

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL HAEDO

LUGAR:
BUENOS AIRES

FECHA:
11/08/2022

INFORME:

CANTIDAD HOJAS

Texto: 60 Anexos = 19

ESPECIALIZACIÓN DISEÑO DE RECIPIENTES CONTENEDORES DE PRESIÓN

TÍTULO

VERIFICACION DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE LA UNION DEL CUERNO DE LA CUNA Y EL CUERPO CILINDRICO DE UN RECIPIENTE DE GAS LICUADO
CODIGO ASME SECCION VIII DIVISION 1

AUTOR

MIGUELANGEL NARVAEZ DNI 95752658

INDICE

- 1.- Introducción
- 2.- Objetivos
- 3.- Datos generales usados en métodos de Zick, Ong y Elementos Finitos
 - 3.1 Nomenclatura Utilizada
 - 3.2 Datos Conocidos
 - 3.3 Estados de Carga
- 4.- Procedimiento de cálculo y resultados – Método de Zick
 - 4.1 Premisas
 - 4.2 Cálculo de tensión circunferencial en cuerpo cilíndrico
- 5.- Procedimiento de cálculo y resultados – Método de Ong
 - 5.1 Premisas
 - 5.2 Cuna Elástica
 - 5.3 Cuna Rígida
- 6.- Procedimiento de cálculo y resultados – Método de Elementos Finitos
 - 6.1 Definición del Modelo y Tipo de Análisis
 - 6.2 Definición de Mallado
 - 6.3 Cargas Aplicadas
 - 6.4 Definición de Salida de Resultados
 - 6.5 Condiciones de Borde para Cuna Elástica
 - 6.6 Condiciones de Borde para Cuna Rígida
 - 6.7 Resultados para Cuna Elástica
 - 6.8 Resultados para Cuna Rígida
- 7.- Comparación de Resultados de los Tres Procedimientos
- 8.- Especificación de Procedimiento de Soldadura
- 9.- Evaluación de una Fisura
- 10.- Conclusiones
- 11.- Figuras y Tablas
- 12.- Anexos
- 13.- Referencias

Observaciones

Revisión

Fecha

Nota

Para aprobación

0

02/08/2022

Para aprobación

1

11/08/2022

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	3
2.	OBJETIVOS.....	4
3.	DATOS GENERALES USADOS EN MÉTODOS DE ZICK, ONG Y ELEMENTOS FINITOS.....	4
3.1	Nomenclatura utilizada.....	4
3.2	Datos conocidos.....	5
3.3	Estados de carga.....	6
4.	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO – MÉTODO DE ZICK.....	6
4.1	Premisas.....	6
4.2	Cálculo de tensión circunferencial en cuerpo cilíndrico (sobre placa de desgaste).....	6
5.	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO – MÉTODO DE ONG.....	8
5.1	Premisas.....	8
5.2	Cuna Elástica.....	8
5.3	Cuna rígida.....	9
6.	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO Y RESULTADOS – MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	10
6.1	Definición de Modelo y Tipo de Análisis.....	10
6.2	Definición de Mallado.....	11
6.3	Cargas Aplicadas.....	14
6.4	Definición de Salida de Resultados.....	16
6.5	Condiciones de Borde para Cuna Elástica.....	18
6.6	Condiciones de Borde para Cuna Rígida.....	20
6.7	Resultados para Cuna Elástica.....	21
6.8	Resultados para Cuna Rígida.....	26
7.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS TRES PROCEDIMIENTOS.....	32
8.	ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA.....	33
9.	EVALUACIÓN DE UNA FISURA.....	43
10.	CONCLUSIONES.....	60
11.	FIGURAS Y TABLAS.....	61
11.1	Figuras Método de Ong.....	61
11.2	Figuras y Tablas extraídas de API 579.....	65
12.	ANEXOS.....	72
	Anexo A. Cálculo de carga en las cunas de apoyo.....	72
	Anexo B. Plano del Equipo Estudiado.....	76
13.	REFERENCIAS.....	79

1. INTRODUCCIÓN

Los recipientes a presión cilíndricos normalmente están soportados horizontalmente por dos soportes o cunas. Por lo general, estas se sueldan a la periferia exterior del recipiente, generándose una discontinuidad estructural entre el recipiente y la cuna; y, en consecuencia, una zona de altos esfuerzos localizados.

A lo largo de los años, el diseño de recipientes cilíndricos con soportes horizontales se ha basado en el análisis de diseño propuesto por Zick [11], comúnmente conocido como análisis de Zick. El análisis se derivó sobre la base de la teoría de vigas.

Tooth, Duthie, White y Carmichael [10] realizaron una serie de experimentos que incluían una serie de diferentes configuraciones de soportes, algunos se consideraban rígidos y otros flexibles. Llegaron a la conclusión de que el análisis de Zick proporcionaría resultados aceptables para los esfuerzos desarrollados en la mayor parte del recipiente, excepto en la región de apoyo donde a veces se subestima el esfuerzo máximo. En particular, cuando se había utilizado un soporte rígido, el análisis de Zick subestimaría el valor máximo por un factor de dos o más.

Una cantidad considerable de esfuerzo de investigación se ha dirigido a proporcionar una solución más precisa al problema anterior. Aunque varios investigadores han verificado analíticamente que la fuerza cortante y el momento en el apoyo son considerablemente diferentes al análisis de Zick, este sigue siendo actualmente la herramienta de diseño recomendada. El hecho es que, aunque el método proporciona un esfuerzo máximo más bajo que el real, rara vez ha provocado una falla en el recipiente en la zona de unión con el soporte. Aparentemente, una carga de reacción estática en el soporte difícilmente provocaría una falla inmediata en el recipiente [9].

Ong [9] desarrolló una ecuación paramétrica que permite determinar el esfuerzo máxima en el borde (cuerno) del soporte o cuna. En su trabajo ejemplifica un caso con cuna rígida donde el método de Zick subestima el esfuerzo máximo (circunferencial) en un factor de 2,5 con respecto al valor obtenido con la ecuación paramétrica que el propone, siendo este último concordante con datos experimentales realizados por Tooth [10]. Ong concluye que el método de Zick no es apropiado en casos donde se requiere un análisis de fatiga, ya que no puede proporcionar un valor preciso de esfuerzo pico, en cuyo caso propone el empleo de la ecuación paramétrica desarrollada en su trabajo.

El método ampliamente utilizado en el diseño de soportes de recipientes horizontales contemplado en ASME BPVC Sección VIII Div 2 está basado en el método de Zick [3]. En este trabajo, se determinó el esfuerzo circunferencial en la vecindad de los cuernos de la cuna de un recipiente horizontal siguiendo la metodología de ASME VIII Div. 2 y Ong. Adicionalmente, se desarrolló un modelo computacional resuelto mediante elementos finitos para determinar los esfuerzos en las cercanías de la unión recipiente-cuna y se comparó con los resultados obtenidos con las 2 metodologías antes mencionadas. Complementariamente, se elaboró (a modo de ejemplo) una especificación de procedimiento de soldadura aplicable a este recipiente; y se realizó la evaluación de una fisura localizada en el cuerpo del recipiente siguiendo la metodología de API 579.

2. OBJETIVOS

El presente trabajo tiene los siguientes objetivos:

- Determinar los esfuerzos circunferenciales en un recipiente horizontales en la zona de unión cuerpo-cuna mediante los métodos de ASME VIII Div. 2 (basado en Zick), Ong y elementos finitos
- Elaborar un Procedimiento de Soldadura aplicable a la fabricación del recipiente estudiado
- Evaluar una fisura en el cuerpo del recipiente siguiendo la metodología de aptitud para el servicio de API 579

3. DATOS GENERALES USADOS EN MÉTODOS DE ZICK, ONG Y ELEMENTOS FINITOS

3.1 Nomenclatura utilizada

Nomenclatura general	
Longitud del cuerpo cilíndrico	L
Diámetro interno – cuerpo cilíndrico	D
Radio interno corroído – cuerpo cilíndrico	R
Radio externo – cuerpo cilíndrico	R_e
Radio medio corroído - cuerpo cilíndrico y cabezal	R_m
Espesor por corrosión	CA
Espesor nominal - cuerpo cilíndrico	t_n
Espesor corroído - cuerpo cilíndrico	t
Radio externo – cabezal	R_{eh}
Radio interno corroído – cabezal	R_h
Espesor nominal - cabezal	t_{nh}
Espesor corroído - cabezal	t_h
Distancia de la cuna a la tangente	a
Espacio entre soportes	c
Ancho de la cuna	B
Ancho de la placa de desgaste	b
Angulo de contacto de la cuna	θ
Angulo de contacto de la placa de desgaste	θ_r
Espesor de la placa de desgaste	t_r
Carga en la cuna obtenida analíticamente	Q_a
Carga en la cuna por peso propio del equipo (incluso cunas) y peso del producto extraída de modelo en Ansys	Q^*
Carga por efecto del peso propio de la cuna (se excluye peso del cuerpo y peso del producto) extraída de modelo en Ansys	Q^{**}
Carga de la cuna por efecto de peso propio (solo cuerpo de presión) y peso de producto para modelo en Ansys (1/4 de equipo)	$Q_{1/4}$
Carga en una cuna (completa) obtenida a partir de $Q_{1/4}$, utilizado en los métodos de Zick y Ong	Q
Esfuerzo admisible – cuerpo cilíndrico	S
Esfuerzo admisible – placa de desgaste	S_r
Gravedad	g

Densidad del acero	ρ
Densidad relativa de producto	G
Densidad del agua de referencia	ρ_A
Nomenclatura exclusiva de método de Zick	
Ancho mínimo de la placa de desgaste	b_1
Angulo mínimo de contacto de la placa de desgaste	θ_1
Coefficiente de esfuerzo para recipiente horizontal sobre cuna	K_7, K_6
Factor de reducción de resistencia de placa de desgaste con respecto al cuerpo cilíndrico	η
Angulo en radianes involucrado en el cálculo de K_6, K_7	β
Esfuerzo circunferencial compresivo membrana más flexión, reducido por la presencia de una placa de desgaste	σ_7
Nomenclatura exclusiva de método de Ong	
Coefficientes geométricos	$\alpha_{(\dots)}$
Factores geométricos de ecuación paramétrica	$k_{(\dots)}$
Angulo de contacto de la cuna	$2\beta^{(1)}$
Extensión angular de la placa de desgaste sobre el cuerno de la cuna	α
Esfuerzo circunferencial máximo en el cuerno de la cuna	σ_h
⁽¹⁾ Equivalente a θ , según se ha indicado en nomenclatura general	

3.2 Datos conocidos

Dimensiones		
Longitud del cuerpo cilíndrico	L	23472 mm
Diámetro interno – cuerpo cilíndrico	D	3375 mm
Radio interno corroído – cuerpo cilíndrico	R	1688,77 mm
Radio externo – cuerpo cilíndrico	R_e	1712,90 mm
Radio medio corroído - cuerpo cilíndrico y cabezal	R_m	1700,835 mm
Espesor por corrosión	CA	1,27 mm
Espesor nominal - cuerpo cilíndrico	t_n	25,40 mm
Espesor corroído - cuerpo cilíndrico	t	24,13 mm
Radio externo – cabezal	R_{eh}	1708,10 mm
Radio interno corroído – cabezal	R_h	1693,57 mm
Espesor nominal - cabezal	t_{nh}	15,8 mm
Espesor corroído - cabezal	t_h	14,53 mm
Distancia de la cuna a la tangente	a	3300 mm
Espacio entre soportes	c	16860 mm
Ancho de la cuna	B	380 mm
Ancho de la placa de desgaste	b	700 mm
Angulo de contacto de la cuna	θ	145°
Angulo de contacto de la placa de desgaste	θ_r	151,62°
Espesor de la placa de desgaste	t_r	20 mm
Producto		
Densidad relativa de producto	ρ	0,56
Densidad del agua de referencia	D_A	1000 kg/m ³
Materiales y esfuerzos admisibles		

Esfuerzo admisible según ASME VIII Div. 1 – cuerpo cilíndrico (SA-516 Gr. 70)	S	138 MPa
Esfuerzo admisible según ASME VIII Div. 1 – placa de desgaste (SA-516 Gr. 70)	S_r	138 MPa
Densidad del acero	ρ	7850 kg/m ³
Otros		
Gravedad	g	9,8066 m/s ²
Tipo de cabezal	-	Semiesférico
Estándar de diseño y fabricación del equipo	-	ASME Sec. VIII Div. 1

3.3 Estados de carga

Los estados de carga a considerar serán:

- Peso propio del equipo (excepto cunas)
- Peso del fluido

4. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO – MÉTODO DE ZICK

4.1 Premisas

- a) La tensión admisible será la correspondiente a ASME VIII Div. 1.
- b) La carga en la cuna será equivalente al valor de carga extraído del modelo en Ansys (ver Anexo A).
- c) En el cálculo de esfuerzos en el cuerpo (sobre la placa de desgaste se utilizará la metodología indicada en ASME VIII Div. 2 basada en el método de Zick).
- d) El esfuerzo obtenido se considera como el correspondiente a una cuna elástica. Zick no aborda el caso de cuna rígida.

4.2 Cálculo de tensión circunferencial en cuerpo cilíndrico (sobre placa de desgaste)

Se determina el ancho mínimo de la placa de desgaste, b_1 :

$$b_1 = \min [(B + 1,56\sqrt{R_m t}), 2a] \quad (\text{Ec. 4.1})$$

$$b_1 = \min \left[\left(380 + 1,56\sqrt{(1700,835)(24,13)} \right); 2 \cdot 3300 \right]$$

$$b_1 = \min[696,03; 6600]$$

$$b_1 = 696,03 \text{ mm}$$

Por otro lado, se determina el mínimo ángulo de contacto de la placa de desgaste con el cuerpo cilíndrico, θ_1 :

$$\theta_1 = \theta + \frac{\theta}{12} \quad (\text{Ec. 4.2})$$

$$\theta_1 = 145 + \frac{145}{12} = 157^\circ$$

De acuerdo con el procedimiento de ASME VIII Div. 2 se deben cumplir las siguientes condiciones para considerar el aporte en resistencia de la placa de desgaste dentro del diseño:

$$b > b_1 \quad (\text{Ec. 4.3})$$

$$\theta_r > \theta_1 \quad (\text{Ec. 4.4})$$

En el presente caso de estudio, se cumple (Ec. 4.3) dado que $700\text{mm} > 696,03\text{mm}$, pero **no se cumple (Ec. 4.4)**, puesto que $151,62^\circ < 157^\circ$. En consecuencia, **no se debe considerar la placa de desgaste**.

Se determina que:

$$8R_m = 8(1700,835) = 13607\text{mm}$$

Luego, se cumple que:

$$L > 8R_m \rightarrow 23460\text{ mm} > 13607\text{ mm} \quad (\text{Ec. 4.5})$$

Entonces, la tensión circunferencial en el cuerpo cilíndrico sobre la placa de desgaste, σ_7 , se determina a través de:

$$\sigma_7 = -\frac{Q}{4t(B+x_1+x_2)} - \frac{3K_7Q}{2t^2} \quad (\text{Ec. 4.6})$$

donde

$$x_1 = x_2 = 0,78\sqrt{R_m t} \quad (\text{Ec. 4.7})$$

$$K_7 = K_6 = \frac{\frac{3\cos\beta}{4}\left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)^2 - \frac{5\sin\beta\cos\beta}{4\beta} + \frac{\cos\beta^3}{2} - \frac{\sin\beta}{4\beta} + \frac{\cos\beta}{4} - \beta\sin\beta\left[\left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)^2 - \frac{1}{2} - \frac{\sin 2\beta}{4\beta}\right]}{2\pi\left[\left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)^2 - \frac{1}{2} - \frac{\sin 2\beta}{4\beta}\right]} \quad (\text{Ec. 4.8})$$

Siendo (Ec. 4.8) válida para $a/R_m \geq 1$, y a su vez:

$$\beta = \pi - \frac{\theta}{2} \quad (\text{Ec. 4.9})$$

Evaluando (Ec. 4.9), se tiene:

$$\beta = \pi - \frac{145^\circ \left(\frac{\pi}{180^\circ}\right)}{2} = \frac{43}{72}\pi$$

Luego de (Ec. 4.8) se obtiene:

$$K_7 = 0,035$$

Evaluando (Ec. 4.7) se consigue:

$$x_1 = x_2 = 0,78\sqrt{(1700,835)(24,13)} = 158,02 \text{ mm}$$

Entonces, al evaluar (Ec. 4.6) se obtiene:

$$\sigma_7 = -\frac{909691,4}{4(24,13)(380 + 158,02 + 158,02)} - \frac{3(0,035)(909691,4)}{2(24,13)^2}$$

$$\sigma_7 = -94,81 \text{ Mpa}$$

5. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO – MÉTODO DE ONG

5.1 Premisas

- Se considerarán las premisas (a) y (b) indicadas en 4.1 para el método de Zick.
- Se desarrollará el método de L.S. Ong publicado en “Journal of Pressure Vessel Technology” con el título “Peak Stress and Fatigue Assessment at the Saddle Support of a Cylindrical Vessel” en el año 1995.
- Para el caso de cuna elástica se considerarán los espesores indicados en el plano mecánico.
- Para el caso de cuna rígida se considerará un espesor de placa de desgaste 10 veces más mayor al indicado en el plano mecánico.

5.2 Cuna Elástica

Primeramente, se determinan los siguientes parámetros geométricos:

$$\alpha_a = \frac{a}{R_m} \sqrt{\frac{t}{R_m}} \quad (\text{Ec. 5.1.a})$$

$$\alpha_b = \frac{b}{R_m} \sqrt{\frac{t}{R_m}} \quad (\text{Ec. 5.1.b})$$

$$\alpha_c = \frac{c}{R_m} \sqrt{\frac{t}{R_m}} \quad (\text{Ec. 5.1.c})$$

$$\alpha_s = \alpha_b^{1/3} \left(\frac{t_r}{t} \right) \quad (\text{Ec. 5.1.d})$$

Obteniéndose:

$$\alpha_a = \frac{3300}{1700,835} \sqrt{\frac{24,13}{1700,835}} = 0,231$$

$$\alpha_b = \frac{700}{1700,835} \sqrt{\frac{24,13}{1700,835}} = 0,049$$

$$\alpha_c = \frac{16860}{1700,835} \sqrt{\frac{24,13}{1700,835}} = 1,180$$

$$\alpha_s = (0,049)^{1/3} \left(\frac{20}{24,13} \right) = 0,303$$

Luego, se determinan los factores k_a, k_b, k_c para $2\beta = 145^\circ$ a partir de las figuras 11.1.1 hasta 11.1.4. Interpolando entre 120° y 150° , se obtiene:

	150°	145°	120°
k_a	0,64	0,625	0,55
k_b	1,20	1,293	1,757
k_c	1,087	1,095	1,134

Se determina la extensión angular de la placa de desgaste mediante:

$$\alpha = \frac{\theta_r - 2\beta}{2} = \frac{151,62^\circ - 145^\circ}{2} = 3,31^\circ \quad (\text{Ec. 5.2})$$

Entonces, se obtiene k_s para la extensión angular previamente calculada, mediante interpolación entre 3° y 4° , obteniéndose:

	3°	3,31°	4°
k_s	0,79	0,775	0,70

Finalmente, se obtiene el esfuerzo circunferencial máximo en el cuerpo cilíndrico (sobre la placa de desgaste) a partir de:

$$\sigma_h = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_s \cdot \frac{Q}{t^2} \sqrt{\frac{t}{R_m}} \quad (\text{Ec. 5.3})$$

$$\sigma_h = (0,625)(1,293)(1,095)(0,775) \cdot \frac{909691,4}{(24,13)^2} \sqrt{\frac{24,13}{1700,835}}$$

$$\sigma_h = 127,62 \text{ MPa}$$

5.3 Cuna rígida

En el caso de cuna rígida se asume $k_s = 1$. Además, se heredan los valores k_a, k_b , y k_c obtenidos en 5.2.

Luego, se obtiene el esfuerzo circunferencial máximo en el cuerpo cilíndrico (sobre la placa de desgaste) a partir de (Ec. 5.3):

$$\sigma_h = (0,625)(1,293)(1,095)(1) \cdot \frac{909691,4}{(24,13)^2} \sqrt{\frac{24,13}{1700,835}}$$

$$\sigma_h = 164,67 \text{ MPa}$$

6. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO Y RESULTADOS – MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

6.1 Definición de Modelo y Tipo de Análisis

Dado que existen condiciones de simetría geométrica del equipo y de los estados de cargas considerados en este análisis, se procede a generar un modelo que consta de $\frac{1}{4}$ de equipo en ANSYS Workbench 2022, como se puede apreciar en la figura 6.1. En el modelo se pueden notar los planos de simetría YZ (a lo largo del eje longitudinal) y XY (en el medio del equipo).

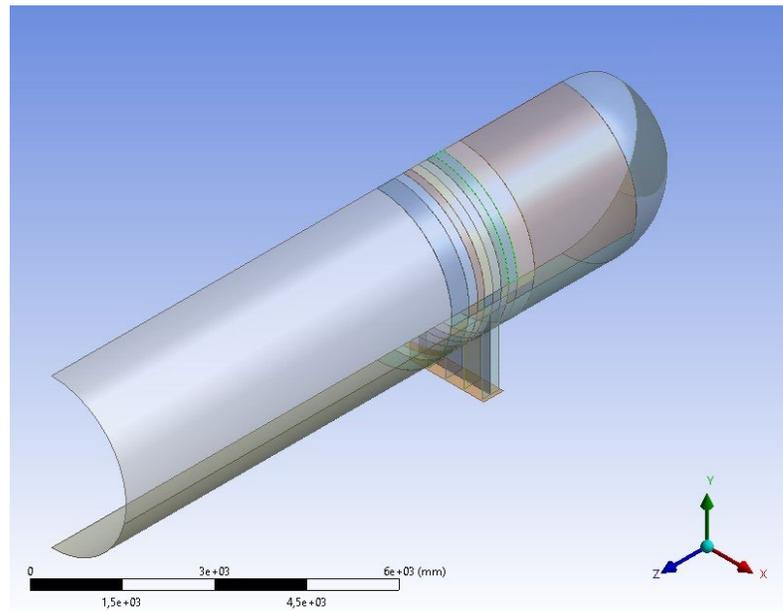


Figura 6.1 Geometría de modelo de $\frac{1}{4}$ de equipo desarrollado en Ansys Workbench

El análisis propuesto es del tipo lineal elástico y será llevado a cabo mediante elementos finitos. El tipo de elemento usado será del tipo placa/cáscara. Se calcularán las tensiones circunferenciales en las superficies interior y exterior. El área del equipo que resulta de interés en este estudio corresponde a la zona del cuerpo cilíndrico sobre la placa desgaste.

En la figura 6.2 se destacan los espesores utilizados en el modelo para cada componente. Nótese que el cuerpo cilíndrico y el cabezal se han modelado en condición de corroído, mientras que la placa de desgaste y la cuna (cartelas, alma y placa base) se modelan con los espesores nominales. Para modelar el aporte de rigidez de la placa desgaste, se ha incorporado el espesor de esta al espesor del cuerpo en la zona de unión de la cuna con el cuerpo cilíndrico. Por lo tanto, en la zona de la placa de desgaste las placas del modelo tienen un espesor de 44,13 mm (24,13 mm correspondientes al espesor corroído del cuerpo más 20 mm del espesor nominal de la placa de desgaste). Por otro lado, el espesor de la cartela central se ha disminuido a la mitad del espesor nominal, debido a que por la simetría planteada en el plano YZ también se ve afectada esta cartela.

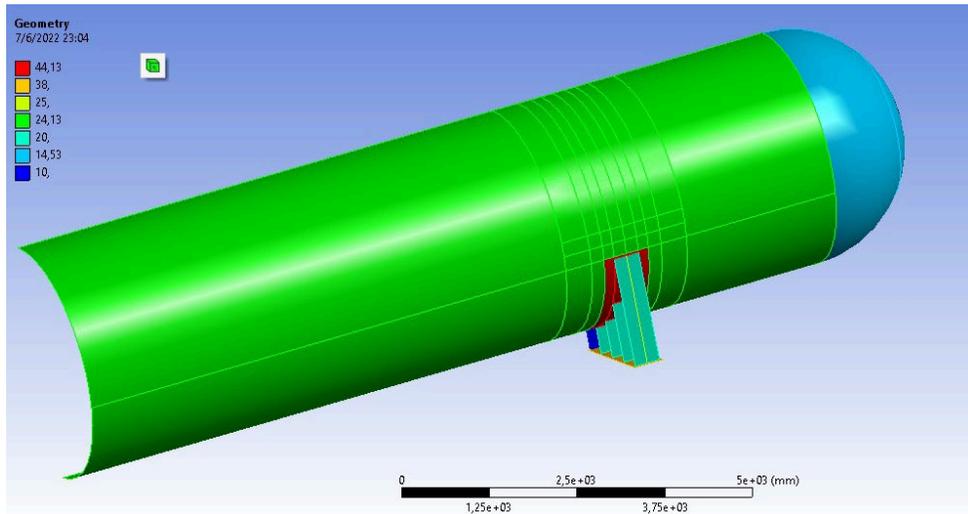


Figura 6.2 Espesores de cada componente en el modelo desarrollado en Ansys Workbench

6.2 Definición de Mallado

Se propone un mallado global (grueso) en zonas del cuerpo cilíndrico, cabezal y cuna lejos del área de interés para este estudio, y un mallado local (fino) en la zona de unión de cuerpo con la cuna. La configuración global del mallado es la mostrada en la tabla 6.1.

Tabla 6.1 Parámetros globales de malla en modelo de Ansys

Physics preference	Mechanical
Element order	Quadratic
Element size	65 mm
Face meshing	Si Method = quadrilaterals

Adicionalmente, para el mallado fino se ha insertado un refinamiento de 3 en el área de interés para este estudio.

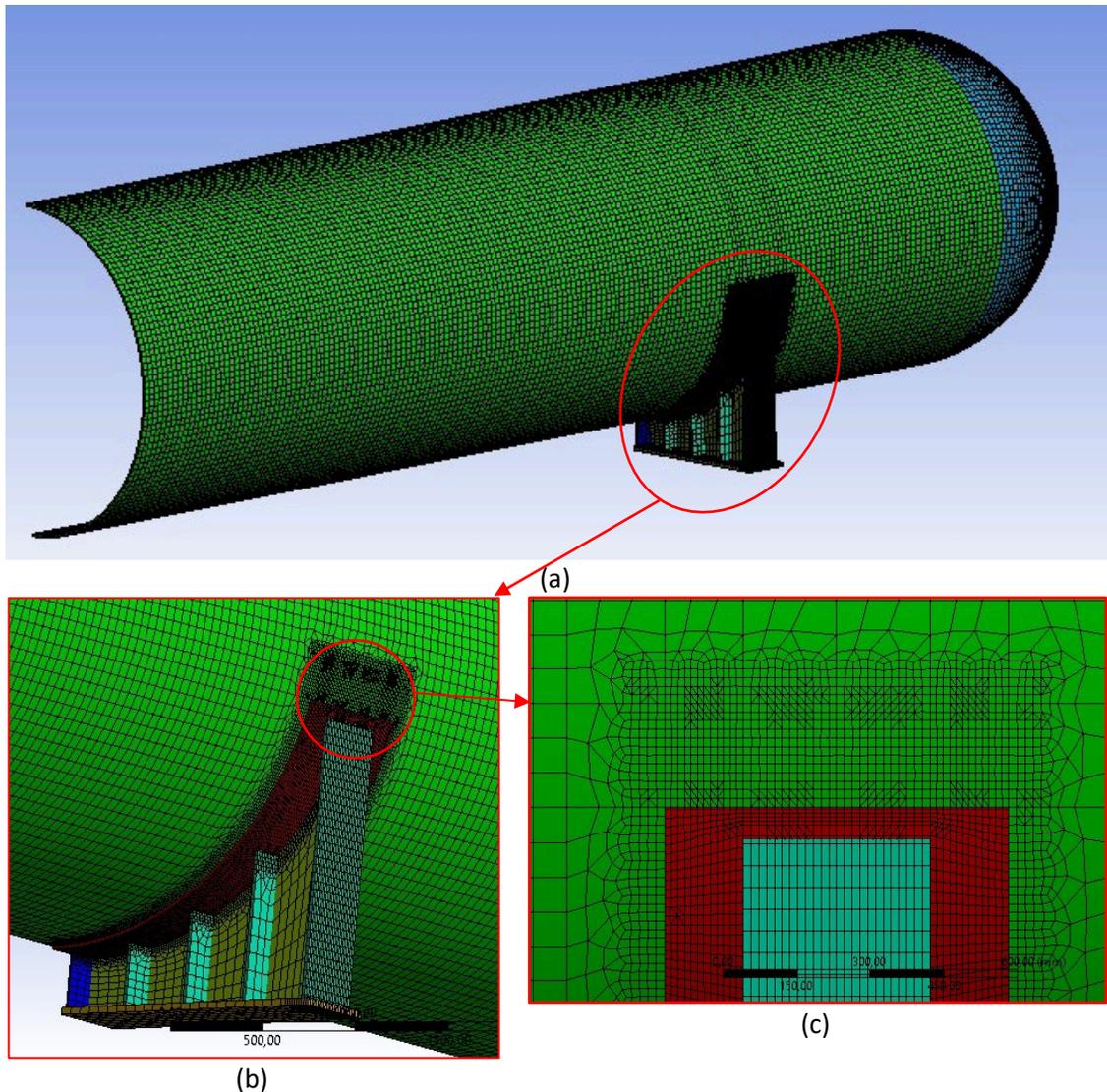


Figura 6.3 Mallado generado en modelo (a) Mallado global (b) Mallado fino en zona de placa de desgaste y cartela exterior (c) Acercamiento en zona de mallado fino en cuerpo sobre la placa de desgaste

En la figura 6.3 se puede apreciar los dos tipos de mallado. Nótese que en general los elementos son del tipo cuadrilátero, sin embargo, el software ha incorporado además elementos de tipo triangular en las zonas de mallado fino alrededor de la unión de la placa de desgaste y el cuerpo en (c).

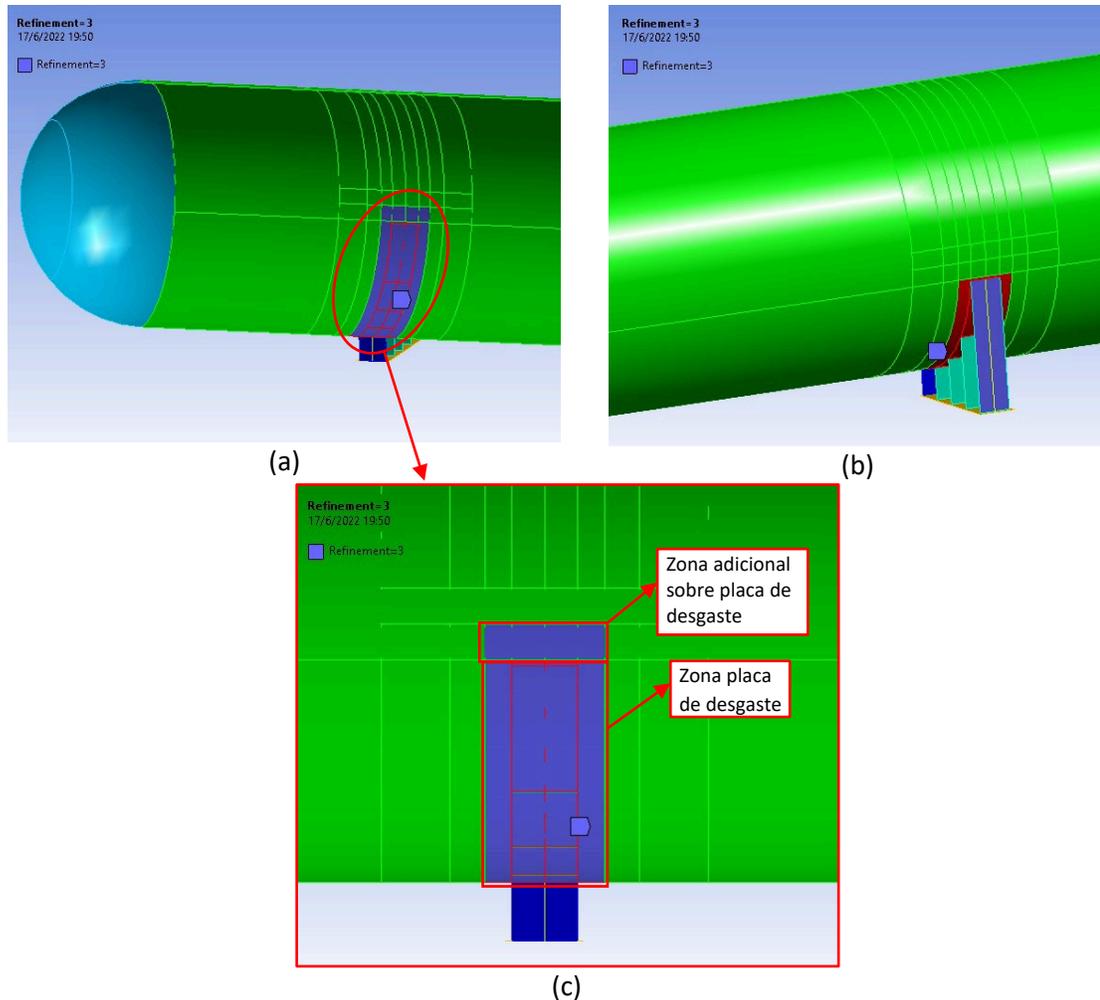


Figura 6.4 Zona de mallado fino con factor de refinamiento de 3. (a) Superficies del cuerpo cilíndrico con mallado fino vistas desde el interior del recipiente (b) Superficie de cartela exterior cercana a unión cuerpo-placa de desgaste (c) Acercamiento de superficies de cuerpo cilíndrico con mallado fino

En la figura 6.4 se aprecian las superficies donde se ha refinado el mallado mediante la aplicación de un factor de refinamiento de 3. En las figuras (a) y (c), vistas desde el interior del recipiente, se puede notar que las superficies corresponden con la zona reforzada por la placa de desgaste y, además, la zona del cuerpo cilíndrico sobre la placa de desgaste con una extensión angular de 7° (aproximadamente 210 mm de longitud arco medido sobre la pared exterior del recipiente). Asimismo, en la cartela exterior también se ha incorporado un mallado fino debido a que su extremo superior es cercano a la unión placa de desgaste-cuerpo cilíndrico, de acuerdo con lo mostrado en (b).

Adicionalmente, se ha incorporado un criterio de convergencia en una solución del modelo. Al generar el mallado (antes de iniciar la corrida), el modelo consta de 83327 nodos y 27944 elementos. Durante la corrida del modelo, el programa podrá añadir elementos adicionales en la zona de interés para atender el criterio de convergencia impuesto. Esto se verá con mayor detalle en las secciones 6.4, 6.5 y 6.6.

Es importante resaltar que los elementos usados son de orden cuadrático, por ende, cada cuadrilátero posee 8 nodos y cada elemento triangular cuentan con 6 nodos. Cada nodo posee teóricamente 5 grados de libertad: 3 desplazamientos y 2 giros.

6.3 Cargas Aplicadas

Las cargas aplicadas en ambos casos de estudio (cuna elástica y cuna rígida) son las indicadas en la figura 6.5 y tabla 6.2.

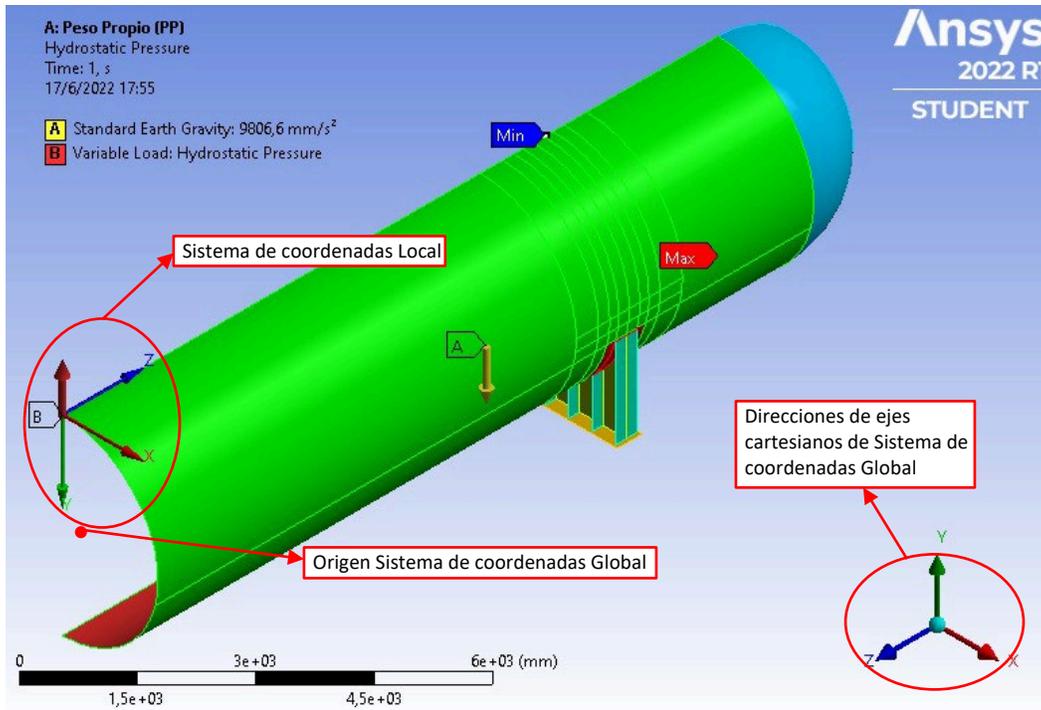


Figura 6.5 Cargas aplicadas en el modelo de Ansys

Tabla 6.2 Descripción de las cargas aplicadas en el modelo de Ansys

Carga aplicada		Valores ingresados	Geometría de aplicación
A	Carga gravitatoria	Coordinate System: Global ⁽¹⁾ Direction: -Y X Component: 0 Y Component: -9806,6 mm/s ² Z Component: 0	Todo el modelo
B	Presión hidrostática	Coordinate system: Local ⁽²⁾ <u>Free Surface Location</u> X Coordinate: 0 Y Coordinate: 0 Z Coordinate: 0	Toda la superficie interior de cuerpo cilíndrico y cabezal. Distribución según figura 6.5
		<u>Fluid Density</u> : 5,6x10 ⁻⁷ kg/mm ³ <u>Hydrostatic Acceleration</u> X Component: 0 Y Component: -9806,6 mm/s ² Z Component: 0	
Notas:			
1) "Global" es un sistema de coordenadas general con el origen y direcciones de ejes cartesianos según se indica en la figura 6.5.			
2) "Local" es un sistema de coordenadas local definido con el origen y direcciones de ejes cartesianos según se indica en la figura 6.5.			

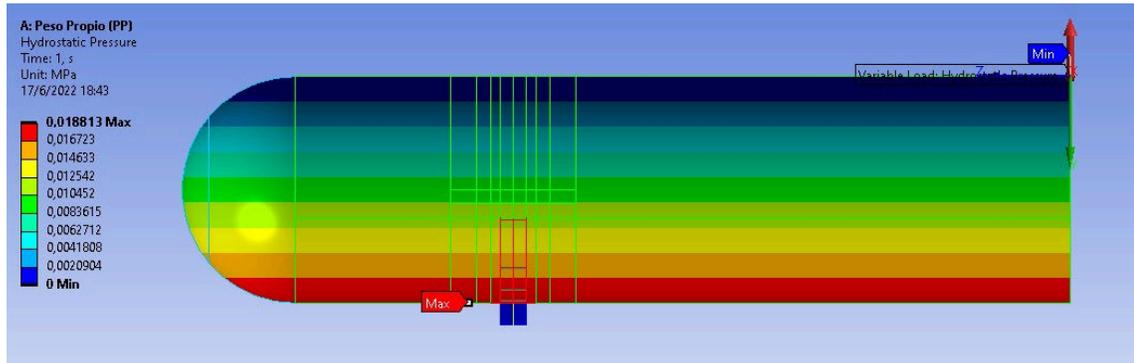


Figura 6.6 Distribución de carga hidrostática en el interior del recipiente

En la figura 6.6 se puede apreciar la distribución de la carga hidrostática de producto en el interior del recipiente. De acuerdo con lo esperado el valor máximo se encuentra en la parte más baja del interior del recipiente.

6.4 Definición de Salida de Resultados

La tabla 6.3 detalla la definición de tres salidas de resultados insertadas en el modelo de Ansys.

Tabla 6.3 Definición de la salida de resultados en modelo de Ansys

Resultado		Definición	Observaciones
1	Esfuerzo circunferencial	Type: Normal Stress Coordinate System: Cilindrico ⁽¹⁾ Orientation: Y Axis Position: Top/Bottom	Proporcionará los valores de esfuerzo circunferencial en el cuerpo cilíndrico y cabezal en las superficies interior y exterior.
2	Esfuerzo circunferencial (con criterio convergencia)	<u>Convergence</u> Type: Maximum Allowable change: 5% (ver nota 2)	Proporcionará los valores de esfuerzo circunferencial en las superficies interior y exterior del cuerpo cilíndrico, pero solo en la geometría mostrada en figura 6.8.
3	Fuerza de reacción	Type: Force reaction Location Method: Boundary condition Boundary condition: Fixed Support Orientation: Global Result Selection: Y axis	Proporcionará los resultados de la fuerza de reacción en la condición de borde "G" definida en la placa base como se verá más adelante en secciones 6.5 y 6.6. Se filtra el resultado de la reacción en el eje "Y", descartándose las reacciones en las demás direcciones ya que no son de interés para este estudio. Nótese que la reacción estará dada de acuerdo con el sistema de coordenadas global.
<p>Notas:</p> <p>1) "Cilíndrico" es un sistema de coordenadas local y de tipo cilíndrico con el origen y direcciones de ejes según se muestra en la figura 6.7. La dirección "Y" coincide con la dirección circunferencial del recipiente. Por lo tanto, el esfuerzo circunferencial estará basado en la dirección "Y".</p> <p>2) Demás parámetros idénticos a los indicados en (1 – Esfuerzo circunferencial)</p>			

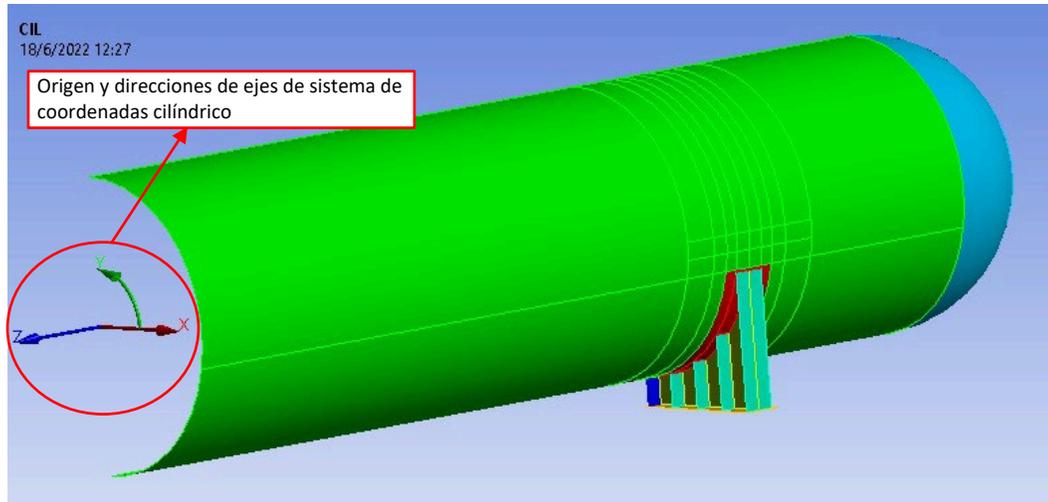


Figura 6.7 Definición de sistema de coordenadas cilíndrico

Como se aprecia en la tabla 6.3, se determinarán dos valores de esfuerzos circunferencial (1 y 2). El primero de carácter general (en toda la geometría del recipiente) y el segundo solo será determinado para la geometría seleccionada en la figura 6.8. En este segundo caso, se ha agregado un criterio de convergencia al esfuerzo circunferencial, mediante el cual se establece un cambio máximo permisible de 5% entre dos iteraciones sucesivas.

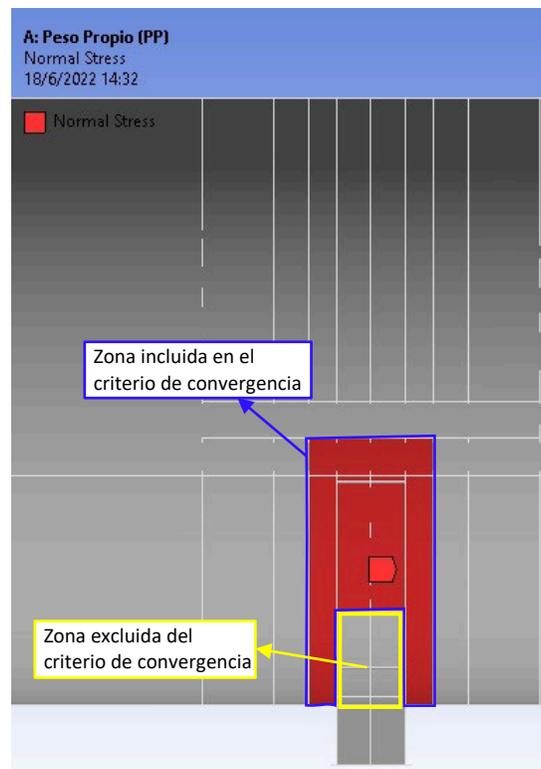


Figura 6.8 Superficies de aplicación de criterio de convergencia en el esfuerzo circunferencial

En la figura 6.8 se muestra la zona donde se determinarán los esfuerzos circunferenciales con criterio de convergencia. En general, corresponde a la misma zona donde se ha aplicado refinamiento de malla, exceptuando el área del cuerpo cilíndrico y placa de desgaste indicada en la figura por encontrarse más lejana de la zona interés de este estudio (cuerpo cilíndrico sobre la placa de desgaste) y bordes de la placa de desgaste donde ocurre el cambio de espesor con el cuerpo. También está exceptuada la cartela exterior de la cuna.

6.5 Condiciones de Borde para Cuna Elástica

Las condiciones de borde establecidas para el caso de cuna elástica se resumen la figura 6.9 y tabla 6.4.

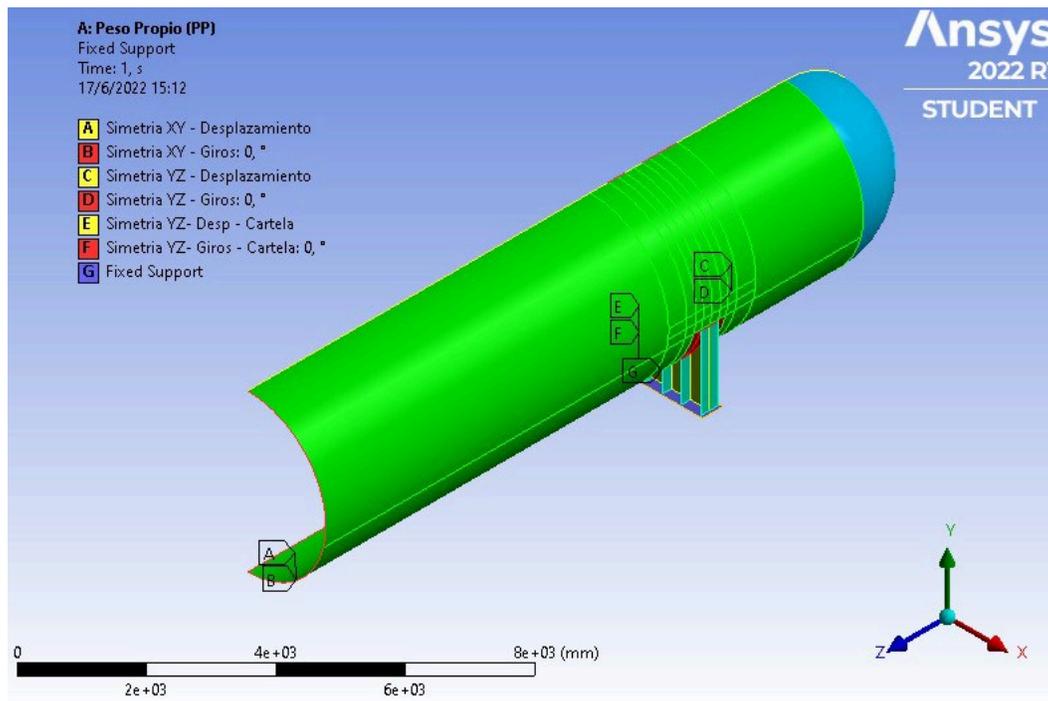


Figura 6.9 Condiciones de borde en modelo de Ansys para caso de cuna elástica

Tabla 6.4 Definición de condiciones de borde en el modelo de Ansys para caso de cuna elástica

Condición de borde		Definición	Geometría de aplicación
A	Simetría XY - Desplazamiento	Desplazamiento X = Libre Desplazamiento Y = Libre Desplazamiento Z = 0	Arista de semicírculo de formado al cortar transversalmente el cuerpo cilíndrico en el plano XY
B	Simetría XY - Giros	Giro X = Fijo Giro Y = Fijo Giro Z = Libre	
C	Simetría YZ - Desplazamiento	Desplazamiento X = 0 Desplazamiento Y = Libre Desplazamiento Z = Libre	Aristas de cuerpo cilíndrico y cabezal formadas al cortar longitudinalmente el equipo en el plano YZ
D	Simetría YZ - Giros	Giro X = Libre Giro Y = Fijo Giro Z = Fijo	
E	Simetría YZ – Desp – Cartela	Desplazamiento X = 0 Desplazamiento Y = Libre Desplazamiento Z = Libre	Superficie de la cartela central, lado eje -X.
F	Simetría YZ – Giros - Cartela	Giro X = Libre Giro Y = Fijo Giro Z = Fijo	
G	Fixed Support	Desplazamiento X = 0 Desplazamiento Y = 0 Desplazamiento Z = 0 Giro X = 0 Giro Y = 0 Giro Z = 0	Superficie inferior de placa base de cuna (teóricamente en contacto con el suelo)

6.6 Condiciones de Borde para Cuna Rígida

Las condiciones de borde establecidas para el caso de cuna elástica se resumen la figura 6.10 y tabla 6.5.

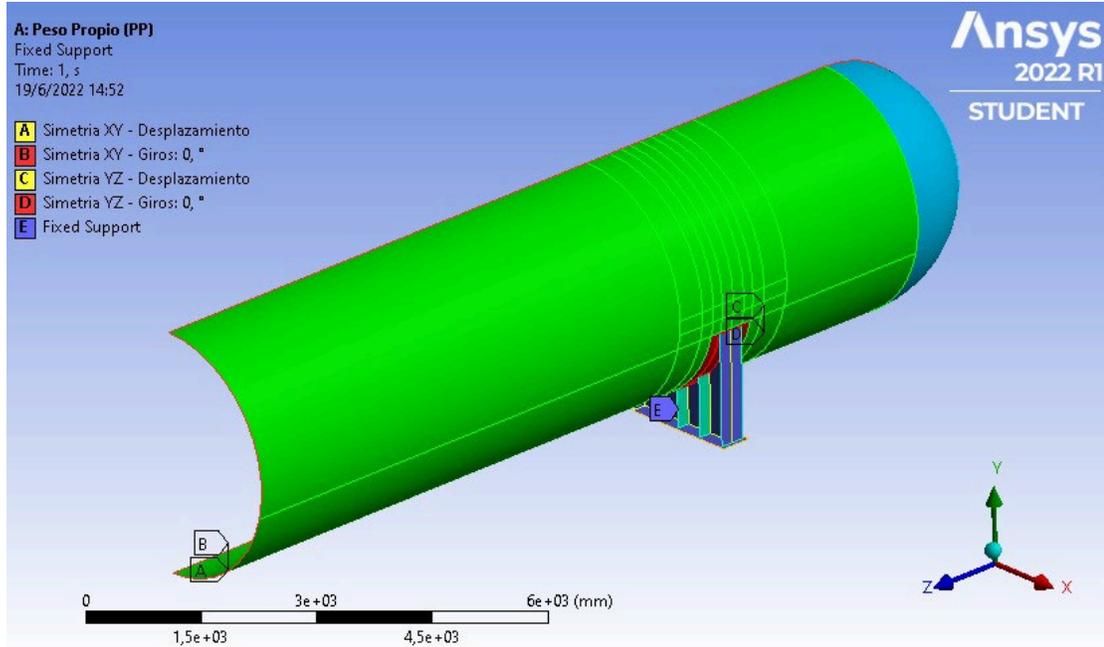


Figura 6.10 Condiciones de borde en modelo de Ansys para caso de cuna rígida

Tabla 6.5 Definición de condiciones de borde en el modelo de Ansys para caso de cuna rígida

Condición de borde		Definición	Geometría de aplicación
A	Simetría XY - Desplazamiento	Desplazamiento X = Libre Desplazamiento Y = Libre Desplazamiento Z = 0	Arista de semicírculo de formado al cortar transversalmente el cuerpo cilíndrico en el plano XY
B	Simetría XY - Giros	Giro X = Fijo Giro Y = Fijo Giro Z = Libre	
C	Simetría YZ - Desplazamiento	Desplazamiento X = 0 Desplazamiento Y = Libre Desplazamiento Z = Libre	Aristas de cuerpo cilíndrico y cabezal formadas al cortar longitudinalmente el equipo en el plano YZ
D	Simetría YZ - Giros	Giro X = Libre Giro Y = Fijo Giro Z = Fijo	
E	Fixed Support	Desplazamiento X = 0 Desplazamiento Y = 0 Desplazamiento Z = 0 Giro X = 0 Giro Y = 0 Giro Z = 0	Superficies de placa base, alma y todas las cartelas.

De la tabla 6.5, se puede notar que en el caso de cuna rígida se han restringido todos los grados de libertad de los nodos de las cartelas, alma y placa base.

6.7 Resultados para Cuna Elástica

Como primera aproximación se tienen las distribuciones de esfuerzos circunferenciales en todo el modelo que se muestran en las figuras 6.11 y 6.12. Estas distribuciones corresponden a la salida de resultado N° 1 mencionada en la tabla 6.3.

La figura 6.11 corresponde al **lado interno** de equipo. En (a) se aprecia una distribución general bastante uniforme, con excepción de una franja orientada en sentido longitudinal con esfuerzos (negativos) de compresión. En (b) se hace un acercamiento de la zona donde ocurre el cambio de espesor entre la placa de desgaste y el cuerpo cilíndrico. Nótese que esta zona presenta los mayores niveles de esfuerzos localizados, siendo mayores cuanto más próximo se esté del borde de la placa de desgaste. Además, se evidencia que los esfuerzos son positivos, indicativo de que la zona está sometida a tensión.

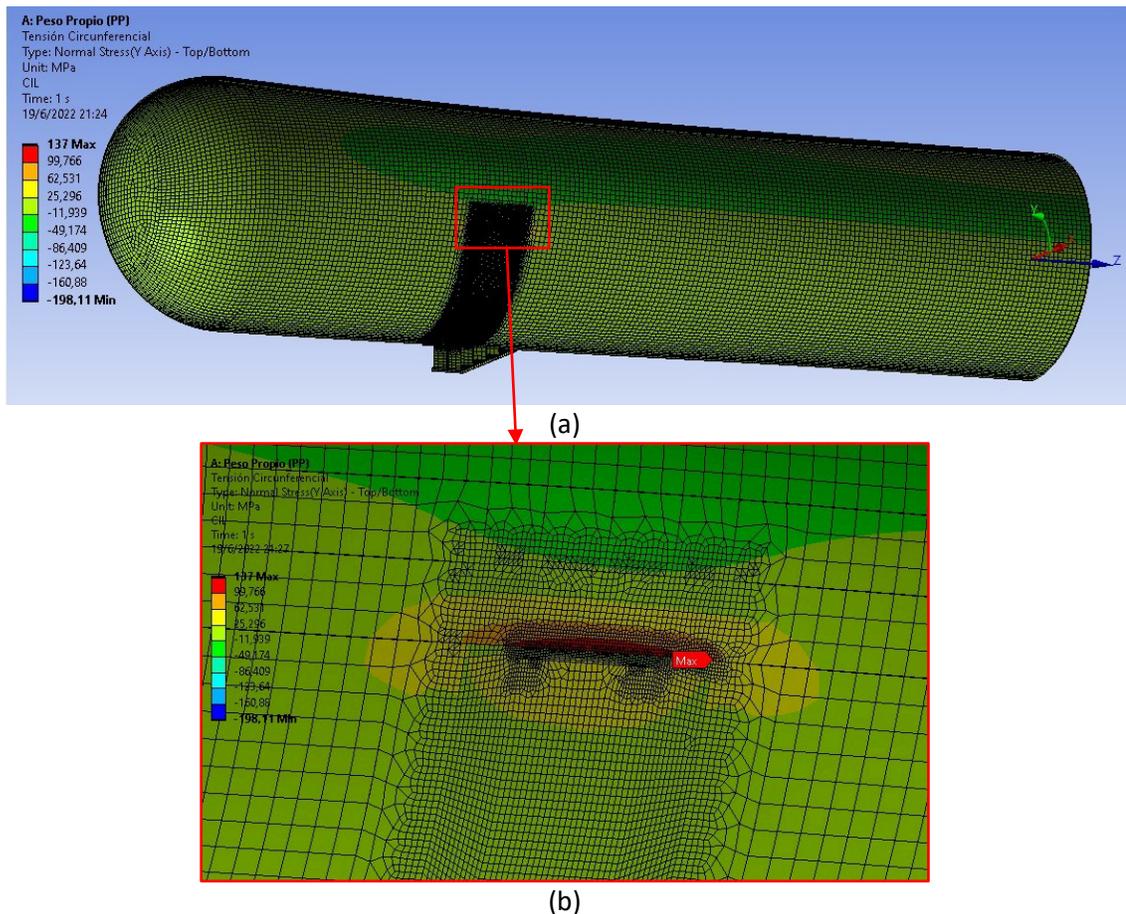
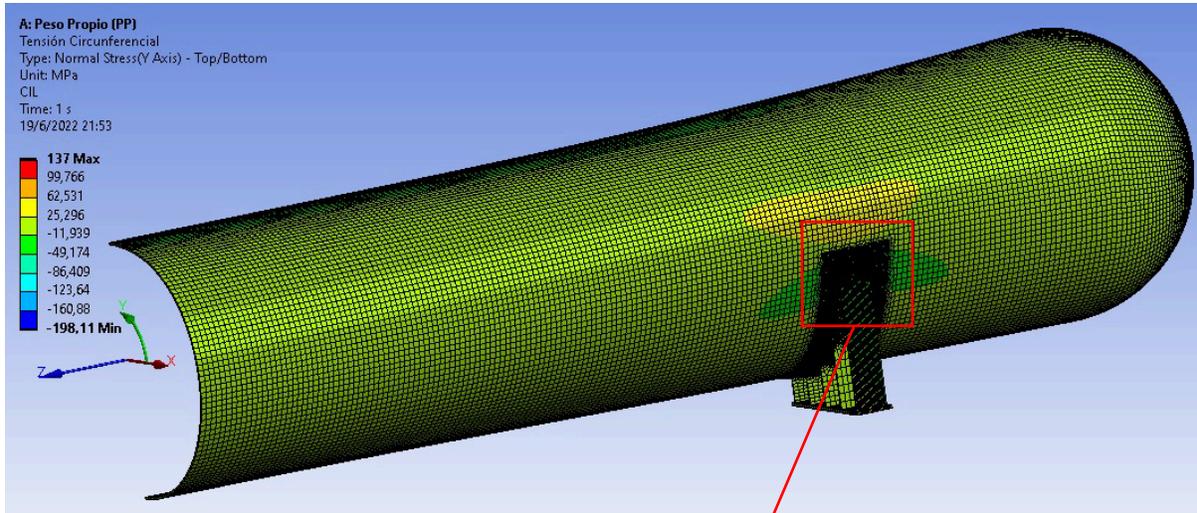
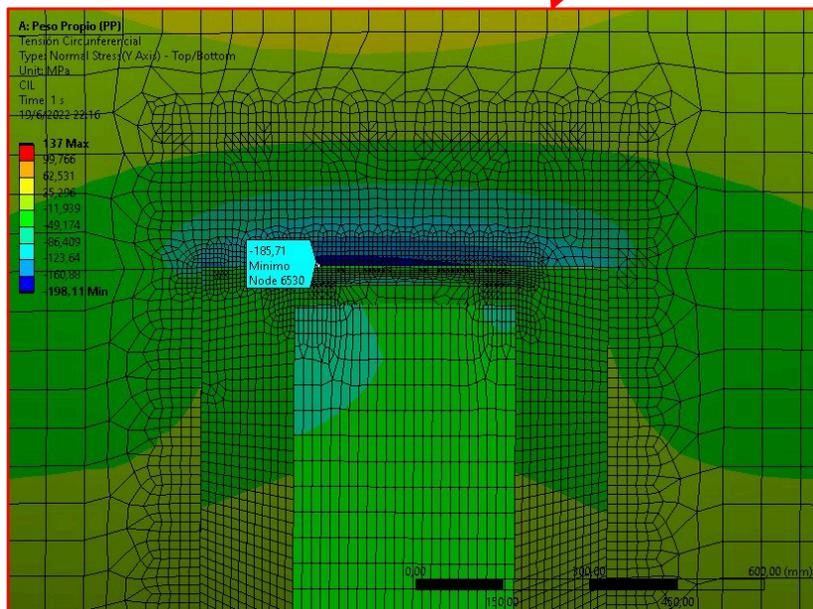


Figura 6.11 Distribución esfuerzo circunferencial con cuna elástica, lado interior del equipo (a) vista general (b) zona cambio de espesor placa de desgaste y cuerpo cilíndrico

Por otro lado, la figura 6.12 corresponde al **lado externo** del equipo. En (a) se aprecia una distribución general bastante uniforme en zonas del cuerpo cilíndrico y cabezal alejadas al área de la unión del equipo con la cuna. En las cercanías de dicha unión se distinguen algunas zonas con gradientes de esfuerzos. En (b) se hace un acercamiento de la zona del cuerpo cilíndrico sobre la placa de desgaste. Nótese que en esta zona predominan esfuerzos de compresión (con signo negativo). Los esfuerzos mínimos (o de compresión máximos) ocurren cerca de la unión del cuerpo con la placa de desgaste.



(a)



(b)

Figura 6.12 Distribución esfuerzo circunferencial con cuna elástica, lado exterior del equipo (a) vista general (b) zona cambio de espesor placa de desgaste y cuerpo cilíndrico

Para resultados más específicos y representativos del comportamiento de la zona de unión entre el cuerpo cilíndrico y la placa de desgaste se acude a la salida de resultados N° 2 indicada en la tabla 6.3, es decir, esfuerzos circunferenciales con criterio de convergencia. En la figura 6.13 se muestra el historial de convergencia. Básicamente, el programa genera elementos y nodos adicionales en la zona de interés hasta que la variación de los resultados obtenidos entre mallados sucesivos sea inferior el cambio permisible que se ha designado. En este caso, se ha establecido un cambio permisible de 5%. De la figura 6.13, se aprecia que con el mallado final este cambio es inferior al 0,08%; lo cual indica un buen nivel de convergencia en la solución.

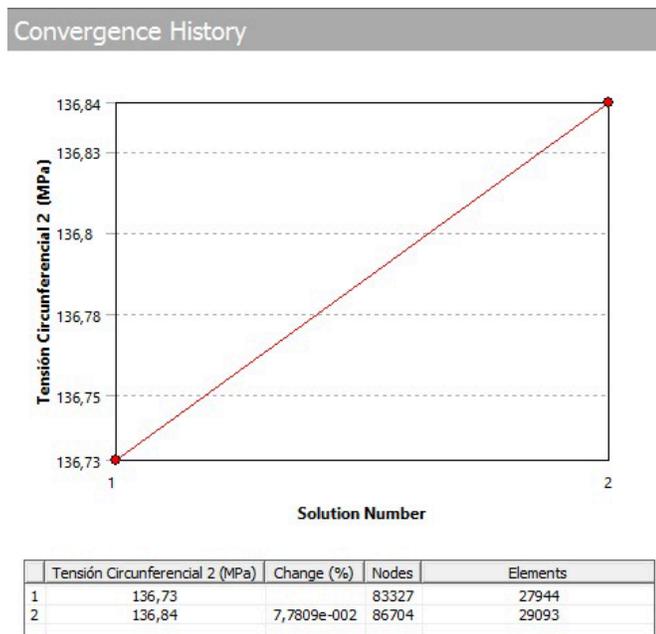
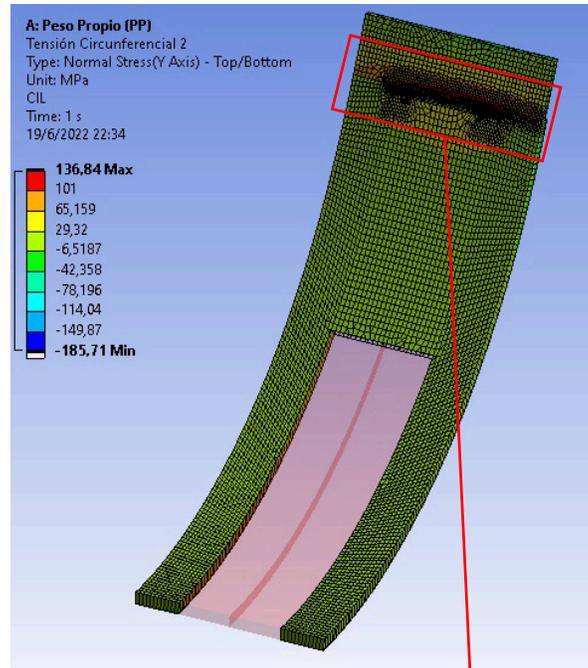


Figura 6.13 Historial de convergencia de esfuerzo circunferencial (cuna elástica)

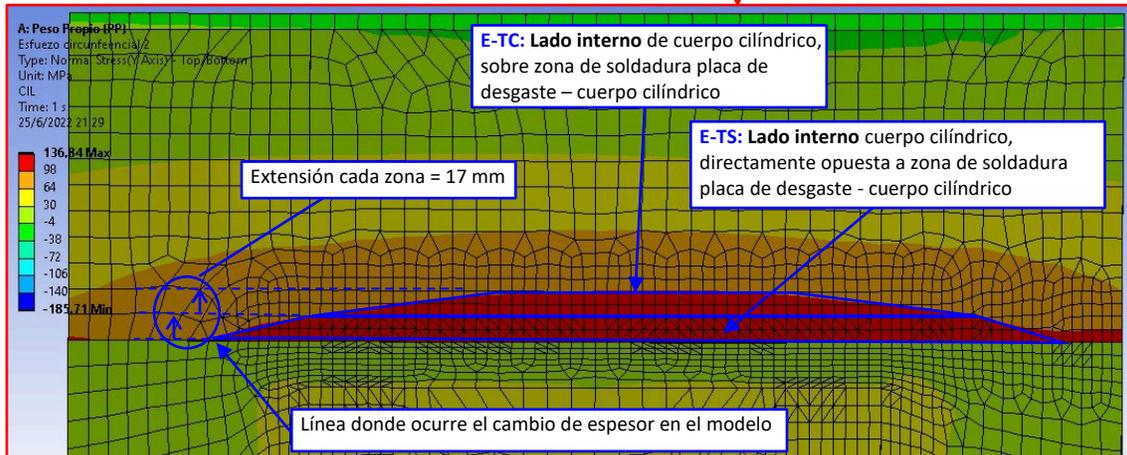
En las figuras 6.14 (a) y (b) se muestra la distribución de esfuerzos circunferenciales en el **lado interno** del equipo (sometido a *tensión*). Se distinguen dos zonas en el lado interno:

- La primera, indicada como **E-TS**, se ubica en el lado opuesto del cateto de soldadura de la unión placa de desgaste - cuerpo cilíndrico. Dado que en el lado externo el cateto de soldadura es de 17 mm, se considerará que esta zona tiene también una extensión, desde la línea donde ocurre el cambio de espesor, equivalente a 17 mm como se indica en la figura 6.14 (b). Si bien esta zona presenta los mayores valores de tensión circunferencial, se debe aclarar que en la simulación realizada no se está modelando la soldadura debido al tipo de elemento utilizado (cáscara). Por lo tanto, los valores arrojados en esta zona serán descartados en nuestro análisis ya que no considera el aporte de área resistente del cateto de soldadura en la unión de la placa de desgaste con el cuerpo cilíndrico.
- La segunda zona, indicada como **E-TC**, se ubica por encima de la primera como se muestra en la figura 6.14 (b), y corresponde a la zona donde físicamente no se espera tener aporte de rigidez

por efecto de la soldadura externa de unión placa de desgaste - cuerpo cilíndrico. La extensión de esta zona también se ha considerado de 17 mm.



(a)

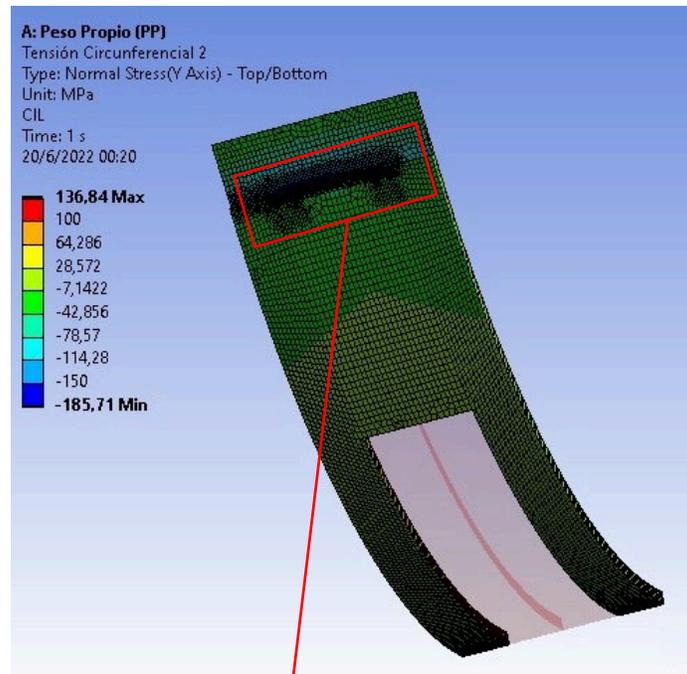


(b)

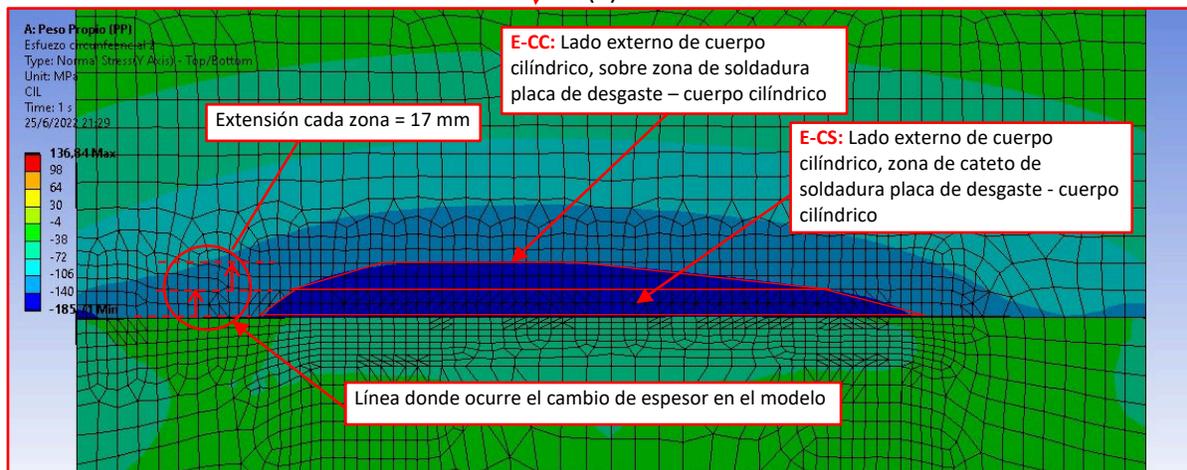
Figura 6.14 Distribución de esfuerzo circunferencial con criterio de convergencia en zona de unión de cuerpo cilíndrico y placa de desgaste con cuna elástica, lado interno del equipo (a) vista general (b) acercamiento en zona cambio de espesor placa de desgaste y cuerpo cilíndrico

Por otro lado, en las figuras 6.15 (a) y (b) se muestra la distribución de esfuerzos circunferenciales en el **lado externo** del equipo (sometido a **compresión**). De manera análoga, al caso anterior se distingue dos zonas:

- La primera, indicada como **E-CS**, se ubica en la zona del cateto de soldadura de la unión placa de desgaste - cuerpo cilíndrico. Su extensión se ha considerado equivalente al tamaño del cateto de soldadura como se muestra en la figura 6.15 (b). Reiterando lo mencionado en el caso anterior, esta zona presenta los mayores valores de compresión circunferencial, pero será descartada de nuestro análisis ya que el modelo no considera el efecto del cateto de soldadura en la unión.
- La segunda zona, indicada como **E-CC**, se ubica por encima de la primera como se muestra en la figura 6.15 (b), y es la de mayor interés en este estudio ya que corresponde a la zona donde *físicamente* termina el cateto de soldadura y se inicia el cambio de espesor. La extensión de esta zona también se ha considerado de 17 mm.



(a)



(b)

Figura 6.15 Distribución de esfuerzo circunferencial con criterio de convergencia en zona de unión de cuerpo cilíndrico y placa de desgaste con cuna elástica, lado externo del equipo (a) vista general (b) acercamiento en zona de unión de cuerpo cilíndrico y placa de desgaste

Finalmente, en la tabla 6.6 se indican los resultados de esfuerzo circunferencial obtenidos con criterio de convergencia en cada zona de estudio. Los valores tabulados corresponden al esfuerzo promedio de los nodos de cada zona. Por lo tanto, en E-TC se obtuvo un esfuerzo promedio de 104,9 MPa, mientras que en E-CC fue de -148,03 MPa. Este último valor será comparado con los obtenidos mediante los demás métodos de cálculo abordados.

Tabla 6.6 Resultados de esfuerzo circunferencial con cuna elástica en cada zona de estudio, obtenido con criterio de convergencia

Zona	Ubicación	Esfuerzo circunferencial (MPa)
E-CC	Lado externo del equipo, sobre una extensión de 17 mm por encima de zona de soldadura de placa de desgaste con cuerpo cilíndrico, según figura 6.14 (b)	-148,03 ⁽¹⁾⁽²⁾
E-TC	Lado interno del equipo, sobre una extensión de 17 mm por encima de zona de soldadura de placa de desgaste con cuerpo cilíndrico	104,90 ⁽¹⁾

Nota:

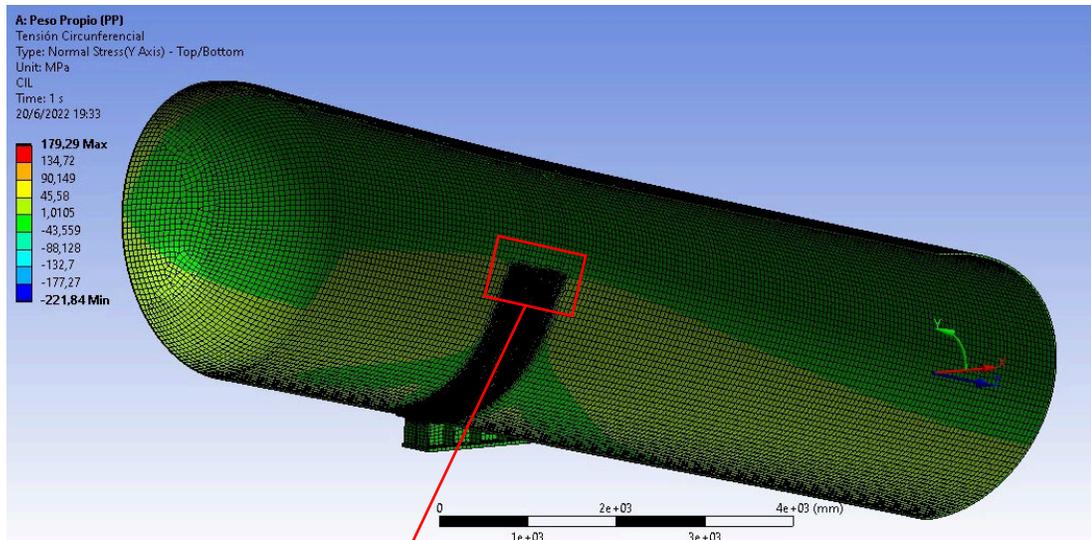
- 1) Esfuerzo promedio de los nodos en la zona
- 2) Signo negativo indica compresión

6.8 Resultados para Cuna Rígida

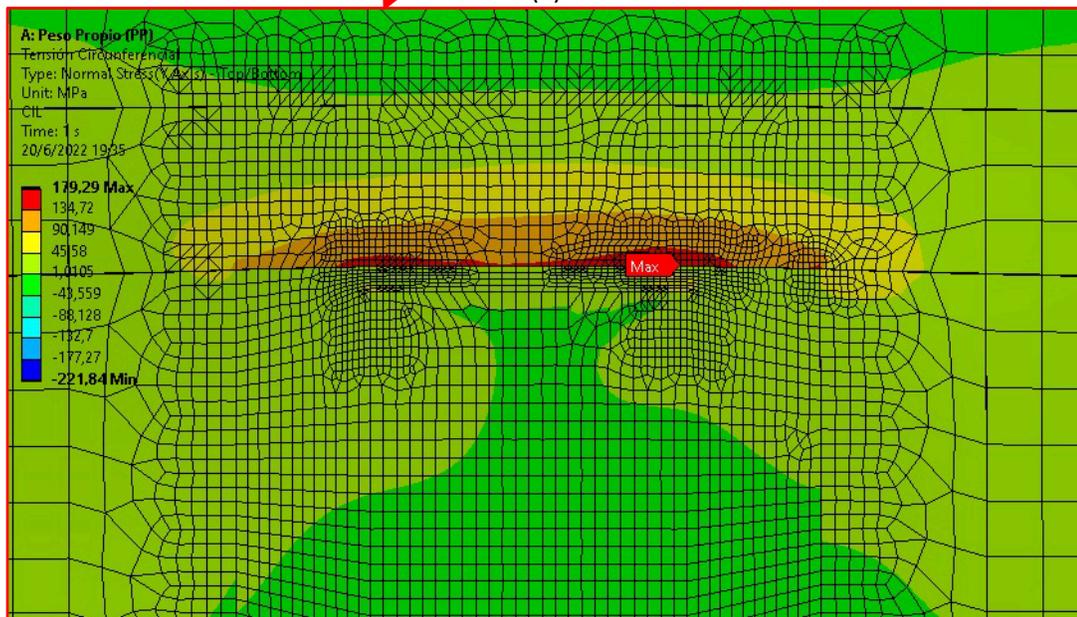
Al igual que en el caso de cuna elástica, se tiene una primera aproximación de las distribuciones de esfuerzos circunferenciales en todo el modelo en las figuras 6.16 y 6.17. Estas distribuciones corresponden a la salida de resultado N° 1 mencionada en la tabla 6.3.

La figura 6.16 muestra la distribución de esfuerzos circunferenciales en el **lado interno** del equipo. En (a) se aprecia una distribución menos uniforme que la mostrada en el caso con cuna elástica, destacándose algunas zonas sometidas a tensión y otras a compresión. En (b) se hace un acercamiento de la zona donde ocurre el cambio de espesor entre la placa de desgaste y el cuerpo cilíndrico. Nótese que esta zona presenta los mayores niveles de esfuerzos localizados de tensión, incluso superiores a los obtenidos con la cuna elástica.

Por otro lado, en la figura 6.17 donde se muestra el **lado externo** del equipo, se aprecia en (a) una distribución de esfuerzos con signo opuesto al mostrado en el lado interno, es decir, las zonas que internamente están sometidas a compresión, desde el lado externo, presentan esfuerzos de tensión, y viceversa. En (b) se hace un acercamiento de la zona del cuerpo cilíndrico sobre la placa de desgaste, evidenciándose que, en general, los esfuerzos de compresión son mayores que los registrados con la cuna elástica.

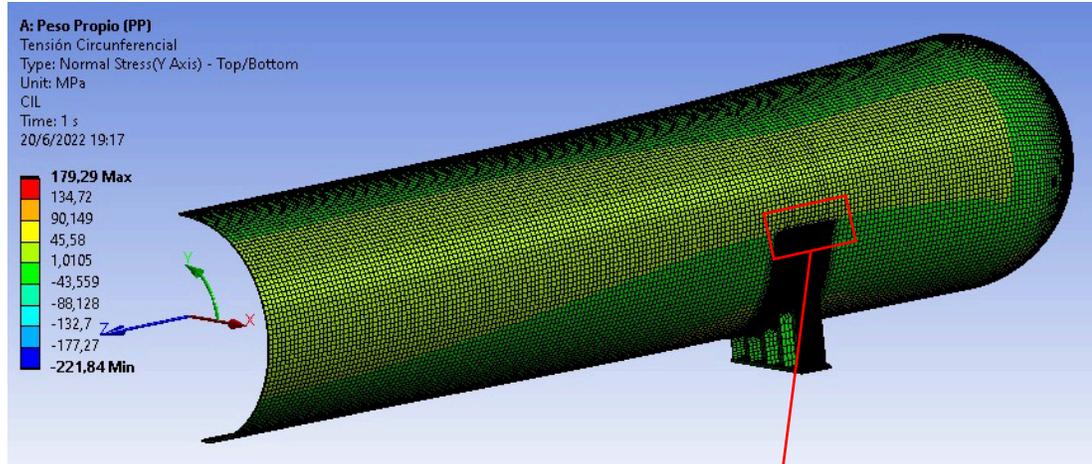


(a)

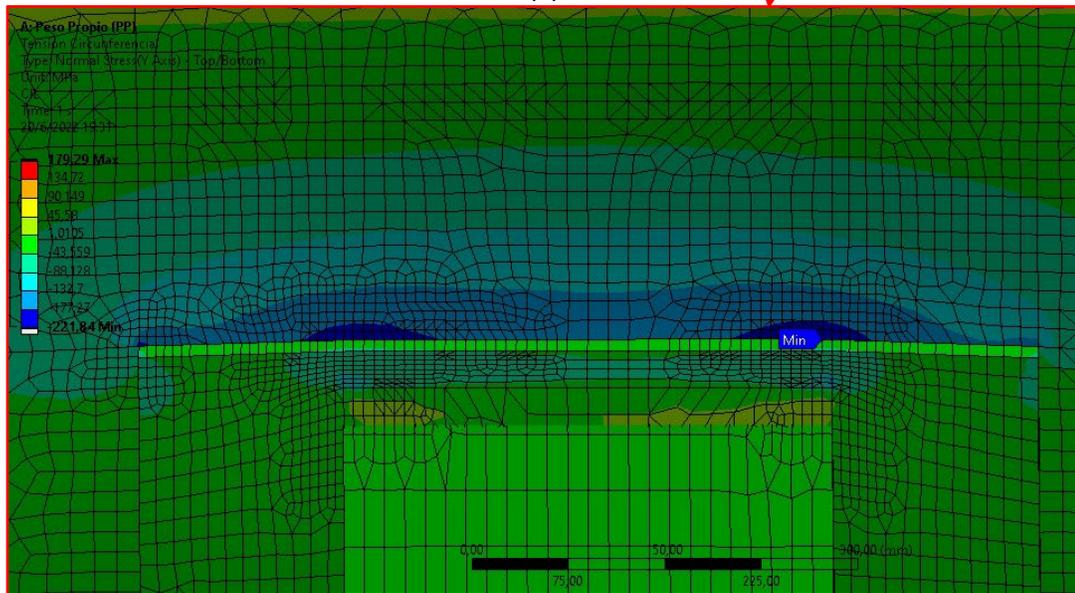


(b)

Figura 6.16 Distribución esfuerzo circunferencial con cuna rígida, lado interior del equipo (a) vista general (b) zona cambio de espesor placa de desgaste y cuerpo cilíndrico



(a)

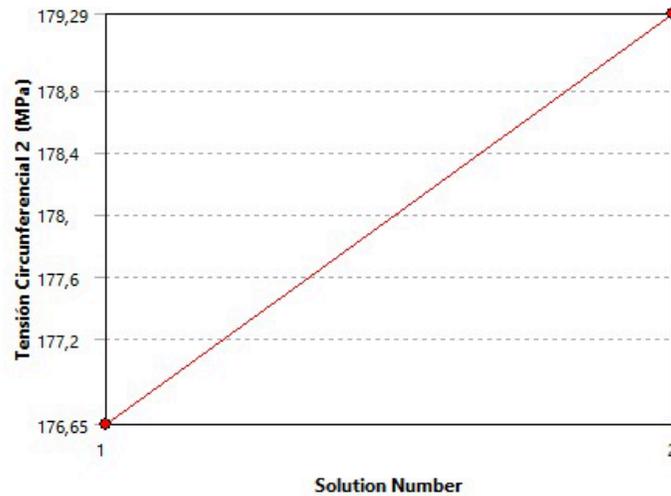


(b)

Figura 6.17 Distribución esfuerzo circunferencial con cuna rígida, lado exterior del equipo (a) vista general (b) zona cambio de espesor placa de desgaste y cuerpo cilíndrico

Para estudiar la zona de unión de la placa de desgaste con el cuerpo cilíndrico, se recurre a la salida de resultados N° 2 de la tabla 6.3. es decir, esfuerzos circunferenciales con criterio de convergencia. En la figura 6.18 se muestra el historial de convergencia y se evidencia que con el mallado final este es cambio es inferior al 1,5%; lo cual indica un buen nivel de convergencia en la solución.

Convergence History

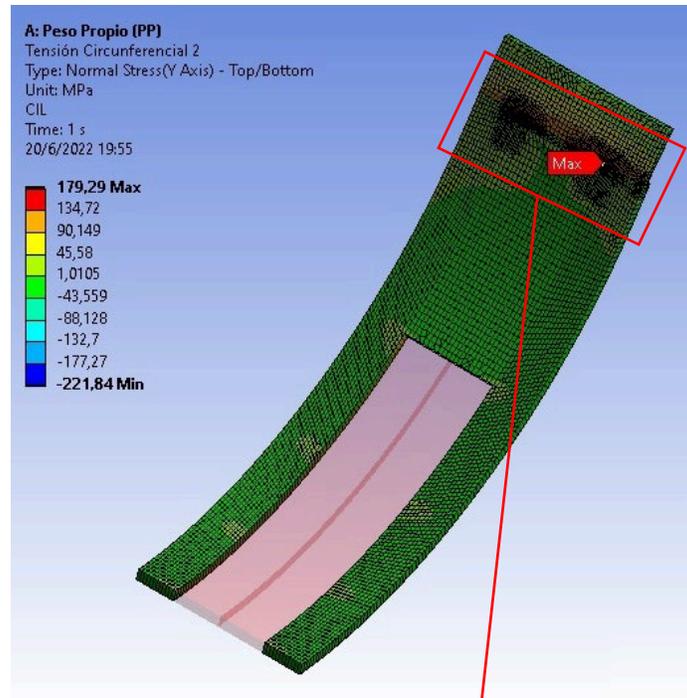


	Tensión Circunferencial 2 (MPa)	Change (%)	Nodes	Elements
1	176,65		83327	27944
2	179,29	1,4847	86151	28836

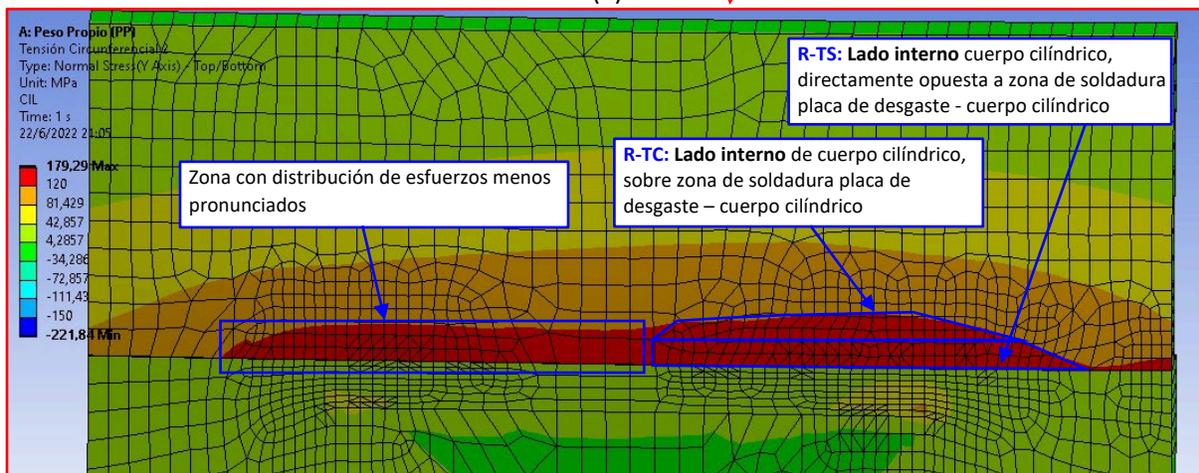
Figura 6.18 Historial de convergencia de esfuerzo circunferencial (cuna rígida)

En las figuras 6.19 (a) y (b) se muestra la distribución de esfuerzos circunferenciales en el **lado interno** del equipo (sometido a *tensión*). En (b) se puede notar que los esfuerzos máximos tienden a mostrar una distribución relativamente homogénea en la parte izquierda, pero tienden incrementarse en la parte derecha. En este sentido, se distinguen tres zonas en el lado interno:

- La primera, indicada como **R-TS**, se ubica en la parte derecha de la distribución de esfuerzos máximos, sobre el lado directamente opuesto al cateto de soldadura de la unión placa de desgaste - cuerpo cilíndrico. Su extensión es de 17 mm, igual que el tamaño del cateto de soldadura en el lado contrario. Por las razones expuestas en la sección anterior, cuando se abordó el caso de la zona **E-TS**, la zona R-TS no será estudiada.
- La segunda zona, indicada como **R-TC**, se ubica en la parte derecha de la unión por encima de la zona anterior como se muestra en la figura 6.19 (b), siendo similar a la zona **E-TC** abordada en la en el caso de cuna elástica. La extensión de esta zona también se ha considerado de 17 mm.
- La tercera zona corresponde a la parte izquierda de la distribución de esfuerzos máximos. Está compuesta principalmente por regiones que corresponderían al lado opuesto de la soldadura y los esfuerzos máximos están menos extendidos que en la parte derecha, por estas razones, esta zona no será analizada.



(a)



(b)

Figura 6.19 Distribución de esfuerzo circunferencial con criterio de convergencia en zona de unión de cuerpo cilíndrico y placa de desgaste con cuna rígida, lado interno del equipo (a) vista general (b) acercamiento en zona cambio de espesor placa de desgaste y cuerpo cilíndrico

La distribución de esfuerzos circunferenciales en el **lado externo** del equipo y alrededor de la unión de la placa de desgaste con el cuerpo cilíndrico se muestra en las figuras 6.20 (a) y (b). En (b) se aprecia una distribución de esfuerzos de compresión que tiende a extenderse más pronunciadamente en los extremos y menos en la zona central. En general, se destacan 5 zonas:

- Las zonas de soldadura **R-CS1** y **R-CS2**, que se ubican en la zona del cateto de soldadura de la unión placa de desgaste - cuerpo cilíndrico. Como se ha explicado anteriormente, las zonas de soldaduras no serán analizadas.

- Las zonas **R-CC1** y **R-CC2**, ubicadas por encima de las zonas de soldadura antes mencionadas como se muestra en la figura 6.20 (b). Son las dos zonas de interés en este estudio.
- Por último, se tiene la zona central que coincide con la zona de soldadura, por ende, no es de interés en este estudio.

Todas las zonas anteriormente descritas tienen una extensión de 17 mm.

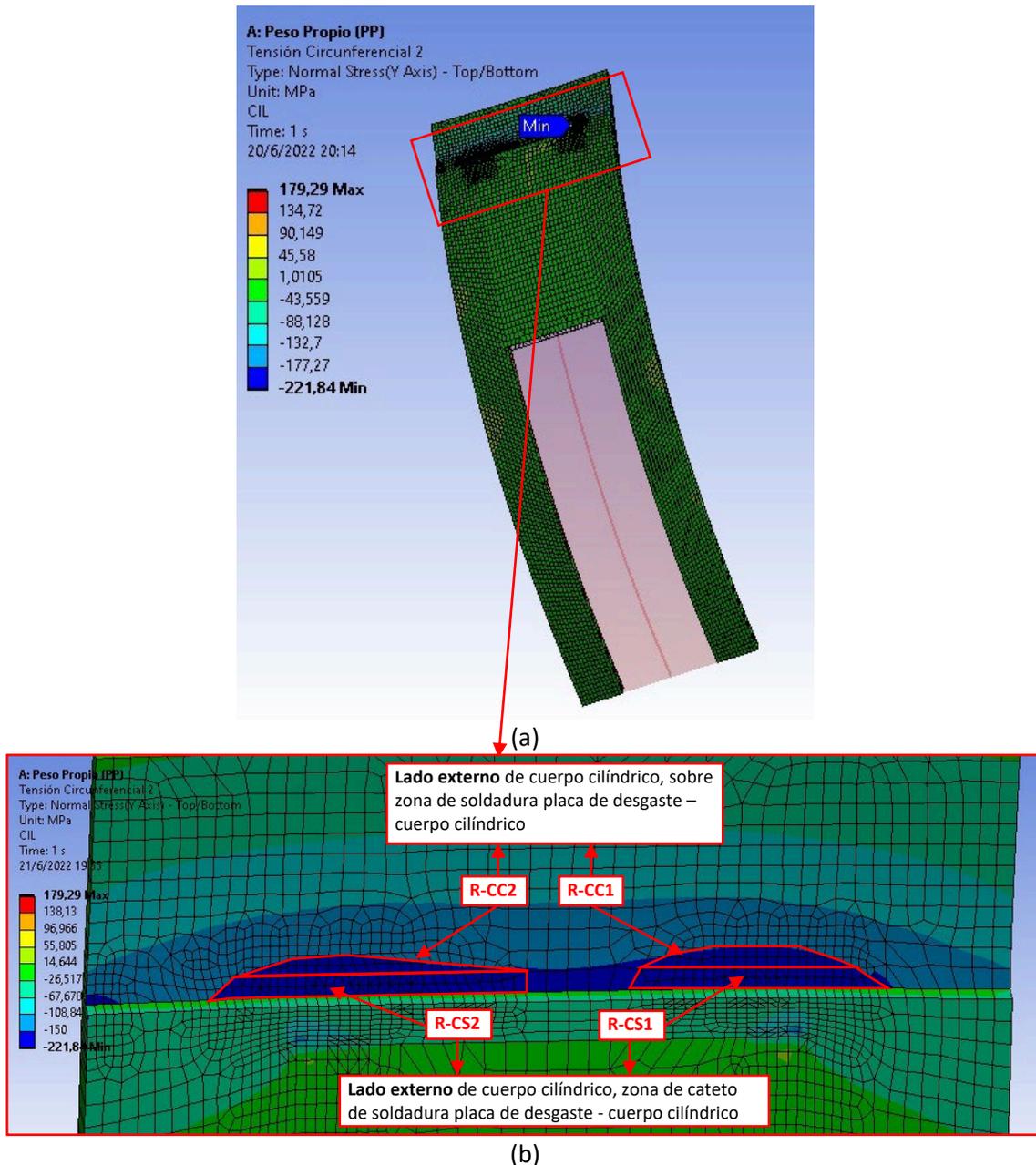


Figura 6.20 Distribución de esfuerzo circunferencial con criterio de convergencia en zona de unión de cuerpo cilíndrico y placa de desgaste con cuna rígida, lado externo del equipo (a) vista general (b) acercamiento en zona de unión de cuerpo cilíndrico y placa de desgaste

Finalmente, en la tabla 6.7 se indican los resultados de esfuerzo circunferencial con cuna rígida en cada zona de estudio obtenidos con criterio de convergencia. Los valores tabulados corresponden al esfuerzo promedio de los nodos de cada zona. En el lado externo, el esfuerzo promedio de compresión registrado en R-CC1 es 159,85 MPa, siendo ligeramente superior al de la zona R-CC2. Este valor es un 8% superior al obtenido con cuna elástica (en zona E-CC). En el lado interno, el esfuerzo promedio de tensión es de 128,14 MPa, siendo un 22% superior al registrado con cuna elástica (zona E-TC).

Tabla 6.7 Resultados de esfuerzo circunferencial con cuna rígida en cada zona de estudio, obtenido con criterio de convergencia

Zona	Ubicación	Esfuerzo circunferencial (MPa)
R-CC1	Lado externo del equipo, sobre una extensión de 17 mm por encima de zona de soldadura de placa de desgaste con cuerpo cilíndrico, según figura 6.20 (b)	-159,85 ⁽¹⁾⁽²⁾
R-CC2		-157,21 ⁽¹⁾⁽²⁾
R-TC	Lado interno del equipo, sobre una extensión de 17 mm por encima de zona de soldadura de placa de desgaste con cuerpo cilíndrico	128,14 ⁽¹⁾

Nota:

- 1) Esfuerzo promedio de los nodos en la zona
- 2) Signo negativo indica compresión

7. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS TRES PROCEDIMIENTOS

En la Tabla 7.1 se resumen los esfuerzos circunferenciales de compresión con cuna elástica obtenidos por los 3 métodos estudiados. Es destacable que entre los métodos de elementos finitos (EF) y Ong hay un buen nivel de concordancia evidenciándose una relación EF/Ong de 1,16. Por otro lado, el esfuerzo obtenido con el método Zick es menor si compara con los métodos de Ong y EF, en este caso de estudio está subestimado entorno al 1,35 y 1,56 con respecto a los métodos de Ong y EF respectivamente.

Tabla 7.1 Comparación de esfuerzo circunferencial de compresión – Cuna Elástica

Método	Esfuerzo circunferencial Compresión (MPa)	Relación			Esfuerzo admisible, 1,25S (MPa)	¿Aceptable?
		Ong/Zick	EF/Ong	EF/Zick		
Elementos Finitos (Zona E-CC)	148,03	-	-	-	172,5	SI
Ong	127,62	-	1,16		172,5	SI
Zick	94,81	1,35	-	1,56	172,5	SI

Los esfuerzos circunferenciales de compresión con cuna rígida obtenidos por los métodos de Ong y EF se resumen en la Tabla 7.2. En este caso, el resultado obtenido con el método de Ong es ligeramente superior al conseguido por elementos finitos, pero es de resaltar que el nivel de concordancia en los resultados de ambos métodos es incluso superior al evidenciado en el caso con cuna elástica. Finalmente, se puede indicar que el esfuerzo obtenido por el método de Ong con cuna rígida es 1,74 veces superior al obtenido con el método de Zick.

Tabla 7.2 Comparación de esfuerzo circunferencial de compresión – Cuna Rígida

Método	Esfuerzo circunferencial Compresión (MPa)	Relación EF/Ong	Esfuerzo admisible (1,25S) (MPa)	¿Aceptable?
Elementos Finitos (Zona R-CC1)	159,85	-	172,5	SI
Ong	164,67	0,97	172,5	SI

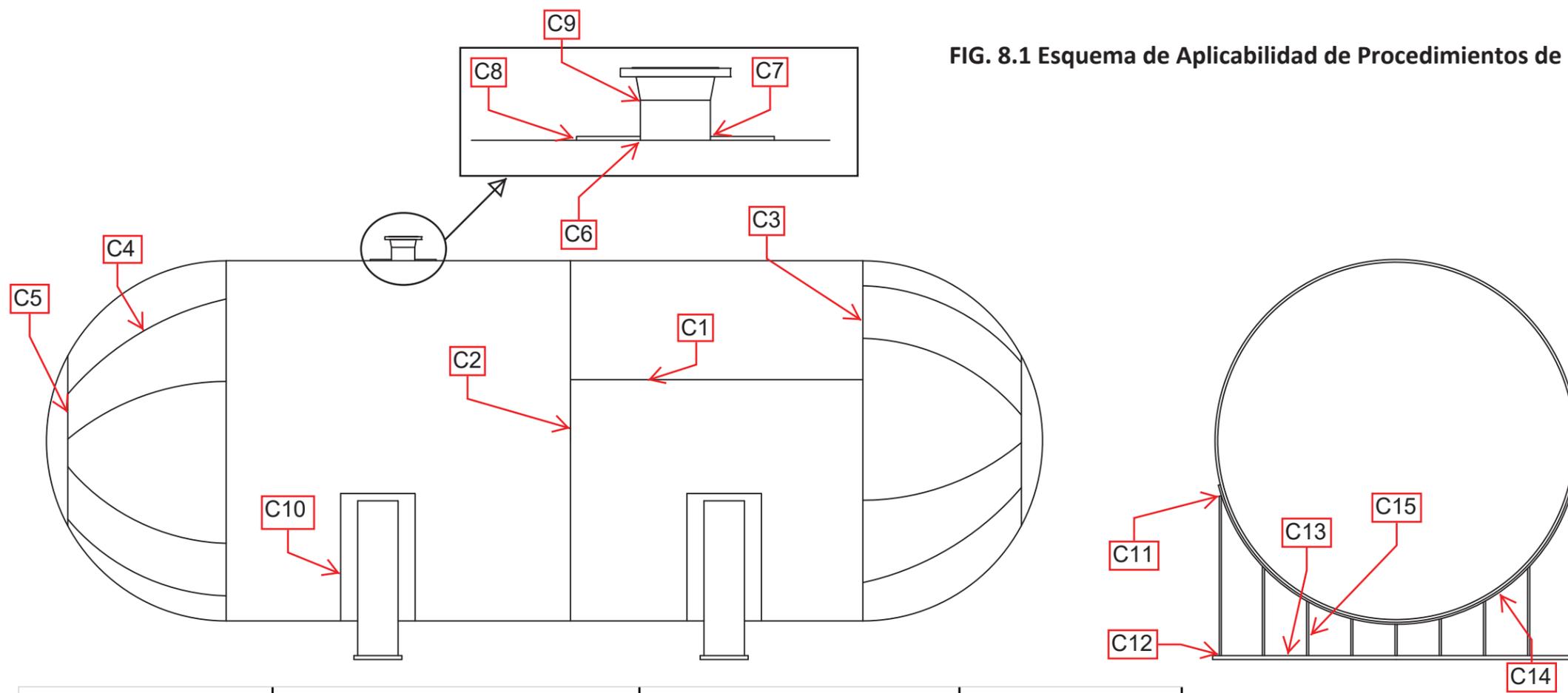
En ambos casos estudiados, los esfuerzos calculados por los 3 métodos son aceptables con respecto al criterio de aceptación de ASME VIII Div. 2, donde se establece un límite de $1,25S$ para el esfuerzo circunferencial estudiado. En nuestro caso, el esfuerzo admisible, S , ha sido tomado de ASME VIII Div. 1.

8. ESPECIFICACIÓN DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA

A continuación, se presentan 4 ejemplos de Especificación de Procedimiento de Soldadura, que podrían ser empleados en la fabricación del recipiente objeto de estudio. En general, se aplicaría una especificación para cada uno de los siguientes componentes: envolvente, cabezal, conexiones y cunas. La figura 8.1 muestra un esquema donde se puede ver con detalle la aplicabilidad propuesta de cada procedimiento según el tipo de junta y localización de esta.

Se ha empleado el formato QW-482 sugerido por ASME Sección IX para la preparación de especificaciones de procedimientos de soldadura. Es de resaltar que toda especificación preparada debe ser calificada de acuerdo con los lineamientos de ASME Sección IX.

FIG. 8.1 Esquema de Aplicabilidad de Procedimientos de soldaduras según Tipo de Unión



DATOS DE SOLDADURA		MATERIAL BASE 1			MATERIAL BASE 2			ESPECIFICACION DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA	
COSTURA N°	TIPO DE JUNTA	DESCRIPCIÓN	ESPECIF. MATERIAL	ESPESOR (mm)	DESCRIPCIÓN	ESPECIF. MATERIA L	ESPESOR (mm)	N°	PROCESOS
C1	TOPE DOBLE "V"	ENVOLVENTE	SA 516 GR. 70	25,4	ENVOLVENTE	SA 516 GR. 70	25,4	WPS 001	SMAW+SAW
C2	TOPE DOBLE "V"	ENVOLVENTE	SA 516 GR. 70	25,4	ENVOLVENTE	SA 516 GR. 70	25,4	WPS 001	SMAW+SAW
C3	TOPE DOBLE "V"	ENVOLVENTE	SA 516 GR. 70	25,4	CABEZAL	SA 516 GR. 70	15,8	WPS 002	SMAW+FCAW
C4	TOPE "V"	CABEZAL	SA 516 GR. 70	15,8	CABEZAL	SA 516 GR. 70	15,8	WPS 002	SMAW+FCAW
C5	TOPE "V"	CABEZAL	SA 516 GR. 70	15,8	CABEZAL	SA 516 GR. 70	15,8	WPS 002	SMAW+FCAW
C6	TOPE 1/2 "V"	ENVOLVENTE	SA 516 GR. 70	25,4	CAÑO CONEXIONES (TODAS)	SA 106 Gr. B	5,54 (DN 2") 7,62 (DN 3") 8,56 (DN 4") 12,7 (DN 8") 15,80 (DN 20")	WPS 003	GTAW+FCAW
C7	TOPE 1/2 "V" + FILETE	CAÑO CONEXIONES (TODAS)	SA 106 Gr. B	5,54 (DN 2") 7,62 (DN 3") 8,56 (DN 4") 12,7 (DN 8") 15,80 (DN 20")	REFUERZO CONEXIONES	SA 516 GR. 70	≤ 25,4	WPS 003	GTAW+FCAW
C8	FILETE	ENVOLVENTE	SA 516 GR. 70	25,4	REFUERZO CONEXIONES	SA 516 GR. 70	≤ 25,4	WPS 004	FCAW
C9	TOPE "V"	CAÑO CONEXIONES (TODAS)	SA 106 Gr. B	5,54 (DN 2") 7,62 (DN 3") 8,56 (DN 4") 12,7 (DN 8") 15,80 (DN 20")	BRIDA WNRF	SA 105	IGUAL AL ESPESOR DE CAÑO	WPS 003	GTAW+FCAW
C10	FILETE	ENVOLVENTE	SA 516 GR. 70	25,4	REFUERZO CUNAS	SA 516 GR. 70	20	WPS 004	FCAW
C11	FILETE	REFUERZO CUNAS	SA 516 GR. 70	20	CARTELA-CUNAS	SA 36	20	WPS 004	FCAW
C12	FILETE	BASE CUNAS	SA 36	38	CARTELA	SA 36	20	WPS 004	FCAW
C13	FILETE	BASE CUNAS	SA 36	38	ALMA-CUNAS	SA 36	20	WPS 004	FCAW
C14	FILETE	REFUERZO CUNAS	SA 516 GR. 70	20	ALMA-CUNAS	SA 36	20	WPS 004	FCAW
C15	FILETE	ALMA-CUNAS	SA 36	20	CARTELA	SA 36	20	WPS 004	FCAW

FORM QW-482 SUGGESTED FORMAT FOR WELDING PROCEDURE SPECIFICATIONS (WPS)
(See QW-200.1, Section IX, ASME Boiler and Pressure Vessel Code)

Organization Name UNIVERSIDAD TECNOLOGICA NACIONAL By MIGUEL ANGEL NARVAEZ
 Welding Procedure Specification No. 001 Date _____ Supporting PQR No.(s) _____
 Revision No. 0 Date 09-08-2022

Welding Process(es) SMAW+SAW Type(s) MANUAL + AUTOMATICO
 (Automatic, Manual, Machine, or Semi-Automatic)

JOINTS (QW-402)	Details
Joint Design _____ TOPE _____	
Root Spacing _____ 2 mm _____	
Backing: Yes _____ X _____ No _____	
Backing Material (Type) _____ METAL DE SOLDADURA _____ (Refer to both backing and retainers)	
<input checked="" type="checkbox"/> Metal <input type="checkbox"/> Nonfusing Metal <input type="checkbox"/> Nonmetallic <input type="checkbox"/> Other	<h2 style="margin:0;">SEGÚN PLANO DE FABRICACIÓN Y DETALLES DE SOLDADURAS</h2>
Sketches, Production Drawings, Weld Symbols, or Written Description should show the general arrangement of the parts to be welded. Where applicable, the details of weld groove may be specified.	
Sketches may be attached to illustrate joint design, weld layers, and bead sequence (e.g., for notch toughness procedures, for multiple process procedures, etc.)]	

***BASE METALS (QW-403)**

P-No. 1 Group No. 1 y 2 to P-No. 1 Group No. 1 y 2

OR

Specification and type/grade or UNS Number SA-36; SA-105; SA-106-A/C; SA-516-55/70
 to Specification and type/grade or UNS Number SA-36; SA-105; SA-106-A/C; SA-516-55/70

OR

Chem. Analysis and Mech. Prop. _____ -----
 to Chem. Analysis and Mech. Prop. _____ -----

Thickness Range:

Base Metal: _____ Groove 10 mm - 38 mm Fillet _____ ILIMITADO
 Maximum Pass Thickness ≤ 1/2 in. (13 mm) (Yes) X (No) _____

Other _____

*FILLER METALS (QW-404)	SMAW	SAW
Spec. No. (SFA) _____	5.1	5.17
AWS No. (Class) _____	E7018	EM12K
F-No. _____	4	6
A-No. _____	1	1
Size of Filler Metals _____	Ø 3.2 - 4 mm	Ø 3.2 - 4 mm
Filler Metal Product Form _____	-----	-----
Supplemental Filler Metal _____	-----	NO
Weld Metal		
Deposited Thickness:		
Groove _____	38 mm MAX.	38 mm MAX.
Fillet _____	ILIMITADO	ILIMITADO
Electrode-Flux (Class) _____	N.A.	F7A4-EM12K
Flux Type _____	N.A.	NEUTRO
Flux Trade Name _____	N.A.	N.A.
Consumable Insert _____	N.A.	N.A.
Other _____	N.A.	N.A.

*Each base metal-filler metal combination should be recorded individually.

FORM QW-482 (Back)

WPS No. _____ Rev. _____

POSITIONS (QW-405) Position(s) of Groove _____ SMAW: F, H, V, O SAW: F, H Welding Progression: Up _____ X (SMAW) _____ Down _____ Position(s) of Fillet _____ SMAW: F, H, V, O SAW: F, H Other _____	POSTWELD HEAT TREATMENT (QW-407) Temperature Range _____ N.A. Time Range _____ N.A. Other _____																							
PREHEAT (QW-406) Preheat Temperature, Minimum _____ 10° C Interpass Temperature, Maximim _____ 250° C Preheat Maintenance _____ NO Other _____ (Continuous or special heating, where applicable, should be recorded)	GAS (QW-408) <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="3">Percent Composition</th> </tr> <tr> <th>Gas(es)</th> <th>(Mixture)</th> <th>Flow Rate</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Shielding</td> <td>_____ N.A</td> <td>_____ N.A</td> <td>_____ N.A</td> </tr> <tr> <td>Shielding</td> <td>_____ N.A</td> <td>_____ N.A</td> <td>_____ N.A</td> </tr> <tr> <td>Backing</td> <td>_____</td> <td>_____</td> <td>_____</td> </tr> <tr> <td>Other</td> <td>_____</td> <td>_____</td> <td>_____</td> </tr> </tbody> </table>		Percent Composition			Gas(es)	(Mixture)	Flow Rate	Shielding	_____ N.A	_____ N.A	_____ N.A	Shielding	_____ N.A	_____ N.A	_____ N.A	Backing	_____	_____	_____	Other	_____	_____	_____
	Percent Composition																							
	Gas(es)	(Mixture)	Flow Rate																					
Shielding	_____ N.A	_____ N.A	_____ N.A																					
Shielding	_____ N.A	_____ N.A	_____ N.A																					
Backing	_____	_____	_____																					
Other	_____	_____	_____																					

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (QW-409)

Weld Pass(es)	Process	Filler Metal		Current Type and Polarity	Amps (Range)	Wire Feed Speed (Range)	Energy or Power (Range)	Volts (Range)	Travel Speed (Range)	Other (e.g., Remarks, Comments, Hot Wire Addition, Technique, Torch Angle, etc.)
		Classification	Diameter							
1-N	SMAW	E7018	3,2 mm 4,0 mm	CC (+)	100-140 130-180	-----	Max. 15,6 kJ/cm	20-24 20-24	-----	
1-N	SAW	EM12K	3,2 mm 4,0 mm	CC (+)	450-550 550-700	-----	Max. 20,8 kJ/cm	27-31 27-31	-----	

Amps and volts, or power or energy range, should be recorded for each electrode size, position, and thickness, etc.

Pulsing Current _____ Heat Input (max.) _____

Tungsten Electrode Size and Type _____
(Pure Tungsten, 2% Thoriated, etc.)

Mode of Metal Transfer for GMAW (FCAW) _____
(Spray Arc, Short Circuiting Arc, etc.)

Other _____

TECHNIQUE (QW-410)
 String or Weave Bead _____ SMAW: AMBOS || SAW: RECTILINEO
 Orifice, Nozzle, or Gas Cup Size _____
 Initial and Interpass Cleaning (Brushing, Grinding, etc.) _____ AMOLADO Y CEPILLADO
 Method of Back Gouging _____ AMOLADO / ARCO AIRE
 Oscillation _____ NO
 Contact Tube to Work Distance _____ 25-40
 Multiple or Single Pass (Per Side) _____ AMBOS
 Multiple or Single Electrodes _____ SIMPLE
 Electrode Spacing _____ NO
 Peening _____ NO
 Other _____

FORM QW-482 SUGGESTED FORMAT FOR WELDING PROCEDURE SPECIFICATIONS (WPS)
(See QW-200.1, Section IX, ASME Boiler and Pressure Vessel Code)

Organization Name UNIVERSIDAD TECNOLOGICA NACIONAL By MIGUEL ANGEL NARVAEZ
 Welding Procedure Specification No. 002 Date _____ Supporting PQR No.(s) _____
 Revision No. 0 Date 09-08-2022

Welding Process(es) SMAW+FCAW Type(s) MANUAL+SEMIATOMATICO
 (Automatic, Manual, Machine, or Semi-Automatic)

JOINTS (QW-402)

Joint Design TOPE

Root Spacing _____

Backing: Yes X (FCAW) No X (SMAW)

Backing Material (Type) METAL DE SOLDADURA
 (Refer to both backing and retainers)

Metal Nonfusing Metal
 Nonmetallic Other

Sketches, Production Drawings, Weld Symbols, or Written Description should show the general arrangement of the parts to be welded. Where applicable, the details of weld groove may be specified.

Sketches may be attached to illustrate joint design, weld layers, and bead sequence (e.g., for notch toughness procedures, for multiple process procedures, etc.)]

Details

***BASE METALS (QW-403)**

P-No. 1 Group No. 1 y 2 to P-No. 1 Group No. 1 y 2

OR

Specification and type/grade or UNS Number SA-36; SA-105; SA-106-A/C; SA-516-55/70
 to Specification and type/grade or UNS Number SA-36; SA-105; SA-106-A/C; SA-516-55/70

OR

Chem. Analysis and Mech. Prop. _____
 to Chem. Analysis and Mech. Prop. _____

Thickness Range:

Base Metal: Groove 5-30 mm Fillet N.A

Maximum Pass Thickness ≤ 1/2 in. (13 mm) (Yes) (No) _____

Other _____

	SMAW	FCAW
Spec. No. (SFA) _____	5.1	5.20
AWS No. (Class) _____	E7018-1	E71T1-C
F-No. _____	4	6
A-No. _____	1	1
Size of Filler Metals _____	Ø 2,4 mm	Ø 1,2 mm
Filler Metal Product Form _____	----	Tubular
Supplemental Filler Metal _____	----	NO
Weld Metal		
Deposited Thickness:		
Groove _____	5 mm MAX.	25 mm MAX.
Fillet _____	N.A	N.A
Electrode-Flux (Class) _____	N.A.	N.A
Flux Type _____	N.A.	N.A.
Flux Trade Name _____	N.A.	N.A.
Consumable Insert _____	N.A.	N.A.
Other _____	N.A.	N.A.

*Each base metal-filler metal combination should be recorded individually.

FORM QW-482 (Back)

WPS No. _____ Rev. _____

POSITIONS (QW-405) Position(s) of Groove _____ F, H, V, O _____ Welding Progression: Up _____ X _____ Down _____ Position(s) of Fillet _____ N.A. _____ Other _____	POSTWELD HEAT TREATMENT (QW-407) Temperature Range _____ N.A. _____ Time Range _____ N.A. _____ Other _____																							
PREHEAT (QW-406) Preheat Temperature, Minimum _____ 10° C (t<25mm); 100°C (t≥25 mm) _____ Interpass Temperature, Maximim _____ 250 °C _____ Preheat Maintenance _____ NO _____ Other _____ (Continuous or special heating, where applicable, should be recorded)	GAS (QW-408) <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="3">Percent Composition</th> </tr> <tr> <th>Gas(es)</th> <th>(Mixture)</th> <th>Flow Rate</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Shielding -FCAW</td> <td>CO2</td> <td>99,80%</td> <td>14-22 l/min</td> </tr> <tr> <td>Shielding</td> <td>N.A</td> <td>N.A</td> <td>N.A</td> </tr> <tr> <td>Backing</td> <td>_____</td> <td>_____</td> <td>_____</td> </tr> <tr> <td>Other</td> <td>_____</td> <td>_____</td> <td>_____</td> </tr> </tbody> </table>		Percent Composition			Gas(es)	(Mixture)	Flow Rate	Shielding -FCAW	CO2	99,80%	14-22 l/min	Shielding	N.A	N.A	N.A	Backing	_____	_____	_____	Other	_____	_____	_____
	Percent Composition																							
	Gas(es)	(Mixture)	Flow Rate																					
Shielding -FCAW	CO2	99,80%	14-22 l/min																					
Shielding	N.A	N.A	N.A																					
Backing	_____	_____	_____																					
Other	_____	_____	_____																					

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (QW-409)

Weld Pass(es)	Process	Filler Metal		Current Type and Polarity	Amps (Range)	Wire Feed Speed (Range)	Energy or Power (Range)	Volts (Range)	Travel Speed (Range)	Other (e.g., Remarks, Comments, Hot Wire Addition, Technique, Torch Angle, etc.)
		Classification	Diameter							
1	SMAW	E7018-1	2,4 mm	CC (+)	70-90	-----	-----	22-25	5-15 cm/min	
2-N	FCAW	E71T1-C	1,2 mm	CC (+)	130-220	-----	-----	24-28	15-45 cm/min	

Amps and volts, or power or energy range, should be recorded for each electrode size, position, and thickness, etc.

Pulsing Current _____ Heat Input (max.) _____

Tungsten Electrode Size and Type _____
(Pure Tungsten, 2% Thoriated, etc.)

Mode of Metal Transfer for GMAW (FCAW) _____
GLOBULAR / SPRAY
(Spray Arc, Short Circuiting Arc, etc.)

Other _____

TECHNIQUE (QW-410)

String or Weave Bead _____ SMAW: AMBOS || SAW: RECTILINEO _____

Orifice, Nozzle, or Gas Cup Size _____ 16 mm (FCAW) _____

Initial and Interpass Cleaning (Brushing, Grinding, etc.) _____ AMOLADO Y CEPILLADO _____

Method of Back Gouging _____ N.A. _____

Oscillation _____ 12 mm _____

Contact Tube to Work Distance _____ 10-20 mm _____

Multiple or Single Pass (Per Side) _____ AMBOS _____

Multiple or Single Electrodes _____ SIMPLE _____

Electrode Spacing _____ NO _____

Peening _____ NO _____

Other _____

FORM QW-482 SUGGESTED FORMAT FOR WELDING PROCEDURE SPECIFICATIONS (WPS)
(See QW-200.1, Section IX, ASME Boiler and Pressure Vessel Code)

Organization Name UNIVERSIDAD TECNOLOGICA NACIONAL By MIGUEL ANGEL NARVAEZ
 Welding Procedure Specification No. 003 Date _____ Supporting PQR No.(s) _____
 Revision No. 0 Date 22-05-2022

Welding Process(es) GTAW+FCAW Type(s) MANUAL + SEMIAUTOMATICO
 (Automatic, Manual, Machine, or Semi-Automatic)

JOINTS (QW-402)

Joint Design TOPE
 Root Spacing 3,5 mm
 Backing: Yes X (FCAW) No N (GTAW)
 Backing Material (Type) METAL DE SOLDADURA
 (Refer to both backing and retainers)

Metal Nonfusing Metal
 Nonmetallic Other

Sketches, Production Drawings, Weld Symbols, or Written Description should show the general arrangement of the parts to be welded. Where applicable, the details of weld groove may be specified.

Sketches may be attached to illustrate joint design, weld layers, and bead sequence (e.g., for notch toughness procedures, for multiple process procedures, etc.)]

Details

The diagram shows a cross-section of a TOPE (top edge) joint. The groove angle is 65±5°. The groove depth is 2-N. The fillet height is 1 mm. The root spacing is 3,5±0,5 mm. The groove depth is 5 mm MAX. The groove width is 3,5±0,5 mm.

***BASE METALS (QW-403)**

P-No. 1 Group No. 1 y 2 to P-No. 1 Group No. 1 y 2
 OR
 Specification and type/grade or UNS Number SA-36; SA-105; SA-106-A/C; SA-516-55/70
 to Specification and type/grade or UNS Number SA-36; SA-105; SA-106-A/C; SA-516-55/70
 OR
 Chem. Analysis and Mech. Prop. _____
 to Chem. Analysis and Mech. Prop. _____

Thickness Range:
 Base Metal: Groove 5 mm - 31 mm Fillet ILIMITADO
 Maximum Pass Thickness ≤ 1/2 in. (13 mm) (Yes) X (No) _____
 Other _____

*FILLER METALS (QW-404)	GTAW	FCAW
Spec. No. (SFA) _____	5.18	5.20
AWS No. (Class) _____	ER70S-3	E71T1-C
F-No. _____	6	6
A-No. _____	1	1
Size of Filler Metals _____	Ø 2,4 mm	Ø 1,2 mm
Filler Metal Product Form _____	SÓLIDO	TUBULAR
Supplemental Filler Metal _____	N.A.	
Weld Metal		
Deposited Thickness:		
Groove _____	5 mm MAX.	26 mm MAX.
Fillet _____	ILIMITADO	ILIMITADO
Electrode-Flux (Class) _____	N.A.	N.A.
Flux Type _____	N.A.	N.A.
Flux Trade Name _____	N.A.	N.A.
Consumable Insert _____	N.A.	N.A.
Other _____	N.A.	N.A.

*Each base metal-filler metal combination should be recorded individually.

FORM QW-482 (Back)

WPS No. _____ Rev. _____

POSITIONS (QW-405) Position(s) of Groove _____ "F"; "H"; "V"; "O" Welding Progression: Up _____ X _____ Down _____ Position(s) of Fillet _____ "F"; "H"; "V"; "O" Other _____	POSTWELD HEAT TREATMENT (QW-407) Temperature Range _____ N.A. Time Range _____ N.A. Other _____																							
PREHEAT (QW-406) Preheat Temperature, Minimum _____ 30° C Interpass Temperature, Maximim _____ 150° C Preheat Maintenance _____ Other _____ (Continuous or special heating, where applicable, should be recorded)	GAS (QW-408) <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="3">Percent Composition</th> </tr> <tr> <th>Gas(es)</th> <th>(Mixture)</th> <th>Flow Rate</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Shielding-GTAW</td> <td>ARGON</td> <td>99,99%</td> <td>10 - 15 l/min</td> </tr> <tr> <td>Shielding-FCAW</td> <td>CO2</td> <td>99,80%</td> <td>15-20 l/min</td> </tr> <tr> <td>Backing</td> <td>N.A.</td> <td>N.A.</td> <td>N.A</td> </tr> <tr> <td>Other</td> <td>N.A</td> <td>N.A</td> <td>N.A</td> </tr> </tbody> </table>		Percent Composition			Gas(es)	(Mixture)	Flow Rate	Shielding-GTAW	ARGON	99,99%	10 - 15 l/min	Shielding-FCAW	CO2	99,80%	15-20 l/min	Backing	N.A.	N.A.	N.A	Other	N.A	N.A	N.A
	Percent Composition																							
	Gas(es)	(Mixture)	Flow Rate																					
Shielding-GTAW	ARGON	99,99%	10 - 15 l/min																					
Shielding-FCAW	CO2	99,80%	15-20 l/min																					
Backing	N.A.	N.A.	N.A																					
Other	N.A	N.A	N.A																					

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (QW-409)

Weld Pass(es)	Process	Filler Metal		Current Type and Polarity	Amps (Range)	Wire Feed Speed (Range)	Energy or Power (Range)	Volts (Range)	Travel Speed (Range)	Other (e.g., Remarks, Comments, Hot Wire Addition, Technique, Torch Angle, etc.)
		Classification	Diameter							
1	GTAW	ER70S-3	2,4 mm	CC (-)	90-120	N.A.	-----	10-13	4 - 8 cm/min	
2-N	FCAW	E71T1-C	1,2 mm	CC (+)	190-220	N.A.	-----	24-26	10 - 15 cm/min	

Amps and volts, or power or energy range, should be recorded for each electrode size, position, and thickness, etc.

Pulsing Current _____ Heat Input (max.) _____

Tungsten Electrode Size and Type _____ EWT_h-2; Ø 2,4 mm
(Pure Tungsten, 2% Thoriated, etc.)

Mode of Metal Transfer for GMAW (FCAW) _____ CORTOCIRCUITO
(Spray Arc, Short Circuiting Arc, etc.)

Other _____

TECHNIQUE (QW-410)

String or Weave Bead _____ AMBOS

Orifice, Nozzle, or Gas Cup Size _____ GTAW: 6-8 mm / FCAW: 16 mm

Initial and Interpass Cleaning (Brushing, Grinding, etc.) _____ AMOLADO

Method of Back Gouging _____ N.A.

Oscillation _____ GTAW: 5mm MAX. / FCAW: 15 mm MAX

Contact Tube to Work Distance _____ N.A.

Multiple or Single Pass (Per Side) _____ MÚLTIPLES

Multiple or Single Electrodes _____ N.A.

Electrode Spacing _____

Peening _____ NO

Other _____

FORM QW-482 SUGGESTED FORMAT FOR WELDING PROCEDURE SPECIFICATIONS (WPS)
(See QW-200.1, Section IX, ASME Boiler and Pressure Vessel Code)

Organization Name UNIVERSIDAD TECNOLOGICA NACIONAL By MIGUELANGEL NARVAEZ
 Welding Procedure Specification No. 004 Date _____ Supporting PQR No.(s) _____
 Revision No. 0 Date 09-08-2022

Welding Process(es) FCAW Type(s) MANUAL + AUTOMATICO
 (Automatic, Manual, Machine, or Semi-Automatic)

JOINTS (QW-402)	Details
Joint Design _____ FILETE	
Root Spacing _____ N.A.	
Backing: Yes _____ X _____ No _____	
Backing Material (Type) _____ METAL BASE	
<small>(Refer to both backing and retainers)</small>	
<input checked="" type="checkbox"/> Metal <input type="checkbox"/> Nonfusing Metal <input type="checkbox"/> Nonmetallic <input type="checkbox"/> Other	<h2 style="margin:0;">SEGÚN PLANO DE FABRICACIÓN Y DETALLES DE SOLDADURAS</h2>
Sketches, Production Drawings, Weld Symbols, or Written Description should show the general arrangement of the parts to be welded. Where applicable, the details of weld groove may be specified.	
Sketches may be attached to illustrate joint design, weld layers, and bead sequence (e.g., for notch toughness procedures, for multiple process procedures, etc.)]	

***BASE METALS (QW-403)**

P-No. 1 Group No. 1 y 2 to P-No. 1 Group No. 1 y 2

OR

Specification and type/grade or UNS Number _____ ---
 to Specification and type/grade or UNS Number _____ ---

OR

Chem. Analysis and Mech. Prop. _____ -----
 to Chem. Analysis and Mech. Prop. _____ -----

Thickness Range:

Base Metal:	Groove _____ N.A.	Fillet _____ ILIMITADO
	Maximum Pass Thickness ≤ 1/2 in. (13 mm) (Yes) <u>X</u> (No) _____	

Other _____

*FILLER METALS (QW-404)	FCAW
Spec. No. (SFA) _____	5.20
AWS No. (Class) _____	E71T1-C
F-No. _____	6
A-No. _____	1
Size of Filler Metals _____	Ø 1,2 mm
Filler Metal Product Form _____	TUBULAR
Supplemental Filler Metal _____	----
Weld Metal	
Deposited Thickness:	
Groove _____	N.A.
Fillet _____	ILIMITADO
Electrode-Flux (Class) _____	N.A.
Flux Type _____	N.A.
Flux Trade Name _____	N.A.
Consumable Insert _____	N.A.
Other _____	N.A.

*Each base metal-filler metal combination should be recorded individually.

FORM QW-482 (Back)

WPS No. _____ Rev. _____

POSITIONS (QW-405) Position(s) of Groove _____ N.A. Welding Progression: Up _____ X _____ Down _____ Position(s) of Fillet _____ F, H, V, O Other _____	POSTWELD HEAT TREATMENT (QW-407) Temperature Range _____ N.A. Time Range _____ N.A. Other _____
--	---

PREHEAT (QW-406) Preheat Temperature, Minimum _____ 30° C Interpass Temperature, Maximim _____ 100 °C Preheat Maintenance _____ NO Other _____ (Continuous or special heating, where applicable, should be recorded)	GAS (QW-408) <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="3">Percent Composition</th> </tr> <tr> <th>Gas(es)</th> <th>(Mixture)</th> <th>Flow Rate</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Shielding</td> <td>CO2</td> <td>99,8%</td> <td>10-20 l/min</td> </tr> <tr> <td>Shielding</td> <td>N.A</td> <td>N.A</td> <td>N.A</td> </tr> <tr> <td>Backing</td> <td>_____</td> <td>_____</td> <td>_____</td> </tr> <tr> <td>Other</td> <td>_____</td> <td>_____</td> <td>_____</td> </tr> </tbody> </table>		Percent Composition			Gas(es)	(Mixture)	Flow Rate	Shielding	CO2	99,8%	10-20 l/min	Shielding	N.A	N.A	N.A	Backing	_____	_____	_____	Other	_____	_____	_____
	Percent Composition																							
	Gas(es)	(Mixture)	Flow Rate																					
Shielding	CO2	99,8%	10-20 l/min																					
Shielding	N.A	N.A	N.A																					
Backing	_____	_____	_____																					
Other	_____	_____	_____																					

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (QW-409)

Weld Pass(es)	Process	Filler Metal		Current Type and Polarity	Amps (Range)	Wire Feed Speed (Range)	Energy or Power (Range)	Volts (Range)	Travel Speed (Range)	Other (e.g., Remarks, Comments, Hot Wire Addition, Technique, Torch Angle, etc.)
		Classifi-cation	Diameter							
1-N	FCAW	E71T1-C	1,2 mm	CC (+)	160-28 0	-----	-----	20-30	-----	

Amps and volts, or power or energy range, should be recorded for each electrode size, position, and thickness, etc.

Pulsing Current _____ Heat Input (max.) _____

Tungsten Electrode Size and Type _____
(Pure Tungsten, 2% Thoriated, etc.)

Mode of Metal Transfer for GMAW (FCAW) _____
GLOBULAR
 (Spray Arc, Short Circuiting Arc, etc.)

Other _____

TECHNIQUE (QW-410)

String or Weave Bead _____ AMBOS

Orifice, Nozzle, or Gas Cup Size _____ 20mm

Initial and Interpass Cleaning (Brushing, Grinding, etc.) _____ AMOLADO Y CEPILLADO

Method of Back Gouging _____ AMOLADO / ARCO AIRE

Oscillation _____ NO

Contact Tube to Work Distance _____ 15 - 30 mm

Multiple or Single Pass (Per Side) _____ AMBOS

Multiple or Single Electrodes _____ SIMPLE

Electrode Spacing _____ NO

Peening _____ NO

Other _____

9. EVALUACIÓN DE UNA FISURA

Se plantea una fisura circunferencial detectada por END, localizada en la superficie del metal de soldadura. Se propone hacer un análisis de aptitud para el servicio de acuerdo con la parte 9 de API 579.

Como datos complementarios para la evaluación se indican los siguientes:

Dimensiones de fisura		
Profundidad	a_m	5 mm
Largo	$2c_m$	30 mm
Datos de diseño		
Presión	P	17,25 kg/cm ² (1,69 MPa)
Temperatura de diseño	-	65°C
Mínima Temperatura ambiental	-	-15°C (5°F)
PWHT	-	NO
Corrosión		
LOSS	-	0
FCA	-	0,06 mm
Procesos de soldadura		
GTAW (raíz) + FCAW (relleno), ver variables en sección 8 de este documento	-	
Material		
Limite elástico especificado en material cuerpo (SA 516-70)	σ_y	260 MPa
Resistencia a la tracción en material cuerpo (SA 516-70)	σ_t	485 MPa
Módulo de Young	E	1,98x10 ⁵ MPa
Coeficiente de Poisson	ν	0,3

La nomenclatura particular de esta sección esta detallada a lo largo de esta sección y es equivalente a la indicada en API 579.

Antes de iniciar la evaluación se requiere realizar algunas verificaciones previas en indicados en el anexo 9 de API 579, a fin de comprobar la aplicabilidad de los niveles 1 y 2 para evaluación de fisuras. Estas verificaciones se muestran a continuación:

Verificaciones previas (Válidas para Nivel 1 y 2)

Parágrafo	Enunciado	Cumplimiento
9.2.2.a	Criterio de diseño original según parte 2 parágrafo 2.2.3	OK. Según ASME BPVC Sección VIII Div. 1
9.2.2.b	El componente no opera en el rango de Creep	OK. No opera en el rango de Creep. Temp. Diseño < 700°F
9.2.2.c	Efectos de cargas dinámicas no son significativos.	OK. Se asume
9.2.2.d	La grieta está sujeta a condiciones de carga y/o ambientales que no darán como resultado en un crecimiento de la grieta.	OK. Se asume

Verificaciones previas (Válidas solo para Nivel 1)

Parágrafo	Enunciado	Cumplimiento
9.2.2.e.1.i	El componente es un plano, cilíndrico o esférico.	OK. Es cilíndrico
9.2.2.e.1.ii	Si es cilíndrico o esférico se debe cumplir que $R/t \geq 5$	OK. Se cumple ($R/t = 1687,5/25,4 \approx 66 > 5$)
9.2.2.e.1.iii	El espesor del componente en el lugar de la grieta es menor o igual a 1,5 pulg	OK. Se cumple ($t=25,4 \text{ mm} < 38,1 \text{ mm}$)
9.2.2.e.1.iv	La fisura puede ser superficial o pasante. La longitud máxima permitida de la fisura es de 200 mm (8 pulg).	OK. Se cumplen. Fisura superficial y longitud total 30 mm (1,18 pulg)
9.2.2.e.1.v	Para componentes cilíndricos y esféricos, la grieta está orientada en la dirección axial o circunferencial y está ubicada a una distancia mayor o igual a $1,8\sqrt{Dt}$ de cualquier discontinuidad estructural.	OK. Orientación circunferencial. Se asume cumplimiento de distancia mínima $\text{Dist. mín} = 1,8 \sqrt{\frac{3375}{25,4} \cdot \frac{25,4}{25,4}} = 20,75 \text{ pulg}$
9.2.2.e.2.i	La carga en el componente proviene de la presión que produce solo un campo de tensión de membrana.	OK. Se cumple
9.2.2.e.2.ii	Las tensiones de membrana durante la operación están dentro de los límites de diseño del código de construcción original.	OK. Se cumple. σ_m y σ_L son inferiores a la tensión admisible $S = 138 \text{ MPa}$ $\sigma_m = \frac{P}{E} \left(\frac{R}{t} + 0,6 \right) = \frac{1,69 \text{ MPa}}{1} \left(\frac{1687,5}{25,4} + 0,6 \right)$ $\sigma_m = 113,3 \text{ MPa}$ $\sigma_L = \frac{P}{2E} \left(\frac{R}{t} - 0,4 \right) = \frac{1,69 \text{ MPa}}{2 \cdot 1} \left(\frac{1687,5}{25,4} - 0,4 \right)$ $\sigma_L = 55,8 \text{ MPa}$
9.2.2.e.2.iii	Si el componente debe someterse a una prueba de presión, la temperatura del metal del componente debe estar por encima de la MAT durante la prueba.	OK. Se asume
9.2.2.e.2.iv	La geometría de la unión soldada es una configuración de V simple o V doble; las tensiones residuales se basan en las soluciones proporcionadas en el anexo 9D.	OK. Se cumple
9.2.2.e.3.i	El material es acero al carbono (P1, Grupo 1 o 2) con una tensión permisible de acuerdo con el código de construcción original que no excede 172 MPa (25 ksi).	OK. Se cumple SA 516-70 es P1, tensión admisible es 138 MPa < 172 MPa
9.2.2.e.3.ii	El límite elástico mínimo especificado para el material base es menor o igual a 276 MPa (40 ksi). La resistencia mínima a la tracción especificada para el material base es menor o igual a 485 MPa (70 ksi). Las soldaduras están hechas con un electrodo compatible con el material base.	OK. Se cumple ($S_y = 260 \text{ MPa}$; $S_t = 485 \text{ MPa}$). Hay compatibilidad de electrodos con metal base.
9.2.2.e.3.iii	La tenacidad a la fractura es mayor o igual al valor límite inferior de K_{Ic} obtenido del Anexo 9F. Esto será cierto para los aceros al carbono donde la tenacidad no se ha degradado debido al daño ambiental (por ejemplo, daño por fuego, sobrecalentamiento, grafitización, etc.).	OK. Se asume

Las verificaciones previas indican que se cumplen las condiciones para la evaluación por los niveles 1 y 2 de la parte 9 de API 579.

Primeramente, se parte de una evaluación Nivel 1.

NOTA: Todas las figuras, tablas y ecuaciones están referenciadas con respecto a API 579.

Evaluación Nivel 1

Paso 1. Determinación de la temperatura de evaluación

La temperatura de la evaluación será la correspondiente a la mínima ambiental:

$$T = 5^{\circ}F$$

Paso 2. Determinación de la longitud y profundidad de la fisura

Considerando que la fisura está en la dirección circunferencial y es perpendicular a la dirección longitudinal (plano principal de mínimo esfuerzo), no es necesario realizar proyección alguna sobre los planos principales, entonces la longitud de fisura ($2c$) es igual a la longitud de fisura medida ($2c_m$):

$$2c = 2c_m = 30 \text{ mm} = 1,18 \text{ pulg}$$

Por otro lado, atendiendo a la figura 9.1 de API 579-1 para una fisura superficial se define la profundidad medida, a_m , como la profundidad de la fisura idealizada, a , entonces:

$$a = a_m = 5 \text{ mm} = 0,197 \text{ pulg}$$

Paso 3. Determinación de la figura para la evaluación del defecto basado en la geometría del componente y orientación del defecto

Considerando que el componente es cilíndrico y la orientación de la fisura es paralela a la junta circunferencial se determina que corresponde la figura 9.15.

Paso 4. Determinación de la curva de revisión a partir del paso 3

Considerando que:

- La fisura se encuentra en el metal de soldadura
- La profundidad fue medida con buen nivel de precisión mediante UT
- $25 \text{ mm} < t < 38 \text{ mm}$
- $a < t/4$
- El metal de soldadura no fue sujeto a PWHT

Se determina que la figura a utilizar será la C (metal de soldadura sin PWHT, $\frac{1}{4}$ de t , línea sólida)

Paso 5. Determinación de la temperatura de referencia

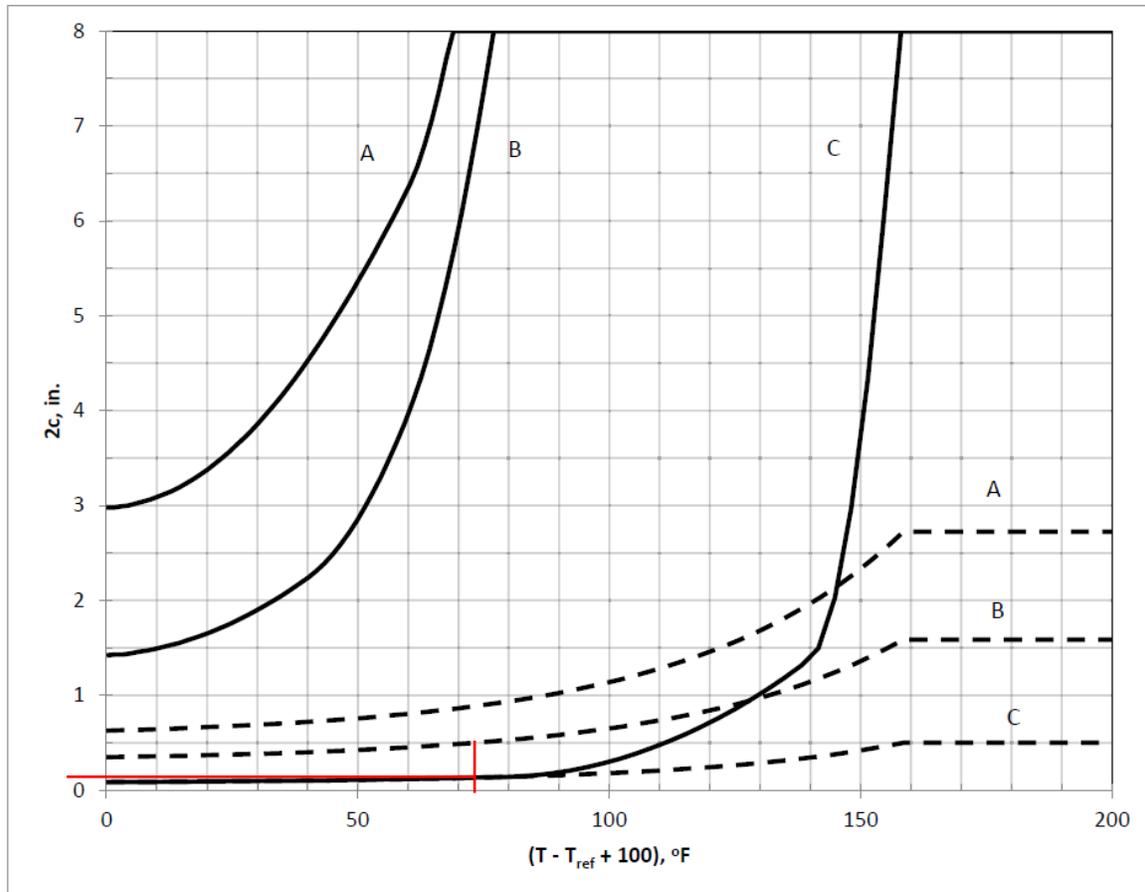
Con base en la especificación del material se entra en la tabla 3.2 y se determina la curva de temperatura de excepción de impacto. Para el SA-516-70 la curva correspondiente es la B. Además, sabiendo que la tensión de fluencia es 260 MPa (38 ksi), se entra en la Tabla 9.2 y se determina una temperatura de referencia, $T_{ref} = 32^{\circ}F$.

Paso 6. Determinación de la longitud máxima permisible de la fisura

Se determina el valor de $(T - T_{ref} + 100)$, tomando T como la mínima temperatura exposición. Entonces:

$$T - T_{ref} + 100 = 5 - 32 + 100 = 73^{\circ}F$$

A partir del valor anterior se entra en la figura 9.15 y se determina el largo máximo de fisura permisible en la curva C (línea solida), obteniéndose un largo máximo total de **0,14 pulg.**



Note :

1. Definition of Screening Curve (solid line 1/4-t flaw, dashed line 1-t flaw):
 - A Allowable flaw size in base metal.
 - B Allowable flaw size in weld metal that has been subjected to PWHT.
 - C Allowable flaw size in weld metal that has not been subjected to PWHT.
2. Crack dimension for a 1-t and 1/4-t flaw are shown in [Appendix 9B Figure 9B.12 & 9B.16](#).
3. See [paragraph 9.2.2.1](#) for restriction and limitation.
4. Guideline for establishing the Reference Temperature T_{ref} , are covered in [paragraph 9.4.2.2.e](#).
5. The maximum permissible flaw length from this curve is $2c = 8 \text{ in.}$

Figure 9.15 – Level 1 Assessment – Cylinder, Circumferential Joint, Crack-Like Flaw Parallel to the Joint

Paso 7. Evaluación de resultados

Teniendo en cuenta que el largo de la fisura actual total (1,18 pulg) es mayor que el largo de fisura máximo permisible, se concluye que el componente (cuerpo cilíndrico) **NO es apto para el servicio. Se indica realizar evaluación nivel 2.**

Evaluación Nivel 2

Paso 1. Evaluar las condiciones de operación y determinar la presión, temperatura y combinaciones de carga adicionales a ser evaluadas

El estado de carga a evaluar es presión interna. Se asumen las mismas condiciones de diseño del equipo (no se indican las condiciones de operación del equipo en el plano de fabricación).

Presión de operación, $p = 1,69MPa$

Temperatura de operación = $66^{\circ}C$

Paso 2. Determinar las distribuciones de esfuerzos en la ubicación de la fisura y categorizar los esfuerzos resultantes

Tensiones primarias

La tensión primaria en la zona de la fisura corresponde a la tensión longitudinal generada por presión interna. Teniendo en cuenta la geometría del componente, estado de carga y geometría de la fisura, se tiene que la solución de esfuerzos de referencia corresponde a 9C.5.13 (Cilindro, fisura superficial, dirección circunferencial, fisura semi - elíptica, presión interna y fuerza axial sobre sección neta – RCSCCE1)

Las componentes de tensiones primarias de membrana (P_m) y flexión (P_b) para el cálculo del esfuerzo de referencia se obtienen de ecuaciones 9C.79 y 9C.80:

$$P_m = \frac{pR_i^2}{R_o^2 - R_i^2} + \frac{F}{\pi(R_o^2 - R_i^2)}$$

Donde:

F es la fuerza axial aplicada sobre la sección neta

R_i, R_o son los radios interno y externo respectivamente

En este caso, $F = 0$. Al sustituir valores se tiene:

$$P_m = \frac{pR_i^2}{R_o^2 - R_i^2} = \frac{1,69(1687,5)^2}{(1712,90)^2 - (1687,5)^2} = 55,71MPa$$

Además, la tensión primaria de flexión es:

$$P_b = 0$$

Tensiones secundarias

No se consideran en esta evaluación.

Tensiones residuales

La fisura se encuentra en la soldadura circunferencial no sometida a PWHT. De 9D.3.3 se obtiene la magnitud del límite elástico efectivo, σ_{ys}^r , que se utilizará para estimar el esfuerzo residual en la junta soldada.

$$\sigma_{ys}^r = \sigma_y + 69MPa = 260MPa + 69MPa = 329 MPa$$

La tensión residual se estima a partir de 9D.5.1. De la Especificación de Procedimiento de Soldadura se conocen los rangos de voltaje (V), intensidad (I) y velocidad de avance (u). Considerando que la fisura se encuentra en la superficie exterior, donde se soldó con FCAW, se determina el calor aportado mínimo (caso más conservativo) a partir de:

$$\dot{q} = \frac{IV}{u} = \frac{190A \cdot 24V}{15 \frac{cm}{min} \left(\frac{10 mm}{1 cm}\right) \left(\frac{1 min}{60 s}\right)} = 1824 J/mm$$

Luego, se obtiene:

$$\frac{\dot{q}}{t} = \frac{1824 J/mm}{25,4 mm} = 71,81 J/mm^2$$

Puesto que $120 J/mm^2 > \dot{q}/t > 50 J/mm^2$, de 9D.5.1.b.2 se obtiene la siguiente distribución de tensión residual a través del espesor $\sigma^r(x)$:

$$\sigma^r(x) = \sigma_{ys}^r \left[1,00 - 4,43 \left(\frac{x}{t}\right) + 13,53 \left(\frac{x}{t}\right)^2 - 16,93 \left(\frac{x}{t}\right)^3 + 7,03 \left(\frac{x}{t}\right)^4 \right]$$

Donde:

x : coordenada local medida desde el lado opuesto a la cara más ancha de la unión soldada (superficie interior)

t : espesor nominal de pared del recipiente

Al sustituir el valor de σ_{ys}^r en la ecuación anterior se obtiene:

$$\sigma^r(x) = 329 - 1457,47 \left(\frac{x}{t}\right) + 4451,37 \left(\frac{x}{t}\right)^2 - 5569,97 \left(\frac{x}{t}\right)^3 + 2312,87 \left(\frac{x}{t}\right)^4$$

Donde $\sigma^r(x)$ se obtiene en MPa. Esta expresión representa la distribución del esfuerzo residual a través del espesor, y será utilizada en el **paso 9**.

Paso 3. Determinar la resistencia a la fluencia y a la tensión

De los datos sabemos las propiedades del material obtenidas a partir de ASME II, parte D:

Resistencia a la fluencia, $\sigma_y = 260 \text{ MPa}$

Resistencia a la tracción, $\sigma_t = 485 \text{ MPa}$

Modulo de Young, $E = 1,98 \times 10^5 \text{ MPa}$

Coefficiente de Poisson, $\nu = 0,3$

Paso 4. Determinar la tenacidad a la fractura K_{mat}

No se dispone de datos experimentales de tenacidad a la fractura para el material. En consecuencia, se procede a estimar la tenacidad a la fractura a partir del Anexo 9F de API 579. Se emplea el método de estimación límite inferior de acuerdo con 9F.4.2. Entonces:

$$K_{mat} = 36,5 + 3,084e^{0,036(T-T_{ref}+56)}$$
$$K_{mat} = 36,5 + 3,084e^{0,036(-15-0+56)} = 50 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

Paso 5. Determinar las dimensiones de la fisura a partir de los datos de inspección

De los END se tiene las siguientes dimensiones de la fisura:

$$2c = 2c_m = 30 \text{ mm} = 1,18 \text{ pulg}$$

$$a = a_m = 5 \text{ mm} = 0,197 \text{ pulg}$$

Paso 6. Calcular las tensiones de referencia para las tensiones primarias σ_{ref}^P

El esfuerzo de referencia se obtiene, de 9C.5.13, mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_{ref} = \frac{P_b + (P_b^2 + 9(Z \cdot P_m \cdot (1 - \alpha)^2)^2)^{0,5}}{3(1 - \alpha)^2}$$

Y a su vez,

$Z = \left[\frac{2\psi}{\pi} - \frac{x\theta}{\pi} \left(\frac{2 - 2\tau + x\tau}{2 - \tau} \right) \right]^{-1}$	$\tau = \frac{t}{R_o}$
$\alpha = \frac{\frac{a}{t}}{1 + \frac{t}{c}}$	$x = \frac{a}{t}$
$\psi = \arccos[A \sin(\theta)]$	$\theta = \frac{\pi c}{4R_o}$
$A = x \left[\frac{(1 - \tau)(2 - 2\tau + x\tau) + (1 - \tau + x\tau)^2}{2(1 + (2 - \tau)(1 - \tau))} \right]$	

Donde:

α, ψ, x, τ, Z , parámetros del esfuerzos de referencia

A: Area de la sección transversal de la fisura

θ : medio ángulo de la grieta

Evaluando los distintos parámetros de la ecuación de σ_{ref} se obtiene:

$x = \frac{a}{t} = \frac{5}{25,34} = 0,1973$
$\theta = \frac{\pi c}{4R_o} = \frac{\pi(30/2)}{4(1712,9)} = 0,006877$
$\tau = \frac{t}{R_o} = \frac{25,34}{1712,9} = 0,014793$
$A = x \left[\frac{(1-\tau)(2-2\tau+x\tau)+(1-\tau+x\tau)^2}{2(1+(2-\tau)(1-\tau))} \right] =$ $A = 0,1968 \left[\frac{(1-0,014793)(2-2(0,014793)) + (0,1973)(0,014793) + (1-0,014793 + (0,1973)(0,014793))^2}{2(1+(2-0,014793)(1-0,014793))} \right]$ $A = 0,1973 \left[\frac{2,920530}{5,911675} \right] = 0,097479$
$\alpha = \frac{\frac{a}{t}}{1 + \frac{t}{c}} = \frac{\frac{5}{25,34}}{1 + \frac{25,34}{30/2}} = 0,073370$
$\psi = \arccos[A \sin(\theta)] = \arccos[(0,097479) \sin(0,006877)] = 1,570125$
$Z = \left[\frac{2\psi}{\pi} - \frac{x\theta}{\pi} \left(\frac{2-2\tau+x\tau}{2-\tau} \right) \right]^{-1}$ $Z = \left[\frac{2(1,570125)}{\pi} - \frac{0,1973(0,006877)}{\pi} \left(\frac{2-2(0,014793) + 0,1973(0,014793)}{2-0,014793} \right) \right]^{-1} =$ $Z = 1,000856$

Finalmente, se obtiene el esfuerzo de referencia:

$$\sigma_{ref} = \frac{0 + (0 + 9(1,000856 \cdot 55,71 \cdot (1 - 0,07337)^2)^2)^{0,5}}{3(1 - 0,07337)^2}$$

$$\sigma_{ref} = 55,75 \text{ MPa}$$

Paso 7. Calcular la relación de carga

La relación de carga se obtiene de:

$$L_r^p = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_y} = \frac{55,75}{260} = 0,2144$$

Paso 8. Calcular la intensidad de esfuerzo atribuida a las cargas primarias, K_I^P

El factor de intensidad de esfuerzos se determina mediante 9B.5.13 con la siguiente expresión (para superficie exterior):

$$K_I^P = G_0 \left(\frac{pR_i^2}{R_0^2 - R_i^2} + \frac{F}{\pi(R_0^2 - R_i^2)} \right) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}$$

Donde:

G_0, Q son parámetros para la determinación de K_I^P .

Q se obtiene de 9B.14 y 9B.15:

$$Q = 1,0 + 1,464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1,65} \quad \text{para } a/c \leq 1,0$$

$$Q = 1,0 + 1,464 \left(\frac{c}{a} \right)^{1,65} \quad \text{para } a/c > 1,0$$

Sabemos que $a/c = 5/15 = 0,33 < 1$, entonces obtenemos Q de:

$$Q = 1,0 + 1,464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1,65} = 1,0 + 1,464 \left(\frac{5}{15} \right)^{1,65} = 1,23894$$

De 9B.5.14.2.b se obtiene G_0 :

$$G_0 = A_{0,0} + A_{1,0}\beta + A_{2,0}\beta^2 + A_{3,0}\beta^3 + A_{4,0}\beta^4 + A_{5,0}\beta^5 + A_{6,0}\beta^6$$

Donde, A_i son parametros que se obtienen de la Tabla 9B.15 y β es un parametro que se define en 9B.95:

$$\beta = \frac{2\varphi}{\pi}$$

Donde

φ : angulo eliptico (para cilindros ver figura 9B.2)

En el fondo de la fisura:

$$\varphi = \pi/2 \rightarrow \beta = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} \right) = 1$$

En el borde de la fisura:

$$\varphi = 0 \rightarrow \beta = \frac{2}{\pi} (0) = 0$$

De la tabla 9B.15:

$t/R_i = 25,34/1687,44 = 0,015$ $a/c = 5/15 = 0,33$ $a/t = 5/25,34 = 0,1973 \approx 0,20$	$A_0 = 0,71380993$
	$A_1 = -0,50064564$
	$A_2 = 6,87744319$
	$A_3 = -18,53446369$
	$A_4 = 25,45166060$
	$A_5 = -17,95938012$
	$A_6 = 5,07390863$

Entonces se obtiene G_0 :

En el fondo de la fisura: $G_0 = 1,12233289$
En el borde de la fisura: $G_0 = 0,71380993$

Finalmente, se obtiene K_I^P :

En el fondo de la fisura:
$K_I^P = 1,12233289 \left(\frac{1,69(1687,44)^2}{1712,9^2 - 1687,44^2} \right) \sqrt{\frac{\pi(5/1000)}{1,23894}} = 7,02 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$
En el borde de la fisura:
$K_I^P = 0,71380993 \left(\frac{1,69(1687,44)^2}{1712,9^2 - 1687,44^2} \right) \sqrt{\frac{\pi(5/1000)}{1,23894}} = 4,47 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

Paso 9. Calcular la intensidad de esfuerzo atribuida a las cargas secundarias, K_I^{SR}

La intensidad de esfuerzo atribuida a cargas secundarias, K_I^{SR} , se obtendrá a partir de 9B.5.14 (distribución de esfuerzos polinomial de cuarto orden):

$$K_I = \left[G_0(\sigma_o + p_c) + G_1\sigma_1 \left(\frac{a}{t}\right) + G_2\sigma_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + G_3\sigma_3 \left(\frac{a}{t}\right)^3 + G_4\sigma_4 \left(\frac{a}{t}\right)^4 + G_5\sigma_5 + G_6\sigma_6 \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}$$

Donde:

G_0 y Q se calcularon en el paso 8.

G_1 se obtiene de 9B.5.14.2:

$$G_1 = A_{0,1} + A_{1,1}\beta + A_{2,1}\beta^2 + A_{3,1}\beta^3 + A_{4,1}\beta^4 + A_{5,1}\beta^5 + A_{6,1}\beta^6$$

De la tabla 9B.15:

$t/R_i = 25,34/1687,44 = 0,015$ $a/c = 5/15 = 0,33$ $a/t = 5/25,34 = 0,1973 \approx 0,20$	$A_{0,1} = 0,10936550$
	$A_{1,1} = 0,16892962$
	$A_{2,1} = 2,41726949$
	$A_{3,1} = -4,80609257$
	$A_{4,1} = 5,96951904$
	$A_{5,1} = -4,62596469$
	$A_{6,1} = 1,45103157$

Entonces se obtiene G_1 :

<p>En el fondo de la fisura:</p> $\varphi = \pi/2 \rightarrow \beta = \frac{2}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} \right) = 1 \rightarrow G_1 = 0,68405796$
<p>En el borde de la fisura:</p> $\varphi = 0 \rightarrow \beta = \frac{2}{\pi} (0) = 0 \rightarrow G_1 = 0,1093655$

Por otro lado, G_2, G_3, G_4 se obtienen de 9B.14.3.

En el fondo de la fisura ($\varphi = \pi/2$)	
$G_2 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left(\frac{16}{15} + \frac{1}{3}M_1 + \frac{16}{105}M_2 + \frac{1}{12}M_3 \right)$	$M_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2Q}} (3G_1 - G_0) - \frac{24}{5}$
$G_3 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left(\frac{32}{35} + \frac{1}{4}M_1 + \frac{32}{315}M_2 + \frac{1}{20}M_3 \right)$	$M_2 = 3$
$G_4 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left(\frac{256}{315} + \frac{1}{5}M_1 + \frac{256}{3465}M_2 + \frac{1}{30}M_3 \right)$	$M_3 = \frac{6\pi}{\sqrt{2Q}} (G_0 - 2G_1) + \frac{8}{5}$
En el borde de fisura ($\varphi = 0$)	
$G_2 = \frac{\sqrt{Q}}{\pi} \left(\frac{4}{5} + \frac{2}{3}N_1 + \frac{4}{7}N_2 + \frac{1}{2}N_3 \right)$	$N_1 = \frac{3\pi}{\sqrt{Q}} (2G_0 - 5G_1) - 8$
$G_3 = \frac{\sqrt{Q}}{\pi} \left(\frac{4}{7} + \frac{1}{2}N_1 + \frac{4}{9}N_2 + \frac{2}{5}N_3 \right)$	$N_2 = \frac{15\pi}{\sqrt{Q}} (3G_1 - G_0) + 15$
$G_4 = \frac{\sqrt{Q}}{\pi} \left(\frac{4}{9} + \frac{2}{5}N_1 + \frac{4}{11}N_2 + \frac{1}{3}N_3 \right)$	$N_3 = \frac{3\pi}{\sqrt{Q}} (3G_0 - 10G_1) - 8$

Evaluando, se obtiene:

En el fondo de fisura ($\varphi = \pi/2$)	
$M_1 = -1,088510719$	$G_2 = 0,525634526$
$M_2 = 3$	$G_3 = 0,440814469$
$M_3 = -1,343151818$	$G_4 = 0,386753618$
En el borde de fisura ($\varphi = 0$)	
$N_1 = -0,542052616$	$G_2 = 0,040629069$
$N_2 = -1,329787713$	$G_3 = 0,0205927$
$N_3 = 0,871840329$	$G_4 = 0,012286422$

Del paso 2 se tiene la distribución del esfuerzo residual a través del espesor:

$$\sigma^r(x) = 329 - 1457,47 \left(\frac{x}{t}\right) + 4451,37 \left(\frac{x}{t}\right)^2 - 5569,97 \left(\frac{x}{t}\right)^3 + 2312,87 \left(\frac{x}{t}\right)^4$$

Por definición, K_I , se obtiene para una distribución de esfuerzo polinomial como la siguiente:

$$\sigma(x) = \sigma_0 + \sigma_1 \left(\frac{x}{t}\right) + \sigma_2 \left(\frac{x}{t}\right)^2 + \sigma_3 \left(\frac{x}{t}\right)^3 + \sigma_4 \left(\frac{x}{t}\right)^4$$

Al comparar las dos ecuaciones anteriores se hace evidente que:

$$\sigma_0 = 329$$

$$\sigma_1 = -1457,47$$

$$\sigma_2 = 4451,37$$

$$\sigma_3 = -5569,97$$

$$\sigma_4 = 2312,87$$

De la ecuación de K_I , es importante mencionar que σ_5 y σ_6 corresponden a los esfuerzos de flexión en las direcciones "x" e "y" (ver 9B.5.14.2.g). En este caso los esfuerzos de flexión no se consideran, entonces $\sigma_5 = \sigma_6 = 0$. Además, debido a que la grieta está en la superficie exterior, la presión en la cara de la grieta es cero, $p_c = 0$. Con lo cual, la ecuación de K_I se reduce a:

$$K_I = \left[G_0(\sigma_0) + G_1\sigma_1 \left(\frac{a}{t}\right) + G_2\sigma_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + G_3\sigma_3 \left(\frac{a}{t}\right)^3 + G_4\sigma_4 \left(\frac{a}{t}\right)^4 \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}$$

Ensamblando la ecuación de K_I en el fondo de la fisura ($\varphi = \pi/2$), se tiene:

$$K_I^{SR} = \left[(1,12233289)(329) + (0,68405796)(-1457,47) \left(\frac{a}{t}\right) + (0,525634526)(4451,37) \left(\frac{a}{t}\right)^2 + (0,440814469)(-5569,97) \left(\frac{a}{t}\right)^3 + (0,386753618)(2312,87) \left(\frac{a}{t}\right)^4 \right] \sqrt{\frac{\pi a}{1,238941181}}$$

Al evaluar para $a = 5mm$ y $t = 25,34 mm$, se obtiene K_I^{SR} en el fondo de la fisura:

$$K_I^{SR} = 27,71 MPa\sqrt{m}$$

Se repite lo anterior para el borde de la fisura ($\varphi = 0$), obteniéndose:

$$K_I = \left[(0,71380993)(329) + (0,1093655)(-1457,47) \left(\frac{a}{t}\right) + (0,040629069)(4451,37) \left(\frac{a}{t}\right)^2 + (0,0205927)(-5569,97) \left(\frac{a}{t}\right)^3 + (0,012286422)(2312,87) \left(\frac{a}{t}\right)^4 \right] \sqrt{\frac{\pi a}{1,148642189}}$$

Al evaluar para $a = 5mm$ y $t = 25,34mm$, se obtiene K_I^{SR} en el borde de la fisura:

$$K_I^{SR} = 23,60 MPa\sqrt{m}$$

Paso 10. Calcular el factor de interacción por plasticidad, Φ

Se determina el parámetro, Φ_0 :

$$\Phi_0 = \left(\frac{a_{eff}}{a}\right)^{0,5}$$

Donde:

a_{eff} : es la longitud efectiva de la fisura y se obtiene de:

$$a_{eff} = a + \left(\frac{1}{2\pi}\right) \cdot \left(\frac{K_I^{SR}}{\sigma_{ys}}\right)^2 \quad (\text{para estado plano de tensiones})$$

Se evalúa a_{eff} con el K_I^{SR} correspondiente al fondo de la fisura ($\varphi = \pi/2$)

$$a_{eff} = \frac{5}{1000} m + \left(\frac{1}{2\pi}\right) \cdot \left(\frac{27,71 MPa\sqrt{m}}{260 MPa}\right)^2 = 6,81 mm$$

$$\Phi_0 = \left(\frac{6,81}{5}\right)^{0,5} = 1,17$$

Luego, se determina el factor de intensidad de esfuerzos secundarios y residuales corregidos por efectos de plasticidad, K_j^{SR} , a partir de:

$$K_j^{SR} = \Phi_0 \cdot K_I^{SR}$$

Evaluando, se obtiene:

En el fondo de la fisura: $K_j^{SR} = 1,17 \cdot 27,71 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} = 32,42 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$
En el borde de la fisura: $K_j^{SR} = 1,17 \cdot 23,60 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} = 27,61 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

Posteriormente, se determina el parámetro X :

$$X = K_j^{SR} \left(\frac{L_r^P}{K_I^P} \right)$$

Evaluando, se obtiene:

En el fondo de la fisura: $X = 32,42 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \left(\frac{0,2144}{7,02 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}} \right) = 0,99$
En el borde de la fisura: $X = 27,61 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} \left(\frac{0,2144}{4,46 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}} \right) = 1,324$

Se entra en la Tabla 9.3 para determinar el parámetro ξ :

En el fondo de la fisura:	
$L_r^P = 0,2144$ $X = 0,99$	$\xi = 1,067516$
En el borde de la fisura:	
$L_r^P = 0,2144$ $X = 1,324$	$\xi = 1,08662656$

Finalmente, se obtiene el factor de interacción por plasticidad con:

$$\Phi = \xi \cdot \Phi_0$$

Evaluando:

En el fondo de la fisura: $\Phi = 1,067516(1,17) = 1,25$
En el borde de la fisura: $\Phi = 1,08662656(1,17) = 1,27$

Paso 11. Determinar la relación de tenacidad, K_r

Se obtiene la relación de tenacidad a partir de:

$$K_r = \frac{K_I^P + \Phi \cdot K_I^{SR}}{K_{mat}}$$

Evaluando:

En el fondo de la fisura: $K_r = \frac{7,02 + 1,25(27,71)}{50} = 0,83$
En el borde de la fisura: $K_r = \frac{4,47 + 1,27(23,60)}{50} = 0,69$

Paso 12. Evaluar los resultados

Se grafica la siguiente ecuación. En las abscisas se representan los valores de L_r^P y en las ordenadas los valores de K_r .

$$K_r = (1 - 0,14(L_r^P)^2) (0,3 + 0,7e^{-0,65(L_r^P)^6})$$

Se grafica la línea de cut-off de L_r^P . Debido a que no se conocen las características de endurecimiento por deformación del material, se establece un valor máximo de $L_r^P = 1$

Se grafican los puntos:

Punto	L_r^P	K_r
Fondo fisura	0,2144	0,83
Borde fisura	0,2144	0,69

En la figura 9.1 se muestra el diagrama FAD del presente caso de estudio. Se evidencia que los puntos (L_r^P, K_r) correspondientes al fondo y borde de la fisura se encuentran debajo de la curva y a la izquierda de la línea de cut-off de L_r^P . En consecuencia, se considera que **el equipo esta apto para el servicio.**

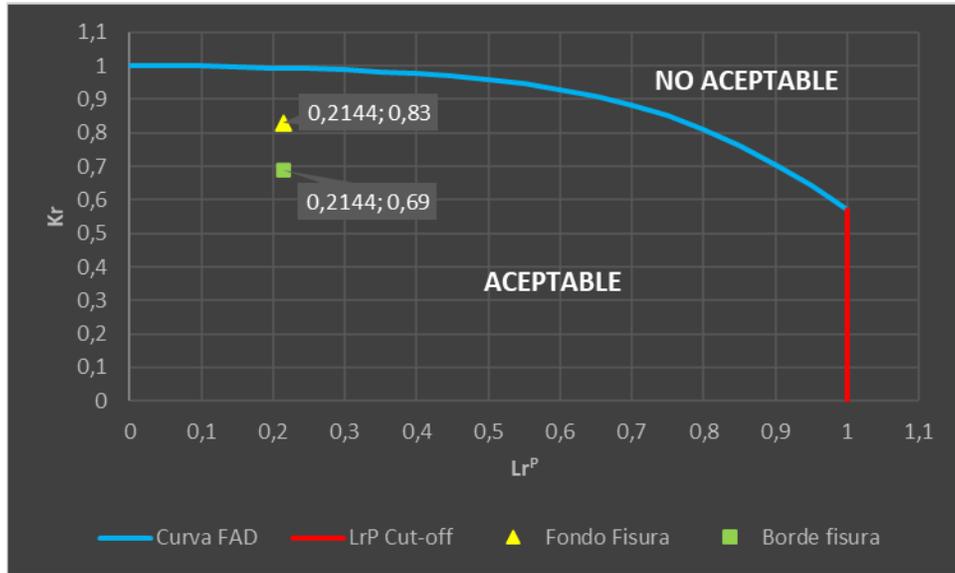


Figura 9.1 Diagrama FAD del caso estudiado

10. CONCLUSIONES

- Mediante el método de elementos finitos se obtuvieron valores de esfuerzo de tracción en el interior del recipiente y de compresión en el exterior, siendo esto concordante con el comportamiento físico esperado.
- Con el método de elementos finitos, los mayores valores de esfuerzos se localizaron en la zona de unión del cuerpo con la placa de desgaste, lo cual concuerda con lo esperado en teoría debido a la discontinuidad estructural (cambio de espesor) presente en la zona.
- Con el método de elementos finitos, los esfuerzos en la zona de unión del cuerpo con la cuna fueron mayores en el modelo con cuna rígida, siendo esto concordante con lo esperado en teoría.
- Los valores de esfuerzos en la unión del cuerpo con la placa de desgaste obtenidos mediante los métodos de Ong y elementos finitos resultaron ser del mismo orden de magnitud.
- El esfuerzo obtenido con el método Zick fue menor que los obtenidos con Ong y elementos finitos, encontrándose por debajo de estos en un factor de 1,35 y 1,56 respectivamente, en el caso de cuna elástica; y en un factor de aproximadamente 1,74 en el caso de cuna rígida. Este hecho refuerza lo indicado por Ong en su trabajo.
- En casos donde se requiere una precisión importante con respecto a los valores pico de esfuerzo, como puede ser el caso de análisis de fatiga, el método de Ong podría ser más apropiado que el método de Zick, dada la cercanía de sus resultados con los obtenidos por métodos de elementos finitos.
- Se elaboraron 4 ejemplos de especificación de procedimiento de soldadura, sin embargo, se debe tener en cuenta que las especificaciones de procedimientos de soldadura deben ser calificadas mediante ensayos (mecánicos, no destructivos, y otros) de acuerdo con el código de aplicable (por ejemplo, ASME IX, u otro similar) para poder demostrar el correcto desempeño de las uniones soldadas generadas a partir de ellas.
- La disponibilidad de datos de fabricación del equipo es de importancia para la posterior evaluación de fisura en servicio. Como ejemplo de ello, es el caso del procedimiento de soldadura, a partir del cual se puede evaluar el calor aportado durante la soldadura de la unión y estimar la distribución de esfuerzo residual en dicha unión mediante el procedimiento de API 579.
- En la evaluación de fisura realizada con la parte 9 de API 579, el resultado paso de ser “No apto” con un nivel 1, que requiere un mínimo de información y esfuerzo ingenieril, a “apto” con nivel 2, que involucra un mayor nivel de análisis, tiempo e información disponible. Por lo tanto, los resultados obtenidos son altamente dependientes de la información disponible del equipo y de las horas de ingeniería que puedan dedicarse a la evaluación.

11.FIGURAS Y TABLAS

11.1 Figuras Método de Ong

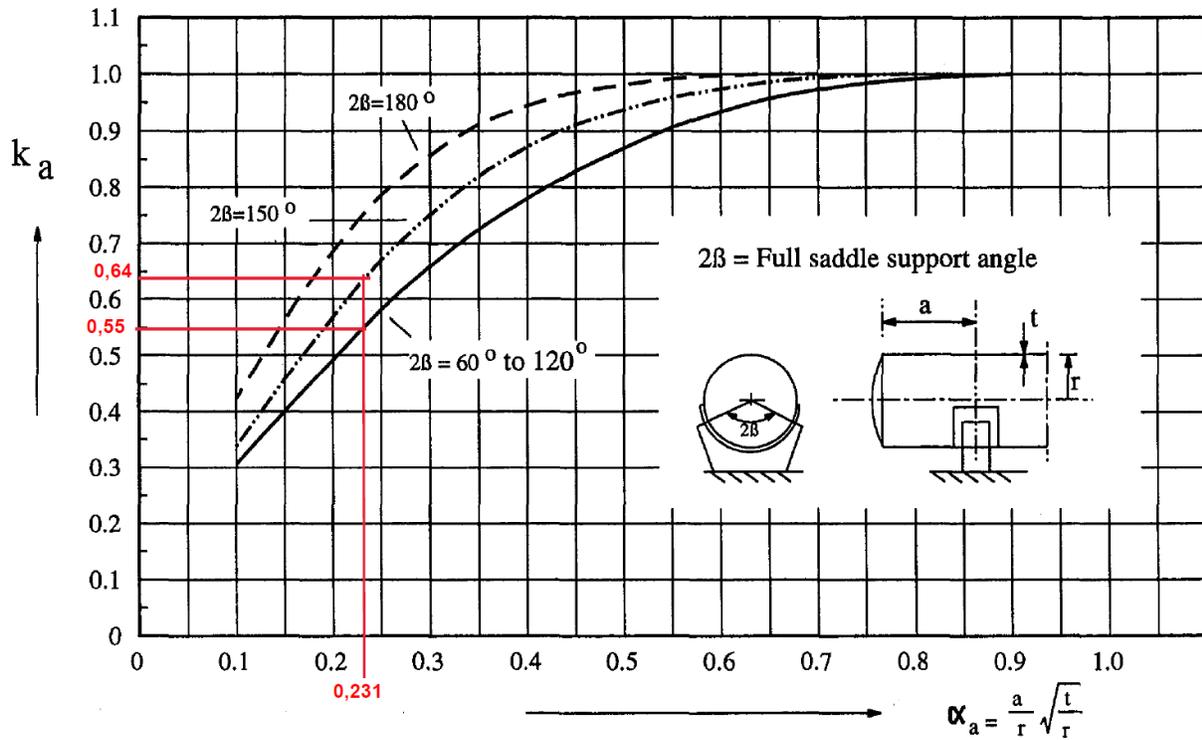


Fig. 1 Support location factor

length (L) = 7320 mm,
 radius (r) = 455 mm,
 thickness (t) = 3.3 mm,

distance from one end (a) = 1410 mm,
 saddle width (b) = 102 mm,
 spacing between supports (c) = $L - 2a = 4500$ mm

Figura 11.1.1 Factor de localización de soporte, k_a

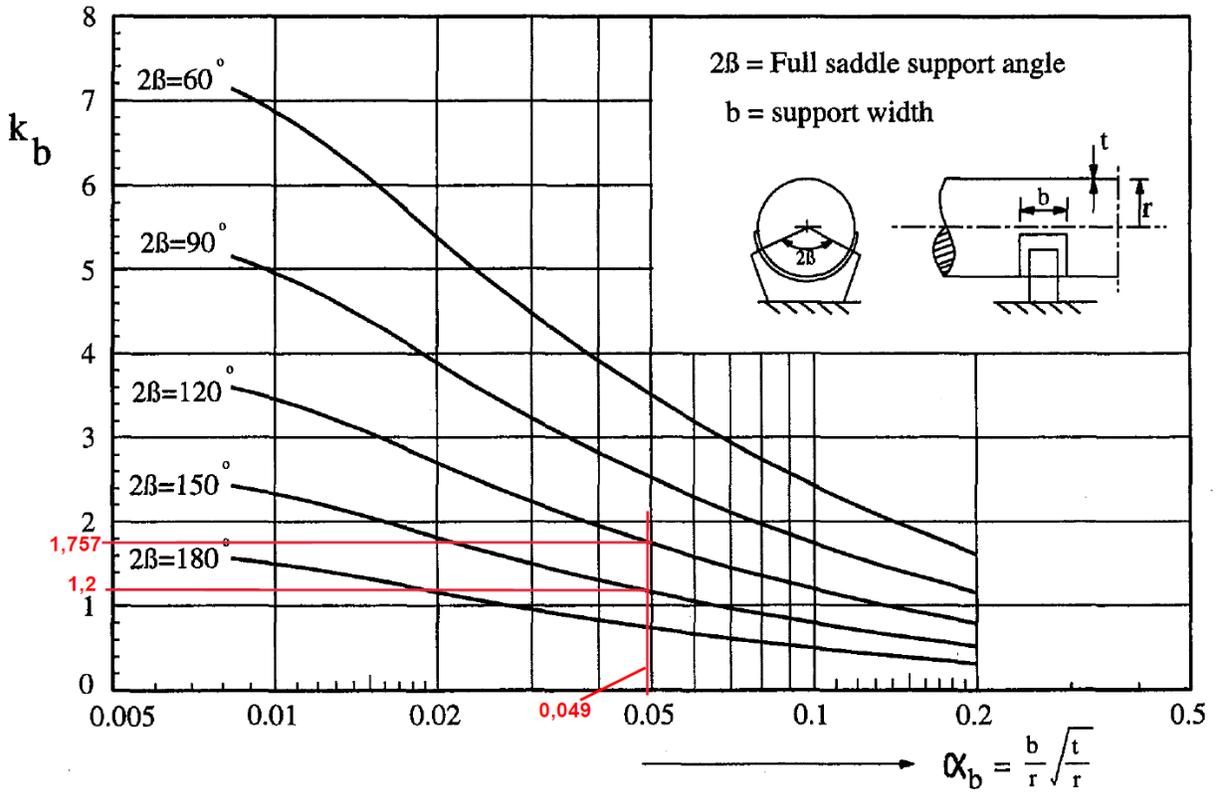


Fig. 2 Support width factor

Figura 11.1.2 Factor de ancho de soporte, k_b

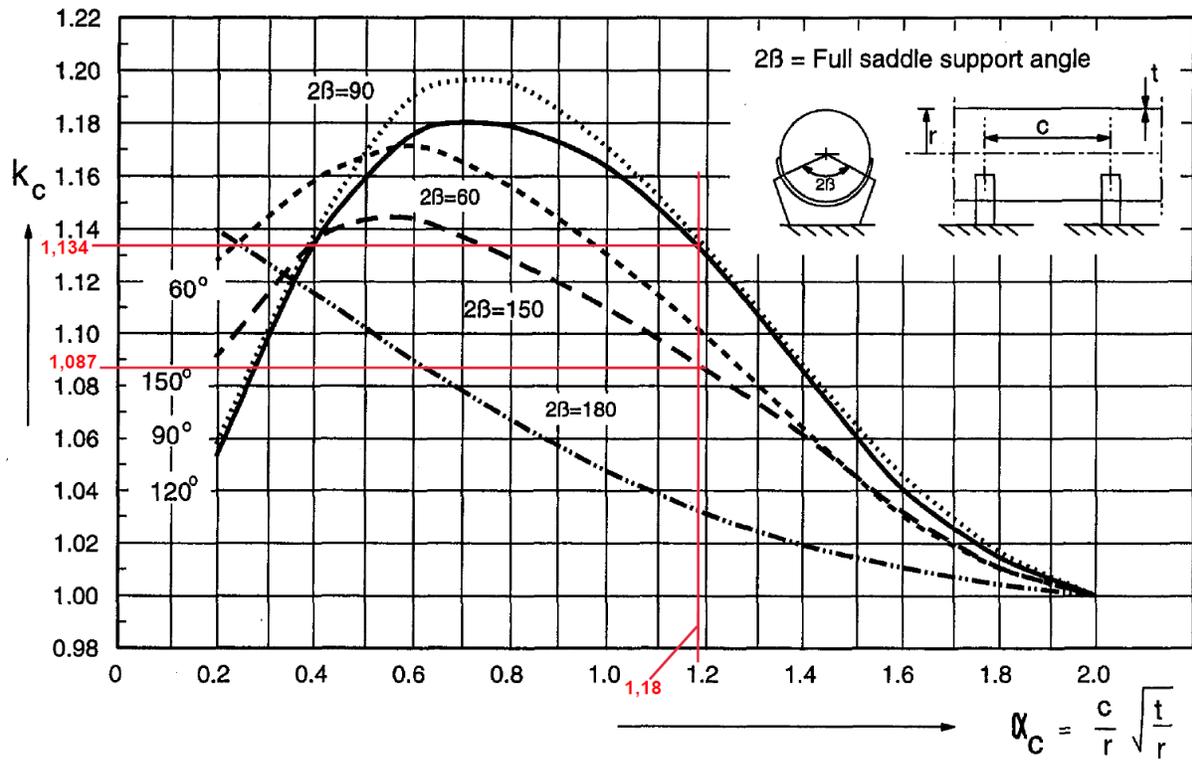


Fig. 3 Support spacing factor

Figura 11.1.3 Factor de espaciamento de soporte, k_c

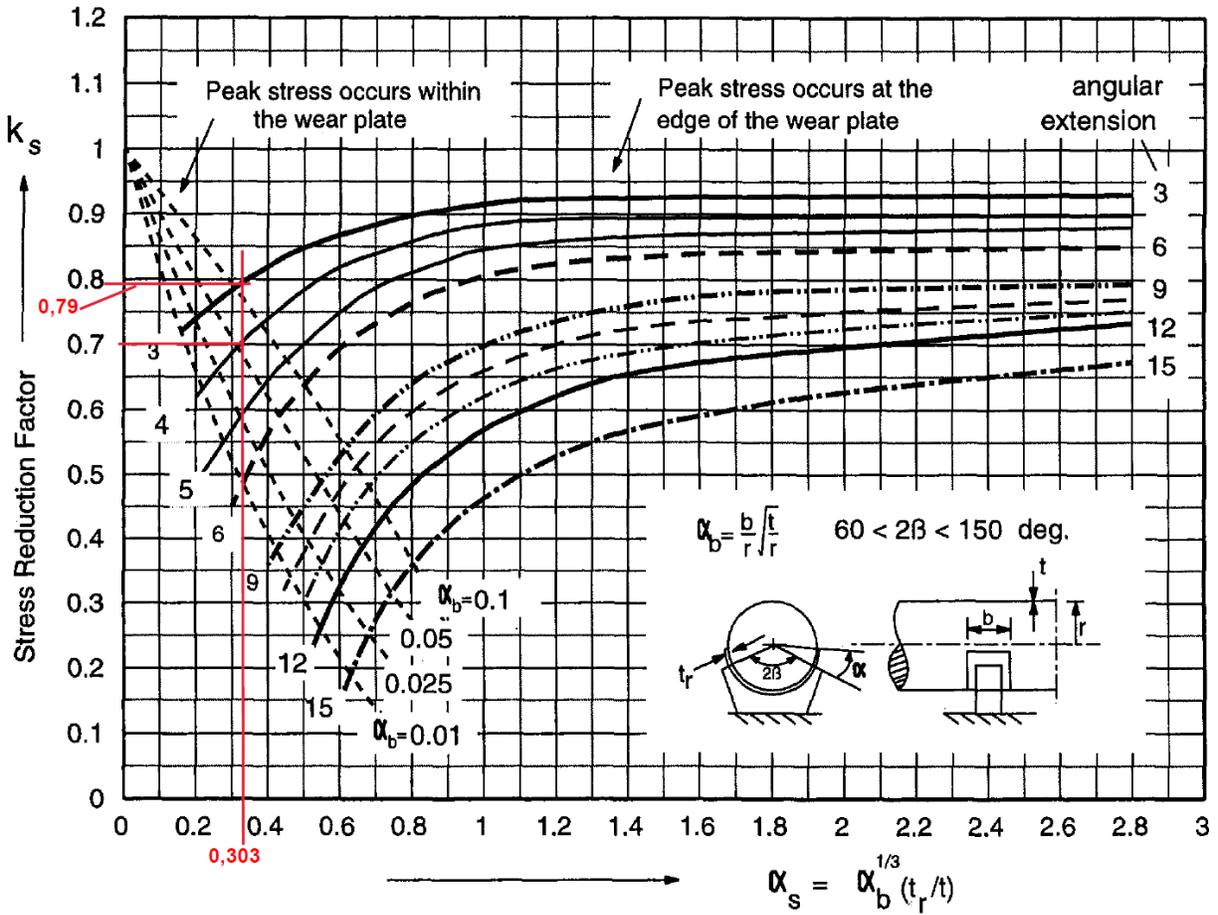


Fig. 4 Stress reduction factor at the wear plate

Figura 11.1.4 Factor de reducción de esfuerzo en la placa de desgaste, k_s

11.2 Figuras y Tablas extraídas de API 579

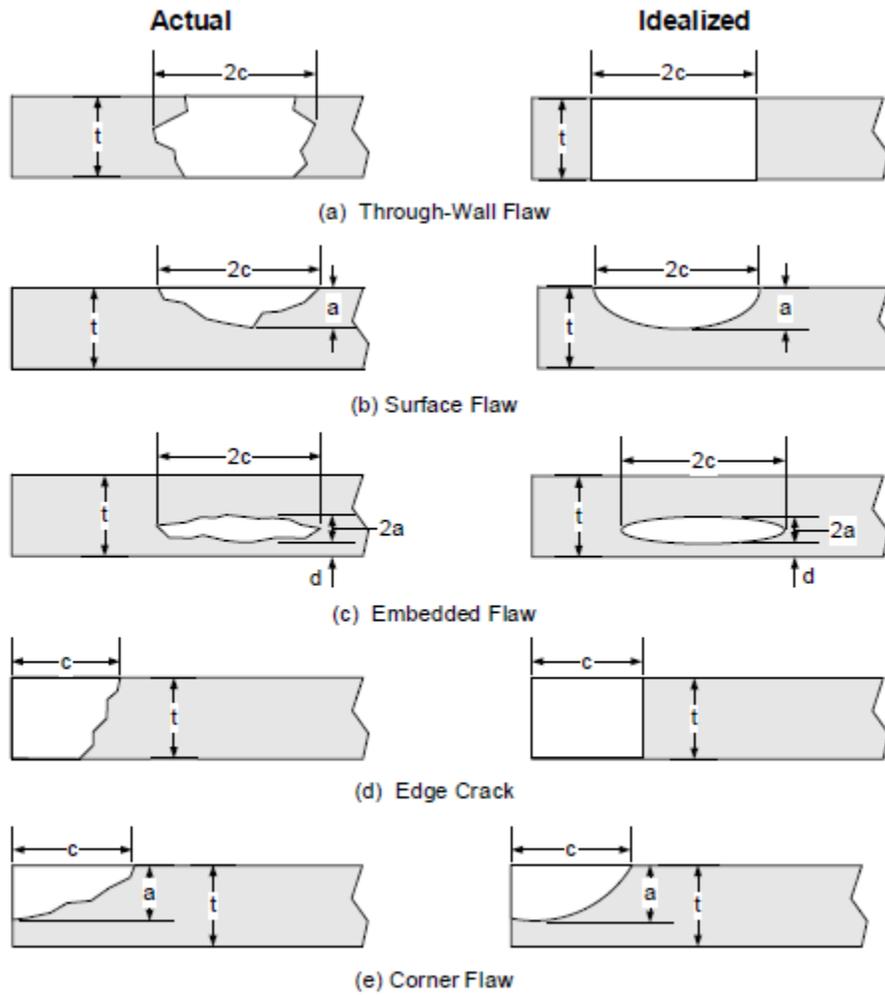


Figure 9.1 – Nomenclature and Idealized Shapes of Crack-Like Flaws

Table 3.2 – Assignment Of Materials To The Material Temperature Exemption Curves In [Figure 3.4](#)

Curve	Material, (1), (2), (6)
A	<p>All carbon and all low alloy steel plates, structural shapes and bars not listed in Curves B, C, and D below.</p> <p>SA-216 Grades WCB and WCC if normalized and tempered or water-quenched and tempered; SA -217 Grade WC6 if normalized and tempered or water-quenched and tempered.</p> <p>The following specifications for obsolete materials: A7, A10, A30, A70, A113, A149, A150 (3).</p> <p>The following specifications for obsolete materials from the 1934 edition of the ASME Code, Section VIII: S1, S2, S25, S26, and S27 (4).</p> <p>A201 and A212 unless it can be established that the steel was produced by a fine-grain practice (5).</p>
B	<p>SA-216 Grades WCA if normalized and tempered or water-quenched and tempered.</p> <p>SA-216 Grades WCB and WCC for thicknesses not exceeding 2 inches if produced to a fine grain practice and water-quenched and tempered.</p> <p>SA -217 Grade WC9 if normalized and tempered.</p> <p>SA-285 Grades A and B</p> <p>SA-414 Grade A</p> <p>SA-442 Grade 55 > 1 in. if not to fine grain practice and normalized.</p> <p>SA-442 Grade 60 if not to fine grain practice and normalized.</p> <p>SA-515 Grades 60</p> <p>SA-516 Grades 65 and 70 if not normalized.</p> <p>SA-612 if not normalized.</p> <p>SA-662 Grade B if not normalized.</p> <p>Except for cast steels, all materials of Curve A if produced to fine grain practice and normalized which are not listed for Curve C and D below.</p> <p>All pipe, fittings, forgings, and tubing not listed for Curves C and D below.</p> <p>Parts permitted from paragraph UG-11 of the ASME Code, Section VIII, Division 1, shall be included in Curve B even when fabricated from plate that otherwise would be assigned to a different curve.</p> <p>A201 and A212 if it can be established that the steel was produced by a fine-grain practice.</p>
C	<p>SA-182 Grades 21 and 22 if normalized and tempered.</p> <p>SA-302 Grades C and D.</p> <p>SA-336 Grades F21 and F22 if normalized and tempered.</p> <p>SA-387 Grades 21 and 22 if normalized and tempered.</p> <p>SA-442 Grades 55 < 1 in. if not to fine grain practice and normalized.</p> <p>SA-516 Grades 55 and 60 if not normalized.</p> <p>SA-533 Grades B and C.</p> <p>SA-662 Grade A.</p> <p>All material of Curve B if produced to fine grain practice and normalized and not listed for Curve D below.</p>

Table 9.2 – Reference Temperature for Use in a Level 1 Assessment

Carbon Steels – 20 Joule or 15 ft-lb Transition Temperature for Each ASME Exemption Curve				
MYS (ksi)	ASME Exemption Curve			
	A (°F)	B (°F)	C (°F)	D (°F)
30	88	50	12	-14
32	83	45	7	-19
34	78	40	2	-24
36	74	36	-2	-28
38	70	32	-6	-32
40	67	29	-9	-35
42	64	26	-12	-38
44	61	23	-15	-41
46	58	20	-18	-44
48	56	18	-20	-46
50	54	16	-22	-48
Low Alloy Steels – 27 Joule or 20 ft-lb Transition Temperature for Each ASME Exemption Curve				
MYS (ksi)	ASME Exemption Curve			
	A (°F)	B (°F)	C (°F)	D (°F)
30	109	71	33	7
32	103	65	27	1
34	97	59	21	-5
36	93	55	17	-9
38	88	50	12	-14
40	85	47	9	-17
42	81	43	5	-21
44	78	40	2	-24
46	75	37	-1	-27
48	73	35	-3	-29
50	70	32	-6	-32
52	68	30	-8	-34
54	66	28	-10	-36
56	64	26	-12	-38
58	62	24	-14	-40
60	60	22	-16	-42
62	59	21	-17	-43
64	57	19	-19	-45
66	56	18	-20	-46
68	54	16	-22	-48
70	53	15	-23	-49
72	51	13	-25	-51
74	50	12	-26	-52
76	49	11	-27	-53
78	48	10	-28	-54
80	47	9	-29	-55

Note: MYS is the Minimum Specified Yield Strength of the material.

Table 9.3 – Plasticity Interaction Factor – Parameter ξ as a Function of L_r^P and X

L_r^P	X																		
	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
0		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.01	1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.001	1.001	1.002	1.003	1.011	1.019	1.023	1.026	1.028	1.029	1.030	1.031	1.032
0.02	1	1.000	1.000	1.001	1.001	1.001	1.002	1.003	1.004	1.006	1.019	1.031	1.038	1.042	1.044	1.046	1.048	1.051	1.047
0.03	1	1.001	1.001	1.001	1.001	1.002	1.003	1.004	1.006	1.008	1.026	1.040	1.048	1.053	1.056	1.059	1.060	1.061	1.062
0.04	1	1.001	1.001	1.001	1.002	1.002	1.004	1.006	1.008	1.011	1.031	1.047	1.056	1.061	1.065	1.068	1.071	1.076	1.081
0.06	1	1.002	1.002	1.003	1.003	1.004	1.006	1.009	1.012	1.016	1.039	1.058	1.068	1.074	1.078	1.083	1.087	1.092	1.099
0.08	1	1.002	1.003	1.004	1.004	1.005	1.008	1.012	1.016	1.020	1.045	1.066	1.077	1.084	1.088	1.093	1.098	1.103	1.112
0.1	1	1.004	1.004	1.005	1.006	1.007	1.011	1.015	1.020	1.024	1.050	1.072	1.084	1.092	1.097	1.102	1.108	1.114	1.122
0.12	1	1.005	1.006	1.007	1.008	1.009	1.013	1.018	1.023	1.028	1.054	1.077	1.090	1.099	1.104	1.110	1.116	1.122	1.132
0.14	1	1.007	1.008	1.009	1.010	1.011	1.016	1.022	1.027	1.032	1.057	1.082	1.096	1.105	1.111	1.117	1.123	1.131	1.142
0.16	1	1.008	1.010	1.011	1.012	1.013	1.019	1.025	1.031	1.035	1.060	1.086	1.101	1.111	1.117	1.123	1.130	1.138	1.149
0.18	1	1.010	1.012	1.013	1.014	1.016	1.022	1.029	1.034	1.038	1.063	1.090	1.106	1.116	1.124	1.129	1.137	1.145	1.158
0.2	1	1.012	1.014	1.015	1.017	1.018	1.026	1.033	1.038	1.041	1.066	1.094	1.110	1.121	1.128	1.136	1.144	1.153	1.166
0.3	1	1.027	1.029	1.031	1.033	1.035	1.045	1.051	1.054	1.055	1.080	1.113	1.133	1.146	1.155	1.165	1.175	1.187	1.205
0.4	1	1.049	1.052	1.054	1.057	1.059	1.068	1.071	1.071	1.071	1.099	1.135	1.157	1.173	1.184	1.196	1.209	1.225	1.248
0.5	1	1.082	1.085	1.087	1.089	1.091	1.096	1.096	1.095	1.095	1.126	1.164	1.187	1.203	1.215	1.229	1.246	1.266	1.292
0.6	1	1.126	1.128	1.129	1.130	1.131	1.131	1.129	1.128	1.129	1.161	1.196	1.218	1.234	1.248	1.262	1.284	1.311	1.337
0.7	1	1.176	1.175	1.175	1.175	1.174	1.171	1.169	1.168	1.169	1.195	1.224	1.242	1.256	1.269	1.288	1.314	1.343	1.365
0.8	1	1.215	1.214	1.212	1.211	1.210	1.204	1.200	1.198	1.196	1.210	1.228	1.241	1.252	1.267	1.291	1.316	1.341	1.355
0.9	1	1.215	1.212	1.210	1.208	1.206	1.198	1.191	1.185	1.180	1.178	1.184	1.190	1.199	1.218	1.240	1.259	1.271	1.272
1	1	1.133	1.130	1.128	1.125	1.123	1.112	1.102	1.094	1.087	1.070	1.067	1.069	1.080	1.098	1.105	1.104	1.094	1.073
1.1	1	0.951	0.948	0.946	0.943	0.941	0.930	0.921	0.912	0.905	0.884	0.877	0.882	0.887	0.879	0.861	0.842	0.820	0.801
1.2	1	0.710	0.708	0.707	0.705	0.703	0.695	0.688	0.682	0.677	0.661	0.658	0.649	0.633	0.613	0.597	0.583	0.571	0.561
1.3	1	0.498	0.497	0.496	0.495	0.494	0.490	0.486	0.483	0.480	0.471	0.461	0.449	0.439	0.426	0.427	0.420	0.415	0.413
1.4	1	0.376	0.375	0.375	0.375	0.374	0.373	0.371	0.370	0.368	0.363	0.361	0.359	0.358	0.357	0.355	0.354	0.351	0.351
1.5	1	0.334	0.334	0.333	0.333	0.333	0.332	0.331	0.331	0.330	0.330	0.331	0.332	0.333	0.332	0.333	0.331	0.333	0.331
1.6	1	0.320	0.319	0.319	0.319	0.319	0.318	0.318	0.317	0.317	0.317	0.319	0.320	0.321	0.320	0.320	0.322	0.319	0.319
1.7	1	0.308	0.308	0.308	0.308	0.308	0.307	0.307	0.306	0.306	0.306	0.307	0.308	0.309	0.309	0.308	0.309	0.308	0.308
1.8	1	0.296	0.296	0.296	0.296	0.296	0.295	0.295	0.294	0.294	0.294	0.295	0.296	0.296	0.295	0.297	0.295	0.297	0.292
1.9	1	0.283	0.283	0.283	0.283	0.282	0.282	0.282	0.281	0.281	0.281	0.281	0.282	0.282	0.284	0.283	0.281	0.280	0.280
2	1	0.268	0.268	0.268	0.268	0.268	0.267	0.267	0.267	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.262	0.261	0.256	0.263	0.266

**Table 9B.15 – Influence Coefficients For A Circumferential Semi-Elliptical Surface Crack
In A Cylinder – Outside Surface**

t/R_i	a/c	a/t	G_1	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
0.01	0.25	0	G_0	0.6152816	-0.3348604	6.2955620	-15.590618	19.299508	-12.488107	3.3010035
			G_1	0.0703566	0.2828152	1.4036169	-0.6511596	-1.2076596	1.0318656	-0.2423741
			G_5	0.6152816	-0.3348604	6.2955620	-15.590618	19.299508	-12.488107	3.3010035
			G_6	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
		0.2	G_0	0.6208998	-0.1664421	6.5968181	-18.807095	26.180692	-18.464818	5.1787192
			G_1	0.0903134	0.1796401	2.4581113	-4.8428461	5.9649997	-4.5970978	1.4302661
			G_5	0.6256175	-0.2460646	7.1786495	-20.690522	29.252089	-20.921801	5.9439866
			G_6	-0.0529280	0.5817080	-2.0439050	2.4908050	-0.3061320	-1.2173360	0.5545260
		0.4	G_0	0.7329950	0.0996250	3.9573730	-7.2526600	4.9136700	-0.6649300	-0.4401500
			G_1	0.1244530	0.2438230	1.9426520	-2.0609400	0.6954550	-0.3004200	0.1292100
			G_5	0.7324580	-0.0790000	5.2132460	-11.267200	11.336950	-5.7116200	1.1111110
			G_6	-0.0724760	0.7545830	-2.6909740	3.3377620	-0.4333620	-1.6647900	0.7776290
		0.6	G_0	0.9335850	-0.0671400	4.9859720	-8.0099800	3.1444570	2.1751370	-1.5670900
			G_1	0.1861600	0.1872070	2.3208790	-2.4591900	0.4288930	0.3550800	-0.1581000
			G_5	0.9308850	-0.2487900	6.4158440	-12.995000	11.662450	-4.8484800	0.6666670
			G_6	-0.0842130	0.8378360	-3.0789330	3.9428740	-0.4659710	-2.2536710	1.1097250
		0.8	G_0	1.2407050	-0.9832700	11.036350	-24.419000	25.074820	-13.247100	3.0448500
			G_1	0.2685320	0.0687020	2.9242790	-3.1935800	-0.0724900	1.6614580	-0.7248500
			G_5	1.2020050	-0.2413600	5.4364160	-5.7446000	-5.6959800	11.276780	-4.5000000
			G_6	-0.0450570	0.4286070	-2.4450330	5.2502870	-4.3532820	0.7113540	0.4546460
0.01	0.5	0	G_0	0.8776607	-0.6729719	3.7721411	-6.5209060	6.3377934	-3.7028038	0.9872447
			G_1	0.1277541	0.4368502	0.4904522	1.0427434	-2.9631236	2.0826525	-0.5184313
			G_5	0.8776607	-0.6729719	3.7721411	-6.5209060	6.3377934	-3.7028038	0.9872447
			G_6	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
		0.2	G_0	0.9005246	-1.0307386	6.3564034	-14.662730	18.900958	-13.111605	3.7340887
			G_1	0.1490274	0.1602062	2.2439024	-4.4879387	5.6373631	-4.4442698	1.4267720
			G_5	0.9044688	-1.0934309	6.8237929	-16.242399	21.630155	-15.453183	4.5238507
			G_6	-0.0216090	0.2225620	-0.7436250	0.8569840	-0.1124830	-0.3230500	0.1247120
		0.4	G_0	1.0063880	-0.7425700	3.1260260	-2.1867000	-3.0931200	5.1298930	-2.0520500
			G_1	0.1789440	0.3206900	1.1011660	-0.2780300	-1.7360100	1.6648710	-0.5147200
			G_5	0.9827660	-0.5544700	2.1195940	0.3228700	-6.2642600	7.0697670	-2.5000000
			G_6	-0.0330000	0.2558440	-1.2392500	2.7155410	-2.7845300	1.1748480	-0.0894600
		0.6	G_0	1.1876880	-1.1514600	4.3134430	-3.6414000	-3.2248100	6.5781370	-2.7782500
			G_1	0.2348560	0.1694010	1.5310330	-0.9297400	-1.2048400	1.4747130	-0.5037800
			G_5	1.1736920	-1.0985200	4.0914840	-3.4273500	-2.7996400	5.6581030	-2.3260900
			G_6	-0.0241400	0.1054660	-0.3692100	0.1480170	1.3452060	-2.2134300	1.0080860
		0.8	G_0	1.3768550	-1.1807900	3.4327750	-1.9675000	-3.7422900	5.2586230	-1.8511600
			G_1	0.2827170	0.2258060	0.9136330	0.4871590	-2.5046300	1.9013960	-0.5002900
			G_5	1.3852980	-1.4598800	4.8824450	-5.0567200	-0.7333900	3.9649120	-1.6666700
			G_6	-0.0069900	-0.1354100	0.5129600	-0.1715000	-1.4812600	2.0791380	-0.7989500

**Table 9B.15 – Influence Coefficients For A Circumferential Semi-Elliptical Surface Crack
In A Cylinder – Outside Surface**

t/R_i	a/c	a/t	G_1	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
0.01667	0.125	0	G_0	0.4065238	0.7772483	3.8861644	-12.573943	16.760207	-11.014593	2.8706957
			G_1	0.0320270	0.1825342	2.2670449	-2.7076615	1.2088194	-0.3777430	0.0763155
			G_5	0.4065238	0.7772483	3.8861644	-12.573943	16.760207	-11.014593	2.8706957
			G_6	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
		0.2	G_0	0.4141030	1.1370353	1.7918721	-8.3657982	8.0276077	-5.1090766	1.3043557
			G_1	0.0486343	0.0164272	3.9099112	-9.0029835	12.437460	-9.6860424	2.9828172
			G_5	0.4143081	1.1612439	1.6725006	-8.0389787	7.5553433	-4.7733918	1.2122682
			G_6	-0.0257390	0.2239250	-1.0656070	1.3604470	0.3212500	-1.4129050	0.6046200
		0.4	G_0	0.4860310	1.6014030	0.4174570	-1.7801100	0.9884490	0.0450910	-0.2110000
			G_1	0.0716230	0.3907820	1.7772010	-1.2379600	-0.5878700	0.4930510	-0.0604600
			G_5	0.4825390	1.5260960	1.0116470	-4.0246700	5.0139140	-3.3630800	0.8888890
			G_6	-0.0202900	-0.2224800	1.2564450	-4.3167000	7.7764130	-6.6030000	2.1296120
		0.6	G_0	0.6270060	1.9158750	0.3750140	0.7243790	-4.3115900	3.7865410	-1.0734300
			G_1	0.1097630	0.4925440	1.7137970	-0.4041900	-1.8971000	1.1354540	-0.1307000
			G_5	0.6308030	1.6413760	2.5244720	-8.8239600	8.5609730	-6.7236500	2.2222220
			G_6	-0.0654530	0.4089380	-2.7275000	5.4276500	-3.4503160	-0.3170070	0.7307650
		0.8	G_0	0.8834920	1.5499750	5.9525350	-9.3777300	1.6582560	2.6247130	-0.7903400
			G_1	0.1827450	0.4170240	3.0645390	-2.2689800	-1.8835600	2.2280410	-0.5460400
			G_5	0.8486090	2.5957920	-2.1629000	17.323570	-41.416700	38.306820	-11.000000
			G_6	-0.0526800	0.0313980	-0.9515500	1.6109290	0.6934160	-2.4678000	1.1362870
0.01667	0.25	0	G_0	0.6152816	-0.3348694	6.2955620	-15.590618	19.299508	-12.488107	3.3010035
			G_1	0.0703566	0.2828152	1.4036169	-0.6511596	-1.2076596	1.0318656	-0.2423741
			G_5	0.6152816	-0.3348694	6.2955620	-15.590618	19.299508	-12.488107	3.3010035
			G_6	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
		0.2	G_0	0.6268151	-0.2659538	7.2065345	-20.567488	28.869672	-20.486698	5.7761489
			G_1	0.0907196	0.1725963	2.5006366	-4.9586990	6.1276304	-4.7110563	1.4617796
			G_5	0.6251326	-0.2394193	7.1122784	-20.448049	28.825683	-20.563129	5.8286449
			G_6	-0.0564090	0.5906920	-2.0901230	2.5558090	-0.2933150	-1.2772490	0.5764810
		0.4	G_0	0.7331060	0.0986810	3.9472550	-7.1889400	4.7837550	-0.5451500	-0.4819600
			G_1	0.1237230	0.2464690	1.9255840	-2.0144800	0.6420620	-0.2712700	0.1223800
			G_5	0.7315800	-0.0604700	5.0518000	-10.721000	10.434690	-4.9906700	0.8888890
			G_6	-0.0146100	-0.1583700	1.0586750	-3.4445700	5.7766210	-4.7213100	1.5035680
		0.6	G_0	0.9330720	-0.0910200	5.1514030	-8.5062000	3.9372450	1.5522690	-1.3786200
			G_1	0.1835580	0.2173130	2.1201030	-1.8419100	-0.4959200	1.0292210	-0.3502900
			G_5	0.9242220	-0.1379100	5.6239620	-10.482500	7.7246490	-1.8459600	-0.2222200
			G_6	-0.0276100	-0.0847600	0.6326700	-2.4527000	4.7781310	-4.3193100	1.4735860
		0.8	G_0	1.2480880	-1.2667900	13.231880	-31.738500	37.283310	-23.122200	6.1251700
			G_1	0.2617530	0.1907690	1.9836910	0.0718510	-5.5586600	6.0836580	-2.0974100
			G_5	1.1785120	0.2633730	1.5799440	7.4390720	-27.718600	29.000000	-10.000000
			G_6	-0.0372000	0.0294390	-0.3454900	1.0579850	-1.3468700	0.8809930	-0.2388600

**Table 9B.15 – Influence Coefficients For A Circumferential Semi-Elliptical Surface Crack
In A Cylinder – Outside Surface**

t/R_1	a/c	a/t	G_1	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
0.01667	0.5	0	G_0	0.8776607	-0.6729719	3.7721411	-6.5209060	6.3377934	-3.7028038	0.9872447
			G_1	0.1277541	0.4368502	0.4904522	1.0427434	-2.9631236	2.0826525	-0.5184313
			G_5	0.8776607	-0.6729719	3.7721411	-6.5209060	6.3377934	-3.7028038	0.9872447
			G_6	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
		0.2	G_0	0.9022613	-1.0595157	6.5513251	-15.271446	19.858891	-13.849252	3.9547586
			G_1	0.1492632	0.1564498	2.2690315	-4.5619815	5.7476801	-4.5263194	1.4510330
			G_5	0.9029354	-1.0732156	6.6901441	-15.831657	20.969482	-14.922494	4.3567685
			G_6	-0.0240560	0.2342620	-0.7930600	0.9271080	-0.1130250	-0.3740260	0.1454300
		0.4	G_0	1.0074290	-0.7627700	3.2930000	-2.7766500	-2.0930300	4.3235700	-1.8034700
			G_1	0.1810320	0.2833580	1.3218690	-0.8922400	-0.8601000	1.0459710	-0.3429800
			G_5	0.9858560	-0.6144600	2.5659140	-1.2397100	-3.5787400	4.8558140	-1.8000000
			G_6	-0.0338400	0.2387950	-1.1681400	2.5946840	-2.7007500	1.1765800	-0.1073300
		0.6	G_0	1.1851510	-1.1065900	4.0604300	-2.9480500	-4.2109900	7.2804210	-2.9762600
			G_1	0.2335280	0.1829380	1.4758450	-0.8294800	-1.2826600	1.4906960	-0.4992200
			G_5	1.1724980	-1.0832900	4.0212020	-3.3213400	-2.8475900	5.6324110	-2.3043500
			G_6	-0.0275600	0.1023610	-0.3536000	0.1087530	1.4111820	-2.2584400	1.0173030
		0.8	G_0	1.3763340	-1.1705800	3.4426520	-2.1143000	-3.3895100	4.9216180	-1.7364000
			G_1	0.2820140	0.2322400	0.9005230	0.4878420	-2.4663700	1.8500330	-0.4797300
			G_5	1.3815880	-1.3958500	4.5246880	-4.1377600	-1.9430100	4.7522810	-1.8666700
			G_6	-0.0123300	-0.1322000	0.4935200	-0.1065200	-1.5677300	2.1435930	-0.8183300
0.01667	1	0	G_0	1.1977992	-0.5244870	0.1498299	2.3284866	-5.1058499	4.3469049	-1.3487980
			G_1	0.1870117	0.6987352	0.1316900	0.7269255	-2.5259384	2.1756251	-0.6540458
			G_5	1.1977992	-0.5244870	0.1498299	2.3284866	-5.1058499	4.3469049	-1.3487980
			G_6	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
		0.2	G_0	1.2159041	-1.2019721	4.8943491	-13.164862	20.514432	-16.542122	5.3339888
			G_1	0.2138478	0.2009657	3.1365782	-8.7806790	13.020781	-10.439196	3.3770529
			G_5	1.2336102	-1.5324242	7.1847065	-20.827179	33.758570	-27.923695	9.1765536
			G_6	0.0004290	-0.0477510	0.2303150	-0.2454810	-0.4980090	1.1046740	-0.5435480
		0.4	G_0	1.3057270	-1.0008200	1.8572720	-0.6808000	-2.8231500	4.0709330	-1.6411400
			G_1	0.2250957	0.1870147	3.1086959	-8.6990069	12.827333	-10.126798	3.2062338
			G_5	1.2693430	-0.6672200	0.1805440	3.0628380	-6.8370600	5.9627910	-1.9000000
			G_6	-0.0555600	0.6002060	-3.0806100	7.2729560	-8.4525400	4.5719390	-0.8563900
		0.6	G_0	1.4097520	-1.1958700	2.1136310	-1.1728300	-1.9231000	3.1722290	-1.2928000
			G_1	0.2528090	0.4962060	0.8029830	-0.6609800	-1.0059000	1.4049960	-0.5248000
			G_5	1.3821790	-0.9982800	1.2826480	0.0761910	-2.2401100	2.3906980	-0.8000000
			G_6	-0.0539000	0.5709100	-2.9238200	6.9536840	-8.2458800	4.6543540	-0.9553500
		0.8	G_0	1.5261100	-1.3576900	1.9596150	-0.7444900	-1.8536800	2.4558510	-0.8665000
			G_1	0.2798340	0.4788400	0.6925290	-0.4412500	-0.9713700	1.1277000	-0.3828300
			G_5	1.4934890	-1.1805900	1.5372220	-1.0351600	0.5002050	-0.6976700	0.5000000
			G_6	-0.0364900	0.1772770	-0.4732300	0.4368740	0.1557290	-0.4866500	0.2265000

12.ANEXOS

Anexo A. Cálculo de carga en las cunas de apoyo

Calculo analítico de carga sobre cuna

En el cálculo analítico de la carga en la cuna se considerarán las siguientes premisas:

- Los cálculos de pesos del cuerpo cilíndrico, cabezal y placa de desgaste se realizarán en condición de corroído.
- El área y volumen de ambos cabezales (juntos) equivalen al de una esfera hueca.
- No se considera el peso de las cunas.
- Se desprecia el peso de las conexiones

Primero, se determina el volumen de metal del equipo a partir de lo siguiente:

$$Vol\ metal = Vol\ Cilindro\ Hueco + Vol\ Esfera\ Hueca + Volumen\ Placa\ Desgaste$$

$$Vol\ metal = 2\pi R_m L t + \frac{4}{3}\pi(R_{eh}^2 - R_h^2) + \theta_r \frac{\pi}{180^\circ} \left(R_e + \frac{t_r}{2}\right) b t_r \quad (Ec. A.1)$$

$$Vol\ metal = \left[2\pi(1700,835)(23460)(24,13) + \frac{4}{3}\pi(1708,10^2 - 1693,57^2) + 151,62^\circ \frac{\pi}{180^\circ} \left(1712,9 + \frac{20}{2}\right)(700)(20) \right] \left(\frac{1}{10^9}\right)$$

$$Vol\ metal = 6,705\ m^3$$

Luego, el peso del cuerpo se consigue con:

$$Peso\ cuerpo = Vol\ metal \times Densidad\ Acero \times g \quad (Ec. A.2)$$

$$Peso\ cuerpo = 6,705\ m^3 \times 7850 \frac{kg}{m^3} \times 9,8066 \frac{m}{s^2}$$

$$Peso\ metal = 516200\ N$$

El volumen de producto se obtiene de:

$$Vol\ producto = Volumen\ Cilindro + Volumen\ Esfera$$

$$Vol\ producto = \pi R^2 L + \frac{4}{3}\pi R_c^3 \quad (Ec. A.3)$$

$$Vol\ producto = \left[\pi(1688,77)^2(23460) + \frac{4}{3}\pi(1693,57)^3 \right] \left(\frac{1}{10^9}\right)$$

$$Vol\ producto = 230,54\ m^3$$

Luego, el peso de producto se consigue con:

$$Peso\ producto = Vol\ producto \times G \times \rho_A \times g \quad (Ec. A.4)$$

$$\text{Peso producto} = 230,54 \text{ m}^3 \times 0,56 \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 9,8066 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\text{Peso producto} = 1266057 \text{ N}$$

El peso total se obtiene de:

$$\text{Peso total} = \text{Peso cuerpo} + \text{Peso producto} \quad (\text{Ec. A.5})$$

$$\text{Peso total} = 1782257 \text{ N}$$

Teniendo en consideración que las cunas están ubicadas simétricamente en el equipo, la carga Q sobre cada cuna se obtiene de:

$$Q_a = \frac{\text{Peso total}}{2}$$

$$Q_a = 891129 \text{ N}$$

Carga sobre cuna extraída de modelo de Ansys Workbench

En la solución del modelo se incluye el cálculo de las reacciones entre la cuna y el suelo por efecto del peso propio del equipo y del producto almacenado. Para fines de este estudio es de interés el valor de la reacción en la dirección Y, según se muestra en la figura 12.1.

Details of "Force Reaction"	
Definition	
Type	Force Reaction
Location Method	Boundary Condition
Boundary Condition	Fixed Support
Orientation	Global Coordinate System
Suppressed	No
Options	
Result Selection	Y Axis
<input type="checkbox"/> Display Time	End Time
Results	
Maximum Value Over Time	
<input type="checkbox"/> Y Axis	4,6132e+005 N
Minimum Value Over Time	
<input type="checkbox"/> Y Axis	4,6132e+005 N
Information	

Figura 12.1 Resultados fuerza de reacción total

Entonces se obtiene:

$$Q^* = 461320 \text{ N}$$

Sin embargo, el valor anterior también incluye el peso de las cunas, el cual no es de interés para nuestro análisis. En este sentido, se procedió a suprimir del modelo toda la geometría

correspondiente al cuerpo cilíndrico y el cabezal, además, de las condiciones de borde asociadas a estos componentes y la carga hidrostática de producto. De lo anterior, se obtiene el modelo de cuna mostrado en la figura 12.2.

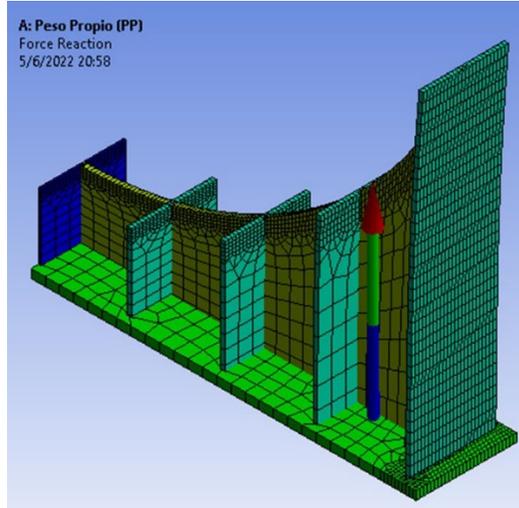


Figura 12.2 Modelo de cuna en Ansys

De este modo, se logra obtener la reacción en la cuna por efecto de su propio peso según se indica en figura 12.3.

Details of "Force Reaction"	
Definition	
Type	Force Reaction
Location Method	Boundary Condition
Boundary Condition	Fixed Support
Orientation	Global Coordinate System
Suppressed	No
Options	
Result Selection	Y Axis
<input type="checkbox"/> Display Time	End Time
Results	
Maximum Value Over Time	
<input type="checkbox"/> Y Axis	6474,3 N
Minimum Value Over Time	
<input type="checkbox"/> Y Axis	6474,3 N
Information	

Figura 12.3 Resultados de reacción por efecto del peso de la cuna

Entonces se obtiene:

$$Q^{**} = 6474,30 \text{ N}$$

Finalmente, la carga de la cuna por efecto de peso propio del equipo y del producto se obtiene de:

$$Q_{1/4} = Q^* - Q^{**} = 461320 - 6474,30 = 454845,7 \text{ N}$$

Considerando que se ha modelado $\frac{1}{4}$ de equipo, la carga sobre la cuna será 2 veces el valor anterior:

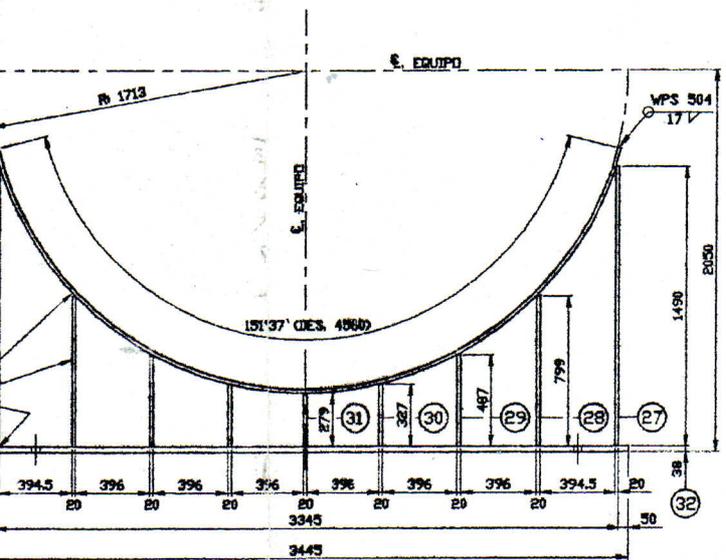
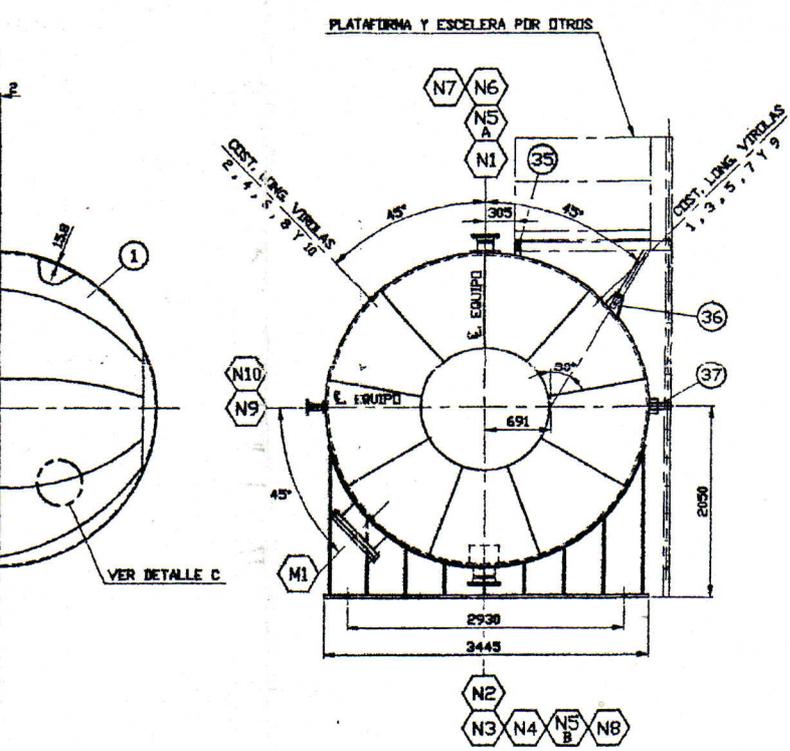
$$Q = 909691,4 N$$

Si se compara el valor anterior con respecto al valor determinado analíticamente se tiene:

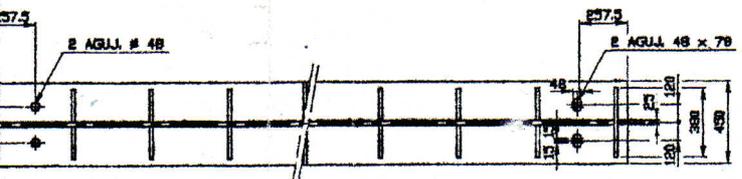
$$Error = \frac{909691,4 - 891129}{891129} \times 100 = 2,08\%$$

Se evidencia un error cercano al 2%. El valor de carga extraído del modelo en Ansys será usado en la aplicación de los métodos de Zick y Ong.

Anexo B. Plano del Equipo Estudiado

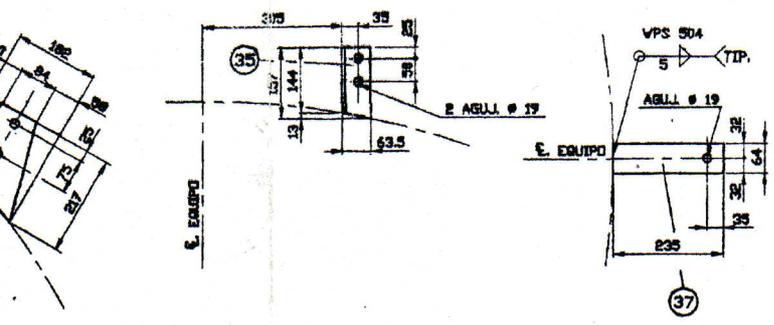


DETALLE DE CUNA



DETALLE CUNA FIJA

DETALLE CUNA MOVIL



POS	CANT	SCH	SERVICIO	TIPO	SERIE	PROY. mm.	OBSERV
N1	1	80	ENTRADA DE LPG	WNRF	150#	1913	C/REFUERZO
N2	1	8"	SALIDA DE LPG	WNRF	150#	1913	C/REFUERZO
N3	1	4"	RETORNO DE LPG	WNRF	150#	1913	C/REFUERZO
N4	1	3"	VALV. DE SEGURIDAD	WNRF	150#	1913	C/REFUERZO
N5	2	3"	BRIDLE	WNRF	150#	1913	C/REFUERZO
N6	1	2"	CONEX. PLACA RUPTURA	WNRF	150#	1913	C/REFUERZO
N7	1	2"	VENTED	WNRF	150#	1913	C/REFUERZO
N8	1	2"	DRENAJE	WNRF	150#	1913	C/REFUERZO
N9	1	2"	TERMOMETRO	WNRF	150#	1913	C/REFUERZO
N10	1	2"	MANOMETRO	WNRF	150#	1913	C/REFUERZO
M1	1	20" ESP. 5/8"	ENTRADA DE HOMBRE	WNRF	150#	1963	C/BRIDA CIEGA Y REFUERZO

MATERIALES

ENVUELTA	A-516 GR. 70	ACCESORIOS	A-234 WPB
CABEZALES	A-516 GR. 70	JUNTAS	KLINGERIT
CUNAS	A-36	CUPLAS	A-105
BRIDAS	A-105	ESPARR./TUERCAS	A-193 B7 A-194 B4
NIPLES	A-106 GR. B		
REFUERZOS CONEX.	A-516 GR. 70		

DATOS DE DISEÑO

CODIGO DE DISEÑO	ASME VIII-DIV. 1 EDICION 1995 AD. 9B
SERVICIO	TANQUE ALMACENAMIENTO LPG
CAPACIDAD	227 M ³
PRESION DE DISEÑO	17.25 KG/CM ²
TEMPERATURA DE DISEÑO	66 °C
ESPESOR POR CORROSION	1.27 mm.
PESO VACIO	62 TN.
PESO LLENO DE AGUA	289 TN.
ESPESOR ENVUELTA	25.4 mm.
ESPESOR CABEZALES SEMIESFERICO	15.8 mm.
RADIOGRAFIADO	SEGUIR FULL
VIENTO	CIRSOC 102
SISMO	CIRSOC 103
NIEVE	SIBRECARGA 75 KG/M ²
TERMINACION EXTERIOR	SUPERFICIES ARENADAS
PINTURA EXTERIOR	APLICACION DE ANTIOXIDO CARBOLINE 858/890

PLANDS COMPLEMENTARIOS

DETALLE DE PESCANTE LATERAL _____ S/PL. N° 118
 PLACA DE IDENTIFICACION _____ S/PL. N° 119

- NOTAS:
 1. LAS BRIDAS SERAN SEGUN ANSI B 16.5 Y SE SOLDARAN CON LOS AGUJEROS PARA BULONES A HORCAJADAS DE LOS EJES PRINCIPALES
 2. LAS PROYECCIONES INDICADAS EN LA LISTA DE CONEXIONES ESTAN TOMADAS DE CARA DE BRIDA A E. DEL EQUIPO
 3. EFECTUAR AGUJEROS PARA VENTED # 6 mm. EN CHAPAS DE REFUERZOS

L.M. 1 HOJA

REV	FECHA	EMISION	DESCRIPCION	DIBUJO	REVISO	APROBO
1	13/10/98					

TECSA INGENIERIA
 DEFENSA 820 (1706) - TEL./FAX. 659-3307

CLIENTE	OBRA	REFERENCIA

DISEÑADO	FECHA	FIRMA	DENOMINACION DEL PLANO
	13/10/98	C.	TANQUE ALMACENAMIENTO LPG
REVISADO	13/10/98	H. SANZI	CAP. 227 M ³
APROBADO	13/10/98	H. SANZI	CONJUNTO Y DETALLES

ESCALAS	TODAS LAS MEDIDAS EN MM.	PRODUCTO	CODIGO	NUMERO	TAMARO	MODIF.
1:40		03	CM	117	A1	0

13.REFERENCIAS

- [1] ASME. (2019). Boiler and Pressure Vessel Code. Section II. Part D, Properties (Metric). American Society of Mechanical Engineers.
- [2] ASME. (2019). Boiler and Pressure Vessel Code. Section VIII. Div. 1. American Society of Mechanical Engineers.
- [3] ASME. (2019). Boiler and Pressure Vessel Code. Section VIII. Div. 2, Alternative Rules. American Society of Mechanical Engineers.
- [4] ASME. (2019). Boiler and Pressure Vessel Code. Section IX. Qualification Standard for Welding, Brazing, and Fusing Procedures; Welders; Brazers; and Welding, Brazing, and Fusing Operators. American Society of Mechanical Engineers.
- [5] API 579-1/ASME FFS-1. (2016). Fitness For Service. American Petroleum Institute and American Society of Mechanical Engineers.
- [6] El-Abbasi N., Meguid S.A. y Czekanski A. (2001). Three-dimensional Finite Element Analysis of Saddle Supported Pressure Vessels. International Journal of Mechanical Sciences. Volumen 43. Elsevier.
- [7] Kumar V., Kumar N., Angra S. y Sharma P. (2014). Design of Saddle Support for Horizontal Pressure Vessel. International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering. World Academy of Science, Engineering and Technology.
- [8] Motashar F., Tooth A. (1992). The Support of Cylindrical Vessels on Rigid and Flexible Saddles – An Improved Analysis. En V. Křupka y M. Drdácý (Eds.), Contact Loading and Local Effects in Thin-walled Plated and Shell Structures (pp. 62-69). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [9] Ong L.S. (1995). Peak Stress and Fatigue Assessment at the Saddle Support of a Cylindrical Vessel. Journal of Pressure Vessel Technology. Volumen 117 (pp. 305-311). ASME.
- [10] Tooth, A. S., Duthie, G. C., White, G. C, and Carmichael, J. (1982). Stresses in Horizontal Storage Vessels - A Comparison of Theory and Experiment. Journal of Strain Analysis. Vol. 17 (pp. 169-176).
- [11] Zick L.P. (1951). Stresses in Large Horizontal Cylindrical Pressure Vessel on Two Saddle Supports. Welding Journal Research Supplement (pp.556-566).