

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

"Diseño de un Recipiente Separador Gas-Líquido Knock Out Drum Bajo la
Normativa ASME VIII División 2"

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Materia Integradora

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por:

Stalin Saúl Velasco Quezada

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2017

AGRADECIMIENTOS

A DIOS

A MIS PADRES

A MI HERMANO

A MI NOVIA

A MIS TUTORES

AL ING. A. ZABÁLA

Stalin Saúl Velasco Quezada

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

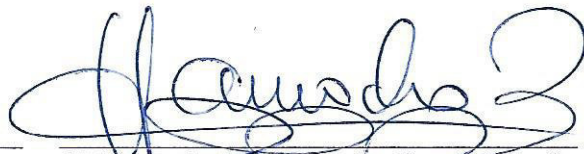
Stalin Saúl Velasco Quezada

M.Sc. Federico Camacho Brausendorff.

y el patrimonio intelectual del mismo a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.



Stalin Velasco Quezada



M.Sc. Federico Camacho Brausendorff

RESUMEN

Acorde con el sistema de despresurización de una terminal hidrocarburífera, se requiere diseñar un tanque KOD por presión interna y externa debido a recientes fallas en equipos similares. Por consiguiente, se presenta como alternativa el uso de códigos más estrictos en tanques a presión con el propósito de evitar que falle por sobrepresión o vacío total. A su vez el objetivo de este trabajo es diseñar los espesores del cuerpo, cabezal y bocas del KOD como también, analizar cargas laterales de sismo y viento. Otro punto es separar el fluido gas-líquido que proviene del cabezal de alivio de presión, para después quemar el gas en la chimenea. Por otro lado, se elabora planos constructivos, lista de materiales y presupuesto referencial.

Dicho lo anterior se utilizó para el dimensionamiento del KOD la norma API 521, y para partes a presión el ASME VIII Div. 2, Parte 4. Los materiales SA-516-70, SA-106-B, SA-105 y SA-36 se utilizaron para diseñar el equipo. Además, se utilizó el código AISC 7-10 para revisar el efecto de las cargas de sismo y viento al tanque.

Como resultado, se obtuvo un tanque horizontal KOD de 2,5 metros diámetro y 6 metros de longitud, el espesor del cuerpo cilíndrico fue de 19.05 mm, mientras los cabezales de 11.43 mm, con un peso 105,000 N, las reacciones por sismo y viento no sobrepasaron los esfuerzos admisibles, de la misma manera los elementos de izaje no fallaron en su análisis. Se debe agregar, que el presupuesto para la fabricación del equipo fue de US \$103,863.

Finalmente, el recipiente KOD, cumplió con ASME VIII Div. 2 se optimizó su diseño, teniendo un ahorro del 10% en costos de materiales, fabricación y soldadura, por disminución de peso en el equipo.

Palabras Clave: Knock Out Drum, ASME VIII Div. 2, recipientes a presión.

ABSTRACT

In accordance with the depressuring system of a hydrocarbon terminal, it is necessary to design a Knock Out Drum vessel by internal and external pressure due to recent errors in similar equipment. Consequently, the use of stricter codes in pressure vessel is proposed as an alternative, in order to avoid equipment failure due to overpressure or full vacuum. Concurrently, the objective of this work is to design the thicknesses of the vessel in the shell, heads and nozzles as well as to analyze lateral loads by seismic and wind. Another point is to separate the gas-liquid fluid from the pressure relief head, then to burn the gas in the chimney. On the other side, drawings, list of materials and reference quote are made.

For this reason, the API 521 was used for the design of KOD, and for parts under pressure the ASME VIII Div. 2, Part 4. Materials SA-516-70, SA-106-B, SA-105 and SA -36 were used to design the equipment. Further, the code AISC 7-10 was used to review the effect of lateral force of seismic and wind on the tank.

As results, a KOD horizontal vessel with 2.5 meters of diameter and 6 meters of length was obtained, the thickness of the shell was 19.05 mm, while the heads 11.43 mm, with a gross weight 105,000 N, the reactions by seismic and wind did not exceed the allowance stress, in the same way, the lifting lugs did not fail in their analysis. Correspondingly, the quote for the construction of the equipment was US \$ 103,863.

Finally, the KOD vessel meet with ASME VIII Div. 2 and its design was optimized, having a saving of 10% in material costs, weld and construction by reducing weight in the equipment.

Keywords: Knock Out Drum, ASME VIII Division 2, pressure vessels.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XV
ÍNDICE DE PLANOS.....	XVIII
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción del problema	2
1.1.1 Personal.....	3
1.1.2 Equipo.....	4
1.1.3 Procedimiento.....	5
1.1.4 Material	6
1.1.5 Otros	7
1.2 Objetivos	8
1.2.1 Objetivo general.....	8
1.2.2 Objetivos específicos	8
1.3 Marco teórico.....	9
1.3.1 Características generales del gas licuado de petróleo (GLP)	11
1.3.2 Propiedades físicas del gas licuado de petróleo	12
1.4 Análisis de alternativas de solución.....	13
1.4.1 Factores de influencia.....	14
1.4.2 Selección de alternativas	17

CAPÍTULO 2.....	21
2. METODOLOGÍA DEL DISEÑO.....	21
2.1 Recopilación de información	21
2.2 Diseño de forma	24
2.2.1 Cuerpo y cabezal	25
2.2.2 Bocas o aperturas.....	31
2.3 Diseño detallado por ASME VIII Div. 2.....	35
2.3.1 Espesor de cuerpo por presión interna	36
2.3.2 Espesor de cuerpo por presión externa	37
2.3.3 Espesor de cabezales hemisféricos del KOD por presión interna	40
2.3.4 Espesor de cabezales hemisféricos del KOD por presión externa	41
2.3.5 Diseño de bocas o aperturas	42
2.3.6 Diseño de silletas.....	78
2.3.7 Diseño de elementos de izaje del KOD	97
2.4 Requerimientos para fabricación.....	110
2.5 Requerimientos de soldadura.....	112
2.6 Requerimientos de inspección y pruebas.....	113
2.7 Requerimientos de pruebas de presión.....	114
CAPÍTULO 3.....	116
3. RESULTADOS.....	116
3.1 Análisis de resultados.....	116
3.2 Presupuesto referencial.....	121
CAPÍTULO 4.....	123
4. CONCLUSIÓN Y DISCUSIÓN.....	123
4.1 Conclusiones.....	123
4.2 Recomendaciones.....	124
BIBLIOGRAFÍA	

PLANOS

APÉNDICES

ABREVIATURAS

API	Instituto Americano de Petróleo
ASME	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos
BPVC	Código de Calderas y Recipientes a Presión
ASM	Sociedad Americana de Metales
ASTM	Sociedad Americana para Ensayos y Materiales
BLEVE	Expansión Explosiva de Vapor de un Líquido en Ebullición
Cont.	Continuación
Div.	División
Ec.	Ecuación
ed.	Edición
FIMCP	Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción
GLP	Gas Licuado de Petróleo
gpm	Galones por minuto
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
Inf.	Inferior
máx.	Máximo
MAEP	Máxima Presión Externa de Trabajo Permisible
MAWP	Máxima Presión de Trabajo Permisible
mín.	Mínima
No.	Número
NFPA	Agencia Nacional para Protección de Incendios
NACE	Asociación Nacional para Ingenieros de Corrosión
NBBI	Consejo Nacional de Inspección de Calderas y Recipientes a Presión
NPS	Tamaño Nominal de Tubería
pág., págs.	Página(s)
s.f.	Sin fecha
SG	Gravedad específica
Vol.	Volumen

SIMBOLOGÍA

A	Largo de placa base.
a	Distancia tangente a centro de silleta.
A_{cproy}	Área proyectada por el cilindro. perpendicular a dirección de viento.
A_E	Área efectiva de contacto.
A_G	Área ocupada por el gas.
A_{L1}	Área ocupada por líquido de drenaje
A_{L2}	Área ocupada por líquido de contención.
A_p	Área resistente a la presión, usada para determinar la fuerza discontinua en la abertura de la boca.
A_{sold}	Área de soldadura unión placa refuerzo y oreja
A_{sold2}	Área de soldadura entre cilindro y placa de refuerzo.
A_{sproy}	Área proyectada por el cilindro, perpendicular a dirección de viento.
A_T	Área total dentro de los límites de reforzamiento.
A_v	Área total de cortante a doble plano.
A_1	Área aportada por la pared del recipiente.
A_2	Área contribuida por la proyección exterior de la boca.
A_3	Área contribuida por la proyección interior de la boca.
A_{41}	Área contribuida por el lado exterior de la soldadura.
A_{42}	Área aportada por la soldadura del refuerzo al recipiente.
A_{43}	Área contribuida por el lado interior de la soldadura.
A_5	Área aportada por la placa de refuerzo.
a_1	Distancia entre centro del agujero hasta la arista superior de la placa de izaje.
a_3	Distancia entre arista de agujero y arista de placa.
b	Ancho de silleta.
b_e	Distancia horizontal entre arista de elemento de izaje hasta el agujero de pin.
b_{eff}	ancho efectivo de elemento de izaje.
b_1	Ángulo de contacto de silleta.
β	Ángulo de contacto de cilindro con silleta.
C_{f1}	Factor de forma del tanque.

C_{f2}	Factor de forma de la silleta.
C_h	Parámetro de carcasa.
C_n	Factor para modificar la longitud L_H , derivado de análisis de elementos finitos.
C_r	Factor de reducción de carga.
$C(R_e^2)$	Factor relacionado al número de Reynolds.
D	Diámetro interior del tanque KOD en estado corroído.
D_H	Diámetro de agujero de placa de izaje.
D_o	Diámetro exterior del cuerpo o cabezal.
D_p	Diámetro de la partícula.
D_{pi}	Diámetro de pin o pasador.
D_R	Excentricidad de boca, desde el eje axial del tanque.
d_1	Diámetro de boca de entrada.
d_2	Diámetro de salida de gas.
E	Eficiencia de junta de soldadura.
E_H	Fuerza horizontal actuante por sismo.
E_V	Fuerza vertical actuante por sismo.
E_y	Módulo de elasticidad del material a la temperatura de diseño.
F	Ancho de placa base.
F_a	Coefficiente de sitio en periodos cortos.
F_h	Fuerza horizontal debido a la reacción Q.
F_{ha}	Valor del esfuerzo de compresión permisible en la membrana circunferencial.
F_{he}	Esfuerzo de falla elástica en la membrana circunferencial por compresión.
F_{ic}	Esfuerzo de pandeo pronosticado, al considerar un FS=1.
F_p	Factor de fijación de boca.
F_r	Fuerza resultante de izaje.
F_v	Fuerza cortante basal
F_{wl}	Fuerza longitudinal por viento.
F_{wt}	Fuerza transversal por viento.
f_N	Fuerza desde la presión interna en la boca del lado exterior del recipiente.
f_S	Fuerza desde la presión interna en la carcasa.
f_Y	Fuerza discontinua por presión interna.

f_{welds}	Discontinuidad global inducida por la existencia de una boca.
f_{rn}	Factor por material de la boca.
f_{rp}	Factor por material de la placa de refuerzo.
f_{ws}	Discontinuidad de fuerza llevada por soldadura t_{W1} y L_{43T} .
f_{wp}	Discontinuidad de fuerza llevada por soldadura t_{W2} y L_{41T} .
G	Factor de ráfaga
g	Gravedad. $\left[9.8 \frac{m}{s^2}\right]$
gal	Galones
σ_{avg}	Esfuerzo promedio de membrana primaria.
σ_{circ}	Esfuerzo general de membrana primaria.
σ_3^*	Esfuerzo longitudinal en la ubicación de la silleta.
σ_4^*	Esfuerzo longitudinal en la ubicación la silleta.
$\sigma_{6.r}$	Esfuerzo circunferencial en la junta silleta – cilindro.
$\sigma_{7.r}^*$	Esfuerzo circunferencial en la junta silleta – cilindro.
σ_{ss}	Esfuerzo en silleta.
h_G	Altura ocupada por el gas.
H_s	Nivel del líquido desde el fondo del tanque.
H	Altura desde inferior de placa base de silleta a centro de tanque.
h_2	Altura de cabezal hemisférico.
I_e	Factor de importancia
σ_B	Esfuerzo por aplastamiento.
σ_1	Esfuerzo longitudinal en la parte superior del tanque.
σ_2	Esfuerzo longitudinal en la parte superior del tanque.
mm	Milímetros
M_L	Flujo másico del líquido.
M_G	Flujo másico del gas.
η	Factor de esfuerzo
φ_{ret}	Tiempo de retención del líquido.
φ_d	Tiempo de caída de gota hasta el nivel de líquido de contención.
θ_3	Ángulo entre el eje axial del tanque y la línea de centro.
θ_4	Ángulo entre el eje axial del tanque y el radio interior de la boca.

θ	Ángulo de contacto de silleta.
θ_1	Ángulo de contacto con placa de refuerzo.
φ	Ángulo de carga
ρ_G	Densidad del gas
ρ_L	Densidad del líquido
P_o	Presión de operación
P_s	Presión de cabezal hidrostático ejercida por un líquido.
ρ_m	Densidad de la mezcla gas-líquido.
P	Presión de diseño.
P_L	Esfuerzo local máximo en membrana primaria.
P_{max}	Presión máxima de trabajo permisible en la intersección.
P_{max1}	Presión máxima de trabajo permisible en la boca.
P_{max2}	Presión máxima de trabajo permisible en la carcasa.
P_n	Fuerza mínima resistente a la tensión en área neta.
P_v	Carga resistente al doble cortante.
P_T	Mínima presión de prueba hidrostática.
P_a	Presión externa permisible en ausencia de otras cargas.
P_b	Fuerza máxima resistente a falla tangencial.
Q_L	Caudal volumétrico del líquido.
Q_D	Caudal volumétrico de salida de líquido de condensado.
Q	Reacción resultante en soporte.
Q_t	Reacción transversal en soporte.
Q_l	Reacción longitudinal en soporte.
q_z	Presión por viento.
R	Constante de gases ideales $\left[8.31 \frac{m^3 \cdot Pa}{^\circ K \cdot mol} \right]$
rad.	Radianes
R_o	Radio exterior de cuerpo cilíndrico o cabezal.
R_{eff}	Radio efectivo del cuerpo.
R_n	Radio interior de boca (corroído).
R_{xn}	Radio de boca para cálculos de fuerza.
R_{xs}	Radio de carcasa para cálculos de fuerza.

R_{nc}	Radio de la abertura de la boca en el recipiente a lo largo de cuerda longitudinal.
R_m	Radio medio de tanque.
S_T	Esfuerzos permisibles a la temperatura de la prueba 28 °C.
S_u	Resistencia a la tracción de material base.
S_{bs}	Esfuerzo permisible de placa base a temperatura ambiente @28°C. Ver Apéndice B.
S_r	Esfuerzo permisible para la placa de refuerzo, a temperatura de diseño.
S_c	Esfuerzo de compresión admisible para el material del cilindro a temperatura de diseño.
S_{MS}	Parámetro de aceleración espectral en tiempos cortos ajustada por efectos de la clase de sitio.
S_s	Parámetro de aceleración espectral en tiempos cortos.
S_{DS}	Aceleración espectral en tiempos cortos.
S_{allow}	Máximo esfuerzo primario local de membrana permisible en la intersección de la boca.
S_n	Esfuerzo permisible para la boca a temperatura de diseño.
S_p	Esfuerzo permisible para la placa de refuerzo a temperatura de diseño.
S_y	Esfuerzo mínimo de fluencia a temperatura de diseño. Ver Apéndice B.
S	Esfuerzo permisible del material base a temperatura de diseño.
SG	Gravedad específica del líquido.
T_o	Temperatura de operación
t_c	Espesor de corrosión admisible.
t_d	Espesor de diseño del cuerpo cilíndrico.
t	Espesor gobernante.
t_e	Espesor de refuerzo en bocas.
t_n	Espesor de boca.
t_{eff}	Espesor efectivo usado en los cálculos de esfuerzos de presión en la cercanía de la abertura de la boca.
τ	Esfuerzo cortante "efectiva" promedio en las soldaduras debido a la presión (incluye la eficiencia de la junta).
τ_1	Esfuerzo cortante a través de la trayectoria de carga 1.
τ_2	Esfuerzo cortante a través de la trayectoria de carga 2.
τ_3	Esfuerzo cortante a través de la trayectoria de carga 3.

t	Espesor de pared del cilindro.
T	Fuerza cortante máximo en la silleta.
τ_{22}	Esfuerzo cortante por reacción del soporte.
t_r	Espesor de placa de refuerzo.
t_b	Espesor de placa base de silleta.
t_L	Espesor nominal de placa de izaje.
τ_{tl}	Esfuerzo de tensión en soldadura unión placa refuerzo y oreja.
τ_{sl}	Esfuerzo de cortante en soldadura unión placa refuerzo y oreja.
τ_{bl}	Esfuerzo de flexión en soldadura unión placa refuerzo y oreja.
τ_{al}	Esfuerzo cortante permisible de oreja.
τ_{tp}	Esfuerzo de tensión en soldadura que une la placa de refuerzo y cilindro.
τ_{sp}	Esfuerzo cortante en soldadura que une la placa de refuerzo y cilindro
τ_{alp}	Esfuerzo cortante permisible de placa de refuerzo.
T_{DP}	Espesor de refuerzos en agujero o collarines.
U_c	Velocidad vertical de la gota.
μ	Viscosidad dinámica
V_D	Volumen de drenaje.
V_G	Velocidad del gas dentro del recipiente.
$v_{m.in}$	Velocidad máxima del fluido gas-líquido en boca de entrada.
$v_{G.out}$	Velocidad máxima del fluido gas-líquido en boca de salida.
x_1	Distancia de tangente de cabezal izquierdo hasta borde de placa de refuerzo.
x_2	Distancia de tangente de cabezal derecho hasta borde de placa de refuerzo.
W_s	Carga de peso sobre cada soporte en condición de vacío.
W_{OS}	Peso total de tanque sobre soportes condición vacío (No incluye peso de soporte).
W	Ancho de placa de refuerzo.
W_T	Peso total de tanque vacío.
W_L	Peso de izaje.
Z	Factor de compresibilidad del gas

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama causa-efecto en tanques KOD	3
Figura 1.2 Daño por sobrepresión durante prueba hidrostática	3
Figura 1.3 Esquemático de sistemas de alivio de presión	4
Figura 1.4 Falla de tanque por presión de vacío	5
Figura 1.5 Tanque previo a BLEVE	7
Figura 1.6 Daño en tanque por vuelco de transporte	8
Figura 1.7 Recipiente a presión KOD	9
Figura 1.8 Comparación de normativas	10
Figura 1.9 Rombo de clasificación de riesgo NFPA-704	13
Figura 1.10 Esquema de separación de gas-líquido	15
Figura 1.11 Orientación de tanques	15
Figura 1.12 Tipos de cabezales	17
Figura 2.1 Metodología para el diseño del proyecto	21
Figura 2.2 Diseño de forma tanque KOD	25
Figura 2.3 Coeficiente de arrastre	26
Figura 2.4 Longitud no arriestrada	37
Figura 2.5 Nomenclatura de bocas con refuerzo	43
Figura 2.6 Boca radial en cuerpo cilíndrico	44
Figura 2.7 Bocas en cabezal excéntricas	45
Figura 2.8 Bocas radial en cabezal	45
Figura 2.9 Vista de radios en boca - cabezal	70
Figura 2.10 Tanque horizontal sobre silletas	79
Figura 2.11 Tanque con placa de refuerzo	81
Figura 2.12 Diagrama de momento	87
Figura 2.13 Bosquejos de esfuerzo longitudinal y cortante	90
Figura 2.14 Ubicación de esfuerzo circunferencial	93
Figura 2.15 Fuerza horizontal sobre silletas	95
Figura 2.16 Elemento de izaje	97
Figura 2.17 Bosquejo de elemento de izaje	98
Figura 2.18 Falla por tensión en área neta	100
Figura 2.19 Falla por fuerza tangencial	103
Figura 2.20 Falla por cortante en doble plano	104
Figura 2.21 Falla por inestabilidad fuera del plano	105

Figura 2.22 Falla por empuje de pasador	107
Figura 3.1 Metal depositado en soldadura de KOD	117
Figura 3.2 Ubicación de esfuerzo longitudinales	119
Figura 3.3 Ubicación de esfuerzos cortantes.....	120
Figura 3.4 Ubicación de esfuerzos circunferenciales.....	120

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Requisitos del GLP	11
Tabla 1.2 Propiedades físicas del propano y butano	12
Tabla 1.3 Propiedades de materiales ferrosos	16
Tabla 1.4 Matriz de selección de orientación de KOD	18
Tabla 1.5 Matriz de selección de material de cuerpo y cabeza.....	19
Tabla 1.6 Matriz de selección de cabezas de KOD	20
Tabla 2.1 Condiciones de diseño	22
Tabla 2.2 Propiedades mecánicas de materiales a usar en KOD	23
Tabla 2.3 Condiciones de diseño de sismo	23
Tabla 2.4 Condiciones de diseño de viento	24
Tabla 2.5 Dimensionamiento de tanque KOD.....	24
Tabla 2.6 Dimensiones de bocas (A) y (B) - NPS 14”	46
Tabla 2.7 Esfuerzo promedio de membrana primaria – (A)(B).....	51
Tabla 2.8 Esfuerzo general de membrana primaria – (A)(B).....	52
Tabla 2.9 Esfuerzo local máximo en membrana primaria–(A)(B).....	52
Tabla 2.10 Esfuerzo permisible–(A)(B)	53
Tabla 2.11 MAWP en bocas (A)(B)	54
Tabla 2.12 Dimensiones de bocas (C) y (E) - NPS 4”	57
Tabla 2.13 Fuerzas en intersección de bocas y el recipiente - (C)(E)	59
Tabla 2.14 Esfuerzo promedio de membrana primaria – (C)(E).....	59
Tabla 2.15 Esfuerzo general de membrana primaria – (C)(E).....	60
Tabla 2.16 Esfuerzo local máximo en membrana primaria–(C)(E).....	60
Tabla 2.17 Esfuerzo permisible–(C)(E).....	60
Tabla 2.18 MAWP en bocas (C)(E)	61
Tabla 2.19 Dimensiones de bocas (D) y (F) - NPS 2”	62
Tabla 2.20 Fuerzas en intersección de bocas y el recipiente - (D)(F)	64
Tabla 2.21 Esfuerzo promedio de membrana primaria – (D)(F).....	64
Tabla 2.22 Esfuerzo general de membrana primaria – (D)(F).....	64
Tabla 2.23 Esfuerzo local máximo en membrana primaria–(D)(F).....	65
Tabla 2.24 Esfuerzo permisible–(D)(F).....	65
Tabla 2.25 MAWP en bocas (D)(F).....	65
Tabla 2.26 Dimensiones de bocas (G1) y (G2) - NPS 2”	67
Tabla 2.27 Fuerzas en intersección de bocas y el cabezal - (G1) y (G2).....	70

Tabla 2.28 Esfuerzo promedio de membrana primaria – (G1) y (G2)	70
Tabla 2.29 Esfuerzo general de membrana primaria – (G1) y (G2)	71
Tabla 2.30 Esfuerzo local máximo en membrana primaria–(G1) y (G2)	71
Tabla 2.31 Esfuerzo permisible en bocas (G1) y (G2)	71
Tabla 2.32 MAWP en bocas (G1) y (G2)	72
Tabla 2.33 Dimensiones de bocas (M) - NPS 24”	74
Tabla 2.34 Fuerzas en intersección de bocas y el cabezal - (M)	76
Tabla 2.35 Esfuerzo promedio de membrana primaria – (M)	76
Tabla 2.36 Esfuerzo general de membrana primaria – (M)	76
Tabla 2.37 Esfuerzo local máximo en membrana primaria– (M)	76
Tabla 2.38 Esfuerzo permisible en bocas (M)	77
Tabla 2.39 MAWP en boca (M)	77
Tabla 2.40 Dimensiones generales de soporte de tanque KOD	79
Tabla 2.41 Peso contribuido por componentes del tanque KOD	82
Tabla 2.42 Peso contribuido por accesorios	82
Tabla 2.43 Peso de KOD sobre silletas	82
Tabla 2.44 Cortante basal en silleta	84
Tabla 2.45 Reacción en cilindro debido a peso + sismo	85
Tabla 2.46 Reacción en cilindro debido a peso + viento	86
Tabla 2.47 Carga de momento y cortante en KOD	88
Tabla 2.48 Esfuerzo longitudinal en cilindro por reacción de soporte	91
Tabla 2.49 Esfuerzo cortante en tanque KOD por reacción de soporte	92
Tabla 2.50 Esfuerzo circunferencial en cilindro por reacción de soporte	94
Tabla 2.51 Reacción sobre silleta	96
Tabla 2.52 Dimensiones de elemento de izaje	98
Tabla 2.53 Mínimo desalineación permisible en juntas de soldadura	112
Tabla 3.1 Espesores de KOD por normativa	116
Tabla 3.2 Peso neto de tanque	117
Tabla 3.3 Esfuerzo máximo permisible S por normativa	117
Tabla 3.4 Resumen de MAWP y MAEP en KOD	118
Tabla 3.5 Esfuerzo longitudinal en tanque KOD por reacción de soporte	119
Tabla 3.6 Esfuerzo cortante en tanque KOD por reacción de soporte	119
Tabla 3.7 Esfuerzo circunferencial en tanque KOD por reacción de soporte	120
Tabla 3.8 Fallas en elementos de izaje	121
Tabla 3.9 Esfuerzo en soldadura en elementos de izaje	121

Tabla 3.10 Presupuesto referencial 122

ÍNDICE DE PLANOS

- PLANO 1 Diseño general de tanque KOD
- PLANO 2 Desarrollo plancha de cuerpo cilíndrico
- PLANO 3 Desarrollo de cabezal hemisférico
- PLANO 4 Despiece de bocas
- PLANO 5 Detalle de silletas
- PLANO 6 Detalle de elementos de izaje
- PLANO 7 Diseño de soldadura

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Las terminales petroleras se vuelven más complejas en el diseño y operación, los niveles de energía almacenada en estas unidades indican la importancia de sistemas fiables y cuidadosamente diseñados para aliviar presión. Para disminuir los riesgos de daños ambientales o seguridad industrial, se recomienda aplicar sistemas de alivio de presión y despresurización de vapor; y para el diseño, fabricación, pruebas e inspección de tanques a presión en normas como las establecidas por la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME, con su acrónimo en inglés) en sus Códigos para Calderas y Recipientes a Presión (BPVC, con sus siglas en inglés).

Los fluidos que salen por despresurización de las esferas de almacenamiento de gas licuado de petróleo o de otros equipos del sistema de alivio, para que no se expulsen de forma directa al ambiente se utiliza un recipiente colector separador de gas-líquido denominado KOD por su acrónimo en inglés de Knock Out Drum. El resultado de este proceso será un líquido condensado que se bombea a un reservorio denominado tanque de líquidos contaminados para su posterior recirculación a la red; mientras el gas residuo se lo dirige a la chimenea para una quema segura.

En el capítulo 1, se indica la descripción del problema analizando las causas de fallas en tanques a presión semejantes a un KOD, los códigos que se aplican para el correcto diseño, se detallan las propiedades generales del producto. Además, se plantean las diferentes alternativas para el diseño de forma del recipiente a presión, y la selección de la mejor alternativa.

En el capítulo 2, se da a conocer la metodología para el desarrollo del diseño, se realiza el dimensionamiento del tanque según API 521, y se selecciona los accesorios para el tanque KOD. Además, se realizan los cálculos de espesores de cuerpo cilíndrico y cabezal cumpliendo con la norma ASME VIII División 2, Parte 4, edición 2013, adicional se calculan los esfuerzos debido a las cargas de laterales como sismo y viento; y se verifican los tamaños de soldadura en sus accesorios.

En el capítulo 3, se analizan los resultados obtenidos de espesores realizando una comparativa con el ASME VIII División 1, así mismo se analizan los esfuerzos sometidos por cargas de sismo y viento, al mismo tiempo que se elaboran los planos constructivos, listados de material y presupuesto referencial; asimismo se indican requerimientos generales para la fabricación, ensayos de inspección y pruebas requeridos por el código ASME BPVC VIII División 2.

Finalmente, en el capítulo 4 se realizan las conclusiones y recomendaciones del diseño del tanque KOD, con la finalidad de optimizar los diseños de recipientes a presión.

El desarrollo de cada uno de estos capítulos servirá como fuente de referencia para la elaboración de cálculos con los requerimientos de diseño por regla del ASME BPVC VIII División 2, Parte 4.

1.1 Descripción del problema

En una empresa de terminal petrolera requiere dentro de sus instalaciones de almacenamiento de Gas Licuado de Petróleo (GLP), el diseño de un recipiente separador colector denominado en el proceso como Knock Out Drum, que es un tanque separador gas-líquido dentro del sistema de alivio y despresurización de la planta, de manera que el equipo cumpla con los más altos estándares de diseño y evitar fallas ocurridas en recipientes a presión semejantes.

Con relatos de diseñadores de recipientes y literatura acerca de equipos similares se presenta la gráfica descriptiva de causa–efecto en tanques KOD, véase la figura 1.1.

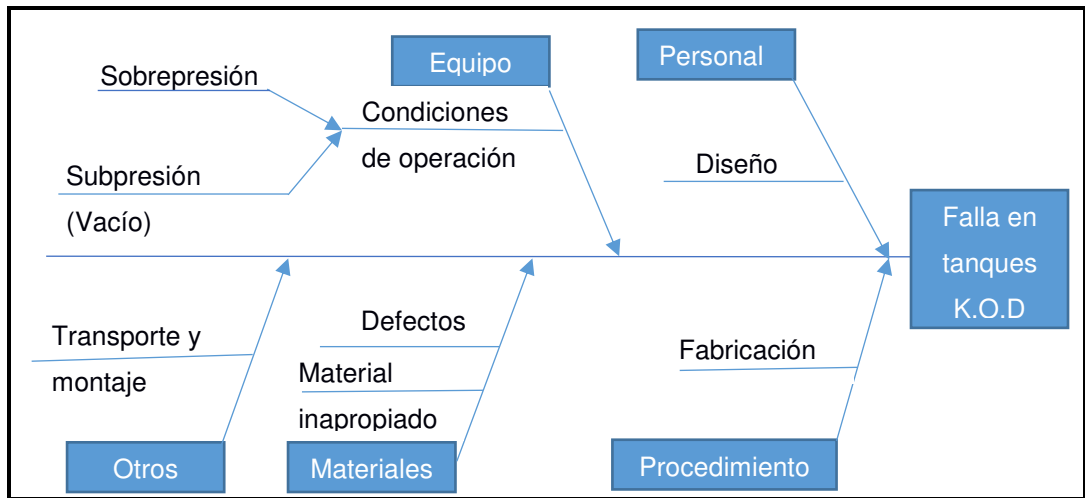


Figura 1.1 Diagrama causa-efecto en tanques KOD

Elaboración propia

1.1.1 Personal

Datos de diseño incorrecto, inadecuados métodos de diseño o establecer presiones de pruebas improcedentes en taller como en la figura 1.2, suelen ocasionar el colapso en recipientes a presión.



Figura 1.2 Daño por sobrepresión durante prueba hidrostática

Fuente: (Werner Sölken, s.f.)

1.1.2 Equipo

En un sistema de alivio de presión como la mostrada en la figura 1.3, las malas operaciones o desperfectos en las válvulas pueden dar como resultado la sobrepresión; que el API 521 (2014) la define como el incremento por encima de la presión configurada en los dispositivos de alivio de un equipo, expresada en unidades de presión o porcentaje. Se debe agregar que también puede ocurrir fallas por fugas en válvulas check, estas válvulas limitan el reverso de flujo, pero no es un medio eficaz para prevenir sobrepresión y el retorno del flujo puede ocurrir.

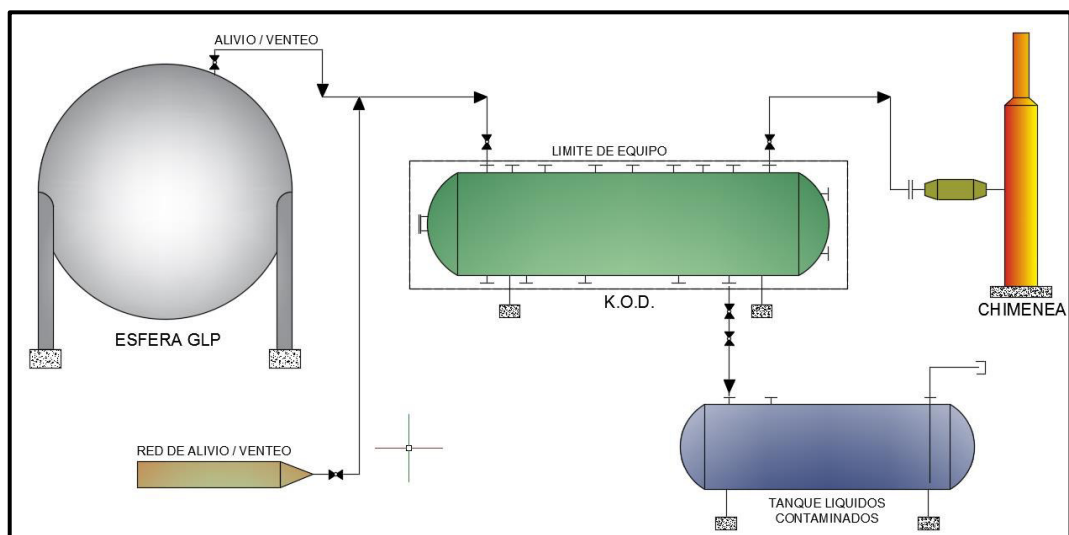


Figura 1.3 Esquemático de sistemas de alivio de presión

Elaboración propia.

A menos que un recipiente esté diseñado para resistir presión externa, un tanque debe estar protegido contra el peligro de subpresión. La subpresión significa normalmente vacío en el interior con presión atmosférica en el exterior. Un tanque puede colapsar por la succión realizada por la bomba de descarga con las aberturas del tanque bloqueadas, una muestra gráfica está en la figura 1.4. (Towler & Sinnott, 2008, págs. 1015-1016).



Figura 1.4 Falla de tanque por presión de vacío

Fuente: (Chen & You, 2014)

1.1.3 Procedimiento

Inapropiados o insuficientes procedimientos de fabricación que incluyen soldadura, controles de calidad, tratamientos de calor o métodos de conformado. (Moss & Basic, 2013, pág. 8)

Cualquier procedimiento como el conformado, o el tratamiento térmico, que crean deformaciones localizadas por arriba del punto de fluencia, dejarán tras sí esfuerzos cuando desaparezca la deformación, estos esfuerzos son llamados esfuerzos residuales.

Una mala selección de un sistema de recubrimiento puede derivarse en un proceso de corrosión que, durante la vida de un recipiente, pueden producirse varios cambios metalúrgicos en los componentes que soportan presión y que podrían afectar significativamente sus propiedades físicas. Estos cambios no son evidentes con el uso de técnicas normales de inspección. Sin embargo, un inspector debe ser consciente de estas posibilidades. (Roberge, 2000, pág. 377)

1.1.4 Material

Dados los parámetros de diseño, se selecciona el material apropiado para el componente estructural. La seguridad y la economía son a menudo los factores que rigen al seleccionar un material para recipientes a presión. El material se selecciona con base a sus propiedades mecánicas, de corrosión, fluencia, tenacidad y térmicas, según corresponda. Si es necesario, el material de soldadura apropiado se selecciona basándose en el material de base elegido. Al material se le asigna un valor de tensión admisible basado en sus límites máximos, límite de elasticidad y rango de temperatura de funcionamiento. Este valor de esfuerzo permisible se utiliza entonces en los cálculos de diseño o en comparación con los resultados obtenidos a partir de análisis detallados. (ASM, 2002, pág. 489)

Debido a que el recipiente está sometido a presión interna y almacena GLP, se considera de alta peligrosidad. El gas al ser inodoro e incoloro, las fugas no podrían ser detectadas; por aquello se es necesario prevenir filtraciones que usualmente ocurren las juntas de soldadura en el equipo que provoquen riesgos físicos y ambientales dentro de la planta. Cabe indicar que el butano-propano desplaza al oxígeno, por lo tanto, la muerte se presenta por asfixia. (Jimenez, pág. 9)

El principal peligro potencial del GLP es el fuego. Esto deriva de su alta inflamabilidad y en casos extremos puede combinarse con la característica de presión; que nos conduce al fenómeno de expansión explosiva de vapor de un líquido en ebullición (con sus siglas, BLEVE). (Jimenez, pág. 9).

La BLEVE (ver figura 1.5) es un caso de estallido catastrófico de un recipiente a presión en el que ocurre un escape súbito a la atmósfera de una gran masa de líquido o gas licuado a presión sobrecalentados. (Mohit, 2016, pág. 1)



Figura 1.5 Tanque previo a BLEVE

Fuente: (Petroblogger.com, 2012)

1.1.5 Otros

El transporte de un recipiente a presión por barco, barcaza, carretera o ferrocarril someterá al tanque a esfuerzos únicos que puedan doblar o deformar permanentemente si no está adecuadamente apoyado o atado en los lugares adecuados (ver figura 1.6). (Moss & Basic, 2013, pág. 632)

Asimismo, deben tenerse en cuenta los daños durante el almacenamiento porque el aire y sus contaminantes pueden ser corrosivos. (ASM, 2002, pág. 2686)

En comparación con el costo total del tanque, los elementos del equipo para izar en el montaje son insignificantes, si estos son agregados después de la compra puede incurrir en gastos extras. También hay consecuencias para la vida, la propiedad y los horarios si esta actividad no se realiza. La posición de estos accesorios puede provocar sobre esfuerzos en el recipiente. (Moss & Basic, 2013, pág. 660)



Figura 1.6 Daño en tanque por vuelco de transporte

Fuente: (Petroblogger.com, 2012)

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Diseñar un recipiente a presión Knock Out Drum separador gas-líquido bajo la normativa ASME Sección VIII División 2.

1.2.2 Objetivos específicos

- Dimensionar el tanque de acuerdo a especificaciones y normativas.
- Optimizar los espesores del tanque KOD.
- Diseñar los componentes del tanque en base a normas aplicables.
- Reducir el peso total del tanque KOD.
- Analizar la ventaja del uso del ASME VIII Div. 2.
- Elaborar los planos de construcción con programas CAD.
- Elaborar listado de materiales.
- Realizar un presupuesto referencial.

1.3 Marco teórico

El propósito de un sistema de eliminación es conducir el fluido liberado a un lugar donde pueda ser descargado con seguridad. (API 521, 2014, pág. 32)

Un tanque KOD también conocido como colector KOD o tanque separador, es un equipo que forma parte del sistema de alivio y despresurización de una planta, el fin de este recipiente es la separación gas-líquido del flujo que proviene de las líneas de alivio o venteo que proviene de las esferas de GLP y de otros equipos, para después enviar el gas residuo a la chimenea y ser quemada, mientras el condensado despachar al tanque de líquidos contaminados.

Dentro del recipiente KOD las partículas líquidas se separarán cuando:

- El tiempo de residencia del gas es igual o mayor al tiempo requerido para recorrer la altura vertical disponible a la velocidad de desprendimiento de las partículas líquidas y
- La velocidad vertical del gas es suficientemente baja para permitir el desprendimiento del gas.

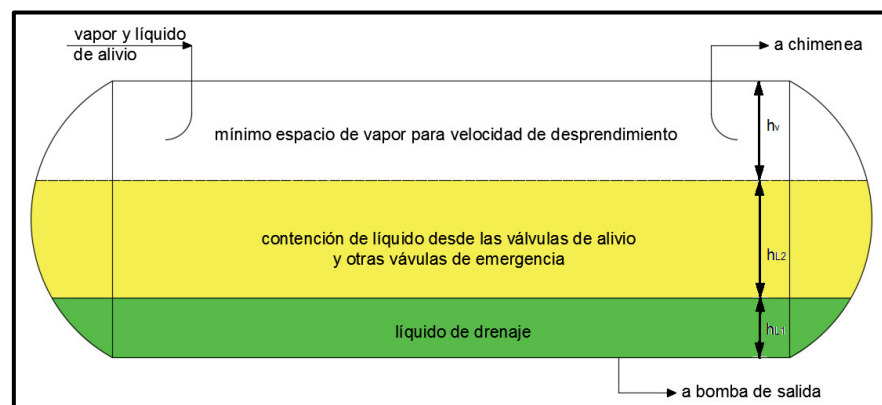


Figura 1.7 Recipiente a presión KOD

Fuente: (Mofrad, 2014, pág. 1)

Además, hay que considerar el efecto de cualquier líquido contenido en el recipiente puede reducir el volumen disponible para la separación gas-líquido, (véase la figura 1.7). Este líquido puede ser el resultado del condensado propio del proceso o por el líquido que acompaña al entrar el gas. (API 521, 2014, págs. 63-64)

En la operación de terminales de gasoducto que reciben GLP, cuyo propósito es la recepción de GLP para su despacho a transportistas, distribuidores o usuarios se utiliza el código API 2510. El (API 2510, 2001, pág. 1) indica que “la seguridad de las instalaciones de almacenamiento de GLP se ve reforzada por el empleo de buenas prácticas de ingeniería, como las recomendadas por esta normativa”.

El (API 2510, 2001, pág. 3) estableció en referencia a los tanques de GLP que “los recipientes deberán cumplir con los requerimientos del ASME, BPVC, Sección VIII, División 1 o 2”.

El código División 2 está desarrollado principalmente para abordar el diseño y la fabricación de recipientes a presión y resultará en ahorros de costos significativos para muchos recipientes. (Osage, 2007, pág. 3)

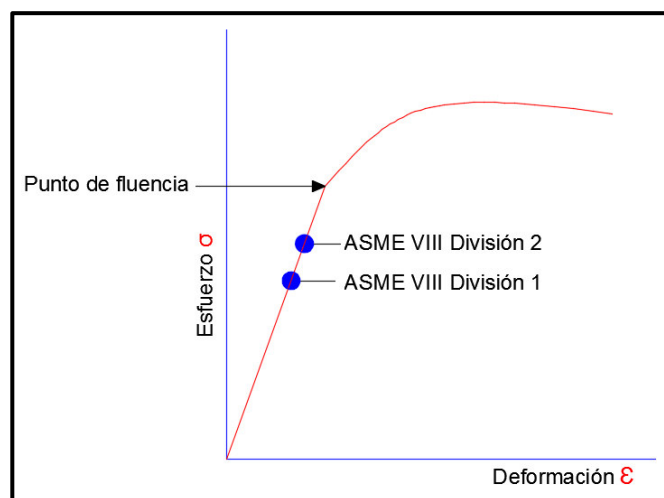


Figura 1.8 Comparación de normativas

Fuente: (Delaforce, 2011)

El código División 2 permite el uso de un mayor valor de esfuerzo permisible, ya que su factor de seguridad es menor comparado al División 1, véase la figura 1.8. Adicional, los requerimientos de inspección, pruebas y ensayos son más rigurosos.

De acuerdo con los datos del directorio del NBBI por sus siglas en inglés del Consejo Nacional de Inspección de Calderas y Recipientes a Presión, a la fecha de la realización de este trabajo existen siete fábricas autorizadas en el Ecuador para la construcción de recipientes a presión con estampe U, y solo tres empresas para la fabricación con estampe U2. Es decir, Ecuador cuenta con proveedores para la producción de recipientes a presión hasta el código ASME Sección VIII División 2. (NBBI, 2016)

1.3.1 Características generales del gas licuado de petróleo (GLP)

Tabla 1.1 Requisitos del GLP

Requisito	Unidad	Propano comercial		Mezcla Propano-Butano		Butano comercial	
		mín.	máx.	mín.	máx.	mín.	máx.
Presión de vapor a 37,8°C (100°F)	Pascal		14,47x10 ⁵		13,78x10 ⁵		4,82x10 ⁵
	(psi)		210		200		70
Temperatura de evaporación del 95% del volumen a 1,0133x10 ⁵ Pa	°C		-38.3		2.2		2.2
	°F		-37		36		36
Corrosión sobre la lámina de cobre			No. 1		No. 1		No. 1
Contenido de azufre	mg/m ³		343		343		343
Residuo de evaporación de 100 cm ³	cm ³		0.05		0.05		0.05
Pentano y pesados (C5+)	%		-		2.0		2.0
Butano y pesados (C4+)	%		2.5				

Fuente: INEN 0675, 1982, pág. 2

Es un producto constituido fundamentalmente por propano (C₃H₈), butano (C₄H₁₀) o sus mezclas, aunque a temperatura y presión ambientales son gases, son fáciles de licuar, de ahí su nombre. El GLP se comercializa como combustible gaseoso y debe cumplir con los requisitos establecidos por la norma técnica (INEN 675, 1982), ver un extracto en la tabla 1.1.

1.3.2 Propiedades físicas del gas licuado de petróleo

En Ecuador el GLP que se comercializa es una mezcla de propano 70% y butano 30%. Las propiedades principales de esta mezcla se muestran en la tabla 1.2.

Tabla 1.2 Propiedades físicas del propano y butano

Nombre		Propano	Butano
Fórmula química		C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀
Gravedad específica (líquido)		0.508	0.584
Gravedad específica (vapor)		1.522	2.006
Límites de inflamabilidad (% de aire)	Sup.	9.5	8.5
	Inf.	2.4	1.9
Poder calorífico Kcal/Kg		11,900	12,100
Metros cúbicos de vapor por galón del líquido		1.032	0.900
Litros de vapor por litros de líquido		272.72	237.93

Fuente: (Austrogas)

Uno de los principales beneficios de la manipulación de gases en forma licuada es la enorme reducción de volumen resultante de la licuefacción de gas. Los ahorros se consiguen porque al vaporizar 1 litro de GLP en fase líquida se obtiene casi 262 litros de GLP en fase de vapor. Es importante recalcar que para llegar a la licuefacción del gas es necesario altas presiones, por lo que las exigencias en los diseños y construcciones de recipientes a presión se hacen más riguroso y por consiguiente la verificación e inspección del equipo.

Como medida de prevención de riesgos, las empresas identifican los peligros de un material en un rombo o diamante de seguridad de acuerdo a la norma (NFPA 704, 2012), ver figura 1.9. Esta norma las clasifica en cuatro categorías:

- Salud: Capacidad de un material para causar daño debido al contacto o ingreso al cuerpo vía inhalación, ingestión, contacto con la piel, o con los ojos.
- Inflamabilidad: Grado de susceptibilidad de los materiales a incendiarse.
- Reactividad: Grado de susceptibilidad intrínseca de los materiales a liberar energía.
- Peligros especiales: Esto trata de propiedades de los materiales que causan problemas especiales o requieren técnicas especiales de combate de incendio.

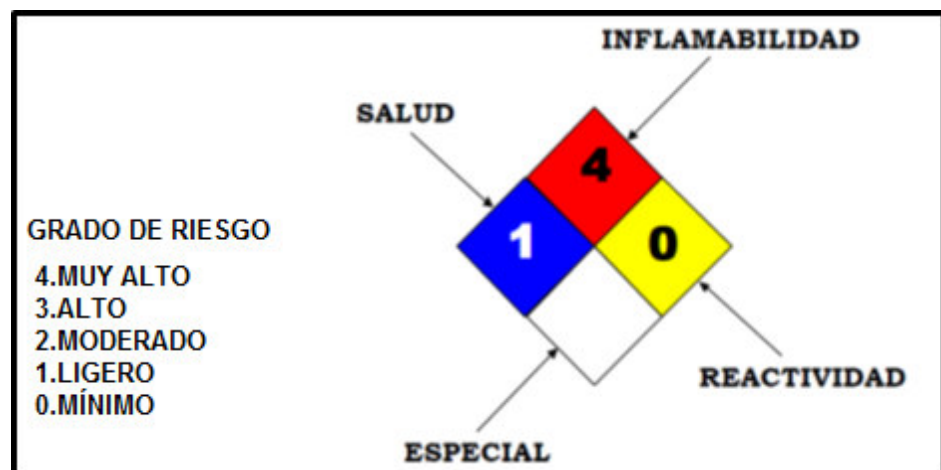


Figura 1.9 Rombo de clasificación de riesgo NFPA-704

Fuente: (PEMEX, pág. 1)

1.4 Análisis de alternativas de solución

El siguiente punto trata de alcanzar una solución para iniciar el dimensionamiento del equipo.

El diseño mecánico para un recipiente KOD involucra la orientación del tanque, forma geométrica de su cabezal y material de cada uno de los componentes del equipo.

1.4.1 Factores de influencia

Los factores o criterios que influyen para el diseño del tanque en cuanto a la orientación, forma, y selección de materiales son los siguientes:

- Recorrido del gas: La eficiencia de la separación depende de la longitud total del recorrido del gas dentro del recipiente, con mayor recorrido mayor eficiencia. (Ver figura 1.10)
- Relación de resistencia: Relación de la capacidad de un cuerpo para resistir una fuerza considerando los mismos parámetros de comparación.
- Presión de fluido estático: Presión debida a un fluido en reposo, a mayor nivel del líquido, tendrá mayor presión en el fondo del recipiente.
- Capacidad volumétrica: Volumen de un fluido que puede almacenar el componente.
- Costo de material: El precio de su materia prima por unidad.
- Peso: Masa del equipo o componente
- Costo de transporte: Costo realizado en la logística para el traslado del equipo.
- Centro de gravedad: Punto que representa el eje del peso del equipo.
- Corrosión: Es el ataque destructivo de un material por la reacción con el ambiente, u otros agentes líquidos o gaseosos, usualmente es representada en milímetros.
- Seguridad ambiental: El gas que se produce durante el proceso de los derivados de hidrocarburo deberá ser adecuadamente manejado en la planta. (Decreto Ejecutivo 1215, 2001)

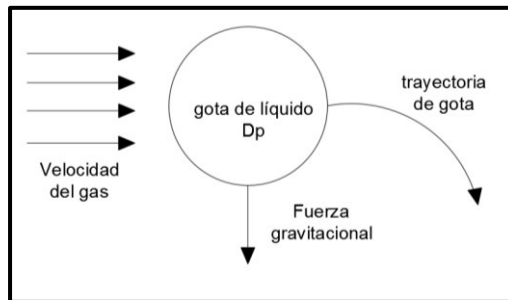


Figura 1.10 Esquema de separación de gas-líquido

Fuente: Elaboración propia

Orientación del tanque

Un recipiente está clasificado de acuerdo a su orientación como horizontal cuyo eje axial se encuentra paralelo al eje horizontal del sistema referencial de coordenadas, y la orientación vertical cuyo eje axial se encuentra perpendicular al eje horizontal. (Ver figura 1.11)

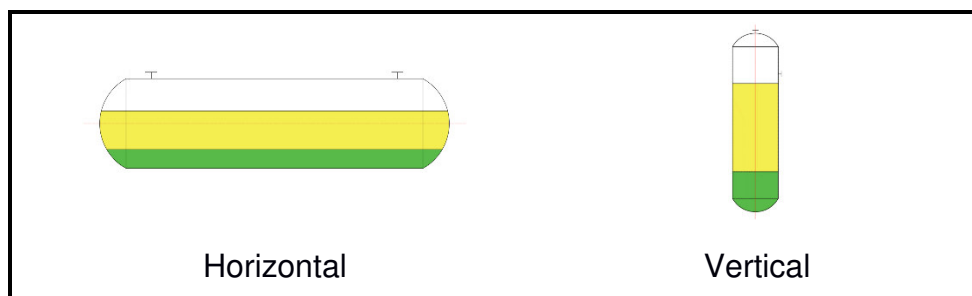


Figura 1.11 Orientación de tanques

Elaboración propia

Materiales

Con referencia al (API 2510, 2001) y el (ASME VIII División 2, 2013) indican que todos los materiales de construcción que contengan GLP deberán cumplir los requerimientos de ASME BPVC Sección II.

Los materiales ferrosos más utilizados en este tipo de tanques son los detallados en la tabla 1.3, indicando sus propiedades.

Tabla 1.3 Propiedades de materiales ferrosos

Especificación No.	Tipo / Grado	Esfuerzo mínimo de tensión (MPa)	Esfuerzo mínimo de fluencia (MPa)	Temperatura máxima de uso °C
SA-36	-	400	250	371
SA-516	70	485	260	538

Fuente: ASME II, 2013, Tabla 5A

Tipo de cabezas

Algunas variedades de cabezas formadas son utilizadas para cerrar el final de los recipientes cilíndricos. En esta sección se detallará 3 tipos de cabezales utilizadas en la norma (ASME VIII División 2, 2013).

Las cabezas toriesféricas son el tipo más común de cabezal utilizado para la fabricación de recipientes a presión y usualmente el más económico de formar, por tal motivo son las más solicitadas en la industria ecuatoriana, y recipientes sin estampe ASME. Cabe añadir que, el radio de curvatura L es igual al diámetro interior del recipiente o menos (normalmente L está entre 90-95% del diámetro interior del tanque). Así mismo, el radio de transición r debe estar entre 6-10% de L de la cabeza. La longitud del faldón está normalmente entre 10mm y 30mm dependiendo del diámetro y grosor de la cabeza que se va a formar. Véase la figura 1.12 (a)

Las cabezas elipsoidales, son más profundas que las toriesféricas y por lo tanto más fuertes y capaces de resistir mayores presiones. Estas cabezas son más difíciles de formar por la mayor profundidad requerida. Como resultado, éstos son más costosos de formar que las cabezas toriesféricas, pero pueden permitir una reducción en el grosor del material a medida que la resistencia es mayor. El radio de curvatura L es aproximadamente 0.8 del diámetro exterior del recipiente, y el radio de transición r es alrededor de 0.154 del diámetro exterior del tanque. Una relación entre la altura y su diámetro más utilizado es de 2:1, ya que proporciona una mejor distribución de las cargas de presión. Véase la figura 1.12 (b)

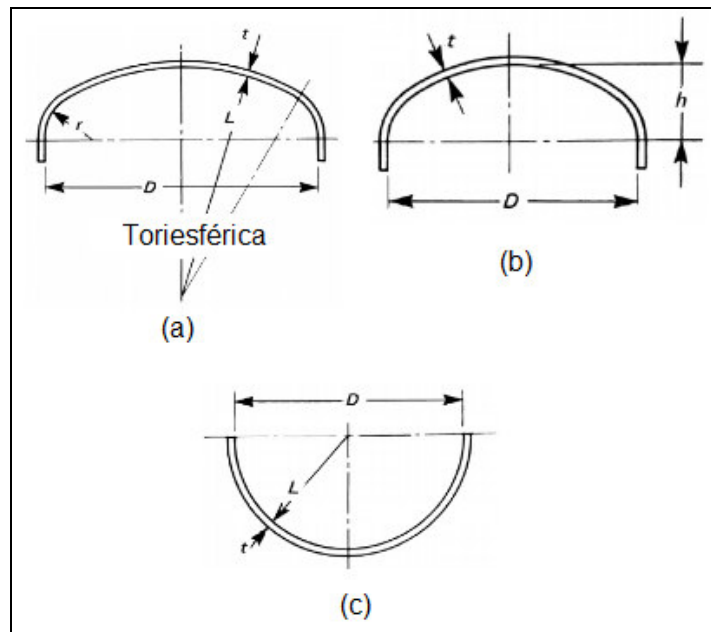


Figura 1.12 Tipos de cabezales

Elaboración propia

En las cabezas hemisféricas su resistencia a esfuerzos de presión es mayor comparado a las toriesféricas y elipsoidales. El radio de curvatura para una cabeza hemisférica deberá ser la mitad del diámetro interior del recipiente, es decir $L=D/2$. Véase la figura 1.12 (c).

1.4.2 Selección de alternativas

De acuerdo a los factores de influencia mencionados en la sección 1.4.1, se escogerá la mejor solución.

Orientación del tanque

Cuando se desea almacenar grandes cantidades de líquido y el flujo de vapor es alto, el recipiente horizontal suele ser el más económico, aunque la diferencia está principalmente en como el fluido es dirigido; a mayor recorrido del gas, mejor es la eficiencia de separación.

En los cálculos de recipientes a presión es necesario tomar en consideración la presión de fluido estático. Al comparar un tanque lleno de agua con diámetro de 2.5 metros y longitud de 6 metros (sin considerar las cabezas), la presión de fluido estático sería de 24.5 kPa para un tanque horizontal y de 58.8 kPa para el vertical.

Para poder transportar a un tanque vertical deberá desarrollarse elementos de apoyo lo que implica un costo adicional en la logística de transporte

Los recipientes horizontales al tener su centro de gravedad más bajo que los verticales, son más resistentes a fuerzas laterales como viento o sismo, y también ayuda a que el tanque no tenga tirantes para evitar el volteo.

Como resultado de los factores de influencia en la tabla 1.4, se obtiene la orientación horizontal de la matriz de selección de orientación del tanque KOD.

Tabla 1.4 Matriz de selección de orientación de KOD

Criterios de diseño	Ponderación	Horizontal	Vertical
Recorrido de gas	40%	10	5
Presión de fluido estático	30%	10	4
Costo de transporte	20%	10	8
Centro de gravedad	10%	10	8
Total, ponderado	100%	10	5.6

Elaboración propia

Material

Lo principal al escoger el material del cuerpo y cabeza es que pueda resistir la presión de diseño establecida al menor espesor deseado, ya que esto influirá de manera directa en el peso total del tanque, proceso de soldadura, cantidad de soldadura a depositar, tratamientos térmicos, costo de material, e incluso en la manipulación del equipo.

Por ejemplo, asumiendo que se tiene la misma condición de diseño es decir presión a 1724 kPa y diámetro del tanque 2.5 metros, el espesor recomendado será de 12.7 mm para el material SA-516-70 y 15.87 mm para el SA-36.

El material SA-516-70 para el cuerpo y cabezales es el resultado de los parámetros de influencia presentado en la tabla 1.5

Tabla 1.5 Matriz de selección de material de cuerpo y cabeza

Criterios de diseño	Ponderación	SA-36	SA-516-70
Relación de resistencia	50%	8.2	10
Peso	30%	10	10
Costo de material	20%	10	9.6
Total, ponderado	100%	9.1	9.92

Elaboración propia

Tipo de cabezas

Seleccionar el tipo de cabeza dependerá de la resistencia a la presión y, por ende, obtener un menor espesor considerando las mismas condiciones, que se verá reflejado en el consumo de soldadura, peso, manipulación y costo de material.

La capacidad volumétrica es mayor en las cabezas hemisféricas para un mismo diámetro, por dar un ejemplo, para una cabeza hemisférica con diámetro de 2.4 m tendrá 1003 gal., la elipsoidal de 501 gal., mientras que para una toriesférica es de 318 gal. (Megvesy, 2008, págs. 416-417)

Por sus métodos de fabricación el costo de las cabezas hemisféricas usualmente son las más altas y las toriesféricas las más económicas. Cabe indicar que el espesor final de los cabezales hemisféricos después del conformado tiene una reducción entre el 15% al 28% de su espesor nominal.

La tabla 1.6 muestra la selección de las cabezas hemisférica a utilizar para el diseño del recipiente KOD.

Tabla 1.6 Matriz de selección de cabezas de KOD

Parámetros	Ponderación	Toriesférica	Elipsoidal	Hemisférico
Relación de resistencia	40%	3.4	9	10
Capacidad volumétrica	30%	3.2	5	10
Peso	20%	3.4	8	10
Costo de material	10%	4	10	7
Total, ponderado	100%	3.4	5.7	9.7

Elaboración propia

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA DEL DISEÑO

Para desarrollar el diseño estructural del tanque K.O.D., se elaboró un esquema, que se lo puede observar en la figura 2.1.

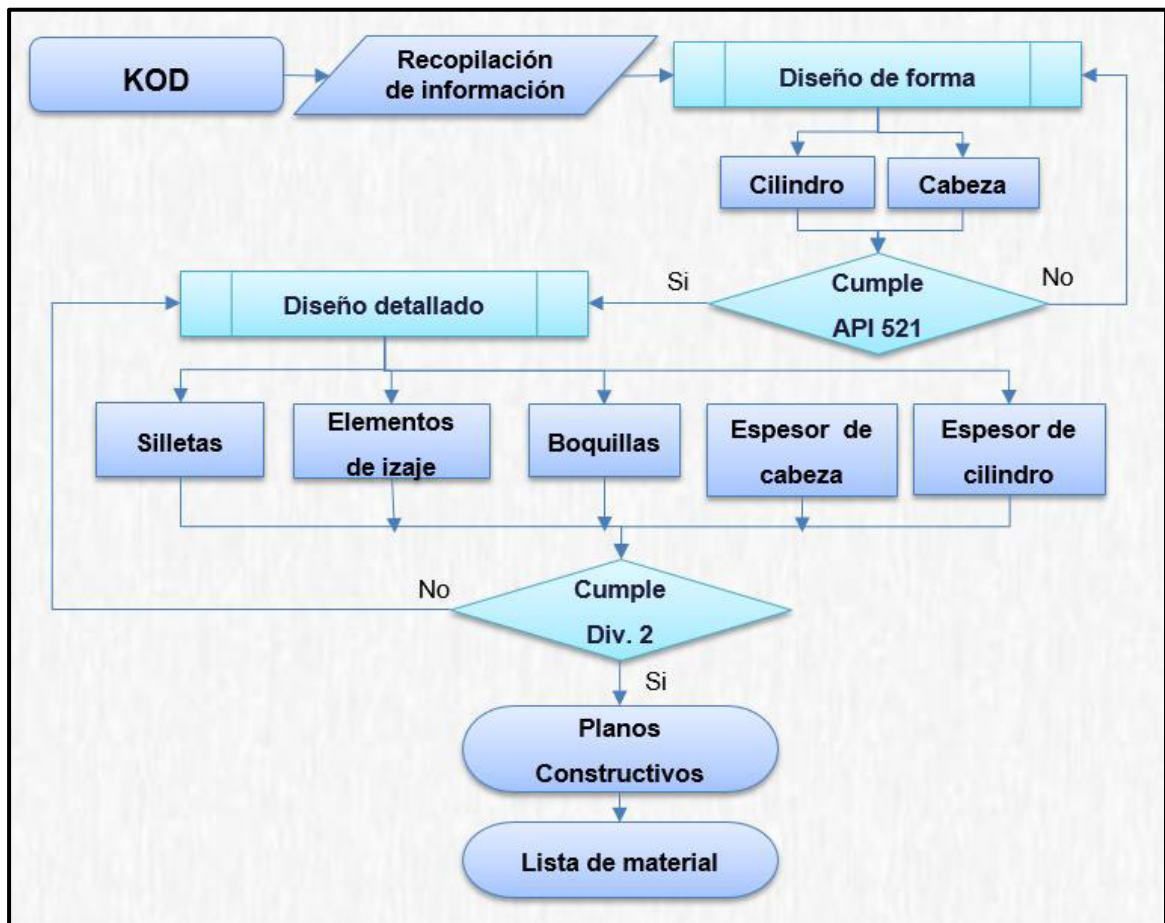


Figura 2.1 Metodología para el diseño del proyecto

Elaboración propia

2.1 Recopilación de información

Para ejecutar los cálculos de diseño de este proyecto se deberán tomar como condiciones de diseño los datos mostrados en la tabla 2.1. Estos datos son una recopilación del proceso del sistema de despresurización en la terminal hidrocarburífera.

Tabla 2.1 Condiciones de diseño

Capacidad total	19.5	tm
Gravedad específica del GLP (líquido), SG	0.53	
Peso molecular, M	47.54	g/mol
Diámetro de la partícula (gota)	300	μm
Viscosidad del gas, μ	0.01280	cP
Flujo másico del gas, M_G	11.6	kg/s
Flujo másico del líquido, M_L	0.58	kg/s
Caudal de drenaje de condensado, Q_D	50	gpm
Temperatura de operación, T_o	0-116	$^{\circ}\text{C}$
Presión de operación, P_o	193.05	kPa
Factor de compresibilidad del gas, Z	0.86	
Presión interna de diseño	1724	kPa
Presión externa de diseño (Vacío total)	103.42	kPa
Temperatura de diseño, T_d	177	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura mínima de diseño	-28.9	$^{\circ}\text{C}$
Corrosión permisible, t_c	3.2	mm
Coeficiente de junta de soldadura, E	1	
Módulo de Young, E_y	193.38×10^3	MPa

Elaboración propia

Además, en el diseño del recipiente KOD se considerará un volumen de drenaje de 500 gal, remanentes de las operaciones de bacheo. Asimismo, un tiempo de retención del líquido condensado de 120 min, en caso de fallas al sistema.

Acerca de la presión de diseño que se utilizará en los cálculos de espesores en el cuerpo y cabezal del tanque KOD, esta deberá ser la presión en el cabezal superior con las tolerancias para los incrementos de presión sobre las secciones más bajas del cilindro y el cabezal inferior debido a la presión hidrostática del producto. Dicho lo anterior de los requisitos del GLP en la tabla 1.1, se puede obtener que la presión máxima de vapor es de 1.447 MPa, de modo que, la presión de diseño del recipiente KOD, será de 1724 kPa, acorde con la norma (NFPA 58, 2014). (Ver Apéndice A)

Por otra parte, la eficiencia de la junta soldada es expresada en forma numérica y es usada en el diseño como factor multiplicador del esfuerzo permisible (ver Apéndice C); para motivos de nuestro diseño se considerará 100% de radiografía en las juntas longitudinales y circunferenciales del recipiente KOD, además se utilizará como material del cilindro y cabezales el SA-516-70. Es por esto que, la eficiencia de la junta será de $E=1$. Para las bocas el SA-105 y 106-B, mientras para las partes no sometidas a presión se utilizará el SA-36.

Las principales propiedades mecánicas de estos materiales se encuentran en la tabla 2.2

Tabla 2.2 Propiedades mecánicas de materiales a usar en KOD

Especificación No.	Tipo / Grado	Esfuerzo mínimo de tensión (MPa)	Esfuerzo mínimo de fluencia (MPa)	Esfuerzo permisible	
				@ 177°C (MPa)	@ 28°C (MPa)
SA-36	-	400	250	144	165
SA-516	70	485	260	152	175
SA-106	B	415	240	140	161
SA-105	-	480	240	144	165

Fuente: ASME II, 2013, Tabla 5A

En cuanto a la corrosión el equipo deberá diseñarse para una vida útil mínima de 20 años, a una tasa de 1.5875 mm cada 10 años. En otras palabras, el espesor de corrosión será de 3mm en el interior de los elementos a presión.

Tabla 2.3 Condiciones de diseño de sismo

Norma aplicable	ASCE 7-10
Aceleración vertical sísmica considerada	Sí
Factor de importancia, I_e	1.25
Clase de sitio	D
Aceleración espectral periodos cortos, como porcentaje de la gravedad, S_s	62.5
De la tabla 11.4-1 del (ASCE 7, 2010), F_a	1.3

Elaboración propia

Además, el tanque deberá ser diseñado para soportar cargas de sismo y viento, cuyas condiciones se establecen en las tablas 2.3 y 2.4

Tabla 2.4 Condiciones de diseño de viento

Norma aplicable	ASCE7-10
Factor de ráfaga	1.15
Tipo de exposición	C
Velocidad de viento	100 Km/h

Elaboración propia

Cabe añadir que la instrumentación no formará parte del presente trabajo, sin embargo, se mencionará las bocas con dimensiones típicas a estos tanques.

2.2 Diseño de forma

Con respecto al diseño de forma, se iniciará el proceso de dimensionamiento del tanque KOD, para obtener la capacidad igual o mayor a la requerida.

Tabla 2.5 Dimensionamiento de tanque KOD

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Diámetro (m)	2.286	2.44	2.5	2.5
Ancho de plancha (m)	2.44	2	1.8	2
Número de planchas	3	3	3	3
Longitud total (m)	7.32	6	5.4	6
Capacidad (tm)	19.23	18.9	18.38	19.94

Elaboración propia

Por otro lado, el recipiente contará con los siguientes componentes:

- Boca de entrada del fluido.
- Boca de salida de gas.
- Salida de líquido de drenaje.

- Bocas para instrumentación.
- Entrada hombre para inspección.
- Soporte o silletas.
- Elementos de izaje.

Por lo tanto, un esquema del recipiente se puede apreciar en la figura 2.2.

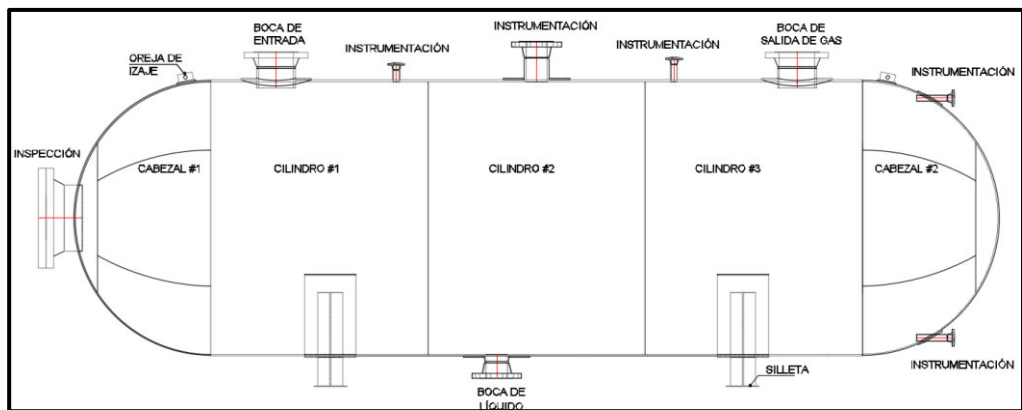


Figura 2.2 Diseño de forma tanque KOD

Elaboración propia

2.2.1 Cuerpo y cabezal

El siguiente punto trata de determinar la longitud mínima de recorrido del fluido que entra al tanque KOD, con el fin de que se produzca la separación gas-líquido, según (API 521, 2014),

Paso 1. Determinar el coeficiente de arrastre mediante la figura 2.3, y las ecuaciones 2.2.1, 2.2.2. Se utilizará el diámetro de la partícula de 300 μm .

$$C(R_e^2) = \frac{0.13 \times 10^8 (\rho_G) (D_p)^3 (\rho_L - \rho_G)}{\mu^2} \quad (\text{Ec. 2.2.1})$$

$$\rho_G = \frac{P_o M}{Z R T_o} \quad (\text{Ec. 2.2.2})$$

Donde:

D_p = diámetro de la partícula, [m].

ρ_G = Densidad del gas, [kg/m³].

ρ_L = Densidad del líquido, [kg/m³].

P_o = Presión de operación, [kPa].

M = Peso molecular [g/mol].

R = Constante de gases ideales $\left[8.31 \frac{m^3 \cdot Pa}{^\circ K \cdot mol}\right]$.

T_o = Temperatura de operación, [°K]

μ = Viscosidad dinámica [cP]

Z = Factor de compresibilidad del gas [0.86]

$C(R_e^2)$ = Factor relacionado a Reynolds

Reemplazando los valores de la tabla 2.1, en las ecuaciones 2.2.2, se obtiene:

$$\rho_G = 3.294 \frac{Kg}{m^3}$$

Ingresando la densidad del gas en la ecuación 2.2.1

$$C(R_e^2) = 3717$$

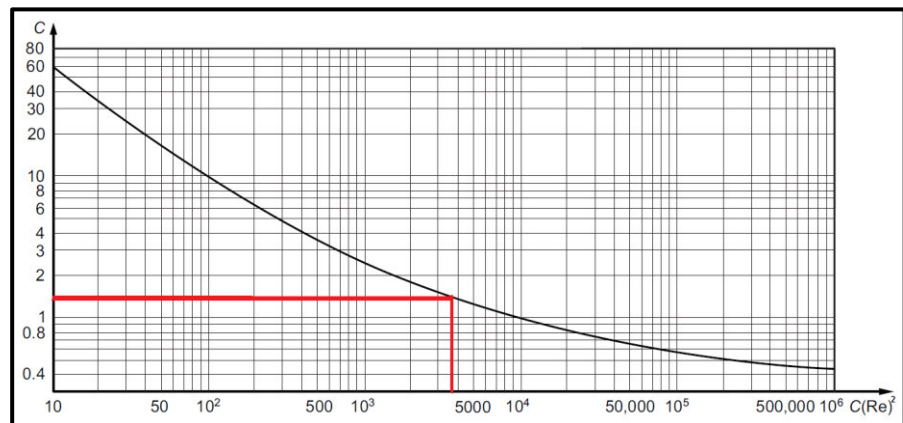


Figura 2.3 Coeficiente de arrastre

Fuente: API 521, 2014, pág. 137

Por lo tanto, se ingresa en la figura 2.3 con el valor de $C(R_e^2)$, para obtener el coeficiente de arrastre igual a $C = 1.4$.

Paso 2. Determinar la velocidad vertical de la gota para que se produzca la separación del gas-líquido.

$$U_c = 1.15 \sqrt{\frac{g \cdot D_p (\rho_l - \rho_v)}{\rho_v (C)}} \quad (\text{Ec. 2.2.3})$$

Donde:

g = gravedad, $\left[9.8 \frac{m}{s^2}\right]$.

U_c = Velocidad vertical de la gota, $\left[\frac{m}{s}\right]$

Ingresando los valores en la ecuación 2.2.3, se obtiene:

$$U_c = 0.65 \frac{m}{s}$$

Paso 3. Calcular el área transversal requerida para los diferentes niveles expresados en la figura 1.7.

– Área total del cilindro, A_C ,

$$A_C = \frac{\pi}{4} D^2$$

Donde:

D = Diámetro interior del tanque KOD, $[m]$

Por consiguiente, se obtiene que $A_C = 4.9 \text{ m}^2$

- Área de drenaje, como se afirmó en la sección 2.1, el volumen de drenaje será de 500 galones

$$A_{L1} = \frac{V_D}{L} \quad (\text{Ec. 2.2.4})$$

Donde:

A_{L1} = Área de drenaje [m^2]

V_D = Volumen de drenaje, [m^3]

L = Longitud de recipiente tangente-tangente, [m]

Por consiguiente, se obtiene:

$$A_{L1} = 2.315 \text{ m}^2$$

- Área de contención de líquido, A_{L2} , el volumen ocupado en este nivel deberá permanecer en el recipiente un tiempo de retención de 120 min,

$$A_{L2} = \frac{60}{L} \left(\frac{M_L}{\rho_L} \right) \varphi_{ret} \quad (\text{Ec. 2.2.5})$$

Donde:

A_{L2} = Área de contención, [m^2]

M_L = Flujo másico del líquido, [$\frac{kg}{s}$]

φ_{ret} = Tiempo de retención del líquido, [s]

De manera que, se obtiene: $A_{L2} = 1.31 \text{ m}^2$

- Área de gas, A_G , el área de la sección transversal restante para el flujo de gas se consigue mediante la ecuación 2.2.6:

$$A_G = A_C - (A_{L1} + A_{L2}) \quad (\text{Ec. 2.2.6})$$

Donde:

$A_G = \text{Área ocupada por el gas, [m}^2\text{]}$

De manera que,

$$A_G = 3.27 \text{ m}^2$$

Dicho lo anterior, el área seccional de un círculo en relación a la altura del líquido o gas, está dada por la siguiente ecuación:

$$A_G = (R_i)^2 \cos^{-1} \left(\frac{R_i - h_G}{R_i} \right) - (R_i - h_G) \sqrt{2h_G R_i - h_G^2} \quad (\text{Ec. 2.2.7})$$

Donde:

$h_G = \text{Altura ocupada por el gas, [m]}$

Por lo tanto, realizando iteraciones de h_G , hasta aproximarse al valor de A_G , se obtiene:

$$h_G = 1.57 \text{ m}$$

Paso 4. Calcular el tiempo de caída de gota

$$\varphi_d = \frac{h_G}{U_c} \quad (\text{Ec. 2.2.8})$$

Donde:

$\varphi_d = \text{Tiempo de caída de gota hasta el nivel de líquido de contención, [s]}$.

Por lo tanto, $\varphi_d = 2.37 \text{ s}$

Paso 5. La velocidad de N pases de vapor, basados sobre una pasada, es determinada bajo la siguiente ecuación.

$$V_G = \frac{Q_G}{N \cdot A_G} \quad (\text{Ec. 2.2.9})$$

$$Q_G = \frac{M_G}{\rho_G} \quad (\text{Ec. 2.2.10})$$

Donde:

M_G = Flujo másico del gas, $[kg/s]$

Q_G = Caudal del gas, $[m^3/s]$

V_G = Velocidad del gas dentro del recipiente, $[m/s]$

Por lo tanto,

$$Q_G = 3.52 \text{ m}^3/s$$

$$V_G = 1.07 \text{ m/s}$$

Paso 6. Computar la longitud mínima requerida para la separación del fluido gas-líquido mediante la siguiente ecuación.

$$L_{min} = V_G \cdot \varphi_d \cdot N \quad (\text{Ec. 2.2.11})$$

Por lo tanto,

$$L_{min} = 2.55 \text{ m.}$$

No obstante, en el caso de que el tanque se llene hasta una altura de 2.2m, es decir $A_{L1} + A_{L2} = 2.2 \text{ m}$, la longitud mínima para la separación sería 4.82m. Por lo tanto, las dimensiones del cuerpo cilíndrico, longitud $L = 6m$ y su diámetro interior $D = 2.5m$, son aceptables acorde con la norma API 521, 2014. Hay que mencionar que una relación de 2 a 4 entre el diámetro y longitud del tanque son recomendables en recipientes a presión.

2.2.2 Bocas o aperturas

Siguiendo la trayectoria del flujo de gas-líquido a través del separador, los siguientes componentes son identificados. Adicional se tiene los siguientes parámetros iniciales mostrados en la tabla 2.1.

Boca de entrada de flujo

De acuerdo a la publicación de (SHELL, 2009, pág. 33), el diámetro interno de la boca de entrada, d_I , deberá ser tomado igual que la tubería de alimentación. También, debe cumplir el criterio de momentum expresado en la ecuación 2.2.12.

$$\rho_m v_{m,in}^2 \leq 5000 \quad [Pa] \quad (\text{Ec. 2.2.12})$$

Además,

$$\rho_m = \frac{M_G + M_L}{Q_G + Q_L} \quad (\text{Ec. 2.2.13})$$

$$Q_L = \frac{M_L}{\rho_L} \quad (\text{Ec. 2.2.14})$$

ρ_m = Densidad de la mezcla gas-líquido, $\frac{kg}{m^3}$

Q_L = Caudal volumétrico del líquido, $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

$v_{m,in}$ = Velocidad máxima del fluido gas-líquido en boca de entrada, $\left[\frac{m}{s}\right]$

Por consiguiente,

$$Q_L = 0.00109 \frac{m^3}{s}$$

$$\rho_m = 3.46 \frac{kg}{m^3}$$

$$v_{m,in} = 38.01 \frac{m}{s}$$

Por lo tanto, el diámetro de la boca de entrada será

$$d_1 = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{Q_G + Q_L}{v_{m,in}}} \quad (\text{Ec. 2.2.15})$$

Donde:

d_1 = Diámetro de boca de entrada. [m]

Es decir que, $d_1 = 0.343 \text{ m}$

De modo que, se seleccionará NPS 14" para la boca de entrada del fluido.

Es necesario recalcar que su ubicación estará en la parte superior del cuerpo cilíndrico.

Boca de salida de gas

El diámetro de la boca de salida de gas, d_2 , deber ser tomado igual a la tubería de descarga, pero también debe satisfacer el criterio de momentum, tomado de (SHELL, 2009, pág. 33)

$$\rho_G v_{G,out}^2 \leq 6000 \quad [Pa] \quad (\text{Ec. 2.2.16})$$

Donde,

$v_{G,out}$ = Velocidad máxima del fluido gas-líquido en boca de salida, $\left[\frac{m}{s}\right]$

Es decir que, $v_{G,out} = 42.67 \text{ m/s}$

Por consiguiente,

$$d_2 = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{Q_G}{v_{G,out}}} \quad (\text{Ec. 2.2.17})$$

Donde,

d_2 = Diámetro de salida de gas, [m]

Por lo tanto,

$$d_2 = 0.324 \text{ m}$$

De modo que, la boca de salida del gas deberá ser NPS 14" y será ubicado en la parte superior del cuerpo cilíndrico.

Boca de inspección

Por lo que se refiere a la boca de inspección, todo recipiente a presión que esté sujeta a corrosión interna o que tienen partes sujetas a la erosión o abrasión mecánica, deberá estar provista de una boca de inspección para examinación y limpieza.

Por lo que, para el diseño de este tanque se seleccionará una boca de NPS 24", que será ubicada en el cabezal hemisférico izquierdo.

Boca salida de líquido

Para la evacuación del líquido condensado (SHELL, 2007, pág. 80) recomienda, que la velocidad no exceda de $v_D = 1 \text{ m/s}$, con un flujo volumétrico de $Q_D = 50 \text{ gpm}$. Además, el mínimo diámetro será de 2".

$$d_3 = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{Q_D}{v_D}} \quad (\text{Ec. 2.2.18})$$

Donde,

Q_D = Caudal volumétrico de salida de líquido de condensado, $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

Por lo tanto,

$$d_3 = 0.0633 \text{ m}$$

De tal forma que, se selecciona una boca NPS 4" para la salida de líquido condensado o drenaje y se ubicará en la parte inferior del cuerpo cilíndrico.

Bocas de instrumentación

Como parte sistema de control del equipo, se considerarán las siguientes bocas:

- Indicador de presión, NPS 2", en parte superior de tanque.
- Transmisor de nivel, NPS 2", en parte superior de tanque.
- Indicador de nivel de alta, NPS 2", en hemisferio derecho a una altura de 2350 mm, desde el fondo del tanque.
- Indicador de nivel de baja: NPS 2", en hemisferio derecho a una altura de 150 mm, desde el fondo del tanque.
- Interruptor de nivel: NPS 4", en parte superior de tanque

Los tamaños seleccionados son estándares para este tipo de equipos.

2.3 Diseño detallado por ASME VIII Div. 2.

En relación con esta sección se determinará el espesor requerido para las partes del cuerpo del tanque, cabezales hemisféricos y bocas, de tal forma que soporten los esfuerzos debido a presión interna y externa. Además, se determinará los esfuerzos sometidos por cargas laterales de sismo y viento transmitidas al cilindro.

En cuanto al cálculo, esta será conforme con los procedimientos dados en la normativa (ASME VIII División 2, 2013), parte 4. Esto es con el análisis de falla en la zona elástica de los materiales del recipiente.

Para el diseño del cuerpo se parte de las consideraciones iniciales dadas en la tabla 2.1. Hay que mencionar, que por motivos de cálculo se asumirá que un líquido con gravedad específica de 0.53 ocupará el nivel entre el fondo del recipiente en estado corroído hasta la altura de la boca de instrumentación de nivel alto igual a 2,353.2 mm.

Por lo tanto, la presión hidrostática, H_s , se computará con la ecuación 2.3.1

$$P_s = g \times H_s \times SG \quad (\text{Ec. 2.3.1})$$

Donde,

P_s = Presión de cabezal hidrostático ejercida por un líquido, $[kPa]$.

H_s = Nivel del líquido desde el fondo del tanque, $[m]$.

SG = Gravedad específica del líquido.

Por lo tanto,

$$P_s = 12.41 \text{ kPa}$$

2.3.1 Espesor de cuerpo por presión interna

El espesor de diseño del cuerpo del tanque KOD por presión interna se calculará por medio de la ecuación 2.3.2 tomada del ASME VIII División 2, párrafo 4.3.3.1. Siempre que los cálculos se realicen en la condición de corrosión.

$$t_d = \frac{D}{2} \left(\exp \left[\frac{P + P_s}{1000 \cdot SE} \right] - 1 \right) + t_c \quad (\text{Ec. 2.3.2})$$

Donde,

D = Diámetro interior del tanque KOD en estado corroído, [mm].

P = Presión de diseño, [kPa].

S = Esfuerzo permisible del material base a temperatura de diseño, [MPa].

E = Eficiencia de junta de soldadura.

t_c = Espesor de corrosión admisible, [mm].

t_d = Espesor de diseño del cuerpo cilíndrico, [mm].

El valor del esfuerzo permisible para el material SA.516-70 y la temperatura de diseño @177°C, es $S= 152 \text{ MPa}$. Ver Apéndice B.

Por lo tanto, de la ecuación antes mencionada se obtiene que el mínimo espesor de diseño para el cilindro por presión interna será de:

$$t_d = 17.68 \text{ mm}$$

No obstante, por motivos de espesores comerciales en el mercado, el espesor nominal del cuerpo será de:

$$t = 19.05 \text{ mm}$$

A continuación, se establece la máxima presión de trabajo permisible (con sus siglas en inglés, MAWP), así mismo en estado corroído mediante la siguiente ecuación:

$$MAWP = 1000 \cdot S E \times \ln \left[\frac{D_o}{D} \right] - P_s \quad (\text{Ec. 2.3.3})$$

Donde,

D_o = Diámetro exterior del cuerpo o cabezal, [mm].

$MAWP$ = Máxima presión de trabajo permisible, [kPa].

Por lo tanto,

$$MAWP = 1,883.16 \text{ kPa}$$

2.3.2 Espesor de cuerpo por presión externa

Como se aprecia en la figura 1.1 una de las causas de falla en tanques KOD, es debido al vacío, por ende, es importante verificar el espesor de diseño por cargas debido a la presión externa. Por consiguiente, de acuerdo a la normativa ASME VIII División 2, párrafo 4.4.5, el espesor deberá ser determinado usando el siguiente procedimiento.

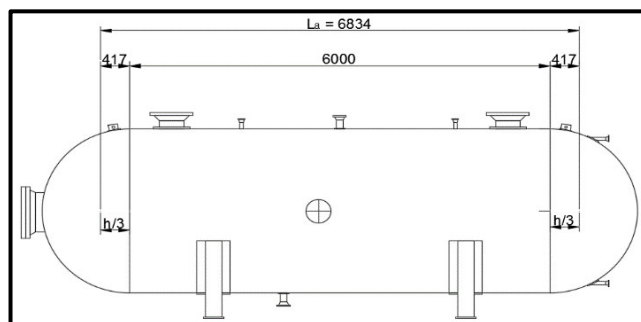


Figura 2.4 Longitud no arriostrada

Fuente: ASME VIII División 2, 2013, pág. 233

Paso 1. Asumir un espesor inicial, t , y longitud no arriestrada, L_a (ver figura 2.4). De igual modo los cálculos se realizarán en estado corrosivo.

Se iniciará el cálculo con el espesor nominal del cuerpo cilíndrico en estado corrosivo, en otras palabras, $t = 19.05 - 3.2 = 15.85$ mm.

Por otro lado, la longitud arriestrada será $L_a = 6,834$ mm.

Paso 2. Calcular el esfuerzo de pandeo elástico pronosticado. F_{he} .

$$F_{he} = \frac{1.6 C_h E_y t}{D_o} \quad (\text{Ec. 2.3.4})$$

$$C_h = 1.12 M_x^{-1.058} \quad (\text{Ec. 2.3.5})$$

$$M_x = \frac{L_a}{\sqrt{R_o t}} \quad (\text{Ec. 2.3.6})$$

Donde,

C_h = Parámetro de carcasa.

E_y = Módulo de elasticidad del material a la temperatura de diseño, [MPa].

F_{he} = Esfuerzo de falla elástica en la membrana circunferencial por compresión, [MPa].

L_a = Longitud arriestrada del recipiente, [mm].

M_x = Parámetro de carcasa.

R_o = Radio exterior de cuerpo cilíndrico o cabezal, [mm].

t = Espesor gobernante, [mm].

Por lo tanto, se obtiene:

$$M_x = 48.197$$

$$C_h = 0.0186$$

$$F_{he} = 35.86 \text{ MPa}$$

Paso 3. Calcular el esfuerzo de pandeo pronosticado. F_{ic} .

$$F_{ic} = F_{he} \quad \text{para } \frac{F_{he}}{S_y} \leq 0.552 \quad (\text{Ec. 2.3.7})$$

Donde,

F_{ic} = Esfuerzo de pandeo pronosticado, al considerar un FS=1.

S_y = Esfuerzo mínimo de fluencia a temperatura de diseño, [MPa]. Ver

Apéndice B, figura B-4

Por lo tanto,

$$0.1573 \leq 0.552$$

Es decir,

$$F_{ic} = F_{he} = 35.86 \text{ MPa}$$

Paso 4. Calcular el valor de factor de diseño real, FS .

$$FS = 2.0 \quad \text{para } F_{ic} \leq 0.55S_y \quad (\text{Ec. 2.3.8})$$

$$35.86 \leq 125.4 \text{ MPa}$$

Por consiguiente, $FS = 2.0$

Paso 5. Calcular la presión externa permisible, P_a .

$$P_a = 2F_{ha} \left(\frac{t}{D_o} \right) \times 1000 \quad (\text{Ec. 2.3.9})$$

$$F_{ha} = \left(\frac{F_{ic}}{FS} \right) \quad (\text{Ec. 2.3.10})$$

Donde,

P_a = Presión externa permisible en ausencia de otras cargas, [kPa].

F_{ha} = Valor del esfuerzo de compresión permisible en la membrana circunferencial, [MPa].

Por lo tanto, resolviendo las ecuaciones se obtiene

$$F_{ha} = 17.93 \text{ MPa}$$

$$P_a = 224 \text{ kPa}$$

Por lo tanto, con el espesor gobernante en estado corroído de 15.85 mm, la presión P_a , es mayor a la presión externa de diseño, y a su vez es la máxima presión externa permisible (con sus siglas en inglés, MAEP).

$$\text{MAEP} = 224 \text{ kPa}$$

2.3.3 Espesor de cabezales hemisféricos del KOD por presión interna

El espesor de diseño de cabezales por presión interna se calculará por medio de la siguiente ecuación tomada del ASME VIII División 2, párrafo 4.3.5.1:

$$t_d = \frac{D}{2} \left(\exp \left[\frac{0.5P}{1000 \cdot SE} \right] - 1 \right) + t_c \quad (\text{Ec. 2.3.11})$$

Por lo tanto, el espesor mínimo de diseño para los cabezales será:

$$t_d = 10.37 \text{ mm}$$

No obstante, por motivos de espesores comerciales en el mercado, el espesor nominal del cabezal será de 12.7 mm.

Sin embargo, tomaremos como espesor gobernante $t = 11.43$ mm que corresponde a un 10% por errores frecuentes después del conformado en los cabezales hemisféricos.

Con este resultado se establece el MAWP para los cabezales hemisféricos, mediante en la condición de estado corroído.

$$MAWP = 2 \cdot 1000 \cdot S E \times \ln \left[\frac{D_o}{D} \right] - P_s \quad (\text{Ec. 2.3.12})$$

Por lo tanto,

$$MAWP = 1,977 \text{ kPa}$$

Cabe mencionar que el MAWP del equipo será la mínima presión de trabajo permisible de todos los componentes.

2.3.4 Espesor de cabezales hemisféricos del KOD por presión externa

De acuerdo a la normativa ASME VIII División 2, párrafo 4.4.7 el espesor de los cabezales por presión externa deberá ser determinado usando el siguiente procedimiento.

Paso 1. Asumir un espesor inicial, t , donde $t = 11.43 - 3.2 = 8.23$ mm (en estado corroído).

Paso 2. Calcular el esfuerzo de pandeo elástico pronosticado, F_{he} .

$$F_{he} = 0.075 E_y \left(\frac{t}{R_o} \right) \quad (\text{Ec. 2.3.13})$$

$$F_{he} = 94.621 \text{ MPa}$$

Paso 3. Calcular el esfuerzo de pandeo pronosticado. F_{ic} .

$$F_{ic} = F_{he} \quad \text{para} \quad \frac{F_{he}}{S_y} \leq 0.55 \quad (\text{Ec. 2.3.14})$$

Por lo tanto,

$$0.4515 \leq 0.55$$

El valor del esfuerzo de pandeo pronosticado.

$$F_{ic} = 94.621 \text{ MPa}$$

Paso 4. Utilizando las ecuaciones 2.3.8, 2.3.9, y 2.3.10 se obtiene la presión externa permisible, P_a .

$$P_a = 617.31 \text{ kPa}$$

Por lo tanto, con el espesor gobernante en estado corroído de 8.23 mm, la presión P_a , es mayor a la presión externa de diseño, y a su vez, la máxima presión externa permisible.

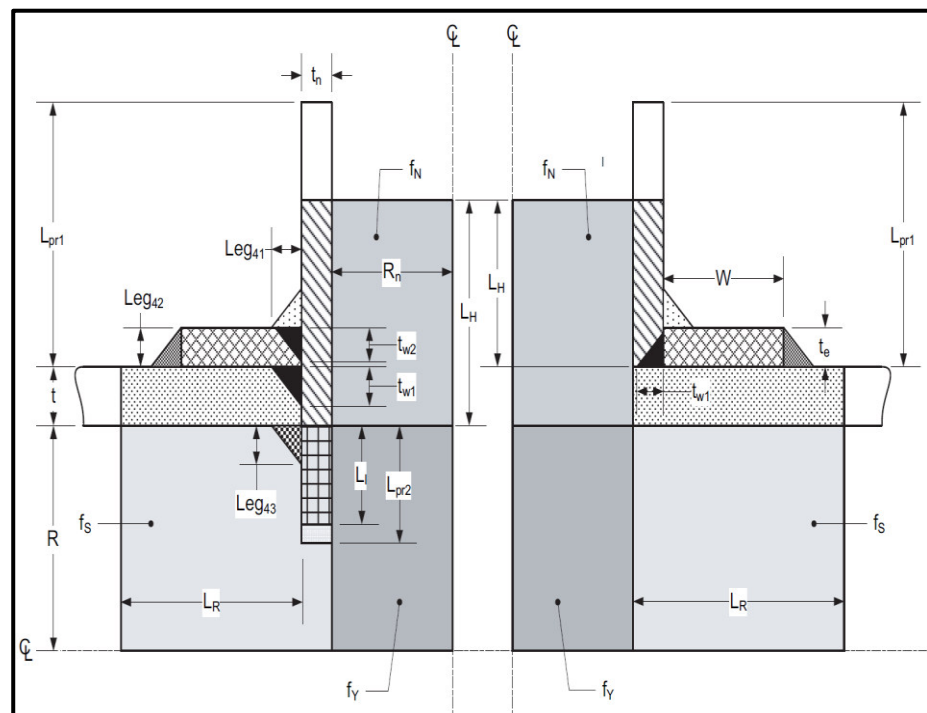
$$\text{MAEP} = 617.31 \text{ kPa}$$

2.3.5 Diseño de bocas o aperturas

Las reglas para el diseño de bocas en el presente trabajo son para bocas ubicadas en el cuerpo y cabezales hemisféricos sujetas a presión interna y presión externa; establecidas en el (ASME VIII División 2, 2013), párrafo 4.5, y deben ser usadas solo si la relación del diámetro interior del cuerpo y el espesor del cuerpo es menor o igual a 400.

Es decir, $400 > 2500\text{mm}/19.05\text{mm} = 131.23$.

Además, la relación entre el corte diametral del eje mayor sobre el diámetro del eje menor de la boca en el cabezal o cuerpo cilíndrico debe ser menor o igual a 1.5. En particular se utilizarán bocas de forma cilíndrica, por lo que la relación entre el eje mayor y el eje menor es igual 1 para las bocas localizadas en el cuerpo cilíndrico. Por lo que, satisfacen las premisas dadas.










-  = A_1 = Area contribuida por cuerpo de tanque
-  = A_2 = Area contribuida por proyeccion exterior
-  = A_3 = Area contribuida por poyección interna
-  = A_{41} = Area contribuida por soldadura exterior
-  = A_{42} = Area contribuida por soldadura de refuerzo a tanque
-  = A_{43} = Area contribuida por soldadura interior
-  = A_5 = Area contribuida por placa de refuerzo
- = Area total contribuida

Figura 2.5 Nomenclatura de bocas con refuerzo

Fuente: ASME VIII División 2, 2013, pág. 262

En el caso de las bocas se utilizará en el diseño dos configuraciones, bocas con refuerzo y sin refuerzo. Así, por ejemplo, las bocas de entrada y salida de fluido tendrán placas de refuerzo, al igual que las bocas de nivel alto, nivel bajo, de inspección, interruptor de nivel y de drenaje.

Por el contrario, el resto de bocas no se colocarán placas de refuerzo, hay que mencionar, además, que el diseño de la boca se hará considerando unión soldada entre la boca y el cuerpo. Ver la figura 2.5 para la nomenclatura de bocas con refuerzo.

Es necesario recalcar que en referencia a la localidad de las bocas en el tanque hay tres tipos, las que se colocan en el cuerpo de forma radial, como la representada en la figura 2.6. que corresponden a:

- Indicador de presión, NPS 2", (D)
- Transmisor de nivel, NPS 2", (F)
- Interruptor de nivel: NPS 4", (C)

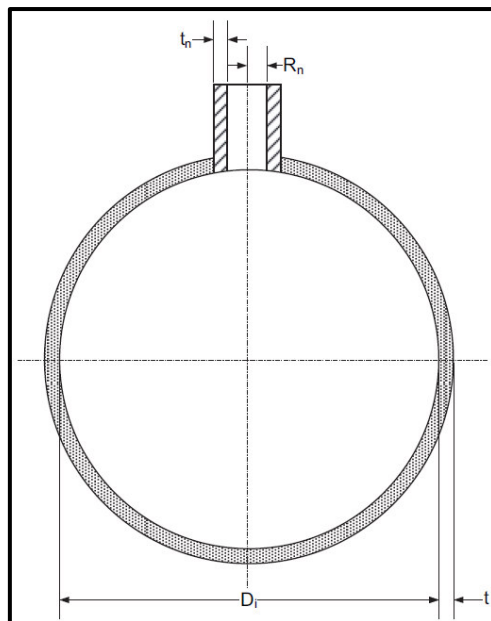


Figura 2.6 Boca radial en cuerpo cilíndrico

Fuente: ASME VIII División 2, 2013, p264

El segundo tipo por su ubicación son las bocas en los cabezales de forma excéntrica, representadas en la figura 2.7:

- Indicador de nivel alto, NPS 2", (G1)
- Indicador de nivel bajo, NPS 2", (G2)

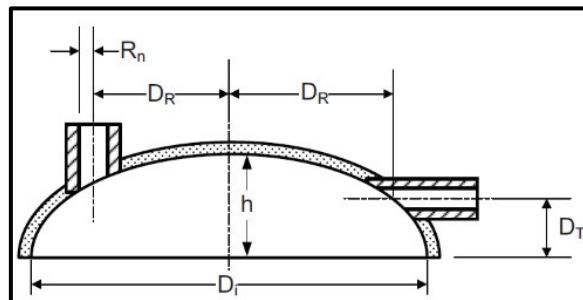


Figura 2.7 Bocas en cabezal excéntricas

Fuente: ASME VIII División 2, 2013, p270

Y, por último, las bocas ubicadas en forma radial al cabezal representadas en la figura 2.8:

- Boca de inspección, NPS 24", (M)

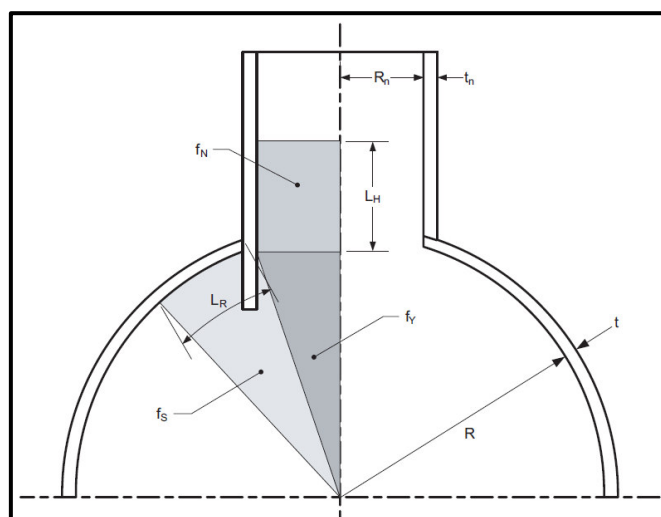


Figura 2.8 Bocas radial en cabezal

Fuente: ASME VIII División 2, 2013, p270

Bocas A y B - NPS 14"

De acuerdo a la norma (ASME VIII División 2, 2013), párrafo 4.5.5, el procedimiento para diseñar una boca radial en un cuerpo cilíndrico, deberá ser considerado en su estado corroído. A continuación, las dimensiones de las bocas se detallarán en la tabla 2.6;

Tabla 2.6 Dimensiones de bocas (A) y (B) - NPS 14"

Diámetro nominal	NPS 14 Sch 60
Clase	300
Tipo	Cuello Soldable
Material de boca	SA-106 B
Material de refuerzo	SA-516-70
Material de brida	SA-105
Unida a	Cilindro
Orientación	Radial
Angulo de orientación	0°
Diámetro interior de tanque (corroído), D	2,506.04 mm
Radio interior de boca (corroído), R_n	165.91 mm
Espesor nominal de pared de boca (corroído), t_n	11.89 mm
Espesor nominal de recipiente (corroído), t	15.85 mm
Soldadura entre boquilla y refuerzo, t_{w2}	12.7 mm
Soldadura Leg_{41}, L_{41}	9.53 mm
Soldadura Leg_{42}, L_{42}	12.7 mm
Soldadura Leg_{43}, L_{43}	14.22 mm
Ancho de refuerzo, W	150 mm
Espesor de refuerzo, t_e	12.7 mm
Proyección externa, L_{pr1}	112.25 mm
Proyección interna, L_{pr2}	20 mm
Corrosión interna. t_c	3.2 mm

Elaboración propia

Paso 1. Determinar el radio efectivo del cuerpo con la siguiente ecuación

$$R_{eff} = 0.5D \quad (\text{Ec. 2.3.15})$$

Donde,

R_{eff} = Radio efectivo del cuerpo, [mm]

Por lo tanto,

$$R_{eff} = 1,253.2 \text{ mm}$$

Paso 2. Calcular los límites de refuerzo de la boca

$$L_R = \min[L_{R1}, L_{R2}, L_{R3}] \quad (\text{Ec. 2.3.16})$$

$$L_{R1} = \sqrt{R_{eff}t} + W \quad (\text{Ec. 2.3.17})$$

$$L_{R2} = \sqrt{(R_{eff} + t)(t + t_e)} \quad (\text{Ec. 2.3.18})$$

$$L_{R3} = 2 \times R_n \quad (\text{Ec. 2.3.19})$$

$$L_H = \min[L_{H1}, L_{H2}, L_{H3}] + t \quad (\text{Ec. 2.3.20})$$

$$L_{H1} = \min[1.5t, t_e] + \sqrt{R_n t_n} \quad (\text{Ec. 2.3.21})$$

$$L_{H2} = L_{pr1} \quad (\text{Ec. 2.3.22})$$

$$L_{H3} = 8(t + t_e) \quad (\text{Ec. 2.3.23})$$

$$L_I = \min[L_{I1}, L_{I2}, L_{I3}] \quad (\text{Ec. 2.3.24})$$

$$L_{I1} = \sqrt{R_n t_n} \quad (\text{Ec. 2.3.25})$$

$$L_{I2} = L_{pr2} \quad (\text{Ec. 2.3.26})$$

$$L_{I3} = 8(t + t_e) \quad (\text{Ec. 2.3.27})$$

Donde,

W = Ancho de placa de refuerzo, [mm].

t_e = Espesor de refuerzo, [mm].

t_n = Espesor de boca, [mm].

R_n = Radio interior de boca (corroído), [mm].

L_R = Longitud efectiva de la pared del recipiente, [mm].

L_H = Longitud efectiva de la boca por el lado exterior del recipiente, [mm].

L_I = Longitud efectiva de la boca por el lado interior del recipiente, [mm].

Por lo tanto, del cómputo de las ecuaciones desde 2.3.26 hasta 2.3.27 se determinan los límites de refuerzo actuantes en las bocas A y B necesarias para soportar las cargas.

$$L_R = 190.34 \text{ mm}$$

$$L_H = 72.96 \text{ mm}$$

$$L_I = 16.8 \text{ mm}$$

Paso 5. Determinar el área total disponible alrededor de la boca, es decir, el área dentro de los límites de refuerzo establecidos por L_H , L_R y L_I (ver figura 2.5). En otras palabras, el área total necesaria para soportar los esfuerzos de presión interna y externa.

$$A_T = A_1 + f_{rn}(A_2 + A_3) + A_{41} + A_{42} + A_{43} + f_{rp}A_5 \quad (\text{Ec. 2.3.28})$$

$$f_{rn} = \min \left[\frac{S_n}{S}, 1 \right] \quad (\text{Ec. 2.3.29})$$

$$f_{rp} = \min \left[\frac{S_p}{S}, 1 \right] \quad (\text{Ec. 2.3.30})$$

$$A_1 = \left(\frac{tL_R}{100} \right) \times \max \left[\left(\frac{\lambda}{5} \right)^{0.85}, 1 \right] \quad (\text{Ec. 2.3.31})$$

$$\lambda = \min \left[\left\{ \frac{2R_n + t_n}{\sqrt{(D + t_{eff})t_{eff}}} \right\}, 12 \right] \quad (\text{Ec. 2.3.32})$$

$$t_{eff} = t + \left(\frac{100 \cdot A_5 f_{rp}}{L_R} \right) \quad (\text{Ec. 2.3.33})$$

$$A_2 = t_n L_H / 100 \quad (\text{Ec. 2.3.34})$$

$$A_3 = t_n L_I / 100 \quad (\text{Ec. 2.3.35})$$

$$A_{41} = 0.5 L_{41}^2 / 100 \quad (\text{Ec. 2.3.36})$$

$$A_{42} = 0.5 L_{42}^2 / 100 \quad (\text{Ec. 2.3.37})$$

$$A_{43} = 0.5 L_{43}^2 / 100 \quad (\text{Ec. 2.3.38})$$

$$A_5 = \min[A_{5a}, A_{5b}] \quad (\text{Ec. 2.3.39})$$

$$A_{5a} = Wt_e/100 \quad (\text{Ec. 2.3.40})$$

$$A_{5b} = L_R t_e/100 \quad (\text{Ec. 2.3.41})$$

Donde,

f_{rn} = Factor por material de la boca.

A_1 = Área aportada por la pared del recipiente, [cm^2]

A_2 = Área contribuida por la proyección exterior de la boca, [cm^2].

A_3 = Área contribuida por la proyección interior de la boca, [cm^2].

A_{41} = Área contribuida por el lado exterior de la soldadura, [cm^2].

A_{42} = Área aportada por la soldadura del refuerzo al recipiente, [cm^2].

A_{43} = Área contribuida por el lado interior de la soldadura, [cm^2].

A_5 = Área aportada por la placa de refuerzo, [cm^2].

A_T = Área total dentro de los límites de reforzamiento, [cm^2].

f_{rp} = Factor por material de la placa de refuerzo.

L_{41} = Tamaño de soldadura de filete del lado exterior de la boca, [mm]

L_{42} = Tamaño de soldadura de filete para la placa de refuerzo, [mm].

L_{43} = Tamaño de soldadura de filete del lado interior de la boca, [mm].

t_{eff} = Espesor efectivo usado en los cálculos de esfuerzos de presión en la cercanía de la abertura de la boca, [mm].

λ = Parámetro de no linealidad aplicado al área A_1 .

S_n = Esfuerzo permisible para la boca a temperatura de diseño, [MPa]

S_p = Esfuerzo permisible para la placa de refuerzo a temperatura de diseño, [MPa].

Realizando los cálculos de las ecuaciones desde 2.3.38 hasta 2.3.41 se obtiene las áreas disponibles alrededor de las bocas A y B:

$$f_{rn} = 0.9211$$

$$f_{rp} = 1$$

$$t_{eff} = 25.86 \text{ mm}$$

$$\lambda = 1.3432$$

Paso 6. Determinar las fuerzas en la intersección de la boca y el recipiente

$$f_N = PR_{xn}L_H/1000 \quad (\text{Ec. 2.3.42})$$

$$f_S = PR_{xs}(L_R + t_n)/1000 \quad (\text{Ec. 2.3.43})$$

$$f_Y = PR_{xs}R_{nc}/1000 \quad (\text{Ec. 2.3.44})$$

$$R_{xn} = \frac{t_n}{\ln \left[1 + \frac{t_n}{R_n} \right]} \quad (\text{Ec. 2.3.45})$$

$$R_{xs} = \frac{t_{eff}}{\ln \left[1 + \frac{t_{eff}}{R_{eff}} \right]} \quad (\text{Ec. 2.3.46})$$

Donde,

R_{xn} = Radio de boca para cálculos de fuerza, [mm].

R_{xs} = Radio de carcasa para cálculos de fuerza, [mm].

R_{nc} = Radio de la abertura de la boca en el recipiente a lo largo de cuerda longitudinal, [mm].

f_N = Fuerza desde la presión interna en la boca del lado exterior del recipiente., [N].

f_S = Fuerza desde la presión interna en la carcasa, [N].

f_Y = Fuerza discontinua por presión interna, [N].

$$R_{xn} = 171 \text{ mm}$$

$$R_{xs} = 1,266 \text{ mm}$$

$$R_{nc} = 165.91 \text{ mm}$$

Para presión interna (1,724 kPa)

$$f_N = 21,607 N$$

$$f_S = 441,416 N$$

$$f_Y = 362,143 N$$

Para presión externa (103.42 kPa)

$$f_N = 1,296 N$$

$$f_S = 26,480 N$$

$$f_Y = 21,724 N$$

Paso 7. Determinar el esfuerzo local promedio de la membrana primaria y el esfuerzo general de la membrana primaria en la intersección de la boca.

$$\sigma_{avg} = \frac{(f_N + f_S + f_Y)}{100 \cdot A_T} \quad (\text{Ec. 2.3.47})$$

$$\sigma_{circ} = \frac{PR_{xs}}{1000 \cdot t_{eff}} \quad (\text{Ec. 2.3.48})$$

Donde,

σ_{avg} = Esfuerzo promedio de membrana primaria, [MPa].

σ_{circ} = Esfuerzo general de membrana primaria, [MPa].

Tabla 2.7 Esfuerzo promedio de membrana primaria – (A)(B)

P	σ_{avg}
kPa	MPa
1,724	136,88
103.42	8.212

Elaboración propia

Tabla 2.8 Esfuerzo general de membrana primaria – (A)(B)

P	σ_{circ}
kPa	MPa
1,724	84.413
103.42	5.064

Elaboración propia

Paso 8. Determinar el esfuerzo local máximo de la membrana primaria en la intersección de la boca.

$$P_L = \max[(2\sigma_{avg} - \sigma_{circ}), \sigma_{circ}] \quad (\text{Ec. 2.3.49})$$

Donde,

P_L = Esfuerzo local máximo en membrana primaria, [MPa].

Tabla 2.9 Esfuerzo local máximo en membrana primaria–(A)(B)

P	P_L
1,724	189.359
103.42	11.359

Elaboración propia

Paso 9. El esfuerzo local máximo calculado de la membrana primaria debe satisfacer la siguiente ecuación.

$$P_L \leq S_{allow} \quad (\text{Ec. 2.3.50})$$

El esfuerzo máximo permisible se computará para la presión interna y externa

$$S_{allow} = 1.5 SE \text{ para presión interna} \quad (\text{Ec. 2.3.51})$$

$$S_{allow} = F_{ha} \text{ para presión externa} \quad (\text{Ec. 2.3.52})$$

Donde,

S_{allow} = Máximo esfuerzo primario local de membrana permisible en la intersección de la boca, [MPa].

De aquí que, los resultados se presentan en la tabla 2.10.

Tabla 2.10 Esfuerzo permisible–(A)(B)

P	P_L	S_{allow}	Sobresfuerzo
kPa	kPa	[MPa]	
1,724	189	228	No
103.42	11.35	17.93	No

Elaboración propia

Es decir, las bocas no sobrepasan el esfuerzo permisible para la presión interna y externa establecidas.

Paso 10. Determinar la MAWP en la intersección.

$$P_{max1} = \frac{S_{allow}}{\frac{2A_p}{A_T} - \frac{R_{xs}}{t_{eff}}} \times 1000 \quad (\text{Ec. 2.3.53})$$

$$P_{max2} = S \left(\frac{t}{R_{xs}} \right) \times 1000 \quad (\text{Ec. 2.3.54})$$

$$P_{max} = \min[P_{max1}, P_{max2}] \quad (\text{Ec. 2.3.55})$$

$$A_p = \frac{f_N + f_S + f_Y}{P} \times 10 \quad (\text{Ec. 2.3.56})$$

Donde,

P_{max} = Presión máxima de trabajo permisible en la intersección, [kPa].

P_{max1} = Presión máxima de trabajo permisible en la boca, [kPa].

P_{max2} = Presión máxima de trabajo permisible en la carcasa, [kPa].

A_p = Área resistente a la presión, usada para determinar la fuerza discontinua en la abertura de la boca, [cm^2].

Tabla 2.11 MAWP en bocas (A)(B)

P	A_p	P_{max1}	P_{max2}	P_{max}
kPa	cm^2	kPa	kPa	kPa
1,724	4,786	2,075.81	1,902.83	1,902.83
103.42	4,786	163.25	224.47	163.25

Elaboración propia

Por otra parte, la soldadura de las bocas deberá ser suficiente para resistir la fuerza discontinua impuesta por la presión para las bocas unidas al cuerpo.

Paso 1. Determinar el factor de discontinuidad

$$k_y = \frac{R_{nc} + t_n}{R_{nc}} \quad (\text{Ec. 2.3.57})$$

Donde,

k_y = Factor de discontinuidad.

Por lo tanto,

$$k_y = 1.0716$$

Paso 2. Calcular la longitud de soldadura resistente a la fuerza discontinua

$$L_\tau = \frac{\pi}{2}(R_n + t_n) \quad (\text{Ec. 2.3.58})$$

$$L_{\tau p} = \frac{\pi}{2}(R_n + t_n + W) \quad (\text{Ec. 2.3.59})$$

$$L_{41T} = 0.7071L_{41} \quad (\text{Ec. 2.3.60})$$

$$L_{42T} = 0.7071L_{42} \quad (\text{Ec. 2.3.61})$$

$$L_{43T} = 0.7071L_{43} \quad (\text{Ec. 2.3.62})$$

Donde,

L_τ = Longitud de soldadura de boca a cuerpo, [mm].

$L_{\tau p}$ = Longitud de soldadura de placa de refuerzo a cuerpo, [mm].

L_{41T} = Dimensión de garganta en soldadura de filete del lado exterior de la boca, [mm].

L_{42T} = Dimensión de garganta en soldadura de filete para la placa de refuerzo, [mm].

L_{43T} = Dimensión de garganta en soldadura de filete del lado interior de la boca, [mm].

$$L_\tau = 279.29 \text{ mm}$$

$$L_{\tau p} = 514.91 \text{ mm}$$

$$L_{41T} = 6.74 \text{ mm}$$

$$L_{43T} = 8.98 \text{ mm}$$

$$L_{43T} = 6.85 \text{ mm}$$

Paso 4. Determinar si los tamaños de soldadura son aceptables

- Si la boca no tiene placa de refuerzo el esfuerzo cortante en la soldadura dado por la ecuación 2.3.63 debe satisfacer la condición, para que el diseño esté completo. Caso contrario se debe incrementar el tamaño de soldadura.

$$\tau = \frac{f_{welds}}{L_\tau(0.49L_{41T} + 0.6t_{W1} + 0.49L_{43T})} \leq S \quad (\text{Ec. 2.3.63})$$

$$f_{welds} = \min \left[f_Y k_Y; 1.5 S_n (A_2 + A_3) \cdot 100; \frac{\pi P R_n^2 k_y^2}{4 \cdot 1000} \right] \quad (\text{Ec. 2.3.64})$$

- Si la boca tiene placa de refuerzo, el esfuerzo cortante en la soldadura dado por las ecuaciones 2.3.65 hasta 2.3.67 debe satisfacer la ecuación 2.3.68. Caso contrario se debe incrementar el tamaño de soldadura.

$$\tau_1 = \frac{f_{ws}}{L_\tau (0.6 t_{W1} + 0.49 L_{43T})} \quad (\text{Ec. 2.3.65})$$

$$\tau_2 = \frac{f_{wp}}{L_\tau (0.6 t_{W2} + 0.49 L_{41T})} \quad (\text{Ec. 2.3.66})$$

$$\tau_3 = \frac{f_{wp}}{L_{\tau p} (0.49 L_{42T})} \quad (\text{Ec. 2.3.67})$$

$$\tau = \max[\tau_1, \tau_2, \tau_3] \leq S \quad (\text{Ec. 2.3.68})$$

$$f_{ws} = \frac{f_{welds} t \cdot S}{t \cdot S + t_e S_p} \quad (\text{Ec. 2.3.69})$$

$$f_{wp} = \frac{f_{welds} t_e \cdot S}{t \cdot S + t_e S_p} \quad (\text{Ec. 2.3.70})$$

Donde,

f_{welds} = Discontinuidad global inducida por la existencia de una boca, [N].

τ = Esfuerzo cortante "efectiva" promedio en las soldaduras debido a la presión (incluye la eficiencia de la junta), [MPa].

τ_1 = Esfuerzo cortante a través de la trayectoria de carga 1, [MPa].

τ_2 = Esfuerzo cortante a través de la trayectoria de carga 2, [MPa].

τ_3 = Esfuerzo cortante a través de la trayectoria de carga 3, [MPa].

f_{ws} = Discontinuidad de fuerza llevada por soldadura t_{W1} y L_{43T} , [N].

f_{wp} = Discontinuidad de fuerza llevada por soldadura t_{W2} y L_{41T} , [N].

Dado que, se consideró que las bocas (A) y (B) no tengan placa de refuerzo se utilizará las ecuaciones de 2.3.66 hasta 2.3.70. Por ende, debe satisfacer 2.3.68.

$$\begin{aligned}
 f_{welds} &= 42,804 \text{ N} \\
 f_{ws} &= 23,763.42 \text{ N} \\
 f_{wp} &= 19,041.2 \text{ N} \\
 \tau_1 &= 6.612 \text{ MPa} \\
 \tau_2 &= 6.242 \text{ MPa} \\
 \tau_3 &= 8.404 \text{ MPa} \\
 \tau &= 8.404 \text{ MPa} \\
 S &= 152 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Sobreesfuerzo = NO

En consecuencia, los tamaños de soldadura soportan los esfuerzos cortantes debido a la presión interna y externa.

Bocas C y E - NPS 4"

Cosa parecida sucede con las bocas (C) y (E). Sin embargo, se tomará de referencia la boca (C), debido a que la presión actuante, P^* , es la presión interna de diseño más la presión hidrostática con el nivel del líquido ($SG=0.53$) hasta la intersección con el cilindro ($H_s = 2,369.05$ mm), Dicho de otra manera, para este caso la presión final será:

$$P^* = P + P_s = 1736.5 \text{ kPa}$$

Tabla 2.12 Dimensiones de bocas (C) y (E) - NPS 4"

Diámetro nominal	NPS 4 Sch 160
Clase	300
Tipo	Cuello Soldable
Material de boca	SA-106 B
Material de refuerzo	SA-516-70

Elaboración propia

Tabla 2.12 Dimensiones de bocas (C) y (E) - NPS 4" (Cont.)

Material de brida	SA-105
Unida a	Cabezal
Orientación	Radial
Angulo de orientación	0°, 180°
Diámetro interior (corroído), D	2,506.04 mm
Radio interior de boca, Rn	46.86 mm
Espesor nominal de pared de boca (corroído), t_n	10.29 mm
Espesor nominal de recipiente (corroído), t	15.85 mm
Soldadura entre boquilla y refuerzo, t_{w2}	12.7 mm
Soldadura Leg_{41}, L_{41}	9.53 mm
Soldadura Leg_{42}, L_{42}	12.7 mm
Soldadura Leg_{43}, L_{43}	0 mm
Ancho de refuerzo, W	50 mm
Espesor de refuerzo, t_e	12.7 mm
Proyección externa, L_{pr1}	117.35 mm
Proyección interna, L_{pr2}	0 mm
Corrosión interna	3.2 mm

Elaboración propia

Utilizando las ecuaciones desde 2.3.15 hasta 2.3.70, se obtiene los siguientes resultados.

$$R_{eff} = 1,253.2 \text{ mm}$$

A continuación, se presenta el cálculo de los límites de refuerzo en las bocas (C) y (E).

$$L_R = 93.73 \text{ mm}$$

$$L_H = 50.51 \text{ mm}$$

$$L_I = 0 \text{ mm}$$

El área total disponible alrededor de la boca, serán los siguientes

$$f_{rn} = 0.9211$$

$$f_{rp} = 1$$

$$t_{eff} = 22.62 \text{ mm}$$

$$\lambda = 0.4348$$

$$A_1 = 14.855 \text{ cm}^2$$

$$A_2 = 5.1955 \text{ cm}^2$$

$$A_3 = 0 \text{ cm}^2$$

$$A_{41} = 0.4541 \text{ cm}^2$$

$$A_{42} = 0.8065 \text{ cm}^2$$

$$A_{43} = 0 \text{ cm}^2$$

$$A_5 = 27.251 \text{ cm}^2$$

$$A_T = 5.1955 \text{ cm}^2$$

Igualmente, las fuerzas en la intersección de la boca y el recipiente.

Tabla 2.13 Fuerzas en intersección de bocas y el recipiente - (C)(E)

P	R_{xn}	R_{xs}	R_{nc}	f_N	f_S	f_Y
kPa	mm	mm	mm	N	N	N
1,736.5	51.84	1,264	46.86	4,546.2	228,388	102,900
103.42	51.84	1,266	46.86	270.76	13,602.21	6,128.47

Elaboración propia

Esfuerzo local promedio de la membrana primaria y el esfuerzo general de la membrana primaria en la intersección de la boca será:

Tabla 2.14 Esfuerzo promedio de membrana primaria – (C)(E)

P	σ_{avg}
kPa	MPa
1,736.5	123.24
103.42	7.34

Elaboración propia

Tabla 2.15 Esfuerzo general de membrana primaria – (C)(E)

P	σ_{circ}
kPa	MPa
1,736.5	97.052
103.42	5.78

Elaboración propia

El Esfuerzo local máximo de la membrana primaria en la intersección de la boca.

Tabla 2.16 Esfuerzo local máximo en membrana primaria–(C)(E)

P	P_L
kPa	MPa
1,736.5	149.422
103.42	8.899

Elaboración propia

Los esfuerzos locales máximos en la membrana primaria se verificarán:

De aquí que,

Tabla 2.17 Esfuerzo permisible–(C)(E)

P	P_L	S_{allow}	Sobresfuerzo
kPa	kPa	$[MPa]$	
1,736.5	149.422	228	No
103.42	8.899	17.93	No

Elaboración propia

Es decir, las bocas no sobrepasan el esfuerzo permisible para la presión interna y externa establecidas.

En cuanto a la presión máxima de trabajo permisible en la intersección se obtiene en resumen la tabla 2.18.

Tabla 2.18 MAWP en bocas (C)(E)

P	A_p	P_{max1}	P_{max2}	P_{max}
kPa	cm^2	kPa	kPa	kPa
1,736.5	1,933.97	2,649.69	1905.24	1,905.24
103.42	1,933.97	208.38	224.75	208.38

Elaboración propia

Por otra parte, la soldadura de las bocas deberá ser suficiente para resistir la fuerza discontinua impuesta por la presión para las bocas unidas al cuerpo.

Se empieza por determinar el factor de discontinuidad.

$$k_y = 1.2195$$

Enseguida se computa las longitudes de la soldadura resistentes a la fuerza discontinua para las bocas (C) y (E), obteniendo.

$$L_{\tau} = 89.77mm$$

$$L_{\tau p} = 168.31 mm$$

$$L_{41T} = 6.74 mm$$

$$L_{43T} = 8.98 mm$$

$$L_{43T} = 0 mm$$

A continuación, se determina si los tamaños de soldadura son aceptables, igualmente las bocas (C) y (E), llevan placa de refuerzo, en otras palabras, se verifica que los esfuerzos generados por presión interna o externo no sobrepasen los esfuerzos admisibles del material base,

$$f_{welds} = 4,454.48 N$$

$$f_{ws} = 2,472.95$$

$$f_{wp} = 1,981.53 N$$

$$\tau_1 = 2.897 \text{ MPa}$$

$$\tau_2 = 2.021 \text{ MPa}$$

$$\tau_3 = 2.676 \text{ MPa}$$

$$\tau = 2.897 \text{ MPa}$$

$$S = 152 \text{ MPa}$$

Sobreesfuerzo: NO

Bocas D y F - NPS 2"

Con respecto a las bocas D y F, estas no tendrán proyección interna, ni placa de refuerzo. Al mismo tiempo se utilizarán las ecuaciones desde 2.3.15 hasta 2.3.70, para revisar si falla por el esfuerzo debido a la fuerza discontinua, como también se revisará si los tamaños de soldaduras no sobrepasan los esfuerzos permisibles. Caso contrario se deberá colocar placa de refuerzo o aumentar el espesor de la boca. En relación con la soldadura se puede aumentar el tamaño del filete acorde con los espesores de la placa de refuerzo. Por otro lado, la presión hidrostática es 0.

Tabla 2.19 Dimensiones de bocas (D) y (F) - NPS 2"

Diámetro nominal	NPS 2 Sch 160
Clase	300
Tipo	Cuello Soldable
Material de boca	SA-106 B
Material de brida	SA-105
Unida a	Cilindro
Orientación	Radial
Diámetro interior (corroído), D	2,506.04 mm
Radio interior de boca, R_n	24.62 mm
Espesor nominal de pared de boca (corroído), tn	5.54 mm
Espesor nominal de recipiente (corroído), t	15.85 mm
Soldadura entre boquilla y refuerzo, $tw2$	0 mm
Soldadura Leg41, L_{41}	9.53 mm
Soldadura Leg42, L_{42}	0 mm

Elaboración propia

Tabla 2.19 Dimensiones de bocas (D) y (F) - NPS 2"

Soldadura Leg43, L_{43}	0 mm
Ancho de refuerzo, W	0 mm
Espesor de refuerzo, t_e	0 mm
Proyección externa, L_{pr1}	82.55 mm
Proyección interna, L_{pr2}	0 mm
Corrosión interna	3.2 mm

Elaboración propia

Utilizando las ecuaciones desde 2.3.15 hasta 2.3.70, se obtiene los siguientes resultados.

$$R_{eff} = 1,253.2 \text{ mm}$$

Mientras los límites de refuerzo en las bocas D y F, en otras palabras, las longitudes efectivas son:

$$L_R = 49.26 \text{ mm}$$

$$L_H = 27.53 \text{ mm}$$

$$L_I = 0 \text{ mm}$$

El área total disponible alrededor de la boca será como indica abajo.

$$f_{rn} = 0.9211$$

$$f_{rp} = 1$$

$$t_{eff} = 15.85 \text{ mm}$$

$$\lambda = 0.274$$

$$A_1 = 7.806 \text{ cm}^2$$

$$A_2 = 1.52 \text{ cm}^2$$

$$A_3 = 0 \text{ cm}^2$$

$$A_{41} = 0.4541 \text{ cm}^2$$

$$A_{42}, A_{43} = 0 \text{ cm}^2$$

$$A_5 = 0 \text{ cm}^2$$

$$A_T = 9.664 \text{ cm}^2$$

Tabla 2.20 Fuerzas en intersección de bocas y el recipiente - (D)(F)

P	R_{xn}	R_{xs}	R_{nc}	f_N	f_S	f_Y
kPa	mm	mm	mm	N	N	N
1,724	27.3	1,264	46.86	1,295.6	119,117	54,539
103.42	27.3	1,266	46.86	77.72	7,145.7	3,211.7

Elaboración propia

Los esfuerzos locales promedios de la membrana primaria en la intersección de la boca serán:

Tabla 2.21 Esfuerzo promedio de membrana primaria – (D)(F)

P	σ_{avg}
kPa	MPa
1,724	180
103.42	10.78

Elaboración propia

Por consiguiente, los esfuerzos generales de la membrana primaria en la intersección de la boca serán:

Tabla 2.22 Esfuerzo general de membrana primaria – (D)(F)

P	σ_{circ}
kPa	MPa
1,724	137.14
103.42	8.23

Elaboración propia

El esfuerzo local máximo de la membrana primaria en la intersección de la boca se muestra en la tabla 2.23.

Tabla 2.23 Esfuerzo local máximo en membrana primaria–(D)(F)

P	P_L
kPa	MPa
1,724	222.82
103.42	13.37

Elaboración propia

Los esfuerzos locales máximos en la membrana primaria se contrastan con el esfuerzo admisible:

De aquí que,

Tabla 2.24 Esfuerzo permisible–(D)(F)

P	P_L	S_{allow}	Sobresfuerzo
kPa	kPa	$[MPa]$	
1,724	222.82	228	No
103.42	13.37	17.93	No

Elaboración propia

Es decir, las bocas no sobrepasan el esfuerzo permisible para la presión interna y externa establecidas.

En cuanto a la presión máxima de trabajo permisible en la intersección se detalla en resumen en la tabla 2.25.

Tabla 2.25 MAWP en bocas (D)(F)

P	A_p	P_{max1}	P_{max2}	P_{max}
kPa	cm^2	kPa	kPa	kPa
1,724	1,933.97	1,649.69	1905.24	1,905.24
103.42	1,933.97	208.38	224.75	224.75

Elaboración propia

Por otra parte, la soldadura de las bocas deberá ser suficiente para resistir la fuerza discontinua impuesta por la presión para las bocas unidas al cuerpo. Por lo tanto, de inicia por determinar el factor de discontinuidad.

$$k_y = 1.2249$$

Enseguida se computa las longitudes de la soldadura resistentes a la fuerza discontinua para las bocas (C) y (E),

$$L_\tau = 47.38 \text{ mm}$$

$$L_{\tau p} = 0 \text{ mm}$$

$$L_{41T} = 6.74 \text{ mm}$$

$$L_{43T} = 0 \text{ mm}$$

$$L_{43T} = 0 \text{ mm}$$

A continuación, se determina si los tamaños de soldadura son aceptables, Cabe mencionar que las bocas (D) y (F), llevan placa de refuerzo.

$$f_{welds} = 1,231.86 \text{ N}$$

$$\tau = 2.03 \text{ MPa}$$

$$S = 152 \text{ MPa}$$

$$\text{Sobreesfuerzo} = \text{NO}$$

Bocas G1 y G2 - NPS 2"

De acuerdo a la norma ASME VII División 2, párrafo 4.5.6, el procedimiento para diseñar una boca excéntrica al eje axial del cabezal, deberá ser computado en su estado corroído. Con respecto a la presión aplicada en la boca esta será de 1735 kPa correspondiente a la suma de la presión de diseño y el nivel de líquido a una altura de 2,200mm.

Tabla 2.26 Dimensiones de bocas (G1) y (G2) - NPS 2"

Diámetro nominal	NPS 2 Sch 160
Clase	300
Tipo	Cuello Soldable
Material de boca	SA-106 B
Material de refuerzo	SA-516-70
Material de brida	SA-105
Unida a	Cabezal
Diámetro interior (corroído), D	2,506.04 mm
Distancia, D_R	1,100 mm
Radio interior de boca (corroído), R_n	24.63 mm
Espesor nominal de pared de boca (corroído), t_n	5.54 mm
Espesor nominal del cabezal (corroído), t	8.23 mm
Soldadura entre boquilla y refuerzo, t_{w2}	12.7 mm
Soldadura Leg_{41}, L_{41}	9.53 mm
Soldadura Leg_{42}, L_{42}	12.7 mm
Soldadura Leg_{43}, L_{43}	12.7 mm
Ancho de refuerzo, W	50 mm
Espesor de refuerzo, t_e	12.7 mm
Proyección externa, L_{pr1}	148.83 mm
Proyección interna, L_{pr2}	15 mm
Corrosión interna	3.2 mm
Ángulo entre el eje axial del tanque y la línea de centro, θ_3 Ver figura 2.9	28.63°
Ángulo entre el eje axial del tanque y el radio interior de la boca, θ_4 . Ver figura 2.9	26.18°

Elaboración propia

Utilizando la ecuación 2.3.15 se obtiene el radio efectivo de presión.

$$R_{eff} = 1,253.2 \text{ mm}$$

A continuación, se presenta el cálculo de los límites de refuerzo en las bocas G1 y G2. Para el cálculo de L_H y L_I se utilizarán las siguientes ecuaciones:

$$L_H = \min[t + t_e + F_p \sqrt{R_n t_n}; L_{pr1} + t] \quad (\text{Ec. 2.3.71})$$

$$F_p = C_n \quad (\text{Ec. 2.3.72})$$

$$C_n = \min \left[\left(\frac{t + t_e}{t_n} \right)^{0.35}; 1 \right] \quad (\text{Ec. 2.3.73})$$

$$L_I = \min[F_p \sqrt{R_n t_n}, L_{pr2}] \quad (\text{Ec. 2.3.74})$$

Donde,

C_n = Factor para modificar la longitud L_H , derivado de análisis de elementos finitos.

F_p = Factor de fijación de boca.

Por lo tanto, resolviendo las respectivas ecuaciones se obtiene.

$$L_R = 49.25 \text{ mm}$$

$$L_H = 32.61 \text{ mm}$$

$$L_I = 37.81 \text{ mm}$$

$$C_n = 1$$

$$F_p = 1$$

Estos serán los límites de refuerzo en las bocas G1 y G2

El área total disponible alrededor de la boca se encuentra detallada abajo.

Sin embargo, el A_I se calculará con la siguiente ecuación

$$A_1 = t \times L_R \quad (\text{Ec. 2.3.75})$$

Por lo tanto, resolviendo las ecuaciones respectivas

$$f_{rn} = 0.9211$$

$$f_{rp} = 1$$

$$\begin{aligned}
t_{eff} &= 20.93 \text{ mm} \\
A_1 &= 4.8977 \text{ cm}^2 \\
A_2 &= 3.303 \text{ cm}^2 \\
A_3 &= 1.195 \text{ cm}^2 \\
A_{41} &= 0.4541 \text{ cm}^2 \\
A_{42} &= 0 \text{ cm}^2 \text{ (fuera de los límites de} \\
&\quad \text{refuerzo, } L_R < W) \\
A_{43} &= 0.8065 \text{ cm}^2 \\
A_5 &= 5.442 \text{ cm}^2 \\
A_T &= 12.921 \text{ cm}^2
\end{aligned}$$

Igualmente se puede hallar las fuerzas en la intersección de la boca y el cabezal hemisférico.

A causa de que las bocas se encuentran en el cabezal hemisférico excéntricamente, se deberá realizar las siguientes modificaciones a las ecuaciones donde corresponda. Para hallar la fuerza f_N , mantener la ecuación 2.3.42.

$$f_S = \frac{PR_{xs}(L_R + t_n)}{2 \times 1000} \quad (\text{Ec. 2.3.76})$$

$$f_Y = \frac{PR_{xs}R_{nc}}{2 \times 1000} \quad (\text{Ec. 2.3.77})$$

$$R_{nc} = R_{eff}(\theta_3 - \theta_4) \frac{\pi}{180} \quad (\text{Ec. 2.3.78})$$

$$\theta_3 = \arccos\left(\frac{D_R}{R_{eff}}\right) \quad (\text{Ec. 2.3.79})$$

$$\theta_4 = \arccos\left(\frac{D_R + R_n}{R_{eff}}\right) \quad (\text{Ec. 2.3.80})$$

Donde,

θ_3 = Ángulo entre el eje axial del tanque y la línea de centro, [rad.].

θ_4 = Ángulo entre el eje axial del tanque y el radio interior de la boca, [rad.].

D_R = Excentricidad de la boca, [mm].

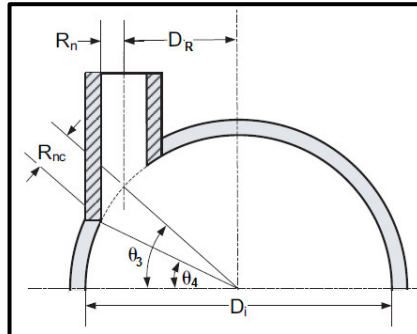


Figura 2.9 Vista de radios en boca - cabezal

Elaboración propia

Por lo tanto, resolviendo las ecuaciones correspondientes, se obtiene los siguientes resultados resumidos en la tabla 2.27.

Tabla 2.27 Fuerzas en intersección de bocas y el cabezal - (G1) y (G2)

P	R_{xn}	R_{xs}	R_{nc}	f_N	f_S	f_Y
kPa	mm	mm	mm	N	N	N
1,735	25.55	1,264	46.74	1,545	60,080	58,674
103.42	25.55	1,264	46.74	92.06	3,580	3,496

Elaboración propia

Con lo antes expuesto, el esfuerzo local promedio de la membrana primaria en la intersección de la boca será:

Tabla 2.28 Esfuerzo promedio de membrana primaria – (G1) y (G2)

P	σ_{avg}
kPa	MPa
1,736.5	93.1
103.42	5.55

Elaboración propia

El esfuerzo general de la membrana primaria en la intersección de la boca será lo señalado en la tabla 2.29:

Tabla 2.29 Esfuerzo general de membrana primaria – (G1) y (G2)

P	σ_{circ}
kPa	MPa
1,736.5	52.39
103.42	3.12

Elaboración propia

El esfuerzo local máximo de la membrana primaria en la intersección de la boca está mostrado en la tabla 2.30

Tabla 2.30 Esfuerzo local máximo en membrana primaria–(G1) y (G2)

P	P_L
kPa	MPa
1,735	133.8
103.42	7.97

Elaboración propia

De aquí que, verificando si existe sobreesfuerzo se detalla en la tabla 2.31.

Tabla 2.31 Esfuerzo permisible en bocas (G1) y (G2)

P	P_L	S_{allow}	Sobreesfuerzo
kPa	kPa	$[MPa]$	
1,735	133.8	228	No
103.42	7.97	17.93	No

Elaboración propia

Es decir, las bocas no sobrepasan el esfuerzo permisible para la presión interna y externa establecidas.

En cuanto a la presión máxima de trabajo permisible en la intersección se obtiene en resumen la tabla 2.32.

Tabla 2.32 MAWP en bocas (G1) y (G2)

P	A_p	P_{max1}	P_{max2}	P_{max}
kPa	cm^2	kPa	kPa	kPa
1,735	693.12	2,957.14	1,979.84	1,979.84
103.42	693.12	613.61	613.24	613.61

Elaboración propia

Por otra parte, la soldadura de las bocas deberá ser suficiente para resistir la fuerza discontinua impuesta por la presión para las bocas unidas al cabezal.

Por lo tanto, se empieza por determinando el factor de discontinuidad.

$$k_y = 1.21035$$

Enseguida se computa las longitudes resistentes a la fuerza discontinua para las bocas G1 y G2.

Cabe mencionar que las ecuaciones para L_τ y $L_{\tau p}$, en cabezales y excéntricos serán las siguientes:

$$L_\tau = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{(R_{nc} + t_n)^2 + (R_n + t_n)^2}{2}} \quad (\text{Ec. 2.3.81})$$

$$L_{\tau p} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{(R_{nc} + t_n + W)^2 + (R_n + t_n + W)^2}{2}} \quad (\text{Ec. 2.3.82})$$

$$L_\tau = 73.64 \text{ mm}$$

$$L_{\tau p} = 151.57 \text{ mm}$$

$$L_{41T} = 6.74 \text{ mm}$$

$$L_{43T} = 8.98 \text{ mm}$$

$$L_{43T} = 5.78 \text{ mm}$$

A continuación, se determina si los tamaños de soldadura son aceptables. Conviene señalar que las bocas (G1) y (G2), llevan placa de refuerzo.

$$f_{welds} = 1,006 \text{ N}$$

$$f_{ws} = 395.78 \text{ N}$$

$$f_{wp} = 610.78 \text{ N}$$

$$\tau_1 = 0.692 \text{ MPa}$$

$$\tau_2 = 0.759 \text{ MPa}$$

$$\tau_3 = 0.916 \text{ MPa}$$

$$\tau = 0.916 \text{ MPa}$$

$$S = 152 \text{ MPa}$$

$$\text{Sobreesfuerzo} = \text{NO}$$

Boca M - NPS 24"

De acuerdo a la norma (ASME VIII División 2, 2013), párrafo 4.5.6, la boca se considera como radial al cabezal, además se colocará una plancha de material SA-516-70 como cuello de las bocas, así mismo como en las bocas de nivel G1 y G2, se soldará una plancha de refuerzo alrededor de la abertura, que ayudará a disminuir los esfuerzo generados por la presión interna en la coyuntura entre el cabezal y la boca.

A continuación, en la tabla 2.33 se detallan las dimensiones generales de la boca de inspección.

Tabla 2.33 Dimensiones de bocas (M) - NPS 24''

Diámetro nominal	NPS 24 Sch 160
Clase	300
Tipo	Cuello Soldable
Material de boca	SA-106 B
Material de refuerzo	SA-516-70
Material de brida	SA-105
Unida a	Cabezal
Orientación	Radial
Angulo de orientación	0°
Diámetro interior (corroído), D	2,506.04 mm
Distancia, D_R	0 mm
Radio interior de boca (corroído), R_n	295.3 mm
Espesor nominal de pared de boca (corroído), t_n	9.5 mm
Espesor nominal del cabezal (corroído), t	8.23 mm
Soldadura entre boquilla y refuerzo, t_{w2}	12.7 mm
Soldadura Leg_{41}	9.53 mm
Soldadura Leg_{42}	12.7 mm
Soldadura Leg_{43}	14.22 mm
Ancho de refuerzo, W	150 mm
Espesor de refuerzo, t_e	12.7 mm
Proyección externa, L_{pr1}	124.8 mm
Proyección interna, L_{pr2}	25.4 mm
Corrosión interna	3.2 mm

Elaboración propia

En seguida se calcula el radio efectivo de presión.

$$R_{eff} = 1,253.2 \text{ mm}$$

Los límites necesarios para soportar las presiones ejercidas al componente se detallan abajo. Es necesario añadir que el cálculo de L_H y L_I se utilizaron las ecuaciones desde 2.3.71 hasta 2.3.74. Y para L_R , se utilizaron las ecuaciones desde 2.3.16 hasta 2.3.19.

$$L_R = 162.48 \text{ mm}$$

$$L_H = 73.89 \text{ mm}$$

$$L_I = 85.04 \text{ mm}$$

$$C_n = 1$$

$$F_p = 1$$

El área total disponible alrededor de la boca se encuentra detallada a continuación. Sin embargo, el A_1 se calculará con la ecuación 2.3.75.

Por lo tanto, resolviendo las ecuaciones respectivas

$$f_{rn} = 1$$

$$f_{rp} = 1$$

$$t_{eff} = 20.93 \text{ mm}$$

$$A_1 = 13.37 \text{ cm}^2$$

$$A_2 = 7.01 \text{ cm}^2$$

$$A_3 = 1.39 \text{ cm}^2$$

$$A_{41} = 0.4541 \text{ cm}^2$$

$$A_{42} = 0.8062 \text{ cm}^2$$

$$A_{43} = 0.47 \text{ cm}^2$$

$$A_5 = 19.05 \text{ cm}^2$$

$$A_T = 42.57 \text{ cm}^2$$

De igual manera que en las otras bocas se puede hallar las fuerzas en la intersección de la boca y el cabezal hemisférico.

Sin embargo, a causa de que la boca se encuentra en el cabezal hemisférico, se utilizará las mismas ecuaciones que se utilizaron en las bocas G1 y G2. Por lo tanto, las fuerzas en la junta boca – carcasa del cabezal hemisférico se encuentran en la tabla 2.34.

Tabla 2.34 Fuerzas en intersección de bocas y el cabezal - (M)

P	R_{xn}	R_{xs}	R_{nc}	f_N	f_S	f_Y
kPa	mm	mm	mm	N	N	N
1,729	300	1,263	259.3	38,350	187,892	322,616
103.42	300	1,263	259.3	2,292	11,234	19,288

Elaboración propia

El esfuerzo local promedio de la membrana primaria y el esfuerzo general de la membrana primaria en la intersección de la boca serán:

Tabla 2.35 Esfuerzo promedio de membrana primaria – (M)

P	σ_{avg}
kPa	MPa
1,729	128.93
103.42	7.71

Elaboración propia

Tabla 2.36 Esfuerzo general de membrana primaria – (M)

P	σ_{circ}
kPa	MPa
1,729	54.75
103.42	3.273

Elaboración propia

El esfuerzo local máximo de la membrana primaria en la intersección de la boca de inspección se cuadra en la tabla 2.37.

Tabla 2.37 Esfuerzo local máximo en membrana primaria– (M)

P	P_L
kPa	MPa
1,729	203.11
103.42	12.14

Elaboración propia

Los esfuerzos locales máximos en la membrana primaria se verificarán:

De aquí que,

Tabla 2.38 Esfuerzo permisible en bocas (M)

P	P_L	S_{allow}	Sobresfuerzo
kPa	kPa	$[MPa]$	
1,729	203.11	228	No
103.42	12.14	17.93	No

Elaboración propia

Es decir, que las acciones de las fuerzas aplicadas en la intersección de las bocas no sobrepasan el esfuerzo permisible del material base en la carcasa del cabezal, es decir el SA-516-70.

En cuanto a la presión máxima de trabajo permisible en la intersección se obtiene en resumen la tabla 2.39

Tabla 2.39 MAWP en boca (M)

P	A_p	P_{max1}	P_{max2}	P_{max}
kPa	cm^2	kPa	kPa	kPa
1,729	3,172	1,942	1,980.6	1,942
103.42	3,172	402.9	616.5	402.92

Elaboración propia

Por otra parte, la soldadura de las bocas deberá ser suficiente para resistir la fuerza discontinua impuesta por la presión en las bocas unidas con el cabezal. Por consiguiente, se empieza por determinar el factor de discontinuidad.

$$k_y = 1.0322$$

Para determinar las longitudes resistentes a la fuerza discontinua se utilizará las ecuaciones desde 2.3.58 hasta 2.3.62

$$\begin{aligned}
 L_{\tau} &= 73.64 \text{ mm} \\
 L_{\tau p} &= 151.57 \text{ mm} \\
 L_{41T} &= 6.74 \text{ mm} \\
 L_{43T} &= 8.98 \text{ mm} \\
 L_{43T} &= 5.78 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Cabe recalcar, que la boca llevará placa refuerzo, por lo que el esfuerzo promedio será de 0.916 MPa, que es inferior al esfuerzo permisible.

$$\begin{aligned}
 f_{welds} &= 1,006 \text{ N} \\
 f_{ws} &= 395.78 \text{ N} \\
 f_{wp} &= 610.78 \text{ N} \\
 \tau_1 &= 0.692 \text{ MPa} \\
 \tau_2 &= 0.759 \text{ MPa} \\
 \tau_3 &= 0.916 \text{ MPa} \\
 \tau &= 0.916 \text{ MPa} \\
 S &= 152 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

$$\text{Sobreesfuerzo} = \text{NO}$$

2.3.6 Diseño de siletas

En relación con las siletas una típica geometría de soportes para cuerpo cilíndricos se muestra en la figura 2.10.

Las siletas para recipientes horizontales deberán ser configurados como soporte continuo por al menos la tercera parte de la circunferencia del tanque o que cumpla $\theta \geq 120^\circ$.

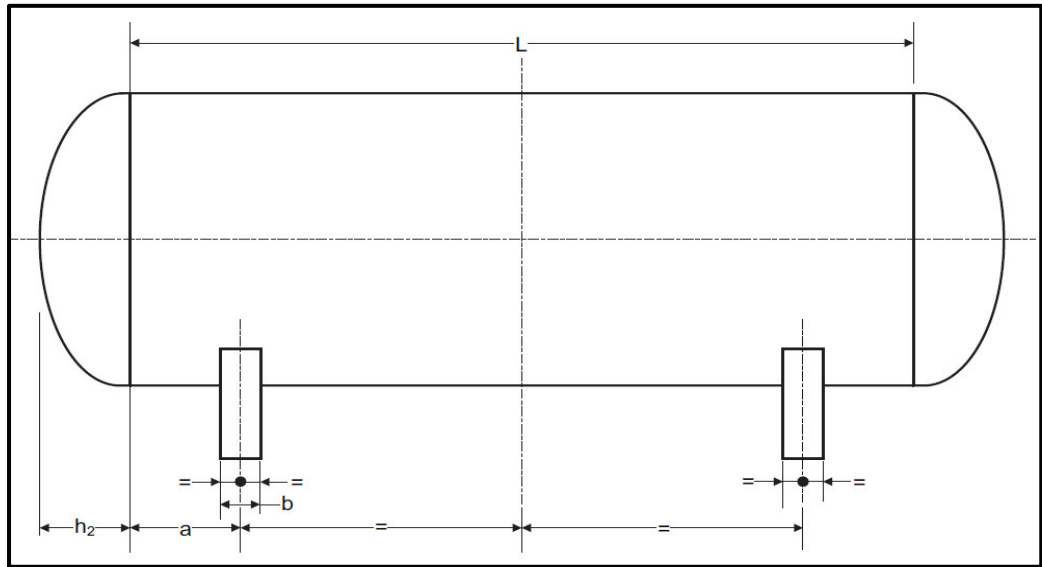


Figura 2.10 Tanque horizontal sobre silletas

Fuente: ASME VIII División 2, 2013, pág. 391

Otro rasgo de las silletas es la colocación de una placa de refuerzo, que, usualmente es incluida en el diseño para reducir los esfuerzos en la pared del tanque en la sección de los soportes.

Además, el comportamiento del recipiente dependerá de las cargas aplicadas al tanque, acorde con lo expuesto anteriormente se es necesario especificar dimensiones generales, que a continuación servirán de guía para analizar los esfuerzos generados por el peso propio, sismo y viento transmitidos al cilindro por sus reacciones.

Tabla 2.40 Dimensiones generales de soporte de tanque KOD

Distancia ente centros de silletas, L_s	3,800 mm
Longitud tangente a tangente. L	6,000 mm
Distancia a tangente de tanque, a	1,100 mm
Altura de silleta, H	1,550 mm
Ángulo de contacto de silleta, θ	120°
Espesor de alma, t_s	12 mm
Longitud de placa base, A	2,370 mm
Ancho de placa base, F	300 mm

Elaboración propia

Tabla 2.40 Dimensiones generales de soporte de tanque KOD (Cont.)

Espesor de placa base, t_b	12 mm
Número de costillas de rigidez, n	5
Distancia entre costillas de rigidez, d_i	572 mm
Espesor de costillas de rigidez, t_w	12 mm
Ancho de silleta, b	230 mm
Material de placa de refuerzo	SA-516-70
Material de silleta	SA-36
Espesor de placa de refuerzo, t_r	12.7 mm
Ancho de placa de refuerzo, b_1	475 mm
Ángulo de contacto con placa de refuerzo, θ_1	132°

Elaboración propia

Se debe agregar que el ancho de la placa de refuerzo, b_1 , deberá satisfacer la ecuación 2.3.83 y la longitud de arco de la placa de refuerzo que satisfaga la ecuación 2.2.84. Un arreglo típico de esta placa es mostrado en la figura 2.11.

$$b_1 = \min[(b + 1.56\sqrt{R_m t}); 2a] \quad (\text{Ec. 2.3.83})$$

$$\theta_1 = \theta + \frac{\theta}{12} \quad (\text{Ec. 2.3.84})$$

Donde,

a = Distancia tangente a centro de silleta, [m].

b_1 = Ancho de placa refuerzo de silleta, [m].

b = Ancho de silleta, [m].

R_m = Radio medio de tanque, [m].

t = Espesor de pared del cilindro, [m].

θ = Ángulo de contacto de silleta, [grados].

θ_1 = Ángulo de contacto con placa de refuerzo, [grados].

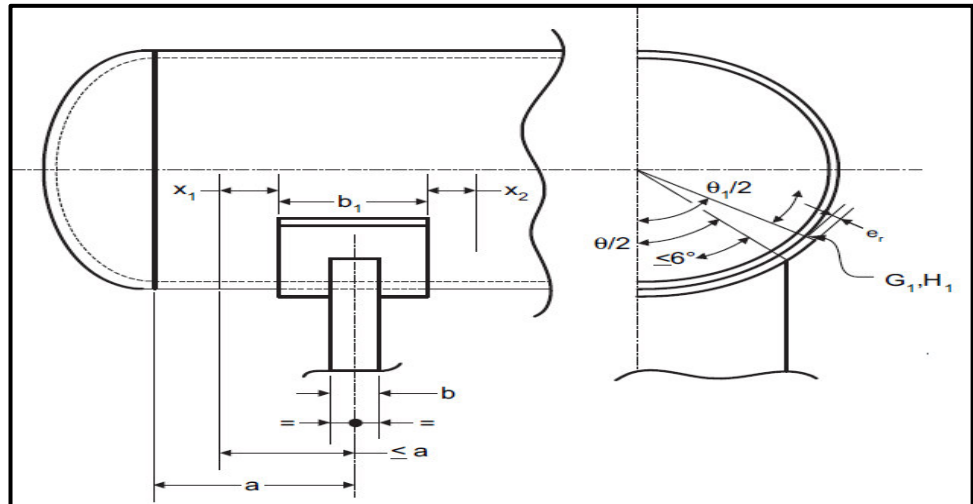


Figura 2.11 Tanque con placa de refuerzo

Fuente: ASME VIII División 2, 2013, pág. 391

Por lo tanto, resolviendo las ecuaciones 2.3.83 y 2.3.84 se obtiene que

$$b_1 = 0.47164 m$$

$$\theta_1 \geq 130^\circ$$

En otras palabras, comparándolo con los datos propuestos se consigue que se cumple con la condición mínima.

Por otro lado, a los soportes o silletas se aplicará las reglas de diseño del ASME VIII División 2, párrafo 4.15.3, el método de diseño en el referido párrafo está basado sobre un análisis de los esfuerzos longitudinales ejercidos en la carcasa cilíndrica por la flexión total del recipiente considerado como una viga sobre dos soportes simples, además del esfuerzo generado por la transmisión de las cargas sobre los soportes como esfuerzo el circunferencial y cortante en la pared del tanque KOD.

Para el diseño de las silletas es necesario conocer las reacciones en los soportes, las tablas 2.41, 2.42 y 2.43 detallan los pesos del tanque de acuerdo a los espesores de cuerpo, cabezales y bocas calculadas anteriormente.

Tabla 2.41 Peso contribuido por componentes del tanque KOD

Componente	Metal Nuevo	Metal Corroído	Líquido en Operación (SG=0.53)		Líquido en Hidrostática (SG=1)	
			Nuevo	Corroído	Nuevo	Corroído
Cabezal #1	8,698.8	6,279.4	21,356.70	21,513.62	40,083	40,392
Cilindro #1	22,995	19,156.0	50,526.64	50,751.23	96,295	96,795
Cilindro #2	23,085	19,231.5	50,533.51	50,759.07	96,229	96,727.4
Cilindro #3	23,012	19,170.7	50,524.68	50,748.28	96,291	96,789.2
Cabezal #2	8,437.9	6,091.1	21,483.21	21,642.09	40,318	40,634
Silletas	7,046.3	7,046.3	-	-	-	-
TOTAL (N):	93,276	76,975.1	194,425	195,414	369,218	371,337

Elaboración propia

Tabla 2.42 Peso contribuido por accesorios

Componente	Boquillas y bridas		Elementos de Izaje
	Nuevo	Corroído	
Cabezal #1	-	-	-
Cilindro #1	1,565.2	1,498.5	67.7
Cilindro #2	1,272.9	1,218.0	-
Cilindro #3	1,291.6	1,236.7	67.7
Cabezal #2	7,469.0	7,358.2	-
TOTAL (N):	11,598.7	11,310.4	136.3

Elaboración propia

Tabla 2.43 Peso de KOD sobre silletas

Componente	Operación, corroído	Hidrostática
Soporte izquierdo (N)	138,393.5	233,591.2
Soporte derecho (N)	138,393.6	233,591.2

Elaboración propia

De acuerdo a la combinación de las cargas del (ASME VIII División 2, 2013, pág. 157), para cargas de sismo y viento, se deberá cumplir con la siguiente combinación:

$$0.9P + P_s + D + (0.6W \text{ or } 0.7E) \quad (\text{Ec. 2.3.85})$$

Reacciones debido a peso + sismo en silleta

Asumiendo que será una estructura rígida, se los datos de entrada, están detallados en la tabla 2.3.

Para el cálculo de las reacciones de silletas debido a peso propio + sismo, primero se deberá conocer la fuerza de cortante basal, F_v , mediante la siguiente ecuación 2.3.88, tomado de (ASCE 7, 2010, pág. 144); mientras para las ecuaciones 2.3.86 y 2.3.87, fueron tomadas de la normativa (ASCE 7, 2010, pág. 65).

$$S_{MS} = F_a \times S_s \quad (\text{Ec. 2.3.86})$$

$$S_{DS} = \frac{2}{3} \times S_{MS} \quad (\text{Ec. 2.3.87})$$

$$F_v = 0.7(0.3S_{DS}W_{OS}I_e) \quad (\text{Ec. 2.3.88})$$

Donde,

S_{MS} = Parámetro de aceleración espectral en tiempos cortos ajustada por efectos de la clase de sitio

F_a = Coeficiente de sitio en periodos cortos

S_s = Parámetro de aceleración espectral en tiempos cortos

S_{DS} = Aceleración espectral en tiempos cortos

F_v = Fuerza cortante basal, [N]

I_e = Factor de importancia

El factor de 0.7 en la ecuación, se debe a la combinación de carga en la ecuación 2.3.85

Por lo tanto,

Tabla 2.44 Cortante basal en silleta

S_S	F_a	S_{MS}	S_{DS}	I_e	F_p
0.625	1.3	0.8125	0.5417	1.25	39,354.27 N

Elaboración propia

El diseño bajo el método de análisis estático, (Moss & Basic, 2013, pág. 201) indica que “los recipientes horizontales son modelados como una viga simplemente apoyada”.

Por lo tanto, las ecuaciones para el computo de reacciones longitudinal y transversal debido al peso + sismo, serán las siguientes:

$$Q_l = E_H \frac{H}{L_s} + E_V + \frac{W_{OS}}{2} \quad (\text{Ec. 2.3.89})$$

$$Q_t = \frac{E_H H}{R_o \text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)} + E_V + \frac{W_{OS}}{2} \quad (\text{Ec. 2.3.90})$$

$$E_V = 0.7(0.2S_{DS}W_s) \quad (\text{Ec. 2.3.91})$$

$$E_H = 0.7(0.3S_{DS}W_s I_e) \quad (\text{Ec. 2.3.92})$$

La máxima reacción debido al peso + sismo será:

$$Q = \max[Q_l, Q_t] \quad (\text{Ec. 2.3.93})$$

Donde:

E_H = Fuerza horizontal actuante por sismo, [N]

E_V = Fuerza vertical actuante por sismo, [N]

H = Altura desde inferior de placa base de silleta a centro de tanque. [m]

L_s = Separación entre silletas, [m]

Q = Reacción resultante en soporte, [N]

Q_t = Reacción transversal en soporte, [N]

Q_l = Reacción longitudinal en soporte, [N]

W_s = Carga de peso sobre cada soporte en condición de vacío, [N]

W_{OS} = Peso total de tanque sobre soportes condición vacío, [N]

Las ecuaciones 2.3.91 y 2.3.92 son tomadas del (ASCE 7, 2010, pág. 150), y (ASCE 7, 2010, pág. 144) respectivamente el factor 0.7 es debido a la combinación de cargas de la ecuación 2.3.85.

Por lo tanto,

Tabla 2.45 Reacción en cilindro debido a peso + sismo

E_V	10,488 N
E_H	19,665 N
Q_l	164,835 N
Q_t	178,238 N
Q	178,238 N

Elaboración propia

Reacciones debido a peso + viento en silleta

Asumiendo que será una estructura rígida, se los datos de entrada, están detallados en la tabla 2.4.

De la norma (ASCE 7, 2010, pág. 308), párrafo 29.5, las variantes de la fuerza de viento para el computo de reacciones longitudinal y transversal debido al peso + viento, serán las siguientes:

$$F_{wt} = 0.6q_z G \left(C_{f1}(A_{cproy}) + C_{f2}(A_{sproy}) \right) \quad (\text{Ec. 2.3.94})$$

$$F_{wl} = 0.6q_z G \left(C_{f1}(A_{cproy}) + C_{f2}(A_{sproy}) \right) \quad (\text{Ec. 2.3.95})$$

$$Q_t = F_{wt} \frac{H_s}{\left(R_o \text{sen} \left(\frac{\theta}{2} \right) \right)} + \frac{W_{OS}}{2} \quad (\text{Ec. 2.3.96})$$

$$Q_l = F_{wl} \frac{H_s}{L_s} + \frac{W_{OS}}{2} \quad (\text{Ec. 2.3.97})$$

$$Q = \max[Q_l, Q_t] \quad (\text{Ec. 2.3.98})$$

Donde,

F_{wt} = Fuerza transversal por viento, [N]

F_{wl} = Fuerza longitudinal por viento, [N]

q_z = Presión por viento, [Pa]

G = Factor de ráfaga,

C_{f1} = Factor de forma del tanque

C_{f2} = Factor de forma de la silleta

A_{cproy} = Área proyectada por el cilindro, perpendicular a dirección de viento, [m²]

A_{sproy} = Área proyectada por el cilindro. perpendicular a dirección de viento, [m²]

θ = Ángulo de abertura de silleta, [grados]

Para los valores de q_z, C_f , ver Apéndice E. el factor de 0.6 es debido a la combinación de carga en la ecuación 2.3.85

Tabla 2.46 Reacción en cilindro debido a peso + viento

Tipo de fuerza	C_{f1}	A_{cproy}	C_{f2}	A_{sproy}	Fuerza
F_{wt}	0.5	20.40	1.3	0.423	2,454.18 N
F_{wl}		2.5381		0.9613	866 N
				$Q_t =$	141,749 N
				$Q_l =$	138,641 N
				$Q =$	141,749 N

Elaboración propia

Momento y fuerza cortante en tanque KOD por reacción de los soportes

De acuerdo al (ASME VIII División 2, 2013), párrafo 4.15.3.2, si el recipiente está compuesto de cuerpo cilíndrico con cabezal conformado en cada punta y que es soportado por dos soportes espaciados equidistante (ver figura 2.12). El momento en la silleta, M_1 , el momento en el centro del recipiente, M_2 , y la fuerza cortante en la silleta, T , puede ser calculado si la distancia entre el centro de las silletas y la línea tangente del cabezal satisface el siguiente límite:

$$a \leq 0.25L \quad (\text{Ec. 2.3.99})$$

Por lo tanto,

$$1,1 \leq 1,5 \text{ m} \quad \text{Satisface la condición}$$

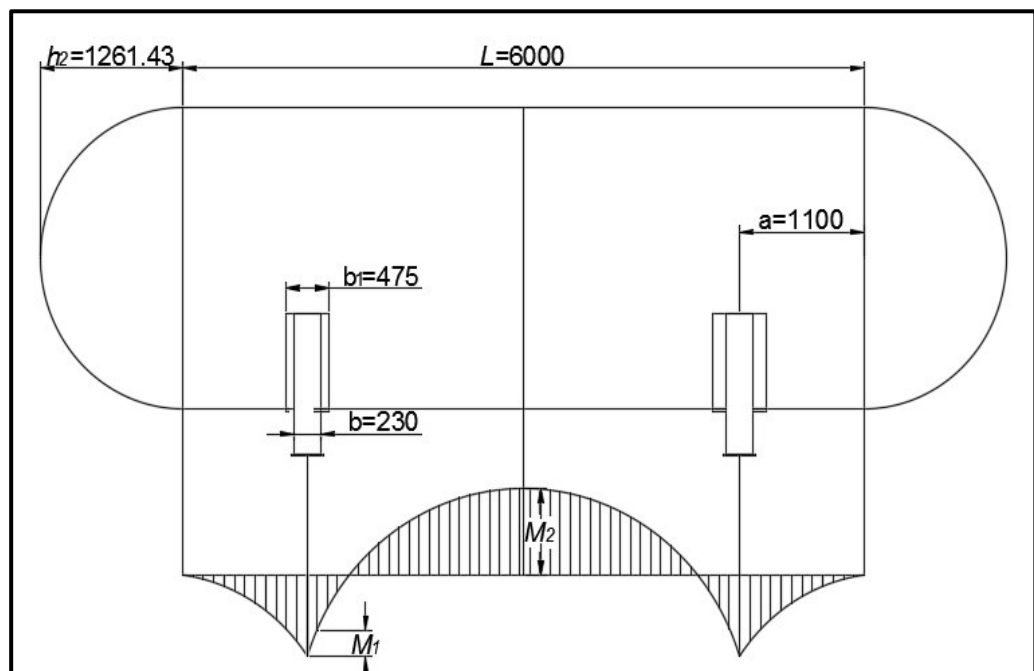


Figura 2.12 Diagrama de momento

Fuente: (Zick, 1951, págs. 435-444)

Por lo tanto, los momentos y fuerza cortantes son;

$$M_1 = -\frac{Qa}{1000} \left(1 - \frac{1 - \frac{a}{L} + \frac{R_m^2 - h_2^2}{2aL}}{1 + \frac{4h_2}{3L}} \right) \quad (\text{Ec. 2.3.100})$$

$$M_2 = \frac{QL}{4 \cdot 1000} \left(\frac{1 + \frac{2(R_m^2 - h_2^2)}{L^2}}{1 + \frac{4h_2}{3L}} - \frac{4a}{L} \right) \quad (\text{Ec. 2.3.101})$$

$$T = \frac{Q(L - a)}{L + \frac{4h_2}{3}} \quad (\text{Ec. 2.3.102})$$

Donde,

M_1 = Máximo momento de flexión longitudinal, entre silletas, [Nm].

M_2 = Máximo momento de flexión longitudinal, en la silleta, [Nm].

T = Fuerza cortante máximo en la silleta, [N].

h_2 = Altura de cabezal hemisférico, [mm].

Por lo tanto,

Tabla 2.47 Carga de momento y cortante en KOD

Carga	M_1	M_2	T
	[Nm]	[Nm]	[N]
Peso + sismo	-70,592	13,288	113,854
Peso + viento	-56,140	10,567	83,472

Elaboración propia

Las cargas de momento y cortante en el KOD, servirán para el computo de los esfuerzos circunferenciales, longitudinales y cortante, acordes con las cargas de sismo y viento obtenidos por el código ASCE 7-10.

Esfuerzo longitudinal en tanque KOD por reacción de soportes

- Los esfuerzos en la membrana longitudinal del cuerpo cilíndrico entre los soportes están dados por las ecuaciones 2.3.103 y 2.3.104

$$\text{Parte superior de cuerpo} \quad \sigma_1 = \frac{PR_m}{2t \cdot 1000} - \frac{M_2 \cdot 1000}{\pi R_m^2 t} \quad (\text{Ec. 2.3.103})$$

$$\text{Parte inferior de cuerpo} \quad \sigma_2 = \frac{PR_m}{2t \cdot 1000} + \frac{M_2 \cdot 1000}{\pi R_m^2 t} \quad (\text{Ec. 2.3.104})$$

Donde,

σ_1 = Esfuerzo longitudinal en la parte superior del tanque., [MPa]

σ_2 = Esfuerzo longitudinal en la parte superior del tanque, [MPa]

- Los esfuerzos longitudinales en el cuerpo cilíndrico en la ubicación del soporte están dados por las siguientes ecuaciones. Para los coeficientes K_1 y K_1^* , ver el Apéndice G.

$$\text{Ver figura 2.13 (a)} \quad \sigma_3^* = \left(\frac{PR_m}{2t \cdot 1000} - \frac{M_1 \cdot 1000}{K_1 \pi R_m^2 t} \right) \quad (\text{Ec. 2.3.105})$$

$$\text{Parte inferior de cuerpo} \quad \sigma_4^* = \frac{PR_m}{2t \cdot 1000} + \frac{M_1 \cdot 1000}{K_1^* \pi R_m^2 t} \quad (\text{Ec. 2.3.106})$$

Donde.

σ_3^* = Esfuerzo longitudinal en la ubicación de la silleta, [MPa]

σ_4^* = Esfuerzo longitudinal en la ubicación la silleta, [MPa]

K_1 = Parámetro de esfuerzo, ver Apéndice G

K_1^* = Parámetro de esfuerzo, ver Apéndice G

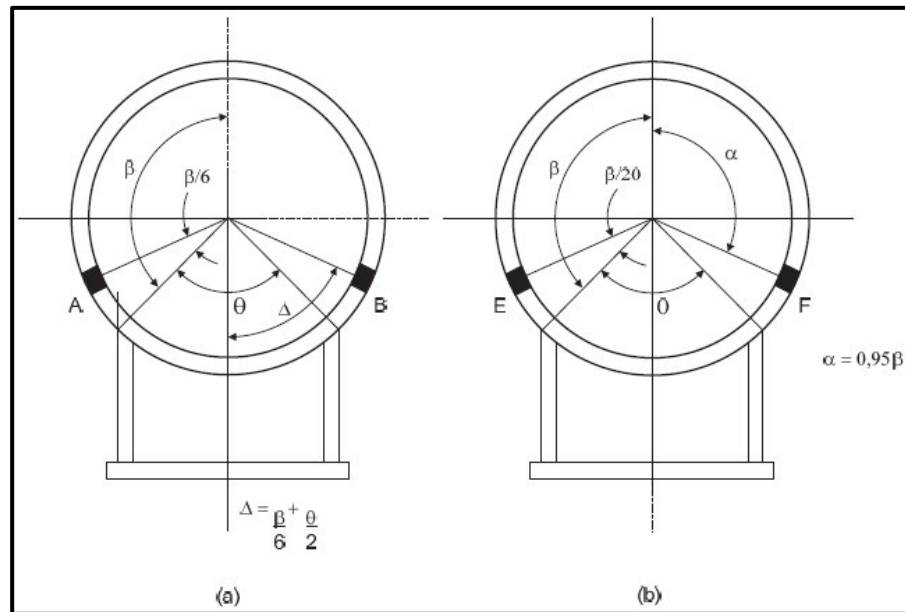


Figura 2.13 Bosquejos de esfuerzo longitudinal y cortante

Fuente: ASME VIII División 2, 2013, pág. 395

Los criterios de aceptación son:

- El valor absoluto de $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3^*$ y σ_4^* , no deberá exceder SE .
- Si algunos de los esfuerzos antes mencionados son negativos, entonces el valor absoluto del esfuerzo no deberá exceder S_c , que está dada por la siguiente ecuación 3.4.24, donde $K=1$ para condiciones de operación normal, $K=1.35$ para operaciones excepcional o prueba hidrostática.

$$S_c = \frac{KtE_y}{2R_m} \quad (\text{Ec. 2.3.107})$$

Donde,

S_c = Esfuerzo de compresión admisible para el material del cilindro a temperatura de diseño.

K = Factor de esfuerzo.

Por lo tanto, los esfuerzos longitudinales se resumen en la tabla 2.48.

Tabla 2.48 Esfuerzo longitudinal en cilindro por reacción de soporte

Condición	Variable	Esfuerzo aplicado (MPa)	Esfuerzo permisible (MPa)	Sobre esfuerzo
Sismo	σ_1	68.41	152	NO
	σ_2	68.75	152	NO
	σ_3^*	76.94	152	NO
	σ_4^*	63.93	152	NO
Viento	σ_1	68.45	152	NO
	σ_2	68.71	152	NO
	σ_3^*	69.29	152	NO
	σ_4^*	67.87	152	NO

Elaboración propia

De acuerdo a los criterios de aceptación, los valores de los esfuerzos son positivos, por lo que, los valores absolutos no deberán exceder SE . Por consiguiente, el valor máximo del esfuerzo permisible $S = 152 \text{ MPa}$, que fue tomado para el material SA-516-70, a la temperatura de diseño T_d . Ver Apéndice B. Y el valor de $E=1$, por la eficiencia de la junta de soldadura. Es decir, $SE = 152 \text{ MPa}$.

Esfuerzo cortante en tanque KOD por reacción de soportes

El esfuerzo cortante para cuerpo cilíndricos sin anillos rigidizadores que no estén rigidizados por el conformado de las cabezas, deberá ser calculado de acuerdo a la siguiente ecuación. Ver figura 2.13 (b)

$$\tau_{22} = \frac{K_2 T}{R_m t} \quad (\text{Ec. 2.3.108})$$

Donde,

K_2 = Factor de esfuerzo. Ver Apéndice G.

τ_{22} = Esfuerzo cortante por reacción del soporte, [MPa]

Los criterios de aceptación son:

- El valor absoluto de τ_{22} , no deberá exceder $0.8S$, para materiales ferríticos y $0.6S$ para otros materiales.
- Si algunos de los esfuerzos antes mencionados son negativos, entonces el valor absoluto del esfuerzo no deberá exceder S_c , que está dada por la siguiente ecuación 2.3.107, donde $K=1$ para condiciones de operación normal, $K=1.35$ para operaciones excepcional o prueba hidrostática.

Por lo tanto, los esfuerzos cortantes en el tanque se resumen en la tabla 2.49.

Tabla 2.49 Esfuerzo cortante en tanque KOD por reacción de soporte

Condición	Variable	Esfuerzo aplicado (MPa)	Esfuerzo Permisible (MPa)	Sobre esfuerzo
Sismo	τ_{22}	6.76	121.6	NO
Viento	τ_{22}	4.89	121.6	NO

Elaboración propia

Como los valores de los esfuerzos cortante son positivos, entonces los valores absolutos no deberán exceder $0.8S$, donde el valor máximo del esfuerzo permisible $S = 152 \text{ MPa}$, ver Apéndice B. Es decir, el esfuerzo permisible para cortante es de 121.6 MPa .

Esfuerzo circunferencial en tanque KOD por reacción de soportes

Debido a que se considera la colocación de una placa de refuerzo soldado entre los soportes y el cuerpo cilíndrico, el esfuerzo circunferencial se ubica en la unión placa de refuerzo y cilindro. (Ver figura 2.14).

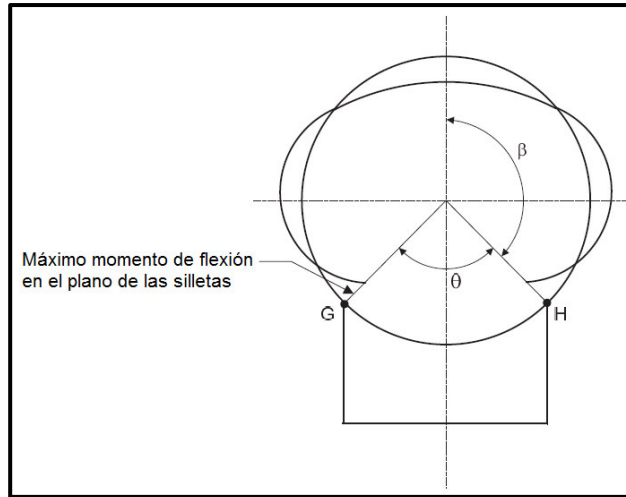


Figura 2.14 Ubicación de esfuerzo circunferencial

Fuente: ASME VIII División 2, 2013, pág. 396

Además, los esfuerzos circunferenciales están dados por la ecuación 2.3.109 y 2.3.110.

$$\sigma_{6,r} = \frac{-K_5 Q k}{b_1(t + \eta t_r) \cdot 10^6} \quad (\text{Ec. 2.3.109})$$

$$\sigma_{7,r}^* = \frac{-Q}{4(t + \eta t_r)b_1 \cdot 10^6} - \frac{12K_7 Q R_m}{10^6 \cdot L(t + \eta t_r)^2} \quad (\text{Ec. 2.3.110})$$

$$\eta = \min \left[\frac{S_r}{S}, 1 \right] \quad (\text{Ec. 2.3.111})$$

Donde,

$\sigma_{6,r}$ = Esfuerzo circunferencial en la junta sileta – cilindro, [MPa]

$\sigma_{7,r}^*$ = Esfuerzo circunferencial en la junta sileta – cilindro, [MPa]

K_5 = Factor de esfuerzo

K_7 = Factor de esfuerzo

η = Factor de esfuerzo

t_r = Espesor de placa de refuerzo, [mm]

S_r = Esfuerzo permisible para la placa de refuerzo, a temperatura de diseño, [MPa]

Además, $k=1$ si el recipiente descansa sobre los soportes sin soldadura, y $k=0.1$ si el tanque es soldado a los soportes.

Por consiguiente, de la ecuación 2.3.111, $\eta = 1$

Los criterios de aceptación son:

- El valor absoluto de $\sigma_{6,r}$, no deberá exceder S .
- El valor absoluto de $\sigma_{7,r}^*$, no deberá exceder $1.25S$.

Por lo tanto, los esfuerzos circunferenciales se resuman en la tabla 2.50.

Tabla 2.50 Esfuerzo circunferencial en cilindro por reacción de soporte

Condición	Variable	Esfuerzo aplicado (MPa)	Esfuerzo Permissible (MPa)	Sobre esfuerzo
Sismo	$\sigma_{6,r}$	-9.99	152	NO
	$\sigma_{7,r}^*$	-30.3	190	NO
Viento	$\sigma_{6,r}$	-7.94	152	NO
	$\sigma_{7,r}^*$	-24.10	190	NO

Elaboración propia

En otras palabras, para los valores absolutos de los esfuerzos circunferenciales no deberán exceder S , donde el valor máximo del esfuerzo permisible es $S = 152 \text{ MPa}$, ver Apéndice B. Sin embargo, para evaluar los esfuerzos circunferenciales $\sigma_{6,r}$ y $\sigma_{7,r}^*$, el valor de esfuerzo máximo permisible será de $1.25S = 190 \text{ MPa}$.

Reacción horizontal sobre la silleta

(Esoe A. K., 1986, pág. 179) indica que la carga Q tiene un componente horizontal ejercido sobre las puntas de la silleta (véase la figura 2.15).

Por lo tanto, esta debe ser diseñada para prevenir que las puntas de las silletas se separen.

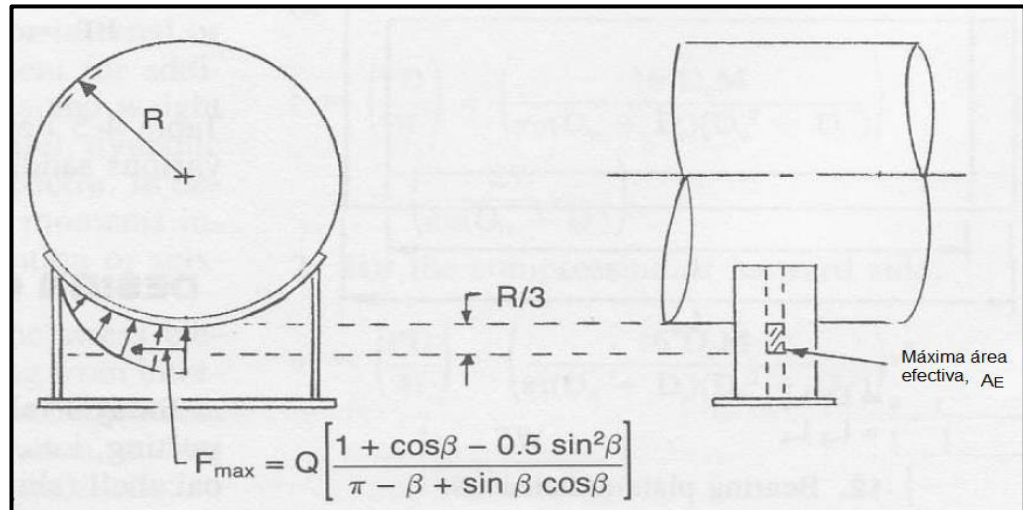


Figura 2.15 Fuerza horizontal sobre silletas

Fuente: Escoe A. K., 1986, pág. 179

Dicho de otra manera, el área transversal, en el punto más bajo del soporte deberá resistir esta fuerza horizontal, dada en la siguiente ecuación:

$$F_h = Q \left[\frac{1 + \cos \beta - 0.5 \sin^2 \beta}{\pi - \beta + \sin \beta \cos \beta} \right] \quad (\text{Ec. 2.3.112})$$

$$A_E = \left(\frac{R_0}{3} \right) t_s / 100 \quad (\text{Ec. 2.3.113})$$

$$\sigma_{ss} = \left(\frac{F_h}{100 \cdot A_E} \right) \leq 0.6S \quad (\text{Ec. 2.3.114})$$

Donde,

F_h = Fuerza horizontal debido a la reacción Q, [N].

A_E = Área efectiva de contacto, [cm²].

β = Ángulo de contacto de cilindro con silleta. [rad].

σ_{ss} = Esfuerzo en silleta, [MPa].

El cálculo se realizará con el mayor valor de reacción que es en condición peso + sismo, es decir $Q = 178,238$, por consiguiente, la reacción es:

Tabla 2.51 Reacción sobre silleta

F_h	A_E	σ_{ts}	S	Sobre esfuerzo
N	cm^2	MPa	MPa	
36,438	50.76	7.14	165	NO

Elaboración propia

El valor de $S = 165 MPa$, fue tomado del apéndice B, para el material de la silleta que es SA-36 a temperatura ambiente @28 °C.

Revisión de placa base de la silleta

Para la revisión de la placa base, (Moss & Basic, 2013, págs. 270-271) da las ecuaciones para el computo del espesor mínimo de dicha placa.

$$t_b = \sqrt{\frac{3QF}{4AS_{bs}}} \quad (\text{Ec. 2.3.119})$$

Donde:

F = Ancho de placa base, [mm].

A = Largo de placa base, [mm].

S_{bs} = Esfuerzo permisible de placa base a temperatura ambiente @28°C, ver apéndice B, [MPa]

t_b = Espesor de placa base de silleta, [mm]

Por lo tanto

$$t_b = 9.76 \text{ mm}$$

El espesor seleccionado para la placa base $t_b = 12$ mm, en contraste con el espesor mínimo calculado es mayor. Es decir, el espesor gobernante es aceptable.

2.3.7 Diseño de elementos de izaje del KOD

Para el diseño de las orejas de izaje en recipientes horizontales (Moss & Basic, 2013, pág. 669) recomienda que el ángulo entre el eje axial y la eslinga debe ser mayor a 30° , ver figura 2.16. Cabe mencionar, que para el recipiente a diseñar se asumirá que el centro de gravedad se encuentra en la línea centro del equipo.

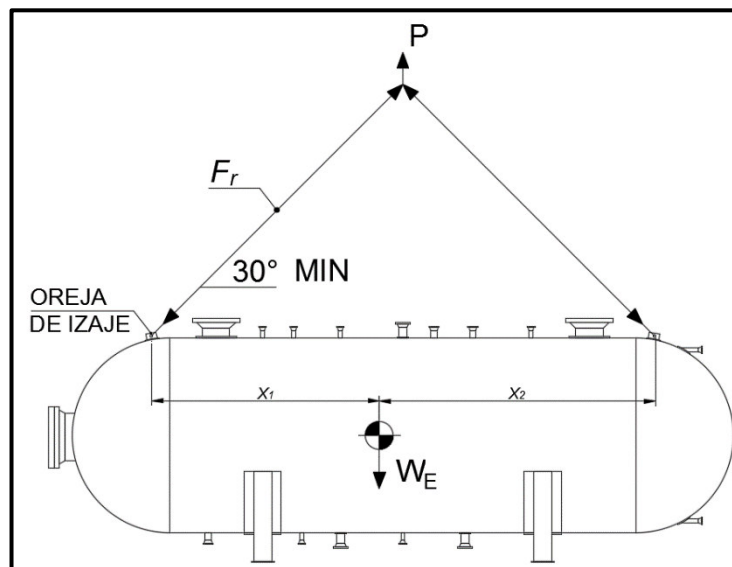


Figura 2.16 Elemento de izaje

Elaboración propia

Por lo que se refiere a esta sección se discutirá los cinco mecanismos básicos de fallas como son: tensión en sección neta, falla en zona tangencial, falla por cortante en doble plano, falla por inestabilidad en el plano, y falla por aplastamiento. A continuación, se detallan las dimensiones de los elementos de izaje en la figura 2.17 y tabla 2.52

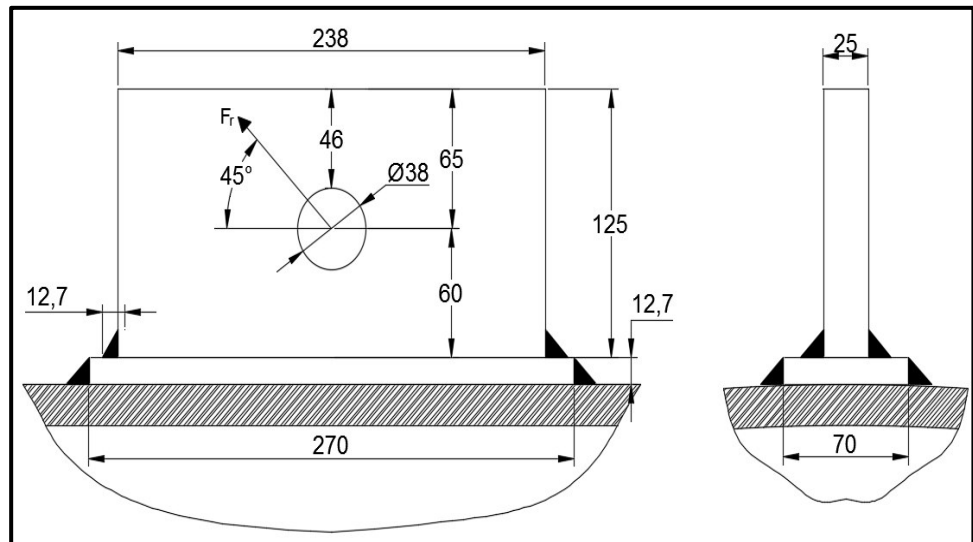


Figura 2.17 Bosquejo de elemento de izaje

Elaboración propia

Adicional, se calculará los esfuerzos en la soldadura que conectan oreja de izaje con refuerzo, y placa de refuerzo con tanque.

Tabla 2.52 Dimensiones de elemento de izaje

Material de oreja	A36
Distancia de centro de tanque a centro de gravedad, x_1	3,200 mm
Longitud de oreja, L_L	238 mm
Altura de oreja, H_L	125 mm
Espesor de oreja, t_L	25 mm
Diámetro de agujero, d_h	38 mm
Diámetro de pasador, D_p	33.01 mm
Distancia de punto de carga a refuerzo, a_2	60 mm
Tamaño de soldadura oreja con placa, t_{wl}	12.7 mm
Ancho de placa de refuerzo, B_p	70 mm
Longitud de placa de refuerzo, L_p	270 mm
Espesor de placa de refuerzo, t_p	12.7 mm
Tamaño de soldadura en placa de refuerzo, t_{wp}	12.7 mm
Ángulo de carga con la vertical, φ	45 °
Peso total de tanque vacío, W_T	105,011 N

Elaboración propia

Factor de impacto

El factor de impacto puede variar de 1.25 a 2.0. Típicamente, 1.5 es usado, que para razones de este diseño será utilizado para incrementar al peso total del recipiente vacío. (Escoe H. , 2008, pág. 120)

Por lo tanto,

$$W_L = W_T \times 1.5 \quad (\text{Ec. 2.3.120})$$

Donde,

W_T = Peso total de tanque vacío, [N]

W_L = Peso de izaje, [N]

$$W_L = 157,517.09 \text{ N}$$

Por consiguiente, la fuerza resultante para el diseño de la oreja de izaje será:

$$F_r = \left[\frac{W_L}{\cos(\varphi)} \right] \left[1 - \frac{x_1}{(x_1 + x_2)} \right] \quad (\text{Ec. 2.3.121})$$

Donde,

F_r = Fuerza resultante de izaje, [N]

x_1 = Distancia de centro de tanque a centro de gravedad, [mm]

x_2 = Distancia de centro de tanque a centro de gravedad, [mm]

φ = Ángulo de carga, [grados]

Cabe recalcar que por la simetría del tanque se asumió el centro de gravedad, igual al centro del recipiente.

Por lo tanto,

$$F_r = 111,381 N$$

Falla por tensión en área neta

Este tipo de falla se puede apreciar en la figura 2.18.

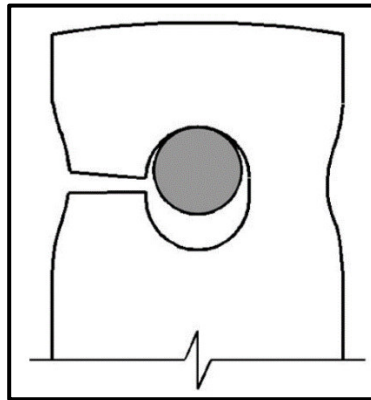


Figura 2.18 Falla por tensión en área neta

Elaboración propia

Con respecto a esto (Duerr, 2006, pág. 122), indica que el ancho efectivo de la oreja actuante a la fuerza de tensión será:

$$b_{eff} = 0.6b_e \left(\frac{S_u}{S_y} \right) \sqrt{\frac{D_H}{b_e}} \quad (\text{Ec. 2.3.122})$$

$$b_e = \frac{L_L - D_H}{2} \quad (\text{Ec. 2.3.123})$$

Donde,

S_u = Resistencia a la tracción de material base, [MPa]

b_e = Distancia horizontal entre arista de elemento de izaje hasta el agujero de pin, [mm].

L_L = Longitud de oreja, [mm].

D_H = Diámetro de agujero, [mm].

b_{eff} = ancho efectivo de elemento de izaje, [mm].

Por lo tanto,

$$b_e = 100 \text{ mm}, b_{eff} = 53.26 \text{ mm}$$

Por consiguiente, la fuerza máxima que puede resistir el agujero del pasador por tensión en la sección neta está dada por:

$$P_n = 2b_{eff}C_r t S_u \quad (\text{Ec. 2.3.124})$$

Donde,

P_n = Fuerza mínima resistente a la tensión en área neta, [N].

C_r = Factor de reducción de carga.

El factor de reducción, C_r , está a función del radio del pin y el diámetro del agujero está dado por:

$$C_r = 1 - 0.275 \sqrt{1 - \frac{D_{pi}^2}{D_H^2}} \quad (\text{Ec. 2.3.125})$$

Donde,

D_{pi} = Diámetro de pin o pasador. [mm].

Por lo tanto, resolviendo las ecuaciones 2.3.124 y 2.3.125, se obtiene

$$C_r = 0.86$$

$$P_n = 916,072 \text{ N}$$

Por consiguiente, se puede decir que la carga resistente P_n , al área tangencial es mayor a la carga aplicada F_r ,

$$P_n = 916,072 \text{ N} > 111,381 \text{ N} \quad \text{Aceptable}$$

Falla tangencial

Este fenómeno es el más probable de falla, Este modo se produce cuando la fuerza de elevación actúa en tensión en la dirección del orificio. (Escoe H. , 2008, pág. 124). En otras palabras, esta fuerza actúa sobre el área de la oreja desde la parte superior del agujero hasta la arista de la placa. Véase la figura 2.19

Con lo antes mencionado, el espesor requerido para la carga actuante será:

$$t_L = \frac{F_r}{0.45 S_y a_3} \quad (\text{Ec. 2.3.126})$$

Donde,

a_3 = Distancia entre arista de agujero y arista de placa, [mm].

t_L = Espesor mínimo requerido de placa de izaje, [mm].

Por lo tanto,

$$t_L = 11.95 \text{ mm}$$

En contraste con el espesor nominal seleccionado de 25mm para la oreja, se puede decir que es aceptable.

Por otra parte, la máxima de fuerza soportante de la oreja utilizando el espesor nominal de la oreja, es decir 25 mm, está dada por:

$$P_b = C_r S_u \left[1.13 a_3 + \frac{0.92 b_e}{1 + \frac{b_e}{D_H}} \right] t_L \quad (\text{Ec. 2.3.127})$$

Donde,

t_L = Espesor nominal de placa de izaje, [mm].

P_b = Fuerza máxima resistente a falla tangencial, [N].

$$P_b = 733,135.73 \text{ N}$$

Por consiguiente, se puede decir que la carga resistente a la falla tangencial, P_b , es mayor a la carga aplicada en el elemento de izaje, F_r .

Es decir,

$$P_b = 733,135.73 \text{ N} > 111,381 \text{ N} \quad \text{Es aceptable}$$

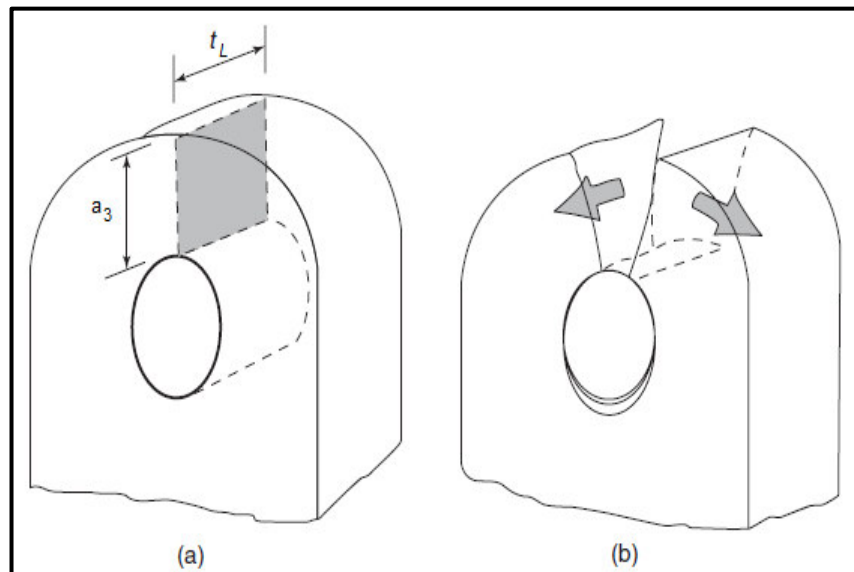


Figura 2.19 Falla por fuerza tangencial

Fuente; (Escoe H. , 2008, pág. 124)

Falla por cortante en doble plano

En esta parte, la región que va más allá del agujero es la sección de cortante en los dos planos que son paralelo entre si y además al vector de la fuerza actuante sobre la placa, ver figura 2.20(a). Las localizaciones de estos planos cortantes están definidas por el ángulo ϕ , mostrado en la figura 2.20(b).

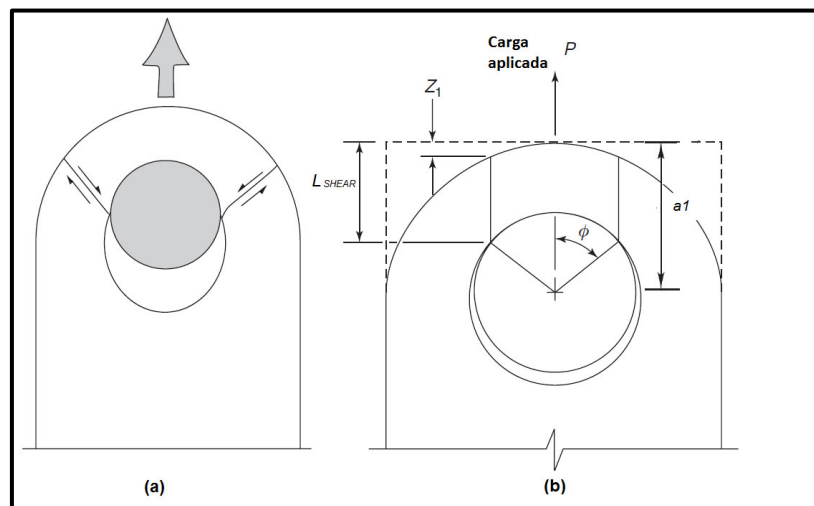


Figura 2.20 Falla por cortante en doble plano

Fuente: (Esoe H. , 2008, pág. 126)

De acuerdo con lo antes expuesto, (ASME BTH-1, 2014, pág. 16) propone las siguientes ecuaciones:

$$P_v = \frac{0.70S_u}{1.2} A_v \quad (\text{Ec. 2.3.128})$$

$$A_v = 2 \left(a_3 + \frac{D_p}{2} (1 - \cos 45^\circ) \right) t_L \quad (\text{Ec. 2.3.129})$$

Donde,

A_v = Área total de cortante a doble plano, $[mm^2]$.

P_v = Carga resistente al doble cortante, $[N]$.

$$A_v = 2541 \text{ mm}^2$$

$$P_v = 592,900 \text{ N}$$

Por consiguiente, comparando con F_r

$$P_s = 592,900 \text{ N} > 111,381 \text{ N} \quad \text{Aceptable}$$

Falla por inestabilidad fuera de plano

Las placas delgadas pueden fallar debido al pandeo fuera del plano (ver figura 2.21). El propósito de este modelo es que la placa encima del pasador sea considerado análogamente a una viga en cantiléver. (Duerr, 2006, pág. 190).

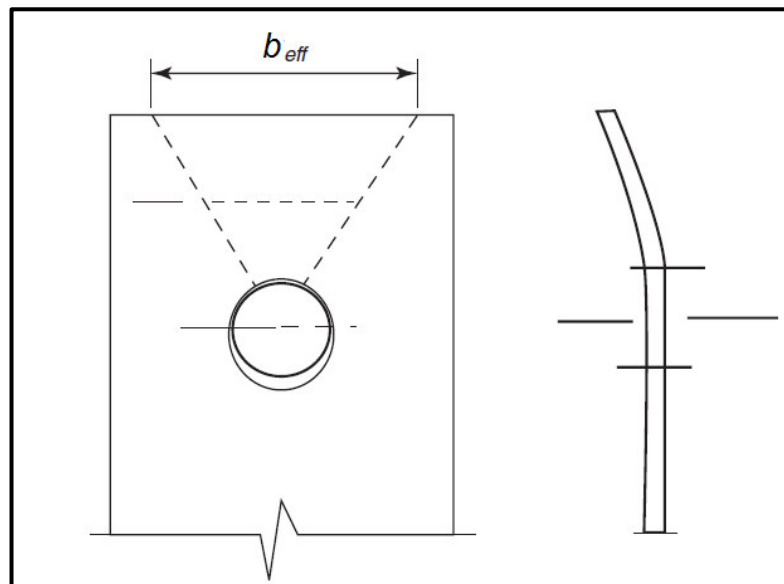


Figura 2.21 Falla por inestabilidad fuera del plano

Fuente: (Duerr, 2006, pág. 191)

Sin embargo, la norma (ASME BTH-1, 2014, pág. 16), indica que el límite de anchura eficaz del área de definida por la Ec. (2.3.130) sirve para eliminar la inestabilidad fuera de plano como modo de fallo.

$$b_e = 100 \text{ mm}, b_{eff} = 53.26 \text{ mm}$$

$$b_{eff} \leq 4t_L \leq b_e \quad (\text{Ec. 2.3.130})$$

Condición se cumple, por lo que la oreja de izaje no fallará por inestabilidad fuera de plano.

Falla por aplastamiento

La tensión inicial de una placa conectada con un pin o pasador se manifiesta típicamente como deformación local de la placa, (ver figura 2.22) inmediatamente después del pin. (Escoe H. , 2008, pág. 129)

La ecuación para el cálculo del aplastamiento es tomada de (Escoe H. , 2008, pág. 129), que está definida por la siguiente ecuación:

$$\sigma_B = \frac{F_r}{D_{pi}(t_L + T_{DP})} \quad (\text{Ec. 2.3.131})$$

Donde,

T_{DP} = Espesor de refuerzos en agujero o collarines, en este caso $T_{DP} = 0$.

σ_B = Esfuerzo por aplastamiento, [MPa]

Por lo tanto,

$$\sigma_B = 117 \text{ MPa}$$

El criterio de aceptación para el esfuerzo de aplastamiento es:

$$\sigma_B \leq 0.9S_y \quad (\text{Ec. 2.3.132})$$

De tal forma que,

$$\sigma_B \leq 0.9(250) = 225$$

Acceptable

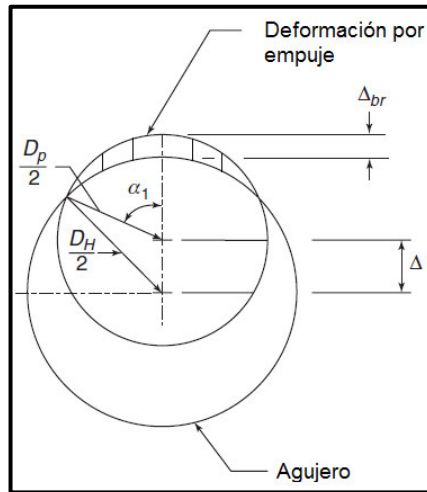


Figura 2.22 Falla por empuje de pasador

Fuente: (Duerr, 2006, pág. 186)

Esfuerzo en soldadura de elemento de izaje

Por otro lado, se deberá verificar los esfuerzos en la soldadura entre la oreja de izaje y la placa de refuerzo, ya sea por tensión flexión y cortante durante el levantamiento de carga. El valor de la inercia es tomado de (Budynas & Nisbett, 2008, pág. 470)

$$A_{sold} = 2 \times 0.707 t_{wl} (L_L + t_L) \quad (\text{Ec. 2.3.133})$$

$$\tau_{sl} = \frac{F_r \cos \varphi}{A_{sold}} \quad (\text{Ec. 2.3.134})$$

$$\tau_{sl} = \frac{F_r \sen \varphi}{A_{sold}} \quad (\text{Ec. 2.3.135})$$

$$\tau_{bl} = \frac{F_r \sen \varphi \cdot a_2 \left(\frac{L_L}{2} \right)}{\left(0.707 (t_{wl}) \left(\frac{L_L^2}{6} \right) (3 \times t_L + L_L) \right)} \quad (\text{Ec. 2.3.136})$$

$$\frac{\sqrt{((\tau_t + \tau_b)^2 + \tau_s^2)}}{\tau_{al}} \leq 1 \quad (\text{Ec. 2.3.137})$$

Donde,

τ_{tl} = Esfuerzo de tensión en soldadura unión placa refuerzo y oreja, [MPa]

τ_{sl} = Esfuerzo de cortante en soldadura unión placa refuerzo y oreja, [MPa]

τ_{bl} = Esfuerzo de flexión en soldadura unión placa refuerzo y oreja, [MPa]

A_{sold} = Área de soldadura unión placa refuerzo y oreja, [mm²].

τ_{al} = Esfuerzo cortante permisible, de oreja, [MPa]

El esfuerzo cortante permisible no deberá exceder 0.4S_y del material base más débil, en este caso sería del elemento de izaje SA-A36. (AWS D1.1, 2015, pág. 17)(Ver Apéndice F)

Es decir, $\tau_{al} = 0.4(250) = 100 \text{ MPa}$

Por lo tanto

$$A_{sold} = 4,723 \text{ mm}^2$$

$$\tau_{tl} = 16.67 \text{ MPa}$$

$$\tau_{sl} = 16.67 \text{ MPa}$$

$$\tau_{bl} = 15 \text{ MPa}$$

$$0.35 \leq 1 \text{ Aceptable}$$

Esfuerzo en placa de refuerzo de la oreja de izaje.

Se verificará los esfuerzos en la soldadura entre la placa de refuerzo y el tanque, ya sea por tensión, flexión y cortante durante el levantamiento de carga.

$$A_{sold2} = 2 \times 0.707 t_{wp} (L_p + t_p) \quad (\text{Ec. 3.5.26})$$

$$\tau_{tp} = \frac{F_r \cos \varphi}{A_{sold2}} \quad (\text{Ec. 3.5.27})$$

$$\tau_{sp} = \frac{F_r \text{ sen } \varphi}{A_{sold2}} \quad (\text{Ec. 3.5.28})$$

$$\tau_{btp} = \frac{F_r \text{ sen } \varphi (a_2 + t_p) \left(\frac{L_p}{2}\right)}{\left(0.707(t_{wp}) \left(\frac{L_p^2}{6}\right) (3 \times B_p + L_p)\right)} \quad (\text{Ec. 3.5.28})$$

$$\frac{\sqrt{((\tau_t + \tau_b)^2 + \tau_s^2)}}{\tau_{altp}} \leq 1 \quad (\text{Ec. 3.5.29})$$

Donde,

τ_{tp} = Esfuerzo de tensión en soldadura que une la placa de refuerzo y cilindro, [MPa]

τ_{sp} = Esfuerzo cortante en soldadura que une la placa de refuerzo y cilindro [MPa]

A_{sold2} = Área de soldadura entre cilindro y placa de refuerzo, [mm²].

τ_{altp} = Esfuerzo cortante permisible de placa de refuerzo, [MPa]

El esfuerzo cortante permisible no deberá exceder 0.4S_y del material base más débil, en este caso sería del elemento de izaje SA-A36. (AWS D1.1, 2015, pág. 17) (Ver apéndice F)

$$A_{sold2} = 6,285 \text{ mm}^2$$

$$\tau_{tp} = 12.53 \text{ MPa}$$

$$\tau_{sp} = 12.53 \text{ MPa}$$

$$\tau_{btp} = 13.94 \text{ MPa}$$

$$0.29 \leq 1 \text{ Aceptable}$$

2.4 Requerimientos para fabricación

El fabricante del recipiente en estudio de acuerdo a las condiciones de diseño y normativa (ASME VIII División 2, 2013), parte 6, deberá cumplir con la documentación de tratamientos, pruebas o ensayos realizados en el tanque. Los materiales sometidos a presión deberán estar marcados o identificados de manera que se garantice la trazabilidad de cada una de sus piezas. Estas marcas deberán permanecer visibles para el inspector durante todo el proceso de fabricación. Un bosquejo o tabulación de los materiales deberá ser realizado por el constructor, enlazando cada marca o código de material con el respectivo informe de certificado de prueba o certificado de cumplimiento suministrado por el proveedor del componente.

Los defectos pueden ser removidos y reparados por el fabricante del recipiente o a menos que esté prohibido por la especificación del material, de ser este el caso el proveedor del material puede repararlo con la autorización del fabricante del tanque.

Examinación de áreas defectivas: Las áreas cuyos desperfectos han sido removidos deberá ser examinado por ensayo de partículas magnéticas o por tintas penetrantes, para asegura la completa remoción del defecto.

Reparación por soldadura: Para reparaciones por soldadura, los procedimientos deberán ser calificados en acuerdo con la normativa ASME IX.

Examinación de superficies reparadas por soldadura: Estas deben ser examinadas por partículas magnéticas o por el método de tintas penetrantes. También puede ser examinado por radiografía si la profundidad del depósito de soldadura es mayor a 10mm o la mitad del espesor.

Todas las reparaciones realizadas en el tanque deben ser documentadas.

Todos los materiales para las secciones del cuerpo como los cabezales deberán ser conformados por cualquier proceso sin que perjudique las propiedades mecánicas del material.

El espesor del material después de conformado debe cumplir con el espesor mínimo de diseño es decir para las planchas del cuerpo cilíndrico de 17.68 mm y para los cabezales de 10.37 mm.

Todas las planchas o aristas de las cabezas pueden ser cortados o biselados a la forma requerida, por lo general se utiliza corte con plasma, y se debe verificar que no se produzcan escorias o decoloración en la plancha, caso contrario se remueven estas zonas. Así mismo, las esquinas de las soldaduras deben ser uniformes y suaves.

La terminación o arista del cuello de boca puede ser cortado de tal forma que sea suave. Una buena práctica es que tengan un radio de 3 mm.

Las piezas que se van a soldar deberán estar montadas, alineadas y retenidas en posición durante la operación de soldadura. Las dos caras a unir deben ser esencialmente simétricas con respecto al eje de rotación.

En el caso de utilizar punto de soldadura estas deben ser retiradas completamente cuando hayan cumplido su propósito.

En el caso de colocar elementos temporales estos deben ser removidos, si es necesario reparar al material base con soldadura, deberán ser inspeccionadas.

Las superficies a soldar deberán estar limpias y libres de incrustaciones, óxido, aceite, grasa, escorias y otros materiales extraños nocivos.

La máxima desalineación en las juntas a tope soldadas entre cuerpos cilíndricos o cuerpos cilíndricos con cabezales hemisféricos deberán ser como las dadas en la tabla 2.53.

Tabla 2.53 Mínimo desalineación permisible en juntas de soldadura

Espesor de sección	Categoría junta A	Categoría juntas B, C, D
$13\text{mm} \leq t$	$t/4$	$t/4$
$13\text{mm} < t \leq 19\text{mm}$	3 mm	$t/4$
$19\text{mm} < t \leq 38\text{mm}$	3 mm	5 mm
$38\text{mm} < t \leq 50\text{mm}$	3 mm	$t/8$
$t > 50\text{mm}$	Min ($t/16$; 10 mm)	Min ($t/8$; 19 mm)

Fuente: ASME VIII División 2, pág. 674

2.5 Requerimientos de soldadura

A continuación, se indican algunos requerimientos generales para el proceso de soldadura, de acuerdo con la norma (ASME VIII División 2, 2013), párrafo 6.2. Sin embargo, cada fabricante o proveedores de partes es responsable por la soldadura realizadas por su organización.

El fabricante es el responsable por la selección del material de aporte a utilizar y el proceso a realizar. La resistencia a tensión de la soldadura deberá ser igual o exceder que del material base.

Todos los soldadores deben ser calificados por el fabricante del recipiente según normativa (ASME IX, 2013).

Toda soldadura no podrá realizarse hasta que los procedimientos respectivos hayan sido calificados.

Cada procedimiento de soldadura que se utilice en la construcción deberá ser registrada en detalle por el fabricante.

El fabricante debe ser responsable del control de los electrodos u otro material utilizado en la fabricación del recipiente.

Toda soldadura a tope deberá tener penetración completa y fusión total. Para uniones de bocas debe tener un mínimo profundidad de penetración de acuerdo a los cálculos realizados.

En el caso de precalentamiento o tratamiento post-soldadura debe cumplir con los requerimientos de (ASME IX, 2013).

Toda reparación debe ser realizado antes del tratamiento post-soldadura.

Más detalles se encuentran en el código (ASME VIII División 2, 2013), sección 6.2.

2.6 Requerimientos de inspección y pruebas

Los requerimientos para la inspección y pruebas incluida los ensayos no destructivos durante la fabricación del recipiente a presión se encuentran definidas en el ASME VIII División 2 Parte 7.

En cuanto a las responsabilidades y deberes, el fabricante deberá permitir el libre acceso al Inspector en cada parte de la planta que concierna con los materiales para la fabricación del recipiente. También será el responsable en asegurar que los ensayos no destructivos (con sus siglas en ingles NDT) han sido calificados y certificados por personal calificado. Los códigos SNT-TC-1A o CP-189 deberá ser usado como guía.

Todas las soldaduras deben ser examinadas visualmente, y deberán someterse a NDT dependiendo del grupo de examinación y tipo de junta que se encuentran en el código (ASME VIII División 2, 2013), parte 7.

2.7 Requerimientos de pruebas de presión

En referencia al (ASME VIII División 2, 2013), parte 8; el recipiente deberá ser sometido a una prueba hidrostática.

Antes de la prueba hidrostática todas las operaciones de fabricación deben ser completadas, excepto aquellas que no se pudieron realizar antes de la prueba, como rectificación de la soldadura o material base sin que aquello afecte al grosor requerido, incluida la tolerancia de corrosión permisible.

La prueba debe llevarse a cabo bajo condiciones de control con apropiada seguridad y equipamiento, venteos deben ser dotados en los puntos altos del recipiente en la posición de prueba para permitir purgar todo el aire mientras se llena para la prueba hidrostática.

La mínima presión hidrostática deberá ser el mayor valor de las siguientes ecuaciones:

$$P_T = 1.43 \cdot MAWP \quad (\text{Ec. 2.3.133})$$

$$P_T = 1.25 \cdot MAWP \cdot \left(\frac{S_T}{S} \right) \quad (\text{Ec. 2.3.134})$$

Donde,

P_T = Mínima presión de prueba hidrostática, [kPa]

S_T = Esfuerzo máximo permisible a la temperatura de prueba, [MPa]

MAWP del recipiente KOD es 1,764 kPa , que corresponde a la boca D y F (ver tabla 3.4).

Los valores S y S_T son los esfuerzos permisibles a la temperatura de diseño $177\text{ }^\circ\text{C}$ y temperatura de la prueba $28\text{ }^\circ\text{C}$ respectivamente; tomados de la tabla 5A del (ASME II, 2013), para el material SA-106-B. Ver Apéndice B

Por lo tanto, resolviendo las ecuaciones antes mencionadas, se obtiene

$$P_T = 2,465.32\text{ kPa}$$

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS

3.1 Análisis de resultados

El dimensionamiento del recipiente KOD en la primera proyección de diámetro y longitud, se logró obtener una longitud mínima de 1.45 m. Es decir, la partícula con diámetro de $300\mu\text{m}$, al alcanzar una distancia mínima de 1,45 m se realizará la separación líquido – vapor. Sin embargo, las recomendaciones de diseño indican que la relación D/L, debe tener valores entre 2 al 5. Por lo que tanto, un diámetro de 2.5 m y longitud de 6 m es aceptable.

Los valores obtenidos para los espesores, sean estos de cuerpo o cabezal hemisférico del tanque KOD mediante la aplicación de la norma ASME VIII División 2 se redujeron en comparación si se hubiese aplicado bajo las mismas condiciones y material con la norma ASME VIII División 1, Además, se muestra resultados con Div. 1 y una eficiencia $E=0.84$. Para una muestra se presenta la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Espesores de KOD por normativa

Componente	ASME VIII Div.2 E = 1		ASME VIII Div.1 E = 1		ASME VIII Div.1 E = 0.85		Diferencia (mm)
	t_d (mm)	t (mm)	t_d (mm)	t (mm)	t_d (mm)	t (mm)	
Cuerpo	17.68	19.05	19.21	22.23	22.06	22.23	3.2 / 3.2
Cabezal	10.42	11.43	11.17	11.43	13.13	14.29	0 / 2.86
Peso* (N)	93,276		105,064		109,096		11,788/15,820

Elaboración propia

El peso total en sus diferentes condiciones, es decir metal nuevo, metal corroído, vacío, y prueba hidrostática, se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Peso neto de tanque

Vacío, corroído	88,446 N
Vacío, nuevo	105,045 N
Prueba hidrostática, corroído	474,372 N
Prueba hidrostática, nuevo	459,902 N
Superficie	81,82 m ²

Elaboración propia

Por lo que, se obtiene un beneficio en el costo de material, ya que de acuerdo a los espesores comerciales para las planchas en SA-516-70 hay una diferencia mínima de 3.2 mm en el cuerpo cilíndrico. Además, un menor peso del equipo entre el 12% al 16%. Y sus respectivas transferencias de cargas hacia las silletas y muros de apoyo (obra civil).

Esto debido a que los esfuerzos máximos permisibles para las condiciones de diseño y material SA-516-70 son mayores en el ASME VIII División 2. (Ver tabla 3.3)

Tabla 3.3 Esfuerzo máximo permisible S por normativa

ASME VIII Div.1	ASME VIII Div.2
138 MPa	152 MPa

Fuente: ASME II, Parte D, Tablas 1A-5A

La diferencia de espesor también se ve reflejado en la cantidad de soldadura depositada, alrededor del 27%

Unión de soldadura	METAL DEPOSITADO (kg/ml) (acero)				
	Esesor (E) mm				
	0,045	0,098	0,380	0,638	0,358
	0,177	0,190	0,638	0,605	0,605
	0,396		1,168	1,066	1,066
	0,708		1,731	1,707	1,707
	1,103		2,380	1,049	2,130
	1,592		3,987	2,578	3,554
	2,839				

Figura 3.1 Metal depositado en soldadura de KOD

Fuente: (INDURA S.A, 2007, pág. 10)

Con lo revisado antes se puede apreciar que hay un ahorro entre el 25% hasta el 30 %, en el rubro de servicio de soldadura. Ver la tabla 3.11.

En lo que respecta a la máxima presión de trabajo permisible (MAWP) del tanque KOD se seleccionó el menor valor MAWP de cada uno de los componentes, cuyo valor es de 1,764 kPa @ 177 °C. Así mismo, para la máxima presión externa de trabajo permisible (MAEP) del tanque KOD se seleccionó el menor valor MAEP de cada uno de los componentes cuyo valor es de 138.73 kPa @ 177 °C. Ver tabla 3.4

Tabla 3.4 Resumen de MAWP y MAEP en KOD

Componente	Presión (kPa)	Temperatura (°C)	MAWP (kPa)	MAEP (kPa)
Cuerpo	1,724	177	1,883.16	223.94
Cabezal	1,724	177	1,977	617.31
Entrada de fluido (A)	1,724	177	1,902.83	163.25
Salida de gas (B)	1,724	177	1,902.83	163.25
Salida de líquido (C)	1,724	177	1,892.74	208.38
Indicador de presión (D)	1,724	177	1,764.04	138.73
Interruptor de nivel (E)	1,724	177	1,892.74	208.38
Transmisor de nivel (F)	1,724	177	1,764.04	138.73
Indicador de nivel (G1)	1,724	177	1,968.23	613.61
Indicador de nivel (G2)	1,724	177	1,968.23	613.61
Entrada de hombre (M)	1,724	177	1,915.63	398.7

Elaboración propia

Por otra parte, la presión para la prueba hidrostática a temperatura ambiente de acuerdo a la mínima MAWP del equipo, será de:

$$P_T = 2,465.32 \text{ kPa}$$

Con la orientación del tanque colocándolo horizontalmente y sus silletas en los extremos, se esperaba que las cargas sísmicas, viento y peso propio, transmitidas al recipiente, no causen distorsión o sobreesfuerzo.

Esto se confirmó con los resultados obtenidos y resumidos en las tablas 3.5 hasta 3.7

Tabla 3.5 Esfuerzo longitudinal en tanque KOD por reacción de soporte

Condición	Variable	Esfuerzo aplicado (MPa)	Esfuerzo permisible (MPa)
Sismo	σ_1	68.41	152
	σ_2	68.75	152
	σ_3^*	76.94	152
	σ_4^*	63.93	152
Viento	σ_1	68.45	152
	σ_2	68.71	152
	σ_3^*	69.29	152
	σ_4^*	67.87	152

Elaboración propia

La ubicación de los esfuerzos longitudinales se puede ver en la figura 3.2. Donde resalta que el mayor esfuerzo longitudinal está en el lado del soporte.

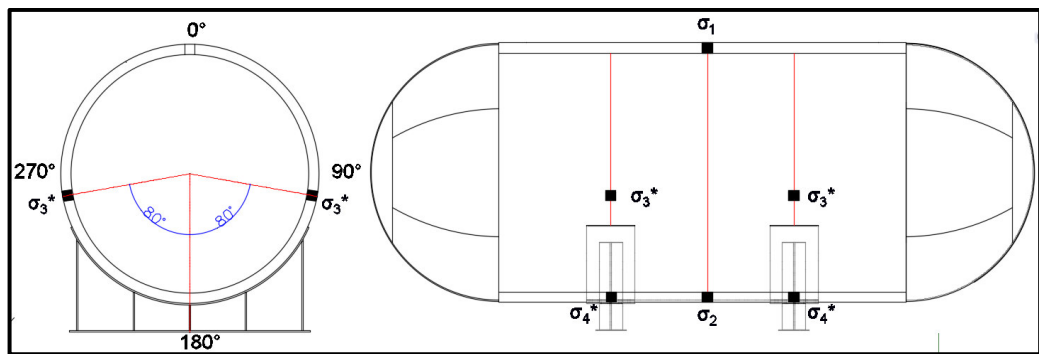


Figura 3.2 Ubicación de esfuerzo longitudinales

Elaboración propia

Tabla 3.6 Esfuerzo cortante en tanque KOD por reacción de soporte

Condición	Variable	Esfuerzo aplicado (MPa)	Esfuerzo Permisible (MPa)
Sismo	τ_{22}	6.76	121.6
Viento	τ_{22}	4.89	121.6

Elaboración propia

La ubicación de los esfuerzos cortantes se puede ver en la figura 3.3.

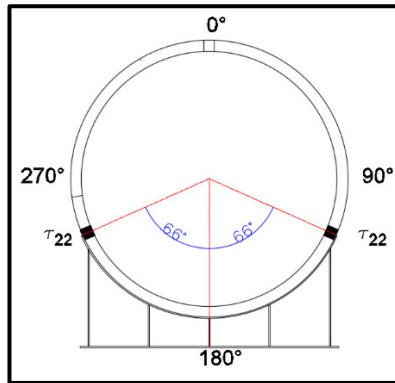


Figura 3.3 Ubicación de esfuerzos cortantes

Elaboración propia

Se puede apreciar que los esfuerzos cortantes se ubican en las puntas de la placa de refuerzo.

Tabla 3.7 Esfuerzo circunferencial en tanque KOD por reacción de soporte

Condición	Variable	Esfuerzo aplicado (MPa)	Esfuerzo Permisible (MPa)
Sismo	$\sigma_{6,r}$	-9.99	152
	$\sigma_{7,r}^*$	-30.3	190
Viento	$\sigma_{6,r}$	-7.94	152
	$\sigma_{7,r}^*$	-24.10	190

Elaboración propia

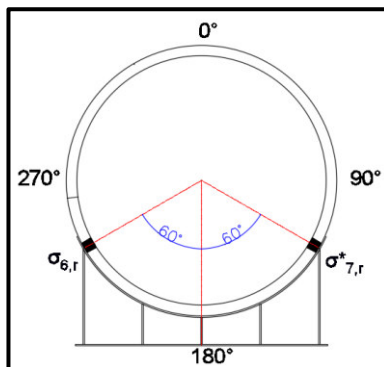


Figura 3.4 Ubicación de esfuerzos circunferenciales

Elaboración propia

Y para los esfuerzos circunferenciales en las puntas laterales de la silleta.

En cuanto a los elementos de izaje los tipos de fallas más recurrentes fueron evaluados para garantizar la integridad del equipo en el momento del levantamiento para su montaje a sitio o transporte. Ver tabla 3.8. Cabe mencionar que las ecuaciones utilizadas fueron tomadas de (Duerr, 2006), que luego fueron incluidas en la norma (ASME BTH-1, 2014).

Tabla 3.8 Fallas en elementos de izaje

Tipo de falla	Observaciones
Tensión en sección neta	$P_n = 916,072 \text{ N} > 111,381 \text{ N}$
Tangencial	$P_s = 733,135 \text{ N} > 111,381 \text{ N}$
Cortante doble plano	$P_v = 592,900 \text{ N} > 111,381 \text{ N}$
Inestabilidad fuera de plano	$53.36 \text{ mm} \leq 100 \text{ mm} \leq 1000 \text{ mm}$
Empuje	$177 \text{ MPa} \leq 225 \text{ MPa}$

Elaboración propia

Cabe recalcar que la inestabilidad fuera del plano se puede evitar aumentando el ancho de la placa.

La soldadura de los elementos de izaje, es decir placa de orejas con placa de refuerzo y la placa de refuerzo unida al recipiente, fueron revisadas conforme con la normativa AWS D.1.1

Tabla 3.9 Esfuerzo en soldadura en elementos de izaje

Junta	Esfuerzo aplicado	Esfuerzo admisible	ratio
Oreja-Placa de refuerzo	35 MPa	100 MPa	0.35
Placa de refuerzo - carcasa	29 MPa	100 MPa	0.29

Elaboración propia

3.2 Presupuesto referencial

El presupuesto del suministro de un recipiente KOD, bajo la normativa ASME VIII División 2, se lo dividirá en costos de materiales, y costos de servicios.

Cabe mencionar que dentro de los costos de materiales está incluido el valor de transporte e impuestos por aduana. Así mismo en los costos de servicio estarán incluidos los valores de mano de obra, insumos, equipos.

Tabla 3.10 Presupuesto referencial

Materiales				
Componente	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Total
Plancha de cilindros	Unid	3	7,200.00	21,600.00
Cabezales hemisféricos	Unid	2	6,250.00	12,500.00
Planchas para refuerzo	Unid	2	550.00	1,100.00
Plancha de silletas	Unid	2	1,050.00	2,100.00
Brida 2"	Unid	4	30.00	120.00
Brida 4"	Unid	2	50.00	100.00
Brida 14"	Unid	2	800.00	1,600.00
Brida 24"	Unid	1	3,500.00	3,500.00
Tubo NPS 2"	Unid	1	500.00	500.00
Tubo NPS 4"	Unid	1	950.00	950.00
Tubo NPS 14"	Unid	1	1400.00	1400.00
	\$/kg	4.26	Subtotal (A)	45,470.00
Servicio				
Rolado	Kg	7100	1.00	7,100.00
Corte con plasma	m	60	1.00	60.00
Biselado	m	80	3.50	280.00
Soldadura SAW	kg	8800	1.2	10,560
Soldadura GMAW	pulg-diam.	204	10	2,040
Soldadura GTAW	Kg	880	0.6	528.00
Granallado	m2	65	5.00	325.00
Pintura	m2	65	80.00	5,200.00
Inspección visual	dias	20	100.00	2,000.00
Radiografía	dias	15	400.00	6,000.00
Tintas penetrantes	dias	4	150.00	600.00
Prueba hidrostática	global	1	1,200.00	1,200.00
Inspección ASME	global	15	1,500.00	22,500.00
	\$/kg	5.45	Subtotal (B)	58,345.00
	\$/kg	9.71	Total (A+B)	103,863.00

Elaboración propia

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIÓN Y DISCUSIÓN

4.1 Conclusiones

- Como resultado del dimensionamiento del tanque para la separación de gas-líquido, se obtuvo un KOD con diámetro 2.5 metros y longitud de tangente – tangente de 6 metros, de tal forma que puedan separarse partículas con diámetros entre 300 y 600 μm , recomendadas por la normativa API 521. De igual manera cumple con la capacidad volumétrica propuesta.
- Acorde con la normativa ASME VIII División 2, 2013, Parte 4, se optimizaron los espesores, dando como resultado de 19.05 mm para la carcasa del cuerpo cilíndrico, y para los cabezales hemisféricos el espesor nominal fue de 12.7mm, sin embargo, se consideró como espesor gobernante de 11.43 mm, por efectos del conformado de las tapas.
- De igual modo los esfuerzos sometidos en los límites de refuerzo de las bocas fueron satisfactorias, en otras palabras, los esfuerzos por la unión de las bocas con el tanque no alcanzaron los esfuerzos admisibles para el material base.
- Con respecto a las cargas transmitidas por viento y sismo con forme a la norma ACSE 7.-10, produjeron esfuerzos longitudinales, cortante y circunferencial, inferiores al admisible.
- Al revisar estructuralmente la silleta por peso propio y reacciones de cargas laterales, no se identificaron fallas. Además, los elementos de izaje analizados según Duerr D., la norma BTH-1, y soldaduras según AWS D1.1, supera los límites establecidos según norma.
- De lo antes expuesto, se elaboraron planos constructivos y un presupuesto referencial de \$103.000.

- Cabe mencionar que el peso total del tanque es inferior en un 10 al 16%, comparado con el ASME VIII División 1.
- Los precios de materiales, soldadura y rolado, representan el 52% del presupuesto; Lo que una reducción de peso representará en un ahorro en el presupuesto final entre del 10% al 13%.
- Se garantiza que la integridad del diseño del recipiente KOD bajo las normativas aplicables es aceptable.

4.2 Recomendaciones

- Utilizar materiales certificados que cumplan con los requerimientos del ASME Sección II, disminuyen la probabilidad de fallas en recipientes a presión y por ende en el tanque KOD.
- Los requerimientos de fabricación, inspección, pruebas de ensayos no destructivos y tratamientos térmicos son acordes a los materiales a utilizar en el recipiente.
- Para conocer el espesor final después del conformado de los cabezales, se debe solicitar la medida a los proveedores o a su vez se puede realizar tomar el menor valor de una muestra de mediciones por ultrasonido.
- Para calcular los esfuerzos aplicadas en bocas o aperturas, debido a cargas externas, utilizar el boletín 537 del Consejo de Investigación de la Soldadura (con sus siglas en ingles WRC) – WRC 537.
- En el izaje del equipo KOD se deberá especificar el ángulo mínimo de posición de eslingas a los operadores o responsable técnico. Adicional, se deberá revisar el peso total del recipiente y evaluarlo con la tabla de cargas de la grúa.
- Se podrá utilizar esta tesis como guía para realizar un software libre para el diseño de recipientes bajo el código ASME VIII División 2.
- Se podrá utilizar esta tesis como comparativa de diseño con los métodos de análisis finito.

- Utilizar proceso de soldadura con arco sumergido (con su acrónimo en inglés SAW), ya que es un proceso con velocidades de avance más rápidas.
- Incentivar en la industria ecuatoriana la fabricación de tanques con estampe U2.

BIBLIOGRAFÍA

- API 2510. (2001). *Design and Construction of LPG Installations* (Eighth ed.).
- API 521. (2014). *Pressure-relieving and Depressuring Systems* (Sixth ed.).
- ASCE 7. (2010). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures ASCE/SEI 7-10*.
Reston, VA.
- ASM. (2002). *ASM Handbook - Failure Analysis and Prevention* (Vol. 11).
- ASME BTH-1. (2014). *Design of Below-the-Hook Lifting Devices*.
- ASME II. (2013). *Materials, Part D, Properties (Metric)*.
- ASME IX. (2013). *Welding, Brazing, and Fusing Qualifications*.
- ASME VIII División 2. (2013). *Rules for Construction of Pressure Vessel*.
- Austrogas. (s.f.). Hoja de datos de seguridad. *Gas licuado de petróleo*. Cuenca, Ecuador.
- AWS D1.1. (2015). *Structural Welding - Code Steel*.
- Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (Octava ed.).
MacGraw-Hill.
- Chen, D., & You, F. (14 de Enero de 2014). *Pressure Vessel*. Obtenido de
https://processdesign.mccormick.northwestern.edu/index.php/Pressure_Vessels
- Decreto Ejecutivo 1215. (2001, Febrero 13). *Instructivo para la Calificación y Registro de Consultores ambientales hidrocarbúfero*. Ecuadir.
- Delaforce, R. (2011, Marzo 24). Comparison of pressure vessel codes. *Why do the codes differ and How do they differ*.
- Duerr, D. (2006). "Pinned Connection Strength and Behavior". *Journal of Structural Engineering ASCE*, (págs. 182-194).
- Escoe, A. K. (1986). *Mechanical Design of Process Systems - Piping and Pressure Vessel* (Second ed., Vol. I). Houston, Texas: Gulf Publishing Company.
- Escoe, H. (2008). *Pressure vessel and stacks field repair manual*. Elsevier.

INDURA S.A. (2007, Marzo). Manual de Sistemas y Materiales de Soldadura. Ograma.

INEN 675. (1982). *Gas Licuado de Petróleo - Requisitos*.

Jimenez, F. (s.f.). La Seguridad en la distribución y manipulación del G.L.P. Repsol-YPF.

Megvesy, E. F. (2008). *Pressure Vessel Handbook* (14th ed.). Pressure Vessel Handbook Pub.

Mofrad, S. R. (3 de Enero de 2014). *Chemwork*. Obtenido de http://chemwork.org/PDF/board/API-521%20Flare%20KOD%20Design%20and%20Even%20More%20_Part%201.pdf

Mohit. (21 de Julio de 2016). *Marine Technology*. Obtenido de Marine in Sight: <http://www.marineinsight.com/tech/what-is-boiling-liquid-expanding-vapour-explosion-bleve-on-gas-carrier-ships/>

Moss, D. R., & Basic, M. (2013). *Pressure Vessel Design Manual* (Fourth ed.). Elsevier.

NBBI. (12 de Octubre de 2016). *Manufacturer and Repair Directory*. Obtenido de <http://www.nationalboard.org/ManufacturerDirectory.aspx>

NFPA 58. (2014). *Liquefied Petroleum Gas Code*.

NFPA 704. (2012). *Standard System for the Identification of the Hazards of Materials for Emergency Response*.

Osage, D. A. (26 de Junio de 2007). An Overview of the New ASME Section VIII, Division 2 Pressure Vessel Code. San Francisco.

PEMEX. (s.f.). Hoja de datos de seguridad para sustancias químicas. *Gas Licuado de Petróleo*.

Petroblogger.com. (2 de Diciembre de 2012). Obtenido de Blog sobre la industria del petróleo: <http://www.ingenieriadepetroleo.com/bleve-explosion-definicion.html>

Roberge, P. R. (2000). *Handbook of Corrosion Engineering*. MacGraw Hill.

SHELL. (2007). DEP 31.22.05.11-Gen. *Gas/Liquid Separators - Type Selection and Design Rules*. Shell Global Solutions International B.V.

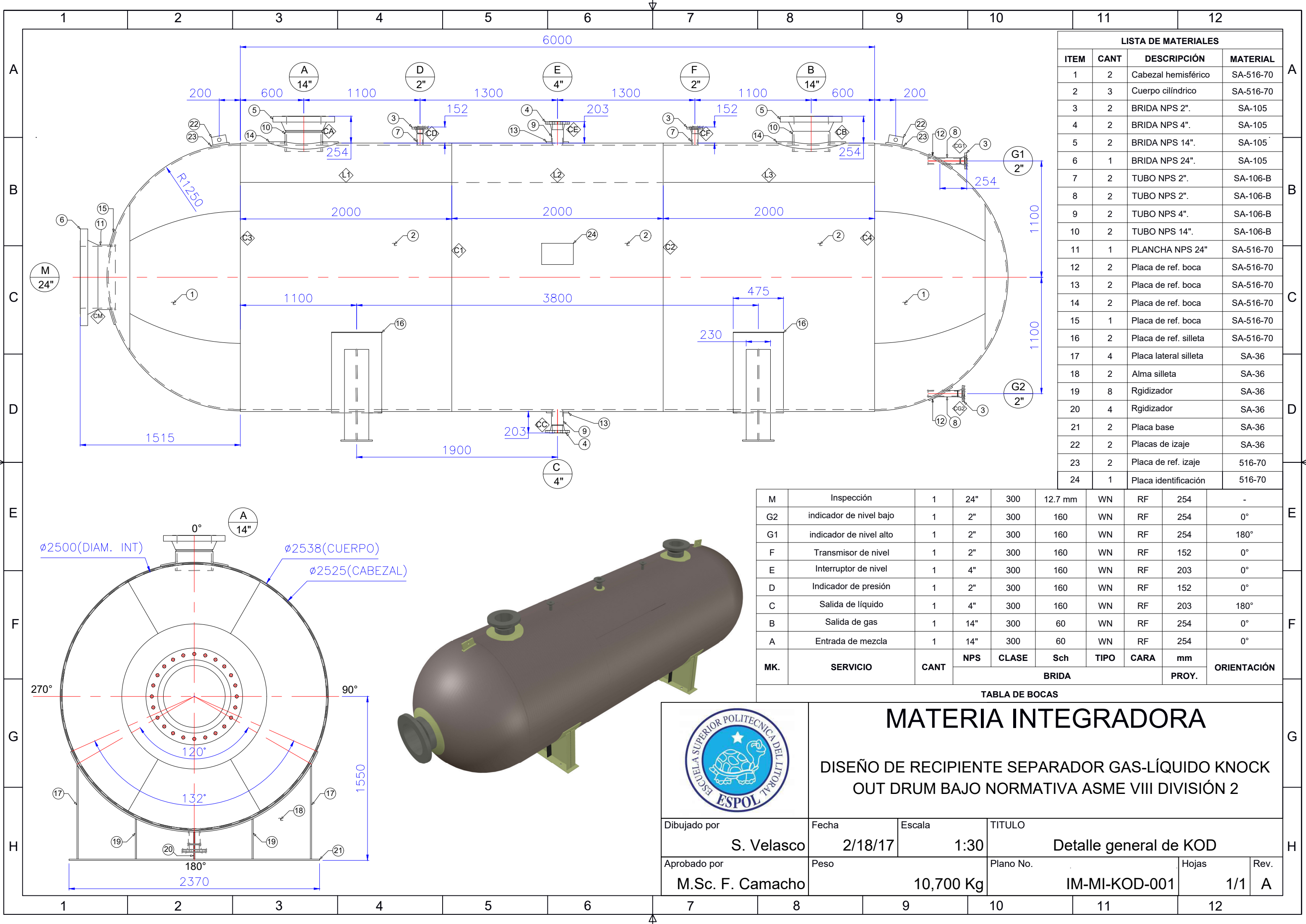
SHELL. (2009). DEP 80.45.10.10-Gen. *Design of Pressure Relief, Flare and Vent Systems*. Shell Global Solutions International B.V.

Towler, G., & Sinnott, R. (2008). *Chemical Engineering Design*. Elsevier.

Werner Sölken. (s.f.). *Non Destructive Testing - Pressure Testing*. Obtenido de http://www.wermac.org/others/ndt_pressure_testing.html

Zick, L. P. (1951). Stresses in large horizontal cylindrical pressure vessels on two saddle supports. *The Welding Journal Research Supplement*, IX, 435-44.

PLANOS



LISTA DE MATERIALES			
ITEM	CANT	DESCRIPCIÓN	MATERIAL
1	2	Cabezal hemisférico	SA-516-70
2	3	Cuerpo cilíndrico	SA-516-70
3	2	BRIDA NPS 2".	SA-105
4	2	BRIDA NPS 4".	SA-105
5	2	BRIDA NPS 14".	SA-105
6	1	BRIDA NPS 24".	SA-105
7	2	TUBO NPS 2".	SA-106-B
8	2	TUBO NPS 2".	SA-106-B
9	2	TUBO NPS 4".	SA-106-B
10	2	TUBO NPS 14".	SA-106-B
11	1	PLANCHA NPS 24"	SA-516-70
12	2	Placa de ref. boca	SA-516-70
13	2	Placa de ref. boca	SA-516-70
14	2	Placa de ref. boca	SA-516-70
15	1	Placa de ref. boca	SA-516-70
16	2	Placa de ref. silleta	SA-516-70
17	4	Placa lateral silleta	SA-36
18	2	Alma silleta	SA-36
19	8	Rgidizador	SA-36
20	4	Rgidizador	SA-36
21	2	Placa base	SA-36
22	2	Placas de izaje	SA-36
23	2	Placa de ref. izaje	516-70
24	1	Placa identificación	516-70

M	Inspección	1	24"	300	12.7 mm	WN	RF	254	-
G2	indicador de nivel bajo	1	2"	300	160	WN	RF	254	0°
G1	indicador de nivel alto	1	2"	300	160	WN	RF	254	180°
F	Transmisor de nivel	1	2"	300	160	WN	RF	152	0°
E	Interruptor de nivel	1	4"	300	160	WN	RF	203	0°
D	Indicador de presión	1	2"	300	160	WN	RF	152	0°
C	Salida de líquido	1	4"	300	160	WN	RF	203	180°
B	Salida de gas	1	14"	300	60	WN	RF	254	0°
A	Entrada de mezcla	1	14"	300	60	WN	RF	254	0°
MK.	SERVICIO	CANT	NPS	CLASE	Sch	TIPO	CARA	BRIDA	
								PROY.	ORIENTACIÓN

TABLA DE BOCAS



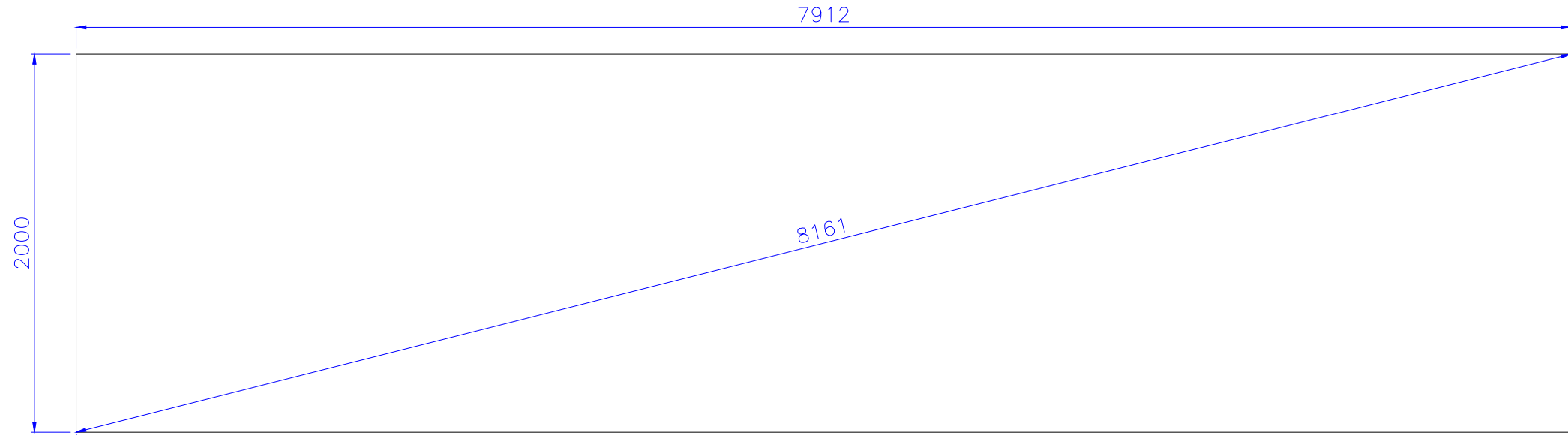
MATERIA INTEGRADORA

DISEÑO DE RECIPIENTE SEPARADOR GAS-LÍQUIDO KNOCK OUT DRUM BAJO NORMATIVA ASME VIII DIVISIÓN 2

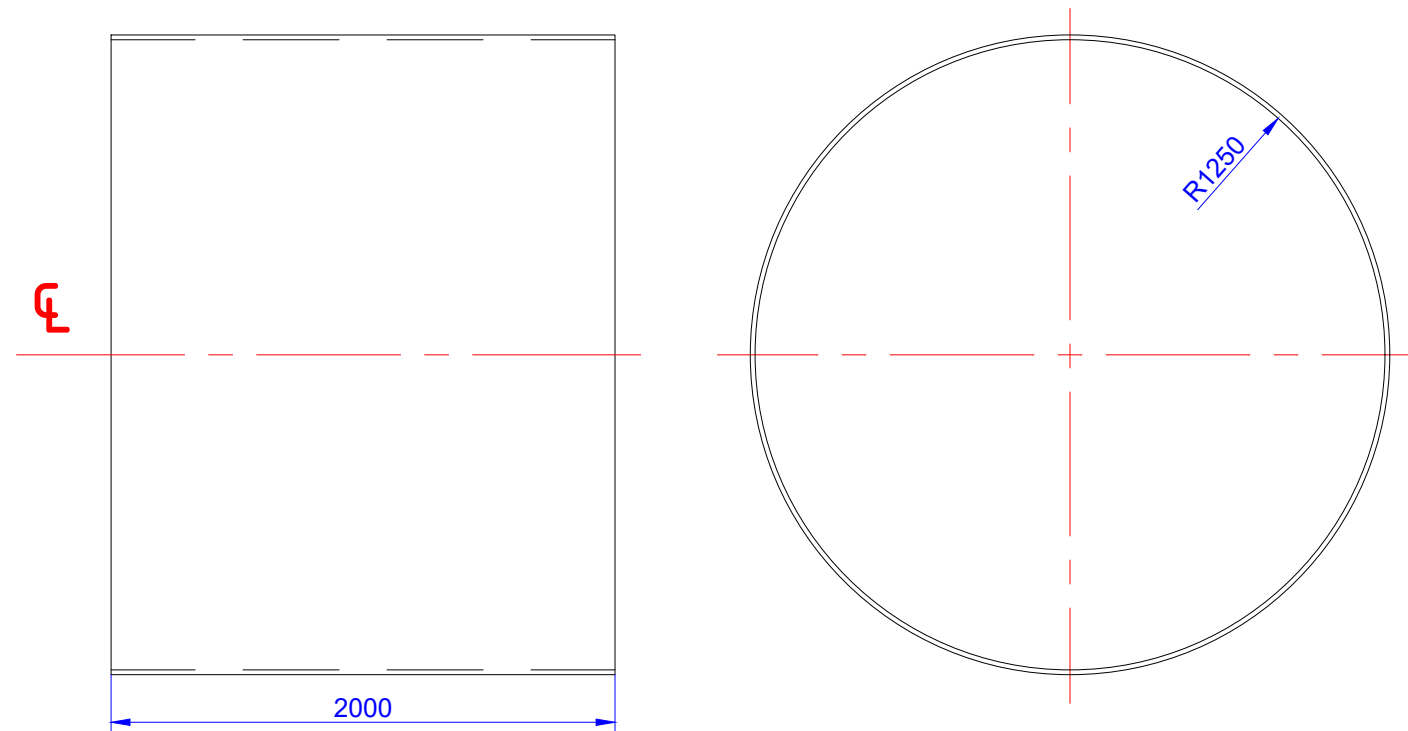
Dibujado por	Fecha	Escala	TITULO
S. Velasco	2/18/17	1:30	Detalle general de KOD
Aprobado por	Peso	Plano No.	Hojas
M.Sc. F. Camacho	10,700 Kg	IM-MI-KOD-001	1/1
			Rev. A

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

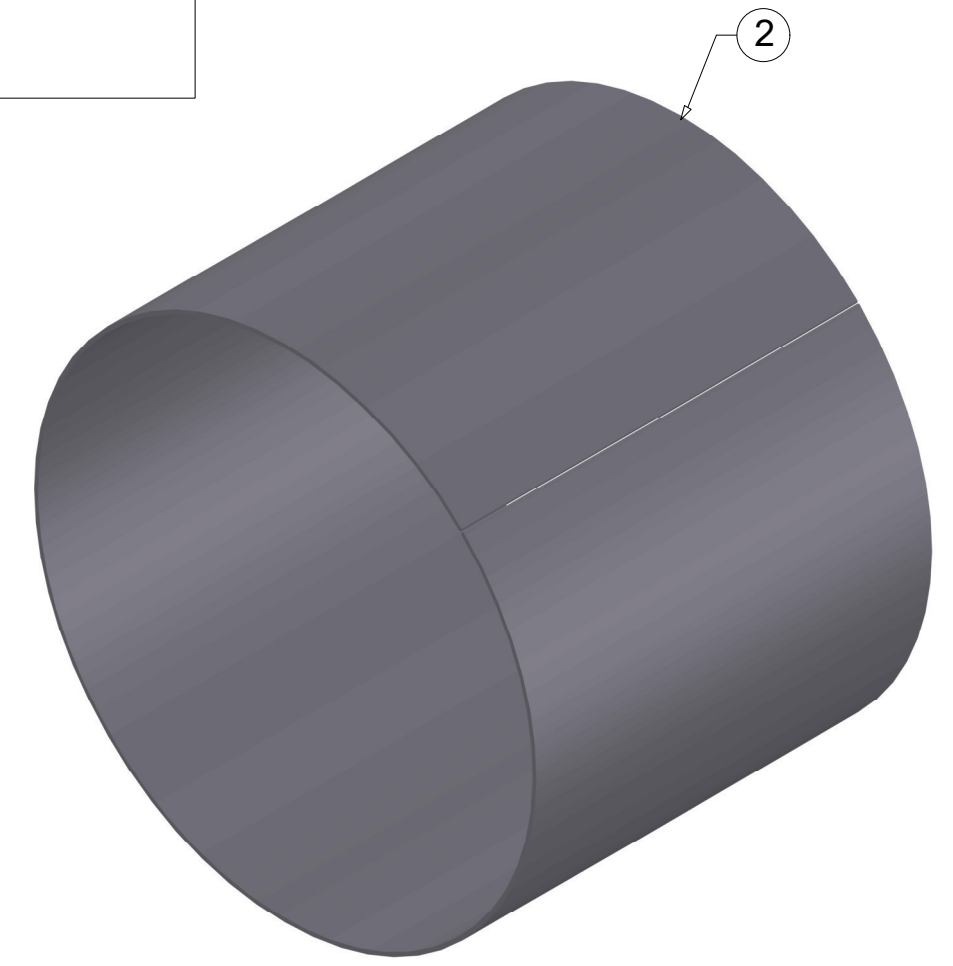
A
B
C
D
E
F
G
H




CORTE DE PLANCHA DE CUERPO t:19.05 mm
 Cantidad: 3 unidades
 Material: SA-516-70



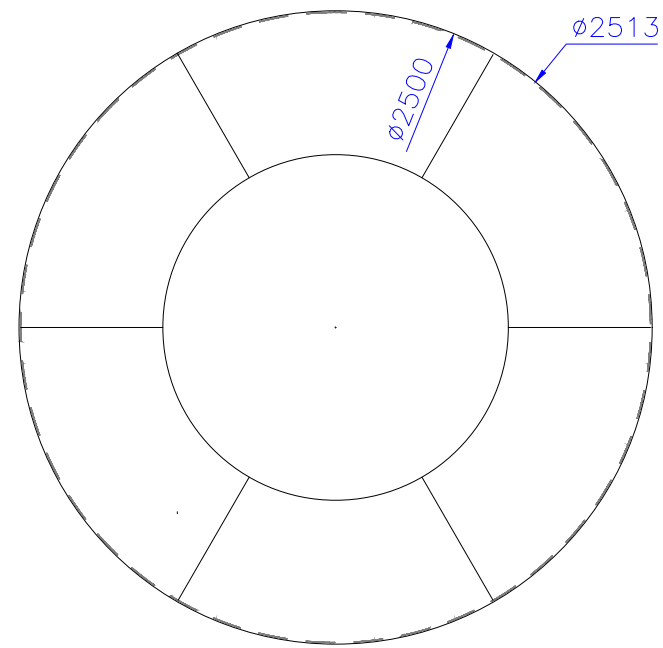
ROLADO DE CUERPO



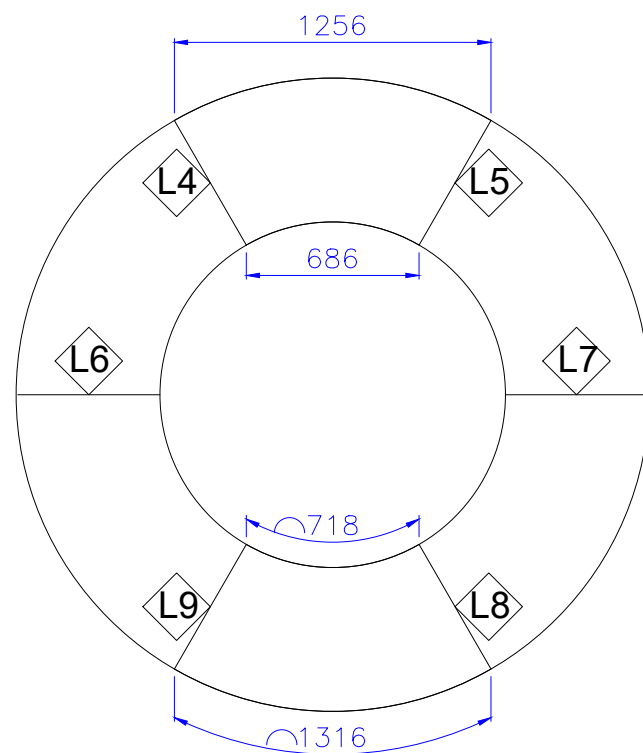
ISOMÉTRICO

		MATERIA INTEGRADORA			
		DISEÑO DE RECIPIENTE SEPARADOR GAS-LÍQUIDO KNOCK OUT DRUM BAJO NORMATIVA ASME VIII DIVISIÓN 2			
Dibujado por	Fecha	Escala	TITULO		
S. Velasco	2/18/17	1:30	Desarrollo plancha de cuerpo cilíndrico		
Aprobado por	Peso	Plano No.	Hojas	Rev.	
M.Sc. F. Camacho	8,700 Kg	IM-MI-KOD-002	1/1	A	

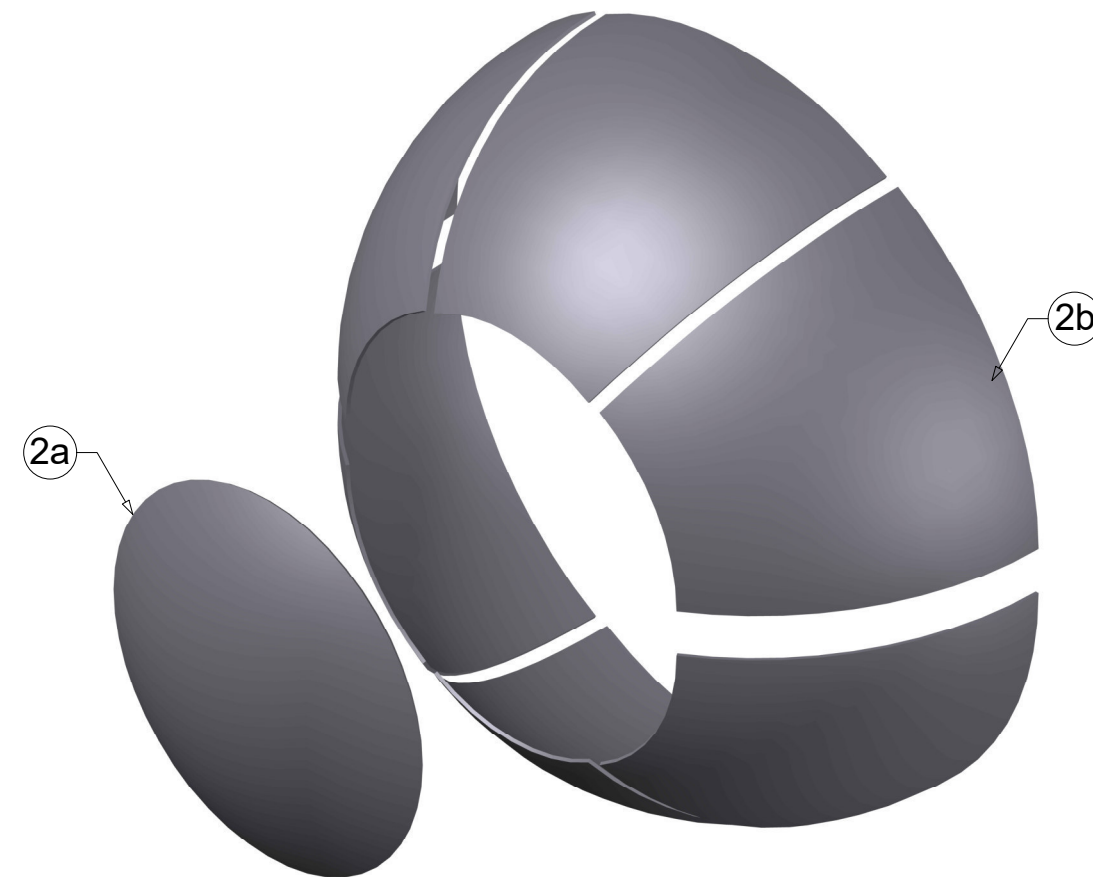
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12



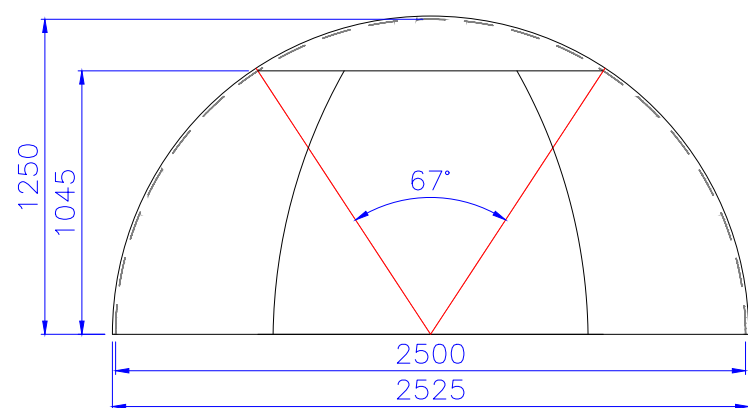
VISTA SUPERIOR
CABEZAL HEMISFÉRICO



JUNTAS DE SOLDADURA
CABEZAL HEMISFÉRICO



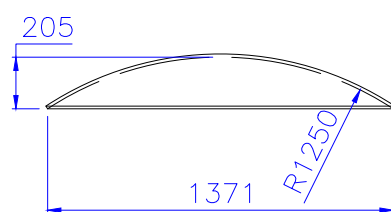
ISOMÉTRICO



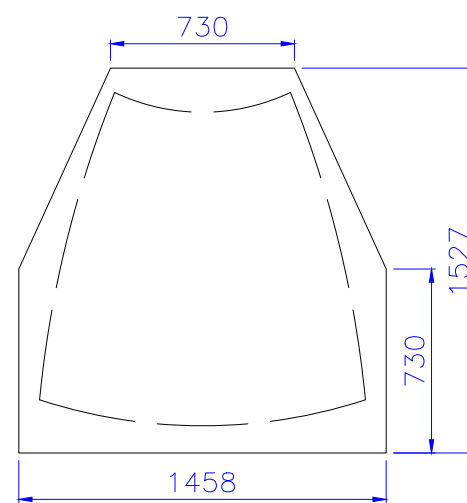
VISTA FRONTAL
CABEZAL HEMISFÉRICO

Cantidad: 2 unidades
Material: SA-516-70

Espesor mínimo despues de conformado 11.43 mm



ITEM 2a
TAPA BOMBEADA
Cantidad: 2 unidades



ITEM 2b
DESARROLLO DE PÉTALOS
Cantidad: 12 unidades



MATERIA INTEGRADORA

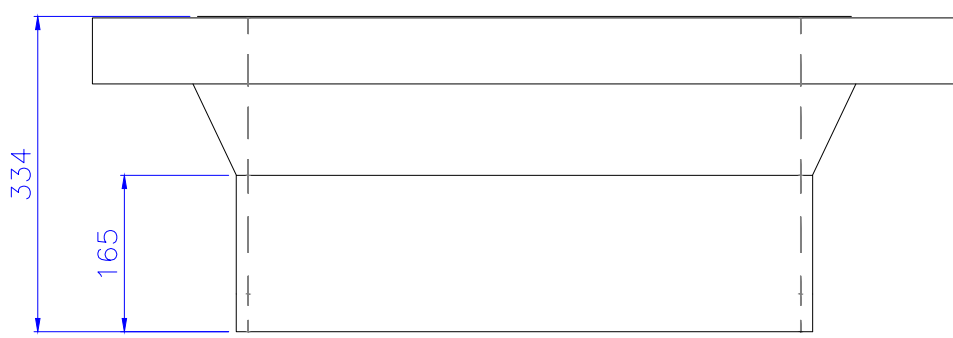
DISEÑO DE RECIPIENTE SEPARADOR GAS-LÍQUIDO KNOCK
OUT DRUM BAJO NORMATIVA ASME VIII DIVISIÓN 2

Dibujado por S. Velasco	Fecha 2/18/17	Escala 1:30	TITULO Desarrollo de cabezal hemisférico	
Aprobado por M.Sc. F. Camacho	Peso 640 Kg	Plano No. IM-MI-KOD-003	Hojas 1/1	Rev. A

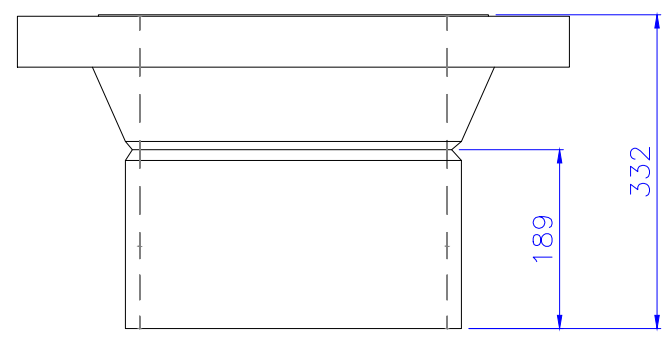
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

A
B
C
D
E
F
G
H

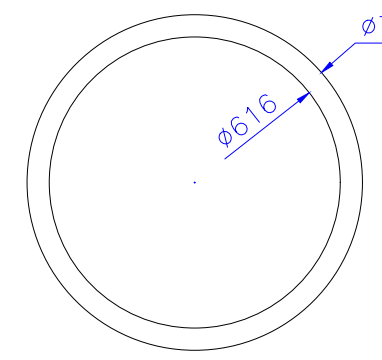
A
B
C
D
E
F
G
H



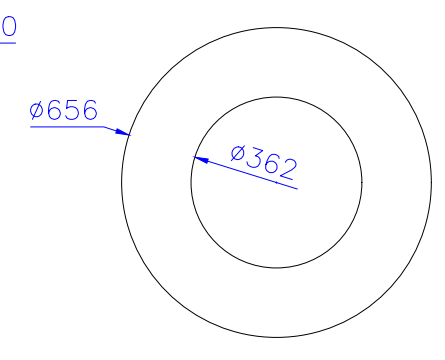
**BOCA NPS 24"
(M)**
Cantidad: 1 unidad



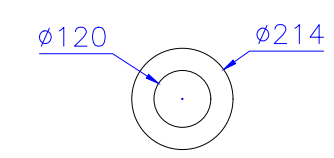
**BOCA NPS 14"
(A)(B)**
Cantidad: 2 unidades



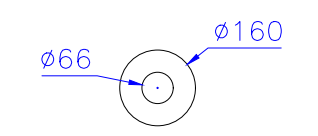
**ITEM 15
REFUERZO NPS 24"
BOCA (M)**
t: 12.7 mm
Cantidad: 1 unidad



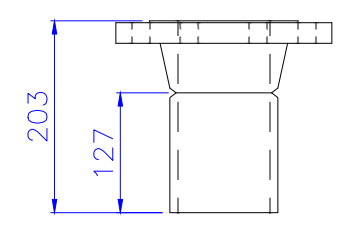
**ITEM 14
REFUERZO NPS 14"
BOCAS (A)(B)**
t: 12.7 mm
Cantidad: 2 unidad



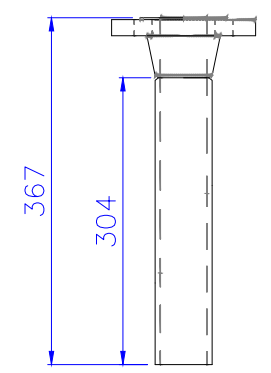
**ITEM 13
REFUERZO NPS 4"
BOCAS (C)(E)**
t: 12.7 mm
Cantidad: 2 unidad



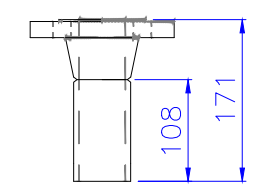
**ITEM 12
REFUERZO NPS 2"
BOCA (G1)(G2)**
t: 12.7 mm
Cantidad: 1 unidad



**BOCA NPS 4"
(C)(E)**
Cantidad: 2 unidades



**BOCA NPS 2"
(G1)(G2)**
Cantidad: 2 unidades



**BOCA NPS 2"
(D)(F)**
Cantidad: 2 unidades

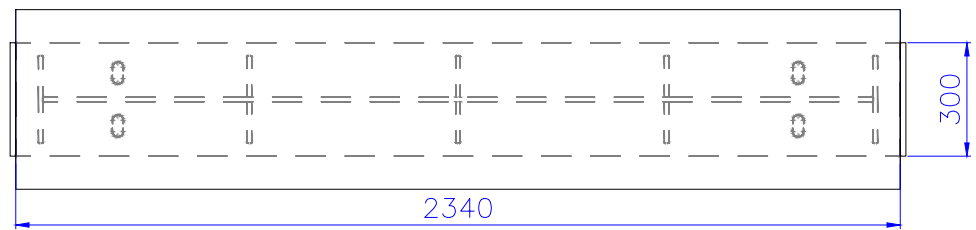


MATERIA INTEGRADORA

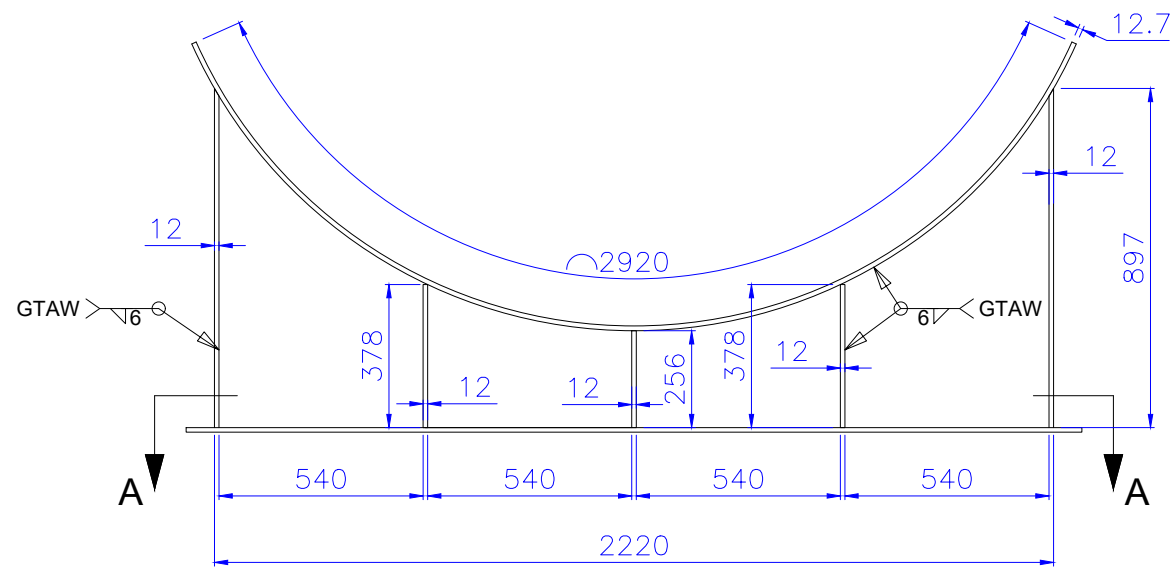
**DISEÑO DE RECIPIENTE SEPARADOR GAS-LÍQUIDO KNOCK
OUT DRUM BAJO NORMATIVA ASME VIII DIVISIÓN 2**

Dibujado por S. Velasco	Fecha 2/18/17	Escala S/E	TITULO Despiece de bocas		
Aprobado por M.Sc. F. Camacho	Peso 1,180 Kg	Plano No. IM-MI-KOD-004	Hojas 1/1	Rev. A	

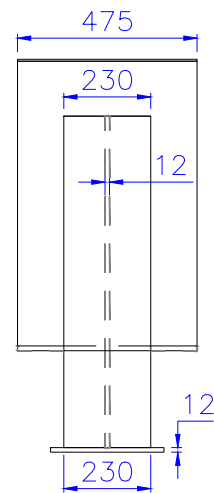
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12



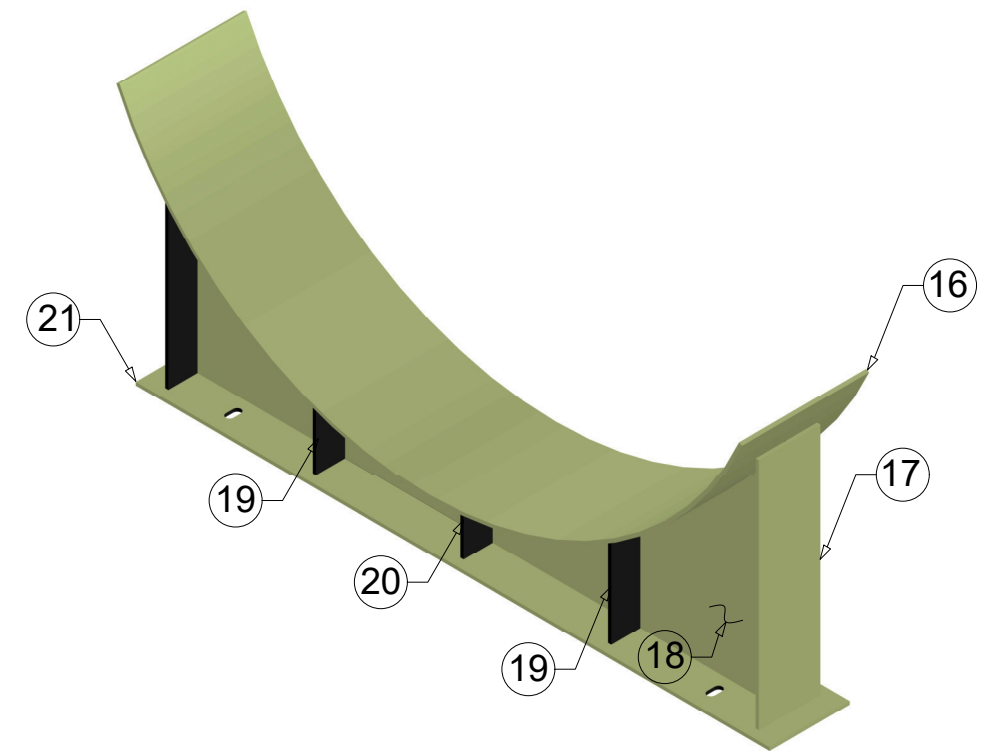
VISTA SUPERIOR
SILLETA



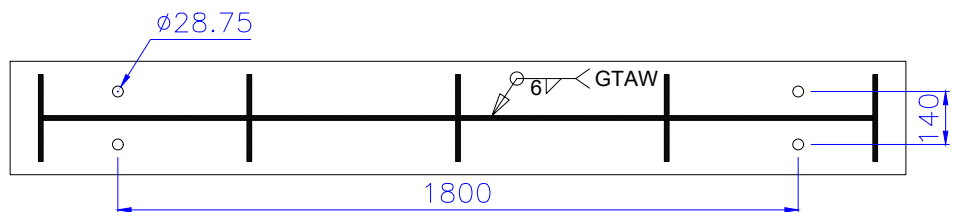
VISTA FRONTAL SILLETA
Cantidad: 2 unidades



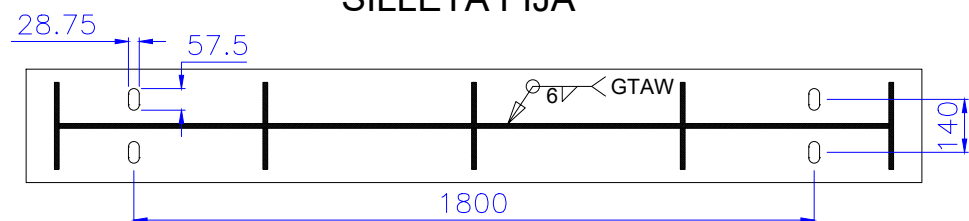
VISTA LATERAL



ISOMÉTRICO

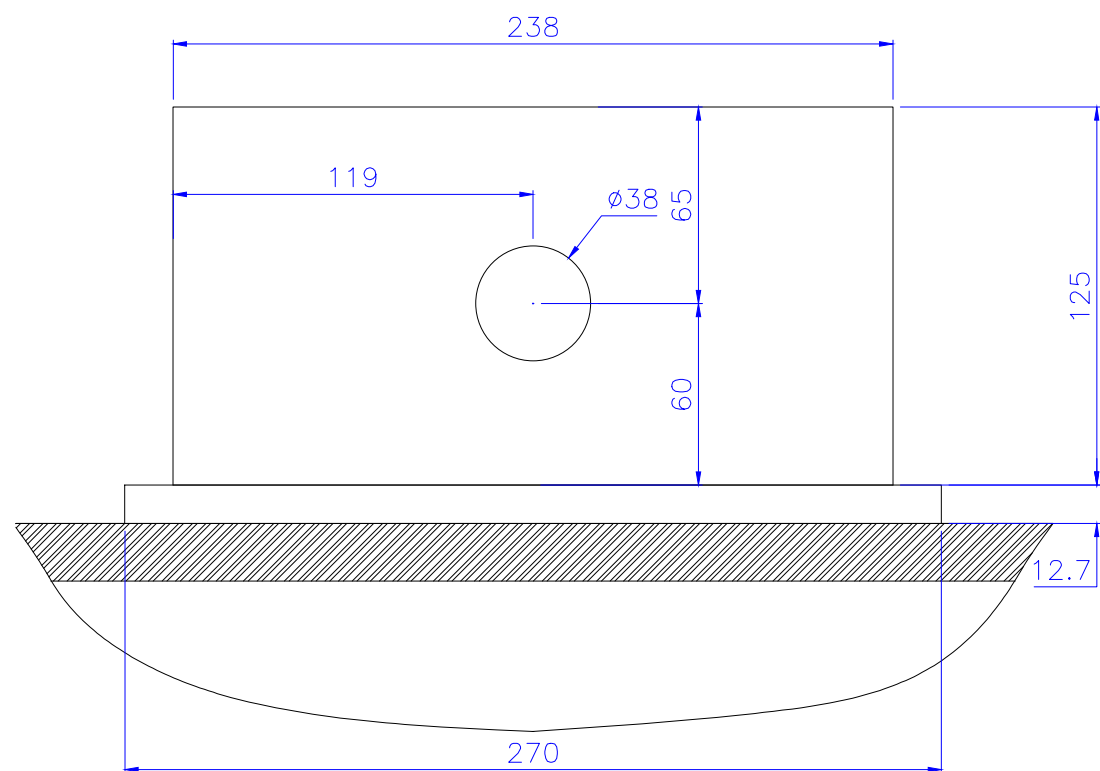


SECCIÓN A-A
SILLETA FIJA

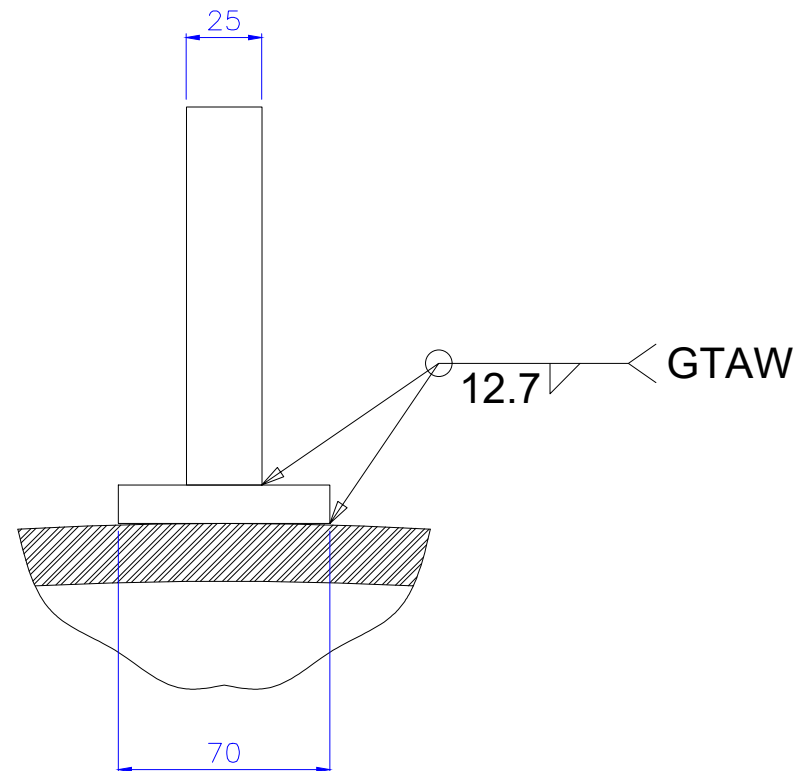


SECCIÓN A-A
SILLETA DESLIZANTE

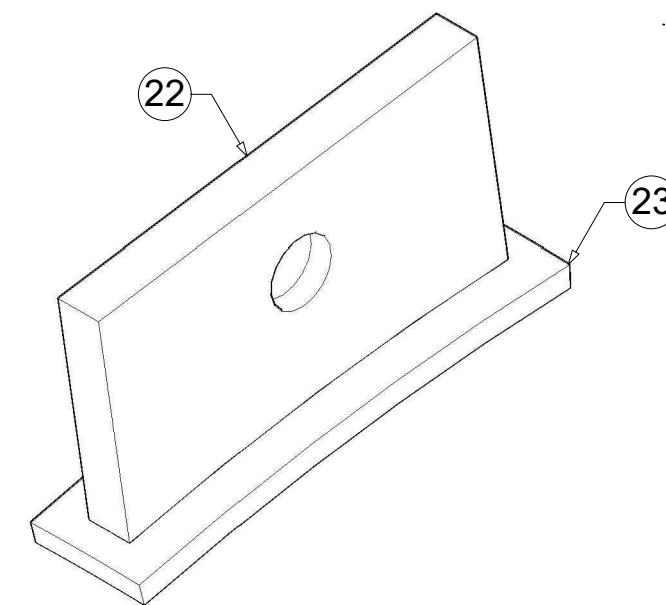
		MATERIA INTEGRADORA			
		DISEÑO DE RECIPIENTE SEPARADOR GAS-LÍQUIDO KNOCK OUT DRUM BAJO NORMATIVA ASME VIII DIVISIÓN 2			
Dibujado por	Fecha	Escala	TÍTULO		
S. Velasco	2/18/17	1:20	Detalle de silletas		
Aprobado por	Peso	Plano No.	Hojas	Rev.	
M.Sc. F. Camacho	360 Kg/unid.	IM-MI-KOD-005	1/1	A	



VISTA FRONTAL ELEMENTO DE IZAJE
Cantidad: 2 unidades

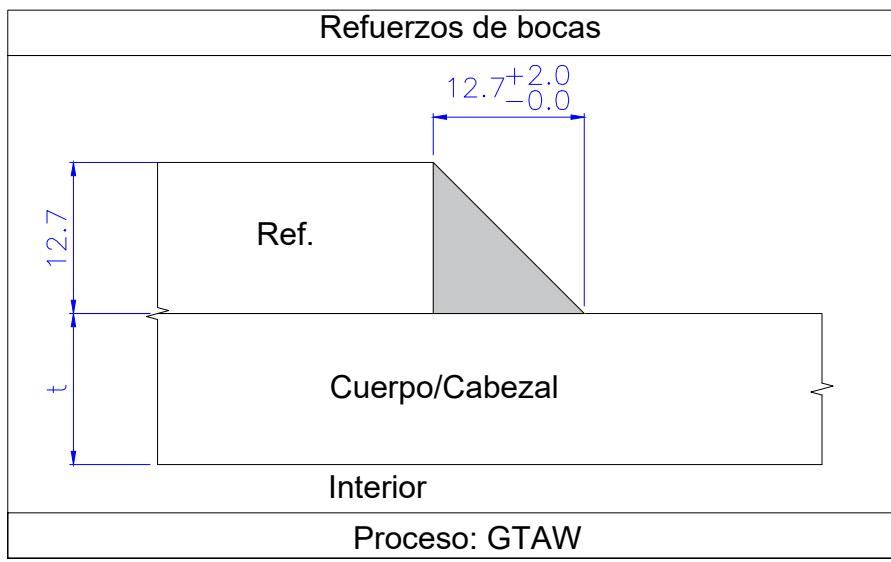
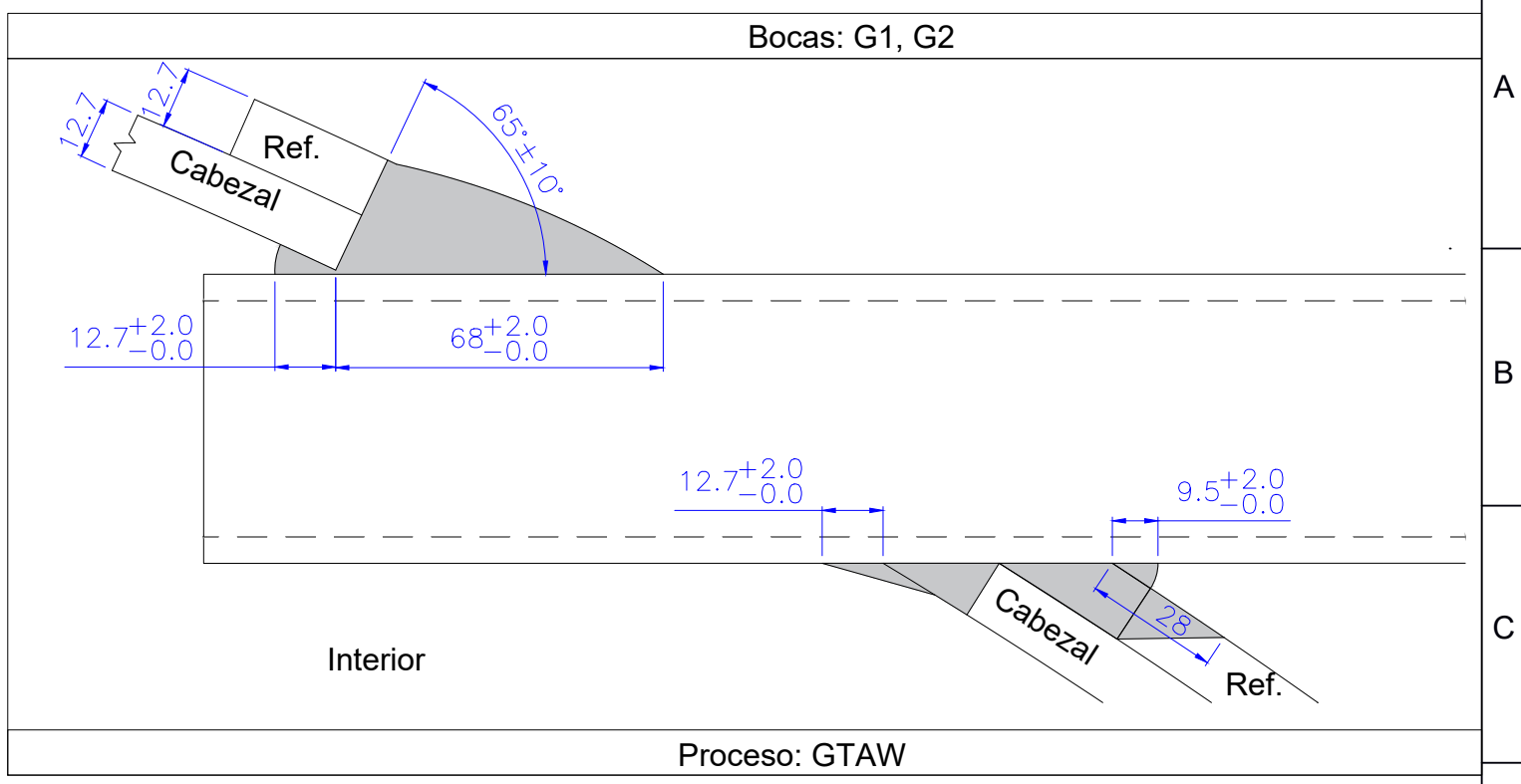
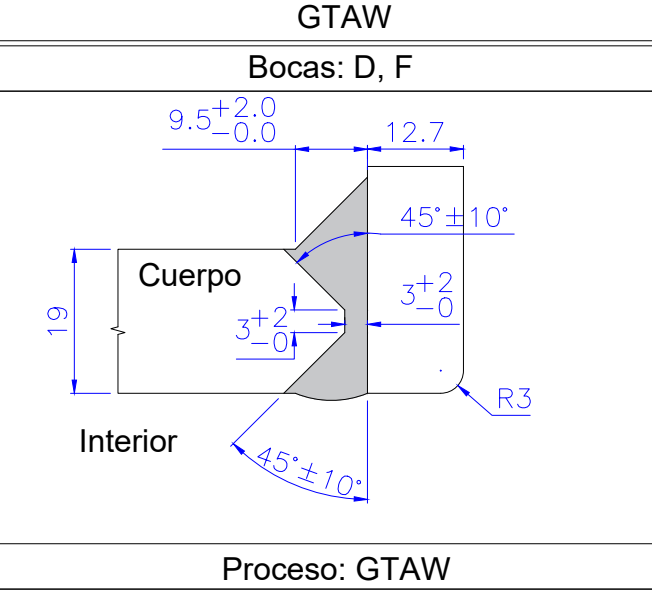
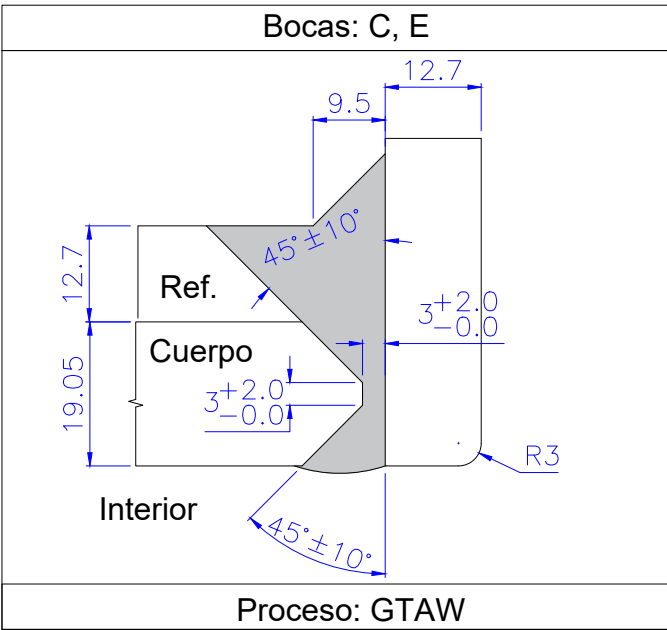
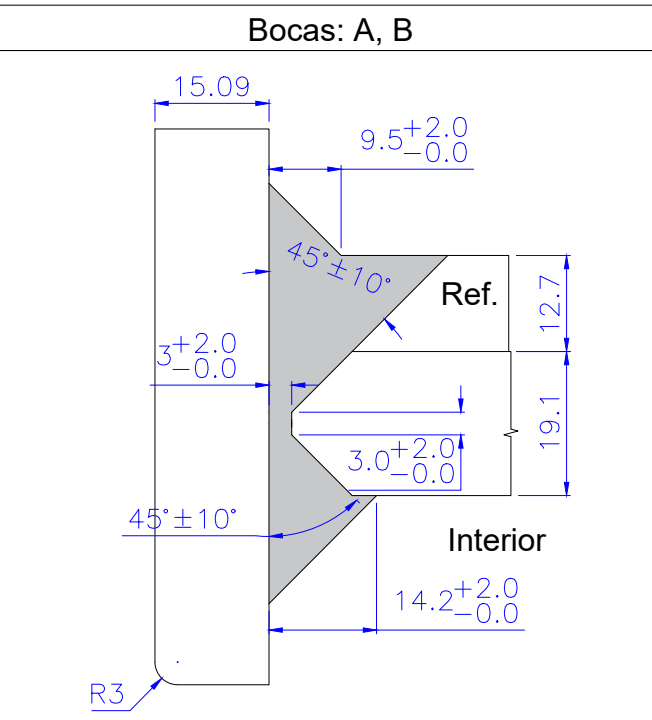
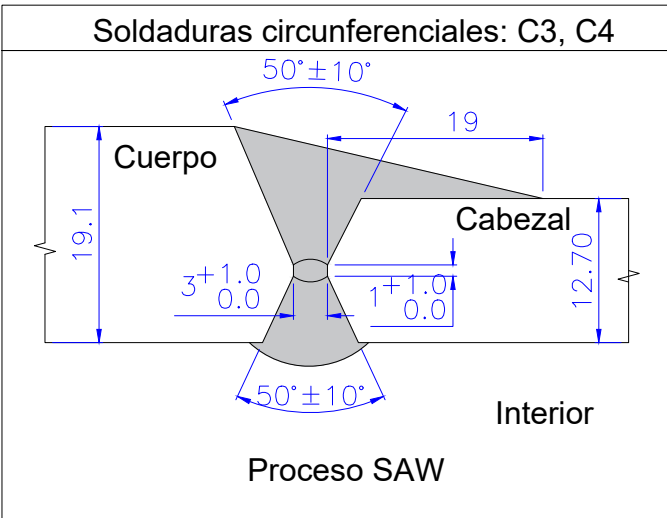
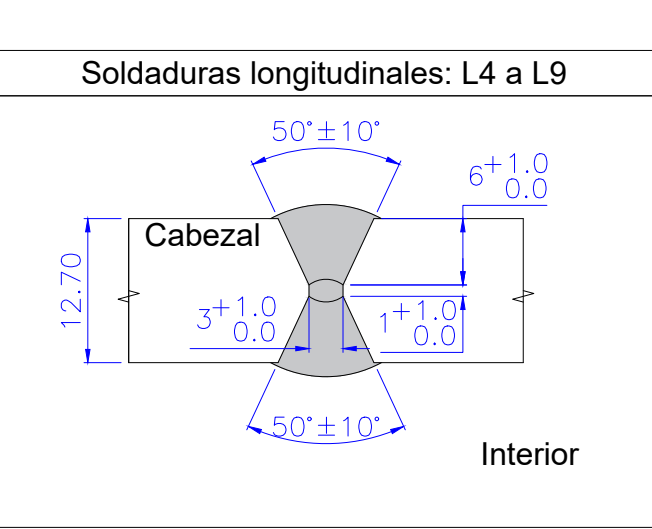
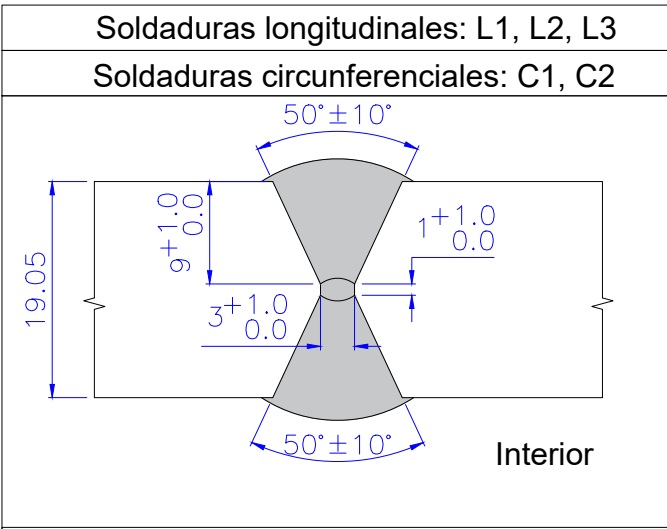


VISTA LATERAL



ISOMÉTRICO

	MATERIA INTEGRADORA			
	DISEÑO DE RECIPIENTE SEPARADOR GAS-LÍQUIDO KNOCK OUT DRUM BAJO NORMATIVA ASME VIII DIVISIÓN 2			
Dibujado por S. Velasco	Fecha 2/18/17	Escala S/E	TITULO Detalle de elementos de izaje	
Aprobado por M.Sc. F. Camacho	Peso 7 Kg/unid.	Plano No. IM-MI-KOD-006	Hojas 1/1	Rev. A



MATERIA INTEGRADORA

DISEÑO DE RECIPIENTE SEPARADOR GAS-LÍQUIDO KNOCK OUT DRUM BAJO NORMATIVA ASME VIII DIVISIÓN 2

Dibujado por	Fecha	Escala	TITULO
S. Velasco	2/18/17	S/E	Detalle de soldadura
Aprobado por	Peso	Plano No.	Hojas
M.Sc. F. Camacho	-	IM-MI-KOD-007	1/1
			Rev. A

APÉNDICES

APÉNDICE A

Este apéndice pretende informar la presión de diseño de acuerdo a la normativa (NFPA 58, 2014) según el párrafo 5.2.4.3 (B).

Para una presión máxima de vapor igual a 1.447 MPa (200 psi), en la figura A-1 se selecciona la presión de diseño

Presión de vapor máxima en psig (MPag)		Máxima presión de trabajo permitida en psig (MPag)					
		Código ASME actual ^a		Códigos anteriores			
A 100°F	A 37,8°C			API-ASME		ASME ^b	
80	0,6	100	(0,7)	100	(0,7)	80	(0,6)
100	0,7	125	(0,9)	125	(0,9)	100	(0,7)
125	0,9	156	(1,1)	156	(1,1)	125	(0,9)
150	1,0	187	(1,3)	187	(1,3)	150	(1,0)
175	1,2	219	(1,5)	219	(1,5)	175	(1,2)
215	1,5	250	(1,7) ^c	250	(1,7) ^c	200	(1,4)
215	1,5	312	(2,0) ^c	312	(2,2) ^c	--	--

Nota: Ver el Anexo D para información sobre códigos ASME o API-ASME anteriores.
a Código ASME, edición 1949, Párrafos U-200 y U-201 y todas las ediciones posteriores. (Ver D.2.1.5).
b Todos los códigos ASME hasta la edición 1946 y párrafos U-68 de la edición 1949. (Ver D.2.1.5).
c Ver 6.21.3.1(A), 6.21.3.1(C) y 6.21.3.1(D) para la presión de diseño mínima requerida para los recipientes ASME para combustible de motores y móviles.

Figura A-1. Selección de presión de diseño

Fuente: NFPA 58, 2014, pág. 15

APÉNDICE B

Este apéndice proveerá los valores de esfuerzo máximo para los materiales ferrosos utilizados en el presente trabajo. Se permite la interpolación.

Line No.	Nominal Composition	Product Form	Spec. No.	Type/Grade	Alloy Desig./UNS No.	Class/Condition/Temper	Size/Thickness, mm	P-No.	Group No.
(13) 39	Carbon steel	Plate	SA/EN 10028-2	P355GH	...	...	150 < t ≤ 250	1	2
(13) 40	Carbon steel	Plate	SA/EN 10028-2	P355GH	...	...	100 < t ≤ 150	1	2
41	Carbon steel	Bar, shapes	SA-675	70	...	...	...	1	1
42	Carbon steel	Forgings	SA-105	...	K03504	...	...	1	2
43	Carbon steel	Forgings	SA-181	...	K03502	70	...	1	2
44	Carbon steel	Castings	SA-216	WCB	J03002	...	...	1	2

Line No.	Min. Tensile Strength, MPa	Min. Yield Strength, MPa	Maximum Use Temperature, °C	External Pressure Chart No.	Notes
39	470	280	538	CS-2	G13, T2
40	480	295	538	CS-2	G13, T2
41	485	240	538	CS-2	G13, T3
42	485	250	538	CS-2	G13, T3
43	485	250	538	CS-2	G13, T3
44	485	250	538	CS-2	G13, T3

Maximum Allowable Stress, MPa (Multiply by 1000 to Obtain kPa), for Metal Temperature, °C, Not Exceeding

Line No.	-30																	
	40	65	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475
39	187	175	170	167	165	163	160	157	154	150	146	141	137	123	101	83.8	66.8	50.3
40	197	184	179	176	174	171	169	166	162	158	154	149	144	123	101	83.3	66.8	50.3
41	161	151	147	144	142	140	138	135	132	129	126	122	118	115	101	83.8	66.8	50.3
42	165	156	151	148	146	144	142	139	136	133	129	125	122	118	101	83.8	66.8	50.3
43	165	156	151	148	146	144	142	139	136	133	129	125	122	118	101	83.8	66.8	50.3
44	165	156	151	148	146	144	142	139	136	133	129	125	122	118	101	83.8	66.8	50.3

Figura B-1. Esfuerzo máximo permisible, para SA-105

Fuente: (ASME II, 2013, págs. 394-396)

Line No.	Nominal Composition	Product Form	Spec. No.	Type/Grade	Alloy Desig./UNS No.	Class/Condition/Temp	Size/Thickness, mm	P-No.	Group No.
24	Carbon steel	Smls. pipe	SA-106	B	K03006	..	..	1	1
25	Carbon steel	Fittings	SA-234	WPB	K03006	..	..	1	1
26	Carbon steel	Smls. pipe	SA-333	6	K03006	..	..	1	1
27	Carbon steel	Forgings	SA-372	A	K03002	..	..	1	1
28	Carbon steel	Fittings	SA-420	WPL6	..	..	..	1	1
29	Carbon steel	Smls. pipe	SA-524	I	K02104	..	..	1	1

Line No.	Min. Tensile Strength, MPa	Min. Yield Strength, MPa	Maximum Use Temperature, °C	External Pressure Chart No.	Notes
24	415	240	371	CS-2	G13
25	415	240	538	CS-2	G13, T2
26	415	240	538	CS-2	G13, T2
27	415	240	343	CS-2	G9, H5
28	415	240	454	CS-2	G13, T2
29	414	240	538	CS-2	G13, T2

Maximum Allowable Stress, MPa (Multiply by 1000 to Obtain kPa), for Metal Temperature, °C, Not Exceeding																		
Line No.	40	65	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475
24	161	151	147	144	142	140	138	135	132	129	126	122	118	115	..	..	..	..
25	161	151	147	144	142	140	138	135	132	129	126	122	118	115	95.1	79.5	62.6	45.0
26	161	151	147	144	142	140	138	135	132	129	126	122	118	115	95.1	79.5	62.6	45.0
27	161	154	146	139	133	127	122	118	115	112	110	109	107	..	..	..	..	..
28	161	151	147	144	142	140	138	135	132	129	126	122	118	115	95.1	79.5	62.6	45.0
29	161	151	147	144	142	140	138	135	132	129	126	122	118	115	95.1	79.5	62.6	45.0

Figura B-2. Esfuerzo máximo permisible, para SA-106-B

Fuente: (ASME II, 2013, págs. 394-396)

Line No.	Nominal Composition	Product Form	Spec. No.	Type/Grade	Alloy Desig./UNS No.	Class/Condition/Temp	Size/Thickness, mm	P-No.	Group No.
13	Carbon steel	Plate, bar, shapes	SA-36	...	K02600	...	...	1	1
14	Carbon steel	Plate	SA-662	A	K01701	...	...	1	1
15	Carbon steel	Forgings	SA-181	...	K03502	60	...	1	1
16	Carbon steel	Castings	SA-216	WCA	J02502	...	...	1	1

Line No.	Min. Tensile Strength, MPa	Min. Yield Strength, MPa	Maximum Use Temperature, °C	External Pressure Chart No.	Notes
13	400	250	371	CS-2	G13
14	400	275	371	CS-2	...
15	415	205	538	CS-2	G13, T3
16	415	205	538	CS-2	G13, T3

Maximum Allowable Stress, MPa (Multiply by 1000 to Obtain kPa), for Metal Temperature, °C, Not Exceeding

Line No.	40	65	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475
13	165	156	151	148	146	144	142	139	136	133	129	125	122	119	...	...	...	...
14	167	167	165	163	163	160	158	155	151	148	144	139	135	132	...	...	...	...
15	138	130	126	124	122	120	118	116	113	111	108	105	101	98.3	95.1	95.1	79.5	62.5
16	138	130	126	124	122	120	118	116	113	111	108	105	101	98.3	95.1	95.1	79.5	62.5

Figura B-3. Esfuerzo máximo permisible, para SA-36

Fuente: (ASME II, 2013, págs. 394-396)

Line No.	Nominal Composition	Product Form	Spec. No.	Type/Grade	Alloy Desig./UNS No.	Class/Condition/Temp	Size/Thickness, mm	P-No.	Group No.
6	Carbon steel	Forgings	SA-541	1	K03506	...	...	1	2
7	Carbon steel	Forgings	SA-541	1A	K03020	...	...	1	2
8	Carbon steel	Forgings	SA-765	II	K03047	...	...	1	2
9	Carbon steel	Plate	SA-516	70	K03101	...	...	1	2
10	Carbon steel	Plate	SA-516	70	K02700	...	...	1	2

Line No.	Min. Tensile Strength, MPa	Min. Yield Strength, MPa	Maximum Use Temperature, °C	External Pressure Chart No.	Notes
6	485	250	538	CS-2	G13, T3
7	485	250	538	CS-2	G13, T3
8	485	250	538	CS-2	G13, T3
9	485	260	538	CS-2	G13, T2
10	485	260	538	CS-2	G13, T2

Line No.	40	65	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475
6	165	156	151	148	146	144	142	139	136	133	129	125	122	118	101	83.8	66.8	50.3
7	165	156	151	148	146	144	142	139	136	133	129	125	122	118	101	83.8	66.8	50.3
8	165	156	151	148	146	144	142	139	136	133	129	125	122	118	101	83.8	66.8	50.3
9	175	164	150	157	154	152	150	147	144	140	136	132	128	122	101	83.8	66.8	50.3
10	175	164	150	157	154	152	150	147	144	140	136	132	128	122	101	83.8	66.8	50.3

Figura B-4. Esfuerzo máximo permisible, para SA-516-70

Fuente: (ASME II, 2013, págs. 398-400)

APÉNDICE C

Este apéndice proveerá el grado de ensayos no destructivos (con su acrónimo en inglés NDE), Debido a los siguientes parámetros.

- La categoría de junta. (Ver Adenda D)
- Tipo de soldadura.
- Grupo de material. (ASME VIII División 2, 2013, pág. 111)
- Grupo de inspección
- Eficiencia de junta.

Nondestructive Examination										
Examination Group					1a	1b	2a	2b	3a	3b
Permitted Materials					All Materials in Annex 3-A [Note (18)]	P-No. 1 Gr 1 & 2 P-No. 8 Gr 1	P-No. 8 Gr 2 P-No. 9A Gr 1 P-No. 9B Gr 1 P-No. 11A Gr 1 P-No. 11A Gr 2 P-No. 10H Gr 1	P-No. 1 Gr 1 & 2 P-No. 8 Gr 1	P-No. 8 Gr 2 P-No. 9A Gr 1 P-No. 9B Gr 1 P-No. 10H Gr 1	P-No. 1 Gr 1 & 2 P-No. 8 Gr 1
Weld Joint Efficiency					1.0	1.0	1.0	1.0	0.85	0.85
Joint Category	Type of Weld [Note (1)]			Type of NDE [Note (2)]	Extent of NDE [Note (10)][Note (11)][Note (12)]					
A	Full penetration butt weld	1	Longitudinal joints	RT or UT MT or PT	100% 10%	100% 10% [Note (4)]	100% 10%	100% 10% [Note (4)]	25% 10%	10% 10% [Note (4)]
B		1	Circumferential joints on a shell	RT or UT MT or PT	100% 10%	100% 10% [Note (4)]	100% 10%	100% 10% [Note (4)]	10% 10%	10% 10% [Note (3)]
B		2,3	Circumferential joints on a shell with backing strip [Note (9)]	RT or UT MT or PT	NA NA	100% 10%	NA NA	25% 10%	NA NA	25% 10%
B		1	Circumferential joints on a nozzle where $d > 150$ mm (6 in.) or $t > 16$ mm ($\frac{7}{8}$ in.)	RT or UT MT or PT	100% 10%	100% 10% [Note (4)]	100% 10%	100% 10% [Note (4)]	10% 10%	10% [Note (3)] 10% [Note (4)]
B		2,3	Circumferential joints on a nozzle where $d > 150$ mm (6 in.) or $t > 16$ mm ($\frac{7}{8}$ in.) with backing strip [Note (9)]	RT or UT MT or PT	NA NA	100% 10%	NA NA	25% 10%	NA NA	25% 10%
B		1	Circumferential joints on a nozzle where $d \leq 150$ mm (6 in.) or $t \leq 16$ mm ($\frac{7}{8}$ in.)	MT or PT	100%	10%	100%	10%	10%	10%
A		1	All welds in spheres, heads, and hemispherical heads to shells	RT or UT MT or PT	100% 10%	100% 10% [Note (4)]	100% 10%	100% 10% [Note (4)]	25% 10%	10% 10% [Note (4)]
B		1	Attachment of a conical shell with a cylindrical shell at an angle ≤ 30 deg	RT or UT MT or PT	100% 10%	100% 10% [Note (4)]	100% 10%	100% 10% [Note (4)]	10% 10%	10% 10% [Note (4)]
B		8	Attachment of a conical shell with a cylindrical shell at an angle > 30 deg	RT or UT MT or PT	100% 10%	100% 10% [Note (4)]	100% 10%	100% 10% [Note (4)]	25% 10%	10% 10% [Note (4)]

Figura C-1. Grado de ensayos no destructivos

Fuente: (ASME II, 2013, págs. 719-721)

Examination Group										
Permitted Materials										
Weld Joint Efficiency										
Joint Category	Type of Weld [Note (1)]			Type of NDE [Note (2)]	Extent of NDE [Note (10)][Note (11)][Note (12)]					
	Assembly of a flat head or tubesheet, with a cylindrical shell or Assembly of a flange or a collar with a shell	1, 2, 3, 7	With full penetration		100%	100%	100%	100%	100%	100%
C	Assembly of a flat head or tubesheet, with a cylindrical shell	1, 2, 3, 7	With full penetration	UT	100%	100%	100%	100%	100%	100%
C	Assembly of a flat head or tubesheet, with a cylindrical shell	9, 10	With partial penetration if $a > 16 \text{ mm } (\frac{5}{8} \text{ in.})$ [Note (16)]	MT or PT	10%	10%	10%	10%	10%	10%
C	Assembly of a flange or a collar with a shell	9, 10	With partial penetration if $a \leq 16 \text{ mm } (\frac{5}{8} \text{ in.})$ [Note (16)]	UT	NA	NA	NA	NA	NA	10%
C	Assembly of a flange or a collar with a nozzle	1, 2, 3, 7	With full penetration	RT or UT	100%	100%	100%	100%	100%	10%
C	Assembly of a flange or a collar with a nozzle	9, 10	With partial penetration	MT or PT	10%	10%	10%	10%	10%	10%
C	Assembly of a flange or a collar with a nozzle	9, 10	With full or partial penetration $d \leq 150 \text{ mm } (6 \text{ in.})$ and $t \leq 16 \text{ mm } (\frac{5}{8} \text{ in.})$	MT or PT	10%	10%	10%	10%	10%	10%
D	Nozzle or branch [Note (5)]	1, 2, 3, 7	With full penetration $d > 150 \text{ mm } (6 \text{ in.})$ or $t > 16 \text{ mm } (\frac{5}{8} \text{ in.})$	RT or UT	100%	100%	100%	100%	100%	10%
D		1, 2, 3, 7	With partial penetration $d \leq 150 \text{ mm } (6 \text{ in.})$ and $t \leq 16 \text{ mm } (\frac{5}{8} \text{ in.})$	MT or PT	10%	10%	10%	10%	10%	10%
D		9, 10	With partial penetration for any d $a > 16 \text{ mm } (\frac{5}{8} \text{ in.})$ [Note (17)]	UT	100%	100%	100%	100%	100%	10%
D	Nozzle or branch [Note (5)]	9, 10	With partial penetration $d > 150 \text{ mm } (6 \text{ in.})$ $a \leq 16 \text{ mm } (\frac{5}{8} \text{ in.})$ [Note (17)]	MT or PT	10%	10%	10%	10%	10%	10%
D		9, 10	With partial penetration $d \leq 150 \text{ mm } (6 \text{ in.})$ $a \leq 16 \text{ mm } (\frac{5}{8} \text{ in.})$	MT or PT	100%	100%	100%	100%	100%	10%

Figura C-1. Grado de ensayos no destructivos (Cont.)

Fuente: (ASME II, 2013, págs. 719-721)

Examination Group									
Joint Category	Type of Weld [Note (1)]			Type of NDE [Note (2)]	Extent of NDE [Note (10)][Note (11)][Note (12)]				
	1, 2, 3, 7	9, 10	9, 10		1a	1b	2a	2b	3a	3b
Permitted Materials									
C	Assembly of a flat head or tubesheet, with a cylindrical shell or	With full penetration	UT	All Materials in Annex 3-A [Note (18)]	P-No. 1 Gr 1 & 2 P-No. 8 Gr 1	P-No. 8 Gr 2 P-No. 9A Gr 1 P-No. 9B Gr 1 P-No. 11A Gr 1 P-No. 11A Gr 2 P-No. 10H Gr 1	P-No. 1 Gr 1 & 2 P-No. 8 Gr 1	P-No. 8 Gr 2 P-No. 9A Gr 1 P-No. 9B Gr 1 P-No. 10H Gr 1	P-No. 1 Gr 1 & 2 P-No. 8 Gr 1
C	Assembly of a flange or a collar with a shell	With partial penetration if $a > 16 \text{ mm } (\frac{5}{8} \text{ in.})$ [Note (16)]	UT MT or PT		NA	NA	NA	NA	10%
C	Assembly of a flange or a collar with a shell	With partial penetration if $a \leq 16 \text{ mm } (\frac{5}{8} \text{ in.})$ [Note (16)]	UT MT or PT		NA	NA	NA	10%	10%
C	Assembly of a flange or a collar with a nozzle	With full penetration	RT or UT MT or PT		100%	100%	100%	100%	10%
C	Assembly of a flange or a collar with a nozzle	With partial penetration	MT or PT		10%	10%	10%	10%	10%
D	Assembly of a flange or a collar with a nozzle	With full or partial penetration $d \leq 150 \text{ mm } (6 \text{ in.})$ and $t \leq 16 \text{ mm } (\frac{5}{8} \text{ in.})$	RT or UT MT or PT		100%	100%	100%	100%	10%
D	Assembly of a flange or a collar with a nozzle	With full penetration $d > 150 \text{ mm } (6 \text{ in.})$ or $t > 16 \text{ mm } (\frac{5}{8} \text{ in.})$	MT or PT		10%	10%	10%	10%	10%
D	Nozzle or branch [Note (5)]	With full penetration for any $d > 16 \text{ mm } (\frac{5}{8} \text{ in.})$ [Note (17)]	UT MT or PT		100%	100%	100%	100%	10%
D	Nozzle or branch [Note (5)]	With partial penetration $d > 150 \text{ mm } (6 \text{ in.})$ and $a \leq 16 \text{ mm } (\frac{5}{8} \text{ in.})$ [Note (17)]	MT or PT		NA	NA	NA	NA	10%
D	Nozzle or branch [Note (5)]	With partial penetration $d \leq 150 \text{ mm } (6 \text{ in.})$ and $a \leq 16 \text{ mm } (\frac{5}{8} \text{ in.})$	MT or PT		100%	100%	100%	100%	10%

Figura C-1. Grado de ensayos no destructivos (Cont.)

Fuente: (ASME II, 2013, págs. 719-721)

Examination Group		1a	1b	2a	2b	3a	3b
Permitted Materials		All Materials in Annex 3-A [Note (18)]	P-No. 1 Gr 1 & 2 P-No. 8 Gr 1	P-No. 8 Gr 2 P-No. 9A Gr 1 P-No. 9B Gr 1 P-No. 11A Gr 1 P-No. 11A Gr 2 P-No. 8 Gr 1 P-No. 10H Gr 1	P-No. 1 Gr 1 & 2 P-No. 8 Gr 1	P-No. 8 Gr 2 P-No. 9A Gr 1 P-No. 9B Gr 1 P-No. 10H Gr 1	P-No. 1 Gr 1 & 2 P-No. 8 Gr 1
Weld Joint Efficiency		1.0	1.0	1.0	1.0	0.85	0.85
Joint Category	Type of Weld [Note (1)]	Extent of NDE [Note (10)][Note (11)][Note (12)]					
		Type of NDE [Note (2)]					
D	Tube-to-Tubesheet Welds	See Figure 4.18.13 and Table 4-C.1	MT or PT	100%	100%	100%	100%
E	Permanent attachments [Note (6)]	1, 7, 9, 10 With full penetration or partial penetration [Note (15)]	RT or UT MT or PT	25% [Note (7)] 100%	10% [Note (4)] 100%	10% 100%	10% [Note (4)] 10% [Note (4)]
NA	Pressure retaining areas after removal of attachments	NA	MT or PT	100%	100%	100%	100%
...	Cladding by welding	...	RT or UT MT or PT	[Note (13)]	[Note (13)]	[Note (13)]	[Note (13)]
...	Repairs [Note (14)]	...	RT or UT MT or PT	100%	100%	100%	100%

NOTES

- (1) See paragraph 4.2
- (2) RT = Radiographic Examination, UT = Ultrasonic Examination, MT = Magnetic Particle Examination, PT = Liquid Penetrant Examination.
- (3) 2% if $t \leq 30$ mm ($1\frac{1}{16}$ in.) and same weld procedure specification as longitudinal, for steel of P-No. 1 Gr 1 and P-No. 8 Gr 1
- (4) 10% if $t > 30$ mm ($1\frac{1}{16}$ in.), 0% if $t \leq 30$ mm ($1\frac{1}{16}$ in.)
- (5) Percentage in the table refers to the aggregate weld length of all the nozzles, see paragraph 7.4.3.5(b).
- (6) RT or UT is not required for weld thicknesses ≤ 16 mm ($\frac{5}{8}$ in.)
- (7) 10% for steel of P-No. 8 Gr 2, P-No. 9A Gr 1, P-No. 11A Gr 1, P-No. 11A Gr 2, P-No. 10H Gr 1
- (8) Currently not used.
- (9) For limitations of application see paragraph 4.2.
- (10) The percentage of surface examination refers to the percentage of length of the welds both on the inside and the outside.
- (11) RT and UT are volumetric examination methods, and MT and PT are surface examination methods. Both volumetric and surface examinations are required to be applied the extent shown.
- (12) NA means "not applicable". All Examination Groups require 100% visual examination to the maximum extent possible.
- (13) See paragraph 7.4.8.1 for detailed examination requirements.

Figura C-1. Grado de ensayos no destructivos (Cont.)

Fuente: (ASME II, 2013, págs. 719-721)

APÉNDICE D

Weld Category	Description
A	<ul style="list-style-type: none"> • Longitudinal and spiral welded joints within the main shell, communicating chambers (1), transitions in diameter, or nozzles • Any welded joint within a sphere, within a formed or flat head, or within the side plates (2) of a flat sided vessel • Circumferential welded joints connecting hemispherical heads to main shells, to transitions in diameter, to nozzles, or to communicating chambers.
B	<ul style="list-style-type: none"> • Circumferential welded joints within the main shell, communicating chambers (1), nozzles or transitions in diameter including joints between the transition and a cylinder at either the large or small end • Circumferential welded joints connecting formed heads other than hemispherical to main shells, to transitions in diameter, to nozzles, or to communicating chambers.
C	<ul style="list-style-type: none"> • Welded joints connecting flanges, Van Stone laps, tubesheets or flat heads to main shell, to formed heads, to transitions in diameter, to nozzles, or to communicating chambers (1) • Any welded joint connecting one side plate (2) to another side plate of a flat sided vessel.
D	<ul style="list-style-type: none"> • Welded joints connecting communicating chambers (1) or nozzles to main shells, to spheres, to transitions in diameter, to heads, or to flat sided vessels • Welded joints connecting nozzles to communicating chambers (1) (for nozzles at the small end of a transition in diameter see Category B).
E	<ul style="list-style-type: none"> • Welded joints attaching nonpressure parts and stiffeners

NOTES:

(1) Communicating chambers are defined as appurtenances to the vessel that intersect the shell or heads of a vessel and form an integral part of the pressure containing enclosure, e.g., sumps.

(2) Side plates of a flat sided vessel are defined as any of the flat plates forming an integral part of the pressure containing enclosure.

Figura D-1. Definición de categoría de soldadura

Fuente: (ASME II, 2013, pág. 163)

S

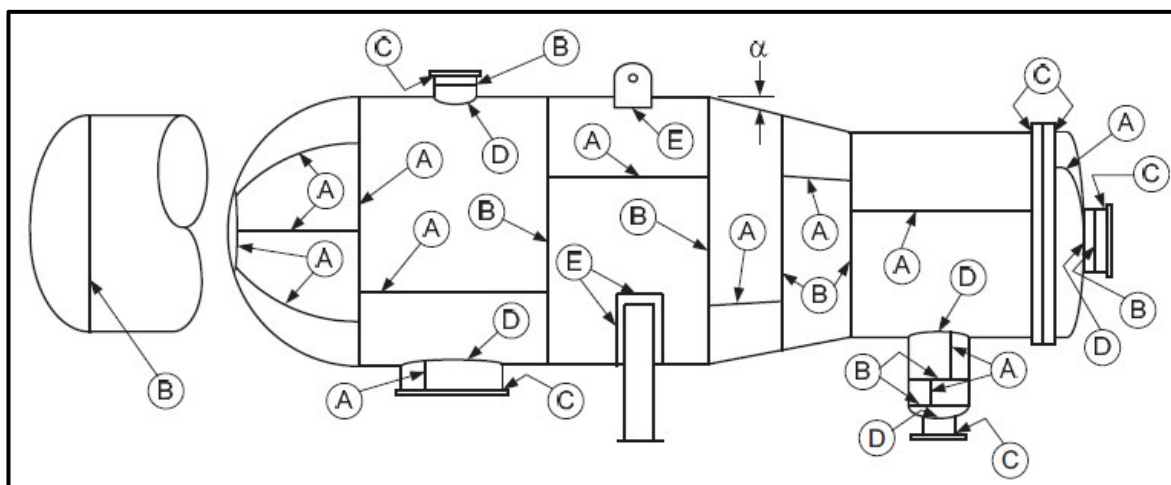


Figura D-2. Ubicación típica de juntas de soldadura

Fuente: (ASME II, 2013, pág. 183)

APÉNDICE E

En este apéndice se calculará el valor de la presión de viento, para el diseño de las silletas.

El (ASCE 7, 2010, pág. 307) proporciona la siguiente ecuación:

$$q_z = 0.613K_zK_{zt}K_dV^2 \quad (\text{Ec. E-1})$$

Donde:

- K_z = Coeficiente de exposición a la presión de velocidad. Ver figura E-1.
- K_{zt} = Factor topográfico. Si las condiciones y ubicación de la estructura no cumplen con lo definido en la sección 26.8.1 del (ASCE 7, 2010, pág. 251), $K_{zt} = 1$
- K_d = Factor de direccionalidad del viento, definido en la sección 26.6 del (ASCE 7, 2010). Ver figura E-2.
- V = Velocidad de viento, m/s

$$q_z = 0.613(0.85 \times 1 \times 0.95) 27.78^2 = 382 \frac{N}{m^2}$$

Height above ground level, z		Exposure		
		B	C	D
ft	(m)			
0-15	(0-4.6)	0.57	0.85	1.03
20	(6.1)	0.62	0.90	1.08
25	(7.6)	0.66	0.94	1.12
30	(9.1)	0.70	0.98	1.16
40	(12.2)	0.76	1.04	1.22
50	(15.2)	0.81	1.09	1.27
60	(18)	0.85	1.13	1.31
70	(21.3)	0.89	1.17	1.34
80	(24.4)	0.93	1.21	1.38
90	(27.4)	0.96	1.24	1.40
100	(30.5)	0.99	1.26	1.43
120	(36.6)	1.04	1.31	1.48
140	(42.7)	1.09	1.36	1.52
160	(48.8)	1.13	1.39	1.55
180	(54.9)	1.17	1.43	1.58
200	(61.0)	1.20	1.46	1.61
250	(76.2)	1.28	1.53	1.68
300	(91.4)	1.35	1.59	1.73
350	(106.7)	1.41	1.64	1.78
400	(121.9)	1.47	1.69	1.82
450	(137.2)	1.52	1.73	1.86
500	(152.4)	1.56	1.77	1.89

Figura E-1. Coeficiente K_z

Fuente: (ASCE 7, 2010, pág. 310)

Structure Type	Directionality Factor K_d^*
Buildings Main Wind Force Resisting System Components and Cladding	0.85 0.85
Arched Roofs	0.85
Chimneys, Tanks, and Similar Structures Square Hexagonal Round	0.90 0.95 0.95
Solid Freestanding Walls and Solid Freestanding and Attached Signs	0.85
Open Signs and Lattice Framework	0.85
Trussed Towers Triangular, square, rectangular All other cross sections	0.85 0.95

Figura E-2. Coeficiente K_d

Fuente: (ASCE 7, 2010, pág. 250)

Los coeficientes de fuerza C_f , para el cilindro y las silletas, en la ecuación 3.4.10 y 3.4.11, en se puede apreciar en la figura E-3. Es decir,

- Para el cuerpo cilíndrico $C_{f1} = 0.5$
- Para las silletas $C_{f2} = 1.3$

Cross-Section	Type of Surface	h/D		
		1	7	25
Square (wind normal to face)	All	1.3	1.4	2.0
Square (wind along diagonal)	All	1.0	1.1	1.5
Hexagonal or octagonal	All	1.0	1.2	1.4
Round ($D\sqrt{q_z} > 2.5$) ($D\sqrt{q_z} > 5.3$, D in m, q_z in N/m^2)	Moderately smooth	0.5	0.6	0.7
	Rough ($D'/D = 0.02$)	0.7	0.8	0.9
	Very rough ($D'/D = 0.08$)	0.8	1.0	1.2
Round ($D\sqrt{q_z} \leq 2.5$) ($D\sqrt{q_z} \leq 5.3$, D in m, q_z in N/m^2)	All	0.7	0.8	1.2

Figura E-3. Coeficiente C_f

Fuente: (ASCE 7, 2010, pág. 312)

APÉNDICE F

Type of Applied Stress	Allowable Stress	Required Filler Metal Strength Level
CJP Groove Welds		
Tension normal to the effective area ^a	Same as base metal	Matching filler metal shall be used ^b
Compression normal to effective area	Same as base metal	Filler metal with a strength level equal to or one classification (10 ksi [70 MPa]) less than matching filler metal may be used.
Tension or compression parallel to axis of the weld ^c	Not a welded joint design consideration	Filler metal with a strength level equal to or less than matching filler metal may be used
Shear on effective area	0.30 × classification tensile strength of filler metal except shear on the base metal shall not exceed 0.40 × yield strength of the base metal	
PJP Groove Welds		
Tension normal to the effective area	0.30 × classification tensile strength of filler metal	Filler metal with a strength level equal to or less than matching filler metal may be used
Compression normal to effective area of weld in joints designed to bear	0.90 × classification tensile strength of filler metal, but not more than 0.90 × yield strength of the connected base metal	
Compression normal to effective area of weld in joints not designed to bear	0.75 × classification tensile strength of filler metal	
Tension or compression parallel to axis of the weld ^c	Not a welded joint design consideration	
Shear parallel to axis of effective area	0.30 × classification tensile strength of filler metal except shear on the base metal shall not exceed 0.40 × yield strength of the base metal	
Fillet Welds		
Shear on effective area or weld	0.30 × classification tensile strength of filler metal except that the base metal net section shear area stress shall not exceed 0.40 × yield strength of the base metal ^{d,e}	Filler metal with a strength level equal to or less than matching filler metal may be used
Tension or compression parallel to axis of the weld ^c	Not a welded joint design consideration	
Plug and Slot Welds		
Shear parallel to the faying surface on the effective area ^f	0.30 × classification tensile strength of filler metal	Filler metal with a strength level equal to or less than matching filler metal may be used

^a For definitions of effective areas, see 2.4.
^b For matching filler metal to base metal strength for code approved steels, see Table 3.1, Table 3.2, and Table 4.9.
^c Fillet welds and groove welds joining components of built-up members are allowed to be designed without regard to the tension and compression stresses in the connected components parallel to the weld axis although the area of the weld normal to the weld axis may be included in the cross-sectional area of the member.
^d The limitation on stress in the base metal to 0.40 × yield point of base metal does not apply to stress on the diagrammatic weld leg; however, a check shall be made to assure that the strength of the connection is not limited by the thickness of the base metal on the net area around the connection, particularly in the case of a pair of fillet welds on opposite sides of a plate element.
^e Alternatively, see 2.6.4.2, 2.6.4.3, and 2.6.4.4. Note d (above) applies.
^f The strength of the connection shall also be limited by the tear-out load capacity of the thinner base metal on the perimeter area around the connection.

Figura F-1. Esfuerzo permisible en soldadura - orejas de izaje

Fuente: (AWS D1.1, 2015, pág. 17)

APÉNDICE G

Tabla G1 Coeficiente de esfuerzo para recipientes horizontales sobre soportes

$$K_1 = \frac{\Delta + \operatorname{sen}\Delta \cdot \cos\Delta - \frac{2 \operatorname{sen}^2 \Delta}{\Delta}}{\pi \left(\frac{\operatorname{sen}\Delta}{\Delta} - \cos\Delta \right)}$$

$$K_1^* = \frac{\Delta + \operatorname{sen}\Delta \cdot \cos\Delta - \frac{2 \operatorname{sen}^2 \Delta}{\Delta}}{\pi \left(1 - \frac{\operatorname{sen}\Delta}{\Delta} \right)}$$

$$K_2 = \frac{\operatorname{sen} \alpha}{\pi - \alpha + \operatorname{sen}\alpha \cdot \cos\alpha}$$

$$K_5 = \frac{1 + \cos \alpha}{\pi - \alpha + \operatorname{sen}\alpha \cdot \cos\alpha}$$

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

$$K_7 = \frac{K_6}{4} \quad \text{cuando } \frac{a}{R_m} \leq 0.5$$

$$K_7 = \frac{3}{2} K_6 \left(\frac{a}{R_m} \right) - \frac{1}{2} K_6 \quad \text{cuando } 0.5 < \frac{a}{R_m} < 1$$

$$K_7 = K_6 \quad \text{cuando } \frac{a}{R_m} \geq 1$$

Nota:

$$\Delta = \frac{\pi}{6} + \frac{5\theta}{12}$$

$$\alpha = 0.95 \left(\pi - \frac{\theta}{2} \right)$$

$$\beta = \pi - \frac{\theta}{2}$$

Fuente: ASME VIII División 2, 2013, pág. 390