

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL  
FACULTAD REGIONAL HAEDO**

LUGAR:  
BUENOS AIRES

FECHA: 04/04/2023

INFORME:  
Rev.1

CANTIDAD HOJAS

Texto: 28

Anexos = 6

## **ESPECIALIZACIÓN DISEÑO DE RECIPIENTES CONTENEDORES DE PRESIÓN**

### **TÍTULO**

**VERIFICACIÓN DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE LA UNIÓN DEL CUERNO DE LA CUNA Y EL CUERPO CILÍNDRICO DE UN RECIPIENTE DE GAS LICUADO  
CÓDIGO ASME SECCIÓN VIII DIVISIÓN 1**

### **AUTOR**

**Fabián Jeandet**

### **ÍNDICE**

- 1- Objetivo
- 2- Introducción
- 3- Datos generales necesarios para el cálculo
  - Dimensiones
  - Estado de carga
  - Tensiones admisibles
  - Otros elementos que entienda incorporar
- 4- Procedimiento de cálculo y resultados – Método de Zick
- 5- Procedimiento de cálculo y resultados – Método de ONG
  - Cuna elástica
  - Cuna rígida
- 6- Procedimiento de cálculo y resultados – Método de Elementos Finitos
  - Cuna elástica
  - Cuna rígida
- 7- Comparación de resultados de los tres procedimientos
- 8- Procedimiento de soldadura
- 9- Evaluación de una fisura
- 10-Conclusiones finales
- 11-Anexos

## 1- Objetivo

Realizar un estudio comparativo del cálculo de la tensión circunferencial en el extremo de los cuernos de la cuna, sobre el recipiente, utilizando tres métodos distintos Zick, Ong y Elementos Finitos. Por último elaborar procedimiento de soldadura y evaluación de una fisura por API 579.

## 2- Introducción

El sistema de soportación, las cunas, en recipientes horizontales fueron y son diseñados desde un inicio por el método desarrollado por Zick en 1951. Este método Ingenieril de diseño fue introducido posteriormente en ASME como una práctica recomendada para el diseño.

En las últimas décadas se han detectado fallas estructurales en la zona de los extremos de los cuernos de las cunas (ver figura 1), después de la placa de desgaste, sobre las paredes del recipiente. Esta falla es consecuencia de la discontinuidad estructural entre el apoyo y recipiente. Ante la carga de peso propio y fluido, las cargas se transfieren de la cáscara a los soportes, las reacciones están muy concentradas en las cunas e inducen tensiones locales altas.

A partir de la detección de este tipo de fallas (ocurrían incluso en recipientes nuevos durante la prueba hidráulica), el investigador L.S.Ong realizó un estudio analítico considerando diferentes variables geométricas y dimensionales que intervienen en el diseño del componente. Determinó que las tensiones circunferenciales calculadas por el método de Zick en los bordes de las cunas, están subdimensionadas por un factor de 2 o más, dependiendo de que el sistema de soportación sea flexible o rígido. Es decir, las tensiones circunferenciales conducían a valores menores que los reales. De esta manera el estado de tensión habría que incrementarse en un factor 2 o 3, disminuyendo el margen de seguridad del equipo con la probabilidad de plastificación.

Dicho estudio de Ong posibilitó que se verifique el componente utilizando estudios mas rigurosos.

En este trabajo se desarrollan y comparan los procedimientos de cálculo para la tensión circunferencial en los extremos de la cuna por los métodos Zick, Ong y Elementos Finitos Ansys sometidos a los estados de carga de peso propio y del líquido interior, adoptado lleno de agua.

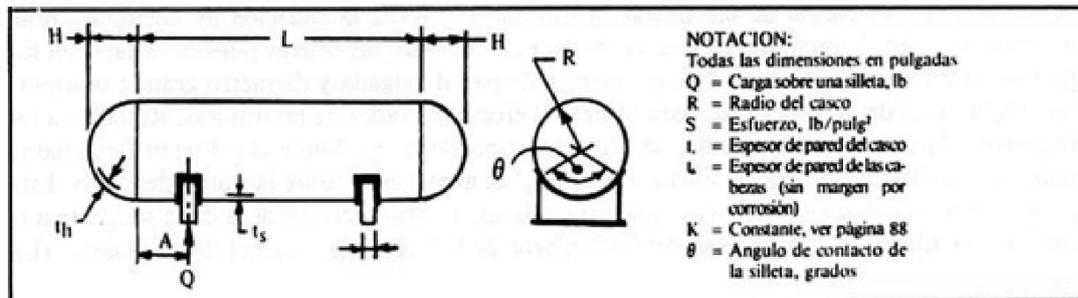


Figura 1: recipiente horizontal soportado en dos cunas. A la derecha zona de falla, tensión circunferencial sub-dimensionada.

## 3- Datos generales necesarios para el cálculo

Dimensiones	Plano "Tanque de almacenamiento LPG cap. 222 m <sup>3</sup> "
Diseño	ASME VIII Div. 1
Servicio	Tanque de almacenamiento LPG
Capacidad	227 m <sup>3</sup>
Presión diseño	17,25 Kg/cm <sup>2</sup>
Temp. diseño	66°C
Esp. por corrosión	1,27 mm
Peso vacío	62 Tn
Peso lleno agua	289 Tn
Material cabezales	A-516 Gr. 70 (tensión admisible = 137,9 Mpa)
Material envuelta	A-516 Gr. 70 (tensión admisible = 137,9 Mpa)
Material cuna	A-36
Estado carga	Pesos propio + peso lleno con agua

#### 4- Procedimiento de cálculo y resultados – Método de Zick



Según plano y considerando recipiente nuevo:

L = 23460 mm

R (radio medio del cabezal) = 1700,2 mm

Como  $23460 \geq 1700,2 \cdot 8 = 13601,6$ , la fórmula para el cálculo de la tensión circunferencial sobre el recipiente, en el borde de los cuernos de la cuna, es la siguiente:

$$S_4 = \frac{Q}{4t_s \left( b + 1,56\sqrt{Rt_s} \right)} - \frac{3K_6 Q}{2t_s^2}$$

Donde:

S<sub>4</sub>: Tensión circunferencial en el cuerno de la cuna

Q: Reacción de vínculo en la cuna

t<sub>s</sub> (Espesor del recipiente virola): 25,4 mm

R (Radio medio del recipiente): 1700,2 mm

B (ancho de la cartela de la cuna): 380 mm

K<sub>6</sub>: Constante que depende de la relación A/R y θ.

θ: Angulo de contacto entre la cuna y el recipiente

A (Distancia entre LT y centro de cuna): 3300 mm

- Cálculo de θ (geométrico, de plano del diseñador):

$$\theta = 2 \cdot \cos^{-1} (501,9/1687,5) = 145,39^\circ$$

- Cálculo de la constante K<sub>6</sub>

Para obtener el valor de K<sub>6</sub>, debemos entrar a la gráfica de la figura 2 con el valor de  $A/R = 3300/1700,2 = 1,94$  por la parte inferior del siguiente gráfico y cortamos a la curva en  $\theta = 145^\circ$ , obteniendo un  $K_6 = 0,035$ .

- Cálculo de la reacción de vínculo en una cuna, Q

Para la determinación del valor de Q, se utilizó el resultado de la fuerza de reacción en la base del soporte de la cuna del programa de elementos finitos Ansys. Las cargas, como se dijo anteriormente, son el peso propio y peso de agua con el tanque lleno. De esta manera se utilizan en ambos casos mismos valores para no influenciar en los resultados.

Q = 1440900 N (valor sobre una cuna completa, sin tener en cuenta peso de la cuna misma)

Ingresando los datos y resolviendo:

$$S_4 = -\left[ \frac{Q}{4t_s (b + 1,56\sqrt{Rt_s})} \right] - \frac{3K_6 Q}{2t_s^2}$$

$$S_4 = -\left[ \frac{1440900}{(4 \cdot 25,4 \cdot (380 + 1,56 \cdot \sqrt{1700,2 \cdot 25,4}))} \right] - \frac{(3 \cdot 0,035 \cdot 1440900)}{(2 \cdot 25,4^2)}$$

$$S_4 = -97,114 \text{ N/mm}^2$$

Para un análisis según el código ASME VIII Div. 1, S<sub>4</sub> no debe ser mayor de 1,5 veces del valor de la tensión admisible del material del cabezal.

$S_m = 1,5 \cdot 137,90 \text{ N/mm}^2 = 206,85 \text{ N/mm}^2 > 97,114 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{OK VERIFICA!}$

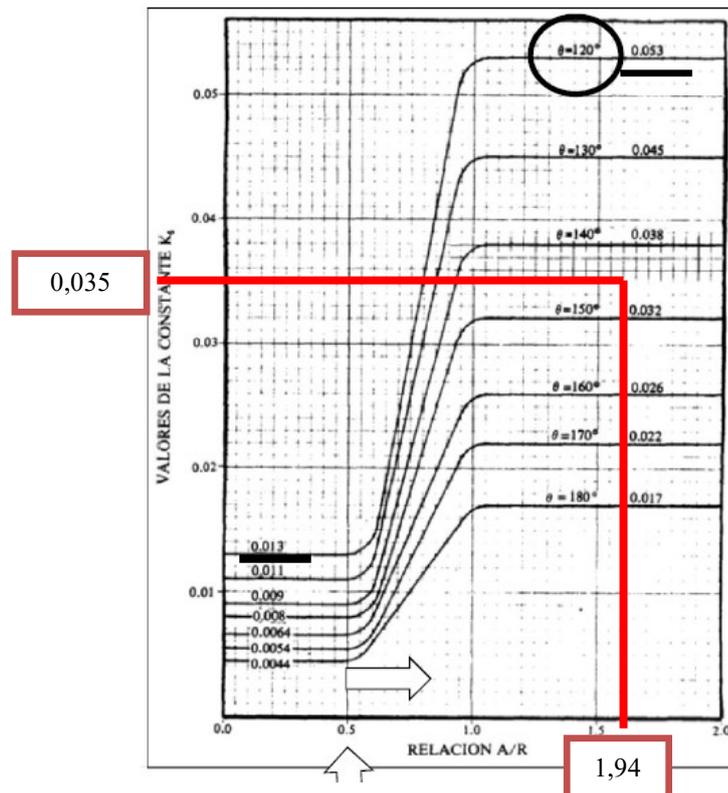


Figura 2: gráfico para la determinación de la constante K6

#### 5- Procedimiento de cálculo y resultados – Método de ONG

Las ecuaciones paramétricas propuestas por L. S. Ong, para determinar la tensión circunferencial máxima en el cuerno de la cuna y sobre el recipiente, es la siguiente:

$$\sigma_c = K_a K_b K_c K_s \frac{Q}{t^2} \sqrt{\frac{t}{r}}$$

Donde Q es la reacción en el soporte, (producto del peso propio y del líquido), mientras que los factores restantes, se obtienen de gráficos paramétricos, siendo:

Ka: factor geométrico obtenido en gráficos función de  $\alpha_a = (a/r) \cdot \sqrt{t/r}$

Kb: factor geométrico obtenido en gráficos función de  $\alpha_b = (b/r) \cdot \sqrt{t/r}$

Kc: factor geométrico obtenido en gráficos función de  $\alpha_c = (c/r) \cdot \sqrt{t/r}$

Ks: factor de reducción debido a la extensión de la placa de desgaste a partir de la relación en gráficos función de  $\alpha_s = \alpha_b^{1/3} \cdot (t/r)$

La placa de desgaste actúa como un refuerzo local para disminuir la tensión desarrollada en el cuerno de la cuna.

En la tabla a continuación se indica la nomenclatura y los valores de cada parámetro:

Q	Fuerza de reacción en la cuna	1440900 N
t	Espesor de la envolvente	25,4 mm
r	Radio medio del cilindro	1700,2 mm
tr	Espesor de la placa de desgaste	20 mm
a	Distancia entre LT y centro de la cuna	3300 mm
b	Ancho de la placa de desgaste	700 mm
c	Distancia entre los soporte, cunas	16860 mm
$2\beta$	Angulo de contacto entre la cuna y el recipiente	$1545,39^\circ$

En función a la ecuaciones y datos anteriores se procede al cálculo y determinación del resto de los factores los cuales se detallan en la tabla a continuación:

$\alpha_a$	$(a/r) * \sqrt{t/r}$	0,237
Ka	Del gráfico de la figura 3	0,61
$\alpha_b$	$(b/r) * \sqrt{t/r}$	0,050
Kb	Del gráfico de la figura 4	1,30
$\alpha_c$	$(c/r) * \sqrt{t/r}$	1,212
Kc	Del gráfico de la figura 5	1,082
$\alpha_s$	$\alpha_b^{1/3} * (tr/t)$	0,029
Ks	Del gráfico de la figura 6	0,725

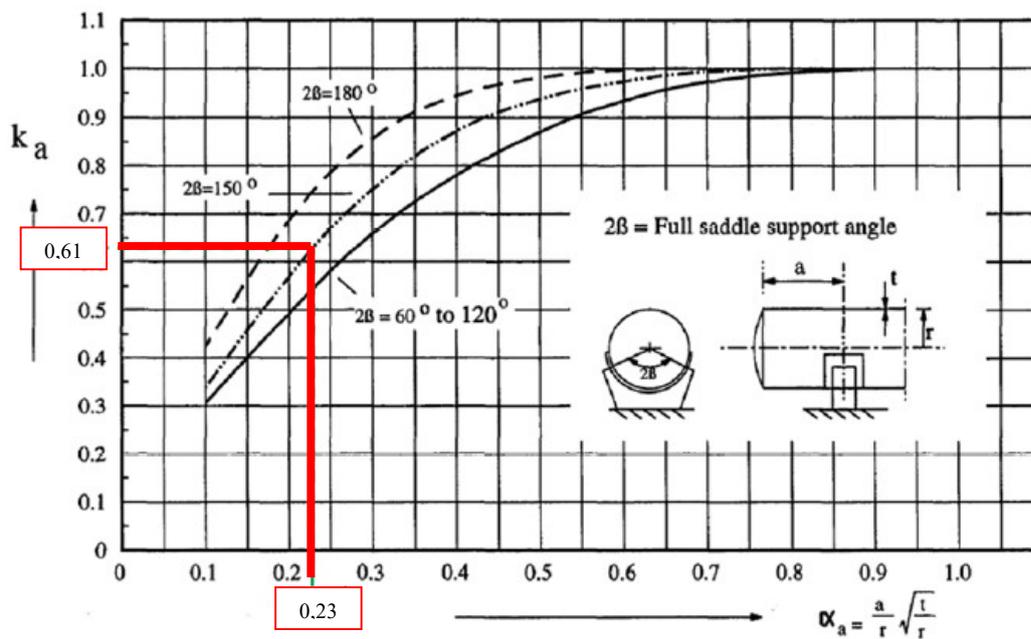


Figura 3: factor geométrico ubicación de la cuna

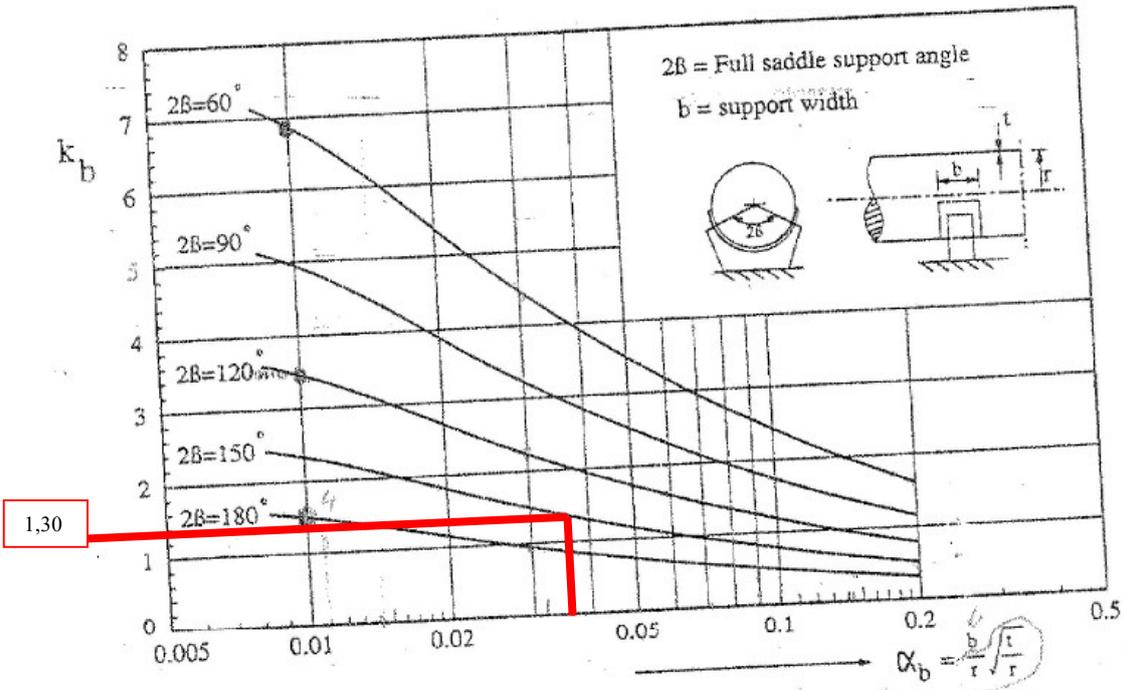


Figura 4: factor geométrico del ancho de la cuna

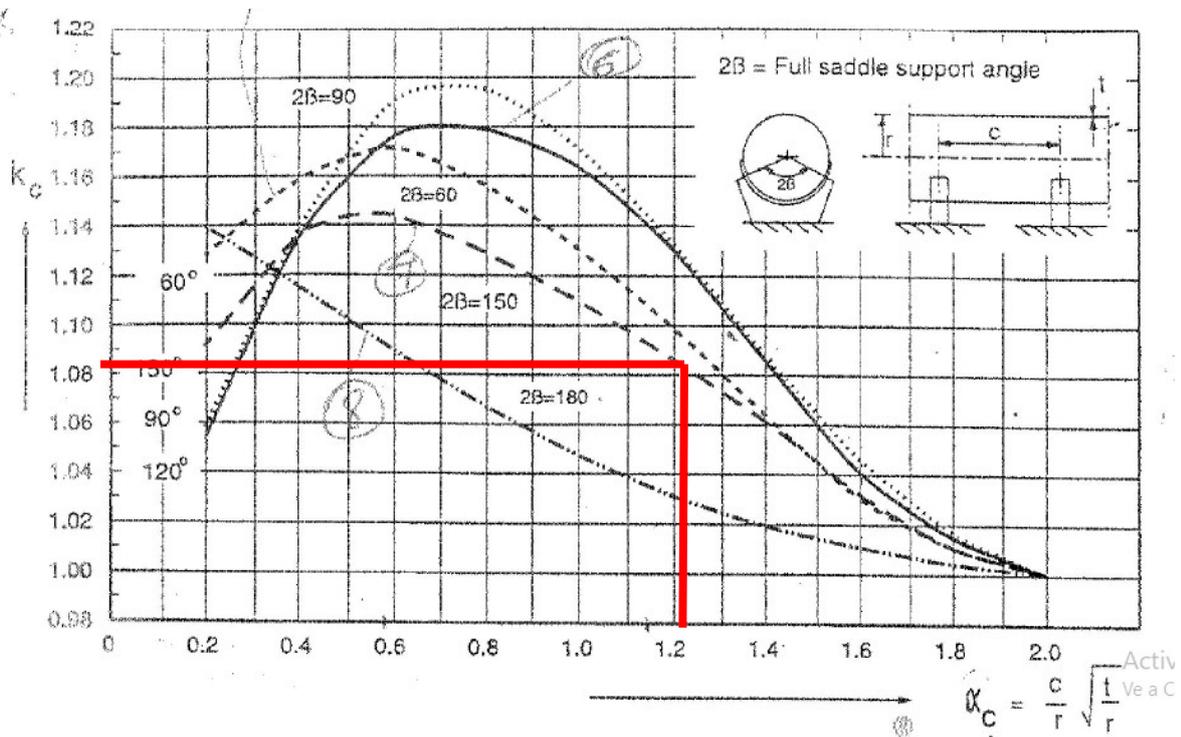


Figura 5: factor geométrico de la distancia entre las cunas

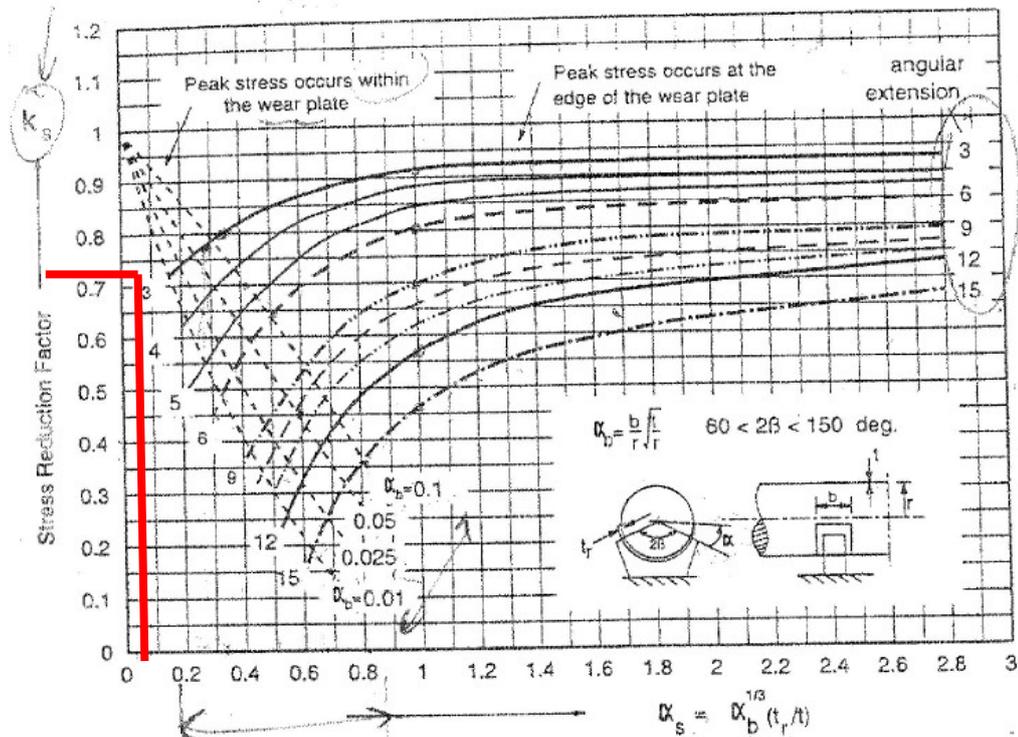


Figura 6: factor de reducción debido a la extensión de la placa de desgaste

Por último, determinamos la tensión circunferencial máxima en el cuerno de la cuna y sobre el recipiente para las siguientes condiciones de la cuna:

- **Cuna elástica**

$\sigma_c = 169,81 \text{ N/mm}^2$

$S_m = 1,5 \cdot 137,90 \text{ N/mm}^2 = 206,85 \text{ N/mm}^2 > 169,81 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{OK VERIFICA!}$

- **Cuna Rígida**

En el caso de una cuna rígida el valor de  $K_s$  es igual a 1. Por lo tanto la tensión circunferencial es:

$\sigma_c = 234,22 \text{ N/mm}^2$

$S_m = 1,5 \cdot 137,90 \text{ N/mm}^2 = 206,85 \text{ N/mm}^2 > 234,22 \text{ N/mm}^2 \rightarrow \text{NO VERIFICA!}$

6- Procedimiento de cálculo y resultados – Método de Elementos Finitos

Planteo del modelo de cálculo: modelo de elementos finitos utilizando elementos tridimensionales de cáscara. 6 grados de libertad por nodo (3 desplazamientos y 3 giros). Programa Ansys 2022 R2 versión académica. En la figura 7 se presenta el modelo de cálculo, el cual quedó conformado por aproximadamente 22221 elementos.

Búsqueda de modelos simplificados: considerando simetría geométrica, cargas y condiciones de borde, se plantea un modelo de un cuarto del componente. Se analizaron dos casos de estudio, cuna elástica y cuna infinitamente rígida. Para este último caso, todos los nodos que entre la placa de desgaste y el alma del soporte fueron restringidos en sus desplazamientos y giros (empotramiento).

Modelo CAD-FEA:

CAD: Puntos/Grids, Curvas/Líneas, Superficies/Regiones.

Tipo de mallado: Automático, cuadriláteros.

Densificaciones: Gradientes. Se han realizado dos refinamientos del mallado en la zona del extremo de la cuna. El mayor en la cartela, placa de desgaste y zona del recipiente inmediata. El otro refinamiento en la zona aledaña a la anterior. La finalidad de esto es obtener resultados mas detallados, dado que allí se producen grandes gradientes de tensión por los efectos de flexión.

Grados de libertad: Desplazamientos  $x / y / z$  y giros  $\Theta_x / \Theta_y / \Theta_z$ .

Propiedades y Materiales: Módulo de elasticidad/Poisson/Densidad/Espesor. Se utilizaron dos materiales: acero estructural como material para los soportes y acero estructural de mayor resistencia mecánica para el recipiente.

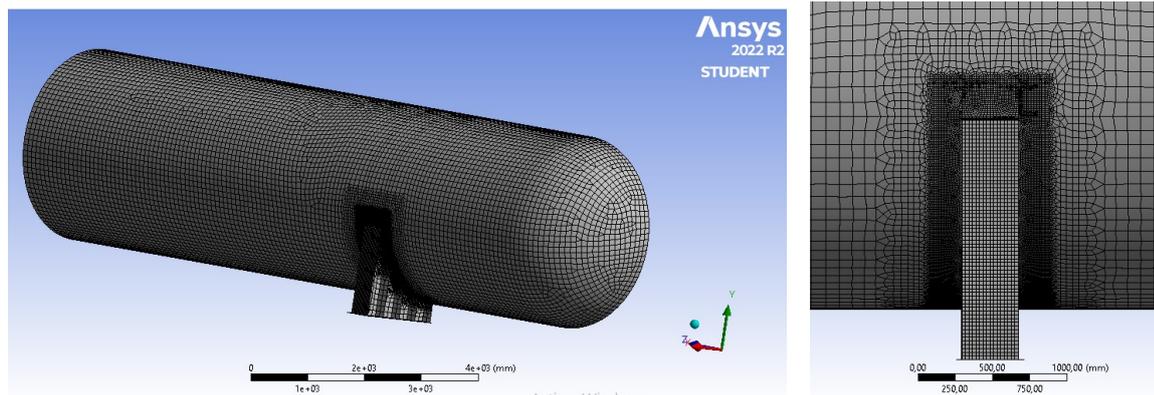


Figura 7: resultado del modelo del mallado en Ansys, elemento de cáscara automático tridimensional cuadriláteros. A la derecha se observa una ampliación de la zona del extremo de la cuna donde se aprecia los gradientes en la densidad de los elementos.

Aplicaciones de carga: peso propio del recipiente y peso del líquido interior con densidad relativa correspondiente al agua a partir de una distribución hidrostática.

Condiciones de borde:

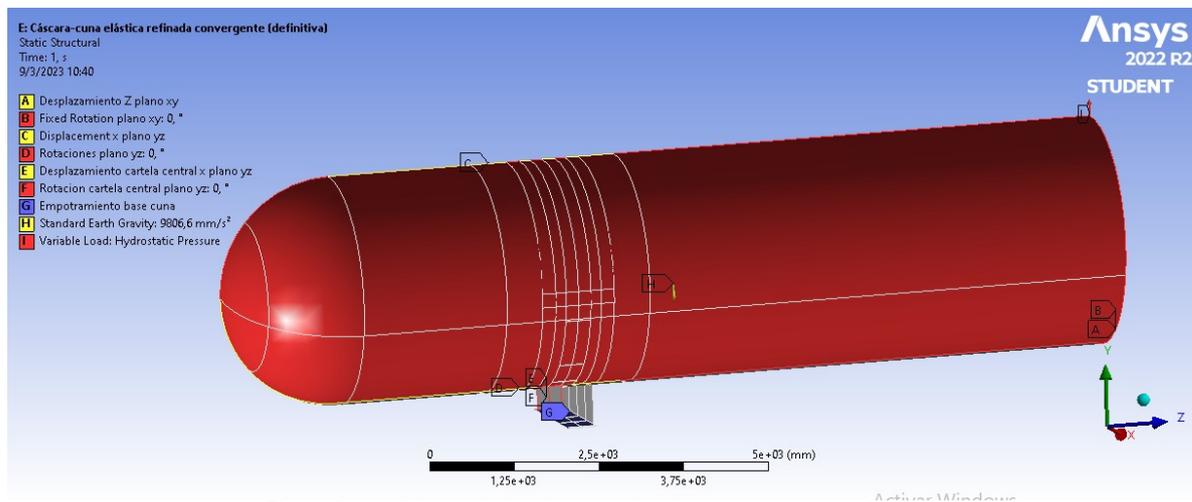
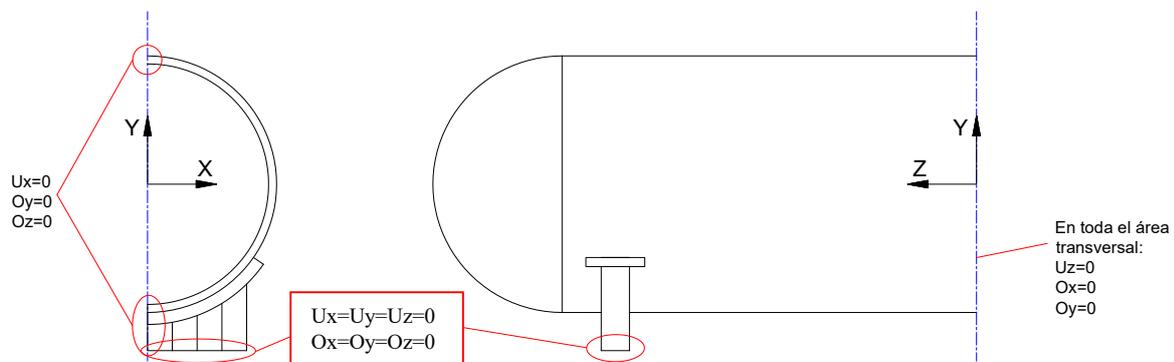


Figura 8: condiciones de borde y estados de carga para cuna elástica.

Para la cuna infinitamente rígida, a las condiciones de borde para la cuna elástica, se agregan: todos los desplazamientos y giros nulos de los nodos que unen la placa de desgaste con el alma del soporte ( $U_x=U_y=U_z=0$  y  $\theta_x=\theta_y=\theta_z=0$ ).

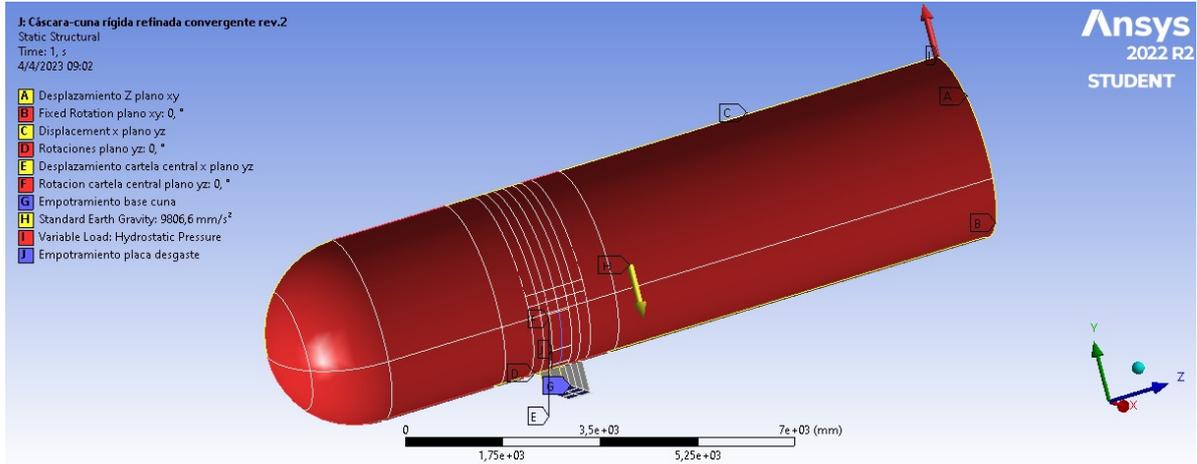


Figura 9: condiciones de borde y estados de carga para cuna infinitamente rígida.

### 7- Comparación de resultados de los tres procedimientos

Resultados: determinación de las tensiones circunferenciales en el extremo de la cuna, en la superficie exterior (bottom, compresión) para el análisis por FEA.

En la siguiente tabla se visualiza la comparación de los resultados que se obtienen al aplicar el método clásico de Zick, la propuesta de Ong y la obtenida a través de elementos finitos para las cunas elástica y rígida. En todos los casos son tensiones de compresión, se escribe su valor absoluto.

Método	Cuna Elástica	Cuna Rígida
Zick	$\sigma$ circunsf. = 97,11 MPa	
Ong	$\sigma$ circunsf. = 169,81 MPa	$\sigma$ circunsf. = 234,22 MPa
ANSYS	$\sigma$ circunsf. min = 171,75 MPa	$\sigma$ circunsf. min = 211,83 MPa

Las tensiones utilizadas en la comparación calculadas por el programa Ansys, son un promedio de los valores aproximadamente a 15 mm superior a la soldadura filete entre el recipiente y la placa de desgaste (ver figura 11 y 13).

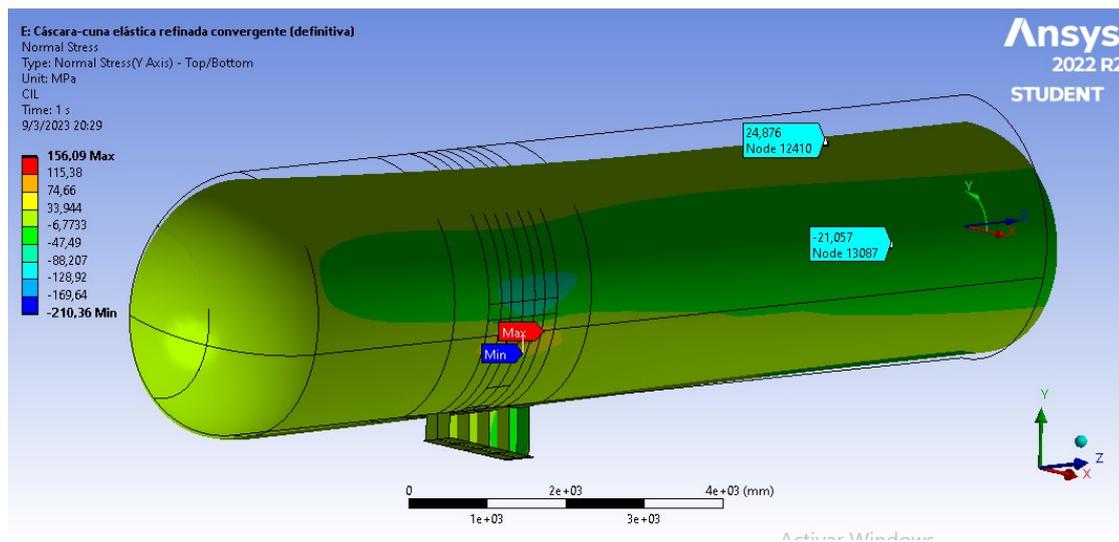


Figura 10: Cuna elástica. Tensiones circunferenciales lado top (interior del recipiente). Tensiones positivas: tracción. Tensiones negativas: compresión. No se aplica convergencia de los resultados a todo el recipiente.

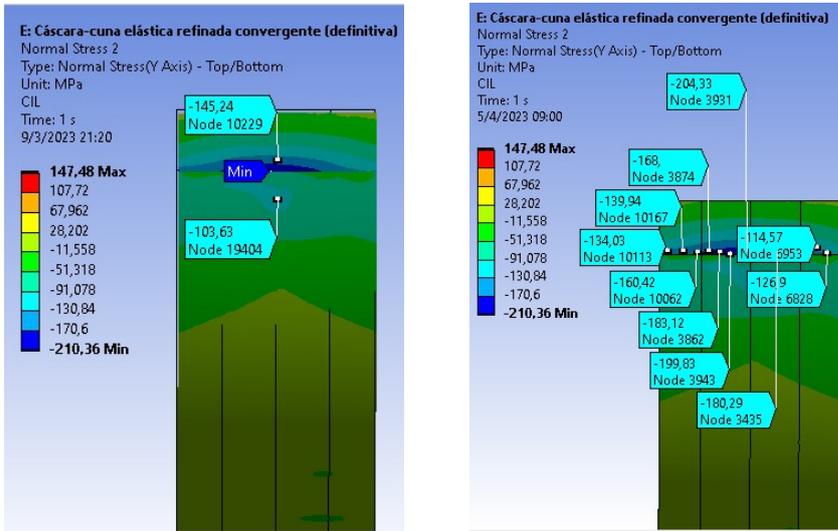


Figura 11: Ídem figura 10 con ampliación en placa de desgaste mas zona inmediata del recipiente (cuerno de la cuna). Lado exterior (bottom), tensiones de compresión. Se aplicó convergencia del 5% a dicha zona.

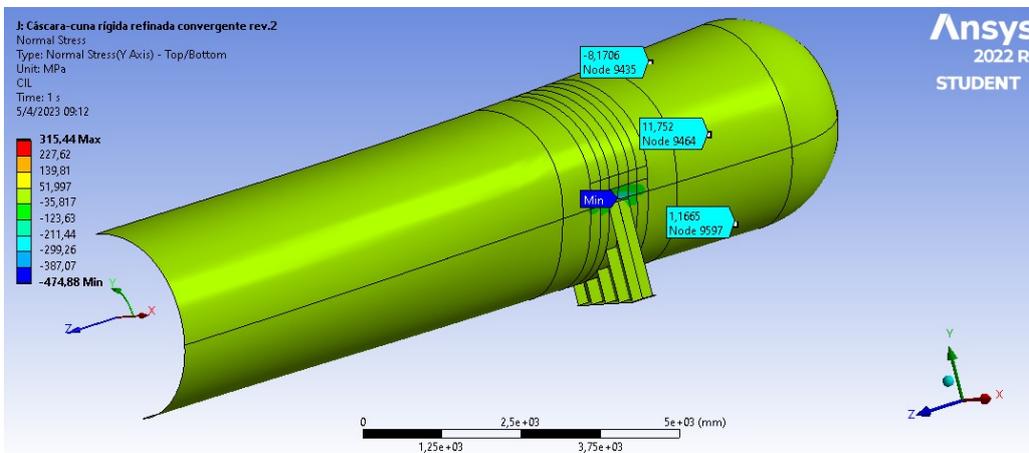


Figura 12: Cuna rígida. Tensiones circunferenciales lado top (interior del recipiente). Tensiones positivas: tracción. Tensiones negativas: compresión. No se aplica convergencia de los resultados a todo el recipiente.

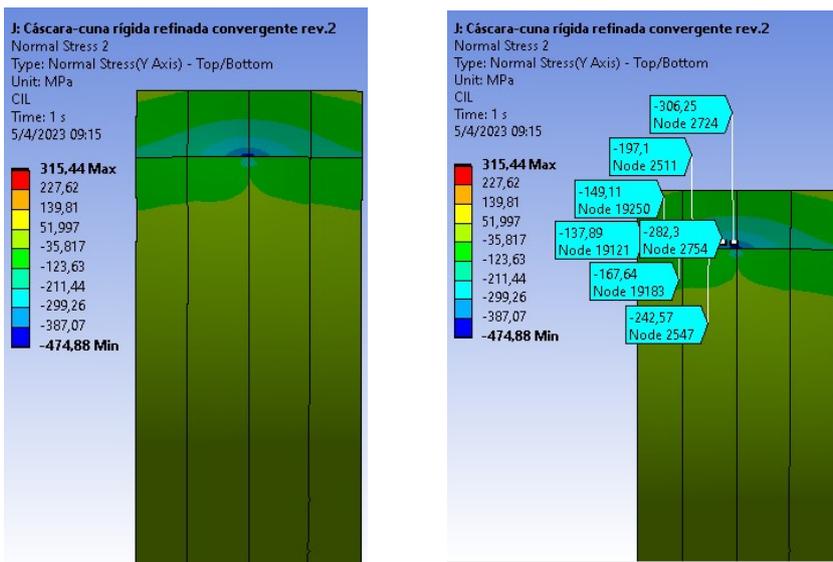


Figura 13: Ídem figura 12 con ampliación en placa de desgaste mas zona inmediata del recipiente (cuerno de la cuna). Lado exterior (bottom), tensiones de compresión. Se aplicó convergencia del 5% solo en dicha zona.

Convergencia de la solución: se determinó de manera analítica y se analizaron los resultados de la simulación con una carga de presión interior conocida y se verificaron los cálculos de la presión hidrostática. Por otra parte, se utilizó la función del programa Ansys de cálculo automático de los resultados (el programa iba refinando la malla) para una convergencia del 5% exclusivamente en la placa de desgaste y la franja inmediata del recipiente (cuerno).

#### 8- Procedimiento de soldadura

Según el código de referencia ASME II Parte A, el material SA-516 Gr. 70 es un acero de baja aleación, aleado al manganeso con una composición química de C=0,28%, Mn=0,79/1,30% y Si=0,13/0,45%. Esto corresponde a un material N°P=1 y grado n° 2 según el código ASME 9. Sus propiedades mecánicas se resumen a continuación:

Material	Tensión de fluencia, $\sigma_y$ [MPa]	Resistencia máxima, $\sigma_m$ [MPa]	Alargamiento, $\alpha$ [%]
SA 516 Gr. 70	Mínimo 260	485 - 620	21

#### Soldabilidad del acero SA 516 Gr. 70

El carbono equivalente según la fórmula del IIW:

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

Utilizando los valores promedios para los elementos que especifica un rango, tenemos que el CE= 0,50%. Como dicho valor se encuentra entre 0,35% y 0,55%, resulta ser un acero de buena soldabilidad.

#### Cálculo predictivo de la temperatura de precalentamiento

En este caso se utilizó el método Seferian, quien propone la siguiente fórmula para el cálculo de la misma:

$$T_p = 350 \sqrt{CT-0,25} \text{ en } [^{\circ}\text{C}]$$

$$CT = C_q + C_e = C_q \cdot (1+0,005e)$$

Donde:

CT: carbono equivalente total

C<sub>q</sub>: suma del carbono equivalente químico

C<sub>e</sub>: carbono equivalente del espesor, función del espesor y templabilidad del acero

e: espesor, 25,4 mm

$$C_q = C + (Mn+Cr)/9 + Ni/18 + 7Mo/90 = 0,396\%$$

$$\text{Por lo tanto: } CT = 0,396 \cdot (1+0,005 \cdot 25,4) = 0,446\%$$

$$T_p = 350 \sqrt{0,446-0,25} = \mathbf{154,95 \text{ } ^{\circ}\text{C}}$$

#### Tratamiento térmico post soldadura

Según el ASME 8 Div. 1, tabla UCS 56-1, para un espesor menor a 38 mm no es necesario realizar tratamiento térmico post soldadura.

#### Selección del proceso y consumible de soldadura

- Soldaduras circunferenciales y longitudinales de la virola

Se propone el diseño de junta establecido en el plano de fabricación del tanque de GLP, en este caso según detalle "B". Se trata de una junta a tope en "X".

Debido a las grandes dimensiones del recipiente, la posibilidad de acceder desde el interior, se determina el proceso SAW para dichas costuras. Esto se respalda por la alta deposición de metal, realizarlo de manera mecanizable y bajo mano.

Una vez seleccionado el proceso de soldadura, el código ASME 2 Parte C, SFA-5.17, especifica los electrodos/fundentes para el proceso de arco sumergido. El sistema electrodo/fundente debe tener una resistencia mínima a la tracción en condición "as Weld" de 485 MPa, por lo tanto utilizaremos el F7A6-EM12K, con un diámetro de 4 mm.

En el anexo de este trabajo se detalla el procedimiento de soldadura, EPS-TE-CV001, confeccionado en función a la tabla QW-254 del ASME 9.

- Soldaduras circunferenciales unión cabezal-virola

El diseño de junto se detalla en el plano de fabricación del tanque. La transición de espesores se realiza desde el lado interior, repelándose la pasada raíz que se realiza desde el exterior. Se selecciona el proceso FCAW. El mismo tiene una alta deposición de metal y al ser un proceso semiautomático se reducen los tiempos de producción. En el anexo de este trabajo se detalla el procedimiento de soldadura, EPS-TE-CAVI001, confeccionado en función a la tabla QW-255 del ASME 9.

- Soldadura del cabezal

El diseño de junta se detalla en el plano de fabricación del tanque, junta a tope en "V". En este caso se decidió soldar únicamente desde el exterior (respetando la junta de diseño del tanque de GLP), por lo tanto se selecciona GTAW para la raíz y FCAW para el relleno. En el anexo de este trabajo se detalla el procedimiento de soldadura, EPS-TE-CAB001.

- Soldadura de cunas, patas y recipiente/placa de desgaste

En todos estos casos se trata una soldadura filete. Por velocidad de producción y calidad en la terminación de la costura se eligió el proceso FCAW. En el anexo de este trabajo se detalla el procedimiento de soldadura, EPS-TE-FIL001.

#### 9- Evaluación de una fisura

##### Datos de entrada

Recipiente diseñado según ASME VIII Div. 1:

Material	SA 516 Gr 70	
Diámetro interno	3375,0	mm
Diámetro externo	3425,8	mm
Presión diseño	1,69	MPa
Presión operación	1,54	MPa
Tensión de fluencia	260	MPa
Tensión de rotura	485	MPa

Fisura circunferencial detectada por END, superficial con profundidad,  $a_d = 5\text{ mm}$  y largo  $2c_d = 40\text{ mm}$ . La fisura ha sido detectada en el metal de soldadura, considerar un error de detección de + 10%.

CTOD del material

Se efectuaron tres ensayos CTOD del metal de soldadura (MS) y ZAC con los siguientes resultados:

MS: 0,20 ; 0,25; 0,35 en mm

ZAC: 0,15; 0,20; 0,45 en mm

##### Integridad por fisuración. API 579 Parte 9.

###### Nivel 1. Aplicaciones y límites (9.2.2)

- El componente ha sido diseñado y construido según códigos o estándares reconocidos.
- El componente no opera en el rango de Creep
- Efectos por cargas dinámicas no son significativas.
- No se considera propagación de fisuras.
- El componente es una placa, cilindro o esfera.
- Cilindros/esferas  $\rightarrow R_i/t \geq 5$  y espesores  $< 38\text{ mm}$  (1.5").
- La fisura debe estar lejos de discontinuidades  $> 1.8 (D_i.t)^{(1/2)}$ .
- Tensiones membranales únicamente.
- Si el componente estará sujeto a prueba de presión futura, es necesario determinar la MAT. Después de la prueba se debe verificar el estado de la fisura.
- Evaluar las tensiones residuales en uniones soldadas.

- k) Se usará para aceros al C (tipo P1 y P2) con  $S_m < 25 \text{ ksi}$ .
- l) La  $S_{ymin} < 40 \text{ ksi}$  (276 MPa) y  $S_{rmin} < 70 \text{ ksi}$  (483 MPa).
- m)  $K_{aplic} > K_{IC}$  -límite inferior a la  $T_{ref}$  (apéndice 9F).

**Procedimiento (9.4.2)**

**Paso 1.** La temperatura de diseño es de  $66^\circ\text{C}$ .

- a) Temperatura crítica de exposición “CET” =  $66^\circ\text{C}$  (3.1.5)

Tensión circunferencial (ASME 8 Div.1):

$$S = P \cdot (R + 0,6t) / (Ext) = 1,69 \text{ MPa} \cdot (3375 \text{ mm} + 0,6 \times 25,4 \text{ mm}) / (1 \times 25,4 \text{ mm}) = 225,57 \text{ MPa}.$$

Verifica que la temperatura mas baja del metal está sujeta a una tensión de tracción membranar primaria mayor a 55 MPa.

- a) Mínima temperatura admisible “MAT” (3.1.6)

Nivel 1 (opción A) (3.4.2.1 (d))

De acuerdo con tabla 3.2 se utiliza curva B (fig. 3.4)  $MAT = -1^\circ\text{C}$  ( $t_g = 25,4 \text{ mm}$ )  
Sin reducción de MAT.

Verifica que  $MAT \leq CET \rightarrow -1^\circ\text{C} \leq 66^\circ\text{C}$

**Paso 2.** Determinación de la longitud y profundidad de la discontinuidad planar a partir de los datos de inspección. La discontinuidad fue caracterizada por END.

Profundidad:  $a_d = 5 \text{ mm}$  ;  
Largo:  $2c_d = 40 \text{ mm}$ .

**Paso 3.** Utilización de la figura 9.15M (cilindro, soldadura circunferencial, discontinuidad paralela a la junta)

En nuestro caso, debido a que la discontinuidad se midió por END y su ubicación, se utiliza la curva C línea sólida.

Determinación de la temperatura de referencia para uso nivel 1

Tabla 3.2 (curva B)  $\rightarrow$  Tabla 9.2M  $\rightarrow$   $MYS = 260 \text{ MPa}$   $\rightarrow$   $T_{ref} = 11^\circ\text{C}$

Low Alloy Steels – 27 Joule or 20 ft-lb Transition Temperature for Each ASME Exemption Curve				
MYS (MPa)	ASME Exemption Curve			
	A (°C)	B (°C)	C (°C)	D (°C)
200	45	24	3	-12
210	42	21	0	-15
220	39	18	-3	-17
230	37	16	-5	-19
240	35	14	-7	-22
250	33	12	-9	-23
260	32	11	-11	-25
270	30	10	-12	-27
280	29	8	-14	-28
290	27	6	-15	-29
300	26	5	-16	-31
310	25	4	-17	-32
320	24	3	-18	-33
330	23	2	-19	-34
340	22	1	-20	-35
360	20	-1	-22	-37
380	18	-3	-24	-38
400	17	-4	-25	-40
420	15	-6	-27	-41
440	14	-7	-28	-43
460	13	-8	-29	-44
480	12	-9	-31	-45
500	11	-10	-32	-46
520	10	-12	-33	-47
540	9	-12	-34	-48
560	8	-13	-35	-49

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

$$(T - T_{ref.} + 56)^{\circ}\text{C} = (66 - 11 + 56)^{\circ}\text{C} = 111^{\circ}\text{C}$$

Resultado de la fig. 9.15M  $\rightarrow 2C = 200 \text{ mm}$

Verifica  $\rightarrow$  la longitud de la fisura medida por END de 40 mm es menor a 200 mm.

**Según la evaluación de Nivel 1, el equipo se encuentra apto para servicio.**

**Nivel 2.** Aplicaciones y límites (9.2.2)

Idem para el nivel 1.

**Paso 1.** Evaluar las condiciones de operación y determinar las combinaciones de presión, temperatura y cargas suplementarias a ser consideradas.

P diseño = 1,69 MPa

Temp. diseño = 66 °C

**Paso 2.** Determinar la distribución de tensión en la zona de localización de la falla en base a las cargas consideradas en el paso anterior y clasificar las tensiones resultantes en las siguientes categorías:

- 1) Tensión primaria.
- 2) Tensión secundaria.
- 3) Tensión residual.

En este caso se trata de tensiones primarias y residuales debido al proceso de soldadura por ausencia de PWHT.

**Paso 3 y 4.** Determinar las propiedades del material: tensión de fluencia, resistencia a la tracción y tenacidad a la fractura ( $K_{mat}$ ) para las condiciones evaluadas en el paso 1. La tensión de fluencia y la resistencia a la tracción serán establecidas utilizando valores experimentales o nominales definidos como los mínimos especificados para el material. La tenacidad a la fractura será establecida basándose en valores experimentales, o una estimación de cota inferior (anexo 9F).

Tensión de fluencia:  $\sigma_y = 260 \text{ MPa}$  (ASME 2 parte A)

Resistencia a la tracción:  $\sigma_m = 485 \text{ MPa}$  (ASME 2 parte A)

El factor  $K_{mat}$  se puede obtener a partir del CTOD mediante la fórmula (9F.29) del Anexo 9F, párrafo 9F.3.2.1.

$$K_{Sc} = \sqrt{\frac{m_{CTOD} \sigma_f \delta_{crit} E_y}{1 - \nu^2}} = \sqrt{\frac{1,4 \cdot 372,5 \text{ MPa} \cdot 0,00015 \text{ m} \cdot 205000 \text{ MPa}}{1 - 0,3^2}} = 132,7 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$$

En donde:

$$\sigma_f = (\sigma_y + \sigma_{UTS})/2 = 372,5 \text{ MPa} \quad (2E.2.2.2 (a))$$

m CTOD = 1,4 (estimado)

$$\delta_{crit} = 0,00015 \text{ m}$$

**Paso 5.** Determinar las dimensiones de la discontinuidad a partir de datos de inspección. La discontinuidad debería luego ser recategorizada utilizando el procedimiento ya visto.

Figura 9.12



(b) Surface Flaw

2C = 44 mm (se agrega el 10% del error de medición).

a = 5 mm.

t = 25,4 mm.

**Paso 6.** Computa la tensión de referencia para las tensiones primarias  $\sigma_{ref}^p$  en base a la distribución de tensión primaria modificada y a la dimensión de discontinuidad modificada según el paso 2-5 y a las soluciones de tensión de referencia del Anexo 9C.

**9C.5.13 Cylinder – Surface Crack, Circumferential Direction – Semi-Elliptical Shape, Internal Pressure and Net-Section Axial Force (RCSCCE1)**

9C.5.13.1 The Reference Stress is (Reference [2]):

$$\sigma_{ref} = \frac{P_b + \left( P_b^2 + 9 \left( Z \cdot P_m \cdot (1 - \alpha)^2 \right)^2 \right)^{0.5}}{3(1 - \alpha)^2} \quad (9C.78)$$

where,

$$P_m = \frac{pR_o^2}{R_o^2 - R_i^2} + \frac{F}{\pi(R_o^2 - R_i^2)} \quad (9C.79)$$

$$P_b = 0.0 \quad (9C.80)$$

$$Z = \left[ \frac{2\psi}{\pi} - \frac{x\theta}{\pi} \left( \frac{2 - 2\tau + x\tau}{2 - \tau} \right) \right]^{-1} \quad (9C.81)$$

$$\psi = \arccos[A \sin[\theta]] \quad (9C.82)$$

$$\alpha = \frac{\frac{a}{t}}{1 + \frac{t}{c}} \quad (9C.83)$$

$$A = x \left[ \frac{(1 - \tau)(2 - 2\tau + x\tau) + (1 - \tau + x\tau)^2}{2(1 + (2 - \tau)(1 - \tau))} \right] \quad (9C.84)$$

$$\tau = \frac{t}{R_o} \quad (9C.85)$$

$$x = \frac{a}{t} \quad (9C.86)$$

$$\theta = \frac{\pi c}{4R_o} \quad \text{for an external crack} \quad (9C.88)$$

Siendo F = 0,

$$P_m (\text{normal}) = \frac{1,69 \text{ MPa} \cdot (1687,5 \text{ mm})^2}{(1712,9 \text{ mm})^2 - (1687,5 \text{ mm})^2} = 55,71 \text{ MPa}$$

$$\theta = \frac{\pi \cdot 22 \text{ mm}}{4 \cdot 1712,9 \text{ mm}} = 0,01$$

$$x = \frac{5 \text{ mm}}{25,4 \text{ mm}} = 0,19$$

$$\tau = \frac{25,4 \text{ mm}}{1712,9 \text{ mm}} = 0,014$$

$$A = 0,19 \left[ \frac{(1-0,014)(2-2 \cdot 0,014+0,19 \cdot 0,014)+(1-0,014+0,19 \cdot 0,014)^2}{2(1+(2-0,014)(1-0,014))} \right] = 0,093$$

$$\alpha = \frac{\frac{a}{t}}{1 + \frac{t}{c}} = \frac{\frac{5 \text{ mm}}{25,4 \text{ mm}}}{1 + \frac{25,4 \text{ mm}}{22 \text{ mm}}} = 0,09$$

$$\psi = \arccos[0,093 \cdot \text{sen } 0,01] = 1,56$$

$$Z = \left[ \frac{2 \cdot 1,56}{\pi} - \frac{0,19 \cdot 0,01}{\pi} \left( \frac{2 - 2 \cdot 0,014 + 0,19 \cdot 0,014}{2 - 0,014} \right) \right]^{-1} = 1$$

Por ultimo siendo  $P_b = 0$ ,

$$\sigma_{\text{ref}}(\text{normal}) = \frac{1.55,71 \text{ MPa} (1 - 0,09)^2}{(1 - 0,09)^2} = 55,71 \text{ MPa}$$

**Paso 7.** Computar el Relación de cargas o la abcisa del diagrama FAD utilizando la tensión de referencia para las tensiones primarias del paso 6 y la tensión de fluencia del paso 3.

$$I_r^P(\text{normal}) = \frac{\sigma_{\text{ref}}^P(\text{normal})}{\sigma_{ys}} = \frac{55,71 \text{ MPa}}{260 \text{ MPa}} = 0,214$$

**Paso 8.** Computar el factor de intensidad de tensiones atribuido a las cargas primarias  $K_I^P$  utilizando la distribución de tensión primaria modificada y la dimensión de la discontinuidad modificada del paso 5, y las soluciones del factor de intensidad de tensiones en el anexo 9B. Si  $K_I^P < 0$ , entonces  $K_I^P = 0$ .

#### 9B.5.13 Cylinder – Surface Crack, Circumferential Direction – Semi-Elliptical Shape, Internal Pressure and Net-Section Axial Force (KCSCE1)

Outside Surface:

$$K_I = G_0 \left( \frac{pR_i^2}{R_o^2 - R_i^2} + \frac{F}{\pi(R_o^2 - R_i^2)} \right) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (9B.194)$$

9B.5.13.2 Notes:

- See [Figure 9B.16](#) for the component and crack geometry.
- The influence coefficient,  $G_0$ , can be determined using [paragraph 9B.5.14.2.b](#).
- The parameter  $Q$  is given by [Equation \(9B.15\)](#) or [\(9B.16\)](#).
- Crack and geometry dimensional limits are shown in [paragraph 9B.5.14.2](#).

De la ecuación 9B.15 tenemos que:

$$Q = 1.0 + 1.464 \left( \frac{a}{c} \right)^{1.65} \quad \text{for } a/c \leq 1.0$$

$$Q = 1 + 1,464 \left( \frac{5 \text{ mm}}{22 \text{ mm}} \right)^{1,65} = 1,127$$

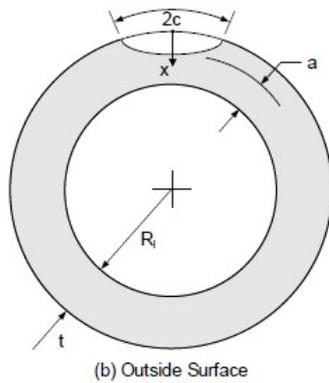


Figure 9B.16 – Cylinder – Surface Crack, Circumferential Direction, Semi-elliptical Shape

$$G_0 = A_{0,0} + A_{1,0}\beta + A_{2,0}\beta^2 + A_{3,0}\beta^3 + A_{4,0}\beta^4 + A_{5,0}\beta^5 + A_{6,0}\beta^6 \quad (9B.90)$$

$$G_1 = A_{0,1} + A_{1,1}\beta + A_{2,1}\beta^2 + A_{3,1}\beta^3 + A_{4,1}\beta^4 + A_{5,1}\beta^5 + A_{6,1}\beta^6 \quad (9B.91)$$

$$G_2 = A_{0,2} + A_{1,2}\beta + A_{2,2}\beta^2 + A_{3,2}\beta^3 + A_{4,2}\beta^4 + A_{5,2}\beta^5 + A_{6,2}\beta^6 \quad (9B.92)$$

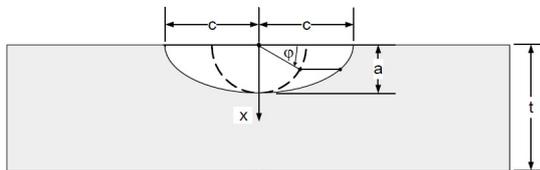
$$G_3 = A_{0,3} + A_{1,3}\beta + A_{2,3}\beta^2 + A_{3,3}\beta^3 + A_{4,3}\beta^4 + A_{5,3}\beta^5 + A_{6,3}\beta^6 \quad (9B.93)$$

$$G_4 = A_{0,4} + A_{1,4}\beta + A_{2,4}\beta^2 + A_{3,4}\beta^3 + A_{4,4}\beta^4 + A_{5,4}\beta^5 + A_{6,4}\beta^6 \quad (9B.94)$$

where,

$$\beta = \frac{2\varphi}{\pi} \quad (9B.95)$$

Siendo  $\varphi$  el ángulo elíptico que determina el frente de la fisura. Por lo tanto en este caso es de  $90^\circ$  (perpendicular a la pared).



$$\varphi = \frac{\pi}{2} ; \beta = \frac{2 \cdot \pi}{\pi \cdot 2} = 1$$

Los coeficientes  $A_{i,0}$  para la determinación del  $G_0$ , se obtienen de la tabla 9B.15 ingresando con los siguientes datos:

$$t/R_i = 25,4 \text{ mm} / 1687,5 \text{ mm} = 0,015$$

$$a/c = 5 \text{ mm} / 22 \text{ mm} = 0,22$$

$$a/t = 5 \text{ mm} / 25,4 \text{ mm} = 0,196$$

De esta manera se obtiene:

A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6
0,638	-0,309	6,532	-	21,056	-	3,698

Resolviendo la ecuación 9B.90, obtenemos:

$$G_0 = 1,143$$

Por último, el factor de intensidad de tensiones para las tensiones primarias resulta de la ecuación 9B.194 siendo  $F = 0$ :

$$K_I^P(\text{normal}) = 1,143 \left[ \frac{1,69 \text{ MPa} \cdot (1687,5 \text{ mm})^2}{(1712,9 \text{ mm})^2 - (1687,5 \text{ mm})^2} \right] \sqrt{\frac{\pi \cdot 0,0050 \text{ m}}{1,127}} = 7,51 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$$

Paso 9. Computar la tensión de referencia para las tensiones secundarias y las tensiones residuales  $\sigma_{refSR}$  en base a la distribución de tensiones secundarias y residuales del paso 2, la dimensión de discontinuidad modificada del paso 5 y las soluciones para la tensión de referencia del Anexo 9B.

Si  $KISR < 0$ , entonces  $KISR = 0$ . El valor de  $KISR$  debería ser determinado en la misma posición del frente de la discontinuidad que la empleada para el cálculo de  $KIP$ .

Las tensiones secundarias son nulas ya que no hay gradiente térmico a través del espesor ni encontrarse la fisura próxima a discontinuidades estructurales. Por lo tanto se calcularán las tensiones residuales del proceso de soldadura ya que no fue sometido a un PWHT (anexo 9D).

#### Procedimiento 9D.5

Debido a no contar con información del procedo de soldadura, se utiliza la tabla 9D.1M para la estimación del calor aportado eligiendo el proceso de soldadura SAW.

Table 9D.1M – Heat Input Based On Welding Process

Welding Process	Heat Input (J/mm)			
	Ferritic Steels		Stainless Steel	
	Average	Upper Bound	Average	Upper Bound
SMAW (1)	1130	1840	940	1330
SAW (2)	1220	1940	1080	1920
GTAW (3)	500	1000	500	944
GMAW (4)	390	720	390	720

Notes:

1. Based on 3.2 mm electrode, 152 mm/min (2.5 mm/sec) travel speed, for carbon steel: average 115A-25V, upper bound 180A-26V, for stainless steel: average 95A-25V, upper bound 130A-26V.
2. Based on 4 mm electrode, 889 mm/min (15 mm/sec) travel speed, for carbon steel: average 600A-30V, upper bound 800A-36V, for stainless steel: average 500A-32V, upper bound 750A-38V.
3. Based on 2.3 mm electrode, 152 mm/min (2.5 mm/sec) travel speed, for carbon steel: average 90A-14V, upper bound 160A-16V, for stainless steel: average 90A-14V, upper bound 150A-16V.
4. Based on 0.9 mm electrode, 305 mm/min (5 mm/sec) travel speed, for carbon steel: average 110A-18V, upper bound 175A-21V, for stainless steel: average 100A-20V, upper bound 160A-23V.

$$\frac{\dot{q}}{t} = \frac{1220 \text{ J/mm}}{25,4 \text{ mm}} = 48,03 \frac{\text{J}}{\text{mm}^2}$$

- 3) For low heat input  $\left(\frac{\dot{q}}{t} \leq 50 \frac{J}{mm^2} \left(32.3 \frac{kJ}{in^2}\right)\right)$  ferritic and medium/low heat input austenitic stainless steels welds:

$$\sigma^r(x) = \sigma_{ys}^r \left[ 1.00 - 6.80 \left(\frac{x}{t}\right) + 24.30 \left(\frac{x}{t}\right)^2 - 28.68 \left(\frac{x}{t}\right)^3 + 11.18 \left(\frac{x}{t}\right)^4 \right] \quad (9D.9)$$

- c) Residual Stress Attenuation – The through-thickness residual stress distribution may be varied with distance from the weld centerline ( $y$ ) as follows (see [Figure 9D.3](#)). [Equations \(9D.12\)](#) and [\(9D.13\)](#) are intended to capture the transverse stress reversal that can occur for thinner sections. This can cause outside surface tensile stresses away from the weld, even while the weld stresses are predicted to be compressive.

- 1) From 0.0 to 1.0w:

$$\sigma^r(x) \text{ from } \text{Equations (9D.7), (9D.8), and (9D.9)} \quad (9D.10)$$

- 2) For thicknesses greater than 9.525 mm (0.375 in.):

$$\sigma^r(x) \text{ linearly decreasing to } 0 \text{ from } 1.0w \text{ to } 2.0\sqrt{rt} \quad (9D.11)$$

- 3) For thicknesses less than or equal to 9.525 mm (0.375 in.):

$$\sigma^r(x) \text{ linearly varying to } -0.5\sigma^r(x) \text{ from } 1.0w \text{ to } 2.0w \quad (9D.12)$$

$$\sigma^r(x) \text{ linearly varying from } -0.5\sigma^r(x) \text{ to } 0 \text{ from } 2.0w \text{ to } 2.0\sqrt{rt} \quad (9D.13)$$

La tensión de fluencia del cordón de soldadura se estima a partir de la tensión de fluencia del material base con la ecuación 9D.1:

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

El factor de intensidad de tensiones para las tensiones secundarias y residuales KISR, se prosigue con el punto 9B.5.14.

#### 9B.5.14 Cylinder – Surface Crack, Circumferential Direction – Semi-Elliptical Shape, Through-Wall Fourth Order Polynomial Stress Distribution with a Net Section Bending Stress (KCSCE2)

##### 9B.5.14.1 The Mode I Stress Intensity Factor (Reference [\[40\]](#))

$$K_I = \left[ \begin{array}{l} G_0(\sigma_0 + p_c) + G_1\sigma_1\left(\frac{a}{t}\right) + G_2\sigma_2\left(\frac{a}{t}\right)^2 + \\ G_3\sigma_3\left(\frac{a}{t}\right)^3 + G_4\sigma_4\left(\frac{a}{t}\right)^4 + G_5\sigma_5 + G_6\sigma_6 \end{array} \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (9B.195)$$

En donde los coeficientes  $\sigma_i$ :

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= 329 \times 1 = 329 \text{ MPa} \\ \sigma_1 &= 329 \times (-6.8) = -2237,2 \text{ MPa} \\ \sigma_2 &= 329 \times 24,3 = 7994,7 \text{ MPa} \\ \sigma_3 &= 329 \times (-28,68) = -9435,7 \text{ MPa} \\ \sigma_4 &= 329 \times 11,18 = 3678,2 \text{ MPa} \\ \sigma_5 &= 0 \\ \sigma_6 &= 0 \end{aligned}$$

Los valores de G0 y Q fueron calculados en el paso 8.

G1 se determina con la ecuación 9B.91 con los coeficientes de la tabla 9B.15:

A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6
0,090	0,172	2,500	-4,958	6,117	-4,711	1,461

$$G1 = 0,671$$

A continuación se determinan los valores de G2, G3 y G4 (ecuaciones 9B.274, 9B.275 y 9B.276 respectivamente) y M1, M2 y M3 (ecuaciones 9B.266, 9B.267 y 9B.268 respectivamente) para el ángulo elíptico de  $\pi/2$ :

$$M_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2Q}}(3G_1 - G_0) - \frac{24}{5}$$

$$M_2 = 3$$

$$M_3 = \frac{6\pi}{\sqrt{2Q}}(G_0 - 2G_1) + \frac{8}{5}$$

$$M1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2 \cdot 1,127}}(3 \cdot 0,671 - 1,143) - \frac{24}{5} = -1,15$$

$$M3 = \frac{6\pi}{\sqrt{2 \cdot 1,127}}(1,143 - 2 \cdot 0,671) + \frac{8}{5} = -0,89$$

$$G_2 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left( \frac{16}{15} + \frac{1}{3}M_1 + \frac{16}{105}M_2 + \frac{1}{12}M_3 \right)$$

$$G_3 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left( \frac{32}{35} + \frac{1}{4}M_1 + \frac{32}{315}M_2 + \frac{1}{20}M_3 \right)$$

$$G_4 = \frac{\sqrt{2Q}}{\pi} \left( \frac{256}{315} + \frac{1}{5}M_1 + \frac{256}{3465}M_2 + \frac{1}{30}M_3 \right)$$

$$G2 = \frac{\sqrt{2 \cdot 1,127}}{\pi} \left( \frac{16}{15} - \frac{1,15}{3} + \frac{3 \cdot 16}{105} - \frac{0,89}{12} \right) = 0,508$$

$$G3 = \frac{\sqrt{2 \cdot 1,127}}{\pi} \left( \frac{32}{35} - \frac{1,15}{4} + \frac{3 \cdot 32}{315} - \frac{0,89}{20} \right) = 0,423$$

$$G4 = \frac{\sqrt{2 \cdot 1,127}}{\pi} \left( \frac{256}{315} - \frac{1,15}{5} + \frac{3 \cdot 256}{3465} - \frac{0,89}{30} \right) = 0,369$$

$$P_c = 0$$

Por último calculamos el factor de intensidad de tensiones para las tensiones residuales con la ecuación 9B.195:

$$K_I^{SR} = \left[ 1,143 \cdot 329 - 0,671 \cdot 2337,2 \left( \frac{5}{25,4} \right) + 0,508 \cdot 7994,7 \left( \frac{5}{25,4} \right)^2 - 0,423 \cdot 9435,7 \left( \frac{5}{25,4} \right)^3 + 0,369 \cdot 3678,2 \left( \frac{5}{25,4} \right)^4 \right] \sqrt{\frac{\pi \cdot 0,0050 \text{ m}}{1,127}} = 24,51 \text{ MPa } \sqrt{\text{m}}$$

Paso 10. Computar el factor de interacción plástico  $\phi$ , utilizando el siguiente procedimiento:

Paso 10.1 Computar el valor de  $\phi_0$ :

$$\Phi_0 = \left( \frac{a_{eff}}{a} \right)^{0,5} \quad (9.12)$$

$$a_{eff} = a + \left( \frac{1}{6\pi} \right) \cdot \left( \frac{K_I^{SR}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (\text{Plane Strain Conditions}) \quad (9.13)$$

$$a_{eff} = 5 \text{ mm} + \left( \frac{1}{6\pi} \right) \left( \frac{24,51 \text{ MPa } \sqrt{\text{m}}}{260 \text{ MPa}} \right)^2 = 5 \text{ mm}$$

$$\Phi_0 = \left( \frac{5 \text{ mm}}{5 \text{ mm}} \right)^{0,5} = 1$$

Paso 10.2 Computar el factor de intensidad de tensiones para las tensiones secundarias y residuales corregido por efectos de plasticidad, KJSR:

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

$$K_J^{SR} = 1 \cdot 24,51 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}} = 24,51 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$$

Paso 10.3 Computar el parámetro X y proceder al PASO 10.4.

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

$$X (\text{normal}) = 24,51 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}} \left( \frac{0,214}{7,51 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}} \right) = 0,698$$

Paso 10.4 Determinar el parámetro  $\xi$  desde la Tabla 9.3.

Table 9.3 – Plasticity Interaction Factor – Parameter  $\xi$  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	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

Resultado:

$$\xi (\text{normal}) = 1,041$$

Paso 10.5 Computar el factor de interacción plástica  $\Phi$ :

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

$$\Phi (\text{normal}) = 1 \cdot 1,041 = 1,041$$

Paso 11. Determinar la relación de tenacidades u ordenada  $K_r$  en el diagrama FAD.

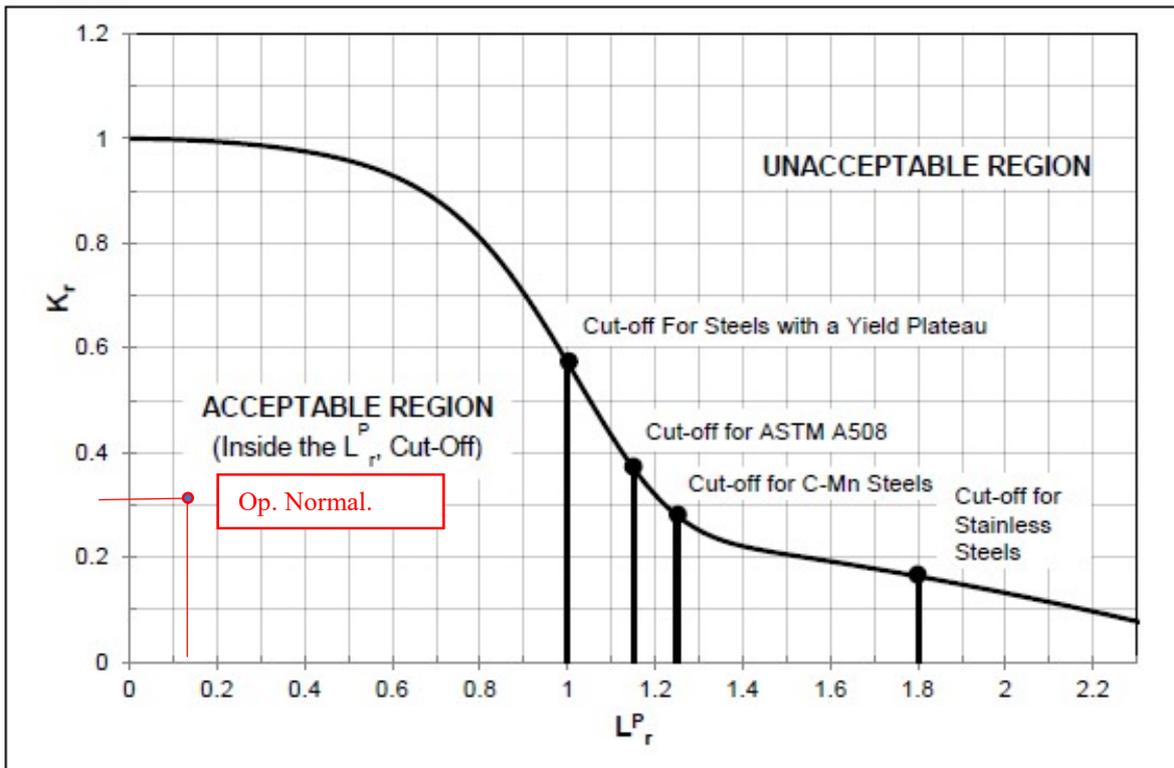
$$K_r = \frac{K_I^P + \Phi K_J^{SR}}{K_{mat}}$$

$$K_r (\text{normal}) = \frac{7,51 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}} + 1,041 \cdot 24,51 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}}{132,7 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}} = 0,317$$

Paso 12. Evaluar los resultados. El punto de evaluación sobre el diagrama FAD queda definido por los parámetros ( $K_r$ ,  $L_r^P$ ).

Punto de evaluación para nivel II de operación normal:

$$K_r = 0,317 ; L_r^P = 0,214.$$



**Conclusión:**

Según la evaluación de Nivel 2, el equipo se encuentra apto para servicio.

10-Conclusiones finales

Los resultados obtenidos con elementos finitos predicen los encontrados por Ong en sus estudios dentro de un orden de coincidencia del 10-20%. En oposición a ambos métodos, se diferencian con el de Zick por un factor de 2 a 3 dependiendo el grado de rigidez de la cuna, tal como era la premisa para este trabajo la cual quedó demostrada en los resultados.



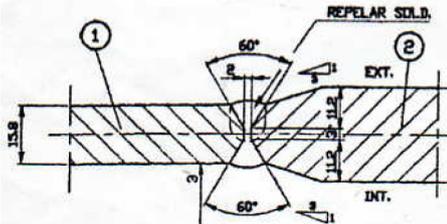
Características eléctricas (QW-409)								
Corriente AC ó DC y polaridad Ver cuadro abajo Intensidad de corriente (A) Ver cuadro abajo Diferencia de potencial (V) Ver cuadro abajo Calor aportado máximo (J/cm) ..... Otro NO				Modo de transferencia de material: No aplica Electrodo de tungsteno (Tipo/ø) No aplica Velocidad de aporte (mm/seg) 6-8 Otro NO				
Técnica (QW-410)								
Cordón: Recto, sin oscilación Oscilación máxima (mm) NO Pasada(s) por lado Múltiple Electrodo(s) Único Distancia entre electrodos NO Ancho de cordón SAW: Otro NO				Limpieza inicial Cepillo circular / amolado Método de repelado de raíz ARC-AIR Limpieza entre pasadas Cepillo circular /amolado Martillado NO Distancia (tubo de contacto y pieza) 20-25 Diámetro de boquilla Según necesidad Uso de procesos termales NO				
Cuadro de variables operativas								
Pasada/ Cordón	Proceso	Clasificación AWS	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Rango de intensidades (A)	Rango de tensión (V)	Vel. de soldadura (mm/min)	Otro
1-Raiz	SAW	EM12K	4,0	DCEP	475/575	27/30	300/360	No
2-n	SAW	EM12K	4,0	DCEP	475/575	27/30	300/360	No

ASME IX QW-482 Formato sugerido para EPS

Empresa: UTN Haedo Soldadura  
EPS n°: EPS-TE- CAVI001  
Proceso de soldadura: FCAW

Fecha: 16/03/2023

Elaborado por: Fabián Jeandet  
Soportado por: RCP-TE-CAVI001  
Tipo: semiautomática

Junta (QW-402)		
Diseño de junta: tope Abertura de raíz: ver esquema Respaldo/Tipo: si/metal de soldadura  Costura circunferencial unión cabezal-virola.		Detalle A (plano Tanque GLP) 
Metal base (QW-403)		
P N° 1 Grupo N° 2	a	P N° 1 Grupo N° 2
Especificación tipo y grado		ASTM 516 GR.70
a Especificación tipo y grado		ASTM 516 GR.70
ó composición química y propiedades mecánicas ----		
a composición química y propiedades mecánicas ----		
Rango de espesores material base T(mm)		Bisel: 5 a 31,6
Rango de diámetro (mm)		Filete: NO
Máximo espesor de pasada ≤ 13 mm		
Otro: No		
Metal de aporte (QW-404)		
Proceso		FCAW
Especificación N°		SFA 5.20
Clasificación N°		E70T-1C
F N°		
A N°		
Diámetro del material de aporte (mm)		1,6
Forma del material de aporte		Flux cored
Inserto consumible		N/A
Rango de espesores depositados (mm) Bisel		Hasta 6 mm
Filete		No

Electrodo – Fundente (clasificación)	No							
Marca comercial fundente								
Tipo de fundente	No							
Fundente aleado / elemento	NO							
Reciclado de escoria	NO							
Alambre suplementario	NO							
Otro	NO							
Posición (QW-405)	TTPS (QW-407)							
Posición del bisel: Plana	Rango de temperatura: No							
Progresión: No aplica	Rango de tiempo: No							
Posición de filete: No aplica	Otro: No							
Otro: No								
Pre calentamiento (QW-406)	Gas (QW-408)							
Mínima temperatura de pre calentamiento: 80°C	Protección: CO2 Caudal 10/12 l/min							
Máxima temperatura entre pasadas: 250°C	Arrastre: No							
Mantenimiento: No	Respaldo: No							
Método: Soplón								
Características eléctricas (QW-409)								
Corriente ACc ó DC y polaridad Ver cuadro abajo	Modo de transferencia de material: No aplica							
Intensidad de corriente (A) Ver cuadro abajo	Electrodo de tungsteno (Tipo/ø) No aplica							
Diferencia de potencial (V) Ver cuadro abajo	Velocidad de aporte (mm/seg)							
Calor aportado máximo (J/cm) .....	Otro NO							
Otro NO								
Técnica (QW-410)								
Cordón: Recto raíz, relleno oscilado	Limpieza inicial Cepillo circular / amolado							
Oscilación máxima (mm) NO	Método de repelado de raíz ARC-AIR							
Pasada(s) por lado Múltiple	Limpieza entre pasadas Cepillo circular /amolado							
Electrodo(s) Único	Martillado NO							
Distancia entre electrodos NO	Distancia (tubo de contacto y pieza) 25/29							
Ancho de cordón:	Diámetro de boquilla Según necesidad							
Otro NO	Uso de procesos termales NO							
Cuadro de variables operativas								
Pasada/ Cordón	Proceso	Clasificación AWS	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Velocidad del alambre (cm/min)	Rango de tensión (V)	Vel. de soldadura (mm/min)	Otro
1-Raiz	FCAW	E70T-1C	1,6	DCEP	570/760	27/30	-	No
2-n	FCAW	E70T-1C	1,6	DCEP	570/760	27/30	-	No

ASME IX QW-482 Formato sugerido para EPS

Empresa: UTN Haedo Soldadura  
 EPS n°: EPS-TE- CAB001  
 Proceso de soldadura: GTAW/FCAW

Fecha: 16/03/2023

Elaborado por: Fabián Jeandet  
 Soportado por: RCP-TE-CAB001  
 Tipo: manual/semiautomática

Junta (QW-402)	Detalle C (plano Tanque GLP)
Diseño de junta: tope Abertura de raíz: ver esquema Respaldo/Tipo: raíz sin respaldo Relleno con respaldo metal de soldadura. Costuras del cabezal	

Metal base (QW-403)		
P N° 1 Grupo N° 2	a	P N° 1 Grupo N° 2
Especificación tipo y grado		ASTM 516 GR.70
a Especificación tipo y grado		ASTM 516 GR.70
ó composición química y propiedades mecánicas ----		
a composición química y propiedades mecánicas ----		
Rango de espesores material base T(mm)	Bisel: 5 a 31,6	Filete: NO
Rango de diámetro (mm)		
Máximo espesor de pasada ≤ 13 mm		
Otro: No		
Metal de aporte (QW-404)		
Proceso	Raíz: GTAW	Relleno: FCAW
Especificación N°	SFA 5.18	SFA 5.20
Clasificación N°	ER70S-3	E70T-1C
F N°		
A N°		
Diámetro del material de aporte (mm)	2,4	1,6
Forma del material de aporte	Sólido	Flux cored
Inserto consumible	N/A	
Rango de espesores depositados (mm) Bisel	Hasta 4 mm	Hasta 6 mm
Filete	No	
Electrodo – Fundente (clasificación)	No	
Marca comercial fundente		
Tipo de fundente	No	
Fundente aleado / elemento	NO	
Reciclado de escoria	NO	
Alambre suplementario	NO	
Otro	NO	
Posición (QW-405)		TTPS (QW-407)
Posición del bisel: Plana		Rango de temperatura: No
Progresión: No aplica		Rango de tiempo: No
Posición de filete: No aplica		Otro: No
Otro: No		
Precalentamiento (QW-406)		Gas (QW-408)
Mínima temperatura de precalentamiento: 80°C		Protección:
Máxima temperatura entre pasadas: 250°C		Para GTAW, Ar 99,9% Caudal 12/15 l/min
Mantenimiento: No		Para FCAW, CO2 100% Caudal 10/12 l/min
Método: Soplón		Arrastre: No
		Respaldo: No
Características eléctricas (QW-409)		
Corriente AC ó DC y polaridad	Ver cuadro abajo	Modo de transferencia de material: No aplica
Intensidad de corriente (A)	Ver cuadro abajo	Electrodo de tungsteno (Tipo/∅) EWTh-2/2,4mm
Diferencia de potencial (V)	Ver cuadro abajo	Velocidad de aporte (m/min) 6-8
Calor aportado máximo (J/cm) .....		Otro NO
Otro NO		
Técnica (QW-410)		
Cordón: Recto raíz, relleno oscilado		Limpieza inicial Cepillo circular / amolado
Oscilación máxima (mm) NO		Método de repelado de raíz No aplica
Pasada(s) por lado Múltiple		Limpieza entre pasadas Cepillo circular /amolado
Electrodo(s) Único		Martillado NO
Distancia entre electrodos NO		Distancia (tubo de contacto y pieza) 25/29
Ancho de cordón:		Diámetro de boquilla Según necesidad
Otro NO		Uso de procesos termales NO

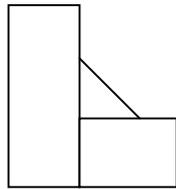
Cuadro de variables operativas								
Pasada/ Cordón	Proceso	Clasificación AWS	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Velocidad del alambre (cm/min)	Rango de tensión (V)	Rango de corriente (A)	Otro
1-Raiz	GTAW	ER70S-3	2,4	DCEN	-	8/12	90/110	No
2-n	FCAW	E70T-1C	1,6	DCEP	570/760	27/30	-	No

ASME IX QW-482 Formato sugerido para EPS

Empresa: UTN Haedo Soldadura  
 EPS n°: EPS-TE- FIL001  
 Proceso de soldadura: FCAW

Fecha: 16/03/2023

Elaborado por: Fabián Jeandet  
 Soportado por: RCP-TE-FIL001  
 Tipo: semiautomática

Junta (QW-402)	
Diseño de junta: tope Abertura de raíz: ver esquema Respaldo/Tipo: si/metal de soldadura  Costura filete (soportes, recipiente/placa)	Detalles (plano Tanque GLP)  
Metal base (QW-403)	
P N° 1 Grupo N° a Especificación tipo y grado a Especificación tipo y grado ó composición química y propiedades mecánicas a composición química y propiedades mecánicas Rango de espesores material base T(mm) Rango de diámetro (mm) Máximo espesor de pasada ≤ 13 mm Otro: No	P N° 1 Grupo N° ---- ---- ---- ---- Bisel: No Filete: Todos
Metal de aporte (QW-404)	
Proceso Especificación N° Clasificación N° F N° A N° Diámetro del material de aporte (mm) Forma del material de aporte Inserto consumible Rango de espesores depositados (mm) Bisel Filete Electrodo – Fundente (clasificación) Marca comercial fundente Tipo de fundente Fundente aleado / elemento Reciclado de escoria Alambre suplementario Otro	FCAW SFA 5.20 E70T-1C  1,6 Flux cored N/A Hasta 6 mm No No NO NO NO NO NO
Posición (QW-405)	
Posición del bisel: Todos Progresión: No aplica Posición de filete: No aplica Otro: No	TTPS (QW-407) Rango de temperatura: No Rango de tiempo: No Otro: No
Precalentamiento (QW-406)	
Mínima temperatura de precalentamiento: 80°C Máxima temperatura entre pasadas: 250°C	Gas (QW-408) Protección: CO2 Caudal 10/12 l/min Arrastre: No

Mantenimiento: No Método: Soplón				Respaldo: No				
Características eléctricas (QW-409)								
Corriente AC ó DC y polaridad Ver cuadro abajo Intensidad de corriente (A) Ver cuadro abajo Diferencia de potencial (V) Ver cuadro abajo Calor aportado máximo (J/cm) ..... Otro NO				Modo de transferencia de material: No aplica Electrodo de tungsteno (Tipo/∅) No aplica Velocidad de aporte (mm/seg) Otro NO				
Técnica (QW-410)								
Cordón: Recto raíz, relleno oscilado Oscilación máxima (mm) NO Pasada(s) por lado Múltiple Electrodo(s) Único Distancia entre electrodos NO Ancho de cordón: Otro NO				Limpieza inicial: Cepillo circular / amolado Método de repelado de raíz: No Limpieza entre pasadas Cepillo circular /amolado Martillado NO Distancia (tubo de contacto y pieza) 25/29 Diámetro de boquilla: Según necesidad Uso de procesos termales NO				
Cuadro de variables operativas								
Pasada/ Cordón	Proceso	Clasificación AWS	Diámetro (mm)	Tipo y polaridad	Velocidad del alambre (cm/min)	Rango de tensión (V)	Vel. de soldadura (mm/min)	Otro
1-Raiz	FCAW	E70T-1C	1,6	DCEP	570/760	27/30	-	No
2-n	FCAW	E70T-1C	1,6	DCEP	570/760	27/30	-	No
<b>Observaciones</b>				<b>Revisión</b>		<b>Fecha</b>		<b>Nota</b>
Para aprobación				1		04/04/2023		