### **Ecuación 1**

Para los recipientes sujetos a presión incluidos en este documento solamente se tomará en cuenta la presión hidrostática para los recipientes esféricos. La altura en un recipiente esférico es considerablemente mayor a la de otros recipientes como los tanques acumuladores horizontales o los cambiadores de calor. Por lo tanto es necesario considerar la carga producida por la altura del fluido en el interior de la esfera.

Por otro lado, la presión de operación,  $P_{op}$ , como su nombre lo dice, es la presión a la cual se encuentra el recipiente en su operación usual. La presión de operación debe ser ajustada con base a la presión máxima interna o externa que el recipiente puede contener.

### **3.1.2. Temperatura de diseño**

La temperatura de diseño,  $T_D$ , es un factor muy importante, ya que esta repercute directamente en las características del material, como son la resistencia y el esfuerzo máximo permisible. El tipo de material y por lo tanto sus características intervienen directamente en el cálculo de límite de retiro del recipiente, por lo que la temperatura es una variable que afecta indirectamente al límite de retiro.

### **3.2. Características del material y fabricación del recipiente**

Unos de los factores primordiales para el diseño de un recipiente a presión, es la selección del material de construcción. La selección del material se basa principalmente en las características del mismo, por ejemplo la resistencia a la corrosión, resistencia al ataque de hidrógeno, resistencia a la fractura, etc. También existen otro tipo de factores secundarios, como son el costo, la viabilidad y el fácil mantenimiento.

Una de las características de un material, es la habilidad de soportar un esfuerzo. Esta característica es muy importante ya que con base a la resistencia del material para soportar un esfuerzo se determinara el espesor necesario.

En la selección del material también influyen las condiciones a las que se encontrara el recipiente. Ya que, por ejemplo, el hidrógeno a temperatura entre 300 °F y 400°F (572°C y 752°C) se difunde entre los poros que presenta el acero al carbón. Este hidrógeno reacciona formando hidrógeno molecular que no se puede difundir fuera de los poros del acero al carbón, y la acumulación de éste puede provocar el incremento en la presión dentro del poro y provocar un ruptura. Por otro lado, a una temperatura de 600°F (1112°C) el hidrógeno ataca al acero al carbón, dejándolo inservible y sin poder ser reparado.

La resistencia a la fractura que puede tener un material, se refiere a la habilidad de soportar las condiciones que podrían transformarlo a quebradizo. Este esfuerzo se determina por medio de la magnitud de energía necesaria para

provocar una fractura en el equipo. La resistencia a la fractura es función de la temperatura, la resistencia disminuye conforme a la temperatura.

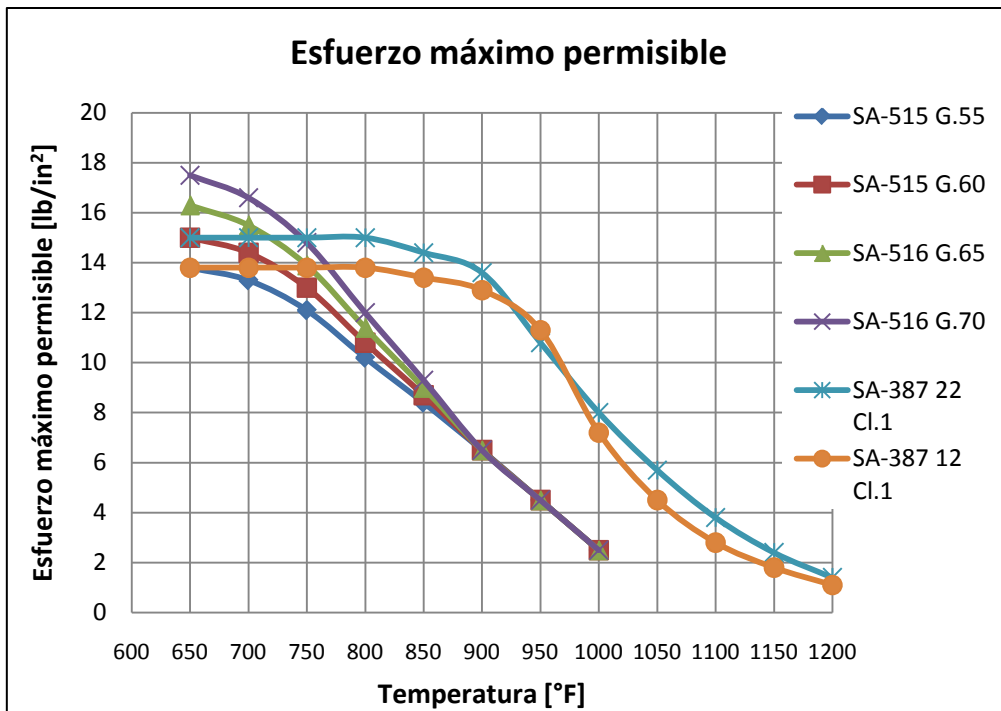
### **3.2.1. Esfuerzo máximo permisible**

Una de las características más importantes del material, que está directamente relacionada en el cálculo del espesor mínimo requerido o límite de retiro, es el esfuerzo máximo permisible.

El esfuerzo máximo permisible,  $S$ , es un factor a considerar en el diseño de recipientes a presión, este factor es la relación entre la resistencia de los componentes del recipiente, las características del material, y las cargas que puede soportar el recipiente, como la presión, el peso etc. En otras palabras, el esfuerzo máximo permisible es el esfuerzo máximo que puede soportar el recipiente de una forma segura.

En el diseño se debe considerar que la presión interna nunca exceda la resistencia de los componentes del recipiente; es decir, del cuerpo o los casquetes. Por lo tanto en el esfuerzo máximo permisible se incluye un margen de seguridad entre el esfuerzo de un componente debido a las cargas aplicadas y el esfuerzo que puede causar una falla.

El esfuerzo máximo permisible del material se encuentra en función de la temperatura a la que se encuentra. En el cálculo de espesor mínimo requerido se debe de incluir el esfuerzo máximo permisible del material de construcción del recipiente, evaluado a la temperatura de diseño del recipiente. En la figura 2, se puede observar una grafica del esfuerzo máximo permisible en función de la temperatura para tres diferentes materiales de uso común para aplicaciones con hidrocarburos: SA-515, SA-516 y SA-378. Los dos primeros materiales son principalmente utilizados en recipientes cilíndricos y casquetes como los tanques acumuladores horizontales, el tercer material es comúnmente utilizado en el cuerpo y casquetes de cambiadores de calor. En la figura 2 se puede ver como el esfuerzo máximo permisible disminuye conforme a la temperatura incrementa.



**Figura 2. Esfuerzo máximo permisible en función de la temperatura**

En el código ASME Sección II Parte D, Subparte 1 “Tabla de esfuerzos”, se encuentran documentadas las tablas para cada material aprobado por dicho código para la construcción de equipos, en donde se indica el valor del esfuerzo máximo permisible en un rango de temperatura de 600°F a 1200°F (316°C a 649°C). En la tabla 1 se muestra las tablas del código ASME de los esfuerzos máximos permisibles para los tres materiales mencionados anteriormente.

Tabla 1. Tabla de esfuerzos máximos permisibles para los materiales SA-515, SA-516 y SA-387


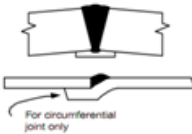
ALLOWABLE STRESS IN TENSION FOR CARBON AND LOW-ALLOY STEEL							ALLOWABLE STRESS IN TENSION FOR CARBON AND LOW ALLOY STEEL Max Allowable Stress, ksi (Multiply by 1,000 to Obtain psi) for Metal Temperature, °F, Not Exceeding													
Spec No.	Grade	Nominal Composition	P-No.	Group No.	Min. Yield (ksi)	Min. Tensile (ksi)	650	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	Spec No.	
<b>Carbon Steel Plates and Sheets</b>							<b>Carbon Steel Plates and Sheets</b>													
SA-515	55	C-Si	1	1	30	55	13.8	13.3	12.1	10.2	8.4	6.5	4.5	2.5	--	--	--	--	SA-515	
	60	C-Si	1	1	32	60	15.0	14.4	13.0	10.8	8.7	6.5	4.5	2.5	--	--	--	--	SA-515	
	65	C-Si	1	1	35	65	16.3	15.5	13.9	11.4	9.0	6.5	4.5	2.5	--	--	--	--	SA-515	
	70	C-Si	1	2	38	70	17.5	16.6	14.8	12.0	9.3	6.5	4.5	2.5	--	--	--	--	SA-515	
SA-516	55	C-Si	1	1	30	55	13.8	13.3	12.1	10.2	8.4	6.5	4.5	2.5	--	--	--	--	SA-516	
	60	C-Mn-Si	1	1	32	60	15.0	14.4	13.0	10.8	8.7	6.5	4.5	2.5	--	--	--	--	SA-516	
	65	C-Mn-Si	1	1	35	65	16.3	15.5	13.9	11.4	9.0	6.5	4.5	2.5	--	--	--	--	SA-516	
	70	C-Mn-Si	1	2	38	70	17.5	16.6	14.8	12.0	9.3	6.5	4.5	2.5	--	--	--	--	SA-516	
<b>Plate - Low Alloy Steels</b>							<b>Plate-Low Alloy Steels (Cont'd)</b>													
SA-387	2 Cl.1	½ Cr-½ Mo	3	1	33	55	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.3	9.2	5.9	--	--	--	--	SA-387	
	2 Cl.2	½ Cr-½ Mo	3	2	45	70	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	16.9	9.2	5.9	--	--	--	--	SA-387	
	12 Cl.1	1Cr-½ Mo	4	1	33	55	13.8	13.8	13.8	13.8	13.4	12.9	11.3	7.2	4.5	2.8	1.8	1.1	SA-387	
	12 Cl.2	1Cr-½ Mo	4	1	40	65	16.3	16.3	16.3	16.3	15.8	15.2	11.3	7.2	4.5	2.8	1.8	1.1	SA-387	
	11 Cl.1	1 ¼ Cr-½Mo-Si	4	1	35	60	15.0	15.0	15.0	15.0	14.6	13.7	9.3	6.3	4.2	2.8	1.9	1.2	SA-387	
	11 Cl.2	1 ¼ Cr-½Mo-Si	4	1	45	75	18.8	18.8	18.8	18.8	18.3	13.7	9.3	6.3	4.2	2.8	1.9	1.2	SA-387	
	22 Cl.1	2 ¼ Cr-1Mo	5	1	30	60	15.0	15.0	15.0	15.0	14.4	13.6	10.8	8.0	5.7	3.8	2.4	1.4	SA-387	
	22 Cl.2	2 ¼ Cr-1Mo	5	1	45	75	17.7	17.2	17.2	16.9	16.4	15.8	11.4	7.8	5.1	3.2	2.0	1.2	SA-387	

En las hojas de diseño mecánico de los equipos, se encuentra documentado el material de construcción de cada una de las partes: cuerpo, casquetes y boquillas. En esta hoja de datos, también se encuentra el valor del esfuerzo máximo permisible del material para cada una de las partes del equipo. En caso de que no se cuente con esta hoja de datos se tendrá que recurrir a las tablas documentadas en el código ASME “Tablas de esfuerzos” para obtener el valor correspondiente.





### 3.2.2. Eficiencia de soldadura

La eficiencia de la soldadura,  $E$ , es un parámetro que toma en consideración la calidad de la soldadura (soldabilidad) y la concentración del esfuerzo localizado. Este esfuerzo localizado se debe al material o a las discontinuidades en la estructura.

El valor del factor eficiencia de soldadura está basado en el tipo de unión y en el grado de inspección radiográfica. En la figura 3 se ilustran los tipos de uniones.

TIPO DE UNIÓN	REPRESENTACIÓN	DESCRIPCIÓN
1		<p>Uniones a tope conectados por una doble soldadura o por otro medio que proporcione la misma calidad de los depósitos de soldadura dentro y fuera de la superficie del metal. Si existe banda de apoyo, deberán de ser retirados después de finalizar la soldadura</p>
2		<p>Unión soldada a tope con banda de respaldo, la cual se debe de retirar después de soldar.</p>



3		Unión soldada a tope sin banda de respaldo.
4		Doble unión por traslape con cordón de soldadura completo.
5		Unión por traslape con cordón de soldadura completo con soldaduras tipo plug.
6		Unión por traslape con cordón de soldadura completo sin soldaduras tipo plug.

**Figura 3. Tipos de uniones**

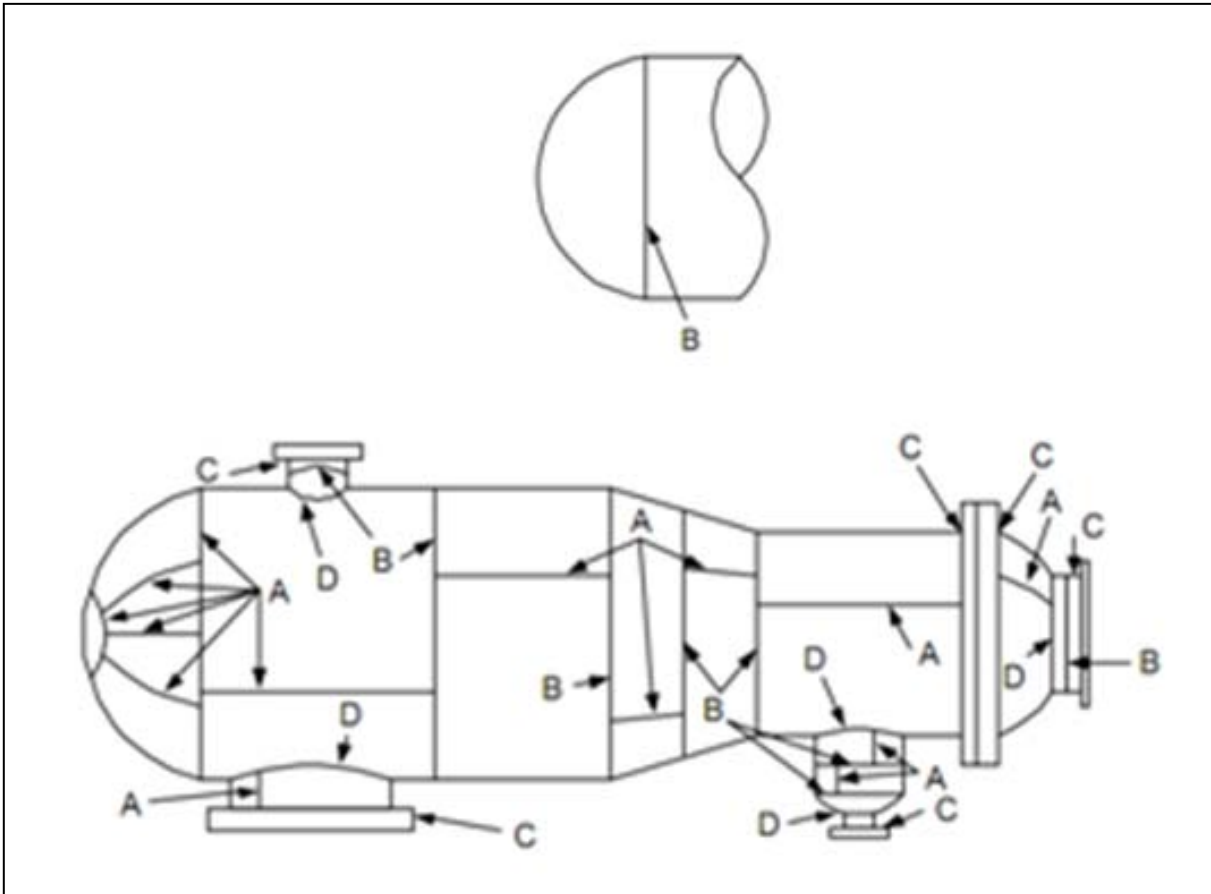
Cada tipo de unión cuenta con diferentes categorías de uniones. La categoría de unión se refiere a la manera en que se unen las partes y los componentes en un equipo. En la figura 4, se indican las diferentes categorías de unión que se pueden tener en un recipiente.

La categoría A se refiere a uniones longitudinales en el cuerpo principal, transiciones en diámetro, en un casquete conformado o plano, juntas soldadas circunferenciales que conectan un cabezal hemisférico al cuerpo principal.

La categoría B se refiere a uniones circunferenciales en el cuerpo, transiciones en diámetro incluyendo juntas entre la transición, soldaduras de juntas circunferenciales conectando casquetes conformados pero que no sean juntas entre casquetes hemisféricos y el cuerpo.

La categoría C, se refiere a uniones que conectan bridas placas-tubo, o casquetes planos al cuerpo, o que conecten casquetes conformados, a transiciones en diámetros.

La categoría D, se refiere a juntas soldadas conectando boquillas al cuerpo, a esferas, a transiciones en diámetro, a casquetes.



**Figura 4. Categorías de uniones**

Este parámetro, generalmente se encuentra indicado en la hoja de diseño mecánico del equipo. Sin embargo, en el código ASME Sección VIII División 1 Tabla UW-12, se puede encontrar la tabla con los valores del factor de eficiencia de soldadura para diferentes tipos de uniones.

Comúnmente, la mayoría de las uniones en los recipientes a presión presentan uniones de tipo 1, las uniones de este tipo tiene un factor de eficiencia de 0.85 o 1.00, dependiendo de la inspección radiográfica que se realice. En la tabla 2 se muestra un resumen de la tabla UW-12.

**Tabla 2. Eficiencia de soldadura para diferentes tipos de soldadura**

Tipo de unión	Categoría de unión	Grado de inspección radiográfica		
		Completa	Partes	Ninguna
1	A, B, C, D	1.00	0.85	0.70
2	A, B, C, D *	0.90	0.80	0.65
3	A, B, C	NA	NA	0.60
4	A, B, C *	NA	NA	0.55
5	B, C *	NA	NA	0.50
6	A, B *	NA	NA	0.45

\*Ver el código ASME para las limitaciones

NA = No Aplica

### **3.3. Factores geométricos**

En el cálculo de límite de retiro, otro factor de gran importancia es la geometría del recipiente. Se tiene para cada recipiente, una ecuación propuesta por el código ASME, para calcular el espesor mínimo requerido. En cada una de las ecuaciones las variables involucradas son prácticamente las mismas, la diferencia entre cada ecuación radica en la forma geométrica del recipiente y las variables que involucran sus dimensiones.

Por ejemplo, para un recipiente cilíndrico se utiliza el radio de la envolvente y para un recipiente esférico se utiliza el radio de la esfera, que son las dimensiones principales.

Para un casquete elipsoidal, las principales dimensiones son el diámetro,  $D$ , y la profundidad del casquete,  $h$ , como se muestra en la figura 5. En un casquete elipsoidal, se toma en cuenta un factor de proporción  $K$ , que es la relación entre el diámetro y la profundidad del casquete, esta relación está dada por la ecuación 2.

$$K = \frac{2 + \frac{D}{2h}}{6}$$

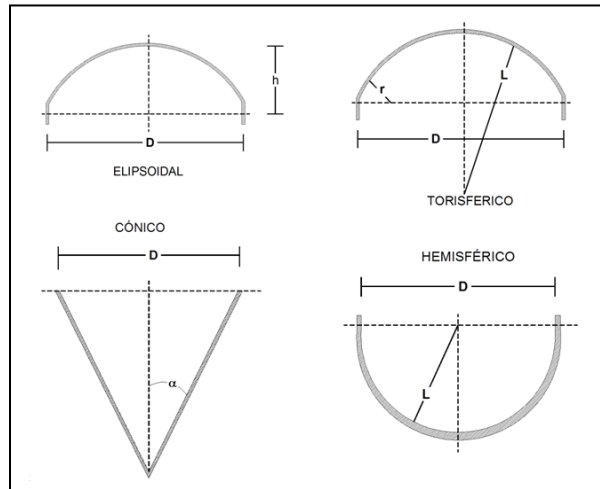
### **Ecuación 2**

En un casquete toriesférico, tiene tres dimensiones principales el diámetro,  $D$ , el radio de la corona o radio esférico,  $L$ , y el radio de transición,  $r$ , como se muestra en la figura 5. En este caso se determina un factor de proporción  $M$ , que es la relación entre el radio esférico y el radio de transición y esta determinado por la ecuación 3.

$$M = \frac{3 + \frac{L}{r} * 0.5}{4}$$

### **Ecuación 3**

En el caso de un casquete cónico, las principales dimensiones son el diámetro del casquete,  $D$ , y el ángulo del cono,  $\alpha$ . Para un casquete hemisférico, las principales dimensiones son el diámetro,  $D$ , y el radio de la corona o el radio esférico,  $L$ , como se indica en la figura 5.



**Figura 5. Dimensiones principales de casquetes típicos**

El factor de proporción  $K$ , para el casquete elipsoidal y el factor de proporción  $M$ , para el casquete torisférico, también se pueden obtener de las tablas localizadas en los apéndices obligatorios del Código ASME Sección VIII División 1<sup>5</sup>. Por ejemplo, para el factor de proporción  $K$  de las tablas, se calcula el valor de  $D/2h$  y se utiliza el valor más cercano al obtenido. Los datos que se encuentran tabulados son valores de  $K$  en función de la relación  $D/2h$ , esto se muestra en la tabla 3.

**Tabla 3. Factor de proporción  $K$  para casquetes elipsoidales**

Valores para el factor K											
<b>D/2h</b>	3.0	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2.3	2.2	2.1	2.0
<b>K</b>	1.83	1.73	1.64	1.55	1.46	1.37	1.29	1.21	1.14	1.07	1.00
<b>D/2h</b>	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0	
<b>K</b>	0.93	0.87	0.87	0.76	0.71	0.66	0.61	0.57	0.53	0.50	

De la misma manera, para el factor de proporción  $M$  se tiene una tabla con valores documentados. Se calcula el valor del cociente  $L/r$  y se utiliza el valor más cercano

<sup>5</sup> Mandatory Appendix 1

al indicado en la tabla y se tiene el correspondiente valor de  $M$ , esto se muestra en la tabla 4.

**Tabla 4. Factor de proporción  $M$  para casquetes toriesféricos**

Valores para el factor $M$											
<b>L/r</b>	1.0	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50
<b>M</b>	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22
<b>L/r</b>	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0
<b>M</b>	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50
<b>L/r</b>	9.5	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	16*
<b>M</b>	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77

### 3.4. Corrosión

Todos los recipientes se encuentran sujetos a un deterioro del material, y uno de los mecanismos principales es la corrosión y/o la erosión. La corrosión en los recipientes es debido a las sustancias que se manejan en los recipientes, ya que la mayoría de los procesos involucran sustancias potencialmente corrosivas, además de la influencia de las condiciones de operación. Por otro lado, la severidad del deterioro dependerá de la resistencia del material de construcción del recipiente. La erosión del material se debe a que algunos procesos involucran sólidos suspendidos que al chocar con el material provocan la pérdida de espesor en el material. Otra fuente de la erosión son los diferentes patrones de flujo que se pueden dar en un recipiente, por ejemplo cuando el fluido entra a altas velocidades por las boquillas y se produce un choque del fluido con las paredes del recipiente.

### **3.4.1. Corrosión permitida**

En el diseño de equipos, se incluye un espesor adicional al espesor mínimo requerido para que el recipiente resista cierto tiempo de operación a este espesor se le conoce como la corrosión permitida. De esta manera el espesor añadido, como corrosión permitida, compensa el espesor gastado durante el servicio del equipo. Este factor de corrosión permitida, generalmente, está incluido en los datos de la hoja de diseño mecánico.

La corrosión permitida es un parámetro que se debe de tomar en cuenta en el cálculo del límite de retiro. En el cálculo de límite de retiro se debe considerar el parámetro de corrosión permitida, ya que esto implica que el espesor mínimo calculado tendrá un factor de seguridad al adicionar la corrosión permitida, tendiendo un espesor mayor.

Esta variable es conocida como corrosión permitida, *CA*, del inglés *corrosion allowance*, tolerancia a la corrosión, *TC*, o corrosión permisible y la fuente principal de éste dato es la experiencia que se tiene de la corrosión observada para recipientes similares con el producto que contiene a lo largo de la vida completa del recipiente, típicamente 20 años.

### **3.4.2. Margen de corrosión**

El límite de retiro se debe de calcular para cada una de las inspecciones de medición de espesores que se realicen, por lo tanto se debe de tomar en cuenta como es la velocidad de desgaste en el recipiente durante un tiempo determinado.

El margen de corrosión es el espesor de la pared de una tubería que se adiciona al límite de retiro y que está destinado a compensar el desgaste por corrosión, abrasión o erosión.

Dicho margen de corrosión será de preferencia tomado de la velocidad real de desgaste en un tiempo de vida útil determinado. Con base a este criterio el margen de corrosión está definido por la ecuación 4.

$$MC = \frac{\bar{D}_{MAX} *}{VUE}$$

#### **Ecuación 4**

En donde  $\bar{D}_{MAX} *$  es la velocidad promedio de desgaste ajustada y  $VUE$  es la vida útil del recipiente, ambos evaluados con los datos de la medición de espesores inmediata anterior. Debido a que el margen de corrosión involucra parámetros de velocidad promedio de desgaste y vida útil, dicho parámetro sólo se tomara en cuenta cuando se cuente con más de una inspección registrada en el expediente del equipo. Y se deberá hacer una evaluación entre la corrosión permitida y el margen de corrosión, en donde se seleccionará el que proporcione un mayor margen de seguridad.

### **3.5. Metodología de cálculo de límite de retiro para recipientes a presión**

Con base a los parámetros analizados anteriormente, criterios especificados en el código ASME Sección VIII División 1 Parte UG para el diseño de recipientes a presión específicamente para el cálculo del espesor mínimo requerido, criterios de la norma API 574 y consideraciones adicionales descritas en este documento; se propone a continuación una metodología de cálculo de límite de retiro para los siguientes recipientes y casquetes.

- Recipiente cilíndrico
- Recipiente esférico
- Casquete elipsoidal
- Casquete toriesférico
- Casquete hemisférico
- Casquete cónico

La norma API 574 recomienda indicar en las tuberías de proceso el registro, análisis y programación de la medición de espesores por unidades de control. Partiendo de esta recomendación, para los equipos también se tomarán unidades de control, en donde una unidad de control de un equipo se define como la



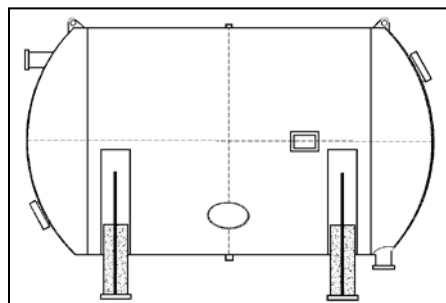
sección del equipo en donde la velocidad de desgaste es más o menos homogénea, con la finalidad de agrupar secciones con desgaste similar.

Por lo tanto, esta metodología se tendrá que aplicar cuando en cada una de las secciones del equipo se tenga una velocidad de desgaste diferente; es decir, se tendrá que calcular el límite de retiro de cada una de las partes del equipo: cuerpo, casquetes y boquillas.

En el caso de que las boquillas, a pesar de tener la misma velocidad de desgaste que la parte en donde se encuentren, el cuerpo o el casquete, se tendrán que tratar por separado para realizar el cálculo del límite de retiro. El tratamiento que se le da a las boquillas es como el de límite de retiro en tuberías; y ya que pueden ser de diámetros diferentes, el análisis se realizará por conjuntos de diámetros según las boquillas que se tengan.

### **3.5.1. Metodología de cálculo de límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para la envolvente de un recipiente cilíndrico horizontal**

Esta metodología se refiere a las secciones horizontales de los equipos, tales como el cuerpo de tanques acumuladores horizontales o cambiadores de calor. Por ejemplo el tanque acumulador de la figura 6. Esta metodología será válida cuando la presión no exceda el valor de  $0.385SE$  o el espesor no exceda la mitad del radio interno.



**Figura 6. Tanque acumulador horizontal**

En la tabla 5, se describen cada una de las variables involucradas en la metodología de cálculo del límite de retiro para la envolvente de un recipiente cilíndrico horizontal

**Tabla 5. Variables para el cálculo de límite de retiro de un recipiente cilíndrico horizontal**

<b>SIMBOLOGÍA</b>		
<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
$P_D$	Presión de diseño	$lb/in^2$
$T_D$	Temperatura de diseño	$^{\circ}C$
$R$	Radio de la envolvente	in
$E$	Eficiencia de la soldadura	-
$S$	Esfuerzo máximo permitida	$lb/in^2$
$CA$	Corrosión permitida	in
$MC$	Margen de corrosión	in
$C$	Corrosión	in
$t$	Espesor mínimo requerido (límite de retiro)	in
$t_a$	Espesor mínimo actual	in
$P_P$	Presión permisible de trabajo actual	$lb/in^2$
$\bar{D}_{MAX}^*$	Velocidad promedio de desgaste ajustada	in/año
VUE	Vida útil estimada	años
$e_k$	Espesor mínimo actual (registrado en el expediente)	mils

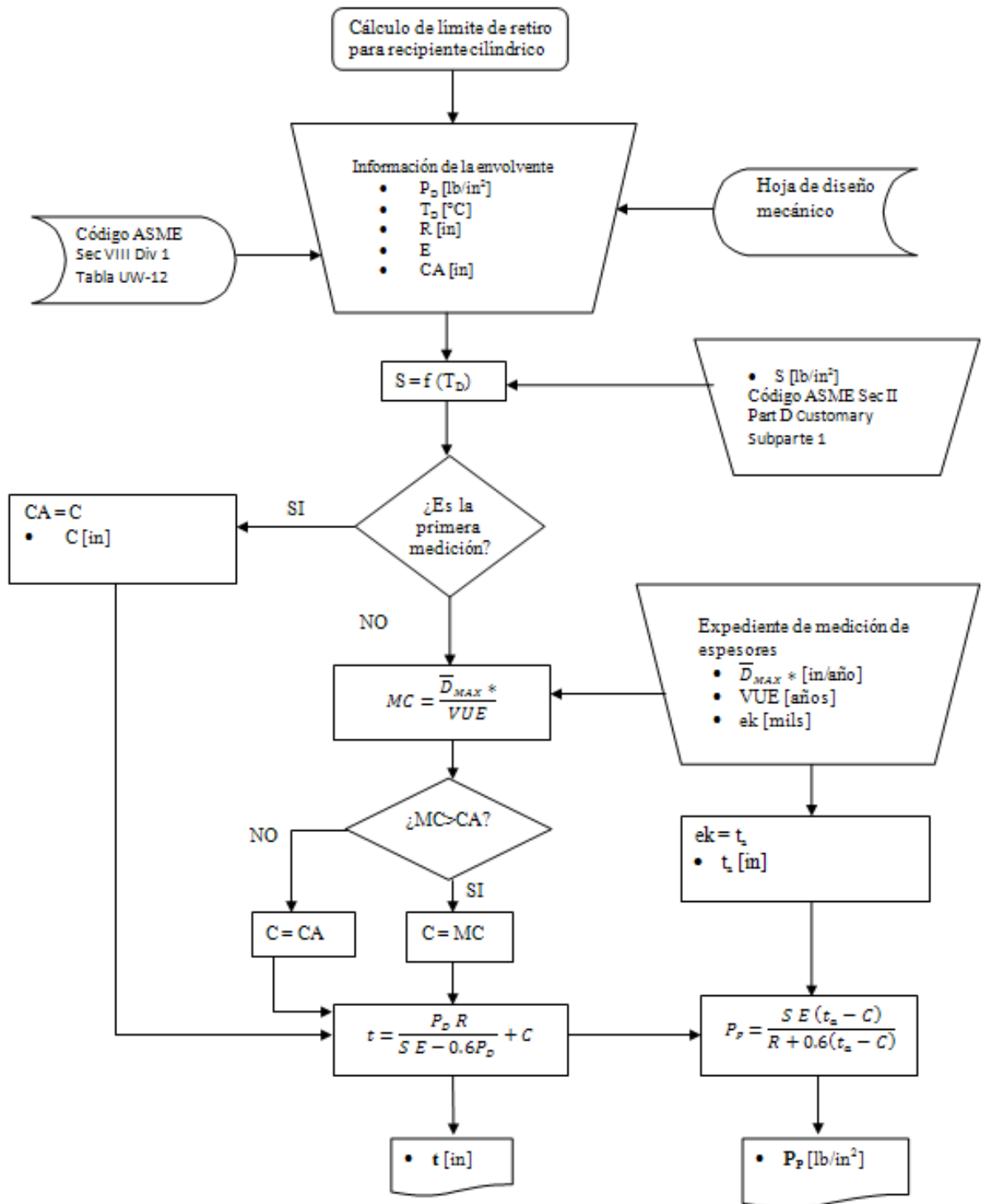


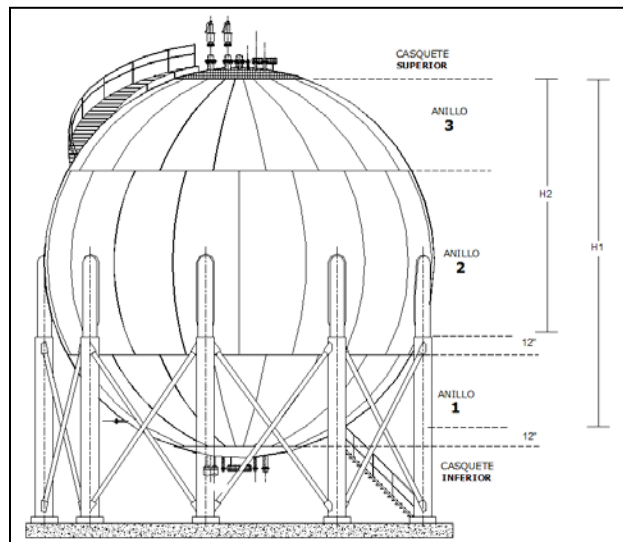
Figura 7 Diagrama de flujo para el cálculo de límite de retiro y presión permisible actual de un recipiente cilíndrico horizontal

### 3.5.2. Metodología de cálculo de límite de retiro y presión permisible actual para un recipiente esférico

Recipiente esférico se refiere a los tanques de almacenamiento esféricos. Este tipo de recipientes, dependiendo de su dimensión, cuenta con diferentes anillos de placas, el casquete superior y el casquete inferior.

El límite de retiro se obtendrá para cada uno de los anillos y los casquetes ya que se encuentran sujetos a una velocidad de desgaste diferente. La diferencia de velocidades de desgaste entre un anillo y otro o alguno de los casquetes, consiste en que las secciones se encuentran a alturas diferentes y como consecuencia la presión hidrostática ejercida por el fluido difiere en cada sección. Por ejemplo, la presión ejercida en el casquete inferior es mayor a la del casquete superior, debido a que el casquete inferior soporta una columna de líquido mayor.

Por cuestiones de seguridad el tanque esférico debe ser operado a un 75% de su capacidad, el cálculo del límite de retiro se debe de realizar tomando en cuenta que la esfera se encuentra al 100% de su capacidad. La altura del líquido se tomara de arriba hacia abajo, para el casquete inferior la altura será igual al diámetro de la esfera, como se muestra en la figura 8.



**Figura 8. Tanque de almacenamiento esférico**

Esta metodología es válida sólo cuando el espesor no exceda el valor de  $0.356R$  ó cuando la presión no exceda de  $0.665SE$ .

Los parámetros involucrados en esta metodología se describen en la tabla 6, donde se indican los símbolos y las unidades.

**Tabla 6. Variables para el cálculo de límite de retiro de un recipiente esférico**

<b>SIMBOLOGÍA</b>		
<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
$P_D$	Presión de diseño	$lb/in^2$
$T_D$	Temperatura de diseño	$^{\circ}C$
$R$	Radio interno de la esfera	in
$E$	Eficiencia de la soldadura	-
$S$	Esfuerzo máximo permisible	$lb/in^2$
$CA$	Corrosión permitida	in
$CM$	Margen de corrosión	in
$C$	Corrosión	in
$H$	Altura del punto considerado (se tomará de arriba hacia abajo, considerando que la esfera se encuentra completamente llena)	in
$\rho$	Densidad del fluido que contiene la esfera	$lb/in^3$
$t$	Espesor mínimo requerido (límite de retiro)	in
$t_a$	Espesor mínimo actual	in
$P_P$	Presión permisible de trabajo actual	$lb/in^2$
$\bar{D}_{MAX} *$	Velocidad promedio de desgaste ajustada	in/año
VUE	Vida útil estimada	años
$e_k$	Espesor mínimo actual (registrado en el expediente)	mils

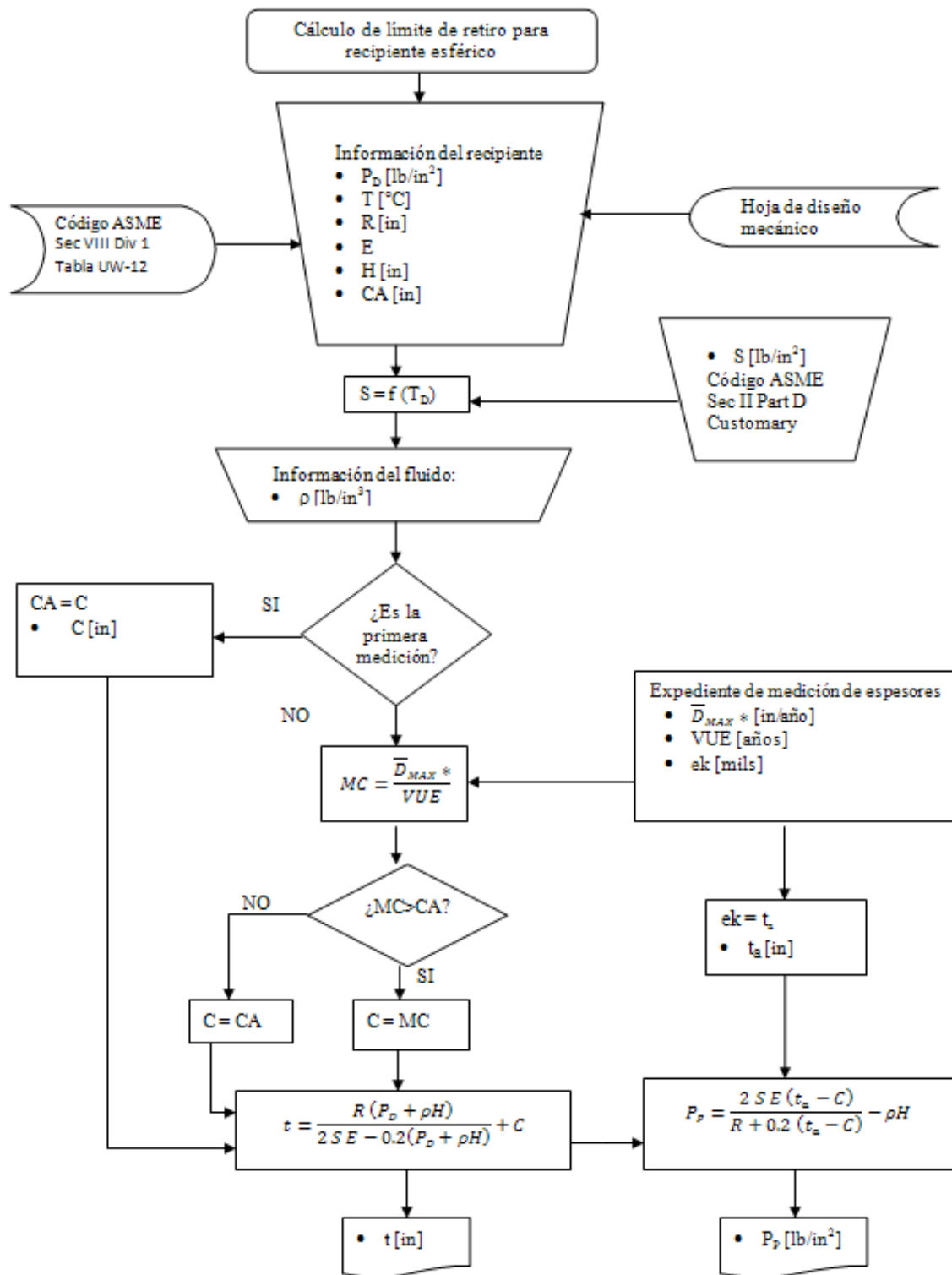


Figura 9 Diagrama de flujo para el cálculo de límite y presión permisible de trabajo actual de retiro de un recipiente esférico

### 3.5.3. Metodología de cálculo de límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para un casquete elipsoidal

Esta metodología está planteada para un casquete de forma cóncava semielipsoidal, en la que la mitad del eje menor (la profundidad interior del casquete, menos el borde) es igual a la cuarta parte del diámetro interno del borde del casquete. Como se observa en la figura 10,  $h$  es la profundidad del casquete y  $D$  el diámetro. Esta metodología es una aproximación aceptable a un casquete elipsoidal 2:1 que tenga un radio de transición de  $0.17D$  y un radio esférico de  $0.9D$ , en donde  $D$  es el diámetro interno del casquete.

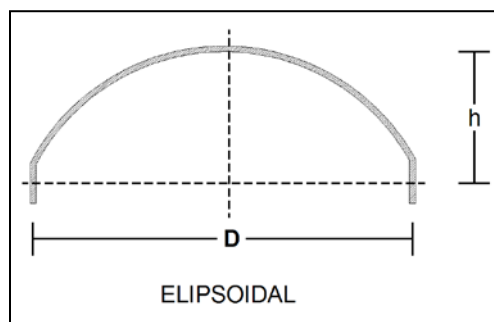


Figura 10. Dimensiones principales de un casquete elipsoidal

En la tabla 7 se describen cada una de las variables involucradas en el cálculo de límite de retiro de un casquete elipsoidal.

Tabla 7. Variables para el cálculo de límite de retiro de un casquete elipsoidal

SIMBOLOGÍA		
Variable	Descripción	Unidades
$P_D$	Presión de diseño	lb/in <sup>2</sup>
$T_D$	Temperatura de diseño	°C
$D$	Diámetro interno	in
$h$	Profundidad del casquete	in
$K$	Factor de proporción	-
$E$	Eficiencia de la soldadura	-
$S$	Esfuerzo máximo permisible	lb/in <sup>2</sup>
$CA$	Corrosión permitida	in

MC	Margen de corrosión	in
C	Corrosión	in
t	Espesor mínimo requerido (límite de retiro)	in
ta	Espesor mínimo actual	in
P <sub>p</sub>	Presión permisible de trabajo actual	lb/in <sup>2</sup>
$\bar{D}_{MAX} *$	Velocidad promedio de desgaste ajustada	in/año
VUE	Vida útil estimada	años
ek	Espesor mínimo actual (registrado en el expediente)	in



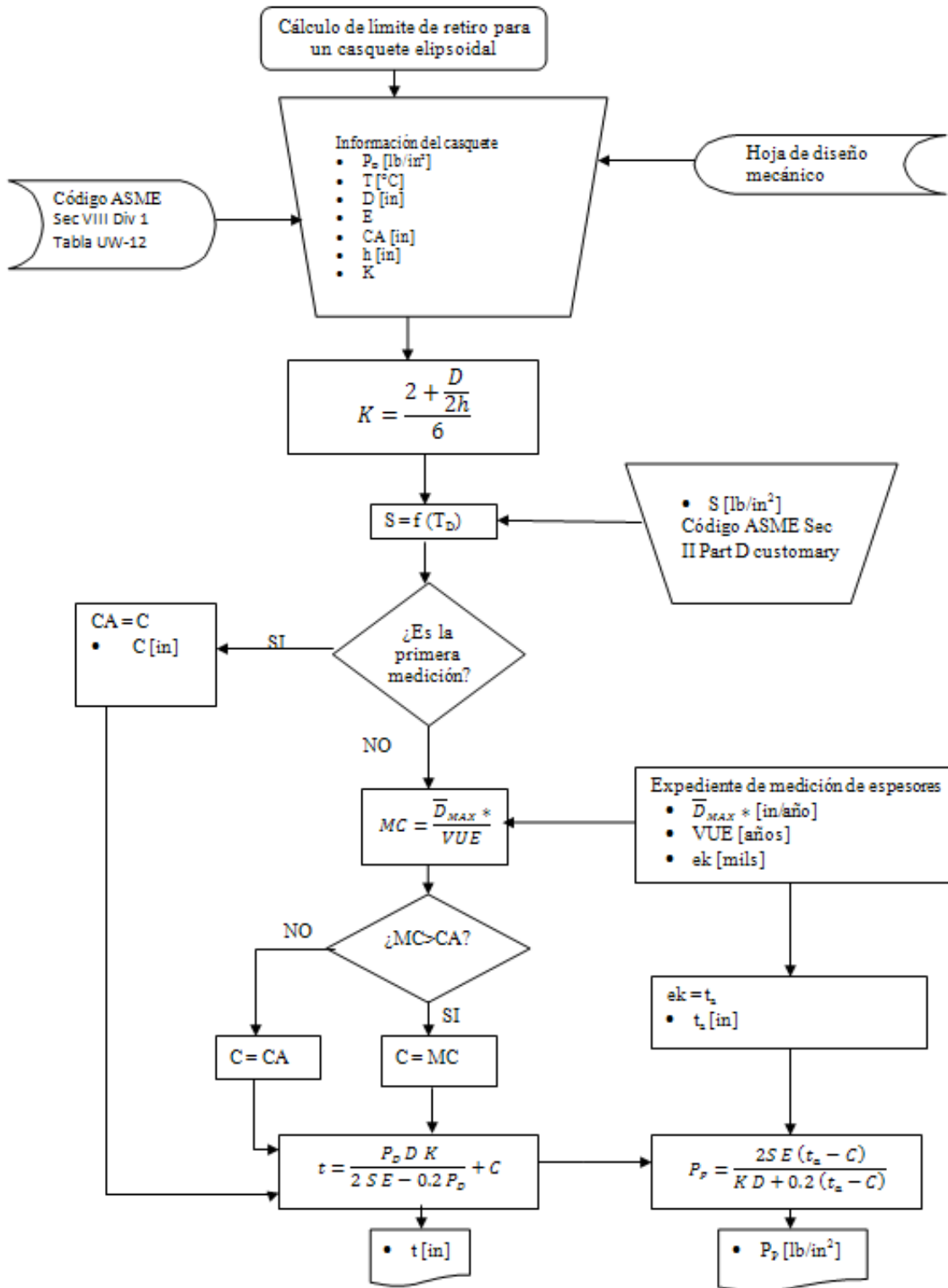
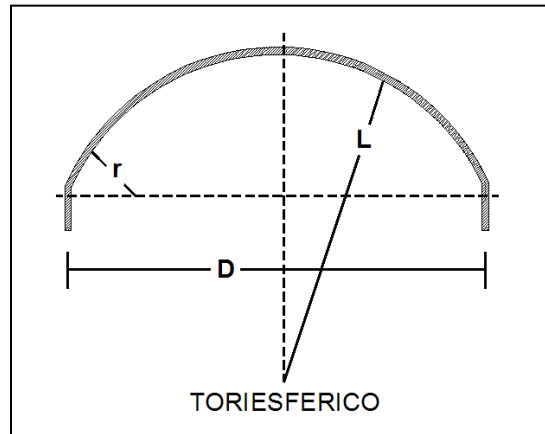


Figura 11 Diagrama de flujo para el cálculo de límite y presión permisible de trabajo actual de retiro de un casquete elipsoidal

### 3.5.4. Metodología de cálculo de límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para un casquete toriesférico

Esta metodología es para los casquetes toriesféricos en donde el radio de transición,  $r$ , es el 6% del radio interior de la corona,  $L$ , y el radio interior de la corona es igual al diámetro exterior de la falda. Las dimensiones principales de un casquete toriesférico están representadas en la figura 12.



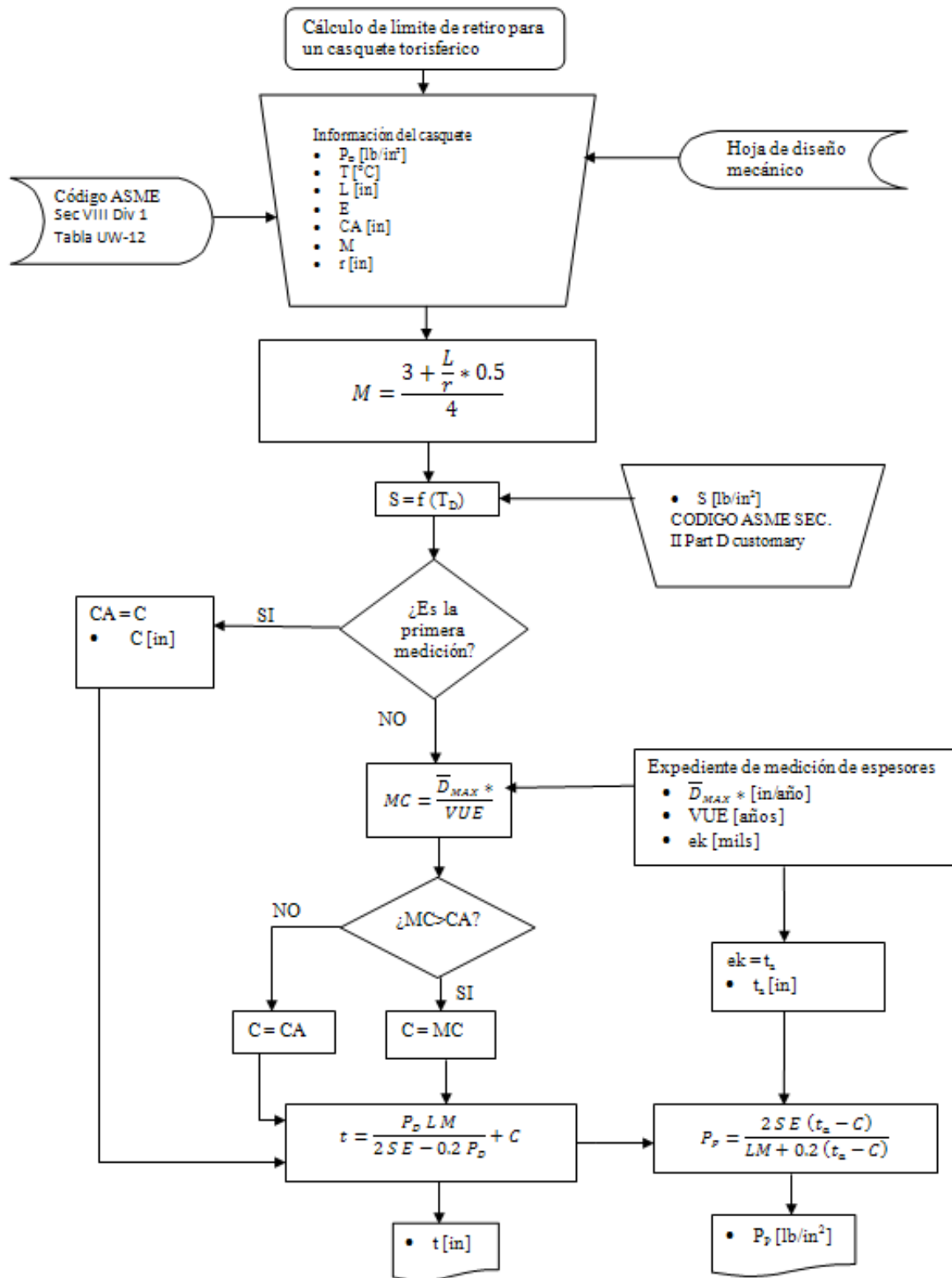
**Figura 12. Dimensiones principales de un casquete toriesférico**

A continuación en la tabla 8 se describen cada una de las variables involucradas en el cálculo de límite de retiro para un casquete toriesférico.

**Tabla 8. Variables para el cálculo de límite de retiro de un casquete toriesférico**

SIMBOLOGÍA		
Variable	Descripción	Unidades
$P_D$	Presión de diseño	lb/in <sup>2</sup>
$T_D$	Temperatura de diseño	°C
$L$	Radio interno esférico o de la corona	in
$r$	Radio de plegado o de transición	in
$M$	Factor de proporción	-
$E$	Eficiencia de la soldadura	-
$S$	Esfuerzo máximo permisible	lb/in <sup>2</sup>
$CA$	Corrosión permitida	in

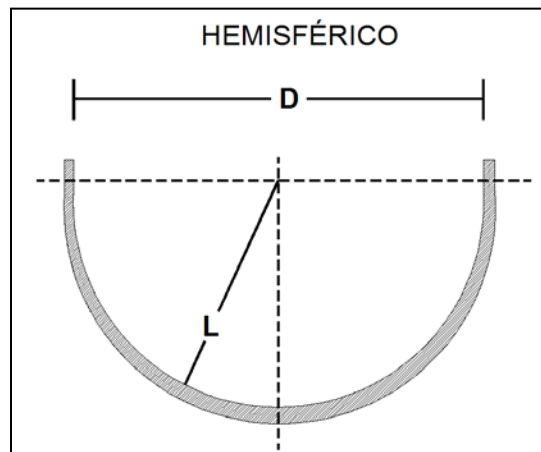
MC	Margen de corrosión	in
C	Corrosión	in
t	Espesor mínimo requerido (límite de retiro)	in
ta	Espesor mínimo actual	in
P <sub>p</sub>	Presión permisible de trabajo actual	lb/in <sup>2</sup>
$\bar{D}_{MAX} *$	Velocidad promedio de desgaste ajustada	in/año
VUE	Vida útil estimada	años
ek	Espesor mínimo actual (registrado en el expediente)	mils



**Figura 13 Diagrama de flujo para el cálculo de límite de retiro y presión permisible de trabajo actual de un casquete toriesférico**

### 3.5.5. Metodología de cálculo de límite de retiro y presión permisible de de trabajo actual para un casquete hemisférico

Esta metodología se aplicará a casquetes hemisféricos, cuando el espesor del casquete no exceda  $0.356L$ , en donde  $L$  es el radio interno esférico o de la corona. También se podrá aplicar cuando la presión no exceda  $0.665SE$ . En la figura 14 se muestran las dimensiones principales de un casquete hemisférico.



**Figura 14. Dimensiones principales de un casquete hemisférico**

Para casquetes hemisféricos, en la tabla 9 se encuentran las variables involucradas para el cálculo de límite de retiro con una descripción y las unidades correspondientes.

**Tabla 9. Variables para el cálculo de límite de retiro de un casquete hemisférico**

SIMBOLOGÍA		
Variable	Descripción	Unidades
$P_D$	Presión de diseño	lb/in <sup>2</sup>
$T_D$	Temperatura de diseño	°C
$L$	Radio interno esférico o de la corona	in
$E$	Eficiencia de la soldadura	-
$S$	Esfuerzo máximo permisible	lb/in <sup>2</sup>
$CA$	Corrosión permitida	in
$MC$	Margen de corrosión	in

C	Corrosión	in
t	Espesor mínimo requerido (límite de retiro)	in
ta	Espesor mínimo actual	in
P <sub>P</sub>	Presión permisible de trabajo actual	lb/in <sup>2</sup>
$\bar{D}_{MAX} *$	Velocidad promedio de desgaste ajustada	in/año
VUE	Vida útil estimada	años
ek	Espesor mínimo actual (registrado en el expediente)	in

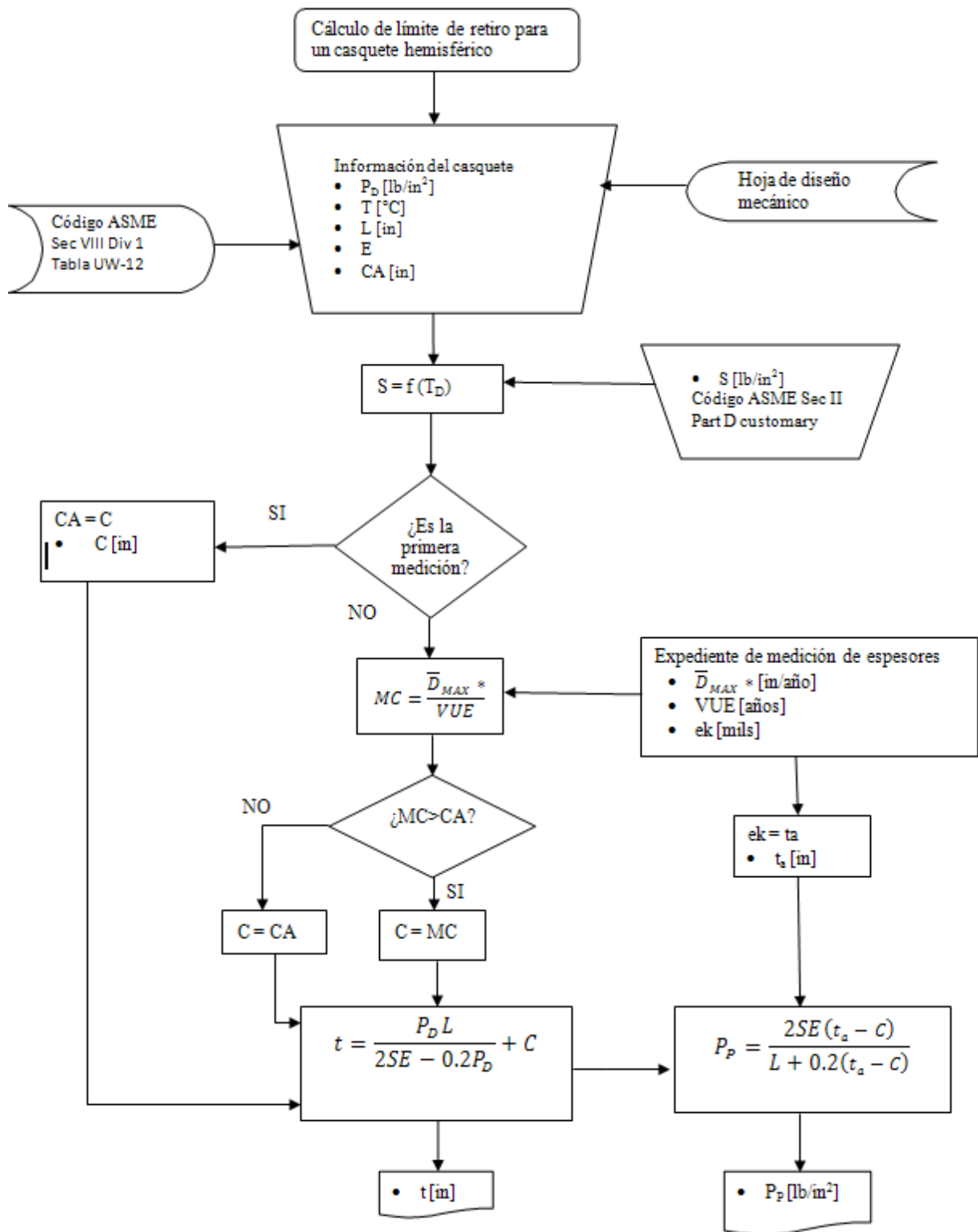
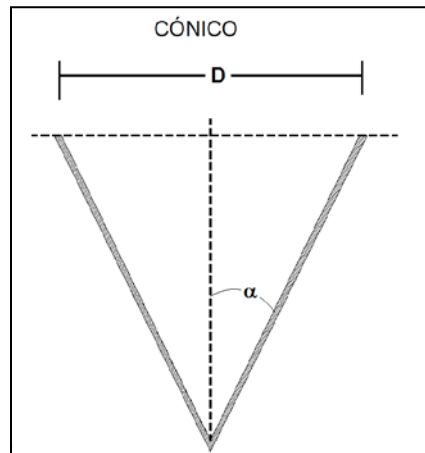


Figura 15 Diagrama de flujo para el cálculo de límite de retiro y presión permisible de trabajo actual de un casquete hemisférico

### 3.5.6. Metodología de cálculo de límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para un casquete cónico

Para el caso de los casquetes cónicos, se utilizará esta metodología cuando la mitad del ángulo de la parte cónica,  $\alpha$  sea superior a los 30 grados. En la figura 16 se muestran las dimensiones principales de un casquete cónico, como el ángulo del cono.



**Figura 16. Dimensiones principales de un casquete cónico**

En la tabla 10 se describe las variables involucradas en el cálculo de espesor mínimo requerido para un casquete cónico.

**Tabla 10. Variables para el cálculo de límite de retiro de un casquete cónico**

SIMBOLOGÍA		
Variable	Descripción	Unidades
$P_D$	Presión de diseño	lb/in <sup>2</sup>
$T_D$	Temperatura de diseño	°C
D	Diámetro interno	in
$\alpha$	Ángulo del cono	
E	Eficiencia de la soldadura	-
S	Esfuerzo máximo permisible	lb/in <sup>2</sup>
CA	Corrosión permitida	in
MC	Margen de corrosión	in
C	Corrosión	in



t	Espesor mínimo requerido (límite de retiro)	in
ta	Espesor mínimo actual	in
P <sub>P</sub>	Presión permisible de trabajo actual	lb/in <sup>2</sup>
$\bar{D}_{MAX} *$	Velocidad promedio de desgaste ajustada	in/año
VUE	Vida útil estimada	años
ek	Espesor mínimo actual (registrado en el expediente)	in

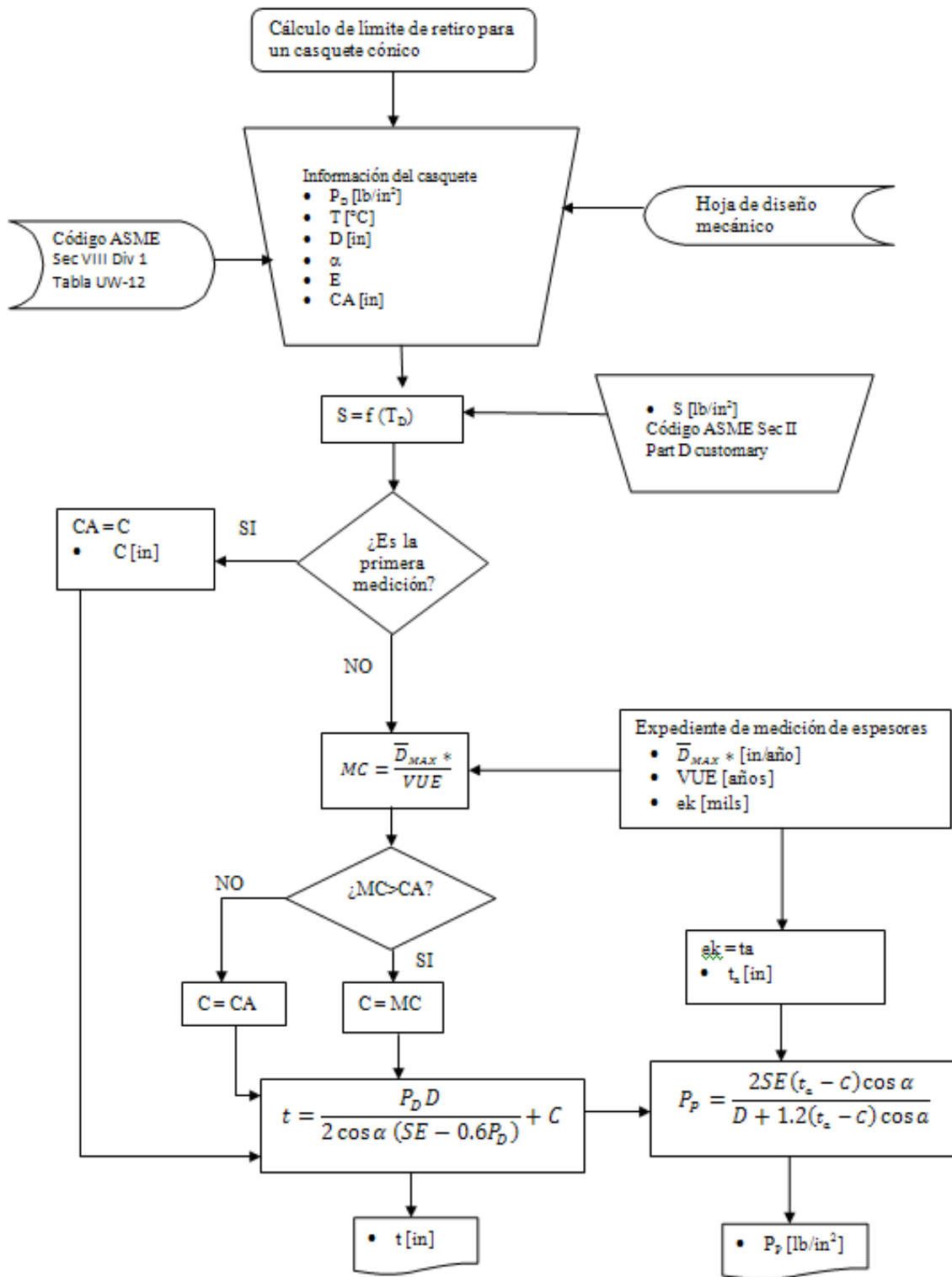


Figura 17 Diagrama de flujo para el cálculo de límite de retiro y presión permisible de trabajo actual de un casquete cónico

#### **4. Aplicación de la metodología propuesta**

En el capítulo 3, se desarrolló la metodología para el cálculo de límite de retiro para cada una de las partes de un equipo, como son el cuerpo, los casquetes y las boquillas por separado.

El límite de retiro se determina por unidad de control; es decir, por partes del equipo o un equipo completo que presente una velocidad de desgaste más o menos homogénea. Las condiciones que propician una velocidad de desgaste más o menos homogénea, son que las condiciones de operación y la composición se mantengan constantes.

Con base a lo anterior, se determinó el límite de retiro para las unidades de control de dos equipos típicos de un sistema de refinación de petróleo, estos son un cambiador de calor y un tanque de almacenamiento esférico.

En las hojas de datos las unidades de las variables se manejan en el sistema internacional, sin embargo en este documento se manejarán las unidades en el sistema inglés. Debido a que las ecuaciones en las que está basada la metodología corresponden al Código ASME y se encuentran en el sistema inglés.

##### **4.1. Cálculo de límite de retiro de un cambiador de calor**

El intercambiador de calor seleccionado se identifica por el tag EA-14, y es un equipo que pertenece a una planta de hidrosulfuración de destilados intermedios (HDD). El EA-14 es un cambiador proceso-proceso.

Este intercambiador de calor se encuentra en la zona de reacción de la planta HDD, recupera calor de la corriente del efluente del reactor, precalentando la corriente de alimentación de hidrógeno al mismo reactor. En el reactor, se lleva a cabo la hidrogenación de compuesto de azufre presentes en el gas amargo, para así tener como efluente el gas pobre en azufre.

El EA-14 es un intercambiador de coraza-haz de tubos, que está dividido en las secciones carrete y cuerpo. El hidrógeno es alimentado por la parte de los tubos; es decir por el lado del carrete. Y el efluente del reactor es alimentado por el lado

de la coraza, es decir el cuerpo. Tanto el carrete como el cuerpo cuentan con casquetes de tipo elipsoidal, como se puede ver en la figura 18.

En el caso del cambiador de calor, el cuerpo y el carrete manejan diferentes fluidos a diferentes condiciones por lo tanto se tendrán que analizar y determinar el límite de retiro por separado. Por otro lado la envolvente y el casquete del cuerpo presentan la misma velocidad de desgaste ya que manejan el mismo fluido y se encuentra a las mismas condiciones, por lo cual se puede manejar como una unidad de control y por lo tanto determinar su límite de retiro. En el caso del carrete sucede lo mismo, la envolvente y el casquete del carrete manejan el mismo fluido a las mismas condiciones, por lo tanto se determinará su límite de retiro conjuntamente.

El intercambiador de calor EA-14, es un equipo que ha estado en operación por más de diez años. En el anexo E de este documento, se muestra el historial de medición de espesores para el EA-14. Este expediente cuenta con tres inspecciones, y este historial se utilizó para hacer el análisis estadístico<sup>6</sup>.

El objetivo del análisis estadístico es poder determinar, mediante el monitoreo de espesores, la velocidad de corrosión, la fecha de próxima medición y la fecha probable de retiro de la tubería o sección del equipo<sup>7</sup>.

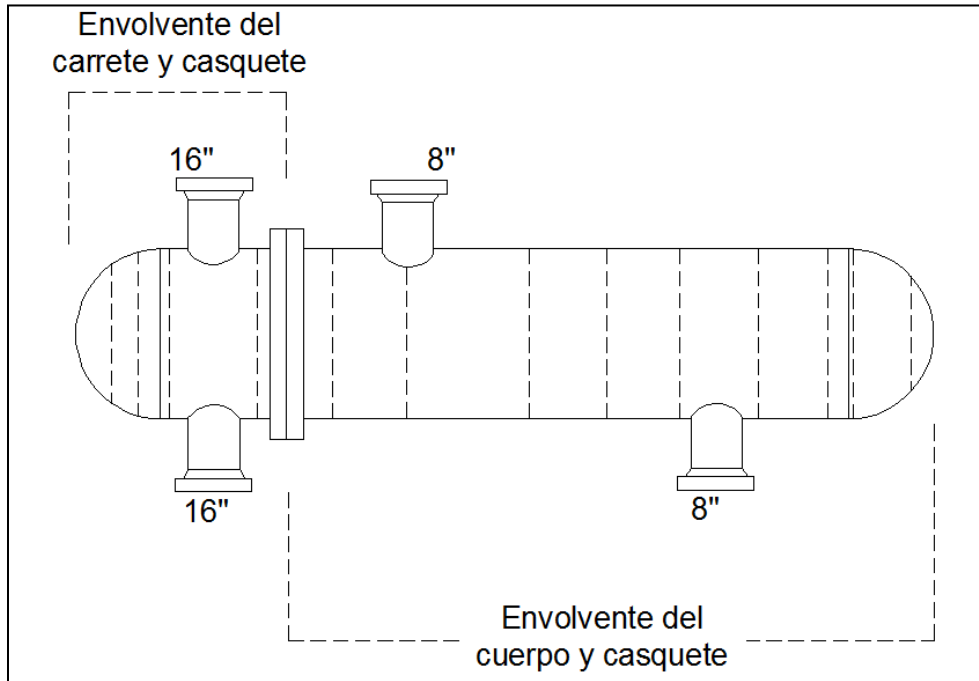
Se aplicó la metodología señalada en las figuras 7 y 11 del capítulo 3, para la envolvente del carrete y para el casquete elipsoidal respectivamente. Posteriormente se determinó el límite de retiro representativo de la unidad de control.

El procedimiento para seleccionar el límite de retiro de la unidad de control del carrete, es el mismo que se utilizó para el cuerpo, así que sólo se presentan los resultados obtenidos para el carrete.

---

<sup>6</sup> El análisis estadístico se realizó como muestra en el Anexo E

<sup>7</sup> Inspection Practices for Piping System Components, Recommended Practices API 574, 2ª Edition, June 1998



**Figura 18 Secciones de un cambiador de calor**

Se recopilaron los datos referentes a diseño del intercambiador de calor EA-14. La identificación del código de diseño es el dato más importante ya que de este depende si se podrá aplicar la metodología. El EA-14 está diseñado bajo el código ASME Sección VIII división 1 de recipientes a presión, por lo tanto esta metodología es aplicable.

De la hoja de datos del intercambiador de calor, se obtuvo la siguiente información: las condiciones de operación y diseño, la eficiencia de soldadura y la corrosión permitida de los casquetes y la envolvente, las dimensiones del equipo y sus boquillas, y el material de construcción para la envolvente, los casquetes y las boquillas.

En la tabla 11 se muestra los datos obtenidos del intercambiador EA-14.

**Tabla 11 Datos de diseño y fabricación del cambiador de calor EA-14**

<b>DATOS DE DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL CAMBIADOR DE CALOR EA-14</b>			
<b>CODIGO DE COSNTRUCCIÓN</b>	<b>ASME SEC VIII DIV I</b>		
	<b>CUERPO</b>	<b>CARRETE</b>	
<b>PRESIÓN DE DISEÑO:</b>	1044	964.25	lb <sub>f</sub> /in <sup>2</sup>
<b>TEMPERATURA DE DISEÑO:</b>	752	800.6	°F
<b>PRESIÓN DE OPERACIÓN:</b>	1003.4	872.9	lb <sub>f</sub> /in <sup>2</sup>
<b>TEMPERATURA DE OPERACIÓN:</b>	654.98	694.94	°F
<b>DIÁMETRO BOQUILLAS</b>	8	16	in
<b>EFICIENCIA DE SOLDADURA ENVOLVENTE:</b>	1.0		
<b>EFICIENCIA DE SOLDADURA CASQUETES:</b>	1.0		
<b>CORROSIÓN PERMITIDA CORAZA:</b>	0		in
<b>CORROSIÓN PERMITIDA CASQUETES:</b>	0		in
<b>DIMENSIONES</b>			
<b>DIAMETRO INTERNO:</b>	37		in
<b>RADIO INTERNO:</b>	18.5		in
<b>ESPESOR NOMINAL CORAZA:</b>	1.377		in
<b>ESPESOR NOMINAL CASQUETES:</b>	1.377		in
<b>MATERIAL DE CORAZA:</b>	SA-387-11-CL2		
<b>MATERIAL DE CASQUETES:</b>	SA-387-11-CL2		
<b>MATERIAL BOQUILLAS</b>	SA-106 GR. B		
<b>TIPO DE CASQUETES:</b>	Elipsoidal 2:1		

El esfuerzo máximo permisible del material es un parámetro indispensable y generalmente no se encuentra indicado en la hoja de datos del equipo. Por lo tanto, se deben utilizar las tablas registradas en el código ASME Sección II Parte D, Subparte 1 “Tabla de esfuerzos”. En el anexo B y el capítulo 3, tabla 1, de este documento se encuentra un extracto de las tablas registradas en el código ASME.

En la tabla 11, se puede observar que en el intercambiador de calor EA-14 tiene dos tipos de materiales diferentes. Las envolventes y los casquetes están contruidos con el material SA-387-11-CL2 y las boquillas están contruidas con el material SA-106 GR. B. el esfuerzo permisible de ambos materiales debe ser avaluado a la temperatura de diseño, según corresponda.

Para la evaluación del esfuerzo máximo permisible del material del carrete se utilizó la tabla 1 del capítulo 3 de este documento. La temperatura de diseño del carrete es de 800.6°F (427 °C) y la del cuerpo es de 752 °F (400 °C). Por lo tanto, para el material SA-387-11-CL2 a las temperaturas de diseño del carrete y el cuerpo tienen un valor de esfuerzo máximo permisible de 18.8 ksi<sup>8</sup>.

Para la determinación del esfuerzo máximo permisible del material de las boquillas se utilizó la tabla registrada en el anexo B. En el caso de las boquillas, la temperatura de diseño corresponde a la parte del equipo en donde se encuentren. Para el material SA-106 GR. B el esfuerzo máximo permisible a la temperatura de 800.6°F (427 °C) es de 10.8 kis.

#### **4.1.1. Cálculo de límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para la envolvente del carrete del intercambiador de calor EA-14**

Para el cálculo de límite de retiro y la presión permisible de trabajo actual de la envolvente del carrete se aplico la metodología señalada en la figura 7 de este trabajo. La metodología se aplicó a cada una de las tres inspecciones realizadas al EA-14.

Se utilizó la ecuación 5 para realizar el cálculo de límite de retiro.

---

<sup>8</sup> El esfuerzo máximo permisible esta dado en ksi (miles de libras por pulgadas cuadradas) en las tablas registradas en el Código ASME, multiplicar por 1000 para tener lb/in<sup>2</sup>

$$t = \frac{P_D R}{S E - 0.6P_D} + C$$

### Ecuación 5

En donde:

- t: espesor mínimo requerido [lb<sub>f</sub>/in<sup>2</sup>]
- P<sub>D</sub>: es la presión de diseño [in]
- R: es el radio interno de la envolvente [in]
- E: eficiencia de soldadura
- S: esfuerzo máximo permisible del material a la temperatura de diseño [lb<sub>f</sub>/in<sup>2</sup>]
- C: corrosión [in]

Se utilizó la ecuación 6 para calcular la presión permisible de trabajo actual ó presión máxima de trabajo actual.

$$P_P = \frac{S E (t_a - C)}{R + 0.6(t_a - C)}$$

### Ecuación 6

En donde:

- P<sub>P</sub>: presión permisible de trabajo actual o presión máxima de trabajo actual [lb<sub>f</sub>/in<sup>2</sup>]
- t<sub>a</sub>: espesor mínimo actual [in]
- R: es el radio interno de la envolvente [in]
- E: eficiencia de soldadura
- S: esfuerzo máximo permisible del material a la temperatura de diseño [lb<sub>f</sub>/in<sup>2</sup>]
- C: corrosión [in]

El parámetro de corrosión, C, depende de los valores que se tenga para la corrosión permitida y el margen de corrosión.



La ecuación 5 es la misma que se utilizó para calcular el límite de retiro en las tres inspecciones. En la primera inspección la variable  $C$  tomó el valor de la corrosión permitida, debido a que no se cuenta con un análisis de la velocidad de desgaste en el equipo. Para las posteriores inspecciones, se tomó el valor del margen de corrosión.

El margen de corrosión se calculó como se indica en la ecuación 4 del capítulo anterior. Y el análisis estadístico formal se realizó de acuerdo al anexo D.

La ecuación 6, se utilizó para calcular la presión permisible de trabajo actual para cada una de las tres inspecciones. La diferencia entre cada cálculo, es la variable espesor mínimo actual,  $t_a$ . Esta variable tomó el valor del espesor mínimo encontrado en cada una de las inspecciones.

#### **4.1.2. Cálculo de límite de retiro y presión permisible de trabajo actual del casquete del carrete del intercambiador EA-14**

Para el cálculo de límite de retiro y la presión permisible de trabajo actual del casquete del intercambiador EA-14, se aplicó la metodología indicada en la figura 11 para un casquete elipsoidal.

Para el casquete se calculó el factor de proporción geométrica entre el diámetro,  $D$ , y la profundidad del casquete,  $h$ . Esta relación está dada por la ecuación 3.2 del capítulo 3 de este documento. En la tabla 12, se indican las dimensiones principales del casquete elipsoidal del carrete y el valor del factor de proporción,  $K$ .

**Tabla 12 Registro de las dimensiones principales del casquete elipsoidal del cambiador de calor EA-14**

<b>Dimensiones del casquete</b>		
<b>D ext.</b>	37	in
<b>h</b>	9.25	in
<b>D/2h</b>	2	-
<b>K</b>	1	-

El límite de retiro del casquete elipsoidal se calculó como se indica en la ecuación 7.

$$t = \frac{P_D D K}{2 S E - 0.2 P_D} + C$$

### Ecuación 7

En donde:

- t: espesor mínimo requerido [in]
- P<sub>D</sub>: es la presión de diseño [lb<sub>f</sub>/in<sup>2</sup>]
- D: es el diámetro del casquete [in]
- K: es el factor de proporción
- E: eficiencia de soldadura
- S: esfuerzo máximo permisible del material a la temperatura de diseño [lb<sub>f</sub>/in<sup>2</sup>]
- C: corrosión [in]

La ecuación 7 se utilizó para calcular el límite de retiro del casquete para las tres inspecciones. En la primera inspección se utilizó, para la variable de corrosión (C) el valor de la corrosión permitida. En las mediciones posteriores se utilizó el valor del margen de corrosión obtenido del análisis estadístico de las inspecciones.

La ecuación 8 se utilizó para calcular la presión permisible de trabajo actual ó presión máxima de trabajo actual para un casquete elipsoidal.

$$P_P = \frac{2 S E (t_a - C)}{K D + 0.2 (t_a - C)}$$

### Ecuación 8

En donde:

- P<sub>P</sub>: presión permisible de trabajo actual o presión máxima de trabajo actual [lb<sub>f</sub>/in<sup>2</sup>]
- t<sub>a</sub>: espesor mínimo actual [in]
- D: es el diámetro del casquete [in]
- K: es el factor de proporción

- E: eficiencia de soldadura
- S: esfuerzo máximo permisible del material a la temperatura de diseño [lb<sub>f</sub>/in<sup>2</sup>]
- C: corrosión [in]

La ecuación 8 se utilizó para calcular la presión permisible de trabajo actual para las tres inspecciones. La variable  $t_{\alpha}$ , tomó diferentes valores debido a que se identificó el espesor mínimo actual para cada una de las inspecciones.

#### **4.1.3. Cálculo de límite de retiro y presión permisible de trabajo actual de las boquillas del carrete del cambiador EA-14**

En un recipiente, por ejemplo, un tanque acumulador horizontal, las boquillas que se encuentran en la parte del cuerpo tienen la misma velocidad de desgaste; sin embargo, el cálculo de límite de retiro de las boquillas se realizara por separado. Esto es debido que a pesar de tener los mismos mecanismos de desgaste, las boquillas son de un diámetro menor al de la envolvente o al del casquete, además de que el código de diseño es ASME B31.3 Tuberías de proceso, por lo tanto se analizaran por separado.

El cálculo de límite de retiro se debe de realizar según lo establecido en el Código de diseño ASME B 31.1 Tuberías de proceso, sección 304.1.1. En esta sección se establece que el espesor requerido para una sección de una tubería, en este caso, una boquilla será determinado por la ecuación 9.

$$t_m = t + C$$

**Ecuación 9**

En donde:

- $t_m$ : espesor mínimo requerido [in]
- $t$ : espesor requerido por presión de diseño [in]
- $C$ : corrosión permisible [in]

El espesor requerido por presión interna está definido por la ecuación 10.

$$t = \frac{PD}{2(SE + PY)}$$

## Ecuación 10

En donde:

- T: espesor mínimo por presión interna [in]
- P: Presión de diseño [ $\text{lb}_f/\text{in}^2$ ]
- D: diámetro externo de la boquilla [in]
- S: esfuerzo máximo permisible del material [ $\text{lb}_f/\text{in}^2$ ]
- E: factor de calidad para uniones soldadas longitudinales (Ver tabla de anexo G)
- Y: coeficiente de material (Ver tabla de anexo G)

### 4.1.4. Límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para EA-14

Para cada sección del equipo se obtuvo su propio límite de retiro y presión permisible de trabajo actual, pero por tratarse de la misma unidad de control se deberá seleccionar el límite de retiro y presión permisible de trabajo representativo de la unidad de control. Los resultados obtenidos se separaron para cada inspección.

Para seleccionar el límite de retiro se tomaron los siguientes criterios:

- El espesor de límite de retiro que resulte mayor, ya que esto garantizara que las secciones involucradas no tengan un límite de retiro menor al establecido individualmente. Este límite de retiro será representativo de la unidad de control.
- La presión permisible de trabajo actual que resulte menor. Ya que en la presión permisible está involucrada la variable de espesor mínimo, y al tomar la de valor menor se garantiza que la sección con menor espesor encontrado soporte la carga por presión.

En la tabla 13 se muestran los resultados obtenidos para la primera inspección, en septiembre de 1999. En esta tabla se encuentra registrado, el espesor original del casquete y la envolvente del carrete. El espesor original sirve como parámetro de referencia al obtener el límite de retiro. En la tabla 13 también se encuentra registrada la corrosión permitida, que es el valor de la variable corrosión, C, que se utilizó para el cálculo de límite de retiro por ser la primera inspección.

**Tabla 13 Límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para el carrete y el casquete en la primera inspección**

<b>1<sup>ra</sup> Inspección: Septiembre 1999</b>			
<b>CARRETE</b>		<b>CASQUETE</b>	
<b>Esp. Org.</b>	1.377 in	<b>Esp. Org.</b>	1.377 in
<b>CA</b>	0.0 in	<b>CA</b>	0.0 in
<b>t</b>	<b>0.979 in</b>	<b>t</b>	<b>0.954 in</b>
<b>Pp</b>	<b>1289 lb<sub>f</sub>/in<sup>2</sup></b>	<b>Pp</b>	<b>1305 lb<sub>f</sub>/in<sup>2</sup></b>

Tomando en cuenta los criterios establecidos, para la primera inspección, el límite de retiro determinante es de 0.979 in y la presión permisible de trabajo actual es de 1289 lb<sub>f</sub>/in<sup>2</sup> para la inspección de septiembre de 1999.

En la tabla 14 se pueden ver los resultados de límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para el carrete y el casquete, en la segunda inspección. En este caso, se cuenta con una inspección anterior, por lo tanto se realizó el análisis estadístico de los espesores registrados. En dicha tabla se encuentra registrado la velocidad de desgaste ajustada, la vida útil de cada sección y el margen de corrosión, realizado con base al análisis estadístico.

En la tabla 14, también se registra el límite de retiro y la presión permisible de trabajo en la inspección actual para cada una de las secciones. Estos datos corresponden a la inspección realizada en Agosto de 2002.

**Tabla 14 Límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para el carrete y el casquete en la segunda inspección**

<b>2<sup>da</sup> Inspección: Agosto 2002</b>			
<b>CARRETE</b>		<b>CASQUETE</b>	
<b>Dmax*</b>	0.013 in/año	<b>Dmax*</b>	0.019 in/año
<b>VUE</b>	30 años	<b>VUE</b>	16 años
<b>C</b>	0.0004 in	<b>C</b>	0.001 in
<b>t</b>	<b>0.979 in</b>	<b>t</b>	<b>0.955 in</b>
<b>Pp</b>	<b>1341 lb<sub>f</sub>/in<sup>2</sup></b>	<b>Pp</b>	<b>1273 lb<sub>f</sub>/in<sup>2</sup></b>

Por lo tanto, de la tabla 14, el límite de retiro de la unidad de control del carrete del intercambiador de calor es de 0.979 in y la presión máxima a la cual puede operar esta sección del intercambiador es de 1273 lb<sub>f</sub>/in<sup>2</sup> para la inspección registrada en el 2002.

En la tabla 15, se encuentran registrados los valores de la velocidad de desgaste ajustada, la vida útil estimada y el margen de corrosión para la inspección realizada en 2009. Para el análisis estadístico, los registros de medición de espesores de esta inspección se compararon con los datos de la inspección del 2002.

**Tabla 15 Límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para el carrete y el casquete en la tercera inspección**

<b>3<sup>ra</sup> Inspección: Junio de 2009</b>			
<b>CARRETE</b>		<b>CASQUETE</b>	
<b>Dmax*</b>	0.003 in/año	<b>Dmax*</b>	0.003 in/año
<b>VUE</b>	110 años	<b>VUE</b>	99 años
<b>C</b>	0.00003 in	<b>C</b>	0.00003 in
<b>t</b>	<b>0.979 in</b>	<b>t</b>	<b>0.954 in</b>
<b>Pp</b>	<b>1314 lb<sub>f</sub>/in<sup>2</sup></b>	<b>Pp</b>	<b>1262 lb<sub>f</sub>/in<sup>2</sup></b>

Con base a la tabla 15, el límite de retiro de la unidad de control del carrete del EA-14 es de 0.979 in y la presión permisible de trabajo es de 1262 lb<sub>f</sub>/in<sup>2</sup> para la inspección registrada en 2009.

Como se había mencionado anteriormente, las boquillas están diseñadas bajo el código ASME B 31.3, por lo tanto el análisis se realizara por separado.

El límite de retiro para las boquillas del carrete, se calculó según la ecuación 9 y 10. En la tabla 16 se muestra los resultados obtenidos para una boquilla de diámetro nominal de 8 in.

El material de las boquillas es A 106 B, por lo tanto se tomó el valor del factor de calidad para uniones soldadas longitudinales de 1.00. Para el valor del coeficiente del material, se tomo 0.4, para aceros ferríticos a una temperatura menor a 900 °F (Ver anexo G). Para la corrosión permisible, se tomo el siguiente criterio: se deberá considerarse una tolerancia del 12.5 % en el espesor de la pared.<sup>9</sup>

**Tabla 16 Resultados del cálculo de límite de retiro para las boquillas del carrete EA-14**

<b>BOQUILLAS DE 8 in DEL CARRETE</b>	
<b>P<sub>OP</sub></b>	872.9 lb <sub>f</sub> /in <sup>2</sup>
<b>Esp Orig.</b>	0.844 in
<b>T<sub>LR</sub></b>	<b>0.680 in</b>

Para las boquillas del carrete, el límite de retiro es de 0.680 in.

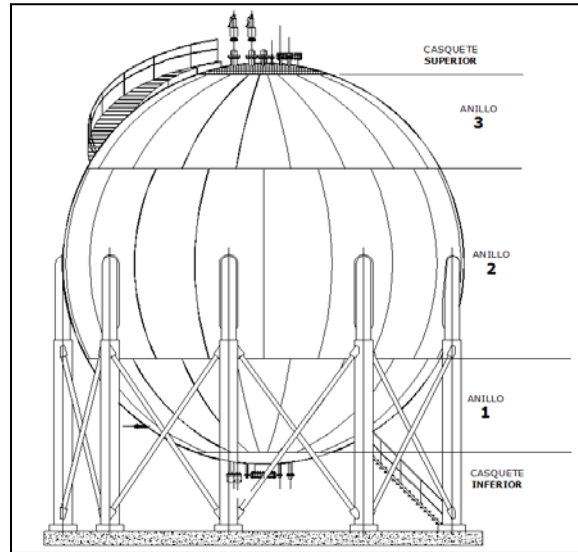
#### **4.2. Cálculo de límite de retiro de un tanque de almacenamiento esférico**

El tanque de almacenamiento esférico seleccionado tiene el tag TE-14, es un equipo que se encuentra la planta de movimiento de productos, MP. Esta esfera se utiliza para almacenar gas licuado de petróleo, LP, este gas es una mezcla de hidrocarburos principalmente propano y butano en un 60% y 40%, respectivamente. Es almacenado a presión y a temperatura ambiente. A esta temperatura, el gas es inflamable por lo tanto la perdida de contención de esta sustancia podría provocar un accidente catastrófico.

---

<sup>9</sup> Manual de Recipientes a presión, diseño y cálculo, Megyesy Eugene F. 1ª Edición, Limusa Grupo Noriega Editores, 1992, pp 124.

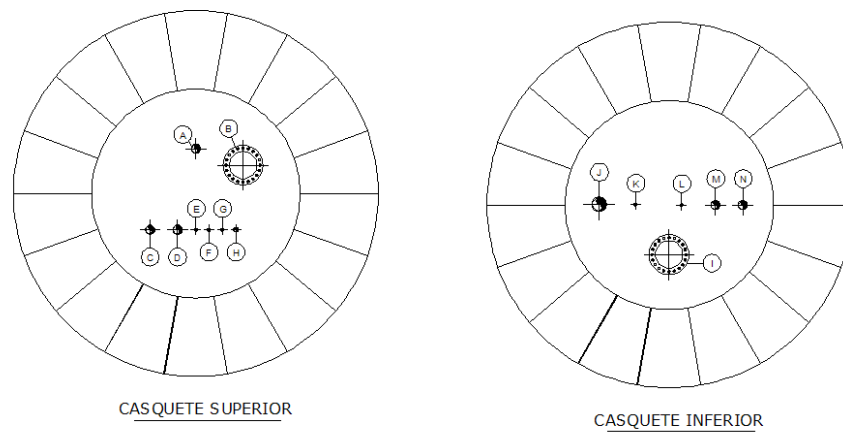
Las esferas se construyen en gajos que forman anillos alrededor del recipiente, además de contar con dos casquetes, el inferior y el superior. La esfera TE-14 cuenta con tres anillos, numerados de abajo hacia arriba, y sus dos casquetes, como se muestra en la figura 19.



**Figura 19 Secciones en un tanque de almacenamiento esférico**

Las boquillas de un tanque de almacenamiento esférico se encuentran ubicadas en los casquetes del recipiente. La línea de alimentación se encuentra en la parte superior y la de vaciado en la parte inferior. Por ser un recipiente a presión cuenta con doble válvula de seguridad independientes, sistemas de medición de presión y temperatura. El tanque de almacenamiento TE-14 cuenta en total con catorce boquillas, ocho en el casquete superior y seis en el casquete inferior. En la figura 20 se pueden observar las boquillas de la esfera, identificadas por una letra.





**Figura 20 Vistas de las boquillas de los casquetes de la esfera TE-14**

En el anexo F, se encuentra el expediente de medición de espesores de la esfera TE-14. Se cuenta con dos registros de espesores de la envolvente de la esfera. Las boquillas no cuentan con historial de medición de espesores.

En un recipiente esférico se tiene el mismo fluido en todas sus secciones, sin embargo es necesario dividir en unidades de control debido a que cada una se encuentra expuesta a diferentes presiones, como se mencionó en el capítulo anterior la columna de líquido dentro de la esfera provoca que el a parte inferior tenga una mayor presión que la parte superior. Además, el espesor en las placas de cada sección es diferente, ya que en el diseño de la esfera se considera esta presión.

Por lo tanto, un recipiente esférico se debe dividir en varias unidades de control, según la cantidad de anillos que lo conformen y cada uno de los casquetes será una unidad de control. En este caso se tienen cinco unidades de control, y para cada una se determinó el límite de retiro.

Para realizar el cálculo de límite de retiro, se identifico el código de diseño del equipo. En este caso la esfera TE-14 está diseñada de acuerdo a lo establecido en el código ASME Sección VIII División 1. Por lo tanto es factible aplicar la metodología propuesta en este trabajo.

De la hoja de diseño del equipo, se obtuvo la información correspondiente a las condiciones de operación y de diseño del equipo. Información respecto al método de fabricación; es decir, eficiencia de soldadura en el equipo, corrosión permitida y la clase del material de construcción, tanto de la envolvente como de las boquillas. En esta hoja de datos, se obtuvieron las dimensiones del equipo necesarias para el cálculo de límite de retiro. Esta información se encuentra concentrada en la tabla 17.

**Tabla 17 Datos de diseño y fabricación de tanque de almacenamiento esférico**

<b>DATOS DE DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO ESFERICO TE-14</b>		
<b>CODIGO DE COSNTRUCCIÓN</b>	<b>ASME SEC VIII DIV I</b>	
<b>PRESIÓN DE DISEÑO:</b>	84.1	lb <sub>f</sub> /in <sup>2</sup>
<b>TEMPERATURA DE DISEÑO:</b>	500	°F
<b>PRESIÓN DE OPERACIÓN:</b>	73.95	lb <sub>f</sub> /in <sup>2</sup>
<b>TEMPERATURA DE OPERACIÓN:</b>	77	°F
<b>CORROSIÓN PERMITIDA:</b>	0	in
<b>EFICIENCIA DE SOLDADURA:</b>	0.85	
<b>DIMENSIONES</b>		
<b>DIAMETRO EXTERNO:</b>	455.9	in
<b>RADIO EXTERIOR:</b>	227.95	in
<b>ESPESOR NOMINAL CASQUETE INFERIOR:</b>	1.161	in
<b>ESPESOR NOMINAL ANILLO 1:</b>	1.161	in
<b>ESPESOR NOMINAL ANILLO 2:</b>	1.161	in
<b>ESPESOR NOMINAL ANILLO 3:</b>	1.122	in
<b>ESPESOR NOMINAL CASQUETE SUPERIOR:</b>	1.083	in

**DATOS DE DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL TANQUE DE  
ALMACENAMIENTO ESFERICO TE-14**

<b>MATERIAL DEL RECIPIENTE:</b>	SA-516 GR. 70
<b>MATERIAL BOQUILLAS:</b>	SA-106 GR. B
<b>TIPO DE CASQUETES:</b>	Semiesféricas
<b>FLUIDO:</b>	GAS LÍCUADO (LP)

La información respecto a las boquillas se obtuvo de la hoja de datos del equipo. En la tabla 18 se muestran el diámetro de las boquillas y el servicio que proporcionan al equipo.

**Tabla 18 Boquillas del tanque de almacenamiento esférico TE-14**

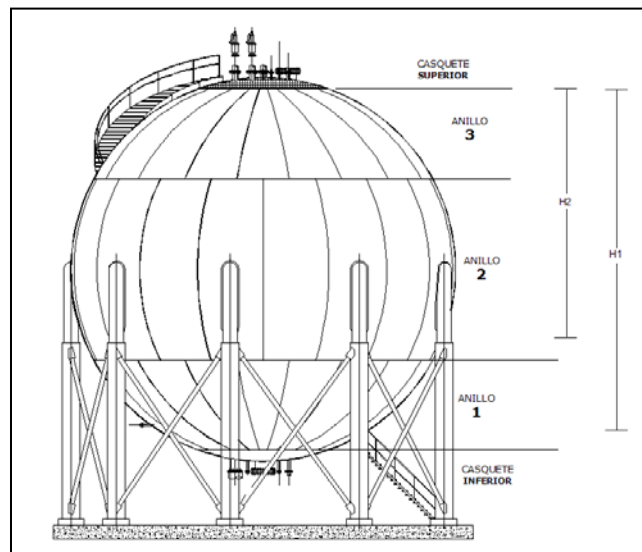
<b>TABLA DE BOQUILLAS</b>		
<b>BOQUILLA</b>	<b>DIÁMETRO NOMINAL</b>	<b>SERVICIO</b>
<b>A</b>	6"	Electro sensor
<b>B</b>	20"	Entrada Hombre
<b>C</b>	6"	Válvula de seguridad
<b>D</b>	6"	Válvula de seguridad
<b>E</b>	2"	Manómetro electrónico
<b>F</b>	2"	Igualadora
<b>G</b>	2"	Termómetro
<b>H</b>	3"	A la línea
<b>I</b>	20"	Entrada Hombre
<b>J</b>	10"	Entrada fluido
<b>K</b>	2"	A la línea
<b>L</b>	2"	A la línea
<b>M</b>	4"	Tapón
<b>N</b>	2"	Electro sensor

Identificado el material de construcción de la envolvente y las boquillas, el esfuerzo máximo permisible de los materiales de construcción fue determinado utilizando las tablas registradas en el código ASME Sección II Parte D Subparte 1 "Tabla de esfuerzos".

El esfuerzo máximo permisible fue evaluado a la temperatura de diseño del recipiente. Por lo tanto para el material de la envolvente, SA-516 GR. 70, a la temperatura de diseño 500°F (260 °C) su valor de esfuerzo máximo permisible es de 20 kis. Se utilizó el extracto de las tablas del código ASME, tabla 1 del capítulo 3 de este documento.

Para el material de las boquillas, SA-106 GR.B, a la temperatura de diseño 500°F (260°C) el valor del esfuerzo máximo permisible es de 17.1 kis. Se utilizaron las tablas del anexo B de este documento, que corresponden a un extracto de las tablas del código ASME.

Para determinar la presión ejercida por el fluido dentro del recipiente esférico es necesario saber la altura del líquido dentro del recipiente. Para determinar la altura del fluido dentro de la esfera, se consideró que se encontraba el 100% de su capacidad y la altura se tomó de arriba hacia abajo. Se determinó una altura para cada uno de los anillos y los casquetes. En la figura 21 se ilustra cómo se determinó la altura para cada sección. En la figura 21, H1 corresponde a la altura del fluido para el cálculo de límite de retiro del anillo 1.



**Figura 21** Altura del fluido dentro de la esfera

La información respecto a la que se encuentra cada anillo se obtuvo de la hoja de diseño mecánico. En la tabla 19 se Indican las alturas utilizadas para el cálculo de límite de retiro de cada una de las secciones de la esfera.

**Tabla 19 Altura del fluido dentro de la esfera**

<b>ALTURA DEL FLUIDO EN LA ESFERA</b>	
<b>SECCIÓN</b>	<b>ALTURA [in]</b>
<b>CASQUETE INFERIOR</b>	455.9
<b>ANILLO 1</b>	399
<b>ANILLO 2</b>	285
<b>ANILLO 3</b>	60
<b>CASQUETE SUPERIOR</b>	12

En el caso de los recipientes esféricos, es necesario conocer ciertas características del fluido como la densidad ya que esta variable se encuentra directamente relacionada en el cálculo de límite de retiro. La densidad es un variable muy importante, ya que se encuentra involucrada en el cálculo se la columna de presión. La presión ejercida por el fluido se calculó utilizando las propiedades del gas licuado que se indican en la tabla 20.

**Tabla 20 Densidad del gas LP**

<b>GAS (LP)</b>	
<b>PROPANO Y BUTANO</b>	
$\rho$ [lb/in <sup>3</sup> ]=	0.00433

Sólo se presenta el procedimiento de cálculo para el anillo 3 y el casquete inferior. Se seleccionó estas dos secciones por considerarse las más representativas, como ejemplo para determinar la columna de líquido. Además de ser dos secciones diferentes, un anillo y un casquete.

#### 4.2.1. Cálculo de límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para el casquete inferior y el anillo 3 del tanque de almacenamiento esférico TE-14

Para el cálculo de límite de retiro y la presión permisible de trabajo actual para un recipiente esférico se aplicó la metodología indicada en la figura 9 del capítulo 3 de este trabajo. La metodología se aplicó a las dos inspecciones registradas en el expediente del equipo.

Para el cálculo de límite de retiro del anillo 3 como del casquete se utilizó la ecuación 11.

$$t = \frac{R (P_D + \rho H)}{2 S E - 0.2(P_D + \rho H)} + C$$

**Ecuación 11**

En donde:

- t: espesor mínimo requerido [in]
- $P_D$ : es la presión de diseño [ $\text{lb}_f/\text{in}^2$ ]
- R: es el radio interno de la esfera [in]
- H: es la altura del líquido dentro del recipiente [in]
- $\rho$ : es la densidad del fluido [ $\text{lb}/\text{in}^3$ ]
- E: eficiencia de soldadura
- S: esfuerzo máximo permisible del material a la temperatura de diseño [ $\text{lb}_f/\text{in}^2$ ]
- C: corrosión [in]

Para un recipiente esférico, la ecuación 12 se utilizó para calcular la presión permisible de trabajo actual.

$$P_P = \frac{2 S E (t_a - C)}{R + 0.2 (t_a - C)} - \rho H$$

**Ecuación 12**

En donde:

- $P_p$ : presión permisible de trabajo actual o presión máxima de trabajo actual [lb<sub>f</sub>/in<sup>2</sup>]
- $t_{\alpha}$ : espesor mínimo actual [in]
- R: es el radio interno de la esfera [in]
- H: es la altura del líquido dentro del recipiente [in]
- $\rho$ : es la densidad del fluido [lb/in<sup>3</sup>]
- E: eficiencia de soldadura
- S: esfuerzo máximo permisible del material a la temperatura de diseño [lb<sub>f</sub>/in<sup>2</sup>]
- C: corrosión [in]

Para la primera inspección, la variable de corrosión, C, tomó el valor de la corrosión permitida indicada en la hoja de diseño, para el cálculo de la primera inspección. En la segunda inspección se tomó el margen de corrosión, obtenido del análisis estadístico de la medición de espesores.

El margen de corrosión se calculó como se indica en la ecuación 4 del capítulo anterior. Y el análisis estadístico formal se realizó de acuerdo al anexo D.

En la ecuación 12, la variable,  $t_{\alpha}$ , espesor mínimo actual se tomó de la inspección correspondiente a la que se realizó el cálculo. Esta ecuación se utilizó para calcular la presión permisible en las dos inspecciones.

#### **4.2.2. Cálculo de límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para las boquillas del recipiente esférico TE-14**

Es importante resaltar, que el cálculo de límite de retiro en las boquillas se debe de analizar por separado aunque forma parte de la unidad de control del casquete inferior.

El cálculo de límite de retiro se realizó conforme a lo indicado en la ecuación 9 y 10.

#### 4.1.1. Límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para TE-14

Para el tanque de almacenamiento esférico TE-14, se debe de analizar por separado cada anillo y cada casquete, ya que corresponden a diferente unidad de control. Los resultados obtenidos se muestran por cada inspección.

En la tabla 21 se muestran los resultados obtenidos de límite de retiro y presión permisible de trabajo para la primera inspección de la esfera TE-14. También se encuentra registrado el espesor original de cada una de las secciones, el casquete y el anillo. Por ser la primera medición se indica la corrosión permitida.

Como se puede ver en la tabla 21, debido que en la parte inferior de la esfera se soporta una mayor presión, el espesor original y el límite de retiro del casquete es mayor que el del anillo 3.

Respecto a la presión, la presión permisible de trabajo actual para la esfera será las que resulte menor de todas las secciones. La presión permisible de trabajo actual menor será la del casquete inferior, debido a la columna de líquido que soporta. A menos que la presión en alguno de los anillo sea afectada por un espesor que se encuentre cercano al límite de retiro.

**Tabla 21 Límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para el casquete inferior y el anillo 3 en la primera inspección**

<b>1<sup>ra</sup> Inspección: Septiembre de 1999</b>			
<b>CASQUETE INFERIOR</b>		<b>ANILLO 3</b>	
<b>Esp. Orig.</b>	1.161 in	<b>Esp. Org.</b>	1.122 in
<b>CA</b>	0 in	<b>CA</b>	0 in
<b>Lr</b>	<b>0.567 in</b>	<b>t</b>	<b>0.555 in</b>
<b>Pp</b>	<b>112.35 lb<sub>f</sub>/in<sup>2</sup></b>	<b>Pp</b>	<b>114.064 lb<sub>f</sub>/in<sup>2</sup></b>

De la tabla 21, el límite de retiro del casquete inferior es de 0.567 in y el límite de retiro del anillo 3 es de 0.555 in. La presión permisible de trabajo en la primera inspección es de 112.35 lb<sub>f</sub>/in<sup>2</sup>.



En la tabla 22, se pueden observar los resultados de límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para la segunda inspección. En esta se incluye la velocidad de desgaste ajustada y la vida útil estimada de cada sección, con base a esto se registro el margen de corrosión.

**Tabla 22 Límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para el casquete inferior y el anillo 3 en la segunda inspección**

<b>2<sup>da</sup> Inspección: 2002</b>					
<b>CASQUETE INFERIOR</b>			<b>ANILLO 3</b>		
<b>Dmax*</b>	0.001	in/año	<b>Dmax*</b>	0.001	in/año
<b>VUE</b>	106.478	años	<b>VUE</b>	96.561	años
<b>C</b>	0.00001	in	<b>C</b>	0	in
<b>t</b>	<b>0.567</b>	<b>in</b>	<b>t</b>	<b>0.555</b>	<b>in</b>
<b>Pp</b>	<b>103.854</b>	<b>lb<sub>f</sub>/in<sup>2</sup></b>	<b>Pp</b>	<b>98.125</b>	<b>lb<sub>f</sub>/in<sup>2</sup></b>

Para la segunda inspección, el límite de retiro del casquete superior es de 0.567 in y el límite de retiro para el anillo 3 es de 0.555 in.

En la tabla 22 se puede ver que en este caso la presión permisible de trabajo del anillo 3 es menor que la registrada para el casquete inferior. El cálculo se realizó para todas las secciones y la presión menor que resulto ser la del anillo 1 con 95.912 lb<sub>f</sub>/in<sup>2</sup>, por lo tanto esa es la presión permisible de trabajo para la segunda inspección.

El análisis de las boquillas para el casquete inferior de la esfera TE-14 se realizó por separado. En la tabla 23, se puede ver el espesor original de las boquillas, que sirve de referencia para el límite de retiro obtenido. También se encuentra registrado el límite de retiro.

El límite de retiro de las boquillas de la esfera, se calculó como se indica en la ecuación 9 y 10. Se tomo el mismo criterio para el valor de la corrosión permisible.

**Tabla 23 Límite de retiro y presión permisible de trabajo para las boquillas del casquete inferior de TE-14**

<b>BOQUILLAS DEL CASQUETE INFERIOR</b>			
<b>Boquilla</b>	<b>Diámetro</b>	<b>Esp Orig [in]</b>	<b>T<sub>(rE ó rB)</sub> [in]</b>
<b>I</b>	20"	1.031	0.182
<b>J</b>	10"	0.594	0.101
<b>K, L, N</b>	2"	0.218	0.034
<b>M</b>	4"	0.337	0.055

## **5. Análisis de resultados**

Determinado el límite de retiro para cada unidad de control es preciso analizar el valor obtenido respecto al espesor original y cómo van las inspecciones. Es fundamental que el equipo no se encuentre operando por debajo de los límites establecidos de espesor mínimo, ni que opere a presiones mayores que la presión permisible de trabajo actual.

### **5.1. Carrete del cambiador de calor EA-14**

En el capítulo anterior se determinó el límite de retiro y la presión de trabajo permisible para cada sección, carrete y casquete. Del resultado obtenido se determinó el límite de retiro representativo y la presión permisible de trabajo para la unidad de control.

En las tablas 13, 14 y 15, se muestran los resultados obtenidos en cada inspección. El límite de retiro es un valor prácticamente constante en una unidad de control, ya que se mantiene la premisa de una velocidad de desgaste más o menos homogénea.

Por otro lado la presión permisible de trabajo es un valor que puede incrementar o disminuir en cada inspección. Esto se debe principalmente a que en la ecuación de cálculo de la presión permisible está involucrada la variable de espesor mínimo encontrado,  $t_{\alpha}$ . En teoría, el espesor mínimo encontrado en una inspección debe de ser menor que al encontrado en la inspección anterior. Sin embargo, por diferencias en el trabajo realizado en la medición de espesores, errores del personal y el equipo de medición de espesores o por el proceso al que está sometido el equipo, el espesor mínimo encontrado en una inspección puede ser mayor al encontrado en inspecciones pasadas.

Para el carrete, el espesor mínimo encontrado incrementa en la segunda y tercera inspección en comparación con la primera. Por lo tanto, la presión permisible de trabajo incrementa. En el caso del casquete, el espesor mínimo encontrado disminuye conforme las inspecciones, por lo tanto la presión permisible de trabajo disminuye.

Un cambio en las condiciones de operación afecta directamente la velocidad de desgaste y al mismo tiempo el límite de retiro de la unidad de control. Debido a que la presión es una de las variables que se puede modificar durante la operación del equipo, se realizó un análisis para observar cómo puede influir dicha variable en el límite de retiro para el carrete y el casquete.

Por otro lado, el análisis estadístico de la medición de espesores de debe de realizar por grupos de diámetros en unidad de control de líneas. Por lo tanto, aplicando este criterio a equipos, el análisis se realizó separando las boquillas, el casquete y el cuerpo.

Referente a las dimensiones del equipo, se analizó como afectaría el factor de proporción para el casquete elipsoidal en el límite de retiro. De la tabla 3 del capítulo 3 de este documento se tomaron los valores extremos para el factor de proporción,  $K$ . Se tomó el valor  $K$  cuando  $D/2h$  es igual a 1; es decir que la profundidad del casquete el diámetro del casquete es el doble de la profundidad del mismo. Y se tomó cuando  $D/2h$  es igual a 3; es decir que el diámetro del casquete es seis veces la profundidad del mismo.

En la figura 22 se puede observar cómo se comporta el límite de retiro dependiendo de la presión cuando la relación  $D/2h$  es igual a 1. El comportamiento es lineal y que el límite de retiro del carrete es mayor que el del casquete a diferente presiones.

En la figura 23 se observa el límite de retiro a diferentes presiones cuando el casquete tiene una relación  $D/2h$  igual a 3. El comportamiento del límite de retiro es lineal y, en este caso, el límite de retiro mayor corresponde al casquete.

Al comparar las figuras 22 y 23, la presión es una variable que afecta el límite de retiro. El límite de retiro es directamente proporcional a la presión de diseño. A mayores presiones, el límite de retiro incrementa.

La geometría de las secciones o piezas del recipiente influyen en el límite de retiro, al comparar las figuras 22 y 23, podemos observar cómo influye la

proporción entre las secciones del casquete (diámetro y profundidad) en el límite de retiro.

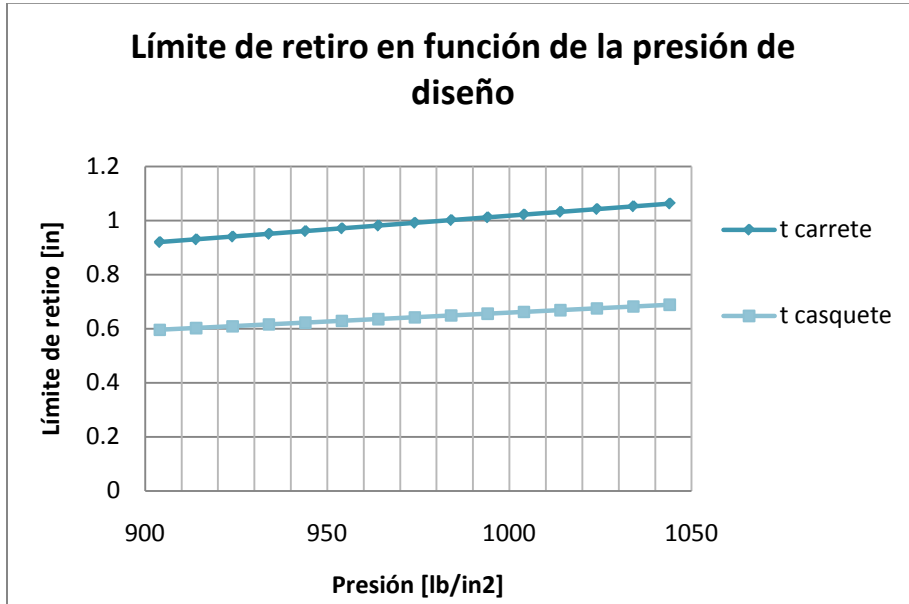


Figura 22 Límite de retiro del carrete y casquete (D/2h=1)

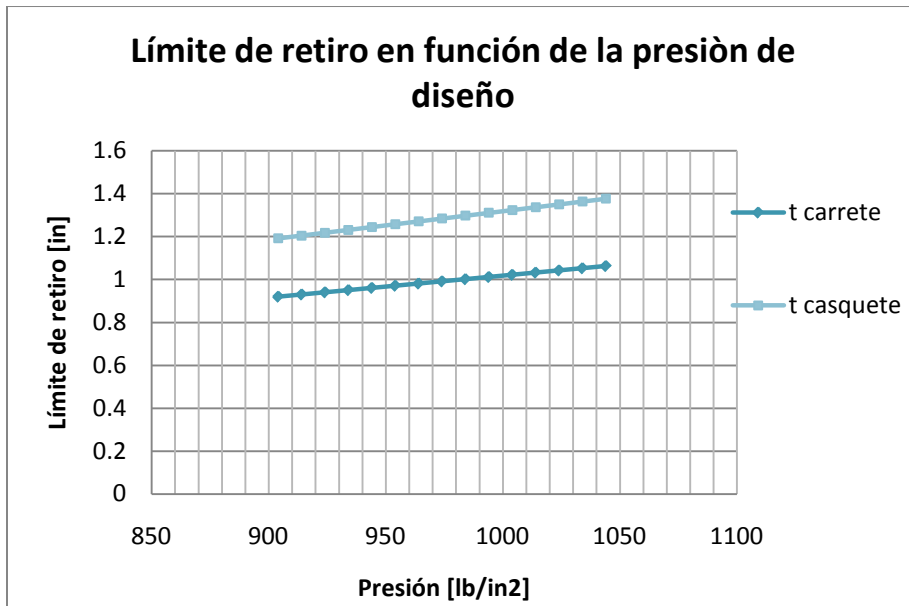


Figura 23 Límite de retiro del carrete y casquete (D/2h=3)

El límite de retiro calculado para el intercambiador de calor EA-14 se debe de comparar respecto al espesor original y las inspecciones realizadas. En el historial

de mediciones del intercambiador EA-14 (anexo E) no es fácil apreciar cómo ha disminuido el espesor de las paredes del equipo. La figura 24 es una representación grafica del desgaste del espesor de la pared en el carrete y su casquete.

En la figura 24 se observa, en el eje de las abscisas los niveles de medición registrados en el expediente de medición de espesores. Por ejemplo, el punto 5 corresponde al nivel de la boquilla B1 con sus respectivos puntos. En el eje de las ordenadas, se puede comparar el espesor original con el límite de retiro calculado y los espesores registrados durante las inspecciones. Los espesores de las inspecciones se deben de encontrar entre el espesor original y el límite de retiro.

En la figura 24 se identifican diferentes grupos de puntos, los primeros cuatro corresponden a los niveles de medición del carrete y el casquete. Los últimos dos grupos, en donde se presenta un cambio de pendiente corresponden a los niveles de las boquillas.

La figura 24, funciona como referencia para identificar que espesores se encuentran cercanos al límite de retiro.

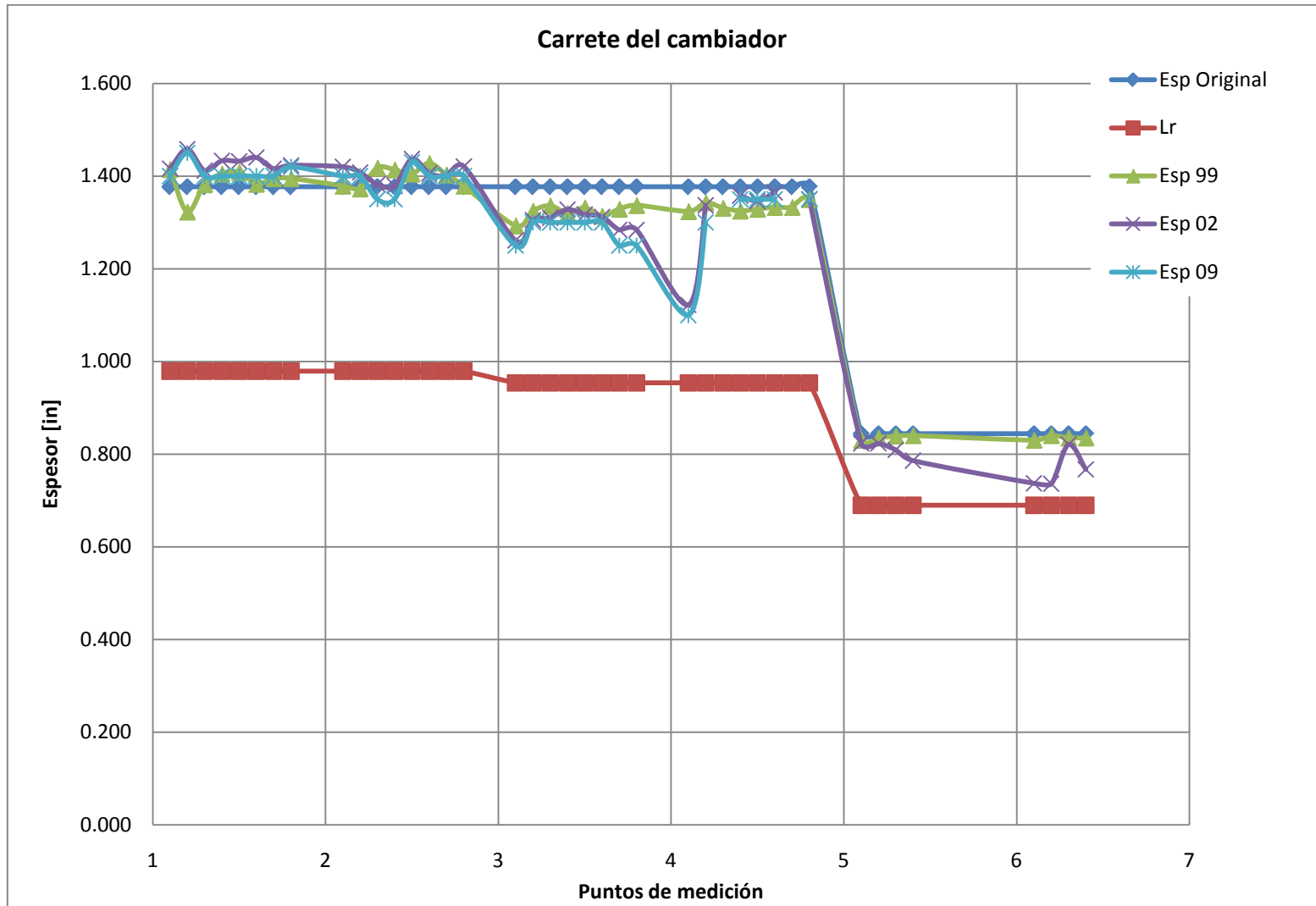


Figura 24 Análisis de espesores del carrete del cambiador de calor EA-14

## 5.2. Casquete superior del tanque de almacenamiento esférico

En el capítulo anterior se determinó el límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para el casquete inferior y el anillo 3. En las tablas 21 y 22 se encuentran registrados los resultados para cada inspección. El límite de retiro se mantiene constante para las dos inspecciones, lo que indica que la velocidad de desgaste es más o menos homogénea. Por el contrario, la presión permisible de trabajo disminuye de una inspección a otra. De la misma manera que en el intercambiador de calor, esta variable es afectada por el espesor mínimo encontrado.

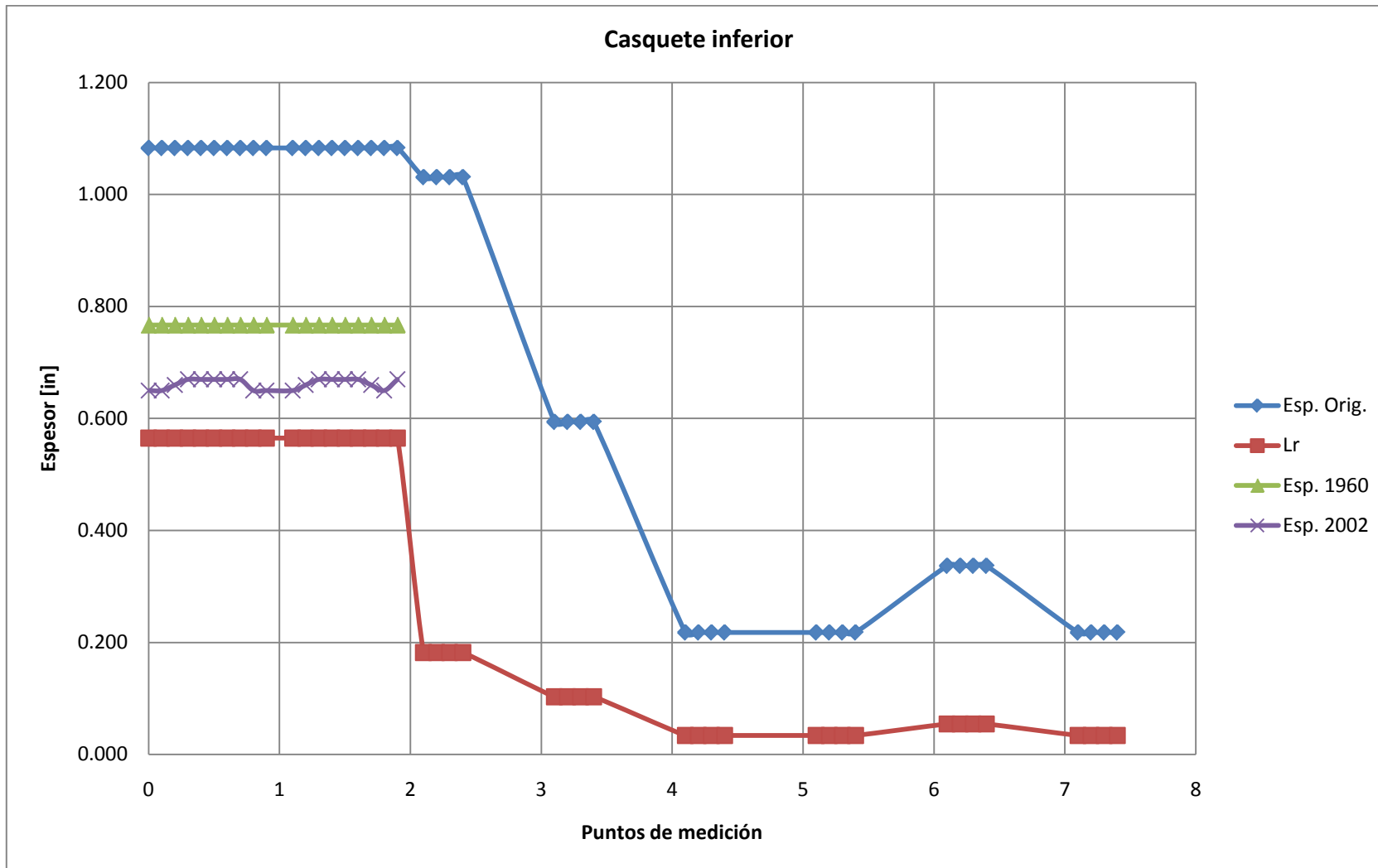
Para evaluar el comportamiento de la medición de espesores en cada inspección respecto al límite de retiro calculado, se elaboró una representación gráfica del desgaste de la pared en el casquete inferior del tanque de almacenamiento esférico TE-14.

En la figura 25 se compara el espesor original del casquete con el límite de retiro calculado. También se observa cómo ha disminuido el espesor de la pared del casquete, comparando con los espesores registrados en las inspecciones. En dicha figura también se puede observar el espesor original de las boquillas y su límite de retiro.

El primer grupo de diámetros pertenece a los puntos de medición de la placa del casquete inferior. Los siguientes grupos de puntos, hacen referencia a las mediciones en las boquillas. El casquete inferior cuenta con seis boquillas de diferentes diámetros. El cambio de pendiente en la línea de límite de retiro indica un cambio de diámetro entre cada boquilla.

En el caso de la placa del casquete, ambas inspecciones presentan una tendencia casi lineal, en otras palabras la velocidad de desgaste es más o menos homogénea.





**Figura 25 Análisis de espesores del casquete inferior del a esfera TE-14**

## 6. Conclusiones

1. Para aplicar la metodología propuesta es necesario contar con el expediente del equipo, es decir, la hoja de diseño (hoja de datos), diagrama de diseño mecánico, historial de operación y registro de medición de espesores.
2. El criterio para establecer la metodología para el cálculo de límite de retiro se debe de realizar con base al código con el que fue diseñado el recipiente.
3. Los parámetros utilizados en un sistema nacional de refinación en México para el cálculo de límite de retiro para recipientes diseñados bajo el Código ASME son:
  - Condiciones de diseño (presión y temperatura)
  - Dimensiones del recipiente (para cuerpo y casquetes)
  - Eficiencia de soldadura de las uniones
  - Esfuerzo máximo permisible del material de fabricación
  - Corrosión permitida
  - Margen de corrosión (si se cuenta con inspecciones)
4. Los parámetros utilizados en un sistema nacional de refinación en México para el cálculo de la presión permisible de trabajo actual para recipientes diseñados bajo el Código ASME son:
  - Condiciones de diseño (temperatura)
  - Dimensiones del recipiente (para cuerpo y casquetes)
  - Eficiencia de soldadura de las uniones
  - Esfuerzo máximo permisible del material de fabricación
  - Corrosión permitida
  - Margen de corrosión
  - Espesor mínimo encontrado en la inspección actual
5. La determinación de límite de retiro y presión permisible de trabajo actual para un recipiente a presión es de gran importancia y es fundamental realizarlo, debido a que de esta manera se establecen los límites de aceptación o criterios para la operación del recipiente. Además de ser un método de administración del riesgo que implica, tener almacenadas sustancias en grandes cantidades,

peligrosas y a condiciones extremas. Y de esta forma evitar un daño a las personas, el ambiente o las instalaciones debido a la pérdida de contención.

## 6. Bibliografía

- Norma Oficial Mexicana NOM-020-STPS-2002, Recipientes sujetos a presión y calderas- Funcionamiento- Condiciones de seguridad.
- Procedimiento para el cálculo por presión interna del espesor mínimo requerido en recipientes, GPASI-IT-0002
- Procedimientos para la inspección de recipientes a presión de almacenamiento de gas licuado del petróleo, GPASI-IT-0003
- Espesores de retiro para tuberías, válvulas y conexiones metálicas, empleadas en el transporte de fluidos, Norma AVIII-4 DG-ASIPA-IT-00008
- Inspection of pressure vessels (tower, drums, reactor, heat exchangers, and condenser) Recommended Practice API-572. 2ª Edition, February 2001
- Pressure vessels inspection code. Maintenance inspection, rating, and alteration. API-510, 8ª Edition, June 1997.
- Inspection Practices for Piping System Components, Recommended Practices API 574, 2ª Edition, June 1998.
- ASME Code for pressure piping, B31. Process piping B 31.3-2002
- Fitness For Service Engineering Assessment Procedure, API-579
- ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE, Pressure Vessels, Sección VIII División 1, Edición 2003
- ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE, Materials, Sección II Parte D Subparte 1 Edición 2003
- Cañerías y recipientes de presión: tomo I diseño de cañerías y recipientes, tomo II: daños en servicio, Otegui José Luis y Rubertis Esteban, 1ª Edición, Mar del Plata, EUDEM 2008.
- Manual de Recipientes a presión, diseño y cálculo, Megyesy Eugene F. 1ª Edición, Limusa Grupo Noriega Editores, 1992.

## **ANEXOS**

### **A. Símbolos, abreviaturas y acrónimos**

- ASME: American Society of Mechanical Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos).
- ASTM: American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales).
- API: American Petroleum Institute
- ANSI: American National Standards Institute
- ASME B 31.3: Abreviación para ASME/ANSI B31.3 Process Piping
- NOM: Norma Oficial Mexicana.
- SASIPA: Subdirección de Auditoría en Seguridad Industrial y Protección Ambiental.
- GPASI: Gerencia de Protección ambiental y Seguridad Industrial
- STPS: Secretaría del Trabajo y Previsión Social.
- AC: Acero al carbón.

## B. Tabla de esfuerzos máximos permisibles

TABLE 1A (CONT'D)  
SECTION I; SECTION III, CLASS 2 AND 3; \* SECTION VIII, DIVISION 1; AND SECTION XII  
MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES S FOR FERROUS MATERIALS  
(\*See Maximum Temperature Limits for Restrictions on Class)

Line No.	Nominal Composition	Product Form	Spec No.	Type/Grade	Alloy Designation/ UNS No.	Class/ Condition/ Temper	Size/Thickness, in.	P-No.	Group No.
1	Carbon steel	Wld. pipe	SA-134	A283C	K02401	...	...	1	1
2	Carbon steel	Plate	SA-283	C	K02401	...	...	1	1
3	Carbon steel	Plate	SA-285	C	K02801	...	...	1	1
4	Carbon steel	Smls. & wld. pipe	SA-333	1	K03008	...	...	1	1
5	Carbon steel	Smls. & wld. tube	SA-334	1	K03008	...	...	1	1
6	Carbon steel	Wld. tube	SA-334	1	K03008	...	...	1	1
7	Carbon steel	Plate	SA-516	55	K01800	...	...	1	1
8	Carbon steel	Smls. pipe	SA-524	II	K02104	...	...	1	1
9	Carbon steel	Wld. pipe	SA-671	CA55	K02801	...	...	1	1
10	Carbon steel	Wld. pipe	SA-671	CE55	K02202	...	...	1	1
11	Carbon steel	Wld. pipe	SA-672	A55	K02801	...	...	1	1
12	Carbon steel	Wld. pipe	SA-672	B55	K02001	...	...	1	1
13	Carbon steel	Wld. pipe	SA-672	C55	K01800	...	...	1	1
14	Carbon steel	Wld. pipe	SA-672	E55	K02202	...	...	1	1
15	Carbon steel	Sheet	SA-414	C	K02503	...	...	1	1
16	Carbon steel	Plate	SA/EN 10028-3	P275NH	...	...	≤ 2	1	1
17	Carbon steel	Bar	SA-36	...	K02600	...	...	1	1
18	Carbon steel	Plate, sheet	SA-36	...	K02600	...	...	1	1
19	Carbon steel	Plate, sheet	SA-662	A	K01701	...	...	1	1
20	Carbon steel	Forgings	SA-181	...	K03502	60	...	1	1
21	Carbon steel	Castings	SA-216	WCA	J02502	...	...	1	1
22	Carbon steel	Forgings	SA-266	I	K03506	...	...	1	1
23	Carbon steel	Forgings	SA-350	LF1	K03009	1	...	1	1
24	Carbon steel	Castings	SA-352	LCA	J02504	...	...	1	1
25	Carbon steel	Cast pipe	SA-660	WCA	J02504	...	...	1	1
26	Carbon steel	Bar	SA-675	60	...	...	...	1	1
27	Carbon steel	Bar	SA-675	60	...	...	...	1	1
04 28	Carbon steel	Forgings	SA-765	I	K03046	...	...	1	1
29	Carbon steel	Plate	SA-515	60	K02401	...	...	1	1
30	Carbon steel	Plate	SA-516	60	K02100	...	...	1	1
31	Carbon steel	Wld. pipe	SA-671	CB60	K02401	...	...	1	1
32	Carbon steel	Wld. pipe	SA-671	CC60	K02100	...	...	1	1
33	Carbon steel	Wld. pipe	SA-671	CE60	K02402	...	...	1	1
34	Carbon steel	Wld. pipe	SA-672	B60	K02401	...	...	1	1
35	Carbon steel	Wld. pipe	SA-672	C60	K02100	...	...	1	1
36	Carbon steel	Wld. pipe	SA-672	E60	K02402	...	...	1	1
37	Carbon steel	Wld. pipe	SA-134	A283D	K02702	...	...	1	1
38	Carbon steel	Plate	SA-283	D	K02702	...	...	1	1

## Tabla de esfuerzos máximos permisibles (continuación)

TABLE 1A (CONT'D)  
SECTION I; SECTION III, CLASS 2 AND 3; \* SECTION VIII, DIVISION 1; AND SECTION XII  
MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES *S* FOR FERROUS MATERIALS  
(\*See Maximum Temperature Limits for Restrictions on Class)

Line No.	Min. Tensile Strength, ksi	Min. Yield Strength, ksi	Applicability and Max. Temperature Limits (NP = Not Permitted) (SPT = Supports Only)				External Pressure Chart No.	Notes
			I	III	VIII-1	XII		
1	55	30	NP	300 (Cl. 3 only)	NP	NP	CS-2	W12
2	55	30	NP	300 (Cl. 3 only)	650	650	CS-2	...
3	55	30	900	700	900	650	CS-2	G10, G35, S1, T2
4	55	30	NP	700	650	650	CS-2	W12, W14
5	55	30	NP	700	650	650	CS-2	W12, W14
6	55	30	NP	NP	650	650	CS-2	G24, W6
7	55	30	850	700	1000	650	CS-2	G10, S1, T2
8	55	30	NP	NP	1000	650	CS-2	G10, T2
9	55	30	NP	700	NP	NP	CS-2	S6, W10, W12
10	55	30	NP	700	NP	NP	CS-2	S6, W10, W12
11	55	30	NP	700	NP	NP	CS-2	S6, W10, W12
12	55	30	NP	700	NP	NP	CS-2	S6, W10, W12
13	55	30	NP	700	NP	NP	CS-2	S6, W10, W12
14	55	30	NP	700	NP	NP	CS-2	S6, W10, W12
15	55	33	NP	700	900	650	CS-2	G10, G35, T1
16	56.5	38.5	NP	NP	400	400	CS-2	G10, G35
17	58	36	650	650 (SPT)	900	650	CS-2	G10, G15, G35, T1
18	58	36	NP	700	650	650	CS-2	G10, G35, G36, T1
19	58	40	NP	NP	700	650	CS-2	T1
20	60	30	1000	700	1000	650	CS-2	G10, G35, S1, T2
21	60	30	1000	700	1000	650	CS-2	G1, G10, G17, S1, T2
22	60	30	1000	700	1000	650	CS-2	G10, S1, T2
23	60	30	NP	700	1000	650	CS-2	G10, T2
24	60	30	NP	700	NP	NP	CS-2	G17
25	60	30	1000	700	NP	NP	CS-2	G1, G10, G17, S1, T2
26	60	30	850	700 (SPT)	NP	NP	CS-2	G10, G15, S1, T2
27	60	30	NP	650 (Cl. 3 only)	900	650	CS-2	G10, G22, G35, T2
28	60	30	NP	NP	1000	650	CS-2	G10, T2
29	60	32	1000	700	1000	650	CS-2	G10, S1, T2
30	60	32	850	700	1000	650	CS-2	G10, S1, T2
31	60	32	NP	700	NP	NP	CS-2	S6, W10, W12
32	60	32	NP	700	NP	NP	CS-2	S6, W10, W12
33	60	32	NP	700	NP	NP	CS-2	S6, W10, W12
34	60	32	NP	700	NP	NP	CS-2	S6, W10, W12
35	60	32	NP	700	NP	NP	CS-2	S6, W10, W12
36	60	32	NP	700	NP	NP	CS-2	S6, W10, W12
37	60	33	NP	300 (Cl. 3 only)	NP	NP	CS-2	W12
38	60	33	NP	300 (Cl. 3 only)	650	650	CS-2	...

## Tabla de esfuerzos máximos permisibles (continuación)

TABLE 1A (CONT'D)  
SECTION I; SECTION III, CLASS 2 AND 3;\* SECTION VIII, DIVISION 1; AND SECTION XII  
MAXIMUM ALLOWABLE STRESS VALUES S FOR FERROUS MATERIALS  
(\*See Maximum Temperature Limits for Restrictions on Class)

Line No.	Maximum Allowable Stress, ksi (Multiply by 1000 to Obtain psi), for Metal Temperature, °F, Not Exceeding														
	-20 to 100	150	200	250	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900	
1	15.7	...	15.7	...	15.7	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
2	15.7	15.7	15.7	...	15.7	15.7	15.7	15.3	14.8	...	...	...	...	...	
3	15.7	15.7	15.7	...	15.7	15.7	15.7	15.3	14.8	14.3	13.0	10.8	8.7	5.9	
4	15.7	...	15.7	...	15.7	15.7	15.7	15.3	14.8	14.3	...	...	...	...	
5	15.7	...	15.7	...	15.7	15.7	15.7	15.3	14.8	14.3	...	...	...	...	
6	13.4	13.4	13.4	...	13.4	13.4	13.4	13.0	12.6	...	...	...	...	...	
7	15.7	15.7	15.7	...	15.7	15.7	15.7	15.3	14.8	14.3	13.0	10.8	8.7	5.9	
8	15.7	15.7	15.7	...	15.7	15.7	15.7	15.3	14.8	14.3	13.0	10.8	8.7	5.9	
9	15.7	...	15.7	...	15.7	15.7	15.7	15.3	14.8	14.3	...	...	...	...	
10	15.7	...	15.7	...	15.7	15.7	15.7	15.3	14.8	14.3	...	...	...	...	
11	15.7	...	15.7	...	15.7	15.7	15.7	15.3	14.8	14.3	...	...	...	...	
12	15.7	...	15.7	...	15.7	15.7	15.7	15.3	14.8	14.3	...	...	...	...	
13	15.7	...	15.7	...	15.7	15.7	15.7	15.3	14.8	14.3	...	...	...	...	
14	15.7	...	15.7	...	15.7	15.7	15.7	15.3	14.8	14.3	...	...	...	...	
15	15.7	15.7	15.7	...	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.6	13.0	10.8	8.7	5.9	
16	16.1	16.1	16.1	...	16.1	16.1	...	...	...	...	...	...	...	...	
17	16.6	16.6	16.6	...	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	15.6	13.0	10.8	8.7	5.9
18	16.6	...	16.6	...	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	15.6	...	...	...	...
19	16.6	16.6	16.6	...	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	16.6	15.6	...	...	...	...
20	17.1	17.1	17.1	...	17.1	17.1	16.3	15.3	14.8	14.3	13.0	10.8	8.7	5.9	
21	17.1	...	17.1	...	17.1	17.1	16.3	15.3	14.8	14.3	13.0	10.8	8.7	5.9	
22	17.1	17.1	17.1	...	17.1	17.1	16.3	15.3	14.8	14.3	13.0	10.8	8.7	5.9	
23	17.1	17.1	17.1	...	17.1	17.1	16.3	15.3	14.8	14.3	13.0	10.8	8.7	5.9	
24	17.1	...	17.1	...	17.1	17.1	16.3	15.3	14.8	14.3	...	...	...	...	
25	17.1	...	17.1	...	17.1	17.1	16.3	15.3	14.8	14.3	13.0	10.8	8.7	5.9	
26	17.1	...	17.1	...	17.1	17.1	16.3	15.3	14.8	14.3	13.0	10.8	8.7	...	
27	17.1	17.1	17.1	...	17.1	17.1	16.3	15.3	14.8	14.3	13.0	10.8	8.7	5.9	
04 28	17.1	17.1	17.1	...	17.1	17.1	16.3	15.3	14.8	14.3	13.0	10.8	8.7	5.9	
29	17.1	17.1	17.1	...	17.1	17.1	17.1	16.4	15.8	15.3	13.0	10.8	8.7	5.9	
30	17.1	17.1	17.1	...	17.1	17.1	17.1	16.4	15.8	15.3	13.0	10.8	8.7	5.9	
31	17.1	...	17.1	...	17.1	17.1	17.1	16.4	15.8	15.3	...	...	...	...	
32	17.1	...	17.1	...	17.1	17.1	17.1	16.4	15.8	15.3	...	...	...	...	
33	17.1	...	17.1	...	17.1	17.1	17.1	16.4	15.8	15.3	...	...	...	...	
34	17.1	...	17.1	...	17.1	17.1	17.1	16.4	15.8	15.3	...	...	...	...	
35	17.1	...	17.1	...	17.1	17.1	17.1	16.4	15.8	15.3	...	...	...	...	
36	17.1	...	17.1	...	17.1	17.1	17.1	16.4	15.8	15.3	...	...	...	...	
37	17.1	...	17.1	...	17.1	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
38	17.1	17.1	17.1	...	17.1	17.1	17.1	16.9	16.3	...	...	...	...	...	



## C. Tabla de eficiencia de soldadura

TABLE UW-12  
MAXIMUM ALLOWABLE JOINT EFFICIENCIES<sup>1,5</sup> FOR ARC AND GAS WELDED JOINTS

Type No.	Joint Description	Limitations	Joint Category	Degree of Radiographic Examination		
				(a) Full <sup>2</sup>	(b) Spot <sup>3</sup>	(c) None
(1)	Butt joints as attained by double-welding or by other means which will obtain the same quality of deposited weld metal on the inside and outside weld surfaces to agree with the requirements of UW-35. Welds using metal backing strips which remain in place are excluded.	None	A, B, C, & D	1.00	0.85	0.70
(2)	Single-welded butt joint with backing strip other than those included under (1)	(a) None except as in (b) below (b) Circumferential butt joints with one plate offset; see UW-13(b)(4) and Fig. UW-13.1, sketch (k)	A, B, C, & D A, B, & C	0.90 0.90	0.80 0.80	0.65 0.65
(3)	Single-welded butt joint without use of backing strip	Circumferential butt joints only, not over $\frac{3}{8}$ in. (16 mm) thick and not over 24 in. (610 mm) outside diameter	A, B, & C	NA	NA	0.60
(4)	Double full fillet lap joint	(a) Longitudinal joints not over $\frac{3}{8}$ in. (10 mm) thick (b) Circumferential joints not over $\frac{3}{8}$ in. (16 mm) thick	A B & C <sup>6</sup>	NA NA	NA NA	0.55 0.55
(5)	Single full fillet lap joints with plug welds conforming to UW-17	(a) Circumferential joints <sup>4</sup> for attachment of heads not over 24 in. (610 mm) outside diameter to shells not over $\frac{1}{2}$ in. (13 mm) thick (b) Circumferential joints for the attachment to shells of jackets not over $\frac{3}{8}$ in. (16 mm) in nominal thickness where the distance from the center of the plug weld to the edge of the plate is not less than $1\frac{1}{2}$ times the diameter of the hole for the plug.	B C	NA NA	NA NA	0.50 0.50

(continued)

## Tabla de eficiencia de soldadura (continuación)

TABLE UW-12  
MAXIMUM ALLOWABLE JOINT EFFICIENCIES<sup>1,5</sup> FOR ARC AND GAS WELDED JOINTS (CONT'D)

Type No.	Joint Description	Limitations	Joint Category	Degree of Radiographic Examination		
				(a) Full <sup>2</sup>	(b) Spot <sup>3</sup>	(c) None
6)	Single full fillet lap joints without plug welds	(a) For the attachment of heads convex to pressure to shells not over $\frac{3}{8}$ in. (16 mm) required thickness, only with use of fillet weld on inside of shell; or	A & B	NA	NA	0.45
		(b) for attachment of heads having pressure on either side, to shells not over 24 in. (610 mm) inside diameter and not over $\frac{1}{4}$ in. (6 mm) required thickness with fillet weld on outside of head flange only	A & B	NA	NA	0.45
7)	Corner joints, full penetration, partial penetration, and/or fillet welded	As limited by Fig. UW-13.2 and Fig UW-16.1	C <sup>7</sup> & D <sup>7</sup>	NA	NA	NA
8)	Angle joints	Design per U-2(g) for Category B and C joints	B, C, & D	NA	NA	NA

NOTES:

- (1) The single factor shown for each combination of joint category and degree of radiographic examination replaces both the stress reduction factor and the joint efficiency factor considerations previously used in this Division.
- (2) See UW-12(a) and UW-51.
- (3) See UW-12(b) and UW-52.
- (4) Joints attaching hemispherical heads to shells are excluded.
- (5)  $E = 1.0$  for butt joints in compression.
- (6) For Type No. 4 Category C joint, limitation not applicable for bolted flange connections.
- (7) There is no joint efficiency  $E$  in the design formulas of this Division for Category C and D corner joints. When needed, a value of  $E$  not greater than 1.00 may be used.

## D. Análisis estadístico de la medición de espesores

Velocidad de desgaste puntual:

$$d = \frac{ei - ef}{ff - fi}$$

- $d$  = Velocidad de desgaste del punto [mpa], (milésimas de pulgadas por año).
- $ff$  = Fecha de la medición mas reciente [años]
- $fi$  = Fecha de medición anterior [años]
- $ei$  = Espesor obtenido en la fecha  $fi$  [mils]
- $ef$  = Espesor obtenido en la fecha  $ff$  [mils]

Calculo de  $D_{Prom}$ , velocidad de desgaste promedio [mpa]:

$$D_{prom} = \frac{d1 + d2 + d3 + \dots + dn}{n}$$

- $d1, d2, d3, \dots, dn$  = Velocidades de desgaste correspondientes a cada punto de la línea o equipo considerado [mpa].
- $n$  = Número de valores de velocidades de desgaste que intervienen en el cálculo.

Calculo de  $D_{Max}$  ajustada, velocidad de desgaste ajustada [mpa]:

$$D_{max} = D_{prom} + 1.28 \frac{D_{prom}}{\sqrt{n}}$$

- $n$  = Número de datos

Datos del mínimo espesor encontrado:

- $ek$  = Espesor mínimo actual [mils]
- $fk$  = Fecha de espesor mínimo actual [años]

Cálculo de la vida útil estimada:

$$VUE = \frac{ek - Lr}{Dmax}$$

- Lr = Límite de retiro

Cálculo de la fecha de próxima medición de espesores:

$$FPME = fk + \frac{VUE}{3}$$

Cálculo de la fecha de retiro probable:

$$FRP = fk + VUE$$

## E. Expediente de inspección técnica del intercambiador de calor EA-14

NIVEL	CARRETE PUNTO	SEP-99	VEL	AGO-02	VEL	JUN-09	VEL
		ESPESOR [mils]	DESGASTE [mpa]	ESPESOR [mils]	DESGASTE [mpa]	ESPESOR [mils]	DESGASTE [mpa]
<b>1</b>	A	1415	-	1416		1400	2
	B	1323	-	1458		1450	1
	C	1382	-	1412		1400	2
	D	1405	-	1433		1400	5
	E	1409	-	1432		1400	5
	F	1383	-	1440		1400	6
	G	1395	-	1416		1400	2
	H	1395	-	1423		1420	0
<b>2</b>	A	1379	-	1420		1400	3
	B	1373	-	1408		1400	1
	C	1418	-	1382	12	1350	5
	D	1414	-	1379	12	1350	4
	E	1405	-	1437		1430	1
	F	1428	-	1406	7	1400	1
	G	1403	-	1401	1	1400	0
	H	1379	-	1421		1400	3
<b>3</b>	A	1293	-	1261	11	1250	2
	B	1325	-	1305	7	1300	1
	C	1336	-	1310	9	1300	1
	D	1320	-	1328		1300	4
	E	1332	-	1317	5	1300	2
	F	1314	-	1312	1	1300	2
	G	1329	-	1284	15	1250	5
	H	1337	-	1284	18	1250	5
<b>4</b>	A	1324	-	1122	67	1100	3
	B	1343	-	1337	2	1300	5
	C	1331	-				0
	D	1325	-	1358		1350	1
	E	1329	-	1346		1350	
	F	1333	-	1365		1350	2
	G	1333	-				0
	H	1350	-	1350	0	1350	0
<b>B1</b>	N	830	-	823	2	-	-
	S	835	-	823	4	-	-
	O	839	-	809	10	-	-
	P	840	-	786	18	-	-
<b>B2</b>	N	830	-	737	31	-	-
	S	840	-	736	35	-	-
	O	835	-	821	5	-	-
	P	835	-	767	23	-	-

**Expediente de inspección técnica del intercambiador de calor EA-14  
(continuación)**

NIVEL	CUERPO PUNTO	SEP-99	VEL	AGO-02	VEL	JUN-09	VEL
		ESPEJOR [mils]	DESGASTE [mpa]	ESPEJOR [mils]	DESGASTE [mpa]	ESPEJOR [mils]	DESGASTE [mpa]
<b>1</b>	A	1575		1551	8.0	1550	0.1
	B	1564		1564	0.0	1550	2.0
	C	1536		1545		1545	0.0
	D	1543		1558		1555	0.4
	E	1547		1555		1555	0.0
	F	1547		1578		1550	4.0
	G	1533		1556		1550	0.9
	H	1557		1555	0.7	1555	0.0
<b>2</b>	A	1572		1568	1.3	1550	2.6
	B	1571		1460	37.0	1450	1.4
	C	1571		1600		1550	7.1
	D	1570		1589		1550	5.6
	E	1578		1583		1550	4.7
	F	1576		1577		1550	3.9
	G	1567		1550		1550	0.0
	H	1571		1573		1550	3.3
<b>3</b>	A	1594		1625		1550	10.7
	B	1612		1634		1550	12.0
	C	1556		1638		1560	11.1
	D	1516		1601		1550	7.3
	E	1567		1601		1550	7.3
	F	1596		1567	9.7	1550	2.4
	G	1608		1586	7.3	1550	5.1
	H	1589		1553	12.0	1550	0.4
<b>4</b>	A	1594		1595		1550	6.4
	B	1589		1620		1550	10.0
	C	1564		1611		1550	8.7
	D	1536		1589		1550	5.6
	E	1559		1575		1550	3.6
	F	1588		1535	17.7	1550	
	G	1609		1567	14.0	1550	2.4
	H	1583		1622		1600	3.1
<b>5</b>	A	1603		1634		1600	4.9
	B	1570		1604		1600	0.6
	C	1551		1623		1600	3.3
	D	1507		1602		1600	0.3
	E	1561		1602		1555	6.7
	F	1579		1549	10.0	1550	
	G	1599		1574	8.3	1550	3.4
	H	1602		1599	1.0	1550	7.0

## Expediente de inspección técnica del intercambiador de calor EA-14

(continuación)

NIVEL	CUERPO PUNTO	SEP-99	VEL	AGO-02	VEL	JUN-09	VEL
		ESPESOR [mils]	DESGASTE [mpa]	ESPESOR [mils]	DESGASTE [mpa]	ESPESOR [mils]	DESGASTE [mpa]
<b>6</b>	A	1593		1600		1600	0.0
	B	1594		1611		1550	8.7
	C	1558		1609		1550	8.4
	D	1528		1609		1550	8.4
	E	1563		1602		1550	7.4
	F	1578		1557	7.0	1550	1.0
	G	1604		1556	16.0	1550	0.9
	H	1611		1598	4.3	1600	
<b>7</b>	A	1653		1610	14.3	1555	
	B	1675		1633	14.0	1555	11.1
	C	1665		1636	9.7	1550	12.3
	D	1647		1616	10.3	1550	9.4
	E	1656		1580	25.3	1550	4.3
	F	1634		1551	27.7	1550	0.1
	G	1653		1578	25.0	1550	4.0
	H	1618		1633		1600	4.7
<b>8</b>	A	1605		1677		1650	3.9
	B	1627		1679		1650	4.1
	C	1616		1666		-	
	D	1644		1680		-	
	E	1627		1688		1650	5.4
	F	1630		1680		1650	4.3
	G	1633		1689		1650	5.6
	H	1629		1659		1650	1.3
<b>9</b>	A	1624		1652		1650	0.3
	B	1633		1636		1600	5.1
	C	1624		1646		-	
	D	1638		1647		-	
	E	1634		1646		1650	
	F	1632		1646		1650	
	G	1623		1652		1650	0.3
	H	1608		1647		1650	
<b>B1</b>	A	809		738	23.7	-	
	B	805		784	7.0	-	
	C	808		750	19.3	-	
	D	807		748	19.7	-	
<b>B2</b>	E	805		749	18.7	-	
	F	803		761	14.0	-	
	G	805		743	20.7	-	
	H	808		765	14.3	-	

F. Expediente de inspección técnica del tanque de almacenamiento esférico TE-14

ANILLO 1	H [in]=	399	$\Delta P$ [lb/in <sup>2</sup> ]	1.727
	A1	ESPESOR		VELOCIDAD
NIVEL	PUNTO	1960	2002	[mils]
1	A	767	710	1.36
	B	767	705	1.48
	C	767	790	
	D	767	665	2.43
	E			
	F	767	665	2.43
2	A	767	780	
	B	767	705	1.48
	C	767	700	1.60
	D	767	690	1.83
	E			
	F	767	680	2.07
3	A	767	710	1.36
	B	767	720	1.12
	C	767	705	1.48
	D	767	690	1.83
	E			
	F	767	690	1.83
4	A	767	690	1.83
	B	767	695	1.71
	C	767		
	D	767	715	1.24
	E			
	F	767	700	1.60
5	A	767	720	1.12
	B	767	710	1.36
	C	767	755	0.29
	D	767	675	2.19
	E			
	F	767	665	2.43
6	A	767	710	1.36
	B	767	700	1.60
	C	767	720	1.12
	D	767	705	1.48
	E			
	F	767	690	1.83
7	A	767	705	1.48
	B	767	700	1.60
	C	767	695	1.71
	D	767	680	2.07
	E			
	F	767	680	2.07
8	A	767	760	0.17
	B	767	760	0.17
	C	767	740	0.64
	D	767	745	0.52
	E			
	F	767	740	0.64



**Expediente de inspección técnica del tanque de almacenamiento esférico TE-14  
(continuación)**

<b>ANILLO 1</b>	<b>H [in]=</b>	<b>399</b>	<b><math>\Delta P</math> [lb/in<sup>2</sup>] =</b>	<b>1.727</b>
<b>A3</b>		<b>ESPESOR</b>		<b>VELOCIDAD</b>
<b>NIVEL</b>	<b>PUNTO</b>	1960	2002	[mils]
<b>9</b>	A	767	685	1.95
	B	767	695	1.71
	C	767	695	1.71
	D	767	695	1.71
	E			
	F	767	690	1.83
<b>10</b>	A	767	680	2.07
	B	767	680	2.07
	C	767	685	1.95
	D	767	690	1.83
	E			
	F	767	685	1.95
<b>11</b>	A	767	700	1.60
	B	767	700	1.60
	C	767	695	1.71
	D	767	680	2.07
	E			
	F	767	675	2.19
<b>12</b>	A	767	695	1.71
	B	767	700	1.60
	C	767	695	1.71
	D	767	700	1.60
	E			
	F	767	690	1.83
<b>13</b>	A	767	705	1.48
	B	767	710	1.36
	C	767	695	1.71
	D	767	695	1.71
	E			
	F	767	695	1.71
<b>14</b>	A	767	690	1.83
	B	767	690	1.83
	C	767	685	1.95
	D	767	720	1.12
	E			
	F	767	700	1.60
<b>15</b>	A	767	720	1.12
	B	767	730	0.88
	C	767	700	1.60
	D	767	710	1.36
	E			
	F	767	695	1.71
<b>16</b>	A	767	700	1.60
	B	767	700	1.60
	C	767	680	2.07
	D	767	680	2.07
	E			
	F	767	675	2.19

**Expediente de inspección técnica del tanque de almacenamiento esférico  
TE-14 (continuación)**

<b>ANILLO 1</b>	<b>H [in]=</b>	<b>399</b>	<b><math>\Delta P</math> [lb/in<sup>2</sup>] =</b>	<b>1.727</b>
<b>A3</b>		<b>ESPESOR</b>		<b>VELOCIDAD</b>
<b>NIVEL</b>	<b>PUNTO</b>	1960	2002	[mils]
<b>17</b>	A	767	720	1.12
	B	767	720	1.12
	C	767	680	2.07
	D	767	695	1.71
	E			
	F	767	695	1.71
<b>18</b>	A	767	680	2.07
	B	767	690	1.83
	C	767	780	
	D	767	655	2.67
	E			
	F	767	675	2.19

<b>CASQUETE INFERIOR</b>	<b>H [in]=</b>	<b>455.905511</b>	<b><math>\Delta P</math> [lb/in<sup>2</sup>] =</b>	<b>1.974</b>
<b>CI</b>		<b>ESPESOR</b>		<b>VELOCIDAD</b>
<b>NIVEL</b>	<b>PUNTO</b>	1960	2002	[mils]
<b>1</b>	1	767	710	1.36
	2	767	710	1.36
	3	767	720	1.12
	4	767	720	1.12
	5	767	730	0.88
	6	767	730	0.88
	7	767	710	1.36
	8	767	720	1.12
	9	767	710	1.36
	10	767	710	1.36
	11	767	710	1.36
	12	767	720	1.12
	13	767	720	1.12
	14	767	720	1.12
	15	767	720	1.12
	16	767	720	1.12
	17	767	710	1.36
	18	767	710	1.36
	19	767	730	0.88

**Expediente de inspección técnica del tanque de almacenamiento esférico  
TE-14 (continuación)**

ANILLO 2	H [in]=	285	$\Delta P$ [lb/in <sup>2</sup> ] =	1.23377126
	A2	ESPESOR		VELOCIDAD
NIVEL	PUNTO	1960	2002	[mils]
1	A	767	750	0.40
	B	767	740	0.64
	C	767	755	0.29
	D	767	750	0.40
	E	767	760	0.17
	F	767	750	0.40
2	A	767	760	0.17
	B	767	730	0.88
	C	767	725	1.00
	D	767	740	0.64
	E	767	710	1.36
	F	767	765	0.05
3	A	767	765	0.05
	B	767	780	
	C	767	750	0.40
	D	767	745	0.52
	E	767	745	0.52
	F	767	775	
4	A	767	735	0.76
	B	767	765	0.05
	C	767	760	0.17
	D	767	735	0.76
	E	767	755	0.29
	F	767	745	0.52
5	A	767	765	0.05
	B	767	755	0.29
	C	767	720	1.12
	D	767	760	0.17
	E			
	F	767	775	
6	A	767	750	0.40
	B	767	780	
	C	767	740	0.64
	D	767	690	1.83
	E	767	760	0.17
	F	767	755	0.29
7	A	767	770	
	B	767	770	
	C	767	760	0.17
	D	767	750	0.40
	E	767	700	1.60
	F	767	765	0.05
8	A	767	790	
	B	767	790	
	C	767	750	0.40
	D	767	765	0.05
	E	767	785	
	F	767	770	

**Expediente de inspección técnica del tanque de almacenamiento esférico  
TE-14 (continuación)**

ANILLO 2	H [in]=	285	$\Delta P$ [lb/in <sup>2</sup> ] =	1.23377126
	A2	ESPESOR		VELOCIDAD
NIVEL	PUNTO	1960	2002	[mils]
9	A	767	760	0.17
	B	767	770	
	C	767	750	0.40
	D	767	740	0.64
	E	767	760	0.17
	F	767	745	0.52
10	A	767	760	0.17
	B	767	720	1.12
	C	767	755	0.29
	D	767	750	0.40
	E	767	760	0.17
	F	767	750	0.40
11	A	767	755	0.29
	B	767	775	
	C	767	760	0.17
	D	767	765	0.05
	E	767	780	
	F	767	765	0.05
12	A	767	740	0.64
	B	767	765	0.05
	C	767	760	0.17
	D	767	740	0.64
	E	767	755	0.29
	F	767	740	0.64
13	A	767	745	0.52
	B	767	755	0.29
	C	767	750	0.40
	D	767	755	0.29
	E	767	765	0.05
	F	767	755	0.29
14	A	767	760	0.17
	B	767	760	0.17
	C	767	745	0.52
	D	767	730	0.88
	E	767	750	0.40
	F	767	735	0.76
15	A	767	755	0.29
	B	767	780	
	C	767	740	0.64
	D	767	750	0.40
	E	767	760	0.17
	F	767	730	0.88
16	A	767	765	0.05
	B	767	770	
	C	767	765	0.05
	D	767	750	0.40
	E	767	765	0.05
	F	767	750	0.40

**Expediente de inspección técnica del tanque de almacenamiento esférico  
TE-14 (continuación)**

<b>ANILLO 2</b>	<b>H [in]=</b>	<b>285</b>	<b><math>\Delta P</math> [lb/in<sup>2</sup>] =</b>	<b>1.23377126</b>
<b>A2</b>		<b>ESPESOR</b>		<b>VELOCIDAD</b>
<b>NIVEL</b>	<b>PUNTO</b>	1960	2002	[mils]
<b>17</b>	A	767	730	0.88
	B	767	780	
	C	767	755	0.29
	D	767	755	0.29
	E	767	765	0.05
	F	767	760	0.17
<b>18</b>	A	767	730	0.88
	B	767	780	
	C	767	750	0.40
	D	767	760	0.17
	E	767	750	0.40
	F	767	730	0.88

**Expediente de inspección técnica del tanque de almacenamiento esférico  
TE-14 (continuación)**

ANILLO 3	H [in]=	60	$\Delta P$ [lb/in <sup>2</sup> ]	0.259
A3		ESPESOR		VELOCIDAD
NIVEL	PUNTO	1960	2002	[mils]
1	A	767	720	1.12
	B	767	730	0.88
	C	767	750	0.40
	D	767	730	0.88
	E			
	F	767	740	0.64
2	A	767	760	0.17
	B	767	770	
	C	767	750	0.40
	D	767	750	0.40
	E			
	F	767	730	0.88
3	A	767	770	
	B	767	760	0.17
	C	767	740	0.64
	D	767	750	0.40
	E			
	F	767	740	0.64
4	A	767	760	0.17
	B	767	760	0.17
	C	767	720	1.12
	D	767	740	0.64
	E			
	F	767	740	0.64
5	A	767	760	0.17
	B	767	730	0.88
	C	767	730	0.88
	D	767	730	0.88
	E			
	F	767	730	0.88
6	A	767	660	2.55
	B	767	680	2.07
	C	767	710	1.36
	D	767	660	2.55
	E			
	F	767	690	1.83
7	A	767	685	1.95
	B	767	770	
	C	767	770	
	D	767	700	1.60
	E			
	F	767	710	1.36
8	A	767	710	1.36
	B	767	750	0.40
	C	767	750	0.40
	D	767	750	0.40
	E			
	F	767	720	1.12

**Expediente de inspección técnica del tanque de almacenamiento esférico  
TE-14 (continuación)**

<b>ANILLO 3</b>	<b>H [in]=</b>	<b>60</b>	<b><math>\Delta P</math> [lb/in<sup>2</sup>] =</b>	<b>0.259</b>
<b>A1</b>		<b>ESPESOR</b>		<b>VELOCIDAD</b>
<b>NIVEL</b>	<b>PUNTO</b>	1960	2002	[mils]
<b>9</b>	A	767	750	0.40
	B	767	760	0.17
	C	767	760	0.17
	D	767	720	1.12
	E			
	F	767	730	0.88
<b>10</b>	A	767	720	1.12
	B	767	730	0.88
	C	767	770	
	D	767	700	1.60
	E			
	F	767	710	1.36
<b>11</b>	A	767	710	1.36
	B	767	720	1.12
	C	767	720	1.12
	D	767	710	1.36
	E			
	F	767	710	1.36
<b>12</b>	A	767	740	0.64
	B	767	760	0.17
	C	767	770	
	D	767	730	0.88
	E			
	F	767	730	0.88
<b>13</b>	A	767	740	0.64
	B	767	740	0.64
	C	767	730	0.88
	D	767	720	1.12
	E			
	F	767	720	1.12
<b>14</b>	A	767	730	0.88
	B	767	730	0.88
	C	767	740	0.64
	D	767	720	1.12
	E			
	F	767	720	1.12
<b>15</b>	A	767	730	0.88
	B	767	760	0.17
	C	767	730	0.88
	D	767	740	0.64
	E			
	F	767	750	0.40
<b>16</b>	A	767	750	0.40
	B	767	740	0.64
	C	767	720	1.12
	D	767	700	1.60
	E			
	F	767	690	1.83

**Expediente de inspección técnica del tanque de almacenamiento esférico  
TE-14 (continuación)**

<b>ANILLO 3</b>		<b>H [in]=</b>	<b>60</b>		<b><math>\Delta P</math> [lb/in<sup>2</sup>] =</b>	<b>0.25974132</b>
<b>A1</b>		<b>ESPESOR</b>			<b>VELOCIDAD</b>	
<b>NIVEL</b>	<b>PUNTO</b>	1960	2002	<b>[mils]</b>		
<b>17</b>	A	767	730	0.88		
	B	767	720	1.12		
	C	767	700	1.60		
	D	767	710	1.36		
	E					
	F	767	710	1.36		
<b>18</b>	A	767	710	1.36		
	B	767	720	1.12		
	C	767	740	0.64		
	D	767	690	1.83		
	E					
	F	767	700	1.60		

<b>CASQUETE SUPERIOR</b>		<b>H [in]=</b>	<b>12</b>		<b><math>\Delta P</math> [lb/in<sup>2</sup>] =</b>	<b>0.052</b>
<b>CS</b>		<b>ESPESOR</b>			<b>VELOCIDAD</b>	
<b>NIVEL</b>	<b>PUNTO</b>	1960	2002	<b>[mils]</b>		
<b>1</b>	1	767	650	2.79		
	2	767	650	2.79		
	3	767	660	2.55		
	4	767	670	2.31		
	5	767	670	2.31		
	6	767	670	2.31		
	7	767	670	2.31		
	8	767	670	2.31		
	9	767	650	2.79		
	10	767	650	2.79		
	11	767	650	2.79		
	12	767	660	2.55		
	13	767	670	2.31		
	14	767	670	2.31		
	15	767	670	2.31		
	16	767	670	2.31		
	17	767	660	2.55		
	18	767	650	2.79		
	19	767	670	2.31		



**G. Tablas de coeficiente de material y eficiencia de soldadura para determinar límite de retiro con base al código ASME B31.3**

**Valores de Y, para  $t < D/6$**

**Table 304.1.1 Values of Coefficient  $Y$  for  $t < D/6$**

Materials	Temperature, °C (°F)					
	$\leq 482$	510	538	566	593	$\geq 621$
	(900 & Lower)	(950)	(1000)	(1050)	(1100)	(1150 & Up)
Ferritic steels	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7
Austenitic steels	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7
Other ductile metals	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Cast iron	0.0	...	...	...	...	...

**Para  $t \geq D/6$**

$$Y = \frac{d + 2c}{D + d + 2c}$$

## Valores de E

**Table A-1B Basic Quality Factors for Longitudinal Weld Joints in Pipes, Tubes, and Fittings,  $E_j$**   
 These quality factors are determined in accordance with para. 302.3.4(a). See also para. 302.3.4(b) and Table 302.3.4 for increased quality factors applicable in special cases. Specifications, except API, are ASTM.

Spec. No.	Class (or Type)	Description	$E_j$ (2)	Appendix A Notes
<b>Carbon Steel</b>				
API 5L	...	Seamless pipe	1.00	...
	...	Electric resistance welded pipe	0.85	...
	...	Electric fusion welded pipe, double butt, straight or spiral seam	0.95	...
	...	Furnace butt welded	0.60	...
A 53	Type S	Seamless pipe	1.00	...
	Type E	Electric resistance welded pipe	0.85	...
	Type F	Furnace butt welded pipe	0.60	...
A 105	...	Forgings and fittings	1.00	(9)
A 106	...	Seamless pipe	1.00	...
A 134	...	Electric fusion welded pipe, single butt, straight or spiral seam	0.80	...
A 135	...	Electric resistance welded pipe	0.85	...
A 139	...	Electric fusion welded pipe, straight or spiral seam	0.80	...
A 179	...	Seamless tube	1.00	...
A 181	...	Forgings and fittings	1.00	(9)
A 234	...	Seamless and welded fittings	1.00	(16)
A 333	...	Seamless pipe	1.00	...
	...	Electric resistance welded pipe	0.85	...
A 334	...	Seamless tube	1.00	...
A 350	...	Forgings and fittings	1.00	(9)
A 369	...	Seamless pipe	1.00	...
A 381	...	Electric fusion welded pipe, 100% radiographed	1.00	(18)
	...	Electric fusion welded pipe, spot radiographed	0.90	(19)
	...	Electric fusion welded pipe, as manufactured	0.85	...
A 420	...	Welded fittings, 100% radiographed	1.00	(16)
A 524	...	Seamless pipe	1.00	...
A 587	...	Electric resistance welded pipe	0.85	...
A 671	12, 22, 32, 42, 52	Electric fusion welded pipe, 100% radiographed	1.00	...
	13, 23, 33, 43, 53	Electric fusion welded pipe, double butt seam	0.85	...
A 672	12, 22, 32, 42, 52	Electric fusion welded pipe, 100% radiographed	1.00	...
	13, 23, 33, 43, 53	Electric fusion welded pipe, double butt seam	0.85	...
A 691	12, 22, 32, 42, 52	Electric fusion welded pipe, 100% radiographed	1.00	...
	13, 23, 33, 43, 53	Electric fusion welded pipe, double butt seam	0.85	...
<b>Low and Intermediate Alloy Steel</b>				
A 182	...	Forgings and fittings	1.00	(9)
A 234	...	Seamless and welded fittings	1.00	(16)
A 333	...	Seamless pipe	1.00	...
	...	Electric resistance welded pipe	0.85	...
A 334	...	Seamless tube	1.00	...
A 335	...	Seamless pipe	1.00	...
A 350	...	Forgings and fittings	1.00	...
A 369	...	Seamless pipe	1.00	...
A 420	...	Welded fittings, 100% radiographed	1.00	(16)
A 671	12, 22, 32, 42, 52	Electric fusion welded pipe, 100% radiographed	1.00	...
	13, 23, 33, 43, 53	Electric fusion welded pipe, double butt seam	0.85	...