

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DISEÑO MECÁNICO DE UNA PLANTA DE ALMACENAMIENTO
DE GAS LICUADO DE PETRÓLEO DE 16000 TONELADAS
MÉTRICAS DE CAPACIDAD**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

ALEJANDRO DAVID GUEVARA GRANJA

JUAN GABRIEL VINUEZA JÁTIVA

DIRECTOR: Ing. Carlos Naranjo

CODIRECTOR: Ing. José Pérez

Sangolquí, 2005 - Junio

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “DISEÑO MECÁNICO DE UNA PLANTA DE ALMACENAMIENTO DE GAS LICUADO DE PETRÓLEO DE 16000 TONELADAS MÉTRICAS DE CAPACIDAD” fue realizado en su totalidad por Alejandro David Guevara Granja y Juan Gabriel Vinuesa Játiva, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Ing. Carlos Naranjo

DIRECTOR

Ing. José Pérez

CODIRECTOR

Sangolquí, 05-06-07

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

**“DISEÑO MECÁNICO DE UNA PLANTA DE ALMACENAMIENTO DE GAS
LICUADO DE PETRÓLEO DE 16000 TONELADAS MÉTRICAS DE
CAPACIDAD”**

ELABORADO POR:

David Guevara G.

Juan Vinueza J.

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

Mayo. de E. Ing. Edgar Pazmiño

DECANO

Sangolquí, 05-06-07

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a todas las personas que me han apoyado durante todos estos años de formación en especial a mis padres y hermanos.

David.

Dedico a las personas que de alguna manera me apoyaron y están junto a mí, principalmente a mis padres y mi hermana.

Juan.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis padres que me han ayudado a cumplir una de mis metas ya que gracias a su apoyo y a los principios que me han impartido he sabido vencer las dificultades que se me han presentado.

David.

Agradezco a Dios y mis padres que siempre de una u otra manera están a mi lado y me apoyan en mis ideales.

Juan.

Adicionalmente queremos agradecer a la Escuela Politécnica del Ejército y a sus docentes por los conocimientos impartidos, a Aerotecnología por la confianza depositada en nosotros, al Ing. Rodrigo Villacís por su colaboración y a todas las personas que nos han brindado su ayuda.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO	ii
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
RESUMEN	xvi
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	2
1.3. OBJETIVOS	2
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	2
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.4. ALCANCE	3
CAPÍTULO 2	5
GENERALIDADES	5
2.1. GAS LICUADO DE PETRÓLEO	5
2.2. PROCESO DE ALMACENAMIENTO DE GLP	11
2.2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	11
2.2.2. REQUERIMIENTOS GENERALES DE LA PLANTA	15
2.3. NORMAS PARA EL MANEJO DEL GLP	15
2.3.1. API STANDARD 2510.- DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE INSTALACIONES DE LPG	16
2.3.2. NFPA 58.- CÓDIGO DE GAS LICUADO DE PETRÓLEO	16
2.4. NORMAS PARA EL DISEÑO DE TUBERÍAS Y RECIPIENTES A PRESIÓN	17
2.4.1. NORMAS PARA EL DISEÑO DE RECIPIENTES A PRESIÓN.	17
2.4.2. NORMAS PARA EL DISEÑO DE TUBERÍAS	18
2.5. ESQUEMA GENERAL DE LA PLANTA	19

CAPÍTULO 3	21
DISEÑO DE LAS ESFERAS DE ALMACENAMIENTO	21
3.1. REQUERIMIENTOS PARA LAS ESFERAS DE ALMACENAMIENTO	21
3.2. DISEÑO DE LAS ESFERAS	24
3.2.1. DIMENSIONAMIENTO.	24
3.2.2. ANÁLISIS ESTÁTICO.	26
3.2.3. ANÁLISIS DINÁMICO.	32
3.2.4. BOCAS	56
3.2.5. SOLDADURA	122
3.3. CONSIDERACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN	123
CAPÍTULO 4	125
DISEÑO DE TUBERÍAS	125
4.1. REQUERIMIENTOS PARA LAS LÍNEAS DE TUBERÍA.	125
4.2. DISEÑO DE LAS LÍNEAS DE TUBERÍA.	128
4.2.1. DIMENSIONAMIENTO.	132
4.2.2. ANÁLISIS ESTÁTICO.	151
4.2.3. ANÁLISIS DINÁMICO.	154
4.2.4. SOPORTERÍA	165
4.2.5. SOLDADURA	198
4.3. CONSIDERACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN.	199
CAPÍTULO 5	203
ESPECIFICACIÓN DE EQUIPOS	203
5.1. COMPRESORES	203
5.2. BOMBAS	203
5.2.1. BOMBAS DE DESPACHO DE GLP.	204
5.2.2. BOMBAS DE DESCARGA BULLET-SLOP.	208
5.3. SISTEMA DE RELICUEFACCIÓN.	212
5.4. SISTEMA DE VAPORIZACIÓN.	213
5.5. SISTEMA DE MEDICIÓN.	213
CAPÍTULO 6	217

PRESUPUESTO REFERENCIAL	217
6.1. ESFERAS	218
6.2. SISTEMA DE TUBERÍAS	219
6.3. EQUIPOS	219
CAPITULO 7	221
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	221
7.1. CONCLUSIONES	221
7.2. RECOMENDACIONES	222
BIBLIOGRAFÍA	
PLANOS	
ANEXOS	

TABLAS

Tabla 2.1. Propiedades Propano	7
Tabla 2.2. Propiedades Butano	8
Tabla 2.3. Propiedades Iso-Butano	9
Tabla 2.4. GLP (Propano70% - Butano 30%)	10
Tabla 3.1. Ciclos de Operación (Temperatura)	12
Tabla 3.2. Ciclos de Operación (Presión)	22
Tabla 3.3. Propiedades de SA – 516 – Gr70	22
Tabla 3.4. Coordenadas externas del tensor desplazado	38
Tabla 3.5. Componente de fuerza x en el tensor	38
Tabla 3.6. Bocas en la parte inferior del recipiente	56
Tabla 3.7. Bocas en la parte superior del recipiente	56
Tabla 3.8. Verificación según AD – 150 (a) (1) y AD – 150 (a) (2)	120
Tabla 3.9. Ubicación de las bocas	122
Tabla 3.10. Verificación según AD – 150 (a) (3)	122
Tabla 4.1. Ciclos de operación	126
Tabla 4.2. Presiones de diseño de los sistemas de tuberías	129
Tabla 4.3. Casos de carga evaluados	131
Tabla 4.4. Coeficientes de resistencia, línea de entrada	133
Tabla 4.5. Coeficientes de resistencia, línea de salida	134
Tabla 4.6. Coeficientes de resistencia, línea de alivio	134
Tabla 4.7. Coeficientes de resistencia, línea de vapor	135
Tabla 4.8. Coeficientes de resistencia, línea de drenaje	135
Tabla 4.9. Coeficientes de resistencia, línea slop – bullet	136
Tabla 4.10. Casos de carga, estudio estático	151
Tabla 4.11. Esfuerzo de código estudio estático, línea de drenaje	152
Tabla 4.12. Esfuerzo de código estudio estático, línea de entrada y salida	153
Tabla 4.13. Esfuerzo de código estudio estático, línea de alivio	153
Tabla 4.14. Esfuerzo de código estudio estático, línea de vapor	154
Tabla 4.15. Esfuerzo de código estudio estático, línea Slop – Bullet	154
Tabla 4.16. Periodos fundamentales, línea de drenaje	156
Tabla 4.17. Casos de carga, estudio dinámico	59

Tabla 4.18. Esfuerzos de código estudio dinámico, línea de drenaje	160
Tabla 4.19. Esfuerzos de código estudio dinámico, línea de entrada y salida	161
Tabla 4.20. Casos de carga, estudio dinámico, línea de alivio	162
Tabla 4.21. Esfuerzos de código estudio dinámico, línea de alivio	163
Tabla 4.22. Esfuerzos de código estudio dinámico, línea de vapor	164
Tabla 4.23. Esfuerzos de código estudio dinámico, línea slop – bullet	164
Tabla 4.24. Cargas soporte 1	165
Tabla 4.25. Cargas soporte 2	166
Tabla 4.26. Cargas soporte 3	166
Tabla 4.27. Cargas soporte 3a	167
Tabla 4.28. Cargas soporte 3b	168
Tabla 4.29. Cargas soporte 4	169
Tabla 4.30. Cargas soporte 5	169
Tabla 4.31. Cargas soporte 6	170
Tabla 4.32. Cargas soporte 6b	171
Tabla 4.33. Cargas soporte 7	171
Tabla 4.34. Cargas soporte 8	172
Tabla 4.35. Cargas soporte 9	173
Tabla 4.36. Cargas soporte 10	173
Tabla 4.37. Cargas soporte 10a	174
Tabla 4.38. Cargas soporte 10b	175
Tabla 4.39. Cargas soporte 11	175
Tabla 4.40. Cargas soporte 12	176
Tabla 4.41. Cargas soporte 13	177
Tabla 4.42. Cargas soporte 14	177
Tabla 4.43. Cargas soporte 15	178
Tabla 4.44. Cargas soporte 16	179
Tabla 4.45. Cordones de soldadura, soporte 1	182
Tabla 4.46. Cordones de soldadura, soporte 2	182
Tabla 4.47. Cordones de soldadura, soporte 3	183
Tabla 4.48. Cordones de soldadura, soporte 4	183
Tabla 4.49. Cordones de soldadura, soporte 5	183
Tabla 4.50. Cordones de soldadura, soporte 6	183

Tabla 4.51. Cordones de soldadura, soporte 6b	184
Tabla 4.52. Cordones de soldadura, soporte 7	184
Tabla 4.53. Cordones de soldadura, soporte 8	184
Tabla 4.54. Cordones de soldadura, soporte 9	184
Tabla 4.55. Cordones de soldadura, soporte 10	185
Tabla 4.56. Cordones de soldadura, soporte 10a	185
Tabla 4.57. Cordones de soldadura, soporte 10b	185
Tabla 4.58. Cordones de soldadura, soporte 11	185
Tabla 4.59. Cordones de soldadura, soporte 11a	186
Tabla 4.60. Cordones de soldadura, soporte 12	186
Tabla 4.61. Cordones de soldadura, soporte 13	186
Tabla 4.62. Cordones de soldadura, soporte 14	186
Tabla 4.63. Cordones de soldadura, soporte 15	187
Tabla 4.64. Cordones de soldadura, soporte 16	187
Tabla 4.65. Fuerza en los pernos, soporte 1	188
Tabla 4.66. Esfuerzo en el perno crítico, soporte 1	188
Tabla 4.67. Fuerza en los pernos, soporte 2	189
Tabla 4.68. Esfuerzo en el perno crítico, soporte 2	189
Tabla 4.69. Fuerza en los pernos, soporte 3	189
Tabla 4.70. Esfuerzo en el perno crítico, soporte 3	189
Tabla 4.71. Fuerza en los pernos, soporte 3b	190
Tabla 4.72. Esfuerzo en el perno crítico, soporte 3b	190
Tabla 4.73. Fuerza en los pernos, soporte 4	190
Tabla 4.74. Esfuerzo en el perno crítico, soporte 4	190
Tabla 4.75. Fuerza en los pernos, soporte 5	191
Tabla 4.76. Esfuerzo en el perno crítico, soporte 5	191
Tabla 4.77. Fuerza en los pernos, soporte 6	191
Tabla 4.78. Esfuerzo en el perno crítico, soporte 6	191
Tabla 4.79. Fuerza en los pernos, soporte 6b	192
Tabla 4.80. Esfuerzo en el perno crítico, soporte 6b	192
Tabla 4.81. Fuerza en los pernos, soporte 7	192
Tabla 4.82. Esfuerzo en el perno crítico, soporte 7	192
Tabla 4.83. Fuerza en los pernos, soporte 8	193
Tabla 4.84. Esfuerzo en el perno crítico, soporte 8	193

Tabla 4.85. Fuerza en los pernos, soporte 9	193
Tabla 4.86. Esfuerzo en el perno crítico, soporte 9	193
Tabla 4.87. Fuerza en los pernos, soporte 10	194
Tabla 4.88. Esfuerzo en el perno crítico, soporte 10	194
Tabla 4.89. Fuerza en los pernos, soporte 10a	194
Tabla 4.90. Esfuerzo en el perno crítico, soporte 10a	194
Tabla 4.91. Fuerza en los pernos, soporte 10b	195
Tabla 4.92. Esfuerzo en el perno crítico, soporte 10b	195
Tabla 4.93. Fuerza en los pernos, soporte 11	195
Tabla 4.94. Esfuerzo en el perno crítico, soporte 11	195
Tabla 4.95. Fuerza en los pernos, soporte 11a	195
Tabla 4.96. Esfuerzo en el perno crítico, soporte 11a	196
Tabla 4.97. Fuerza en los pernos, soporte 12	196
Tabla 4.98. Esfuerzo en el perno crítico, soporte 12	196
Tabla 4.99. Fuerza en los pernos, soporte 13	196
Tabla 4.100. Esfuerzo en el perno crítico, soporte 13	196
Tabla 4.101. Fuerza en los pernos, soporte 14	197
Tabla 4.102. Esfuerzo en el perno crítico, soporte 14	197
Tabla 4.103. Fuerza en los pernos, soporte 15	197
Tabla 4.104. Esfuerzo en el perno crítico, soporte 15	197
Tabla 4.105. Fuerza en los pernos, soporte 16	198
Tabla 4.106. Esfuerzo en el perno crítico, soporte 16	198
Tabla 5.1. Coeficiente de resistencia, bombas despacho de GLP	204
Tabla 5.2. Coeficiente de resistencia, bombas descarga bullet – slop	209
Tabla 6.1. Presupuesto referencia	217

FIGURAS

Figura 2.1. Esquema de líneas de tuberías en una esfera	13
Figura 3.1. Distribución horizontal de anillos en la esfera	26
Figura 3.2. Pantalla para visualización de esfuerzos de membrana, CosmosWorks	27
Figura 3.3. Diagrama de velocidad de viento aplicado a la esfera, CosmosFlow	32
Figura 3.4. Diagrama de presión por carga de viento aplicado a la esfera, CosmosFlow	33
Figura 3.5. Desplazamiento en dirección x por carga sísmica	36
Figura 3.6. Disposición superior de tensores en la esfera entre columnas	37
Figura 3.7. Ubicación lateral del tensor en la columna	37
Figura 3.8. Parte inferior de recipiente esférico	40
Figura 3.9. Momento en el eje z para cargas en la prueba hidrostática	41
Figura 3.10. Fuerza de reacción en y para carga en la prueba hidrostática	42
Figura 3.11. Fuerza de reacción para cargas en la prueba hidrostática	42
Figura 3.12. D.C.L. Para una columna	43
Figura 3.13. Nomenclatura en bocas	57
Figura 3.14. Diámetro de abertura de la boca	63
Figura 3.15. Límites para áreas de bocas	64
Figura 3.16. Área disponible en la pared de la esfera	65
Figura 3.17. Área disponible en la pared de la boca exterior a la esfera	67
Figura 3.18. Área disponible en la pared de la boca interior a la esfera	82
Figura 4.1. Pantalla de introducción de datos CAESAR II	130
Figura 4.2. Pantalla gráfica 3D CAESAR II	131
Figura 4.3. Pantalla para restricción flexible CAESAR II	132
Figura 4.4. Direcciones de flujo a través de tes	133
Figura 4.5. Pantalla de introducción de datos de viento, CAESAR II	155
Figura 4.6. Curva de fatiga para la tubería	160
Figura 4.7. Distribución de esfuerzos, soporte 1	165
Figura 4.8. Distribución de esfuerzos, soporte 2	166
Figura 4.9. Distribución de esfuerzos, soporte 3	167

Figura 4.10. Distribución de esfuerzos, soporte 3a	167
Figura 4.11. Distribución de esfuerzos, soporte 3b	168
Figura 4.12. Distribución de esfuerzos, soporte 4	169
Figura 4.13. Distribución de esfuerzos, soporte 5	170
Figura 4.14. Distribución de esfuerzos, soporte 6	170
Figura 4.15. Distribución de esfuerzos, soporte 6b	171
Figura 4.16. Distribución de esfuerzos, soporte 7	172
Figura 4.17. Distribución de esfuerzos, soporte 8	172
Figura 4.18. Distribución de esfuerzos, soporte 9	173
Figura 4.19. Distribución de esfuerzos, soporte 10	174
Figura 4.20. Distribución de esfuerzos, soporte 10a	174
Figura 4.21. Distribución de esfuerzos, soporte 10b	174
Figura 4.22. Distribución de esfuerzos, soporte 11	176
Figura 4.23. Distribución de esfuerzos, soporte 12	176
Figura 4.24. Distribución de esfuerzos, soporte 13	177
Figura 4.25. Distribución de esfuerzos, soporte 14	178
Figura 4.26. Distribución de esfuerzos, soporte 15	178
Figura 4.27. Distribución de esfuerzos, soporte 16	179
Figura 4.28. Pantalla Archon Weld, soporte 1 cordón a	180
Figura 4.29. Pantalla Archon Weld, soporte 1 cordón b	180
Figura 4.30. Pantalla Archon Weld, soporte 1 cordón c	181
Figura 4.31. Pantalla Archon Weld, soporte 1 cordón d	181
Figura 4.32. Posición de los cordones en los soportes	182
Figura 4.33. Distribución de pernos en los soportes	188
Figura 4.34. Preparación de la junta para tubería	199

ANEXOS

- ANEXO A Estudios Cosmosworks
- ANEXO B Estudio Cosmosfloworks
- ANEXO C Estudios CAESAR II
 - Estudios en el sistema de tuberías
 - Estudios para las esferas según WRC 107
- ANEXO D Cálculo de ecuación de presión de viento
- ANEXO E Catálogos
- ANEXO F Carta de Satisfacción

RESUMEN

Este proyecto presenta el diseño mecánico de una planta de almacenamiento de gas licuado de petróleo, el mismo que es una prioridad de la empresa Aerotecnología quien tiene a su cargo el diseño de esta planta de almacenamiento, que servirá para el desarrollo de posteriores proyectos cubriendo las necesidades del manejo de GLP. El objetivo de esta planta es el de recibir gas licuado de petróleo que llega a través de un gasoducto, almacenarlo en los recipientes esféricos para posteriormente evacuarlo hacia un gasoducto de despacho.

Uno de los derivados de petróleo más importantes en el consumo interno energético, lo constituye el gas licuado de petróleo (GLP), el cual ha impulsado el desarrollo de la ingeniería en este campo, haciendo que no sólo empresas extranjeras incursionen en el diseño de plantas y sistemas relacionados con el GLP y con otros derivados del petróleo, sino que empresas nacionales como Aerotecnología compitan prestando sus servicios de ingeniería.

La operación de estas plantas tiene por objetivo recibir gas licuado de petróleo por una línea de llegada, y almacenarlo a presiones establecidas que permitan su manejo en forma líquida, controlando grandes volúmenes que no serían posibles en su forma gaseosa. Posteriormente existe un sistema de tuberías que sirve para la evacuación de GLP de las esferas. Parte de este proceso se lo lleva a cabo con la ayuda de bombas y del sistema de relicuefacción que mantiene en estado líquido a las fracciones de vapor que se hayan generado.

Para poder concretar este proyecto y disponer de los datos necesarios para desarrollarlo, ha sido necesaria una amplia recopilación de información obtenida de diferentes fuentes, principalmente ingenieros con experiencia en el medio que han ayudado a comprender los diferentes procesos involucrados en una planta de almacenamiento.

Para realizar el diseño de la planta de almacenamiento de gas licuado de petróleo se han utilizado programas computacionales que permiten hacer los diseños más fiables ya que pueden existir zonas críticas en donde el diseño bajo la norma no define profunda y detalladamente todos los parámetros a considerar en el desarrollo del proyecto.

Los principales programas utilizados han sido Caesar II para el diseño de las tuberías y Cadworx para la diagramación de las tuberías. Así mismo para el modelamiento de las esferas de almacenamiento se ha utilizado Solidworks, y Cosmosworks para el diseño mediante el análisis de elementos finitos FEA (Finite Element Análisis) que tiene la facilidad de realizar cálculos sumamente rápidos y confiables.

A partir de las memorias de cálculo se han desarrollado los planos del diseño mecánico de las esferas y de las líneas de tuberías para la planta de almacenamiento de gas licuado de petróleo, cumpliendo con las normas que rigen su diseño y su operación.

Este proyecto abarca el diseño mecánico de las esferas y líneas de tuberías de la planta de almacenamiento de GLP, desde la recepción, el almacenamiento hasta la evacuación, con los instrumentos de medición básicos, excluyendo el sistema de automatización y control y el sistema contra incendios.

Para el diseño mecánico de esta planta se ha cumplido con los requerimientos de diseño y el lineamiento establecidos por las normas que rigen el desarrollo de este proyecto. Se ha empleado la NFPA 58, norma que se aplica a la operación de todos los sistemas de GLP entre los que está el diseño, construcción, instalación y operación de terminales marinos cuyo principal propósito es la recepción de GLP. Las normas empleadas para el diseño de recipientes a presión y para el sistema de tuberías son las que se especifican en NFPA 58 que dice que los recipientes deben ser diseñados de acuerdo a la Sección VIII del Código de Calderas y Recipientes a Presión de la ASME y que todas las tuberías metálicas de GLP deben estar diseñadas e instaladas de acuerdo a ASME B31.3, Tuberías de Proceso.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

Uno de los derivados de petróleo más importantes en el consumo interno energético, lo constituye el gas licuado de petróleo (GLP), el cual ha impulsado el desarrollo de la ingeniería en este campo, haciendo que no sólo empresas extranjeras incursionen en el diseño de plantas y sistemas relacionados con el GLP y con otros derivados del petróleo, sino que empresas nacionales como Aerotecnología compitan prestando sus servicios de ingeniería.

En el país existen plantas de almacenamiento de GLP pero sus diseños fueron realizados por empresas extranjeras, como es el caso de la terminal de almacenamiento de El Beaterio, que fue realizado por una empresa brasileña en el año 1979. Petrocomercial filial de Petroecuador, la cual es la empresa encargada de manejar las plantas de almacenamiento, tiene previsto futuras ampliaciones para incrementar la capacidad de almacenamiento de GLP en el país.

La operación de estas plantas tiene por objetivo recibir gas licuado de petróleo por una línea de llegada, y almacenarlo a presiones establecidas que permitan su manejo en forma líquida, controlando grandes volúmenes que no serían posibles en su forma gaseosa. Posteriormente existe un sistema de tuberías que sirve para la evacuación de GLP de las esferas. Parte de este proceso se lo lleva a cabo con la ayuda de bombas y del sistema de relicuefacción que mantiene en estado líquido a las fracciones de vapor que se hayan generado.

Las empresas que realizan sus actividades de ingeniería en el área petrolera de nuestro país en su afán de brindar un servicio competitivo y de calidad con relación al resto han obligado a cada empresa a ser más eficientes y mejorar su sistema de trabajo para llegar a ser líder en este mercado.

Es por este motivo que empresas en el país han ido incursionando en el desarrollo de ingeniería que sea competitiva a nivel internacional, siendo este el caso de Aerotecnología la cual cuenta con los recursos para realizar el diseño de la planta de almacenamiento de gas licuado de petróleo como por ejemplo programas computacionales que permiten hacer sus diseños más fiables ya que pueden existir zonas críticas en donde el diseño bajo la norma no define profunda y detalladamente todos los parámetros a considerar en el desarrollo del proyecto. Un conjunto importante de estos programas los agrupa la casa de software de ingeniería COADE entre los que se encuentran: PVElite CodeCalc para el diseño y análisis de recipientes a presión, Caesar II para el análisis de esfuerzos en tuberías, CADWorx para diagramación de tuberías.

En la actualidad existe una ventaja que nos ayuda a resolver estos problemas de una mejor manera, esto es mediante el análisis de elementos finitos FEA (Finite Element Analysis) el cual se lo lleva a cabo bajo un software que nos da la facilidad de realizar cálculos sumamente rápidos y confiables.

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La realización de este proyecto es una prioridad de la empresa Aerotecnología la cual tiene a su cargo el diseño de esta planta de almacenamiento de gas licuado de petróleo, el cual servirá para el desarrollo de posteriores proyectos cubriendo las necesidades del manejo de GLP de Petrocomercial.

Este proyecto nace de la necesidad de almacenar 16000 toneladas métricas de GLP en recipientes esféricos a presión que son los más adecuados para este proceso como se describe más adelante. Para esto se debe establecer el número de esferas necesarias para esta planta y luego definir sus características, posteriormente se diseña el sistema de tuberías.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar el diseño mecánico de una planta de almacenamiento de gas licuado de petróleo de 16000 toneladas métricas de capacidad.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar las esferas de almacenamiento necesarias para 16000 toneladas métricas de gas licuado de petróleo.
- Diseñar las líneas de transporte de fluidos necesarios en el proceso de almacenamiento de GLP.
- Definir las especificaciones para la selección de los equipos para el almacenamiento de GLP.
- Establecer la distribución de planta (Layout) de las esferas y las líneas de transporte para el almacenamiento.

1.4. ALCANCE

Disponer de los planos del diseño mecánico de las esferas y de las líneas de tuberías para una planta de almacenamiento de gas licuado de petróleo de 16000 toneladas métricas, cumpliendo con las normas que rigen su diseño y su operación, basados en las memorias de cálculo, y especificaciones de accesorios y equipos.

Este proyecto abarca el diseño mecánico de las esferas y líneas de tuberías de la planta de almacenamiento de GLP, desde la recepción, el almacenamiento hasta la evacuación, con los instrumentos de medición básicos, excluyendo el sistema de automatización y control y el sistema contra incendios.

Para el diseño mecánico de esta planta se cumplirá con los requerimientos de diseño y el lineamiento establecidos por las normas que rigen el desarrollo de este proyecto, como por ejemplo las normas ASME, NFPA y API, enfocadas a las esferas de almacenamiento de GLP y al sistema de tuberías.

CAPÍTULO 2

GENERALIDADES

2.1. GAS LICUADO DE PETRÓLEO

El Gas Licuado de Petróleo conocido comúnmente en nuestro medio como gas de uso doméstico o gas embotellado, es un compuesto formado principalmente por la mezcla de los hidrocarburos propano (C_3H_8) y butano (C_4H_{10}), derivados del petróleo y representado por las siglas GLP.

A este compuesto se le denomina gas licuado, en virtud de que esta mezcla de propano y el butano pasan a estado líquido cuando son sometidos a presiones mayores que la presión atmosférica, a partir de la presión de vapor, y esta es la razón por la cual deben ser almacenados en tanques presurizados.

Los componentes hidrocarburos del GLP están en el petróleo crudo y en el gas natural, en unión con otros hidrocarburos, y se los obtiene después de varias operaciones en los procesos de destilación en plantas refinadoras.

En el caso que nos ocupa, es importante señalar que el GLP no es tóxico, pero sí inflamable en concentraciones normales de oxígeno en el aire. El GLP es un líquido incoloro e inodoro que fácilmente se transforma en gas, condición por la que para percibir su presencia en el medio ambiente se lo adiciona un odorizante.

El comportamiento del GLP dentro de recipientes obedece a factores tales como la densidad, la relación líquido - vapor, la presión y temperatura y considerando que coexisten las fases líquido y vapor permanecerán equilibradas siempre y cuando la temperatura del ambiente permanezca estable y las condiciones de operación y conservación de los recipientes sean las adecuadas.

Cuando la temperatura se modifica en aumento, ocurre en los recipientes que, una cantidad de GLP líquido calentado pasará a la fase gaseosa (vaporización), rompiendo el equilibrio existente y aumentando su presión interior, hasta que se restablezca un nuevo equilibrio entre fases con un contenido menor de fase líquida. Si ese aumento de presión temperatura resultó incontrolable, por ejemplo por la acción de fuegos alrededor de tanques, se emplea accesorios como válvulas de seguridad para mantener la presión dentro de los límites de operación.

Cuando el GLP líquido entra en contacto con el ambiente, se transforma en vapor aumentando su volumen en mas de 200 veces dependiendo de la mezcla propano - butano.

Para comprender las propiedades y comportamientos del GLP, es necesario conocer las características individuales de los gases que lo conforman:

Propano

Es un gas incoloro e inodoro de la serie de los alcanos de los hidrocarburos, de fórmula C_3H_8 . El propano no reacciona vigorosamente a temperatura ambiente; pero sí reacciona a dicha temperatura al mezclarlo con cloro y exponerlo a la luz. A temperaturas más altas, el propano arde en contacto con el aire, produciendo dióxido de carbono y agua, por lo que sirve como combustible. Es utilizado como combustible industrial y doméstico.

Tabla 2.1. Propiedades Propano

PROPIEDADES	PROPANO	
	Unidades SI	Unidades Inglesas
Peso Molecular	44.10	44.10
Temperatura de Fusión (@1 atm)	-187.6 °C	-305.7 °F
Temperatura de Ebullición (@1 atm)	-43.3 °C	-45.9 °F
Temperatura Crítica	96.7 °C	206.1 °F
Presión Crítica	4249.2 kPa	616.3 psia
Presión de Vapor (@70 °F)	868.7 kPa	126.0 psia
(@100 °F)	1316.3 kPa	190.9 psia
Densidad del Líquido		
(@70 °F, @P.sat)	498.1 Kg/m ³	31.1 lb/ft ³
(@100 °F, @P.sat)	470.8 Kg/m ³	29.4 lb/ft ³
Densidad del Vapor		
(@70 °F, @1atm)	1.86 Kg/m ³	0.12 lb/ft ³
(@100 °F, @1atm)	1.75 Kg/m ³	0.11 lb/ft ³
Densidad del Vapor		
(@70 °F, @ P.sat)	18.60 Kg/m ³	1.16 lb/ft ³
(@100 °F, @ P.sat)	28.61 Kg/m ³	1.79 lb/ft ³
Viscosidad del Líquido		
(@70 °F, @P.sat)	1.06E-04 Kg/m-s	0.2569 lbm/ft-hr
(@100 °F, @P.sat)	8.77E-05 Kg/m-s	0.2122 lbm/ft-hr
Viscosidad del Vapor		
(@70 °F, @1atm)	8.21E-06 Kg/m-s	0.0198 lbm/ft-hr
(@100 °F, @1atm)	8.65E-06 Kg/m-s	0.0209 lbm/ft-hr
Viscosidad del Vapor		
(@70 °F, @P.sat)	8.63E-06 Kg/m-s	0.0209 lbm/ft-hr
(@100 °F, @P.sat)	9.36E-06 Kg/m-s	0.0226 lbm/ft-hr
Cp del Líquido (@70 °F, @P.sat)	2.6415 kJ/kg-K	0.6309 BTU/lb-R
(@100 °F, @P.sat)	2.8453 kJ/kg-K	0,6796 BTU/lb-R
Cp del Vapor (@70 °F, @P.sat)	1.8286 kJ/kg-K	0.4368 BTU/lb-R
(@100 °F, @P.sat)	2.0272 kJ/kg-K	0.4842 BTU/lb-R
Cp/Cv del Vapor (@70 °F, @P.sat)	1.234	1.234
(@100 °F, @P.sat)	1.290	1.290

Fuente: MixProps 1.1.0 G&P Engineering Software

Butano

Es cualquiera de los dos hidrocarburos saturados o alcanos, de fórmula química C_4H_{10} : el n-butano (normal) y el i-butano (iso), o metilpropano. A pesar de que tienen la misma composición química, tienen una estructura diferente la cual causa las distintas propiedades que presentan.

Poseen una baja reactividad química a temperatura normal, pero arden con facilidad al quemarse en el aire o con oxígeno. Constituyen el componente más volátil de la gasolina, y a menudo se les añade propano en la elaboración del gas embotellado. No obstante, la mayoría del n-butano se transforma en butadieno, que se utiliza para fabricar caucho sintético y pinturas de látex.

Tabla 2.2. Propiedades Butano

PROPIEDADES	N-BUTANO	
	Unidades SI	Unidades Inglesas
Peso Molecular	58.12	58.12
Temperatura de Fusión (@1 atm)	-138.36 °C	-217.05 °F
Temperatura de Ebullición (@1 atm)	-0.30 °C	31.46 °F
Temperatura Crítica	152.07 °C	305.72°F
Presión Crítica	3797.01 kPa	550.71 psia
Presión de Vapor (@70 °F)	215.28 kPa	31.22 psia
(@100 °F)	357.47 kPa	51.85 psia
Densidad del Líquido		
(@70 °F, @P.sat)	577.71 Kg/m ³	36.07 lb/ft ³
(@100 °F, @P.sat)	557.64 Kg/m ³	34.81 lb/ft ³
Densidad del Vapor		
(@70 °F, @1atm)	2.48 Kg/m ³	0.15 lb/ft ³
(@100 °F, @1atm)	2.33 Kg/m ³	0.145 lb/ft ³
Densidad del Vapor		
(@70 °F, @ P.sat)	5.45 Kg/m ³	0.34 lb/ft ³
(@100 °F, @ P.sat)	8.82 Kg/m ³	0.55 lb/ft ³
Viscosidad del Líquido		
(@70 °F, @P.sat)	1.68E-04 Kg/m-s	0.4065 lbm/ft-hr
(@100 °F, @P.sat)	1.44E-04 Kg/m-s	0.3490 lbm/ft-hr

Tabla 2.2. Propiedades Butano (Continuación)

Viscosidad del Vapor (@70 °F, @1atm) (@100 °F, @1atm)	5.56E-06 Kg/m-s 5.87E-06 Kg/m-s	0.0135 lbm/ft-hr 0.0142 lbm/ft-hr
Viscosidad del Vapor (@70 °F, @P.sat) (@100 °F, @P.sat)	5.63E-06 Kg/m-s 6.02E-06 Kg/m-s	0.0136 lbm/ft-hr 0.0146 lbm/ft-hr
Cp del Líquido (@70 °F, @P.sat) (@100 °F, @P.sat)	2.4168 kJ/kg-K 2.5086 kJ/kg-K	0.5772 BTU/lb-R 0.5992 BTU/lb-R
Cp del Vapor (@70 °F, @P.sat) (@100 °F, @P.sat)	1.7146 kJ/kg-K. 1.8150 kJ/kg-K	0.4095 BTU/lb-R 0.4335 BTU/lb-R
Cp/Cv del Vapor (@70 °F, @P.sat) (@100 °F, @P.sat)	1.1152 1.1224	1.1152 1.1224

Fuente: MixProps 1.1.0 G&P Engineering Software

Tabla 2.3. Propiedades Iso-Butano

PROPIEDADES	ISO-BUTANO	
	Unidades SI	Unidades Inglesas
Peso Molecular	58.12	58.12
Temperatura de Fusión (@1 atm)	-145 °C	293 °F
Temperatura de Ebullición (@1 atm)	-11.71 °C	10.93 °F
Temperatura Crítica	135.03 °C	275.05 °F
Presión Crítica	3648.01 kPa	529.10 psia
Presión de Vapor (@70 °F) (@100 °F)	314.01 kPa 504.89 kPa	45.54 psia 73.23 psia
Densidad del Líquido (@70 °F, @P.sat) (@100 °F, @P.sat)	557.89 Kg/m ³ 536.21 Kg/m ³	34.83 lb/ft ³ 33.47 lb/ft ³
Densidad del Vapor (@70 °F, @1atm) (@100 °F, @1atm)	2.47 Kg/m ³ 2.33 Kg/m ³	0.15 lb/ft ³ 0.15 lb/ft ³
Densidad del Vapor (@70 °F, @ P.sat) (@100 °F, @ P.sat)	8.14 Kg/m ³ 12.88 Kg/m ³	0.51 lb/ft ³ 0.80 lb/ft ³
Viscosidad del Líquido (@70 °F, @P.sat) (@100 °F, @P.sat)	1.72E-04 Kg/m-s 1.49E-04 Kg/m-s	0.4165 lbm/ft-hr 0.3595 lbm/ft-hr

Tabla 2.3. Propiedades Iso-Butano (Continuación)

Viscosidad del Vapor (@70 °F, @1atm) (@100 °F, @1atm)	7.57E-06 Kg/m-s 7.98E-06 Kg/m-s	0.0138 lbm/ft-hr 0.0138 lbm/ft-hr
Viscosidad del Vapor (@70 °F, @P.sat) (@100 °F, @P.sat)	7.70E-06 Kg/m-s 8.24E-06 Kg/m-s	0.0186 lbm/ft-hr 0.0199 lbm/ft-hr
Cp del Líquido (@70 °F, @P.sat) (@100 °F, @P.sat)	2.42 kJ/kg-K 2.51 kJ/kg-K	0.5764 BTU/lb-R 0.6002 BTU/lb-R
Cp del Vapor (@70 °F, @P.sat) (@100 °F, @P.sat)	1.70 kJ/kg-K 1.82 kJ/kg-K	0.4058 BTU/lb-R 0.4338 BTU/lb-R
Cp/Cv del Vapor (@70 °F, @P.sat) (@100 °F, @P.sat)	1.1280 1.1398	1.1280 1.1398

Fuente: MixProps 1.1.0 G&P Engineering Software

Tabla 2.4. GLP (Propano 70% - Butano 30%)

PROPIEDADES	GLP	
	Unidades SI	Unidades Inglesas
Peso Molecular	47.54	47.54
Temperatura de Fusión (@1 atm)	°C	°F
Temperatura de Ebullición (@1 atm)	-30.21 °C	-22.38 °F
Temperatura Crítica	135.03 °C	275.05 °F
Presión Crítica	3648.01 kPa	529.10 psia
Presión de Vapor (@70 °F) (@100 °F)	722.48 kPa 1097.65 kPa	104.79 psia 159.20 psia
Densidad del Líquido (@70 °F, @P.sat) (@100 °F, @P.sat)	514.91 Kg/m ³ 489.80 Kg/m ³	32.1447 lb/ft ³ 30.5770 lb/ft ³
Densidad del Vapor (@70 °F, @1atm) (@100 °F, @1atm)	2.043 Kg/m ³ 1.924 Kg/m ³	0.128 lb/ft ³ 0.120 lb/ft ³
Densidad del Vapor (@70 °F, @ P.sat) (@100 °F, @ P.sat)	15.67 Kg/m ³ 23.99 Kg/m ³	0.9783 lb/ft ³ 1.4979 lb/ft ³
Viscosidad del Líquido (@70 °F, @P.sat) (@100 °F, @P.sat)	1.23E-04Kg/m-s 1.03E-04Kg/m-s	0.2969 lbm/ft-hr 0.2486 lbm/ft-hr

Tabla 2.4. GLP (Propano 70% - Butano 30%) (Continuación)

Viscosidad del Vapor (@70 °F, @1atm) (@100 °F, @1atm)	8.02E-06 Kg/m-s 8.45E-06 Kg/m-s	0.0194 lbm/ft-hr 0.0204 lbm/ft-hr
Viscosidad del Vapor (@70 °F, @P.sat) (@100 °F, @P.sat)	1.2E-05 Kg/m-s 1.3E-05 Kg/m-s	0.0289 lbm/ft-hr 0.0309 lbm/ft-hr
Cp del Líquido (@70 °F, @P.sat) (@100 °F, @P.sat)	2.5731 kJ/kg-K 2.7455 kJ/kg-K	0.6146 BTU/lb-R 0.6558 BTU/lb-R
Cp del Vapor (@70 °F, @P.sat) (@100 °F, @P.sat)	1.7886 kJ/kg-K 1.9542 kJ/kg-K	0.4272 BTU/lb-R 0.4668 BTU/lb-R
Cp/Cv del Vapor (@70 °F, @P.sat) (@100 °F, @P.sat)	1.2054 1.2426	1.2054 1.2426
Z Factor de Compresibilidad (@70 °F, @P.sat) (@100 °F, @P.sat)	0.8630 0.8134	0.8630 0.8134

Fuente: MixProps 1.1.0 G&P Engineering Software

2.2. PROCESO DE ALMACENAMIENTO DE GLP

2.2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

El objetivo de una terminal marítima es el de recibir gas licuado de petróleo que llega a través de un gasoducto, almacenarlo en los recipientes esféricos para posteriormente evacuarlo hacia un gasoducto de despacho.

Los recipientes a presión más adecuados para el almacenamiento de GLP son esferas por varias razones. Las esferas en comparación con los cilindros tienen la ventaja de que presentan la mitad del esfuerzo debido a presión interna y por consiguiente el espesor necesario es mucho menor. Las esferas tienen menos área de superficie de contacto con la atmósfera en comparación con cualquier otro recipiente, obteniéndose variaciones de temperatura más lentas dentro del líquido, lo que contribuye a reducir la evaporación, haciéndose que se reduzca la necesidad de relicuar el vapor. Por otra parte, un volumen considerable se puede almacenar mediante una esfera o bien por otros tanques de otro tipo, colocados en batería, por lo tanto la primera solución requiere de menos acero

y conexiones, la instalación requiere menor inversión en la obra civil y ocupa una menor superficie de terreno.

La recepción del GLP en la planta se lo hace sin la necesidad de bombas ya que llega por el gasoducto inclusive con una presión más alta que la de operación requerida, por lo que es necesario utilizar una válvula reductora de presión.

Una vez reducida la presión se necesita cuantificar el volumen de GLP recibido en la planta para lo cual se emplea un dispositivo de medición que debe ser altamente preciso. Este dispositivo también se necesita para cuantificar el volumen despachado.

Cuantificado el volumen, el GLP ingresa a las esferas por la línea de entrada.

Las principales líneas de tubería que se manejan en la planta son:

- Línea de entrada.- permite el ingreso del GLP líquido hasta las esferas de almacenamiento.
- Línea de salida.- permite la descarga del GLP líquido de las esferas hacia el gasoducto de despacho.
- Línea de alivio.- recoge el GLP proveniente de las diferentes válvulas de alivio que se hayan activado por sobrepresión.
- Línea de vapores.- recoge los vapores de la mezcla líquido-vapor de los recipientes que posteriormente serán relicuados.
- Línea de drenaje.- sirve para evacuar las sustancias diferentes al GLP que no son deseadas como por ejemplo componentes pesados (pentanos).
- Línea slop – bullet.- permite evacuar los líquidos del tanque bullet al slop y permite descargar el tanque slop.

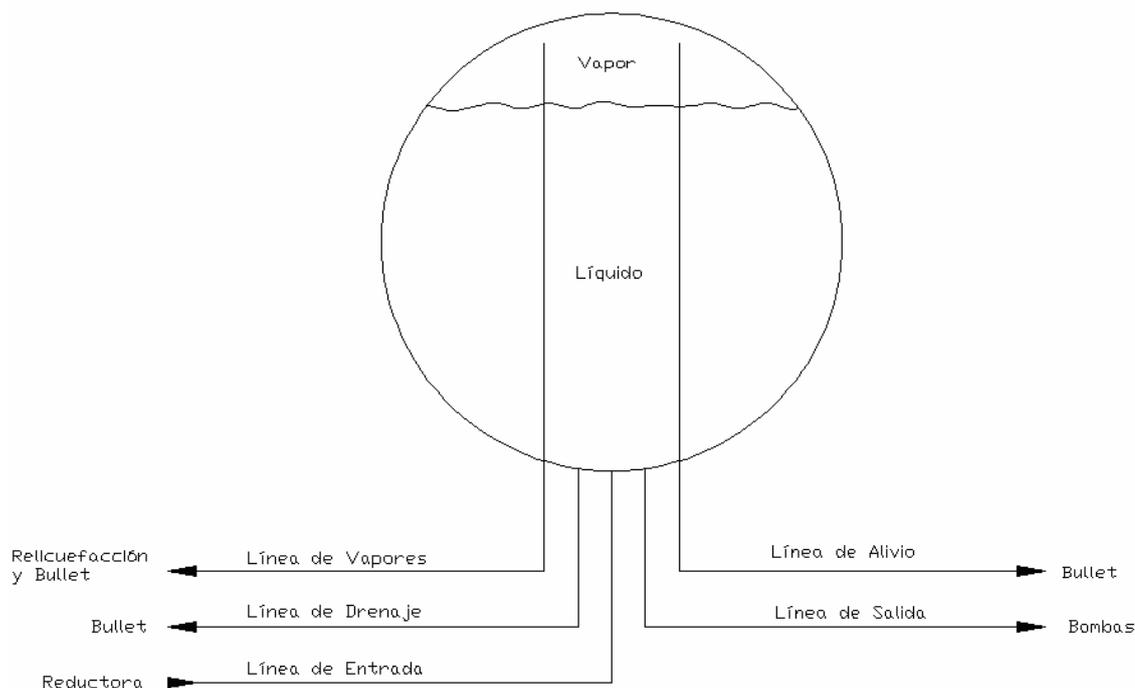


Figura 2.1. Esquema de Líneas de Tuberías en una Esfera

El despacho del GLP desde las esferas se lo realiza mediante bombas que elevan la presión a un valor definido en la tubería a la salida de la terminal a un caudal también predeterminado.

Una de las operaciones requeridas de la planta, es el trasvase el cual consiste en intercambiar GLP líquido de una esfera o otra, ya que se necesita para la recepción al requerir esferas con niveles bajos de líquido.

Para mantener la presión en los recipientes de almacenamiento dentro de los límites de operación se utiliza la unidad de relieves que transforma las fracciones de vapor en líquido para luego ser reingresado a las esferas. En varias circunstancias entra en funcionamiento la unidad de relieves:

- Cuando existe un incremento en la temperatura ambiente ya que hace que aumente la presión en el tanque al aumentar la presión de vapor de la mezcla.
- Al ingresar GLP líquido, ya que va desplazando al GLP vapor que se encuentra ocupando espacio en la esfera, que de no ser evacuado por la

unidad de relicuefacción, se iría comprimiendo y aumentando la presión progresivamente.

- Para relicuar los vapores de GLP existentes en el tanque bullet.

El funcionamiento de la unidad de relicuefacción esta dividido en dos partes:

- Compresión.- las fracciones de vapor ingresan a un compresor después de haber pasado por un separador de fases líquido-vapor, elevando su presión y temperatura.
- Enfriador.- este vapor sobrecalentado que entrega el compresor ingresa a un intercambiador de calor que lo enfría, haciendo que la mayor parte de este se condense, luego estas dos fases ingresan a un separador de fases líquido-vapor, del cual la fase vapor reingresa nuevamente al proceso de relicuefacción y la fase líquida ingresa nuevamente a la esfera.

Existe un equipo en esta planta de almacenamiento que es un vaporizador, necesario para mantener la presión en el recipiente esférico al ser evacuado el GLP líquido, mediante la utilización de una pequeña cantidad de GLP líquido de la línea de descarga que se vaporiza y se lo vuelve a reingresar por la línea de vapor.

En la planta de almacenamiento existe un recipiente comúnmente llamado tanque bullet, el cual sirve para recibir el GLP proveniente de las válvulas de alivio a través de la línea de alivio, y también diferentes compuestos provenientes del drenaje de las esferas y de los equipos y accesorios.

Los compuestos existentes dentro del tanque bullet son separados, los vapores de GLP existentes son sacados a través de la unidad de relicuefacción los cuales ingresan a la esfera como líquido, mientras que las gasolinas que son más densas son evacuadas al tanque slop que está a presión atmosférica. Al relicuar los vapores de GLP se produce que la presión en el tanque bullet vaya disminuyendo hasta un punto en el que casi todo el GLP sea evacuado y dejando solo gasolinas si es que existe o sino simplemente vapor de GLP.

Un equipo o sistema crítico en la operación de la planta siempre debe estar respaldado por otro de iguales características en paralelo que permanece en stand by para entrar en funcionamiento en caso de que el principal falle o cuando necesite recibir mantenimiento. Esta redundancia se considera en la sala de bombas, en el sistema de medición y reducción de presión, en el sistema de relicuefacción y en el sistema de vaporización.

2.2.2. REQUERIMIENTOS GENERALES DE LA PLANTA

A continuación se detallan los requerimientos generales a ser considerados para el diseño de esta planta:

- La capacidad nominal de almacenamiento requerida es de 16000 toneladas métricas.
- El GLP a ser almacenado tiene una mezcla de 70% propano y 30% butano en peso, sin embargo en ocasiones puede tener un contenido más alto de butano.
- En el ingreso a la planta el GLP tiene una presión de 180 psig (1241 kPa) y un caudal de 6000 bph (0.26498 m³/s).
- En el despacho de la planta el GLP tiene una presión de 220 psig (1516 kPa) y un caudal de 2500 bph (0.11041 m³/s).
- Esta terminal marina será construida al nivel del mar y la presión atmosférica es 14.696 psia (101.325 kPa)
- La temperatura ambiente es 25 °C, la temperatura ambiente máxima media es 31°C, la temperatura ambiente mínima media es 23 °C,.
- El diseño de la planta debe cubrir una vida de servicio de 20 años.

2.3. NORMAS PARA EL MANEJO DEL GLP.

Existen numerosos códigos y normas relativos al manejo de GLP que se aplican en diferentes países dependiendo de sus leyes o de las tendencias que han hecho que determinado código o norma sea de uso general en dicho país. En el caso de Ecuador, ha existido una notable influencia de las normas estadounidenses de tal manera que esta planta ha sido diseñada bajo esta tendencia.

Para el manejo del GLP, existen 2 normas estadounidenses que indican los lineamientos que debe cumplir el diseño de una planta de GLP.

2.3.1. API STANDARD 2510.- DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE INSTALACIONES DE LPG

Es una norma del Instituto Americano de Petróleo (American Petroleum Institute) que cubre el diseño, construcción y localización de terminales marinas de GLP, plantas de procesamiento de gas natural, refinerías, plantas petroquímicas y grupos de tanques. Este estándar cubre tanques de almacenamiento, sistemas de carga y descarga, tubería o equipo relacionado, todo esto de una manera muy general, sin procedimientos de cálculo que incluyan fórmulas o tablas, sino lineamientos explicativos en muchos de los cuales hacen referencia a otros códigos o estándares más específicos.

A pesar de que este estándar incluye dentro de su alcance terminales marinas de GLP, uno de sus párrafos indica que no debe ser aplicado en aquellas instalaciones cubiertas por la NFPA 58. Por esta razón para el diseño de esta planta de almacenamiento de GLP se empleó la NFPA 58.

2.3.2. NFPA 58.- CÓDIGO DE GAS LICUADO DE PETRÓLEO

Es una norma de la Asociación Nacional de Protección contra el Fuego (National Fire Protection Association) que se aplica a la operación de todos los sistemas de GLP entre los que está el diseño, construcción, instalación y operación de terminales marinas cuyo principal propósito es la recepción de GLP para la entrega a transportistas, distribuidores o usuarios.

Esta norma permite definir entre otras cosas presiones de diseño, accesorios y distancias mínimas de los tanques; parámetros de diferentes equipos como bombas y compresores y de sistemas de tuberías; dispositivos de seguridad como válvulas de alivio y sistemas de venteo; límites de llenado de tanques.

2.4. NORMAS PARA EL DISEÑO DE TUBERÍAS Y RECIPIENTES A PRESIÓN

2.4.1. NORMAS PARA EL DISEÑO DE RECIPIENTES A PRESIÓN.

Las normas empleadas para el diseño de recipientes a presión son las que se especifican en las normas para el diseño de plantas de GLP, específicamente la NFPA 58 que dice que los recipientes deben ser diseñados de acuerdo a la Sección VIII del Código de Calderas y Recipientes a Presión de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (American Society of Mechanical Engineers, ASME).

2.4.1.1. ASME Sección VIII.- Reglas para la Construcción de Recipientes a Presión

La Sección VIII consta de 3 divisiones, de las cuales sólo las dos primeras son aplicables en el diseño de recipientes en plantas de GLP, ya que la división 3 trata de Recipientes de Alta Presión (mayores a 10000 psi). El código ASME Sección VIII establece que es decisión del cliente bajo que división se hará el diseño y construcción (en nuestro caso diseño) del recipiente.

El usuario o su agente designado debe establecer los requerimientos de diseño para recipientes a presión. En este proyecto, el usuario es quien ha dado los requerimientos de diseño que deben ser considerados para el diseño de las esferas de almacenamiento.

2.4.1.1.1. ASME Sección VIII: División 1

El código ASME Sección VIII División 1 es el código de recipientes a presión como existió en el pasado (y sigue existiendo); trata las Reglas para la Construcción de Recipientes a Presión, y contiene los requerimientos mandatorios, prohibiciones específicas y guías no mandatorias para actividades de construcción, entendiéndose como construcción un término que

comprende materiales, diseño, fabricación, examinación, inspección, prueba, certificación y alivio de presión.

2.4.1.1.2. ASME Sección VIII: División 2 - Reglas Alternativas

El código ASME Sección VIII División 2 establece las Reglas Alternativas para la Construcción de Recipientes a Presión. En relación con las reglas de la División 1 de la Sección VIII, las reglas de la División 2 son más restrictivas en la selección de materiales que pueden ser usados pero permiten mayores valores de intensidad de esfuerzo de diseño a ser empleados en el rango de temperaturas sobre el cual el valor de intensidad de esfuerzo de diseño es controlado por el esfuerzo último o el esfuerzo de fluencia; son requeridos procedimientos de diseño más precisos y algunos detalles comunes de diseño son prohibidos; procesos de fabricación aceptables son delineados específicamente, y son requeridas examinación, prueba e inspección más completas.

La División 2 al ser más estricta permite determinar si es que un análisis de fatiga es necesario, y si lo es, da los pasos para diseñar bajo esta consideración. La teoría de falla utilizada en esta división es la teoría del esfuerzo cortante máximo, excepto en algunos casos específicos.

2.4.2. NORMAS PARA EL DISEÑO DE TUBERÍAS

La norma empleada para el diseño de tuberías es la que se especifica en la NFPA 58, que determina que todas las tuberías metálicas de GLP deben estar diseñadas e instaladas de acuerdo a ASME B31.3, Tuberías de Proceso (Process Piping), el cual forma parte de ASME B31, Tuberías de Presión (Pressure Piping).

2.4.2.1. ASME B31.3.- Tuberías de Proceso.

Las reglas del código ASME B31.3, Tuberías de Proceso, han sido desarrolladas considerando tubería típicamente encontrada en refinerías de petróleo; plantas químicas, farmacéuticas, textiles, de papel, y criogénicas; y plantas de proceso y terminales relacionadas. Este código prescribe los requerimientos para materiales y componentes, diseño, fabricación, ensamblaje, instalación, examinación, inspección y pruebas de tuberías.

Este código establece las bases para el diseño de un sistema de tuberías a partir de la determinación del Fluido de Servicio, que es un término general concerniente a la aplicación del sistema de tuberías a diseñar, considerando la combinación de las propiedades del fluido, condiciones de operación, y otros factores.

2.5. ESQUEMA GENERAL DE LA PLANTA

Esta planta de almacenamiento de GLP cuenta con áreas que están establecidas en:

- Reducción de presión y dispositivo de medición de entrada.
- Recipientes esféricos de GLP
- Sala de bombas
- Sistema de relicuefacción
- Sistema de vaporización
- Dispositivo de medición de salida.
- Recipientes adicionales Bullet y Slop.

Además en la infraestructura de una planta de almacenamiento se requiere construcciones civiles como son: cuarto de control, bodegas, parqueaderos y oficinas.

Esquema: Ver plano MEC-GLP-001

CAPÍTULO 3

DISEÑO DE LAS ESFERAS DE ALMACENAMIENTO

3.1. REQUERIMIENTOS PARA LAS ESFERAS DE ALMACENAMIENTO

Los requerimientos para los recipientes esféricos de almacenamiento, cumplen con los lineamientos de las siguientes normas:

- NFPA 58 Código de Gas Licuado de Petróleo (Liquefied Petroleum Gas Code).
- ASME Calderos y Recipientes a Presión Sección VIII Reglas para la construcción de Recipientes a Presión División 2 Reglas Alternativas (Boiler and Pressure Vessel, Section VIII Rules for Construction of Pressure Vessels, Division 2 Alternative Rules) .

Conforme a la Sección 2.2 Recipientes (Containers) de la norma NFPA 58 los recipientes deben ser diseñados acorde con las regulaciones del ASME Calderos y Recipientes a Presión Sección VIII Reglas para la Construcción de Recipientes a Presión.

La presión de diseño para los recipientes ASME debe estar de acuerdo con la tabla 2.2.2.2 Presión de Vapor Máxima y Presión de Diseño (Maximum Vapor Pressures and Design Pressures) de la norma NFPA 58. Con una presión de vapor de la mezcla de GLP de 150 psig a 100 °F se requiere una presión de diseño 187 psig.

Los recipientes esféricos serán diseñados para la temperatura ambiente de 25 °C y para una temperatura extrema de 60 °C con una corrosión permitida de 2 mm.

La capacidad requerida de la planta es 16000 t de GLP, el cual tiene que estar distribuido en cuatro recipientes esféricos, con una densidad de la mezcla de GLP de 514 kg/m³.

Se debe considerar el volumen operacional de cada recipiente, el cual está especificado en la norma NFPA en la Tabla 4.4.2.2 (b) Máximo Volumen de GLP Permitido (Maximum Permitted LPG Volumen) y es 91 % del volumen del recipiente esférico.

Cada recipiente esférico está diseñado para los siguientes ciclos de operación con temperaturas basadas principalmente en condiciones ambientales y en la recopilación de información experimental en sistemas similares:

Tabla: 3.1. Ciclos de Operación (Temperatura)

	Temperatura min. (°C)	Temperatura máx. (°C)	Ciclos al año	Ciclos totales
Ciclo 1	21	25	365	7300
Ciclo 2	21	60	365	7300

Y presiones basadas en la operación del recipiente, debido a la presión hidrostática al cargar y descargar el recipiente esférico:

Tabla: 3.2. Ciclos de Operación (Presión)

	Presión min. (kPa)	Presión máx. (kPa)	Ciclos al año	Ciclos totales
Ciclo 3	1034.21	1168.76	365	7300
Puesta en marcha - Paro	0	1168.76	1	20

Conforme a los requerimientos de materiales AM-100 Materiales Permitidos (Materials Permitted) del ASME Sección VIII División 2, el material seleccionado es acero al carbono SA-516-Gr70.

Tabla: 3.3. Propiedades de SA-516-Gr70

Propiedad	
Módulo de elasticidad	200600 MPa
Coeficiente de Poisson	0.3
Módulo de elasticidad para	77153.8 MPa

cortante	
Densidad	7750 Kg/m ³
Resistencia final	482.633 MPa
Resistencia a la fluencia	262.001 MPa
Coefficiente de expansión térmica	12.6 mm/mm/°C

Fuente: ASME Section II Materials Part. D

Este material es muy difundido en el medio con una alta accesibilidad y un costo menor en comparación con otros materiales, además de tener buena resistencia a altas temperaturas.

Para el diseño del recipiente a presión se considera la prueba hidrostática dada en AT-301 Prueba Hidrostática (Hydrostatic test), del ASME Sección VIII División 2, estableciendo el valor de presión:

$$P_{ph} = 1.25 \times P_d \times \frac{S_{amb}}{S_{Td}} \quad \text{Ec. 3.1}$$

Presión Hidrostática

$$D_i := 25400 \text{ mm}$$

Presión de Diseño:

$$P_d := 12.89 \cdot 10^2 \text{ kPa} \quad \text{Según NFPA 58 Tabla: 2.2.2.2}$$

Presión para la Prueba Hidrostática:

$$S_{m_amb} := 160647.844 \text{ Pa} \quad \text{Intensidad del esfuerzo a la temperatura de la Prueba Hidrostática (25 °C)}$$

$$S_{m_Td} := 160096.264 \text{ Pa} \quad \text{Intensidad del esfuerzo a la temperatura de diseño (60 °C)}$$

$$P_{ph} := 1.25 \cdot P_d \cdot \frac{S_{m_amb}}{S_{m_Td}}$$

$$P_{ph} = 1.617 \times 10^3 \text{ kPa} \quad \text{Presión de prueba hidrostática}$$

Las cargas para el diseño de los recipientes esféricos según AD-110 Cargas (Loadings) del ASME Sección VIII División 2, son listadas a continuación:

- Presión interna y externa, incluido la presión de líquido almacenado.

- Peso del recipiente con su contenido en operación normal o condiciones de pruebas.
- Cargas de viento y cargas sísmicas.
- Cargas aplicadas, como otros tanques, mecanismos de operación, aislamiento, recubrimientos de corrosión o erosión y tuberías.
- Reacciones producidas al recipiente por agarraderas, anillos, patas u otro tipo de soportes del recipiente.
- Cargas de impacto, incluidas las fluctuaciones rápidas de presión.

3.2. DISEÑO DE LAS ESFERAS

La Sección VIII División 2 del código ASME utiliza para el diseño de recipientes, la teoría de falla del esfuerzo cortante máximo, esfuerzo que es denominado intensidad del esfuerzo (stress intensity), que es definido como dos veces el esfuerzo cortante máximo. Para la verificación del cumplimiento de los esfuerzos admisibles que establece esta norma, se ha hecho uso de Cosmosworks, en donde también se puede calcular este tipo de esfuerzo.

Los recipientes esféricos, están constituidos por anillos horizontales los mismos que se dividen en pedazos llamados pétalos.

3.2.1. DIMENSIONAMIENTO.

El dimensionamiento cumpliendo la capacidad de cuatro recipientes esféricos de 4000 t cada uno, esta dado a continuación:

$$\rho := 514 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Densidad del GLP}$$

Para 4000 t:

$$m = 4000 \times 10^3 \text{ kg}$$

$$\rho := \frac{m}{V}$$

$$V_{op} := \frac{m}{\rho}$$

$$V_{op} := \frac{4000 \cdot 10^3}{514}$$

$$V_{op} = 7.782 \times 10^3 \text{ m}^3$$

$$V_t := \frac{V_{op}}{0.91}$$

91 % Tabla NFPA a 25 C

$$V_t = 8.552 \times 10^3 \text{ m}^3$$

$$d := \sqrt[3]{6 \cdot \frac{V_t}{\pi}}$$

$$d = 25.372 \text{ m}$$

Diámetro asumido para la esfera: 25400 mm

La distancia entre recipientes esta dada en la Tabla 3.2.2.2 Distancia de separación entre recipientes (Separation distances between containers) de la norma NFPA 58, la cual establece que para recipientes con una capacidad mayor a 3785 m³ sea un cuarto (1/4) de la suma de los diámetros.

$$d := \frac{1}{4} \cdot (25400 + 25400)$$

$$d = 12700 \text{ mm}$$

Esta distancia esta dada entre puntos tangentes entre cada recipiente esférico.

El cálculo de los espesores se lo realizará considerando la corrosión y la presión debida a la columna del líquido en cada uno de los anillos horizontales, los cuales serán nombrados de acuerdo al grafico explicativo:

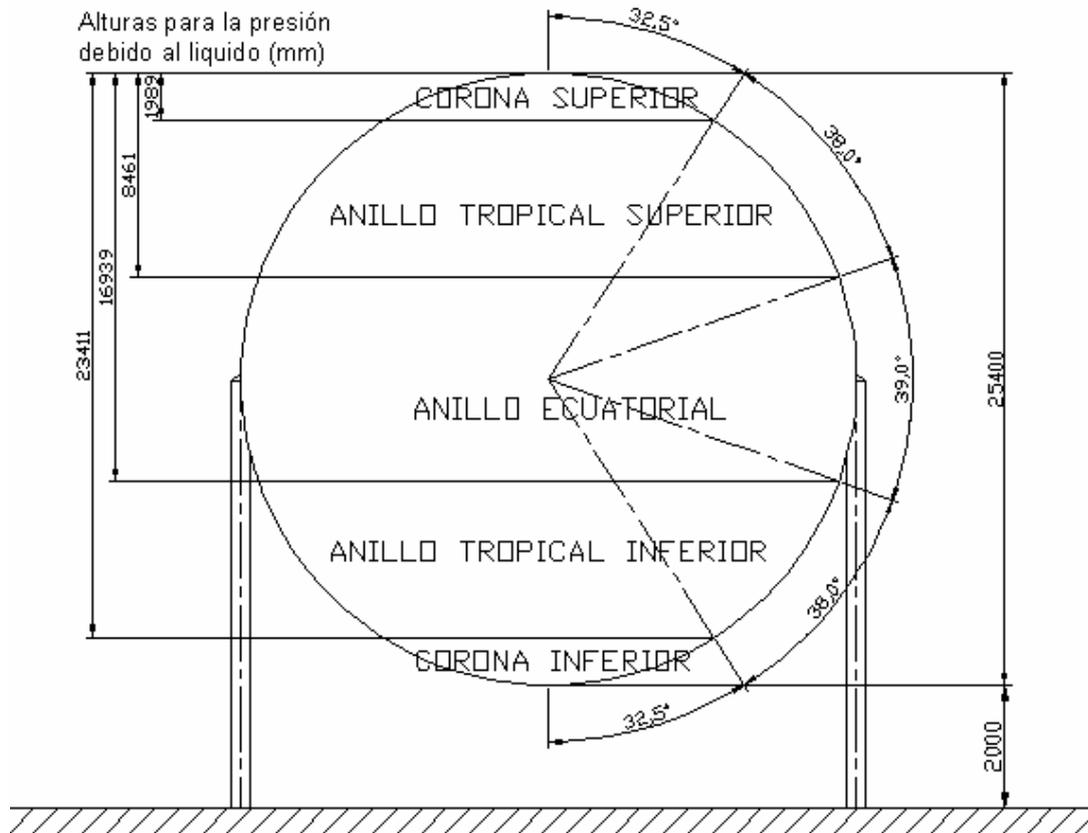


Figura 3.1. Distribución horizontal de anillos en la esfera.

Cada uno de estos anillos está ubicado con un ángulo el cual considera los tamaños de las placas y el área de apoyo de la columna.

3.2.2. ANÁLISIS ESTÁTICO.

El espesor mínimo requerido para el cuerpo del recipiente esférico es calculado en: AD-202 Cuerpos Esféricos (Spherical Shells) del ASME Sección VIII División 2, y se lo establecerá como el mayor espesor de todos los literales del párrafo.

Los valores de fuerza de membrana fueron obtenidos de CosmosWorks en base al esfuerzo de membrana:

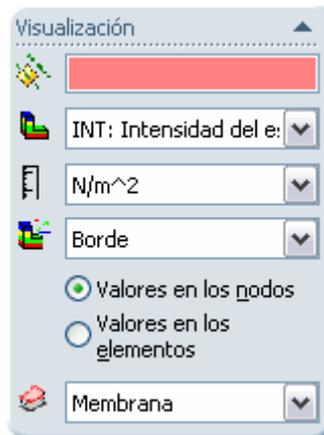


Figura 3.2. Pantalla para visualización de esfuerzo de membrana, CosmosWorks

Datos de Diseño:

Código de Diseño: ASME Sección VIII División 2

Presión de Diseño:(kPag)

$P_d := 1289 \text{ kPa}$

Según NFPA 58 Tabla: 2.2.2.2

Temperatura de Diseño:

$T_d := 60 \text{ }^\circ\text{C}$

Diámetro Interno:

$D_i := 25400 \text{ mm}$

Densidad del GLP:

$\rho := 540 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$

Corrosión Permitida:

$c := 2 \text{ mm}$

Materiales:

Cuerpo:

SA – 516Gr70

Espesor por Presión Interna AD-202 Cuerpos Esféricos

(a)

$$t := \frac{0.5 \cdot P \cdot R}{S - 0.25 \cdot P}$$

t = espesor mínimo requerido en el cuerpo de recipiente.

P = Presión interna más la presión debido al líquido almacenado

R = Radio interno de la esfera

S = Intensidad de esfuerzo de membrana, de acuerdo al material en la sección II, parte D

Si $P > 0.4S$, se debe usar la siguiente fórmula:

$$\ln\left(\frac{R+t}{R}\right) := \frac{0.5P}{S}$$

$$S := 160096 \text{ kPa}$$

A 60°C Tabla 2A Subparte 1
Parte D Sección II

$$R := \left(\frac{D_i}{2} + c\right)$$

$$R = 12702 \text{ m}$$

Radio Interno de la Esfera

(b) F = Fuerza de membrana

Si F es positivo se utiliza:

$$t := \frac{0.5 \cdot P \cdot R + F}{1.2S - 0.25 \cdot P}$$

Se considera el factor de 1.2 debido a la combinación de cargas; Tabla AD-150.1

(c)

Si F es negativo, se debe utilizar: AD-340 siendo usado para esferas.

Corona Inferior

$$h := 25.4 \text{ m}$$

Altura

$$Ph_{ci} := \rho \cdot g \cdot h$$

Presión Hidrostática

$$Ph_{ci} = 134553.96 \text{ Pa}$$

$$Ph_{ci} := \frac{Ph_{ci}}{1000} \text{ kPa}$$

$$Pd = 1289 \text{ kPa}$$

$$Pci := Pd + Ph_{ci}$$

$$Pci = 1423.554 \text{ kPa}$$

(a)

$$tci := \left(\frac{0.5 \cdot Pci \cdot R}{S - 0.25 \cdot Pci} + c\right)$$

$$tci = 58.6 \text{ mm}$$

Espesor de la corona inferior

(b)

$$Sm_ci := 606.53 \text{ kPa}$$

Esfuerzo de membrana

$$Fci := Sm_ci \cdot 0.057$$

$$Fci = 34.572 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Fuerza de membrana

$$tci := \left(\frac{0.5 \cdot Pci \cdot R}{S - 0.25 \cdot Pci} + c \right)$$

$$tci = 49.1 \text{ mm}$$

Espesor seleccionado: 59 mm

Anillo Tropical Inferior

$$h = 23.411 \text{ m}$$

Altura

$$Ph_ati := \rho \cdot g \cdot h$$

$$Ph_ati = 124017.43 \text{ Pa}$$

Presión Hidrostática

$$Ph_ati := \frac{Ph_ati}{1000} \text{ kPa}$$

$$Pd = 1289 \text{ kPa}$$

$$Pati := Pd + Ph_ati$$

$$Pati = 1413.02 \text{ kPa}$$

(a)

$$tati := \left(\frac{0.5 \cdot Pati \cdot R}{S - 0.25 \cdot Pati} + c \right)$$

$$tati = 58.2 \text{ mm}$$

Espesor del anillo tropical inferior

(b)

$$Sm_ati := 12440 \text{ kPa}$$

Esfuerzo de membrana

$$Fati := Sm_ati \cdot 0.0565$$

$$Fati = 702.86 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Fuerza de membrana

$$tati := \left(\frac{0.5 \cdot Pati \cdot R + Fati}{1.2S - 0.25 \cdot Pati} + c \right)$$

$$tati = 48.8 \text{ mm}$$

Espesor seleccionado: 58.5 mm

Anillo Ecuatorial

$$h = 16.939 \text{ m}$$

Altura

$$Ph_{ae} := \rho \cdot g \cdot h$$

Presión Hidrostática

$$Ph_{ae} = 89732.66 \text{ Pa}$$

$$Ph_{ae} := \frac{Ph_{ae}}{1000} \text{ kPa}$$

$$Pd = 1289 \text{ kPa}$$

$$Pae := Pd + Ph_{ae}$$

$$Pae = 1378.73 \text{ kPa}$$

(a)

$$tae := \left(\frac{0.5 \cdot Pae \cdot R}{S - 0.25 \cdot Pae} + c \right)$$

$$tae = 56.8 \text{ mm}$$

Espesor del anillo ecuatorial

(b)

$$Sm_{ae} := 20689 \text{ kPa}$$

Esfuerzo de membrana

$$Fae := Sm_{ae} \cdot 0.055$$

$$Fae = 1137.89 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Fuerza de membrana

$$tae := \left(\frac{0.5 \cdot Pae \cdot R + Fae}{1.2S - 0.25 \cdot Pae} + c \right)$$

$$tae = 47.7 \text{ mm}$$

Espesor seleccionado: 57 mm

Anillo Tropical Superior

$$h = 8.461 \text{ m}$$

Altura

$$Ph_{ats} := \rho \cdot g \cdot h$$

Presión Hidrostática

$$Ph_{ats} = 44821.3 \text{ Pa}$$

$$Ph_{ats} := \frac{Ph_{ats}}{1000} \text{ kPa}$$

$$Pd = 1289 \text{ kPa}$$

$$Pats := Pd + Ph_{ats}$$

$$Pats = 1333.82 \text{ kPa}$$

(a)

$$tats := \left(\frac{0.5 \cdot Pats \cdot R}{S - 0.25 \cdot Pats} + c \right)$$

$$tats = 55.0 \text{ mm}$$

Espesor del anillo tropical superior

(b)

$$Sm_ats := 1846 \text{ kPa}$$

Esfuerzo de membrana

$$Fats := Sm_ats \cdot 0.053$$

$$Fats = 97.84 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Fuerza de membrana

$$tats := \left(\frac{0.5 \cdot Pats \cdot R + Fats}{1.2S - 0.25 \cdot Pats} + c \right)$$

$$tats = 46.2 \text{ mm}$$

Espesor seleccionado: 55 mm

Corona Superior

$$h = 10989 \text{ m}$$

Altura

$$Ph_cs := \rho \cdot g \cdot h$$

Presión Hidrostática

$$Ph_cs = 10536.53 \text{ Pa}$$

$$Ph_cs := \frac{Ph_cs}{1000} \text{ kPa}$$

$$Pd = 1289 \text{ kPa}$$

$$Pcs := Pd + Ph_cs$$

$$Pcs = 1299.54 \text{ kPa}$$

(a)

$$tcs := \left(\frac{0.5 \cdot Pcs \cdot R}{S - 0.25 \cdot Pcs} + c \right)$$

$$tcs = 53.7 \text{ mm}$$

Espesor de la corona superior

(b)

$$Sm_cs := 601.52 \text{ kPa}$$

Esfuerzo de membrana

$$Fcs := Sm_cs \cdot 0.052$$

$$Fcs = 31.279 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Fuerza de membrana

$$tcs := \left(\frac{0.5 \cdot Pcs \cdot R + Fcs}{1.2S - 0.25 \cdot Pcs} + c \right)$$

tcs = 45.0 mm

Espesor seleccionado: 54 mm

3.2.3. ANÁLISIS DINÁMICO.

El análisis dinámico considerado en la carga de viento y sísmico según el código ASME Sección VIII División 2, en el párrafo AD-150 de requerimientos de diseño, establece que la carga de viento y la sísmica no necesitan ser asumidas que ocurren simultáneamente.

3.2.3.1. Carga de Viento

Los recipientes esféricos son diseñados para soportar cargas de viento, para lo cual con la ayuda de CosmosFlow se ha realizado el análisis (anexo B), para una velocidad de viento de 50 m/s en una sola dirección. Con este programa se obtienen las presiones que deben ser consideradas en el análisis dinámico con Cosmosworks.

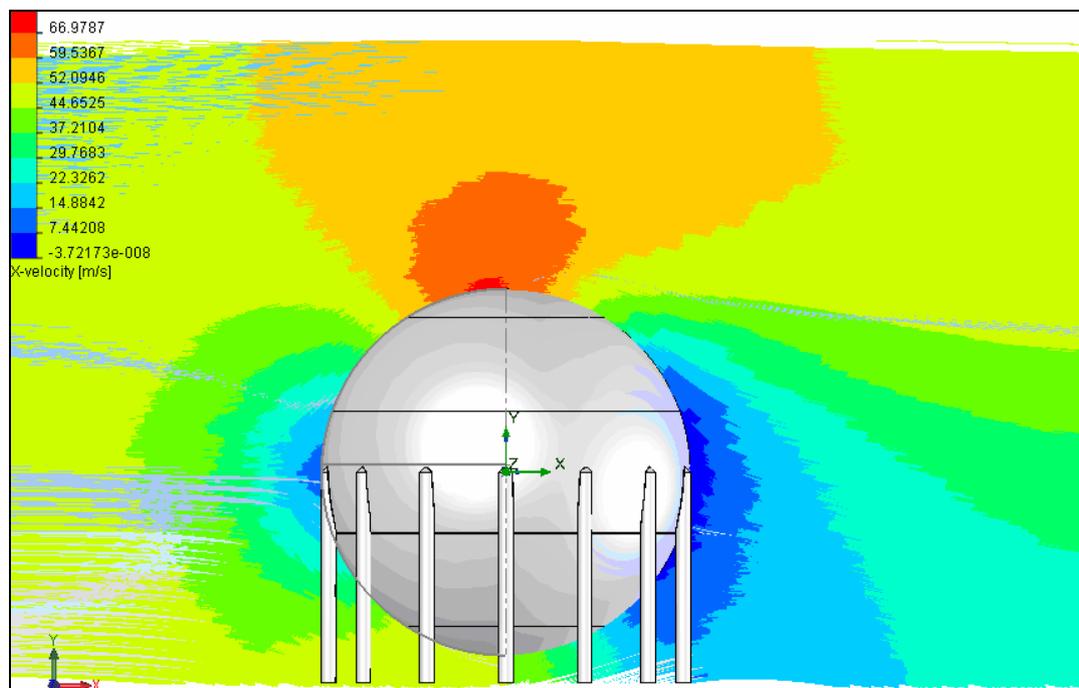


Figura 3.3. Diagrama de velocidad de viento aplicado a la esfera, CosmosFlow

Con esta velocidad definida a lo largo del eje x; se obtiene en la esfera una distribución de presiones en todo el cuerpo.

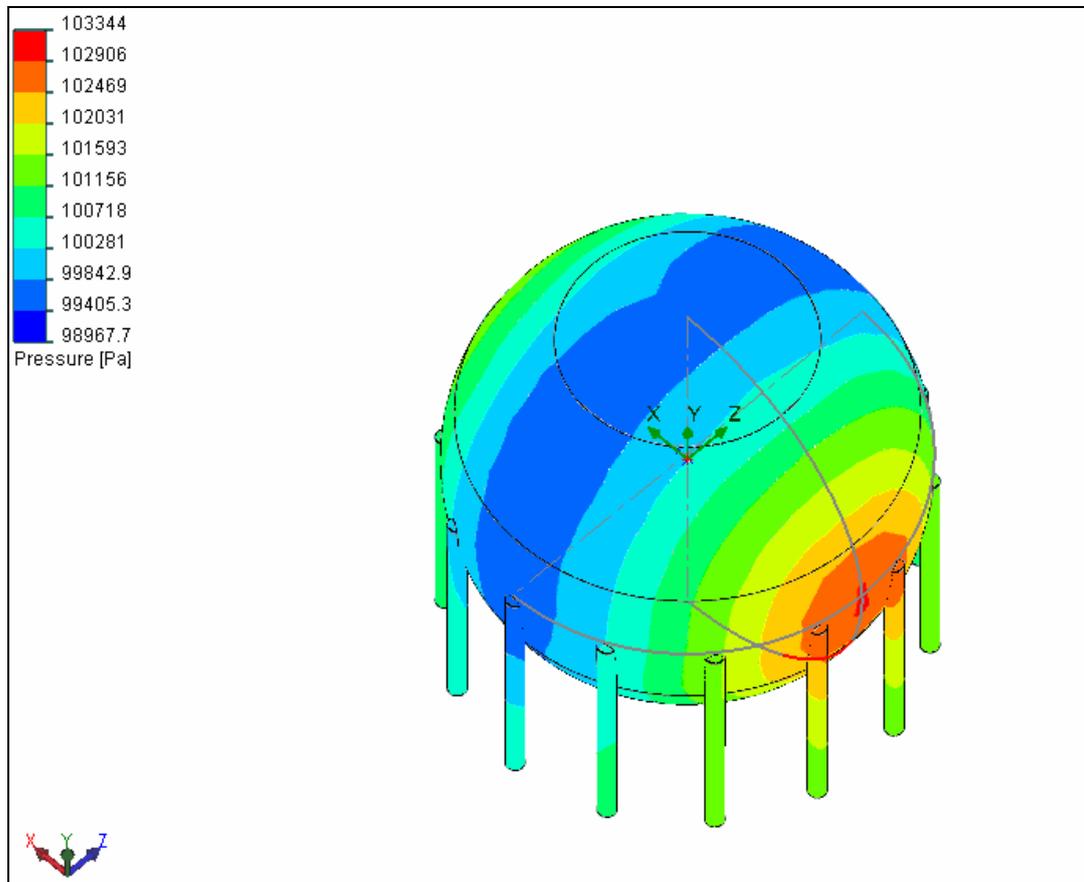


Figura 3.4. Distribución de presión por carga de viento en la esfera, CosmosFlow

En este punto del análisis se obtienen los datos de presión para cada coordenada para generar una ecuación de distribución de presiones que es ingresada en Cosmosworks. Esta ecuación es generada con la ayuda de Mathcad (ver anexo D) y es la siguiente:

$$P = -16.023 y^2 - 32.216 y + 0.094 x - 19.672 x^2 + 1494 \text{ (Pa)} \quad \text{Ec. 3.2}$$

3.2.3.2. Carga Sísmica

La carga sísmica del recipiente esférico es calculada según el estándar ASCE Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (American Society of Civil

Engineers), con el cual se obtiene una aceleración que será ingresada a CosmosWorks para el análisis. Para los cálculos de los efectos sísmicos por la zona geográfica, se han proporcionado los siguientes datos:

- Coeficiente sísmico máximo efectivo de aceleración, $A_a = 0.1$
- Coeficiente sísmico máximo efectivo de aceleración relacionado a la velocidad, $A_v = 0.1$
- Suelo rígido (tipo D)

3.2.3.2.1. Cálculo de Carga Sísmica para Recipientes ASCE 7

$$F_p := \frac{a_p \cdot A_p \cdot I_p \cdot W_p}{R_p} \quad \text{ASCE 7 ecuación 9.3.1.3-2}$$

$$a_p := 2.5$$

Factor de amplificación. Tabla 9.3.3.2

$$R_p := 4$$

Factor de modificación de respuesta. Tabla 9.3.3.2

$$I_p := 1.5$$

Factor de importancia. Sección 9.3.1.5

Según la sección 9.2.3.3, el período no puede exceder $C_u \cdot T_a$:

$$h_n := 27.4 \text{ m}$$

Altura de la estructura.

$$C_t := 0.073$$

Coeficiente para el período aproximado

$$T_a := C_t \cdot h_n^{\frac{3}{4}}$$

$$T_a = 0.874 \text{ s}$$

Período fundamental aproximado.

Coeficiente para límite superior de Período

$$C_u := 1.7$$

$$T_{\max} := C_u \cdot T_a$$

$$T_{\max} = 1.486 \text{ s}$$

Período fundamental máximo.

Como el período calculado no excede el máximo, se toma el período de la estructura

$T := 0.54814$ Período calculado en CosmosWorks
 Tipo de suelo: D
 $A_a := 0.1$ Coeficiente sísmico máximo efectivo de aceleración

 $A_v := 0.1$ Coeficiente sísmico máximo efectivo de aceleración
 relacionado a la velocidad

 $C_a := 0.16$ Coeficiente sísmico basado en el tipo de suelo y el valor de
 A_a : Tabla 9.1.4.2.4A

 $C_v := 0.17$ Coeficiente sísmico basado en el tipo de suelo y el valor de
 A_v : Tabla 9.1.4.2.4B

 $A_s := \frac{1.2 \cdot C_v}{T^{\frac{2}{3}}}$

 $A_s = 0.305$ Coeficiente de aceleración correspondiente a la estructura

 A_r como máximo puede tomar el valor de $4C_a$
 $A_r := 2 \cdot A_s$
 $A_r = 0.609$
 $A_r := 4 \cdot C_a$
 $A_r = 0.64$
 Se toma el valor de 0.609 para A_r según la relación 9.3.1.3-4

 $A_r := 0.609$ Coeficiente del componente de aceleración a
 nivel del techo de la estructura.

 $x := 13.7 \text{ m}$ Altura del centro de gravedad en la estructura.
 $h := 27.4 \text{ m}$ Altura promedio del techo de la estructura.

 $A_p := C_a + (A_r - C_a) \cdot \left(\frac{x}{h}\right)$ Coeficiente del componente de aceleración
 para un punto de la estructura.
 $A_p = 0.384$

 $F_p := \frac{a_p \cdot A_p \cdot I_p \cdot W_p}{R_p}$

Para simular en CosmosWorks esta fuerza que debe ser distribuida en el sistema, introducimos una aceleración que producirá la fuerza determinada. Considerando que Fuerza = (masa)(aceleración), esta aceleración viene determinada por:

$$a_h := \frac{a_p \cdot A_p \cdot I_p}{R_p} \cdot g$$

$$a_h = 3.535 \frac{m}{s^2}$$

Debido a la simetría de la esfera esta aceleración es ingresada en una sola dirección que es el eje x, generando un desplazamiento lateral en condiciones de operación, esto es con GLP y presión de vapor en el recipiente.

Nombre de modelo: esfera2005
 Nombre de estudio: Operacion+Sismica
 Tipo de trazado : Desplazamiento estático Trazado1
 Escala de deformación: 133.045

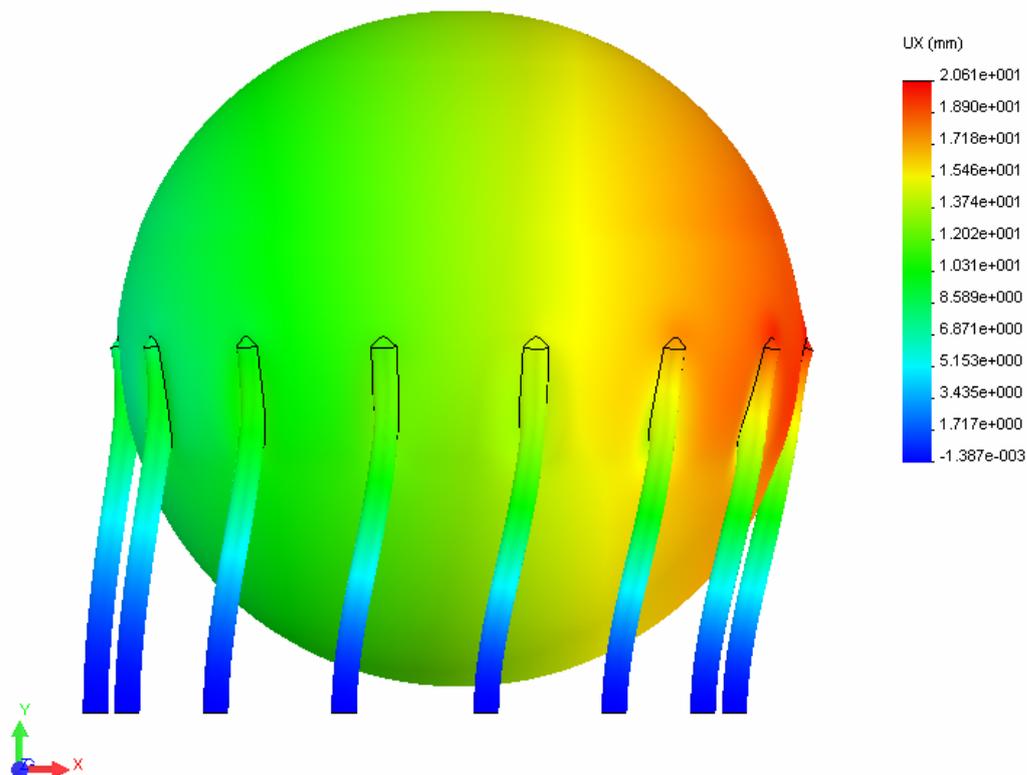


Figura 3.5. Desplazamiento en dirección x por carga sísmica

El objetivo de este análisis es calcular la fuerza de reacción horizontal debido a la carga sísmica para con esta fuerza diseñar los tensores en las columnas que la contrarrestarán, protegiendo así la estructura de la carga sísmica.

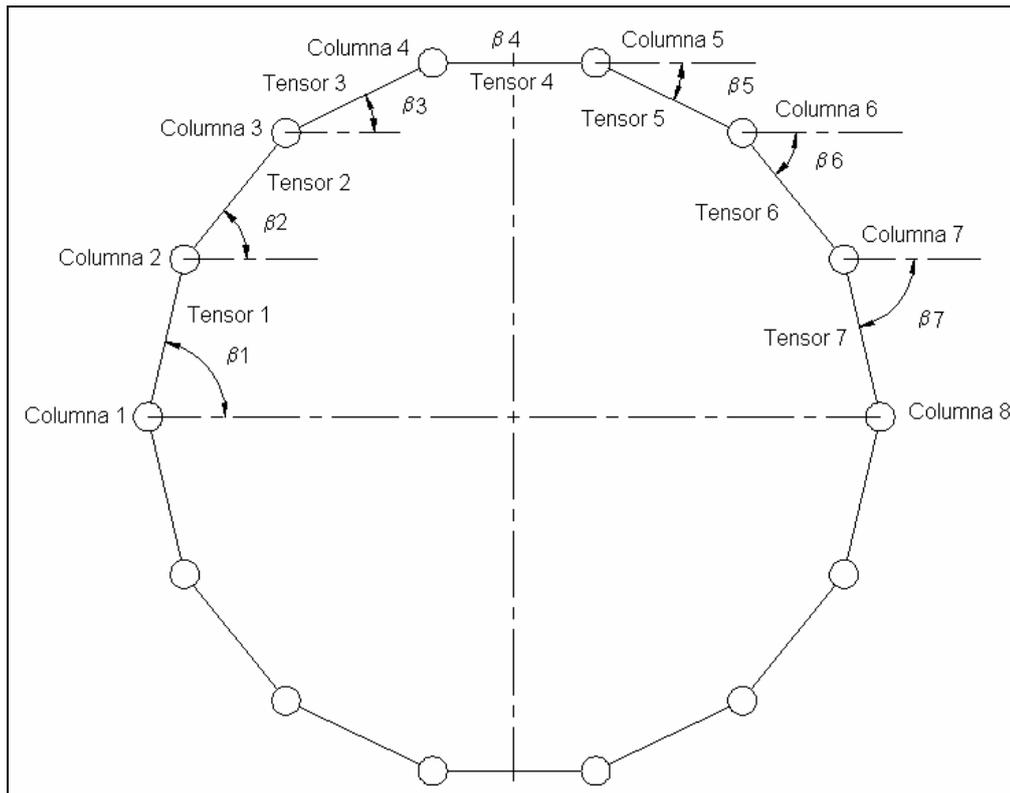


Figura 3.6. Disposición superior de sensores en la esfera entre columna

En el diseño de los sensores se considera la ubicación de las 14 columnas en el recipiente y ubicación del tensor en la columna, para de esta manera determinar la fuerza en el tensor a mayor tensión.

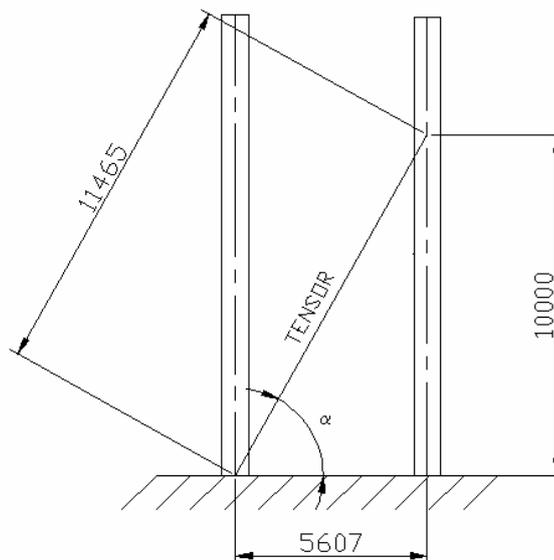


Figura 3.7. Ubicación lateral del tensor en la columna

La geometría de las columnas nos permite calcular para siete sensores y luego considerar el total de sensores.

Tabla: 3.4. Coordenadas extremas del tensor desplazado

Tensor	Coordenada columna parte inferior			Coordenada columna parte superior		
	x1	z1	y1	x2	z2	y2
1	-12600.0	0.0	0	-11344.2	-5466.9	10000
2	-11352.2	-5466.9	0	-7846.5	-9851.1	10000
3	-7856.0	-9851.1	0	-2792.4	-12284.1	10000
4	-2803.8	-12284.1	0	2816.6	-12284.1	10000
5	2803.8	-12284.1	0	7869.2	-9851.1	10000
6	7856.0	-9851.1	0	11365.5	-5466.9	10000
7	11352.2	-5466.9	0	12613.3	0.0	10000

Las coordenadas de cada tensor ubicado en cada columna y los ángulos del tensor nos permiten encontrar el componente de fuerza en el eje x de cada tensor. El tensor que soporta la mayor fuerza es el número cuatro y con respecto a este se han calculado las proporciones para los otros tensores; a esta fuerza en el tensor se la ha denominado Ft.

Tabla: 3.5. Componente de fuerza x en el tensor.

Tensor	Delta δ	Proporción Fuerza	cos α	cos β	Componente de fuerza x
1	0.873	0.139	0.489	0.223	0.015
2	2.901	0.463	0.489	0.623	0.141
3	5.028	0.802	0.489	0.901	0.354
4	6.266	1.000	0.489	1.000	0.489
5	5.823	0.929	0.489	0.901	0.410
6	4.063	0.648	0.489	0.623	0.198
7	1.455	0.232	0.489	0.223	0.025

La componente de fuerza de reacción en x producida por la carga sísmica es:
3968400 N:

$$0.015F_t + 0.141F_t + 0.354F_t + 0.489F_t + 0.410F_t + 0.198F_t + 0.025F_t + 0.015F_t + 0.141F_t + 0.354F_t + 0.489F_t + 0.410F_t + 0.198F_t + 0.025F_t = 3968400N$$

$$3.266F_t = 3968400 N$$

$$F_t = 1215064 N$$

La mayor fuerza asumida por el tensor es igual a: 1215064 N, con la cual se dimensiona el tensor que se utilizará.

3.2.3.2.2. Cálculo de tensor

$F_t := 1215064\text{N}$ Fuerza en el tensor

Características del material del tensor:

AISI 4340

$S_y := 860000000\text{Pa}$ Esfuerzo de fluencia

$E := 2 \cdot 10^{11}\text{Pa}$

$FS := 1.5$ Factor de seguridad

$S_{ad} := \frac{S_y}{FS}$ Esfuerzo Admisible

$S_{ad} = \frac{F_t}{A}$

$A := \frac{F_t}{S_{ad}}$

$A = 2.119 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ Área a la tracción requerida de la sección

Para esta área se selecciona una barra de diámetro 63.5 mm (2 ½ pulg), que es unida a la columna mediante un pasador de horquilla (clevis) número 7 (ver Anexo E).

3.2.3.3. Columnas.

Se ha diseñado con las especificaciones AISC Instituto Americano de Construcciones de Acero (American Institute of Steel Construction) considerando que es una columna a compresión axial y flexión. Con la ayuda de CosmosWorks se obtienen los valores de fuerza y momentos en la parte inferior de la columna considerando las condiciones de cargas siguientes:

- Cargas en la prueba hidrostática.
- Cargas de operación más sísmica o viento.

Se partió de un diámetro y un espesor el cual fue modificado hasta cumplir con los requerimientos de la norma AISC. En el número de columnas se considera su alineación y distancia entre columnas. Para las cargas de la prueba hidrostática no existen fuerzas externas como es el caso de la carga sísmica o de viento, por lo que los momentos serán iguales en cualquier columna. Se considera para este análisis la columna uno (1) de acuerdo al siguiente esquema:

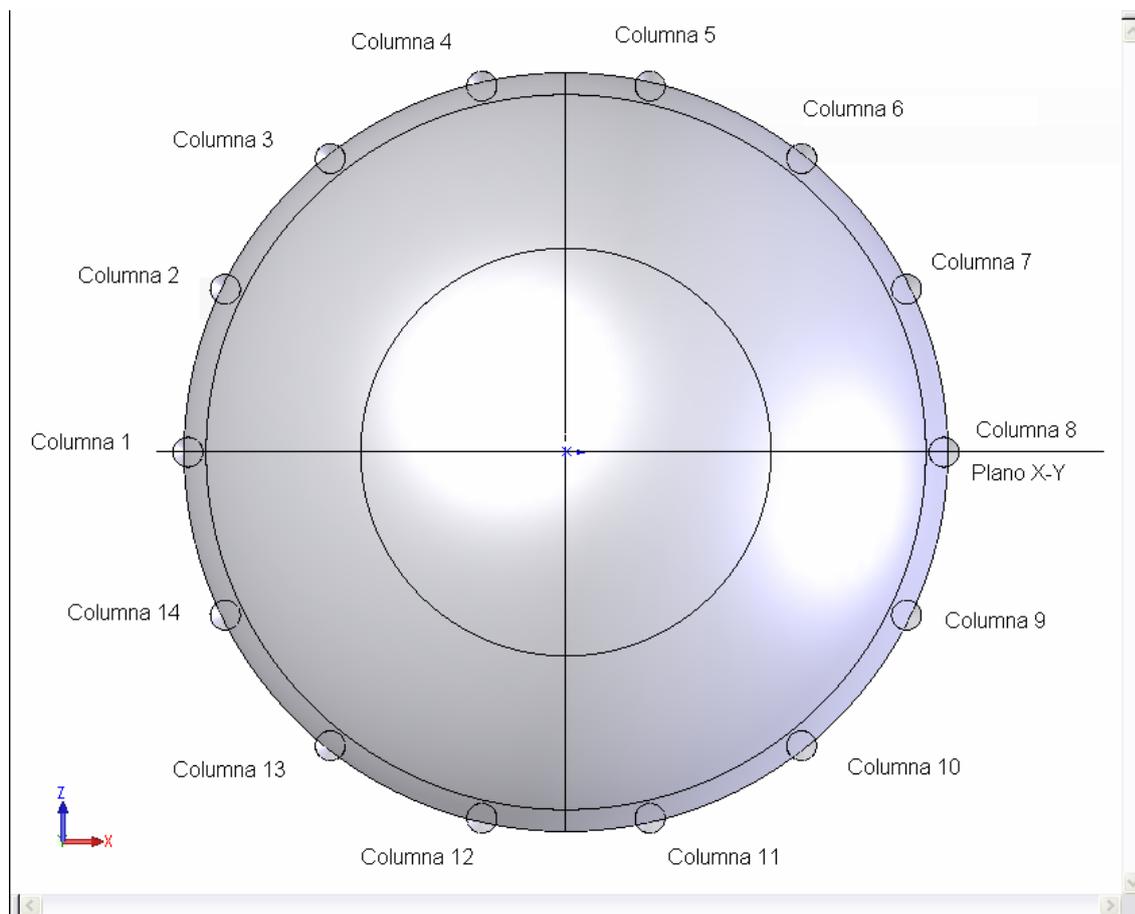


Figura 3.8. Parte inferior de recipiente esférico

Definidos los materiales, espesores, fuerzas y restricciones en Cosmosworks se realiza un análisis y se procede a obtener los datos, sabiendo que al calcular los momentos en la parte inferior de la columna uno, solo existen momentos alrededor del eje z y no del eje x.

Para calcular el momento en el eje z obtenemos el momento resultante del contorno seleccionado en la columna uno:

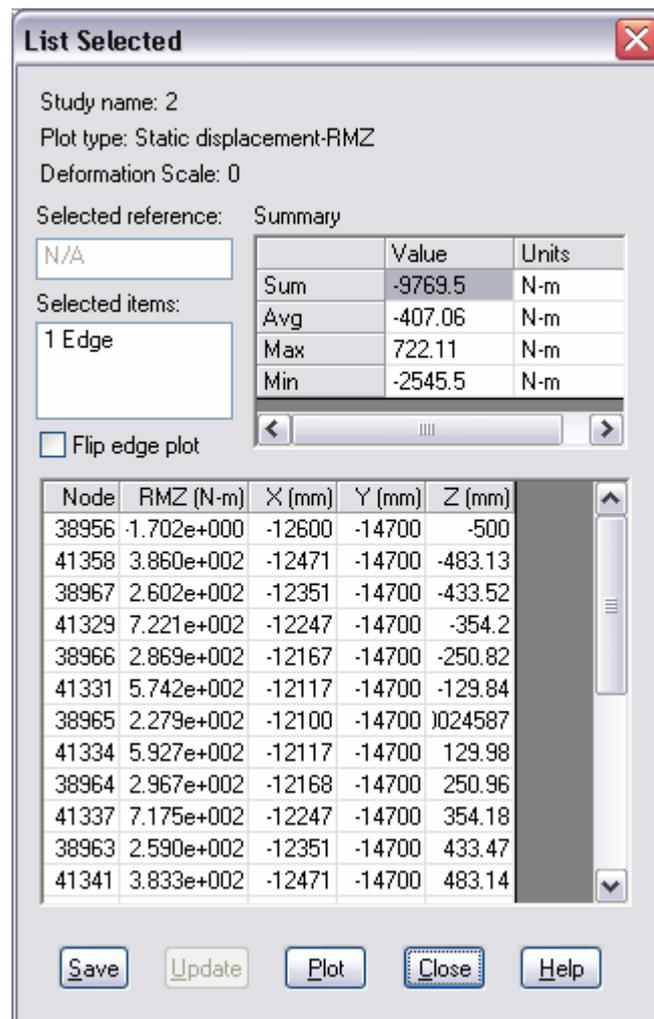


Figura 3.9. Momento en el eje z para cargas en la prueba hidrostática

El momento en el contorno seleccionado es igual a: -9769.5 Nm, luego se suma el momento producido por las fuerzas de reacción F_y y multiplicado por la distancia determinada por las coordenadas de cada nodo al eje correspondiente mediante los datos obtenidos de Cosmosworks como se muestra en el ventana:

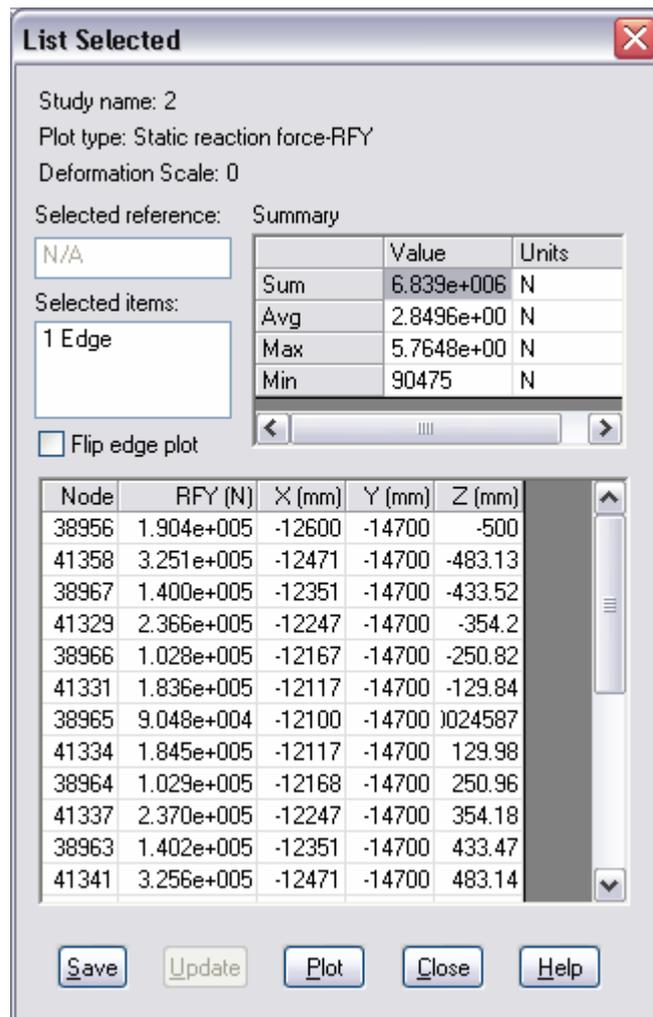


Figura 3.10. Fuerza de Reacción en y para cargas en la prueba hidrostática

De esta manera el momento total alrededor del eje z es: -922481.49 Nm.

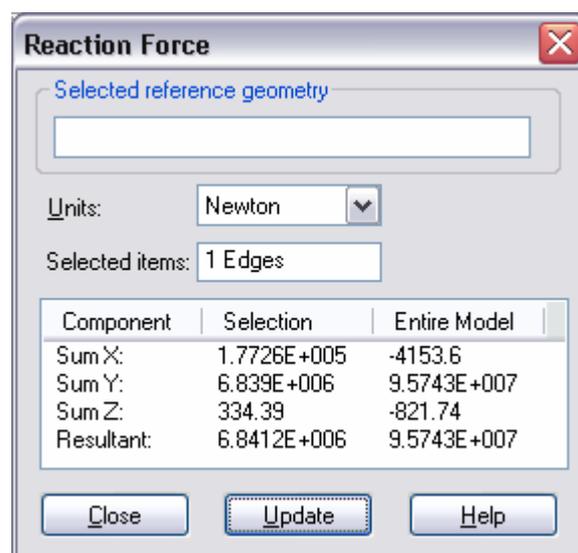


Figura 3.11. Fuerzas de reacción para cargas en la prueba hidrostática

La fuerza de reacción F_y en la columna es: 6838785.71 N y la fuerza transversal F_x es igual a: 177260.315 N, con estos valores de fuerzas y momentos en la parte inferior podemos obtener en la parte superior de la columna.

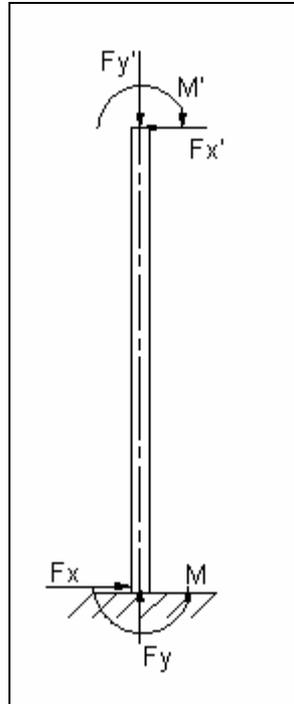


Figura 3.12. D. C. L. Para una columna

En el cálculo de la columna con carga de operación más sísmica o viento, se considera la carga sísmica ya que es más crítica que la carga de viento y se vuelve a realizar el análisis de la columna, considerando la fuerza de compresión producida por el tensor en la columna, como se muestra a continuación:

3.2.3.3.1. Cálculo de la Columna (Prueba Hidrostática)

Características de la columna:

$d_i := 1\text{m}$

Diámetro Interno de la columna

$t := 50\text{mm}$

Espesor de la Columna

$$A := \pi \cdot \left(\frac{d_i}{2} + t \right)^2 - \pi \cdot \left(\frac{d_i}{2} \right)^2$$

$A = 0.165\text{ m}^2$

Área de la columna

$L := 14700\text{mm}$ Longitud de la columna

$$r_y := \frac{\sqrt{(d_i + 2 \cdot t)^2 + d_i^2}}{4}$$

$r_y = 0.372 \text{ m}$ Radio de gravitación

$$I := 0.049 \cdot [(d_i + 2t)^4 - d_i^4]$$

$I = 0.023 \text{ m}^4$ Inercia del anillo

Fuerzas y Momentos en la columna

$F_y := 6838785.71\text{N}$ Fuerza de compresión (masa metal y líquido de la esfera)

$M := 922481.639\text{Nm}$ Momento en la parte inferior de la columna

$F_x := 177260.315\text{N}$ Fuerza cortante en la parte inferior de la columna

$$M_v := F_x \cdot L$$

$M_v = 2.606 \times 10^6 \text{ N.m}$ Momento debido a la fuerza transversal

$$M' := M_v + M$$

$M' = 3.528 \times 10^6 \text{ N.m}$ Momento en la parte superior de la columna

Características del material de la columna según AISC:

$S_y := 248 \cdot 10^6 \text{ Pa}$ Especificaciones ASTM SA-36

$$E := 2 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$$

Cálculo de la columna según AISC sec. 1.5 y 1.6 en compresión axial y pandeo.

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_m \cdot f_b}{\left(1 - \frac{f_a}{F_e}\right) F_b} \leq 1.0$$

Los miembros sujetos a compresión axial y esfuerzo flector, cumplen con estos requerimientos de estas dos ecuaciones.

$$\frac{f_a}{0.60 F_y} + \frac{f_b}{F_b} \leq 1.0$$

$f_a := \frac{F_y}{A}$ Esfuerzo axial calculado

$$f_a = 4.146 \times 10^7 \text{ Pa}$$

$$k := 1.2$$

Factor de condición de extremo Tabla C 1.8.1

$$C_c := \sqrt{\frac{2 \cdot \pi^2 E}{S_y}}$$

$$C_c = 126.169$$

Relación de esbeltez

$$\frac{k \cdot L}{r_y} = 47.464$$

Longitud efectiva de la columna

$$\frac{kL}{r_y} < C_c$$

$$F_S := \frac{5}{3} + \frac{3}{8} \cdot \frac{\frac{k \cdot L}{r_y}}{C_c} - 1 \cdot \frac{\left(\frac{k \cdot L}{r_y}\right)^3}{C_c^3}$$

$$F_S = 1.754$$

Factor de seguridad tomado por la AISC

$$F_a := \frac{S_y}{F_S} \cdot \left[1 - \frac{\left(\frac{k \cdot L}{r_y}\right)^2}{2C_c^2} \right]$$

Esfuerzo axial de acuerdo a las características de la columna.

$$F_a = 1.313 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$F_b := 0.6 \cdot S_y$$

Esfuerzo Flector de Compresión

$$F_b = 1.488 \times 10^8 \text{ Pa}$$

Sección 1.5.1.4.5

$$C_m := 1.0$$

Factor de reducción, sección 1.6.1

$$F_e := \frac{12\pi^2 \cdot E}{23 \cdot \left(\frac{k \cdot L}{r_y}\right)^2}$$

$$F_e = 4.571 \times 10^8 \text{ Pa}$$

Esfuerzo crítico de pandeo

$$f_b := \frac{M' \cdot \left(\frac{d_i}{2} + t\right)}{I}$$

$$f_b = 8.533 \times 10^7 \text{ Pa}$$

Esfuerzo flector de compresión calculado

$$\frac{C_m \cdot f_b}{\left(1 - \frac{f_a}{F_e}\right) F_b} = 0.631$$

$$\frac{f_a}{F_a} = 0.316$$

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_m \cdot f_b}{\left(1 - \frac{f_a}{F_e}\right) F_b} = 0.946$$

Cumple con los requerimientos AISC
fórmula: 1.6-1a

$$\frac{f_a}{0.6S_y} = 0.279 \quad \frac{f_b}{F_b} = 0.573$$

$$\frac{f_a}{0.60S_y} + \frac{f_b}{F_b} = 0.852$$

Cumple con los requerimientos AISC
fórmula: 1.6-1b

3.2.3.3.2. Cálculo de la Columna (Operación + Sísmica)

Características de la columna:

$d_i := 1\text{m}$ Diámetro interno de la columna

$t := 50\text{mm}$ Espesor de la columna

$$A := \pi \cdot \left(\frac{d_i}{2} + t\right)^2 - \pi \cdot \left(\frac{d_i}{2}\right)^2$$

$A = 0.165 \text{ m}^2$ Área de la columna

$L := 14.7\text{m}$ Longitud de la columna

$$r_y := \frac{\sqrt{(d_i + 2 \cdot t)^2 + d_i^2}}{4}$$

$r_y = 0.372 \text{ m}$ Radio de gravitación

$$I := 0.049 \cdot [(d_i + 2t)^4 - d_i^4]$$

$I = 0.023 \text{ m}^4$ Inercia del anillo

Fuerza debido al tensor

$F_t := 1215064\text{N}$ Fuerza con la cual fue calculado el tensor

$$F_{yt} := F_t \cdot \sin(61.7 \cdot \text{deg})$$

$F_{yt} = 1.07 \times 10^6 \text{ N}$ Fuerza de compresión debida al tensor

$F_{ye} := 4054900\text{N}$ Fuerza de compresión (masa metal y líquido de la esfera)

$$F_y := F_{yt} + F_{ye}$$

$F_y = 5.125 \times 10^6 \text{ N}$	Fuerza total de compresión
$M := 596074.56 \text{ N}\cdot\text{m}$	Momento en la parte inferior de la columna
$F_x := 114340 \text{ N}$	Fuerza cortante en la parte inferior de la columna
$M_v := L \cdot F_x$	
$M_v = 1.681 \times 10^6 \text{ mN}$	Momento debido a la fuerza transversal
$M' := M_v + M$	
$M' = 2.277 \times 10^6 \text{ mN}$	Momento en la parte superior de la columna

Características del material de la columna según AISC :

$S_y := 248 \cdot 10^6 \text{ Pa}$ Especificaciones ASTM SA- 36

$E := 2 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$

Cálculo de la columna según AISC sección 1.5 y 1.6 en compresión axial y flexión.

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{C_m \cdot f_b}{\left(1 - \frac{f_a}{F_e}\right) F_b} \leq 1.0$$

Los miembros sujetos a compresión axial y esfuerzo flector, cumplen con estos requerimientos de estas dos ecuaciones.

$$\frac{f_a}{0.60 F_y} + \frac{f_b}{F_b} \leq 1.0$$

$$f_a := \frac{F_y}{A}$$

Esfuerzo axial calculado

$$f_a = 3.107 \times 10^7 \text{ Pa}$$

$$k := 1.2$$

Factor de condición de extremo Tabla C 1.8.1

$$C_c := \sqrt{\frac{2 \cdot \pi^2 E}{S_y}}$$

$$C_c = 126.169$$

Relación de esbeltez

$$\frac{k \cdot L}{r_y} = 47.464$$

Longitud efectiva de la columna

$$\frac{kL}{r_y} < C_c$$

$$FS := \frac{5}{3} + \frac{3}{8} \cdot \frac{k \cdot L}{r_y} - 1 \cdot \frac{\left(\frac{k \cdot L}{r_y}\right)^3}{Cc^3}$$

$$FS = 1.754$$

Factor de seguridad tomado por la AISC

$$Fa := \frac{Sy}{FS} \cdot \left[1 - \frac{\left(\frac{k \cdot L}{r_y}\right)^2}{2Cc^2} \right]$$

Esfuerzo axial de acuerdo a las características de la columna sección 1.5.1.3.1.

$$Fa = 1.313 \times 10^8 \text{ Pa}$$

$$Fb := 0.6 \cdot Sy$$

Esfuerzo Flector de Compresión

$$Fb = 1.488 \times 10^8 \text{ Pa}$$

Sección 1.5.1.4.5

$$Cm := 1.0$$

Factor de reducción, sección. 1.6.1

$$Fe := \frac{12\pi^2 \cdot E}{23 \cdot \left(\frac{k \cdot L}{r_y}\right)^2}$$

$$Fe = 4.571 \times 10^8 \text{ Pa}$$

Esfuerzo crítico de pandeo

$$fb := \frac{M' \cdot \left(\frac{di}{2} + t\right)}{I}$$

$$fb = 5.507 \times 10^7 \text{ Pa}$$

Esfuerzo flector de compresión calculado

$$\frac{Cm \cdot fb}{\left(1 - \frac{fa}{Fe}\right) Fb} = 0.397 \quad \frac{fa}{Fa} = 0.237$$

$$\frac{fa}{Fa} + \frac{Cm \cdot fb}{\left(1 - \frac{fa}{Fe}\right) Fb} = 0.634$$

Cumple con los requerimientos AISC

fórmula: 1.6-1a

$$\frac{fa}{0.6Sy} = 0.209 \quad \frac{fb}{Fb} = 0.37$$

$$\frac{fa}{0.60Sy} + \frac{fb}{Fb} = 0.579$$

Cumple con los requerimientos AISC

fórmula: 1.6-1b

3.2.3.4. Verificación de Esfuerzos en la unión Esfera – Columna

Para la verificación de esfuerzos en la unión de la esfera con las columnas se considera diferentes condiciones en donde se comprueba que los esfuerzos no sobrepasen los establecidos en el criterio del ASME Sección VIII División 2 (anexo A). Los esfuerzos definidos para las diferentes condiciones son los siguientes:

- Esfuerzo de membrana primario general (P_m).
- Esfuerzo de membrana primario local (P_L).
- Esfuerzo de flexión primario (P_b).
- Esfuerzo secundario (Q).

El factor k utilizado para las diferentes condiciones se lo obtiene de la tabla AD-150.1.

Condición de diseño

Los esfuerzos son calculados en el estado corroído.

a) P_L : Esfuerzo admisible $Sad = 1.5k \cdot Sm$

$$k = 1$$

$$Sad = 240.14 \text{ Mpa}$$

$$P_L = 180.3 \text{ MPa}$$

b) P_L : La distancia en la que el esfuerzo excede $1.1k \cdot Sm$ no debe extenderse en la dirección meridional más que $\sqrt{Rm(t-c)}$:

$$k = 1$$

$$1.1k \cdot Sm = 176.11 \text{ MPa}$$

$$Rm = R + c + \frac{t-c}{2} = 12729.5 \text{ mm}$$

$$\sqrt{Rm(t-c)} = \sqrt{(12729.5)(57-2)} = 836.73 \text{ mm}$$

Distancia = 390 mm < 836.73 mm

c) P_b : Esfuerzo admisible $S_{ad} = 1.5k \cdot S_m$

$$k = 1$$

$$S_{ad} = 240.14 \text{ Mpa}$$

$$P_b = 87.76 \text{ MPa}$$

d) $P_L + P_b$: Esfuerzo admisible $S_{ad} = 1.5k \cdot S_m$

$$k = 1$$

$$S_{ad} = 240.14 \text{ Mpa}$$

$$P_L + P_b = 215.0 \text{ MPa}$$

Condición de diseño más carga sísmica

Los esfuerzos son calculados en el estado corroído.

a) P_L : Esfuerzo admisible $S_{ad} = 1.5k \cdot S_m$

$$k = 1.2$$

$$S_{ad} = 288.17 \text{ Mpa}$$

$$P_L = 186.7 \text{ MPa}$$

b) P_L : La distancia en la que el esfuerzo excede $1.1k \cdot S_m$ no debe extenderse en la dirección meridional más que $\sqrt{R_m(t-c)}$:

$$k = 1.2$$

$$1.1k \cdot S_m = 211.33 \text{ MPa}$$

$$R_m = R + c + \frac{t-c}{2} = 12729.5 \text{ mm}$$

$$\sqrt{R_m(t-c)} = \sqrt{(12729.5)(57-2)} = 836.73 \text{ mm}$$

Distancia = 0 mm < 836.73 mm

c) P_b : Esfuerzo admisible $S_{ad} = 1.5k \cdot S_m$

$$k = 1.2$$

$$S_{ad} = 288.17 \text{ Mpa}$$

$$P_b = 140.5 \text{ MPa}$$

d) P_L+P_b : Esfuerzo admisible $S_{ad} = 1.5k \cdot S_m$

$$k = 1.2$$

$$S_{ad} = 288.17 \text{ Mpa}$$

$$P_L+P_b = 236.2 \text{ MPa}$$

Condición de operación más carga sísmica más carga térmica

Los esfuerzos son calculados en el estado corroído.

La carga térmica produce un esfuerzo secundario ocasionado por coeficientes de expansión diferentes.

a) P_L+P_b+Q : Esfuerzo admisible $S_{ad} = 3 \cdot S_m$

$$S_{ad} = 480.29 \text{ Mpa}$$

$$P_L+P_b+Q = 283.8 \text{ MPa}$$

Condición de prueba hidrostática

a) P_m : Esfuerzo admisible $S_{ad} = 0.9 \cdot S_y$

$$S_y = 262.0 \text{ MPa}$$

$$S_{ad} = 235.8 \text{ MPa}$$

$$P_m = 223.3 \text{ MPa}$$

b) P_m+P_b : Esfuerzo admisible $S_{ad} = 2.35 \cdot S_y - 1.5 \cdot P_m$

$$P_m = 223.3 \text{ MPa}$$

$$S_{ad} = 280.72 \text{ MPa}$$

$$P_m + P_b = 276.80 \text{ MPa}$$

3.2.3.5. Fatiga.

La verificación de la necesidad del análisis de fatiga se lo hace de acuerdo al ASME sección VIII división 2 AD – 160.2 Reglas para determinar si se requiere análisis de fatiga de las partes del recipiente (Rules to Determine Need for Fatigue Analysis of Integral Parts of Vessels), en la que indica que se debe cumplir ya sea con la condición A ó B.

La condición A no es analizada, ya que este recipiente no cumple con los literales indicados (se excede el número de ciclos permitidos en el literal c).

La condición B se analizará a continuación para cada uno de sus literales:

Según AD-160.2 Condición B:

(a) El número esperado de ciclos de rango completo de presión, incluyendo la puesta en marcha y el paro del sistema no debe exceder el número de ciclos correspondientes a un S_a igual a tres veces S_m

$$S_m := 160096264 \text{ Pa}$$

Intensidad de esfuerzo ASME Sección II
Parte D (SA-516 Gr 70)

$$S_a := 3 \cdot S_m$$

Esfuerzo permitido ASME Sección VIII División
2 AD-160.2 Condición B (a)

$$S_a = 480.29 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Número de ciclos: 1702

Figura 5-110.1 Apéndice 5

El número esperado de ciclos de rango completo para la vida útil es de 20

$$1702 > 20$$

Cumple con el requerimiento

(b) El rango esperado de ciclos de presión durante la operación normal no debe exceder $\delta P = 1/3(P_d)(S_a/S_m)$.

Las variaciones de presión significantes son aquellas que su rango excede $\delta = 1/3(P_d)(S/S_m)$

S es el valor de Sa obtenido para 10^6 ciclos:

$$S := 86.18 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$P_d := 1289319 \text{ Pa}$$

$$\delta P := \frac{1}{3} \cdot P_d \cdot \left(\frac{S}{S_m} \right)$$

$$\delta P = 231347.3 \text{ Pa}$$

$$\Delta P := 134550 \text{ Pa}$$

Delta de presión Tabla 3.2.

No existen fluctuaciones significantes de presión por lo tanto cumple con el requerimiento

(c) La diferencia de temperatura en dos puntos adyacentes durante la operación normal y durante la puesta en marcha - paro no debe exceder $S_a/(2 \cdot E \cdot \alpha)$:

Sa es obtenido para el número de ciclos de puesta en marcha - paro (20 ciclos):

$$S_a := 2826.8 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$E := 202.095 \cdot 10^9 \text{ Pa}$$

Módulo de elasticidad a 40.5 °C ASME Sección II Parte D Tabla TM-1

$$\alpha := 12.84 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{mm} \cdot \text{C}}$$

Coefficiente de expansión térmica a 40.5 °C ASME Sección II Parte D Tabla TE-1

$$\delta T := \frac{S_a}{2 \cdot E \cdot \alpha}$$

Literal (c) ASME Sección VIII División 2 AD-160.2 Condición B

$$\delta T = 544.684 \text{ C}$$

La diferencia de temperatura considerada es según la Tabla 3.1:

$$\Delta T := 60 \text{ C} - 21 \text{ C}$$

$$\Delta T = 39 \text{ C}$$

Cumple con los requerimiento condición B (c)

$$39^\circ \text{C} < 544.68^\circ \text{C}$$

(d) El rango de la diferencia de temperatura entres dos puntos adyacentes del recipiente no cambia durante la operación normal por más de $S_a/(2 \cdot E \cdot \alpha)$:

Las variaciones de temperatura significantes son aquellas que su rango excede

$$\delta T = S_a / (2 \cdot E \cdot \alpha):$$

S es el valor de S_a obtenido para 10^6 ciclos:

$$S := 86.18 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

Esfuerzo permitido en función de 1E6 ciclos
ASME Sección VIII División 2 Apéndice 5 Figura
5-110.1

$$E := 202.095 \cdot 10^9 \text{ Pa}$$

Módulo de elasticidad a 40.5 °C ASME Sección
II Parte D Tabla TM-1

$$\delta T := \frac{S}{2 \cdot E \cdot \alpha}$$

$$\delta T = 16.6 \text{ C}$$

S_a es obtenido para el número de ciclos de variaciones de temperatura significantes (7300 ciclos):

$$S_a := 296.47 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$E := 202.095 \cdot 10^9 \text{ Pa}$$

Módulo de elasticidad a 40.5 °C ASME Sección
II Parte D Tabla TM-1

$$\alpha := 12.84 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{mm} \cdot \text{C}}$$

Coefficiente de expansión térmica a 40.5 °C
ASME Sección II Parte D Tabla TE-1

$$\delta T := \frac{S_a}{2 \cdot E \cdot \alpha}$$

Literal (d) ASME Sección VIII División 2 AD-
160.2 Condición B

$$\delta T = 57.1 \text{ C}$$

La diferencia de temperatura considerada es según la Tabla 3.1:

$$\Delta T := 60 \text{ C} - 21 \text{ C}$$

$$\Delta T = 39 \text{ C}$$

$$39^\circ \text{C} < 57.1^\circ \text{C}$$

Cumple con los requerimiento
condición B (d)

(e) El rango total de fluctuación de temperatura para componentes fabricados de materiales de diferentes módulos de elasticidad y/o coeficientes de expansión térmica durante la operación normal no debe exceder $\delta T = S_a / [2 \cdot (E_1 \cdot \alpha_1 + E_2 \cdot \alpha_2)]$.

Todos los componentes como: cuerpo, bocas, bridas, etc. son fabricados de acero al carbono y no existen cambios en el módulo de elasticidad y coeficiente de expansión térmico, a excepción de las columnas para las que se verifica a continuación:

Las variaciones de temperatura significantes son aquellas que su rango excede $\delta T = S_a / [2 \cdot (E_1 \cdot \alpha_1 + E_2 \cdot \alpha_2)]$:

S es el valor de S_a obtenido para 10^6 ciclos:

$S := 86.18 \cdot 10^6 \text{ Pa}$ Esfuerzo permitido en función de 10^6 ciclos
ASME Sección VIII División 2 Apéndice 5 Figura
5-110.1

Material del Cuerpo:

SA – 516Gr70

Material de la Columna:

SA - 36

$E_1 := 2020.95 \cdot 10^8 \text{ Pa}$

$E_2 := 2020.95 \cdot 10^8 \text{ Pa}$

$\alpha_1 := 12.84 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{mm} \cdot \text{C}}$

$\alpha_2 := 11.52 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mm}}{\text{mm} \cdot \text{C}}$

$$\delta T := \frac{S}{2 \cdot (E_1 \cdot \alpha_1 + E_2 \cdot \alpha_2)}$$

$$\delta T = 161.5 \text{ C}$$

La diferencia de temperatura considerada es según la Tabla 3.1:

$$\Delta T := 60 \text{ C} - 21 \text{ C}$$

$$\Delta T = 39 \text{ C}$$

No existen fluctuaciones significantes de temperatura por lo tanto cumple con el requerimiento.

(f) El rango completo de cargas mecánicas excluyendo la presión no debe producir esfuerzos cuyo rango excede S_a .

La fluctuación de carga es significativa si su esfuerzo excede S.

S es el valor de S_a obtenido para 10^6 ciclos:

$$S := 86.18 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

La mayor fluctuación de esfuerzos, considerando la variación entre la condición de operación y el estado descargado es de 24.7 MPa

Para la mayor fluctuación de esfuerzos, considerando la variación entre la condición de operación y el estado de paro (sin presión), se tomó el esfuerzo máximo en la condición de operación que es 176 MPa.

Sa es obtenido para el número de ciclos de puesta en marcha - paro (20 ciclos):

$$S_a := 2826.8 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

Cumple con los requerimiento
condición B (f)

$$176 < 2826.8 \text{ MPa}$$

Todos los literales de la condición B son cumplidos, y se puede concluir que no es necesario hacer el análisis de fatiga para el recipiente esférico.

3.2.4. BOCAS

Las bocas requeridas en la esfera son las que se indican a continuación:

Tabla: 3.6. Bocas en la parte inferior del recipiente

NOMBRE	SERVICIO	DIÁMETRO
A	Entrada	14"
B	Salida	10"
C	Drenaje	4"
D	Vapor	6"
E	Sensor de presión	1 1/2"
F	Sensor de temperatura	1 1/2"
G1	Alivio	8"
G2	Alivio	8"
G3	Alivio	8"
H	Entrada de Hombre	24"

Tabla: 3.7. Bocas en la parte superior del recipiente

NOMBRE	SERVICIO	DIÁMETRO
I	Medidor de nivel	4"
J	Sensor de presión	1 1/2"
K	Sensor de temperatura	1 1/2"
L1	Alivio	8"
L2	Alivio	8"
L3	Alivio	8"

Los parámetros utilizados para el diseño de las bocas son los siguientes:

- P = Presión de diseño más presión hidrostática
- S_n = Límite de Intensidad de esfuerzo de membrana de la boca
- S = Límite de Intensidad de esfuerzo de membrana de la esfera
- c = Corrosión permitida
- r_n = Radio interno de la boca (sin corrosión)
- r_{nc} = Radio interno de la boca (corroído)
- r_m = Radio medio de la boca
- D = Diámetro interno de la boca (sin corrosión)
- D_c = Diámetro interno de la boca (corroído)
- DV = Diámetro externo de la boca (sin corrosión)
- DV_c = Diámetro externo de la boca (corroído)
- t_{rn} = Espesor de la boca mínimo requerido (sin corrosión)
- t_{pi} = Espesor t_p interno (interior de la esfera)
- t_r = Espesor del cuerpo mínimo requerido (sin corrosión)
- d_c = Diámetro de la abertura (corroído)
- XZ = Distancia entre el eje vertical de la esfera y el eje vertical de la boca
- t_r = Espesor requerido por la esfera
- t = Espesor de la esfera
- F = 1.00 para esferas
- R = Radio interno de la esfera
- R_m = Radio medio de la esfera

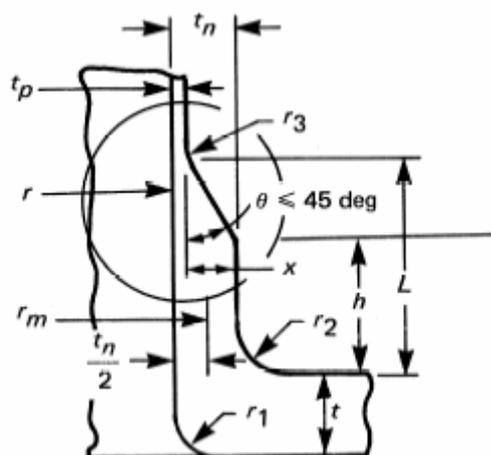


Figura 3.13. Nomenclatura en bocas

3.2.4.1. Bocas y sus Refuerzos

Para las bocas que necesitan refuerzos se han seleccionado bocas autoreforzadas las mismas que tienen un espesor mayor al de las bocas comunes.

El material seleccionado para todas las bocas es el SA-105, el mismo que tiene un esfuerzo admisible $S_n = 156786$ kPa.

Verificación de bocas que necesitan refuerzo según AD-510:

Para las bocas de la parte inferior A, B, C, D, E, F, G1, G2, G3, H:

- a) No requieren refuerzo las bocas que tienen un diámetro no mayor a:

$$D_{\max} = 0.2 \sqrt{R_m(t - c)}$$

$$R_m = 12730.5 \text{ mm}$$

$$t = 59 \text{ mm}$$

$$D_{\max} = 170.37 \text{ mm}$$

Entonces requieren refuerzos las bocas A, B, G1, G2, G3, H y quedan por verificar las bocas C, D, E, F.

Además se debe cumplir que para dos o más bocas dentro de un diámetro de $2.5 \sqrt{R_m(t - c)}$ la suma de los diámetros de estas bocas sin refuerzo no debe exceder $0.25 \sqrt{R_m(t - c)}$:

$$2.5 \sqrt{R_m(t - c)} = 2129.61 \text{ mm}$$

$$0.25 \sqrt{R_m(t - c)} = 212.96 \text{ mm}$$

Bocas C y D:

$$\text{Sum} = 101.28 + 150.30 = 251.58 \text{ mm}$$

Bocas E y F:

$$\text{Sum} = 42.1 + 42.1 = 84.2 \text{ mm}$$

Entonces las bocas C y D necesitan refuerzo y quedan por verificar las bocas E y F.

- b) La distancia entre centros de 2 bocas medida en la parte interna del cuerpo debe ser mayor a 1.5 veces la suma de sus diámetros:

Bocas E y F:

$$1500 \text{ mm} > 1.5(84.2) = 126.3 \text{ mm}$$

Por consiguiente las bocas de la parte inferior que no necesitan refuerzo son las bocas E y F.

Para las bocas de la parte superior I, J, K, L1, L2, L3:

- a) No requieren refuerzo las bocas que tienen un diámetro no mayor a:

$$D_{\text{max}} = 0.2\sqrt{R_m(t-c)}$$

$$R_m = 12728 \text{ mm}$$

$$t = 54 \text{ mm}$$

$$D_{\text{max}} = 162.71 \text{ mm}$$

Entonces requieren refuerzos las bocas L1, L2, L3 y quedan por verificar las bocas I, J, K.

Además se debe cumplir que para dos o más bocas dentro de un diámetro de $2.5\sqrt{R_m(t-c)}$ la suma de los diámetros de estas bocas sin refuerzo no debe exceder $0.25\sqrt{R_m(t-c)}$:

$$2.5\sqrt{R_m(t-c)} = 2033.86 \text{ mm}$$

$$0.25\sqrt{Rm(t-c)} = 203.39 \text{ mm}$$

Bocas I, J, K:

$$\text{Sum} = 105.6 + 42.1 + 42.1 = 189.8 \text{ mm}$$

Entonces quedan por verificar las bocas I, J, K.

- b) La distancia entre centros de 2 bocas medida en la parte interna del cuerpo debe ser mayor a 1.5 veces la suma de sus diámetros:

Bocas I y J (igual a bocas I y K):

$$1677.05 \text{ mm} > 1.5(147.7) = 221.55 \text{ mm}$$

Bocas J y K:

$$1500 \text{ mm} > 1.5(84.2) = 126.3 \text{ mm}$$

Por consiguiente las bocas de la parte superior que no necesitan refuerzo son las bocas I, J, K.

3.2.4.1.1. Metal disponible para refuerzo:

Según AD-550:

El metal considerado para el refuerzo está limitado a lo siguiente:

Metal formando parte de la pared del recipiente el cual está en exceso del requerido.

Para que se pueda considerar el metal en exceso en la boca, y en la soldadura, debe cumplirse con:

$$|(\alpha_R - \alpha_V)\Delta T| \leq 0.0008$$

α_R = Coeficiente medio de expansión térmica del metal del refuerzo.

α_V = Coeficiente medio de expansión térmica del metal del recipiente.

ΔT = Variación de temperatura.

Esta relación se cumple dado que α_R y α_V son iguales para los materiales seleccionados.

3.2.4.2. Boca A

Marca: FVC

Tipo: V2

Diámetro nominal = 14 pulg.

Clase ANSI = 300

Material: SA-105

Servicio: Entrada

P = 1423.5 kPa

Sn = 156786 kPa

S = 160096 kPa

rn = 177.8 mm

c = 2 mm

tr = 56.6 mm

t = 59 mm

tn = 77.72 mm

tp = 56.39 mm

XZ = 200 mm

R = 12700 mm

$$R_m = R + c + \frac{t - c}{2} = 12730.5 \text{ mm}$$

$$r_m = r_n + c + \frac{t_n - c}{2} = 217.66 \text{ mm}$$

Determinación de espesores:

Según AD-602:

Según AD-201 (a):

Espesor requerido por presión

$$t_{rn} = \frac{P(r_n + c)}{S_n - 0.5P}$$

$$trn = 1.64 \text{ mm}$$

Espesor requerido por presión más corrosión permitida:

$$trn1 = trn + c$$

$$trn1 = 3.64 \text{ mm}$$

Según AD-602 (a):

Espesor requerido del cuerpo más corrosión permitida.

$$trn2 = tr + c$$

$$trn2 = 58.6 \text{ mm}$$

Según AD-602 (b):

Espesor mínimo de pared de una tubería estándar más la corrosión permitida.

$$trn3 = 10.33 \text{ mm}$$

El espesor mínimo tiene que ser mayor a $trn1 = 3.64 \text{ mm}$, y no menor al más pequeño de $trn2 = 58.6 \text{ mm}$ y $trn3 = 10.33 \text{ mm}$:

$$tp = 56.39 \text{ mm} > 10.33 \text{ mm}$$

Soldadura

Según AD-601 (c) y AD-601.1

$$tc1 = 6.35 \text{ mm}$$

$$tc2 = 0.7tn$$

$$tc2 = 54.40 \text{ mm}$$

El tamaño de la garganta de soldadura no debe ser menor al menor de $tc1 = 6.35 \text{ mm}$ y $tc2 = 54.40 \text{ mm}$

Tamaño de cateto de soldadura seleccionado:

$$K = 10 \text{ mm}$$

Diámetro de la abertura

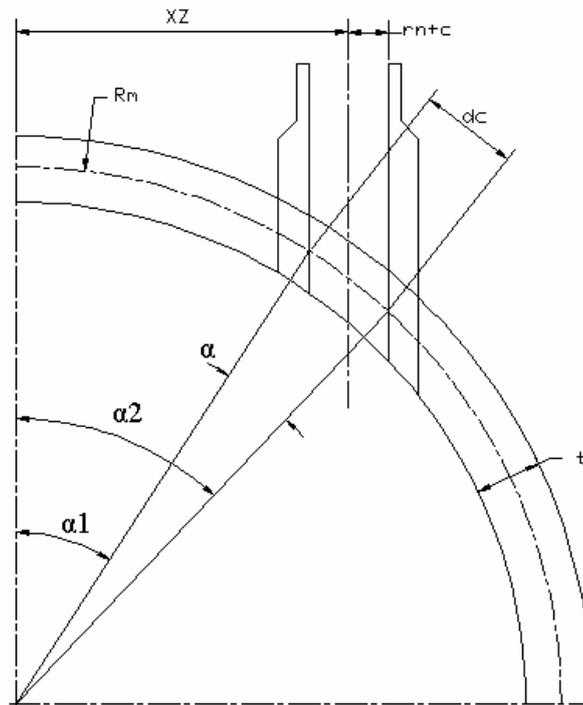


Figura 3.14. Diámetro de abertura de la boca

$$\alpha_1 = \text{asen}\left(\frac{XZ - (r_n + c)}{R_m}\right)$$

$$\alpha_2 = \text{asen}\left(\frac{XZ + (r_n + c)}{R_m}\right)$$

$$\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$$

$$\alpha = 1.62^\circ$$

$$d_c = 2 \cdot R_m \cdot \text{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

$$d_c = 359.64 \text{ mm}$$

Área de refuerzo requerida:

Según AD-520:

$$A = d_c(t_r)(F)$$

$$A = 20355.87 \text{ mm}^2$$

Límite a lo largo de la pared del cuerpo:

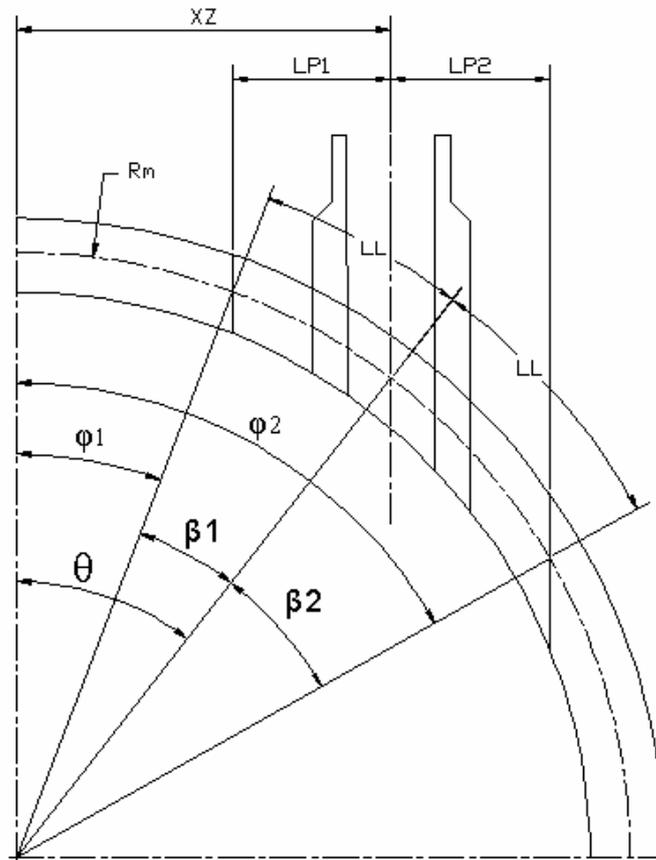


Figura 3.15. Límites para áreas de bocas

Según AD-540.1:

$$LL1 = dc$$

$$LL1 = 359.64 \text{ mm}$$

$$LL2 = \frac{dc}{2} + (t - c) + (tn - c)$$

$$LL2 = 312.55 \text{ mm}$$

El límite a lo largo del cuerpo es el mayor de $LL1 = 359.64 \text{ mm}$ y $LL2 = 312.55 \text{ mm}$:

$$LL = 359.64 \text{ mm}$$

Límite paralelo al eje de la boca

$$LP1 = XZ - R_m \cdot \text{sen} \left(a \text{sen} \frac{XZ}{R_m} - \frac{LL}{R_m} \right)$$

$$LP1 = 359.63 \text{ mm}$$

$$LP2 = R_m \cdot \text{sen} \left(a \text{sen} \frac{XZ}{R_m} + \frac{LL}{R_m} \right) - XZ$$

$$LP2 = 359.58 \text{ mm}$$

Área disponible en la pared de la esfera

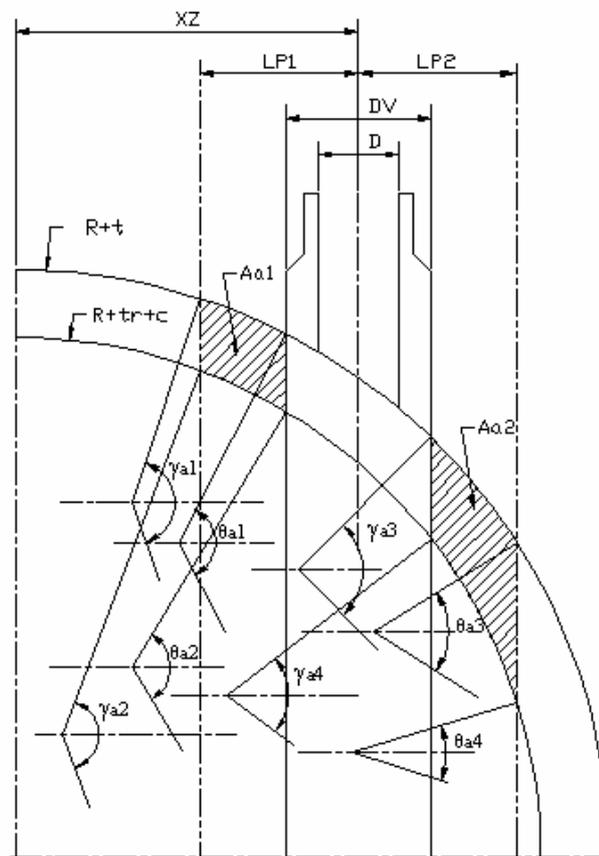


Figura 3.16. Área disponible en la pared de la esfera

$$A_{a1-1} = \frac{1}{2}(R+t)^2(\gamma_{a1} - \text{sen}\gamma_{a1}) - \frac{1}{2}(R+t)^2(\theta_{a1} - \text{sen}\theta_{a1})$$

$$\cos \frac{\gamma_{a1}}{2} = \frac{XZ - LP1}{R+t}$$

$$\cos \frac{\theta_{a1}}{2} = \frac{XZ - DV/2}{R+t}$$

$$A_{a1-2} = \frac{1}{2}(R + tr + c)^2 (Y_{a2} - \text{sen}Y_{a2}) - \frac{1}{2}(R + tr + c)^2 (\theta_{a2} - \text{sen}\theta_{a2})$$

$$\cos \frac{Y_{a2}}{2} = \frac{XZ - LP1}{R + tr + c}$$

$$\cos \frac{\theta_{a2}}{2} = \frac{XZ - DV/2}{R + tr + c}$$

$$A_{a1} = \frac{(A_{a1-1}) - (A_{a1-2})}{2}$$

$$A_{a1} = 41.64 \text{ mm}^2$$

$$A_{a2-1} = \frac{1}{2}(R + t)^2 (Y_{a3} - \text{sen}Y_{a3}) - \frac{1}{2}(R + t)^2 (\theta_{a3} - \text{sen}\theta_{a3})$$

$$\cos \frac{Y_{a3}}{2} = \frac{XZ + DV/2}{R + t}$$

$$\cos \frac{\theta_{a3}}{2} = \frac{XZ + LP2}{R + t}$$

$$A_{a2-2} = \frac{1}{2}(R + tr + c)^2 (Y_{a4} - \text{sen}Y_{a4}) - \frac{1}{2}(R + tr + c)^2 (\theta_{a4} - \text{sen}\theta_{a4})$$

$$\cos \frac{Y_{a4}}{2} = \frac{XZ + DV/2}{R + tr + c}$$

$$\cos \frac{\theta_{a4}}{2} = \frac{XZ + LP2}{R + tr + c}$$

$$A_{a2} = \frac{(A_{a2-1}) - (A_{a2-2})}{2}$$

$$A_{a2} = 41.66 \text{ mm}^2$$

$$A_a = A_{a1} + A_{a2}$$

$$A_a = 83.30 \text{ mm}^2$$

Límite normal a la pared del cuerpo

Según AD-540.2 (a):

$$2.5(t_n - c) + K = 199.31 \text{ mm}$$

$$h_1 = 152.22 \text{ mm}$$

$$h_2 = 160.23 \text{ mm}$$

$h_1 = 152.22 \text{ mm}$ y $h_2 = 160.23 \text{ mm}$ son menor que $2.5(t_n - c) + K = 199.31 \text{ mm}$,
 entonces el límite normal LN es el mayor de:

$$0.5\sqrt{r_m(t_n - c)} + K = 74.19 \text{ mm}$$

$$1.73(t_n - t_p) + 2.5(t_p - c) + K = 182.88 \text{ mm}$$

pero no debe exceder

$$2.5(t - c) = 142.50 \text{ mm}$$

ni

$$L_1 + 2.5(t_p - c) = 313.94 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el límite normal es:

$$LN = 142.50 \text{ mm}$$

Área disponible en la pared de la boca

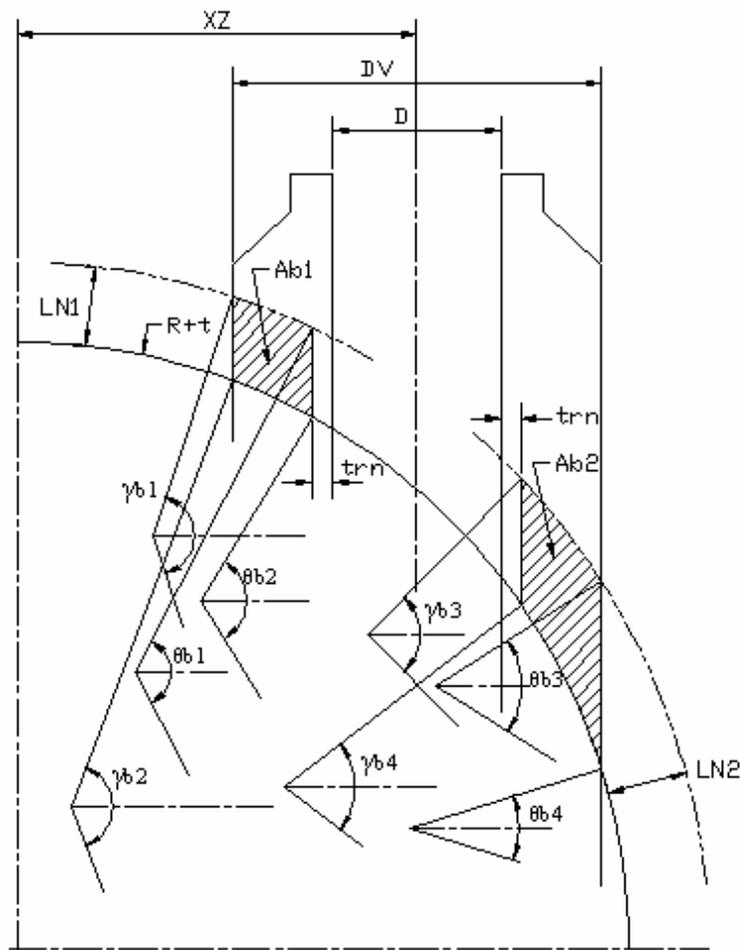


Figura 3.17. Área disponible en la pared de la boca exterior a la esfera

$$A_{b1-1} = \frac{1}{2}(R+t+LN)^2(\gamma_{b1} - \text{sen}\gamma_{b1}) - \frac{1}{2}(R+t+LN)^2(\theta_{b1} - \text{sen}\theta_{b1})$$

$$\cos \frac{\gamma_{b1}}{2} = \frac{XZ - DV/2}{R+t+LN}$$

$$\cos \frac{\theta_{b1}}{2} = \frac{XZ - (Dc/2 + \text{trn})}{R+t+LN}$$

$$A_{b1-2} = \frac{1}{2}(R+t)^2(\gamma_{b2} - \text{sen}\gamma_{b2}) - \frac{1}{2}(R+t)^2(\theta_{b2} - \text{sen}\theta_{b2})$$

$$\cos \frac{\gamma_{b2}}{2} = \frac{XZ - DV/2}{R+t}$$

$$\cos \frac{\theta_{b2}}{2} = \frac{XZ - (Dc/2 + \text{trn})}{R+t}$$

$$A_{b1} = \frac{(A_{b1-1}) - (A_{b1-2})}{2}$$

$$A_{b1} = 10553.84 \text{ mm}^2$$

$$A_{b2-1} = \frac{1}{2}(R+t+LN)^2(\gamma_{b3} - \text{sen}\gamma_{b3}) - \frac{1}{2}(R+t+LN)^2(\theta_{b3} - \text{sen}\theta_{b3})$$

$$\cos \frac{\gamma_{b3}}{2} = \frac{XZ + (Dc/2 + \text{trn})}{R+t+LN}$$

$$\cos \frac{\theta_{b3}}{2} = \frac{XZ + DV/2}{R+t+LN}$$

$$A_{b2-2} = \frac{1}{2}(R+t)^2(\gamma_{b4} - \text{sen}\gamma_{b4}) - \frac{1}{2}(R+t)^2(\theta_{b4} - \text{sen}\theta_{b4})$$

$$\cos \frac{\gamma_{b4}}{2} = \frac{XZ + (Dc/2 + \text{trn})}{R+t}$$

$$\cos \frac{\theta_{b4}}{2} = \frac{XZ + DV/2}{R+t}$$

$$A_{b2} = \frac{(A_{b2-1}) - (A_{b2-2})}{2}$$

$$A_{b2} = 10559.45 \text{ mm}^2$$

$$A_b = (A_{b1} + A_{b2})$$

$$A_b = 21113.29 \text{ mm}^2$$

Área equivalente

$$A_{eq} = A_a + A_b \left(\frac{S_n}{S} \right)$$

$$A_{eq} = 20760.14 \text{ mm}^2$$

El área equivalente $A_{eq} = 20760.14 \text{ mm}^2$ es mayor que el área requerida $A = 20355.87 \text{ mm}^2$.

3.2.4.3. Boca B

Marca: FVC

Tipo: V1

Diámetro nominal = 10 pulg.

Clase ANSI = 300

Material: SA-105

Servicio: Salida

P = 1423.5 kPa

Sn = 156786 kPa

S = 160096 kPa

rn = 121.41 mm

c = 2 mm

tr = 56.6 mm

t = 59 mm

tn = 59.56 mm

tp = 51.56 mm

XZ = 1060.66 mm

R = 12700 mm

$$R_m = R + c + \frac{t - c}{2} = 12730.5 \text{ mm}$$

$$r_m = r_n + c + \frac{t_n - c}{2} = 152.19 \text{ mm}$$

Determinación de espesores:

Según AD-602:

Según AD-201 (a):

Espesor requerido por presión

$$trn = \frac{P(rn + c)}{Sn - 0.5P}$$

$$trn = 1.13 \text{ mm}$$

Espesor requerido por presión más corrosión permitida:

$$trn1 = trn + c$$

$$trn1 = 3.13 \text{ mm}$$

Según AD-602 (a):

Espesor requerido del cuerpo más corrosión permitida.

$$trn2 = tr + c$$

$$trn2 = 58.6 \text{ mm}$$

Según AD-602 (b):

Espesor mínimo de pared de una tubería estándar más la corrosión permitida.

$$trn3 = 10.11 \text{ mm}$$

El espesor mínimo tiene que ser mayor a $trn1 = 3.13 \text{ mm}$, y no menor al más pequeño de $trn2 = 58.6 \text{ mm}$ y $trn3 = 10.11 \text{ mm}$:

$$tp = 51.56 \text{ mm} > 10.11 \text{ mm}$$

Soldadura

Según AD-601 (c) y AD-601.1

$$tc1 = 6.35 \text{ mm}$$

$$tc2 = 0.7tn$$

$$tc2 = 41.69 \text{ mm}$$

El tamaño de la garganta de soldadura no debe ser menor al menor de $tc1 = 6.35 \text{ mm}$ y $tc2 = 41.69 \text{ mm}$

Tamaño de cateto de soldadura seleccionado:

$$K = 10 \text{ mm}$$

Diámetro de la abertura

$$\alpha = 1.11^\circ$$

$$dc = 2 \cdot Rm \cdot \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

$$dc = 247.69 \text{ mm}$$

Área de refuerzo requerida:

Según AD-520:

$$A = dc(tr)(F)$$

$$A = 14018.99 \text{ mm}^2$$

Límite a lo largo de la pared del cuerpo:

Según AD-540.1:

$$LL1 = dc$$

$$LL1 = 247.69 \text{ mm}$$

$$LL2 = \frac{dc}{2} + (t - c) + (tn - c)$$

$$LL2 = 238.41 \text{ mm}$$

El límite a lo largo del cuerpo es el mayor de $LL1 = 247.69 \text{ mm}$ y $LL2 = 238.41 \text{ mm}$:

$$LL = 247.69 \text{ mm}$$

Límite paralelo al eje de la boca

$$LP1 = XZ - Rm \cdot \operatorname{sen}\left(\operatorname{asen}\frac{XZ}{Rm} - \frac{LL}{Rm}\right)$$

$$LP1 = 247.01 \text{ mm}$$

$$LP2 = Rm \cdot \sin\left(\arcsin\frac{XZ}{Rm} + \frac{LL}{Rm}\right) - XZ$$

$$LP2 = 246.99 \text{ mm}$$

Área disponible en la pared de la esfera

$$A_{a1} = 26.47 \text{ mm}^2$$

$$A_{a2} = 26.54 \text{ mm}^2$$

$$A_a = A_{a1} + A_{a2}$$

$$A_a = 53.01 \text{ mm}^2$$

Límite normal a la pared del cuerpo

Según AD-540.2 (a):

$$2.5(t_n - c) + K = 153.91 \text{ mm}$$

$$h1 = 151.86 \text{ mm}$$

$$h2 = 182.06 \text{ mm}$$

$h1 = 151.86 \text{ mm}$ es menor que $2.5(t_n - c) + K = 153.91 \text{ mm}$, entonces el límite normal LN1 es el mayor de:

$$0.5\sqrt{r_m(t_n - c)} + K = 56.8 \text{ mm}$$

$$1.73(t_n - t_p) + 2.5(t_p - c) + K = 147.75 \text{ mm}$$

pero no debe exceder

$$2.5(t - c) = 142.50 \text{ mm}$$

ni

$$L1 + 2.5(t_p - c) = 283.77 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el límite normal 1 es:

$$LN1 = 142.50 \text{ mm}$$

$h_2 = 182.06 \text{ mm}$ es mayor que $2.5(t_n - c) + K = 153.91 \text{ mm}$, entonces el límite normal LN2 es el mayor de:

$$0.5\sqrt{r_m(t_n - c)} + K = 56.8 \text{ mm}$$

$$2.5(t_n - c) = 143.91 \text{ mm}$$

pero no debe exceder

$$2.5(t - c) = 142.50 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el límite normal 2 es:

$$\text{LN2} = 142.50 \text{ mm}$$

Área disponible en la pared de la boca

$$A_{b1} = 8001.01 \text{ mm}^2$$

$$A_{b2} = 8016.91 \text{ mm}^2$$

$$A_b = (A_{b1} + A_{b2})$$

$$A_b = 16017.93 \text{ mm}^2$$

Área equivalente

$$A_{eq} = A_a + A_b \left(\frac{S_n}{S} \right)$$

$$A_{eq} = 15739.82 \text{ mm}^2$$

El área equivalente $A_{eq} = 15739.82 \text{ mm}^2$ es mayor que el área requerida $A = 14018.99 \text{ mm}^2$.

3.2.4.4. Boca C

Marca: FVC

Tipo: V1

Diámetro nominal = 4 pulg.

Clase ANSI = 150

Material: SA-105

Servicio: Drenaje

$$P = 1423.5 \text{ kPa}$$

$$S_n = 156786 \text{ kPa}$$

$$S = 160096 \text{ kPa}$$

$$r_n = 48.64 \text{ mm}$$

$$c = 2 \text{ mm}$$

$$t_r = 56.6 \text{ mm}$$

$$t = 59 \text{ mm}$$

$$t_n = 40.26 \text{ mm}$$

$$t_p = 35.43 \text{ mm}$$

$$XZ = 1060.66 \text{ mm}$$

$$R = 12700 \text{ mm}$$

$$R_m = R + c + \frac{t - c}{2} = 12730.5 \text{ mm}$$

$$r_m = r_n + c + \frac{t_n - c}{2} = 69.77 \text{ mm}$$

Determinación de espesores:

Según AD-602:

Según AD-201 (a):

Espesor requerido por presión

$$t_{rn} = \frac{P(r_n + c)}{S_n - 0.5P}$$

$$t_{rn} = 0.46 \text{ mm}$$

Espesor requerido por presión más corrosión permitida:

$$t_{rn1} = t_{rn} + c$$

$$t_{rn1} = 2.46 \text{ mm}$$

Según AD-602 (a):

Espesor requerido del cuerpo más corrosión permitida.

$$t_{rn2} = t_r + c$$

$$t_{rn2} = 58.6 \text{ mm}$$

Según AD-602 (b):

Espesor mínimo de pared de una tubería estándar más la corrosión permitida.

$$trn3 = 7.26 \text{ mm}$$

El espesor mínimo tiene que ser mayor a $trn1 = 2.46 \text{ mm}$, y no menor al más pequeño de $trn2 = 58.6 \text{ mm}$ y $trn3 = 7.26 \text{ mm}$:

$$tp = 35.43 \text{ mm} > 7.26 \text{ mm}$$

Soldadura

Según AD-601 (c) y AD-601.1

$$tc1 = 6.35 \text{ mm}$$

$$tc2 = 0.7tn$$

$$tc2 = 28.18 \text{ mm}$$

El tamaño de la garganta de soldadura no debe ser menor al menor de $tc1 = 6.35 \text{ mm}$ y $tc2 = 28.18 \text{ mm}$

Tamaño de cateto de soldadura seleccionado:

$$K = 10 \text{ mm}$$

Diámetro de la abertura

$$\alpha = 0.46^\circ$$

$$dc = 2 \cdot Rm \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

$$dc = 101.64 \text{ mm}$$

Área de refuerzo requerida:

Según AD-520:

$$A = dc(tr)(F)$$

$$A = 5752.56 \text{ mm}^2$$

Límite a lo largo de la pared del cuerpo:

Según AD-540.1:

$$LL1 = dc$$

$$LL1 = 101.64 \text{ mm}$$

$$LL2 = \frac{dc}{2} + (t - c) + (tn - c)$$

$$LL2 = 146.08 \text{ mm}$$

El límite a lo largo del cuerpo es el mayor de $LL1 = 101.64 \text{ mm}$ y $LL2 = 146.08 \text{ mm}$:

$$LL = 146.08 \text{ mm}$$

Límite paralelo al eje de la boca

$$LP1 = XZ - Rm \cdot \text{sen} \left(\text{asen} \frac{XZ}{Rm} - \frac{LL}{Rm} \right)$$

$$LP1 = 145.64 \text{ mm}$$

$$LP2 = Rm \cdot \text{sen} \left(\text{asen} \frac{XZ}{Rm} + \frac{LL}{Rm} \right) - XZ$$

$$LP2 = 145.63 \text{ mm}$$

Área disponible en la pared de la esfera

$$A_{a1} = 22.76 \text{ mm}^2$$

$$A_{a2} = 22.79 \text{ mm}^2$$

$$A_a = A_{a1} + A_{a2}$$

$$A_a = 45.55 \text{ mm}^2$$

Límite normal a la pared del cuerpo

Según AD-540.2 (a):

$$2.5(t_n - c) + K = 105.65 \text{ mm}$$

$$h_1 = 111.83 \text{ mm}$$

$$h_2 = 126.66 \text{ mm}$$

$h_1 = 111.83 \text{ mm}$ y $h_2 = 126.66 \text{ mm}$ son mayor que $2.5(t_n - c) + K = 105.65 \text{ mm}$, entonces el límite normal LN es el mayor de:

$$0.5\sqrt{r_m(t_n - c)} + K = 35.83 \text{ mm}$$

$$2.5(t_n - c) = 95.65 \text{ mm}$$

pero no debe exceder

$$2.5(t - c) = 142.50 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el límite normal es:

$$LN = 95.65 \text{ mm}$$

Área disponible en la pared de la boca

$$A_{b1} = 3609.11 \text{ m}^2$$

$$A_{b2} = 3612.41 \text{ m}^2$$

$$A_b = (A_{b1} + A_{b2})$$

$$A_b = 7221.52 \text{ m}^2$$

Área equivalente

$$A_{eq} = A_a + A_b \left(\frac{S_n}{S} \right)$$

$$A_{eq} = 7117.78 \text{ mm}^2$$

El área equivalente $A_{eq} = 7117.78 \text{ mm}^2$ es mayor que el área requerida $A = 5752.56 \text{ mm}^2$.

3.2.4.5. Boca D

Marca: FVC

Tipo: V1

Diámetro nominal = 6 pulg.

Clase ANSI = 150

Material: SA-105

Servicio: Vapor

P = 1423.5 kPa

Sn = 156786 kPa

S = 160096 kPa

rn = 73.15 mm

c = 2 mm

tr = 56.6 mm

t = 59 mm

tn = 39.62 mm

tp = 31.62 mm

tpi = 10.97 mm

XZ = 1677.05 mm

R = 12700 mm

$$R_m = R + c + \frac{t - c}{2} = 12730.5 \text{ mm}$$

$$r_m = r_n + c + \frac{t_n - c}{2} = 93.96 \text{ mm}$$

Determinación de espesores:

Según AD-602:

Según AD-201 (a):

Espesor requerido por presión

$$t_{rn} = \frac{P(r_n + c)}{S_n - 0.5P}$$

$$t_{rn} = 0.69 \text{ mm}$$

Espesor requerido por presión más corrosión permitida:

$$trn1 = trn + 2c$$

$$trn1 = 4.69 \text{ mm}$$

Según AD-602 (a):

Espesor requerido del cuerpo más corrosión permitida.

$$trn2 = tr + c$$

$$trn2 = 58.6 \text{ mm}$$

Según AD-602 (b):

Espesor mínimo de pared de una tubería estándar más la corrosión permitida.

$$trn3 = 10.22 \text{ mm}$$

El espesor mínimo tiene que ser mayor a $trn1 = 4.69 \text{ mm}$, y no menor al más pequeño de $trn2 = 58.6 \text{ mm}$ y $trn3 = 10.22 \text{ mm}$:

$$t_{pi} = 10.97 \text{ mm} > 10.22 \text{ mm}$$

Soldadura

Según AD-601 (c) y AD-601.1

$$tc1 = 6.35 \text{ mm}$$

$$tc2 = 0.7tn$$

$$tc2 = 27.73 \text{ mm}$$

El tamaño de la garganta de soldadura no debe ser menor al menor de $tc1 = 6.35 \text{ mm}$ y $tc2 = 27.73 \text{ mm}$

Tamaño de cateto de soldadura seleccionado:

$$K = 10 \text{ mm}$$

Diámetro de la abertura

$$\alpha = 0.68^\circ$$

$$dc = 2 \cdot Rm \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

$$dc = 151.63 \text{ mm}$$

Área de refuerzo requerida:

Según AD-520:

$$A = dc(tr)(F)$$

$$A = 8582.00 \text{ mm}^2$$

Límite a lo largo de la pared del cuerpo:

Según AD-540.1:

$$LL1 = dc$$

$$LL1 = 151.63 \text{ mm}$$

$$LL2 = \frac{dc}{2} + (t - c) + (tn - c)$$

$$LL2 = 170.44 \text{ mm}$$

El límite a lo largo del cuerpo es el mayor de $LL1 = 151.63 \text{ mm}$ y $LL2 = 170.44 \text{ mm}$:

$$LL = 170.44 \text{ mm}$$

Límite paralelo al eje de la boca

$$LP1 = XZ - Rm \cdot \sin\left(\text{asen} \frac{XZ}{Rm} - \frac{LL}{Rm}\right)$$

$$LP1 = 169.10 \text{ mm}$$

$$LP2 = Rm \cdot \sin\left(\text{asen} \frac{XZ}{Rm} + \frac{LL}{Rm}\right) - XZ$$

$$LP2 = 169.09 \text{ mm}$$

Área disponible en la pared de la esfera

$$A_{a1} = 22.69 \text{ mm}^2$$

$$A_{a2} = 22.76 \text{ mm}^2$$

$$A_a = A_{a1} + A_{a2}$$

$$A_a = 45.45 \text{ mm}^2$$

Límite normal a la pared del cuerpo

Según AD-540.2 (a):

$$2.5(t_n - c) + K = 104.06 \text{ mm}$$

$$h_1 = 106.45 \text{ mm}$$

$$h_2 = 136.36 \text{ mm}$$

$$h_3 = 102.00 \text{ mm}$$

$h_1 = 106.45 \text{ mm}$ y $h_2 = 136.36 \text{ mm}$ son mayor que $2.5(t_n - c) + K = 104.06 \text{ mm}$, entonces el límite normal LN es el mayor de:

$$0.5\sqrt{rm(t_n - c)} + K = 39.73 \text{ mm}$$

$$2.5(t_n - c) = 94.06 \text{ mm}$$

pero no debe exceder

$$2.5(t - c) = 142.50 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el límite normal es:

$$LN_1 = LN_2 = 94.06 \text{ mm}$$

$h_3 = 102.00 \text{ mm}$ es menor que $2.5(t_n - c) + K = 104.06 \text{ mm}$, entonces el límite normal LN3 es el mayor de:

$$0.5\sqrt{rm(t_n - c)} + K = 39.73 \text{ mm}$$

$$1.73(t_n - t_{pi} + c) + 2.5(t_n - 2c) + K = 80.46 \text{ mm}$$

pero no debe exceder

$$2.5(t - c) = 142.50 \text{ mm}$$

ni

$$L3 + 2.5(t_{pi} - 2c) = 148.08 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el límite normal 3 es:

$$LN3 = 80.46 \text{ mm}$$

Área disponible en la pared de la boca

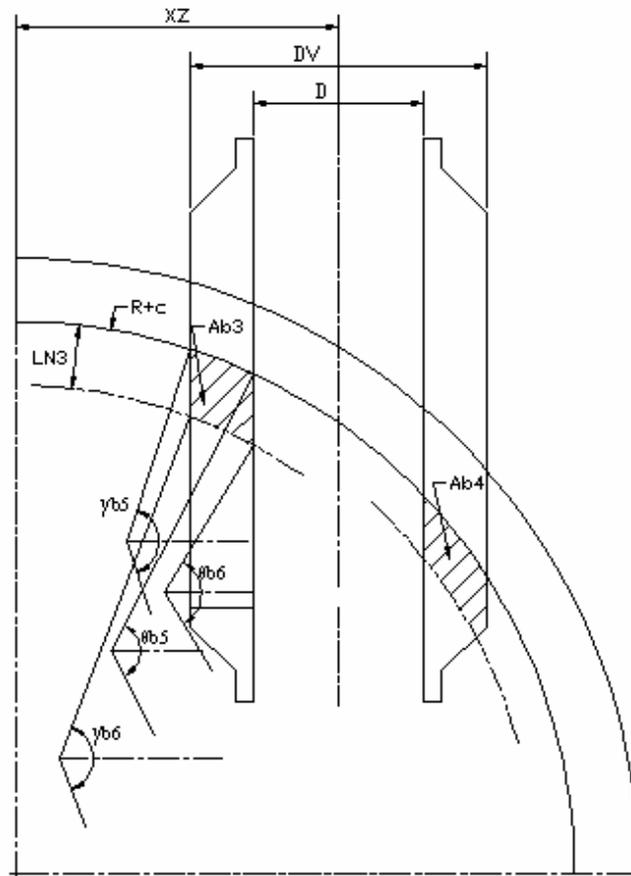


Figura 3.18. Área disponible en la pared de la boca interior a la esfera

$$A_{b1} = 3715.12 \text{ mm}^2$$

$$A_{b2} = 3445.42 \text{ mm}^2$$

$$A_{b3-1} = \frac{1}{2}(R+c)^2(\gamma_{b5} - \text{sen}\gamma_{b5}) - \frac{1}{2}(R+c)^2(\theta_{b5} - \text{sen}\theta_{b5})$$

$$\cos \frac{\gamma_{b5}}{2} = \frac{XZ - DVc/2}{R+c}$$

$$\cos \frac{\theta_{b5}}{2} = \frac{XZ - Dc/2}{R + c}$$

$$A_{b3-2} = \frac{1}{2}(R + c - LN3)^2 (\gamma_{b6} - \text{sen} \gamma_{b6}) - \frac{1}{2}(R + c - LN3)^2 (\theta_{b6} - \text{sen} \theta_{b6})$$

$$\cos \frac{\gamma_{b6}}{2} = \frac{XZ - DVc/2}{R + c - LN3}$$

$$\cos \frac{\theta_{b6}}{2} = \frac{XZ - Dc/2}{R + c - LN3}$$

$$A_{b3} = \frac{(A_{b3-1}) - (A_{b3-2})}{2}$$

$$A_{b3} = 3051.72 \text{ mm}^2$$

$$A_b = (A_{b1} + A_{b2} + A_{b3})$$

$$A_b = 10212.26 \text{ mm}^2$$

Área equivalente

$$A_{eq} = A_a + A_b \left(\frac{S_n}{S} \right)$$

$$A_{eq} = 10046.62 \text{ mm}^2$$

El área equivalente $A_{eq} = 10046.62 \text{ mm}^2$ es mayor que el área requerida $A = 8582.00 \text{ mm}^2$.

3.2.4.6. Bocas E Y F

Marca: FVC

Tipo: LWN

Diámetro nominal = 1.5 pulg.

Clase ANSI = 150

Material: SA-105

Servicio boca E: Sensor de presión

Servicio boca F: Sensor de temperatura

P = 1423.5 kPa

Sn = 156786 kPa

S = 160096 kPa
rn = 19.05 mm
c = 2 mm
tr = 56.6 mm
t = 59 mm
tn = 14.22 mm
tp = 14.22 mm
XZ = 1677.05 mm
R = 12700 mm

Determinación de espesores:

Según AD-602:

Según AD-201 (a):

Espesor requerido por presión

$$trn = \frac{P(rn + c)}{Sn - 0.5P}$$

$$trn = 0.19 \text{ mm}$$

Espesor requerido por presión más corrosión permitida:

$$trn1 = trn + c$$

$$trn1 = 2.19 \text{ mm}$$

Según AD-602 (a):

Espesor requerido del cuerpo más corrosión permitida.

$$trn2 = tr + c$$

$$trn2 = 58.6 \text{ mm}$$

Según AD-602 (b):

Espesor mínimo de pared de una tubería estándar más la corrosión permitida.

$$trn3 = 5.22 \text{ mm}$$

El espesor mínimo tiene que ser mayor a $trn1 = 2.19$ mm, y no menor al más pequeño de $trn2 = 58.6$ mm y $trn3 = 5.22$ mm:

$$tp = 14.22 \text{ mm} > 5.22 \text{ mm}$$

Soldadura

Según AD-601 (c) y AD-601.1

$$tc1 = 6.35 \text{ mm}$$

$$tc2 = 0.7tn$$

$$tc2 = 9.95 \text{ mm}$$

El tamaño de la garganta de soldadura no debe ser menor al menor de $tc1 = 6.35$ mm y $tc2 = 9.95$ mm

Tamaño de cateto de soldadura seleccionado:

$$K = 10 \text{ mm}$$

3.2.4.7. Boca G1

Marca: FVC

Tipo: V2

Diámetro nominal = 8 pulg.

Clase ANSI = 150

Material: SA-105

Servicio: Alivio

$$P = 1423.5 \text{ kPa}$$

$$Sn = 156786 \text{ kPa}$$

$$S = 160096 \text{ kPa}$$

$$rn = 96.77 \text{ mm}$$

$$c = 2 \text{ mm}$$

$$tr = 56.6 \text{ mm}$$

$$t = 59 \text{ mm}$$

$$t_n = 49.28 \text{ mm}$$

$$t_p = 36.58 \text{ mm}$$

$$t_{pi} = 12.70 \text{ mm}$$

$$XZ = 2371.71 \text{ mm}$$

$$R = 12700 \text{ mm}$$

$$R_m = R + c + \frac{t - c}{2} = 12730.5 \text{ mm}$$

$$r_m = r_n + c + \frac{t_n - c}{2} = 122.41 \text{ mm}$$

Determinación de espesores:

Según AD-602:

Según AD-201 (a):

Espesor requerido por presión

$$t_{rn} = \frac{P(r_n + c)}{S_n - 0.5P}$$

$$t_{rn} = 0.90 \text{ mm}$$

Espesor requerido por presión más corrosión permitida:

$$t_{rn1} = t_{rn} + 2c$$

$$t_{rn1} = 4.90 \text{ mm}$$

Según AD-602 (a):

Espesor requerido del cuerpo más corrosión permitida.

$$t_{rn2} = t_r + c$$

$$t_{rn2} = 58.6 \text{ mm}$$

Según AD-602 (b):

Espesor mínimo de pared de una tubería estándar más la corrosión permitida.

$$t_{rn3} = 11.16 \text{ mm}$$

El espesor mínimo tiene que ser mayor a $trn1 = 4.90$ mm, y no menor al más pequeño de $trn2 = 58.6$ mm y $trn3 = 11.16$ mm:

$$t_{pi} = 12.70 \text{ mm} > 11.16 \text{ mm}$$

Soldadura

Según AD-601 (c) y AD-601.1

$$tc1 = 6.35 \text{ mm}$$

$$tc2 = 0.7t_n$$

$$tc2 = 34.50 \text{ mm}$$

El tamaño de la garganta de soldadura no debe ser menor al menor de $tc1 = 6.35$ mm y $tc2 = 34.50$ mm

Tamaño de cateto de soldadura seleccionado:

$$K = 10 \text{ mm}$$

Diámetro de la abertura

$$\alpha = 0.90^\circ$$

$$dc = 2 \cdot R_m \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

$$dc = 201.07 \text{ mm}$$

Área de refuerzo requerida:

Según AD-520:

$$A = dc(tr)(F)$$

$$A = 11380.47 \text{ mm}^2$$

Límite a lo largo de la pared del cuerpo:

Según AD-540.1:

$$LL1 = dc$$

$$LL1 = 201.07 \text{ mm}$$

$$LL2 = \frac{dc}{2} + (t - c) + (tn - c)$$

$$LL2 = 204.81 \text{ mm}$$

El límite a lo largo del cuerpo es el mayor de $LL1 = 201.07 \text{ mm}$ y $LL2 = 204.81 \text{ mm}$:

$$LL = 204.81 \text{ mm}$$

Límite paralelo al eje de la boca

$$LP1 = XZ - R_m \cdot \sin\left(\arcsin\left(\frac{XZ}{R_m} - \frac{LL}{R_m}\right)\right)$$

$$LP1 = 201.52 \text{ mm}$$

$$LP2 = R_m \cdot \sin\left(\arcsin\left(\frac{XZ}{R_m} + \frac{LL}{R_m}\right)\right) - XZ$$

$$LP2 = 201.51 \text{ mm}$$

Área disponible en la pared de la esfera

$$A_{a1} = 22.53 \text{ mm}^2$$

$$A_{a2} = 22.64 \text{ mm}^2$$

$$A_a = A_{a1} + A_{a2}$$

$$A_a = 45.17 \text{ mm}^2$$

Límite normal a la pared del cuerpo

Según AD-540.2 (a):

$$2.5(tn - c) + K = 128.19 \text{ mm}$$

$$h1 = 122.77 \text{ mm}$$

$$h2 = 178.04 \text{ mm}$$

$$h_3 = 100.00 \text{ mm}$$

$h_1 = 122.77 \text{ mm}$ es menor que $2.5(t_n - c) + K = 128.19 \text{ mm}$, entonces el límite normal LN1 es el mayor de:

$$0.5\sqrt{r_m(t_n - c)} + K = 48.04 \text{ mm}$$

$$1.73(t_n - t_p) + 2.5(t_p - c) + K = 118.41 \text{ mm}$$

pero no debe exceder

$$2.5(t - c) = 142.50 \text{ mm}$$

ni

$$L_1 + 2.5(t_p - c) = 221.91 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el límite normal 1 es:

$$LN_1 = 118.41 \text{ mm}$$

$h_2 = 178.04 \text{ mm}$ es mayor que $2.5(t_n - c) + K = 128.19 \text{ mm}$, entonces el límite normal LN2 es el mayor de:

$$0.5\sqrt{r_m(t_n - c)} + K = 48.04 \text{ mm}$$

$$2.5(t_n - c) = 118.19 \text{ mm}$$

pero no debe exceder

$$2.5(t - c) = 142.50 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el límite normal 2 es:

$$LN_2 = 118.19 \text{ mm}$$

$h_3 = 100.00 \text{ mm}$ es menor que $2.5(t_n - c) + K = 128.19 \text{ mm}$, entonces el límite normal LN3 es el mayor de:

$$0.5\sqrt{r_m(t_n - c)} + K = 48.04 \text{ mm}$$

$$1.73(t_n - t_p + c) + 2.5(t_n - 2c) + K = 98.49 \text{ mm}$$

pero no debe exceder

$$2.5(t - c) = 142.50 \text{ mm}$$

ni

$$L3 + 2.5(tp - 2c) = 158.33 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el límite normal 3 es:

$$LN3 = 98.49 \text{ mm}$$

Área disponible en la pared de la boca

$$A_{b1} = 5366.06 \text{ mm}^2$$

$$A_{b2} = 5375.90 \text{ mm}^2$$

$$A_{b3} = 4734.42 \text{ mm}^2$$

$$A_b = (A_{b1} + A_{b2} + A_{b3})$$

$$A_b = 15476.38 \text{ mm}^2$$

Área equivalente

$$A_{eq} = A_a + A_b \left(\frac{S_n}{S} \right)$$

$$A_{eq} = 15201.62 \text{ mm}^2$$

El área equivalente $A_{eq} = 15201.62 \text{ mm}^2$ es mayor que el área requerida $A = 11380.47 \text{ mm}^2$.

3.2.4.8. Boca G2

Marca: FVC

Tipo: V2

Diámetro nominal = 8 pulg.

Clase ANSI = 150

Material: SA-105

Servicio: Alivio

P = 1423.5 kPa

$$S_n = 156786 \text{ kPa}$$

$$S = 160096 \text{ kPa}$$

$$r_n = 96.77 \text{ mm}$$

$$c = 2 \text{ mm}$$

$$t_r = 56.6 \text{ mm}$$

$$t = 59 \text{ mm}$$

$$t_n = 49.28 \text{ mm}$$

$$t_p = 36.58 \text{ mm}$$

$$t_{pi} = 12.70 \text{ mm}$$

$$XZ = 750.00 \text{ mm}$$

$$R = 12700 \text{ mm}$$

$$R_m = R + c + \frac{t - c}{2} = 12730.5 \text{ mm}$$

$$r_m = r_n + c + \frac{t_n - c}{2} = 122.41 \text{ mm}$$

Determinación de espesores:

Igual a los de la boca G1.

Soldadura

Igual a la de la boca G1.

Diámetro de la abertura

$$\alpha = 0.89^\circ$$

$$d_c = 2 \cdot R_m \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

$$d_c = 197.89 \text{ mm}$$

Área de refuerzo requerida:

Según AD-520:

$$A = dc(tr)(F)$$

$$A = 11200.67 \text{ mm}^2$$

Límite a lo largo de la pared del cuerpo:

Según AD-540.1:

$$LL1 = dc$$

$$LL1 = 197.89 \text{ mm}$$

$$LL2 = \frac{dc}{2} + (t - c) + (tn - c)$$

$$LL2 = 203.22 \text{ mm}$$

El límite a lo largo del cuerpo es el mayor de $LL1 = 197.89 \text{ mm}$ y $LL2 = 203.22 \text{ mm}$:

$$LL = 203.22 \text{ mm}$$

Límite paralelo al eje de la boca

$$LP1 = XZ - Rm \cdot \text{sen} \left(\text{asen} \frac{XZ}{Rm} - \frac{LL}{Rm} \right)$$

$$LP1 = 202.96 \text{ mm}$$

$$LP2 = Rm \cdot \text{sen} \left(\text{asen} \frac{XZ}{Rm} + \frac{LL}{Rm} \right) - XZ$$

$$LP2 = 202.95 \text{ mm}$$

Área disponible en la pared de la esfera

$$A_{a1} = 22.79 \text{ mm}^2$$

$$A_{a2} = 22.82 \text{ mm}^2$$

$$A_a = A_{a1} + A_{a2}$$

$$A_a = 45.60 \text{ mm}^2$$

Límite normal a la pared del cuerpo

Según AD-540.2 (a):

$$2.5(t_n - c) + K = 128.19 \text{ mm}$$

$$h_1 = 121.45 \text{ mm}$$

$$h_2 = 138.66 \text{ mm}$$

$$h_3 = 102.30 \text{ mm}$$

$h_1 = 121.45 \text{ mm}$ es menor que $2.5(t_n - c) + K = 128.19 \text{ mm}$, entonces el límite normal LN1 es el mayor de:

$$0.5\sqrt{r_m(t_n - c)} + K = 48.04 \text{ mm}$$

$$1.73(t_n - t_p) + 2.5(t_p - c) + K = 118.41 \text{ mm}$$

pero no debe exceder

$$2.5(t - c) = 142.50 \text{ mm}$$

ni

$$L_1 + 2.5(t_p - c) = 220.59 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el límite normal 1 es:

$$LN_1 = 118.41 \text{ mm}$$

$h_2 = 138.66 \text{ mm}$ es mayor que $2.5(t_n - c) + K = 128.19 \text{ mm}$, entonces el límite normal LN2 es el mayor de:

$$0.5\sqrt{r_m(t_n - c)} + K = 48.04 \text{ mm}$$

$$2.5(t_n - c) = 118.19 \text{ mm}$$

pero no debe exceder

$$2.5(t - c) = 142.50 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el límite normal 2 es:

$$LN_2 = 118.19 \text{ mm}$$

$h_3 = 102.30 \text{ mm}$ es menor que $2.5(t_n - c) + K = 128.19 \text{ mm}$, entonces el límite normal LN3 es el mayor de:

$$0.5\sqrt{r_m(t_n - c)} + K = 48.04 \text{ mm}$$

$$1.73(t_n - t_p + c) + 2.5(t_n - 2c) + K = 98.49 \text{ mm}$$

pero no debe exceder

$$2.5(t - c) = 142.50 \text{ mm}$$

ni

$$L_3 + 2.5(t_p - 2c) = 160.63 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el límite normal 3 es:

$$LN_3 = 98.49 \text{ mm}$$

Área disponible en la pared de la boca

$$A_{b1} = 5477.53 \text{ mm}^2$$

$$A_{b2} = 5473.47 \text{ mm}^2$$

$$A_{b3} = 4661.37 \text{ mm}^2$$

$$A_b = (A_{b1} + A_{b2} + A_{b3})$$

$$A_b = 15612.37 \text{ mm}^2$$

Área equivalente

$$A_{eq} = A_a + A_b \left(\frac{S_n}{S} \right)$$

$$A_{eq} = 15335.24 \text{ mm}^2$$

El área equivalente $A_{eq} = 15335.24 \text{ mm}^2$ es mayor que el área requerida $A = 11200.67 \text{ mm}^2$.

3.2.4.9. Boca G3

Marca: FVC

Tipo: V2

Diámetro nominal = 8 pulg.

Clase ANSI = 150

Material: SA-105

Servicio: Alivio

P = 1423.5 kPa

Sn = 156786 kPa

S = 160096 kPa

rn = 96.77 mm

c = 2 mm

tr = 56.6 mm

t = 59 mm

tn = 49.28 mm

tp = 36.58 mm

tpi = 12.70 mm

XZ = 1677.05 mm

R = 12700 mm

$$R_m = R + c + \frac{t - c}{2} = 12730.5 \text{ mm}$$

$$r_m = r_n + c + \frac{t_n - c}{2} = 122.41 \text{ mm}$$

Determinación de espesores:

Iguales a los de la boca G1.

Soldadura

Igual a la de la boca G1.

Diámetro de la abertura

$$\alpha = 0.90^\circ$$

$$d_c = 2 \cdot R_m \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

$$d_c = 199.28 \text{ mm}$$

Área de refuerzo requerida:

Según AD-520:

$$A = dc(tr)(F)$$

$$A = 11279.52 \text{ mm}^2$$

Límite a lo largo de la pared del cuerpo:

Según AD-540.1:

$$LL1 = dc$$

$$LL1 = 199.28 \text{ mm}$$

$$LL2 = \frac{dc}{2} + (t - c) + (tn - c)$$

$$LL2 = 203.92 \text{ mm}$$

El límite a lo largo del cuerpo es el mayor de $LL1 = 199.28 \text{ mm}$ y $LL2 = 203.92 \text{ mm}$:

$$LL = 203.92 \text{ mm}$$

Límite paralelo al eje de la boca

$$LP1 = XZ - Rm \cdot \text{sen} \left(\text{asen} \frac{XZ}{Rm} - \frac{LL}{Rm} \right)$$

$$LP1 = 202.35 \text{ mm}$$

$$LP2 = Rm \cdot \text{sen} \left(\text{asen} \frac{XZ}{Rm} + \frac{LL}{Rm} \right) - XZ$$

$$LP2 = 202.34 \text{ mm}$$

Área disponible en la pared de la esfera

$$A_{a1} = 22.68 \text{ mm}^2$$

$$A_{a2} = 22.76 \text{ mm}^2$$

$$A_a = A_{a1} + A_{a2}$$

$$A_a = 45.43 \text{ mm}^2$$

Límite normal a la pared del cuerpo

Según AD-540.2 (a):

$$2.5(t_n - c) + K = 128.19 \text{ mm}$$

$$h_1 = 119.34 \text{ mm}$$

$$h_2 = 158.07 \text{ mm}$$

$$h_3 = 104.21 \text{ mm}$$

$h_1 = 119.34 \text{ mm}$ es menor que $2.5(t_n - c) + K = 128.19 \text{ mm}$, entonces el límite normal LN1 es el mayor de:

$$0.5\sqrt{r_m(t_n - c)} + K = 48.04 \text{ mm}$$

$$1.73(t_n - t_p) + 2.5(t_p - c) + K = 118.41 \text{ mm}$$

pero no debe exceder

$$2.5(t - c) = 142.50 \text{ mm}$$

ni

$$L_1 + 2.5(t_p - c) = 218.48 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el límite normal 1 es:

$$LN_1 = 118.41 \text{ mm}$$

$h_2 = 158.07 \text{ mm}$ es mayor que $2.5(t_n - c) + K = 128.19 \text{ mm}$, entonces el límite normal LN2 es el mayor de:

$$0.5\sqrt{r_m(t_n - c)} + K = 48.04 \text{ mm}$$

$$2.5(t_n - c) = 118.19 \text{ mm}$$

pero no debe exceder

$$2.5(t - c) = 142.50 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el límite normal 2 es:

$$LN_2 = 118.19 \text{ mm}$$

$h_3 = 104.21 \text{ mm}$ es menor que $2.5(t_n - c) + K = 128.19 \text{ mm}$, entonces el límite normal LN3 es el mayor de:

$$0.5\sqrt{r_m(t_n - c)} + K = 48.04 \text{ mm}$$

$$1.73(t_n - t_p + c) + 2.5(t_n - 2c) + K = 98.49 \text{ mm}$$

pero no debe exceder

$$2.5(t - c) = 142.50 \text{ mm}$$

ni

$$L_3 + 2.5(t_p - 2c) = 162.54 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el límite normal 3 es:

$$LN_3 = 98.49 \text{ mm}$$

Área disponible en la pared de la boca

$$A_{b1} = 5428.52 \text{ mm}^2$$

$$A_{b2} = 5432.28 \text{ mm}^2$$

$$A_{b3} = 4692.65 \text{ mm}^2$$

$$A_b = (A_{b1} + A_{b2} + A_{b3})$$

$$A_b = 15553.46 \text{ mm}^2$$

Área equivalente

$$A_{eq} = A_a + A_b \left(\frac{S_n}{S} \right)$$

$$A_{eq} = 15277.37 \text{ mm}^2$$

El área equivalente $A_{eq} = 15277.37 \text{ mm}^2$ es mayor que el área requerida $A = 11279.52 \text{ mm}^2$.

3.2.4.10. Boca H

Marca: FVC

Tipo: F

Diámetro nominal = 24 pulg.

Clase ANSI = 150

Material: SA-105

Servicio: Entrada de hombre

P = 1423.5 kPa

Sn = 156786 kPa

S = 160096 kPa

rn = 304.80 mm

c = 2 mm

tr = 56.6 mm

t = 59 mm

tn = 101.60 mm

tp = 44.45 mm

XZ = 2500.00 mm

R = 12700 mm

$$R_m = R + c + \frac{t - c}{2} = 12730.5 \text{ mm}$$

$$r_m = r_n + c + \frac{t_n - c}{2} = 356.60 \text{ mm}$$

Determinación de espesores:

Según AD-602:

Para accesos de inspección solamente se requiere que el espesor requerido sea mayor que el calculado por presión más la corrosión permitida.

Según AD-201 (a):

Espesor requerido por presión

$$t_{rn} = \frac{P(r_n + c)}{S_n - 0.5P}$$

$$t_{rn} = 2.80 \text{ mm}$$

Espesor requerido por presión más corrosión permitida:

$$t_{rn1} = t_{rn} + c$$

$$trn1 = 4.80 \text{ mm}$$

$$tp = 44.45 \text{ mm} > 4.80 \text{ mm}$$

Soldadura

Según AD-601 (c) y AD-601.1

$$tc1 = 6.35 \text{ mm}$$

$$tc2 = 0.7tn$$

$$tc2 = 71.12 \text{ mm}$$

El tamaño de la garganta de soldadura no debe ser menor al menor de $tc1 = 6.35 \text{ mm}$ y $tc2 = 71.12 \text{ mm}$

Tamaño de cateto de soldadura seleccionado:

$$K = 10 \text{ mm}$$

Diámetro de la abertura

$$\alpha = 2.82^\circ$$

$$dc = 2 \cdot Rm \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

$$dc = 625.79 \text{ mm}$$

Área de refuerzo requerida:

Según AD-520:

$$A = dc(tr)(F)$$

$$A = 35419.87 \text{ mm}^2$$

Límite a lo largo de la pared del cuerpo:

Según AD-540.1:

$$LL1 = dc$$

$$LL1 = 625.79 \text{ mm}$$

$$LL2 = \frac{dc}{2} + (t - c) + (tn - c)$$

$$LL2 = 469.50 \text{ mm}$$

El límite a lo largo del cuerpo es el mayor de $LL1 = 625.79 \text{ mm}$ y $LL2 = 469.50 \text{ mm}$:

$$LL = 625.79 \text{ mm}$$

Límite paralelo al eje de la boca

$$LP1 = XZ - R_m \cdot \text{sen} \left(a \text{sen} \frac{XZ}{R_m} - \frac{LL}{R_m} \right)$$

$$LP1 = 616.38 \text{ mm}$$

$$LP2 = R_m \cdot \text{sen} \left(a \text{sen} \frac{XZ}{R_m} + \frac{LL}{R_m} \right) - XZ$$

$$LP2 = 616.14 \text{ mm}$$

Área disponible en la pared de la esfera

$$A_{a1} = 85.03 \text{ mm}^2$$

$$A_{a2} = 86.34 \text{ mm}^2$$

$$A_a = A_{a1} + A_{a2}$$

$$A_a = 171.37 \text{ mm}^2$$

Límite normal a la pared del cuerpo

Según AD-540.2 (a):

$$2.5(tn - c) + K = 259.00 \text{ mm}$$

$$h1 = 148.09 \text{ mm}$$

$$h2 = 310.58 \text{ mm}$$

$$h3 = 186.27 \text{ mm}$$

$h_1 = 148.09$ mm es menor que $2.5(t_n - c) + K = 259.00$ mm , entonces el límite normal LN1 es el mayor de:

$$0.5\sqrt{r_m(t_n - c)} + K = 104.23 \text{ mm}$$

$$1.73(t_n - t_p) + 2.5(t_p - c) + K = 214.99 \text{ mm}$$

pero no debe exceder

$$2.5(t - c) = 142.50 \text{ mm}$$

ni

$$L_1 + 2.5(t_p - c) = 311.36 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el límite normal 1 es:

$$LN_1 = 142.50 \text{ mm}$$

$h_2 = 310.58$ mm es mayor que $2.5(t_n - c) + K = 259.00$ mm , entonces el límite normal LN2 es el mayor de:

$$0.5\sqrt{r_m(t_n - c)} + K = 104.23 \text{ mm}$$

$$2.5(t_n - c) = 249.00 \text{ mm}$$

pero no debe exceder

$$2.5(t - c) = 142.50 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el límite normal 2 es:

$$LN_2 = 142.50 \text{ mm}$$

$h_3 = 186.27$ mm es menor que $2.5(t_n - c) + K = 259.00$ mm , entonces el límite normal LN3 es el mayor de:

$$0.5\sqrt{r_m(t_n - c)} + K = 104.23 \text{ mm}$$

$$1.73(t_n - t_n) + 2.5(t_n - 2c) + K = 254.00 \text{ mm}$$

pero no debe exceder

$$2.5(t - c) = 142.50 \text{ mm}$$

ni

$$h_3 + 2.5(t_n - 2c) = 430.27 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el límite normal 3 es:

$$LN_3 = 142.50 \text{ mm}$$

Área disponible en la pared de la boca

$$A_{b1} = 13108.99 \text{ mm}^2$$

$$A_{b2} = 13259.41 \text{ mm}^2$$

$$A_{b3} = 14122.46 \text{ mm}^2$$

$$A_b = (A_{b1} + A_{b2} + A_{b3})$$

$$A_b = 40490.86 \text{ mm}^2$$

Área equivalente

$$A_{eq} = A_a + A_b \left(\frac{S_n}{S} \right)$$

$$A_{eq} = 39825.22 \text{ mm}^2$$

El área equivalente $A_{eq} = 39825.22 \text{ mm}^2$ es mayor que el área requerida $A = 35419.87 \text{ mm}^2$.

3.2.4.11. Boca I

Marca: FVC

Tipo: LWN

Diámetro nominal = 4 pulg.

Clase ANSI = 150

Material: SA-105

Servicio: Sensor de nivel

$$P = 1289 \text{ kPa}$$

$$S_n = 156786 \text{ kPa}$$

$$S = 160096 \text{ kPa}$$

$$r_n = 50.80 \text{ mm}$$

c = 2 mm
tr = 51.7 mm
t = 54 mm
tn = 19.05 mm
tp = 19.05 mm
XZ = 0.00 mm
R = 12700 mm

Determinación de espesores:

Según AD-602:

Según AD-201 (a):

Espesor requerido por presión

$$tr_n = \frac{P(r_n + c)}{S_n - 0.5P}$$

$$tr_n = 0.44 \text{ mm}$$

Espesor requerido por presión más corrosión permitida:

$$tr_{n1} = tr_n + c$$

$$tr_{n1} = 2.44 \text{ mm}$$

Según AD-602 (a):

Espesor requerido del cuerpo más corrosión permitida.

$$tr_{n2} = tr + c$$

$$tr_{n2} = 53.7 \text{ mm}$$

Según AD-602 (b):

Espesor mínimo de pared de una tubería estándar más la corrosión permitida.

$$tr_{n3} = 5.27 \text{ mm}$$

El espesor mínimo tiene que ser mayor a $trn1 = 2.44$ mm, y no menor al más pequeño de $trn2 = 53.7$ mm y $trn3 = 5.27$ mm:

$$tp = 19.05 \text{ mm} > 5.27 \text{ mm}$$

Soldadura

Según AD-601 (c) y AD-601.1

$$tc1 = 6.35 \text{ mm}$$

$$tc2 = 0.7tn$$

$$tc2 = 13.34 \text{ mm}$$

El tamaño de la garganta de soldadura no debe ser menor al menor de $tc1 = 6.35$ mm y $tc2 = 13.34$ mm

Tamaño de cateto de soldadura seleccionado:

$$K = 10 \text{ mm}$$

3.2.4.12. Bocas J Y K:

Marca: FVC

Tipo: LWN

Diámetro nominal = 1.5 pulg.

Clase ANSI = 150

Material: SA-105

Servicio boca J: Sensor de presión

Servicio boca K: Sensor de temperatura

$$P = 1289 \text{ kPa}$$

$$Sn = 156786 \text{ kPa}$$

$$S = 160096 \text{ kPa}$$

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

$$c = 2 \text{ mm}$$

$$tr = 51.7 \text{ mm}$$

$$t = 54 \text{ mm}$$

tn = 14.22 mm
tp = 14.22 mm
XZ = 1677.05 mm
R = 12700 mm

Determinación de espesores:

Según AD-602:

Según AD-201 (a):

Espesor requerido por presión

$$trn = \frac{P(rn + c)}{Sn - 0.5P}$$

trn = 0.17 mm

Espesor requerido por presión más corrosión permitida:

$$trn1 = trn + c$$

trn1 = 2.17 mm

Según AD-602 (a):

Espesor requerido del cuerpo más corrosión permitida.

$$trn2 = tr + c$$

trn2 = 53.7 mm

Según AD-602 (b):

Espesor mínimo de pared de una tubería estándar más la corrosión permitida.

trn3 = 5.22 mm

El espesor mínimo tiene que ser mayor a trn1 = 2.19 mm, y no menor al más pequeño de trn2 = 53.7 mm y trn3 = 5.22 mm:

tp = 14.22 mm > 5.22 mm

Soldadura

Según AD-601 (c) y AD-601.1

$$tc1 = 6.35 \text{ mm}$$

$$tc2 = 0.7tn$$

$$tc2 = 9.95 \text{ mm}$$

El tamaño de la garganta de soldadura no debe ser menor al menor de $tc1 = 6.35 \text{ mm}$ y $tc2 = 9.95 \text{ mm}$

Tamaño de cateto de soldadura seleccionado:

$$K = 10 \text{ mm}$$

3.2.4.13. Boca L1

Marca: FVC

Tipo: V2

Diámetro nominal = 8 pulg.

Clase ANSI = 150

Material: SA-105

Servicio: Alivio

$$P = 1289 \text{ kPa}$$

$$Sn = 156786 \text{ kPa}$$

$$S = 160096 \text{ kPa}$$

$$rn = 96.77 \text{ mm}$$

$$c = 2 \text{ mm}$$

$$tr = 51.7 \text{ mm}$$

$$t = 54 \text{ mm}$$

$$tn = 49.28 \text{ mm}$$

$$tp = 36.58 \text{ mm}$$

$$XZ = 2371.71 \text{ mm}$$

$$R = 12700 \text{ mm}$$

$$Rm = R + c + \frac{t - c}{2} = 12728 \text{ mm}$$

$$r_m = r_n + c + \frac{t_n - c}{2} = 122.41 \text{ mm}$$

Las válvulas de alivio en la parte superior, L1, L2, L3 se han dimensionado de la siguiente manera:

$$D_e := 25400 \text{ mm} \quad \text{Diámetro de la esfera}$$

$$A_e := D_e^2 \cdot \pi$$

$$A_e = 2026.83 \text{ m}^2 \quad \text{Área de la esfera}$$

$$Q := 53.632 \cdot A_e^{.82} \quad \text{NFPA 58: 2.3.2.4(a)}$$

$$\frac{\text{ft}^3}{\text{min}}$$

$$Q := 91.431 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad \text{Caudal de aire}$$

Cálculo del Seteo de Presión de la válvula

$$P_d := 1289319.61 \text{ Pa} \quad \text{Presión de Diseño}$$

$$P := P_d \cdot 1.1 + 101325 \text{ Pa} \quad \text{ASME Sección VIII División 2 AR-142(b)}$$

$$P = 1519576.571 \text{ Pa} \quad \text{Presión de seteo de Válvulas de Alivio parte superior}$$

Con la presión de seteo y el caudal de aire a condiciones estándares calculado, seleccionamos la válvula apropiada en el catálogo Crosby No 310.

$$\frac{Q}{2} = 45.715 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Se usarán 3 válvulas **JBS-45-8T10**: dos válvulas principales que cubren el caudal requerido y una válvula auxiliar.

Estas 3 válvulas en la parte superior del recipiente esférico tienen desfogue hacia la atmósfera.

Determinación de espesores:

Según AD-602:

Según AD-201 (a):

Espesor requerido por presión

$$trn = \frac{P(rn + c)}{Sn - 0.5P}$$

$$trn = 0.82 \text{ mm}$$

Espesor requerido por presión más corrosión permitida:

$$trn1 = trn + c$$

$$trn1 = 2.82 \text{ mm}$$

Según AD-602 (a):

Espesor requerido del cuerpo más corrosión permitida.

$$trn2 = tr + c$$

$$trn2 = 53.7 \text{ mm}$$

Según AD-602 (b):

Espesor mínimo de pared de una tubería estándar más la corrosión permitida.

$$trn3 = 9.16 \text{ mm}$$

El espesor mínimo tiene que ser mayor a $trn1 = 2.82 \text{ mm}$, y no menor al más pequeño de $trn2 = 53.7 \text{ mm}$ y $trn3 = 9.16 \text{ mm}$:

$$tp = 36.58 \text{ mm} > 9.16 \text{ mm}$$

Soldadura

Según AD-601 (c) y AD-601.1

$$tc1 = 6.35 \text{ mm}$$

$$tc2 = 0.7tn$$

$$tc2 = 34.50 \text{ mm}$$

El tamaño de la garganta de soldadura no debe ser menor al menor de $t_{c1} = 6.35 \text{ mm}$ y $t_{c2} = 34.50 \text{ mm}$

Tamaño de cateto de soldadura seleccionado:

$$K = 10 \text{ mm}$$

Diámetro de la abertura

$$\alpha = 0.91^\circ$$

$$d_c = 2 \cdot R_m \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

$$d_c = 201.07 \text{ mm}$$

Área de refuerzo requerida:

Según AD-520:

$$A = d_c(t_r)(F)$$

$$A = 10395.31 \text{ mm}^2$$

Límite a lo largo de la pared del cuerpo:

Según AD-540.1:

$$LL1 = d_c$$

$$LL1 = 201.07 \text{ mm}$$

$$LL2 = \frac{d_c}{2} + (t - c) + (t_n - c)$$

$$LL2 = 199.81 \text{ mm}$$

El límite a lo largo del cuerpo es el mayor de $LL1 = 201.07 \text{ mm}$ y $LL2 = 199.81 \text{ mm}$:

$$LL = 201.07 \text{ mm}$$

Límite paralelo al eje de la boca

$$LP1 = XZ - Rm \cdot \sin\left(a \cdot \sin\left(\frac{XZ}{Rm} - \frac{LL}{Rm}\right)\right)$$

$$LP1 = 197.84 \text{ mm}$$

$$LP2 = Rm \cdot \sin\left(a \cdot \sin\left(\frac{XZ}{Rm} + \frac{LL}{Rm}\right)\right) - XZ$$

$$LP2 = 197.83 \text{ mm}$$

Área disponible en la pared de la esfera

$$A_{a1} = 15.77 \text{ mm}^2$$

$$A_{a2} = 15.85 \text{ mm}^2$$

$$A_a = A_{a1} + A_{a2}$$

$$A_a = 31.62 \text{ mm}^2$$

Límite normal a la pared del cuerpo

Según AD-540.2 (a):

$$2.5(t_n - c) + K = 128.19 \text{ mm}$$

$$h1 = 127.85 \text{ mm}$$

$$h2 = 183.14 \text{ mm}$$

$h1 = 127.85 \text{ mm}$ es menor que $2.5(t_n - c) + K = 128.19 \text{ mm}$, entonces el límite normal LN1 es el mayor de:

$$0.5\sqrt{r_m(t_n - c)} + K = 48.04 \text{ mm}$$

$$1.73(t_n - t_p) + 2.5(t_p - c) + K = 118.41 \text{ mm}$$

pero no debe exceder

$$2.5(t - c) = 142.50 \text{ mm}$$

ni

$$L1 + 2.5(t_p - c) = 226.99 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el límite normal 1 es:

$$LN1 = 118.41 \text{ mm}$$

$h2 = 183.14 \text{ mm}$ es mayor que $2.5(tn - c) + K = 128.19 \text{ mm}$, entonces el límite normal LN2 es el mayor de:

$$0.5\sqrt{rm(tn - c)} + K = 48.04 \text{ mm}$$

$$2.5(tn - c) = 118.19 \text{ mm}$$

pero no debe exceder

$$2.5(t - c) = 142.50 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el límite normal 2 es:

$$LN2 = 118.19 \text{ mm}$$

Área disponible en la pared de la boca

$$A_{b1} = 5376.29 \text{ mm}^2$$

$$A_{b2} = 5386.15 \text{ mm}^2$$

$$A_b = (A_{b1} + A_{b2})$$

$$A_b = 10762.44 \text{ mm}^2$$

Área equivalente

$$A_{eq} = A_a + A_b \left(\frac{S_n}{S} \right)$$

$$A_{eq} = 10571.59 \text{ mm}^2$$

El área equivalente $A_{eq} = 10571.59 \text{ mm}^2$ es mayor que el área requerida $A = 10395.31 \text{ mm}^2$.

3.2.4.14. Boca L2

Marca: FVC

Tipo: V2

Diámetro nominal = 8 pulg.

Clase ANSI = 150

Material: SA-105

Servicio: Alivio

P = 1289 kPa

Sn = 156786 kPa

S = 160096 kPa

rn = 96.77 mm

c = 2 mm

tr = 51.7 mm

t = 54 mm

tn = 49.28 mm

tp = 36.58 mm

XZ = 750.00 mm

R = 12700 mm

$$R_m = R + c + \frac{t - c}{2} = 12728 \text{ mm}$$

$$r_m = r_n + c + \frac{t_n - c}{2} = 122.41 \text{ mm}$$

Determinación de espesores:

Igual a los de la boca L1.

Soldadura

Igual a la de la boca L1.

Diámetro de la abertura

$$\alpha = 0.89^\circ$$

$$d_c = 2 \cdot R_m \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

$$d_c = 197.89 \text{ mm}$$

Área de refuerzo requerida:

Según AD-520:

$$A = dc(tr)(F)$$

$$A = 10231.01 \text{ mm}^2$$

Límite a lo largo de la pared del cuerpo:

Según AD-540.1:

$$LL1 = dc$$

$$LL1 = 197.89 \text{ mm}$$

$$LL2 = \frac{dc}{2} + (t - c) + (tn - c)$$

$$LL2 = 198.22 \text{ mm}$$

El límite a lo largo del cuerpo es el mayor de $LL1 = 197.89 \text{ mm}$ y $LL2 = 198.22 \text{ mm}$:

$$LL = 198.22 \text{ mm}$$

Límite paralelo al eje de la boca

$$LP1 = XZ - Rm \cdot \text{sen} \left(\text{asen} \frac{XZ}{Rm} - \frac{LL}{Rm} \right)$$

$$LP1 = 197.96 \text{ mm}$$

$$LP2 = Rm \cdot \text{sen} \left(\text{asen} \frac{XZ}{Rm} + \frac{LL}{Rm} \right) - XZ$$

$$LP2 = 197.95 \text{ mm}$$

Área disponible en la pared de la esfera

$$A_{a1} = 15.59 \text{ mm}^2$$

$$A_{a2} = 15.61 \text{ mm}^2$$

$$A_a = A_{a1} + A_{a2}$$

$$A_a = 31.20 \text{ mm}^2$$

Límite normal a la pared del cuerpo

Según AD-540.2 (a):

$$2.5(t_n - c) + K = 128.19 \text{ mm}$$

$$h_1 = 126.46 \text{ mm}$$

$$h_2 = 143.67 \text{ mm}$$

$h_1 = 126.46 \text{ mm}$ es menor que $2.5(t_n - c) + K = 128.19 \text{ mm}$, entonces el límite normal LN1 es el mayor de:

$$0.5\sqrt{r_m(t_n - c)} + K = 48.04 \text{ mm}$$

$$1.73(t_n - t_p) + 2.5(t_p - c) + K = 118.41 \text{ mm}$$

pero no debe exceder

$$2.5(t - c) = 142.50 \text{ mm}$$

ni

$$L_1 + 2.5(t_p - c) = 225.60 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el límite normal 1 es:

$$LN_1 = 118.41 \text{ mm}$$

$h_2 = 143.67 \text{ mm}$ es mayor que $2.5(t_n - c) + K = 128.19 \text{ mm}$, entonces el límite normal LN2 es el mayor de:

$$0.5\sqrt{r_m(t_n - c)} + K = 48.04 \text{ mm}$$

$$2.5(t_n - c) = 118.19 \text{ mm}$$

pero no debe exceder

$$2.5(t - c) = 142.50 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el límite normal 2 es:

$$LN_2 = 118.19 \text{ mm}$$

Área disponible en la pared de la boca

$$A_{b1} = 5487.62 \text{ mm}^2$$

$$A_{b2} = 5483.56 \text{ mm}^2$$

$$A_b = (A_{b1} + A_{b2})$$

$$A_b = 10971.18 \text{ mm}^2$$

Área equivalente

$$A_{eq} = A_a + A_b \left(\frac{S_n}{S} \right)$$

$$A_{eq} = 10775.59 \text{ mm}^2$$

El área equivalente $A_{eq} = 10775.59 \text{ mm}^2$ es mayor que el área requerida $A = 10231.01 \text{ mm}^2$.

3.2.4.15. Boca L3

Marca: FVC

Tipo: V2

Diámetro nominal = 8 pulg.

Clase ANSI = 150

Material: SA-105

Servicio: Alivio

$$P = 1289 \text{ kPa}$$

$$S_n = 156786 \text{ kPa}$$

$$S = 160096 \text{ kPa}$$

$$r_n = 96.77 \text{ mm}$$

$$c = 2 \text{ mm}$$

$$t_r = 51.7 \text{ mm}$$

$$t = 54 \text{ mm}$$

$$t_n = 49.28 \text{ mm}$$

$$t_p = 36.58 \text{ mm}$$

$$XZ = 1677.05 \text{ mm}$$

$$R = 12700 \text{ mm}$$

$$R_m = R + c + \frac{t - c}{2} = 12728 \text{ mm}$$

$$r_m = r_n + c + \frac{t_n - c}{2} = 122.41 \text{ mm}$$

Determinación de espesores:

Igual a los de la boca L1.

Soldadura

Igual a la de la boca L1.

Diámetro de la abertura

$$\alpha = 0.90^\circ$$

$$d_c = 2 \cdot R_m \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

$$d_c = 199.29 \text{ mm}$$

Área de refuerzo requerida:

Según AD-520:

$$A = d_c(t_r)(F)$$

$$A = 10303.06 \text{ mm}^2$$

Límite a lo largo de la pared del cuerpo:

Según AD-540.1:

$$LL1 = d_c$$

$$LL1 = 199.29 \text{ mm}$$

$$LL2 = \frac{d_c}{2} + (t - c) + (t_n - c)$$

$$LL2 = 198.92 \text{ mm}$$

El límite a lo largo del cuerpo es el mayor de $LL1 = 199.29 \text{ mm}$ y $LL2 = 198.92 \text{ mm}$:

$$LL = 199.29 \text{ mm}$$

Límite paralelo al eje de la boca

$$LP1 = XZ - R_m \cdot \text{sen} \left(\text{asen} \frac{XZ}{R_m} - \frac{LL}{R_m} \right)$$

$$LP1 = 197.75 \text{ mm}$$

$$LP2 = R_m \cdot \text{sen} \left(\text{asen} \frac{XZ}{R_m} + \frac{LL}{R_m} \right) - XZ$$

$$LP2 = 197.74 \text{ mm}$$

Área disponible en la pared de la esfera

$$A_{a1} = 15.62 \text{ mm}^2$$

$$A_{a2} = 15.67 \text{ mm}^2$$

$$A_a = A_{a1} + A_{a2}$$

$$A_a = 31.29 \text{ mm}^2$$

Límite normal a la pared del cuerpo

Según AD-540.2 (a):

$$2.5(t_n - c) + K = 128.19 \text{ mm}$$

$$h_1 = 124.38 \text{ mm}$$

$$h_2 = 163.12 \text{ mm}$$

$h_1 = 124.38 \text{ mm}$ es menor que $2.5(t_n - c) + K = 128.19 \text{ mm}$, entonces el límite normal LN1 es el mayor de:

$$0.5\sqrt{r_m(t_n - c)} + K = 48.04 \text{ mm}$$

$$1.73(t_n - t_p) + 2.5(t_p - c) + K = 118.41 \text{ mm}$$

pero no debe exceder

$$2.5(t - c) = 142.50 \text{ mm}$$

ni

$$L1 + 2.5(tp - c) = 223.52 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el límite normal 1 es:

$$LN1 = 118.41 \text{ mm}$$

$h2 = 163.12 \text{ mm}$ es mayor que $2.5(tn - c) + K = 128.19 \text{ mm}$, entonces el límite normal LN2 es el mayor de:

$$0.5\sqrt{rm(tn - c)} + K = 48.04 \text{ mm}$$

$$2.5(tn - c) = 118.19 \text{ mm}$$

pero no debe exceder

$$2.5(t - c) = 142.50 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el límite normal 2 es:

$$LN2 = 118.19 \text{ mm}$$

Área disponible en la pared de la boca

$$A_{b1} = 5438.67 \text{ mm}^2$$

$$A_{b2} = 5442.45 \text{ mm}^2$$

$$A_b = (A_{b1} + A_{b2})$$

$$A_b = 10881.12 \text{ mm}^2$$

Área equivalente

$$A_{eq} = A_a + A_b \left(\frac{S_n}{S} \right)$$

$$A_{eq} = 10687.47 \text{ mm}^2$$

El área equivalente $A_{eq} = 10687.47 \text{ mm}^2$ es mayor que el área requerida $A = 10303.06 \text{ mm}^2$.

3.2.4.16. Dimensiones y forma de las aberturas.

Se verifica que cumplan con los siguientes puntos:

Según AD-501:

Todas las aberturas resultan de la intersección de un cilindro con un recipiente esférico (AD-501 (a)).

AD-501 (a)(1):

La razón entre el diámetro a lo largo del eje mayor (d_c) al diámetro a lo largo del eje menor (igual al diámetro interno de la boca D_c) es 1.5 o menos.

AD-501 (a)(2):

La razón entre el mayor diámetro interno de la abertura (d_c) y el diámetro interno de la esfera ($2R+2c$) es menor o igual a 0.50.

Tabla: 3.8. Verificación según AD-501 (a)(1) y AD-501 (a)(2)

Boca	d_c (mm)	D_c (mm)	d_c/D_c	$d_c/(2R+2c)$
A	359.64	359.60	1.0001	0.0142
B	247.69	246.82	1.0035	0.0097
C	101.64	101.28	1.0035	0.0040
D	151.63	150.30	1.0088	0.0060
E	42.47	42.10	1.0088	0.0017
F	42.47	42.10	1.0088	0.0017
G1	201.07	197.55	1.0178	0.0079
G2	197.89	197.55	1.0017	0.0078
G3	199.28	197.55	1.0088	0.0078
H	625.79	613.60	1.0199	0.0246
I	105.60	105.60	1.0000	0.0042
J	42.47	42.10	1.0088	0.0017
K	42.47	42.10	1.0088	0.0017
L1	201.07	197.55	1.0178	0.0079
L2	197.89	197.55	1.0017	0.0078
L3	199.29	197.55	1.0088	0.0078

AD-501 (a)(3):

La distancia entre las líneas de centro de bocas adyacentes medida a lo largo de la superficie interna del recipiente debe ser tal que $\sqrt{(l_c/2)^2 + (l_l/3)^2}$ no es menor que la suma de sus radios internos ($dc/2$), donde l_l es la componente de la distancia en la dirección longitudinal y l_c para esferas es cero:

$$\sqrt{(l_c/2)^2 + (l_l/3)^2} = l_l/3$$

Se utiliza teoría de vectores para el cálculo de las distancias y de los ángulos entre vectores:

P_i = Vector de posición de la boca i

P_j = Vector de posición de la boca j

α = ángulo entre los vectores de posición de las bocas i, j.

$$\alpha = \arccos\left(\frac{P_i \cdot P_j}{|P_i| \cdot |P_j|}\right)$$

$$P_i \cdot P_j = X_i \cdot X_j + Y_i \cdot Y_j + Z_i \cdot Z_j$$

$$|P_i| \cdot |P_j| = (R + c)^2$$

La distancia entre dos bocas a lo largo de la superficie interna es:

$$l_l = (R + c)\alpha$$

Las coordenadas de las bocas son las siguientes:

Tabla: 3.9. Ubicación de las bocas

Boca	Xi (mm)	Yi(mm)	Zi (mm)
A	0.00	-12700.43	200.00
B	750.00	-12657.64	750.00
C	-750.00	-12657.64	750.00
D	-1500.00	-12590.80	750.00
E	1500.00	-12590.80	-750.00
F	1500.00	-12590.80	750.00
G1	2250.00	-12478.61	750.00
G2	0.00	-12679.84	-750.00
G3	-1500.00	-12590.80	-750.00
H	-2500.00	-12453.55	0.00
I	0.00	12702.00	0.00
J	1500.00	12590.80	-750.00
K	1500.00	12590.80	750.00
L1	2250.00	12478.61	750.00
L2	0.00	12679.84	-750.00
L3	-1500.00	12590.80	-750.00

Tabla: 3.10. Verificación según AD-501 (a)(3)

Boca i	Boca j	(dc/2) _i mm	(dc/2) _j mm	α	l _i mm	l _i /3 mm	(dc/2) _i +(dc/2) _j mm
A	B	179.82	123.84	4.20	931.2	310.4	303.66
A	G2	179.82	98.95	4.29	950.4	316.8	278.77
A	C	179.82	50.82	4.20	931.2	310.4	230.64
F	E	75.81	50.82	6.77	1500.9	500.3	126.63
F	G1	75.81	99.64	3.42	758.5	252.8	175.46
G2	G3	50.82	99.64	6.78	1503.5	501.2	150.46
G2	G1	50.82	98.95	12.25	2716.8	905.6	149.76
H	G3	123.84	98.95	5.67	1258.0	419.3	222.79
H	D	123.84	21.24	5.67	1258.0	419.3	145.08
I	L2	123.84	21.24	3.39	750.4	250.1	145.08
I	J	21.24	21.24	7.59	1682.0	560.7	42.47
L2	L3	21.24	100.53	6.78	1503.5	501.2	121.77
L2	J	98.95	99.64	6.78	1503.5	501.2	198.59
K	L1	98.95	100.53	3.42	758.5	252.8	199.48

3.2.5. SOLDADURA

La soldadura de las esferas cumple con los requerimientos de ASME Sección VIII División 2, que considera lo siguiente:

Según AD-410 Tipos de juntas permitidas, la categoría de la junta de soldadura empleada para unir entre sí los pétalos de la esfera, es categoría A. Todas las juntas categoría A, deben ser tipo No. 1, juntas a tope. Este tipo de junta debe tener el material de soldadura depositado a ambos lados de la superficie que se va a soldar.

Según AD-417 Juntas que unen partes sin presión y rigidizadores, el tipo de junta que se selecciona en la unión de las patas a la esfera es junta a tope de penetración completa.

El material de la parte que se va a soldar al recipiente debe ser compatible, requerimiento que es verificado dado que tanto el material de la esfera (SA-516-70) como el de las patas (SA-36) poseen el mismo número P (1), que indica características de soldabilidad similares.

El proceso de soldadura seleccionado, SMAW, soldadura con arco con electrodo revestido.

Para este proceso de soldadura, según AWS se realiza la preparación de la junta conforme se indica en los planos específicos para cada unión.

3.3. CONSIDERACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN

Los pétalos del recipiente deben estar cortadas listas para formar la esfera, con bordes preparados para soldar en el campo.

Las bocas y la entrada de hombre serán soldadas a los pétalos correspondientes antes de ser ensambladas las esferas.

Antes del ensamblaje en campo de las esferas se debe tener todo el terreno preparado para posteriormente ubicar las patas de las esferas, cada una unida a su pétalo del anillo ecuatorial. A continuación se colocan los demás pétalos del anillo ecuatorial seguidos por los del anillo tropical y finalmente las coronas.

Todo esto se logra con la ayuda de andamios debidamente montados y grúas para la movilización de los diferentes componentes.

Las soldaduras serán efectuadas con procedimientos y operadores calificados según ASME Sección IX, Estándar de calificación para procedimientos de soldadura, soldadura con cobre, soldadoras, soldadoras con cobre, y operadores de soldaduras y soldadoras por cobre (Qualification Standard for welding and brazing procedures, welders, brazers, and welding and brazing operators). De igual manera, los electrodos de soldadura, automáticas o manual, serán seleccionados para producir soldaduras satisfactorias en las condiciones mecánicas y ambientales para las cuales el recipiente está sujeto.

A las esferas se las debe dar un tratamiento térmico luego de que ya estén ensambladas, soldadas y examinadas.

Las paredes de las esferas se protegerán contra la corrosión exterior mediante el uso de pintura adecuada para estos fines.

La prueba hidrostática se la realiza para verificación contra fugas. Se debe emplear una bomba para agua que alcance la presión de prueba hidrostática y se debe dejar que el aire salga completamente de la esfera luego de lo cual se la aísla para alcanzar la presión necesaria.

Se deben considerar procedimientos de manejo del agua tanto para la prueba hidrostática, como para el sistema contra incendios que debe implementarse como requerimiento de seguridad para toda la planta.

CAPÍTULO 4

DISEÑO DE TUBERÍAS

4.1. REQUERIMIENTOS PARA LAS LÍNEAS DE TUBERÍA.

Los requerimientos para las líneas de tuberías, cumplen con los lineamientos de las normas siguientes:

- NFPA 58 Código de Gas Licuado de Petróleo (Liquefied Petroleum Gas Code).
- ASME B31.3 Tuberías de Proceso (Process Piping).

Conforme a la sección 2.4. Tuberías, Accesorios y Válvulas (Piping, Fittings and Valve) de la NFPA 58, el material para la tubería a ser utilizado es el ASTM A 106, tubería de acero al carbono sin costura. La tubería metálica de GLP debe ser diseñada de acuerdo a la B31.3, Tuberías de Proceso.

Para los cálculos de los efectos sísmicos por la zona geográfica, se han proporcionado los siguientes datos:

- Coeficiente sísmico máximo efectivo de aceleración, $A_a = 0.1$
- Coeficiente sísmico máximo efectivo de aceleración relacionado a la velocidad, $A_v = 0.1$
- Suelo rígido (tipo D, según ASCE 7)

Las líneas de tubería están diseñadas para los siguientes ciclos de operación, con temperaturas basadas principalmente en condiciones ambientales y en la recopilación de información experimental en sistemas similares:

Tabla 4.1. Ciclos de operación.

	Tmin °C	Tmax °C	Ciclos al año	Ciclos totales	Factor f
Ciclo 1	21	25	365	7300	0.9
Ciclo 2	21	60	365	7300	0.9

La tubería ha sido diseñada para la temperatura ambiente de 25 °C y para una temperatura extrema de 60 °C con una corrosión permitida de 2 mm. La tolerancia de espesor de la tubería del fabricante se ha establecido en 12.5% que es el valor bajo el cual puede caer el valor nominal.

El diseño de la tubería debe considerar la prueba hidrostática, cuya presión es establecida por la siguiente ecuación:

$$P_T = \frac{1.5PS_T}{S} \quad \text{Ec. 4.1}$$

P_T = Presión de prueba.

P = Presión de diseño.

S_T = Valor de esfuerzo a la temperatura de prueba.

S = Valor de esfuerzo a la temperatura de diseño.

Las cargas que deben ser consideradas son la presión, el peso, el viento, fuerzas horizontales debidas a sismos, reacciones de descarga, expansión y contracción térmica.

Para el cumplimiento del código, las cargas se dividen en primarias y secundarias. A su vez las cargas primarias que usualmente son conducidas por fuerzas se dividen en dos categorías basadas en la duración de la carga. La primera categoría son las cargas sostenidas. Estas cargas se espera que estén presentes durante la operación normal de la planta. La segunda categoría son las cargas ocasionales. Estas cargas están presentes en intervalos infrecuentes durante la operación de la planta.

Adicionalmente a las cargas primarias, existen las cargas de expansión (secundarias). Estas son las cargas debidas al desplazamiento de la tubería. Las ecuaciones que la B31.3 establece para los diferentes tipos de carga son las siguientes:

Cargas sostenidas:

La B31.3 no provee una ecuación explícita para calcular los esfuerzos por cargas sostenidas, sino que simplemente requiere que el ingeniero calcule el esfuerzo longitudinal en la tubería debido a peso y presión, y asegurarse de que este no exceda S_h (Esfuerzo máximo admisible a la temperatura máxima de operación). Esto es normalmente interpretado de la siguiente manera:

$$S_l = \frac{F_{ax}}{A} + \frac{\sqrt{(i_i M_i)^2 + (i_o M_o)^2}}{Z} + \frac{PD_o}{4t} \quad \text{Ec. 4.2}$$

F_{ax} = Fuerza axial debido a cargas sostenidas.

A = Área transversal de la tubería.

M_i = Momento flector en el plano debido a cargas sostenidas.

M_o = Momento flector fuera del plano debido a cargas sostenidas.

i_i = Factor de intensificación en el plano por apéndice D de B31.3.

i_o = Factor de intensificación fuera del plano por apéndice D de B31.3.

Z = Módulo de sección de la tubería.

P = Presión de diseño de la tubería.

D_o = Diámetro exterior de la tubería.

t = Espesor de la tubería.

Como cargas sostenidas típicas están el peso y la presión durante condiciones normales de operación.

Cargas Ocasionales:

La ecuación para calcular los esfuerzos ocasionales no está definida en la B31.3, la cual simplemente establece que la suma del esfuerzo longitudinal debido a cargas sostenidas y ocasionales no debe exceder $1.33S_h$. La interpretación común de este requerimiento es calcular los esfuerzos de las cargas sostenidas y ocasionales independientemente y luego sumarlas. Como ejemplos de cargas ocasionales tenemos la sísmica y el viento.

Cargas de Expansión:

El rango de esfuerzo de desplazamiento S_e no debe exceder S_a :

$$S_E = \frac{\sqrt{(i_i M_i)^2 + (i_o M_o)^2 + 4M_t^2}}{Z} \quad \text{Ec. 4.3}$$

$$S_A = f(1.25S_c + 1.25S_H - S_l) \quad \text{Ec. 4.4}$$

M_T = Momento torsor debido a cargas de expansión.

S_H = Esfuerzo máximo admisible a la máxima temperatura de instalación.

S_C = Esfuerzo máximo admisible a la mínima temperatura de instalación.

S_l = Esfuerzo longitudinal.

f = Factor de reducción de rango de esfuerzo, función del número de ciclos.

Como ejemplo de cargas de expansión están la expansión térmica y la vibración.

4.2. DISEÑO DE LAS LÍNEAS DE TUBERÍA.

La norma B31.3, dependiendo de las propiedades del fluido, condiciones de operación, y otros factores clasifica al fluido de servicio en cuatro categorías: categoría D, categoría M, fluido de servicio de alta presión, y fluido de servicio

normal. Esta categoría establece las bases para el diseño del sistema de tuberías.

La clasificación del fluido de servicio para la planta, mediante el apéndice M, ha sido definido como fluido de servicio normal. Para esta categoría se utiliza el código base (capítulos I al VI) para el diseño del sistema de tuberías.

El trazado de las líneas de tubería se lo ha realizado considerando el proceso mismo de la planta de almacenamiento, con una distribución adecuada procurando agrupar las líneas de tal forma que el número de soportes utilizados no sea excesivo. Se ha considerado también las clases necesarias para cada accesorio como válvulas, bridas, filtros, los cuales influyen principalmente en los pesos a ser considerados así como también en las dimensiones.

Para el cálculo hidráulico en las diferentes líneas se han considerado las longitudes más largas como por ejemplo hasta la esfera más distante.

La tabla 2.4.4.1, NFPA 58, permite establecer las presiones para las tuberías y accesorios, las mismas que han quedado definidas de la siguiente manera:

Tabla 4.2. Presiones de diseño de los sistemas de tubería.

Línea	Presión	Presión de diseño (kPa)	Clase ANSI
Entrada	Presión mayor que las esferas	2413	300
Salida (Esferas–Bombas)	Presión mayor que las esferas	2413	300
Salida (Bombas–Punto de Entrega)	Máximo 1840 kPa (365 m)	2413	300
Alivio	Presión menor que las esferas	1724	150
Vapor	Presión menor que las esferas	1724	150
Drenaje	Presión menor que las esferas	1724	150
Slop - Bullet	Presión menor que Slop y Bullet	1724	150

Específicamente el material utilizado es el SA-106 grado B, según la denominación ASME, que tiene las mismas especificaciones que el especificado por la norma ASTM que es la que recomienda la NFPA 58. Este material es muy difundido en el medio con una alta accesibilidad y un costo menor en comparación con otros materiales, además de tener buena resistencia a altas temperaturas.

Las válvulas seleccionadas son tipo globo ya que tienen una buena capacidad de regulación de flujo y también sirven para aislamiento.

El diseño de las líneas de tubería se lo realiza con la ayuda del programa CAESAR II Versión 4.40 en el que las diferentes líneas se van definiendo mediante tramos que son introducidos estableciendo los nodos extremos que lo conforman, como se puede apreciar en la imagen.

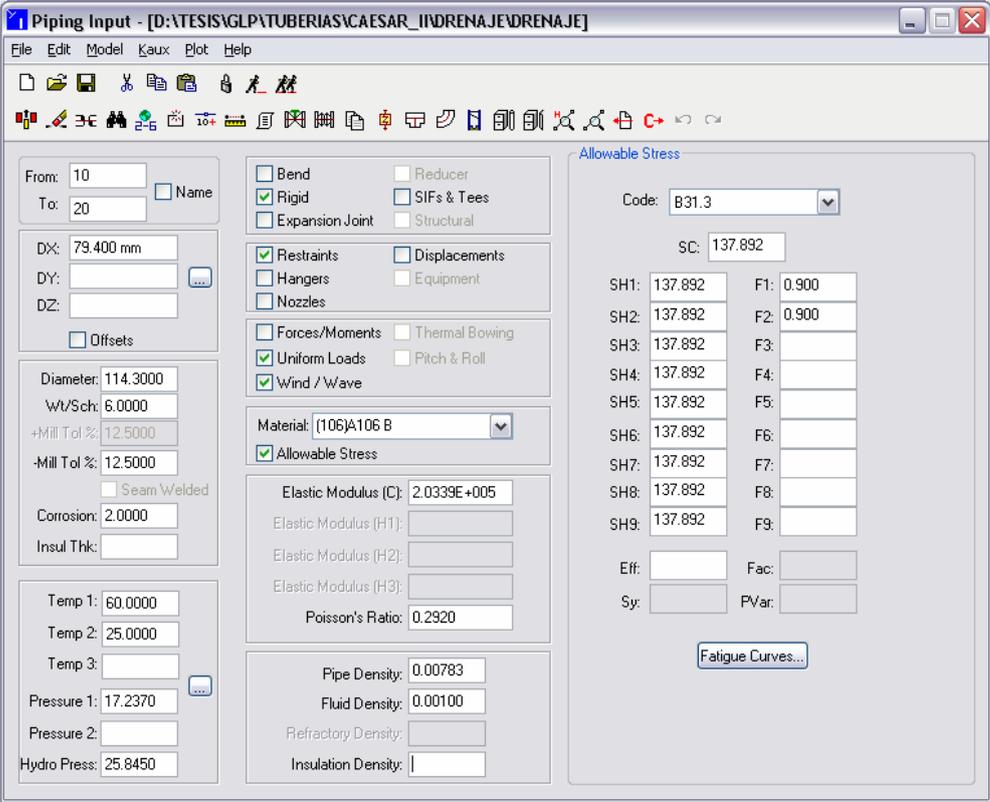


Figura 4.1. Pantalla de introducción de datos CAESAR II.

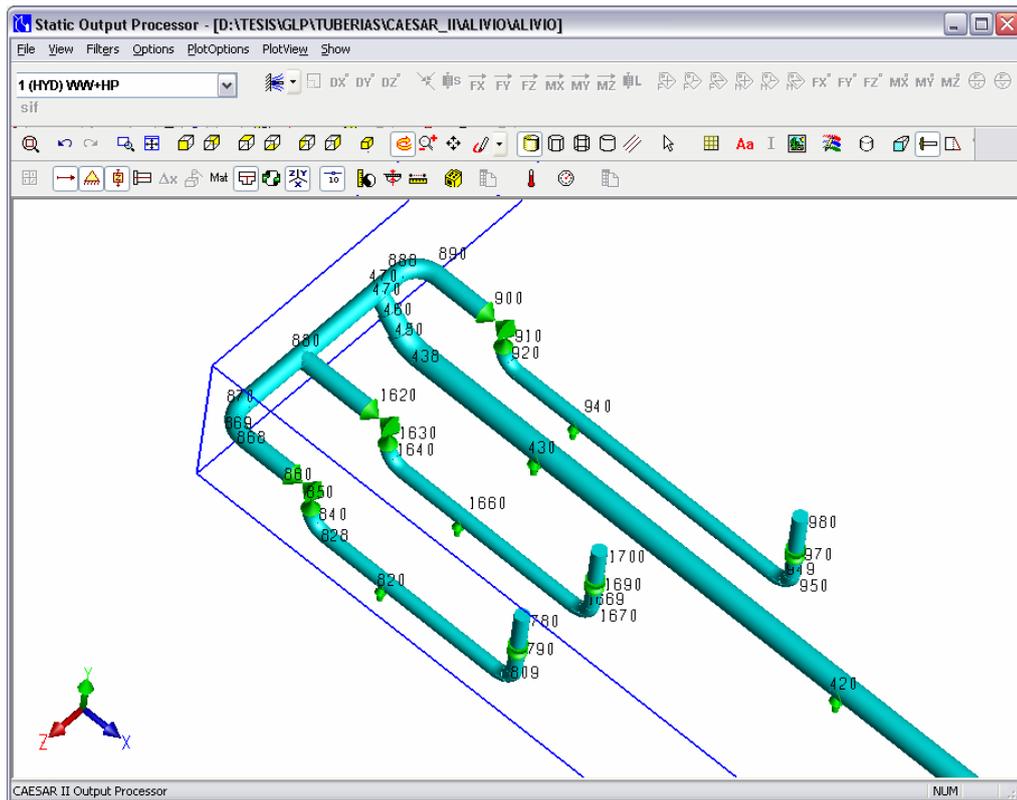


Figura 4.2. Pantalla gráfica 3D CAESAR II.

Así como la tubería queda definida por nodos, así también el programa presenta los diferentes resultados como fuerzas, momentos y esfuerzos, en cada uno de los nodos.

Para el diseño de la tubería se ha definido inicialmente el espesor estándar, el cual tiene equivalentes en cédula de tubería dependiendo de su diámetro.

Uno de los pasos para la verificación del cumplimiento del código es la definición de los casos de carga a ser evaluados. Estas cargas son las siguientes:

Tabla 4.3. Casos de carga evaluados.

Nomenclatura	Carga	Descripción
W	Peso	Peso incluido tubería, fluido y aislamiento
WW	Peso	Peso incluido tubería, agua y aislamiento
T	Temperatura	Temperatura de operación
P	Presión	Presión de operación
F	Fuerza	Vector de fuerza concentrada
U	Carga uniforme	Vector de carga uniforme o gravedad
WIN	Viento	Vector de carga de viento

Los tipos de restricciones definidos en la tubería pueden ser de tipo simple, es decir indicando la dirección en la cual se encuentra restringida o se puede definir una restricción de tipo flexible, como es el caso de la tubería en el punto de unión con una esfera. Para esto se ha utilizado el criterio del boletín 297 del Consejo de Investigación de Soldadura (Welding Research Council) definiéndose los siguientes datos:

Nozzles	
Type	<input checked="" type="radio"/> WRC 297 <input type="radio"/> API 650 <input type="radio"/> PD 5500
Nozzle Node:	640
Vessel Node (optional):	
Nozzle Outer Diameter:	114.300
Nozzle Wall Thickness:	6.000
Vessel Outer Diameter:	25400.000
Vessel Wall Thickness:	59.000
Vessel Pad Thickness:	20.000
Distance to Stiffener or Head:	12700.000
Distance to Opposite Stiffener:	12700.000
Vessel Centerline Direction Cosine VX:	
Vessel Centerline Direction Cosine VY:	
Vessel Centerline Direction Cosine VZ:	1.000
Vessel Temperature (optional):	
Vessel Material (optional):	<input type="text"/> ▼

Figura 4.3. Pantalla para restricción flexible CAESAR II

La fuerza de fricción en los soportes de la tubería tiene un efecto significativo en el comportamiento del sistema de tubería, para esto ha sido considerado un coeficiente de fricción de 0.39^1 , entre la tubería y los soportes.

4.2.1. DIMENSIONAMIENTO.

El dimensionamiento del sistema de tuberías consiste en determinar el menor diámetro aceptable que acomode el caudal requerido manteniendo la caída de presión y la velocidad dentro de límites aceptables.

¹ Marks' Standard Handbook Mechanical Engineers, Tabla 3.2.1

Para los cálculos de las pérdidas menores en cada tramo han sido considerados los accesorios que se detallan más adelante, para la determinación del coeficiente k, con la siguiente fórmula:

$$k = (Le/D)f_T \quad \text{Ec. 4.5}$$

k = Coeficiente de resistencia.

Le/D = Longitud equivalente en diámetros de tubería.

f_T = Factor de fricción.

Los valores de Le/D para filtros y válvulas de alivio han sido asumidos como válvulas globo, y los de válvulas de exceso de flujo han sido asumidos como válvulas check. Cuando el fluido sale de la tubería, se usa el valor de $k = 1$ sin importar la forma de la salida donde la tubería se conecta a la pared del tanque. El valor de k es 1 también cuando el fluido sale del tanque y entra en una tubería de proyección hacia adentro del tanque. Las pérdidas en las bridas y en los empaques han sido despreciadas.

Línea de Entrada.

En esta línea se han considerado dos tes con flujo con cambio de dirección y tres tes con flujo sin cambio de dirección.



Figura 4.4. Direcciones de flujos a través de tes

Tabla 4.4. Coeficientes de resistencia, línea de entrada.

Cant.	Diám	Descripción	f_T	Le/D	K
3	14"	Codo de 90° radio largo	0.013	20	0.78
5	14"	Te	0.013	36	2.34
10	14"	Brida	0.013	0	0
10	14"	Empaque	0.013	0	0
3	14"	Válvula globo	0.013	340	13.26
1	14"	Filtro	0.013	340	4.42
1	14"	Válvula de exceso de flujo	0.013	100	1.3
1	14"	Salida de la tubería hacia la esfera			1
				k total:	23.1

Línea de Salida.

En esta línea se han considerado una te con flujo con cambio de dirección y cuatro tes con flujo sin cambio de dirección.

Tabla 4.5. Coeficientes de resistencia, línea de salida.

Cant.	Diám	Descripción	f_T	Le/D	k
4	10"	Codo de 90° radio largo	0.014	20	1.12
5	10"	Te	0.014	28	1.96
8	10"	Brida	0.014	0	0
8	10"	Empaque	0.014	0	0
2	10"	Válvula Globo	0.014	340	9.52
1	10"	Filtro	0.014	340	4.76
1	10"	Válvula de exceso de flujo	0.014	100	1.4
1	10"	Entrada a la tubería desde la esfera			1
				k total:	19.76

Línea de Alivio.

En la línea de 10 pulg. se ha considerado una te con flujo con cambio de dirección y una te con flujo sin cambio de dirección. En la línea de 14 pulg. se ha considerado las tres tes con flujo sin cambio de dirección.

Tabla 4.6. Coeficientes de resistencia, línea de alivio.

Cant.	Diám	Descripción	f_T	Le/D	k
1	10"	Codo de 90° radio largo	0.014	20	0.28
4	14"	Codo de 90° radio largo	0.013	20	1.04
2	8"	Codo de 90° radio largo	0.014	20	0.56
1	14"	Codo de 90° radio corto	0.013	30	0.39
1	14"	Codo de 90° radio largo	0.013	16	0.21
2	10"	Te	0.014	40	1.12
3	14"	Te	0.013	20	0.78
1	14"x10"	Reducción concéntrica	0.013	6	0.08
1	10"	Brida	0.014	1	0.01
1	14"	Brida	0.013	0	0
2	8"	Brida	0.014	0	0
1	10"	Empaque	0.014	0	0
2	8"	Empaque	0.014	0	0
1	10"x8"	Válvula de alivio	0.014	340	4.76
1	14"	Salida de la tubería hacia la esfera			1
				k total:	10.23

.Línea de Vapor.

En esta línea se han considerado una te con flujo con cambio de dirección y tres tes con flujo sin cambio de dirección.

Tabla 4.7. Coeficientes de resistencia, línea de vapor.

Cant.	Diám	Descripción	f_T	Le/D	k
4	6"	Codo de 90° radio largo	0.015	20	1.2
4	6"	Te	0.015	30	1.8
6	6"	Brida	0.015	0	0
6	6"	Empaque	0.015	0	0
2	6"	Válvula globo	0.015	340	10.2
1	6"	Válvula de exceso de flujo	0.015	100	1.5
1	6"	Entrada a la tubería desde la esfera			1
				k total:	15.7

Línea de Drenaje.

En esta línea todas las tes tienen flujo sin cambio de dirección.

Tabla 4.8. Coeficientes de resistencia, línea de drenaje.

Cant.	Diám	Descripción	f_T	Le/D	k
5	4"	Codo de 90° radio largo	0.017	20	1.7
5	4"	Te	0.017	20	1.7
8	4"	Brida	0.017	0	0
7	4"	Empaque	0.017	0	0
1	4"	Válvula check	0.017	100	1.7
2	4"	Válvula globo	0.017	340	11.56
1	4"	Válvula de exceso de flujo	0.017	100	1.7
1	4"	Entrada a la tubería desde la esfera			1
1	4"	Salida de la tubería hacia el tanque bullet			1
				k total:	20.36

Línea Slop – Bullet

Tabla 4.9. Coeficientes de resistencia, línea slop - bullet.

Cant.	Diám	Descripción	f_T	Le/D	k
5	4"	Codo de 90° radio largo	0.017	20	1.7
2	4"	Te	0.017	20	0.68
10	4"	Brida	0.017	0	0
10	4"	Empaque	0.017	0	0
1	4"	Válvula check	0.017	100	1.7
2	4"	Válvula globo	0.017	340	11.56
1	4"	Filtro	0.017	340	5.78
1	4"	Válvula de exceso de flujo	0.017	100	1.7
1	4"	Entrada a la tubería desde el slop			1
				k total:	24.12

4.2.1.1. Cálculo de Diámetros:

Línea de Entrada:

$$Q_i := 0.2649788 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Caudal de recepción (6000 bbl/h)

$$v := 10 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

Velocidad promedio del flujo en estado líquido

$$A_r := \frac{Q_i}{v}$$

$$A_r = 0.087 \text{ m}^2$$

$$D_o := \sqrt{4 \cdot \frac{A_r}{\pi}}$$

$$D_o = 0.333 \text{ m}$$

El diámetro utilizado para la tubería de recepción calculado: 13.11 in y se selecciona de **14 in**

Línea de Salida:

$$Q_o := 0.1104078 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Caudal de despacho (2500 bph)

$$v := 10 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

Velocidad promedio del flujo en estado líquido

$$A_r := \frac{Q_o}{v}$$

$$A_r = 0.036 \text{ m}^2$$

$$D_o := \sqrt{4 \cdot \frac{A_r}{\pi}}$$

$$D_o = 0.215 \text{ m}$$

El diámetro utilizado para la tubería de despacho calculado: 8.46 in y se selecciona de **10 in**

Línea de Alivio:

$$D_e := 25400 \text{ mm}$$

Diámetro de la esfera

$$A_e := D_e^2 \cdot \pi$$

Área de la esfera

$$A_e = 2026.83 \text{ m}^2$$

$$Q := 53.632 \cdot A_e^{.82}$$

NFPA 2.3.2.4

$$Q := 91.431 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Caudal de aire

Cálculo del Seteo de Presión de la válvula

$$P_d := 1289319.61 \text{ Pa}$$

Presión de Diseño

$$P_s := P_d + 101325 \text{ Pa}$$

Presión de seteo de válvulas de alivio parte

$$P_s = 1390644.61 \text{ Pa}$$

inferior

Con la presión de seteo y el caudal de aire a condiciones estándares calculado, seleccionamos la válvula apropiada en el catálogo Crosby No 310.

$$\frac{Q}{2} = 45.715 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Se usarán 3 válvulas **JBS-45-8T10**: dos válvulas principales que cubren el caudal requerido y una válvula auxiliar (Catalogo: Crosby Styles JOS, JBS y JLT).

La tubería de descarga seleccionada es de **14 in** considerando el caudal requerido de $1.729 \times 10^5 \text{ ft}^3/\text{min air}$ (Catálogo Crosby CROMC-0290 pág.6)

Línea de Vapores:

$$Q_v := Q_i$$

Caudal (6000 bbl/h)

$$Q_i := 0.2649788 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

El volumen de vapor evacuado debe ser el mismo que del líquido que va ingresando a la esfera.

$$v := 40 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

Velocidad promedio del flujo en estado vapor (Piping Handbook pág. C274).

$$A_r := \frac{Q_v}{v}$$

$$A_r = 0.022 \text{ m}^2$$

$$D_o := \sqrt{4 \cdot \frac{A_r}{\pi}}$$

$$D_o = 0.166 \text{ m}$$

El diámetro utilizado para la tubería de vapor calculando: 6.53 in y se selecciona de **6 in**

Línea de Drenaje:

$$Q_d := 0.012618 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Caudal 200 gal/min

$$v := 7 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

Velocidad promedio del flujo en estado líquido recomendado para líneas de drenaje. (Piping Handbook pág. B.60)

$$A_r := \frac{Q_d}{v}$$

$$A_r = 0.00591 \text{ m}^2$$

$$D_o := \sqrt{4 \cdot \frac{A_r}{\pi}}$$

$$D_o = 0.087 \text{ m}$$

El diámetro utilizado para la tubería de recepción calculando: 3.45 in y se selecciona de **4 in**

Línea de Descarga del Slop al Autotank:

$$Q_s := 0.01893 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Caudal de 300 gal/min

$$v := 10 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

Velocidad promedio del flujo en estado líquido

$$Ar := \frac{Qs}{v}$$

$$Ar = 0.00621 \text{ m}^2$$

$$Do := \sqrt{4 \cdot \frac{Ar}{\pi}}$$

El diámetro utilizado para la tubería de descarga calculando: 3.51 in y se selecciona de **4 in**

$$Do = 0.089 \text{ m}$$

4.2.1.2. Cálculo de Pérdidas

Cálculos a: 70 °F de Temperatura de Diseño

Pérdidas Línea de Entrada

Número de Reynolds

$$D := 13.124 \text{ in}$$

Diámetro interno de la tubería

$$\mu := 1.23 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

Viscosidad dinámica

$$\rho := 514.91 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Densidad del fluido

$$Qi = 0.265 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$v := \frac{Qi}{\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2}$$

Velocidad promedio del flujo

$$v = 3.036 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$D := 0.333 \text{ m}$$

Diámetro interno de la tubería

$$Nr := \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu}$$

$$Nr = 4232449.83$$

Número de reynolds

Flujo Turbulento

Pérdidas de fricción en flujo turbulento

$$\varepsilon := 4.6 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

Rugosidad relativa

$$\frac{D}{\varepsilon} = 7239.13$$

$$\text{Nr} = 4.232 \times 10^6$$

Factor de fricción

$$f := \frac{0.25}{\log \left[\frac{1}{3.7 \cdot \left(\frac{D}{\varepsilon} \right)} + \frac{5.74}{\text{Nr}^{0.9}} \right]^2}$$

$$f = 0.013$$

Ecuación de Darcy

$$L := 100 \text{ m}$$

Longitud a evaluar

$$v = 3.036 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad promedio del flujo

$$D := 13.124 \text{ in}$$

Diámetro interno

$$D = 0.333 \text{ m}$$

$$h_l := f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

$$h_l = 1.854 \text{ m}$$

$$P_l := h_l \cdot g \cdot \rho$$

Pérdidas en Pa por cada 100 metros

$$P_l = 9359.5 \text{ Pa}$$

Pérdidas en línea de entrada con longitud real y accesorios

Tramo considerado desde la válvula reductora de presión hasta la esfera más distante.

$$L := 97.5 \text{ m}$$

Longitud real

$$v = 3.036 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad promedio del flujo

$$D := 13.124 \text{ in}$$

Diámetro interno

$$D = 0.333 \text{ m}$$

$$k := 23.1$$

Coeficiente de resistencia

$$h_l := \left(k + f \cdot \frac{L}{D} \right) \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

$$h_l = 12.664 \text{ m}$$

$$P_l := h_l \cdot g \cdot \rho$$

$$P_l = 63947.661 \text{ Pa}$$

Pérdidas en Pa para el tramo más largo de la línea de entrada

Pérdidas línea de Salida

Número de Reynolds

$$D := 10.02 \text{ in}$$

Diámetro de la tubería

$$\mu := 1.23 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

Viscosidad dinámica

$$\rho := 514.91 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Densidad del fluido

$$Q_o = 0.11 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$v := \frac{Q_o}{\pi \cdot \left(\frac{D}{2} \right)^2}$$

$$v = 2.170 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad promedio del flujo

$$D = 0.255 \text{ m}$$

Diámetro interno de la tubería

$$N_r := \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu}$$

$$N_r = 2312249.27$$

Número de Reynolds

Flujo Turbulento

Pérdidas de fricción en flujo turbulento

$$\varepsilon := 4.6 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

Rugosidad relativa

$$\frac{D}{\varepsilon} = 5532.783$$

Factor de fricción

$$f := \frac{0.25}{\log\left[\frac{1}{3.7 \cdot \left(\frac{D}{\varepsilon}\right)} + \frac{5.74}{\text{Nr}^{0.9}}\right]^2}$$

$$f = 0.014$$

Ecuación de Darcy

$$L := 100\text{m}$$

Longitud a evaluar.

$$v = 2.17 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad promedio del flujo

$$D := 10.02\text{in}$$

Diámetro interno

$$D = 0.255 \text{ m}$$

$$h_l := f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

$$h_l = 1.322 \text{ m}$$

$$P_l := h_l \cdot g \cdot \rho$$

$$P_l = 6673.362 \text{ Pa}$$

Pérdidas en Pa por cada 100 metros

Pérdidas en línea de salida con longitud real y accesorios

Tramo considerado desde la esfera más distante hasta la bomba más distante.

$$L := 110.4\text{m}$$

Longitud real.

$$v = 2.17 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad promedio del flujo

$$D := 10.02\text{in}$$

Diámetro interno

$$k := 19.76$$

$$h_l := \left(k + f \cdot \frac{L}{D}\right) \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

Coefficiente de resistencia

$$h_l = 6.204 \text{ m}$$

$$P_l := h_l \cdot g \cdot \rho$$

$$PI = 31328.244 \text{ Pa}$$

Pérdidas en Pa para el tramo más largo de la línea de entrada

Pérdidas Línea de Alivio

Caudal másico para GLP

$$W := C \cdot K \cdot Ad \cdot P \cdot \sqrt{\frac{M}{Z \cdot T}}$$

ASME Sección VIII D-2 Apéndice 10

$$Pd = 1289319.61 \text{ Pa}$$

$$P := Pd + 101325 \text{ Pa}$$

Presión de diseño

$$P = 1390644.61 \text{ Pa}$$

Temp. de diseño a la entrada de la válvula
60°C

$$T := 600 \text{ °R}$$

$$K := 0.878$$

Coefficiente de descarga de la válvula
(depende del fabricante)

$$Z := 0.7473$$

Factor de Compresibilidad del GLP

$$C := 346$$

Constante en función de $k=cp/cv$ (1.29)
para GLP

$$M := 47.54$$

Peso molecular del GLP

$$Ad := 16774.16 \text{ mm}^2$$

Área de descarga efectiva de la válvula
JBS-45-8T10

$$W := C \cdot K \cdot Ad \cdot P \cdot \sqrt{\frac{M}{Z \cdot T}}$$

$$W := 71.421 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Caudal de GLP

Se considera una densidad promedio entre los extremos del tramo a ser analizados.

$$\rho_{glp} := 19.7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Densidad del GLP a 60 °C

$$W = 71.421 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$Q_{glp} := \frac{W}{\rho_{glp}}$$

$$Q_{glp} = 3.625 \frac{m^3}{s}$$

Caudal de GLP

$$D := 13.124 \text{ in}$$

$$Q_{glp} := A \cdot v$$

$$v := \frac{Q_{glp}}{\pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2}$$

$$v = 41.54 \frac{m}{s}$$

Pérdidas de en la tubería de 14 in para el GLP vapor

La presión de la esfera se considera 1390.6 kPa (201.7 psia) y en el bullet 308.2 kPa (44.7 psia) a 60°C

Número de Reynolds

$$D := 13.124 \text{ in}$$

Diámetro de la tubería

$$\mu := 1.35 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}$$

Viscosidad dinámica promedio del GLP entre el tanque bullet y la esfera a 60 °C

$$\rho := 19.703 \cdot \frac{kg}{m^3}$$

Densidad del vapor promedio del GLP entre el tanque bullet y la esfera a 60 °C

Velocidad promedio del flujo

$$v = 41.54 \frac{m}{s}$$

$$D = 0.333 \text{ m}$$

$$Nr := \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu}$$

$$Nr = 20210100.34$$

Número de reynolds

Flujo Turbulento

Pérdidas de fricción en flujo turbulento

$$\varepsilon := 4.6 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

Rugosidad relativa

$$\frac{D}{\varepsilon} = 7246.73$$

Factor de fricción

$$f := \frac{0.25}{\log \left[\frac{1}{3.7 \cdot \left(\frac{D}{\varepsilon} \right)} + \frac{5.74}{\text{Nr}^{0.9}} \right]^2}$$

$$f = 0.013$$

Pérdidas línea de alivio con longitud real y accesorios

Tramo considerado desde la esfera más distante hasta el tanque bullet.

$$L := 140\text{m}$$

Longitud real.

$$v = 41.54 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad promedio del flujo

$$D := 13.124\text{in}$$

Diámetro interno

$$D = 0.333 \text{ m}$$

$$k := 10.23$$

Coefficiente de resistencia

$$h_l := \left(k + f \cdot \frac{L}{D} \right) \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

$$h_l = 1.375 \times 10^3 \text{ m}$$

$$P_l := h_l \cdot g \cdot \rho$$

$$P_l = 265646.137 \text{ Pa}$$

Pérdidas en Pa para el tramo más largo de la línea de alivio

Pérdidas en Línea de Drenaje

Para Agua:

$$D := 4.026\text{in}$$

Diámetro de la tubería 4 in

$$Q := 0.0126 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Caudal requerido 200 gal/min

$$v := \frac{Q}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}}$$

$$v = 1.534 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad en la línea de drenaje

$$\mu := 9.91 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

Viscosidad dinámica

$$\rho := 1000 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Densidad del fluido

$$D := 0.1023 \text{m}$$

Diámetro interno de la tubería

$$\text{Nr} := \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu}$$

$$\text{Nr} = 158368.09$$

Número de reynolds

Flujo Turbulento

Pérdidas de fricción en flujo turbulento

$$\varepsilon := 4.6 \cdot 10^{-5} \text{m}$$

Rugosidad relativa

$$\frac{D}{\varepsilon} = 2.224 \times 10^3$$

Factor de fricción

$$f := \frac{0.25}{\log \left[\frac{1}{3.7 \cdot \left(\frac{D}{\varepsilon} \right)} + \frac{5.74}{\text{Nr}^{0.9}} \right]^2}$$

$$f = 0.019$$

Ecuación de Darcy

$$L := 100 \text{m}$$

Longitud a evaluar

$$v = 1.534 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad promedio del flujo

$$D := 4.026 \text{in}$$

Diámetro interno

$$D = 0.102 \text{ m}$$

$$h_l := f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

$$h_l = 2.242 \text{ m}$$

$$\text{Pl} := h_l \cdot g \cdot \rho$$

$$\text{Pl} = 21990.3998 \text{ Pa}$$

Pérdidas en Pa por cada 100 metros

Pérdidas línea de drenaje con longitud real y accesorios

$L := 133.34\text{m}$	Longitud real
$v = 1.534 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	Velocidad promedio del flujo
$D := 4.026\text{in}$	Diámetro interno
$k := 19.425$	Coficiente de resistencia
$h_l := \left(k + f \cdot \frac{L}{D} \right) \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$	
$h_l = 5.321 \text{ m}$	
$PI := h_l \cdot g \cdot \rho$	
$PI = 52181.272 \text{ Pa}$	Pérdidas para el tramo más largo de la línea de drenaje.

Línea de Vapor

La presión de la esfera se considera 1097.64 kPa (159.2 psia) a 100 °F

Número de Reynolds

$D := 6.065\text{in}$	Diámetro de la tubería
$\mu := 1.3 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$	Viscosidad dinámica
$\rho := 24.895 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Densidad del vapor
$Q_v = 0.265 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	
$v := \frac{Q_v}{\pi \cdot \left(\frac{D}{2} \right)^2}$	
$v = 14.216 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	Velocidad promedio del flujo
$D = 0.154 \text{ m}$	Diámetro interno de la tubería
$Nr := \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu}$	
$Nr = 4193971.78$	Número de reynolds

Flujo Turbulento

Pérdidas de fricción en flujo turbulento

$$\varepsilon := 4.6 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

Rugosidad relativa

$$\frac{D}{\varepsilon} = 3.349 \times 10^3$$

Factor de fricción

$$f := \frac{0.25}{\log \left[\frac{1}{3.7 \cdot \left(\frac{D}{\varepsilon} \right)} + \frac{5.74}{\text{Nr}^{0.9}} \right]^2}$$

$$f = 0.015$$

Ecuación de Darcy

$$L := 100 \text{ m}$$

Longitud a evaluar

$$v = 14.216 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad promedio del flujo

$$D := 6.065 \text{ in}$$

Diámetro interno

$$D = 0.154 \text{ m}$$

$$h_l := f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

$$h_l = 101.425 \text{ m}$$

$$P_l := h_l \cdot g \cdot \rho$$

$$P_l = 24761.585 \text{ Pa}$$

Pérdidas en Pa por cada 100 metros

Pérdidas con longitud real y accesorios

Tramo considerado desde la esfera más distante hasta la bomba más distante.

$$L := 109.7 \text{ m}$$

Longitud real.

$$v = 14.216 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad promedio del flujo

$$D := 6.065 \text{ in}$$

Diámetro interno

$$D = 0.154 \text{ m}$$

$$k := 19.3$$

Coeficiente de resistencia

$$hl := \left(k + f \cdot \frac{L}{D} \right) \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

$$hl = 310.143 \text{ m}$$

$$Pl := hl \cdot g \cdot \rho$$

Pérdidas en Pa para el tramo más largo de la línea de vapores.

$$Pl = 75717.329 \text{ Pa}$$

Pérdidas en Línea de Descarga desde el Slop hasta bombas :

Para Agua a 70 °F:

$$D := 4.026 \text{ in}$$

Diámetro de la tubería 4 in

$$Qs = 0.0189 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Caudal Requerido 300 gal/min

$$v := \frac{Qs}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}}$$

$$v = 2.305 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad en la línea

$$\mu := 9.91 \cdot 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

Viscosidad dinámica

$$\rho := 1000 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Densidad del fluido

$$D := 0.1023 \text{ m}$$

Diámetro interno de la tubería

$$Nr := \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu}$$

$$Nr = 237929.2$$

Número de reynolds

Flujo Turbulento

Pérdidas de fricción en flujo turbulento

$$\varepsilon := 4.6 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

Rugosidad relativa

$$\frac{D}{\varepsilon} = 2.224 \times 10^3$$

Factor de fricción

$$f := \frac{0.25}{\log\left[\frac{1}{3.7 \cdot \left(\frac{D}{\varepsilon}\right)} + \frac{5.74}{\text{Nr}^{0.9}}\right]^2}$$

$$f = 0.018$$

Ecuación de Darcy

$$L := 100\text{m}$$

Longitud a evaluar

$$v = 2.305 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad promedio del flujo

$$D := 4.026\text{in}$$

Diámetro interno

$$D = 0.102 \text{ m}$$

$$h_l := f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

$$h_l = 4.866 \text{ m}$$

$$P_l := h_l \cdot g \cdot \rho$$

$$P_l = 47721.893 \text{ Pa}$$

Pérdidas en Pa por cada 100 metros

Pérdidas con longitud real y accesorios

$$L := 53.085\text{m}$$

Longitud real

$$v = 2.305 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad promedio

$$D := 4.026\text{in}$$

Diámetro interno

$$D = 0.102 \text{ m}$$

$$k := 24.12$$

$$h_l := \left(k + f \cdot \frac{L}{D}\right) \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

Coefficiente de resistencia

$$h_l = 9.116 \text{ m}$$

$$P_l := h_l \cdot g \cdot \rho$$

Pérdidas en Pa para el tramo más largo de la línea slop - bullet.

$$P_l = 89400.821 \text{ Pa}$$

4.2.2. ANÁLISIS ESTÁTICO.

El análisis estático se lo realiza independientemente en cada tramo de tubería con sus propios parámetros y se verifica que cumpla con la norma B31.3. Para esto se establecen diferentes casos de carga que son evaluados con los criterios de la norma.

4.2.2.1. Línea de Drenaje.

Esta ha sido la primera línea verificada ya que según la Práctica Estándar (Standar Practice) SP-69 de la MSS, Sociedad de Estandarización de Fabricantes (Manufacturer Standardization Society) el espaciamiento mínimo necesario de soportes es menor para una tubería de menor diámetro. Este es el caso de la línea de drenaje para la que se ha seguido las recomendaciones de espaciamiento de la tabla 3 de SP-69 ya que en las demás líneas el espaciamiento necesario es mayor y al estar todas las líneas apoyadas en los mismos soportes cumplen por demás esta recomendación. Sin embargo esta es una primera aproximación cuyos resultados son verificados en el análisis estático con CAESAR II.

Para la línea de drenaje y para las otras líneas en el estudio estático se han establecido los siguientes casos de carga:

Tabla 4.10. Casos de carga, estudio estático.

Caso de Carga	Tipo de Carga	Cargas Consideradas
Caso 1	Prueba Hidrostática	WW+HP
Caso 2	Operacional	W+T1+P1
Caso 3	Operacional	W+T2+P1
Caso 4	Sostenida	W+P1

Los casos 2 y 3 no son evaluados ya que no son un tipo de carga para el cumplimiento de la B31.3, sin embargo a partir de estos se evalúan los casos de expansión. El fluido considerado para el diseño de esta tubería es el agua debido a que es el de mayor densidad. La presión y temperaturas son las siguientes:

P1= 1723 kPa.

T1 = 60 °C

T2 = 25 °C

Densidad del fluido= 1000 kg/m³.

Los resultados de verificación de código para cada caso dicen que pasan los requerimientos de esfuerzos:

Tabla 4.11. Esfuerzos de código estudio estático, línea de drenaje.

Caso	Nodo	Esfuerzo de Código (kPa)	Esfuerzo Admisible (kPa)
1 (HYD) WW+HP	200	36224	183401
4 (SUS) W+P1	200	47757	137895

4.2.2.2. Línea de Entrada y Línea de Salida

Estas dos líneas han sido analizadas en conjunto. Los soportes en el tren de reducción han sido reubicados ya que en un principio hacían que los esfuerzos en la tubería sean demasiado altos y no cumplan los requerimientos del código. El fluido considerado para el diseño de esta tubería es el GLP ya que no conduce fluidos de mayor densidad.

La presión y temperaturas son las siguientes:

P1= 2413 kPa

T1 = 60 °C

T2 = 25 °C

Densidad del fluido= 540 kg/m³.

Los resultados de verificación de código para cada caso dicen que pasan los requerimientos de esfuerzos:

Tabla 4.12. Esfuerzos de código estudio estático, línea de entrada y salida.

Caso	Nodo	Esfuerzo de Código (kPa)	Esfuerzo Admisible (kPa)
1 (HYD) WW+HP	1940	106724	183401
4 (SUS) W+P1	1940	92486	137895

4.2.2.3. Línea de Alivio.

La densidad considerada en esta tubería es una media entre la densidad del vapor en la esfera y la densidad del vapor en el tanque bullet.

La presión y temperaturas son las siguientes:

$$P1 = 1724 \text{ kPa}$$

$$T1 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T2 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Densidad del fluido} = 19.7 \text{ kg/m}^3.$$

Los resultados de verificación de código para cada caso dicen que pasan los requerimientos de esfuerzos:

Tabla 4.13. Esfuerzos de código estudio estático, línea de alivio.

Caso	Nodo	Esfuerzo de Código (kPa)	Esfuerzo Admisible (kPa)
1 (HYD) WW+HP	730	49295	183401
4 (SUS) W+P1	1030	42465	137895

4.2.2.4. Línea de Vapor.

La presión y temperaturas son las siguientes:

$$P1 = 1724 \text{ kPa}$$

$$T1 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T2 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Densidad del fluido} = 24 \text{ kg/m}^3.$$

Los resultados de verificación de código para cada caso dicen que pasan los requerimientos de esfuerzos:

Tabla 4.14. Esfuerzos de código estudio estático, línea de vapor.

Caso	Nodo	Esfuerzo de Código (kPa)	Esfuerzo Admisible (kPa)
1 (HYD) WW+HP	990	38225	183401
4 (SUS) W+P1	990	44731	137895

4.2.2.5. Línea Slop – Bullet

La presión y temperaturas son las siguientes:

$$P1 = 1724 \text{ kPa}$$

$$T1 = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T2 = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Densidad del fluido} = 1000 \text{ kg/m}^3.$$

Los resultados de verificación de código para cada caso dicen que pasan los requerimientos de esfuerzos:

Tabla 4.15. Esfuerzos de código estudio estático, línea slop - bullet.

Caso	Nodo	Esfuerzo de Código (kPa)	Esfuerzo Admisible (kPa)
1 (HYD) WW+HP	550	43746	183401
4 (SUS) W+P1	550	58444	137895

4.2.3. ANÁLISIS DINÁMICO.

La Norma B31.3 establece que se deben considerar los efectos dinámicos en el diseño de la tubería. Las cargas que se han considerado son la de viento, la sísmica y las reacciones de descarga las cuales son cargas ocasionales.

Un método común de analizar las cargas dinámicas es modelarlas como estáticas con un incremento en la magnitud para reflejar la carga dinámica.

4.2.3.1. Carga de Viento.

La carga de viento es calculada por la ASCE 7 con los siguientes parámetros:

- Velocidad del viento: 50 m/s
- Exposición al viento: D (Zonas costeras planas)
- Coeficiente de amortiguamiento crítico: 0.03

Clasificación de la estructura: III (Estructuras que contienen cantidades suficientes de sustancias explosivas que sean peligrosas para el público si son liberadas).

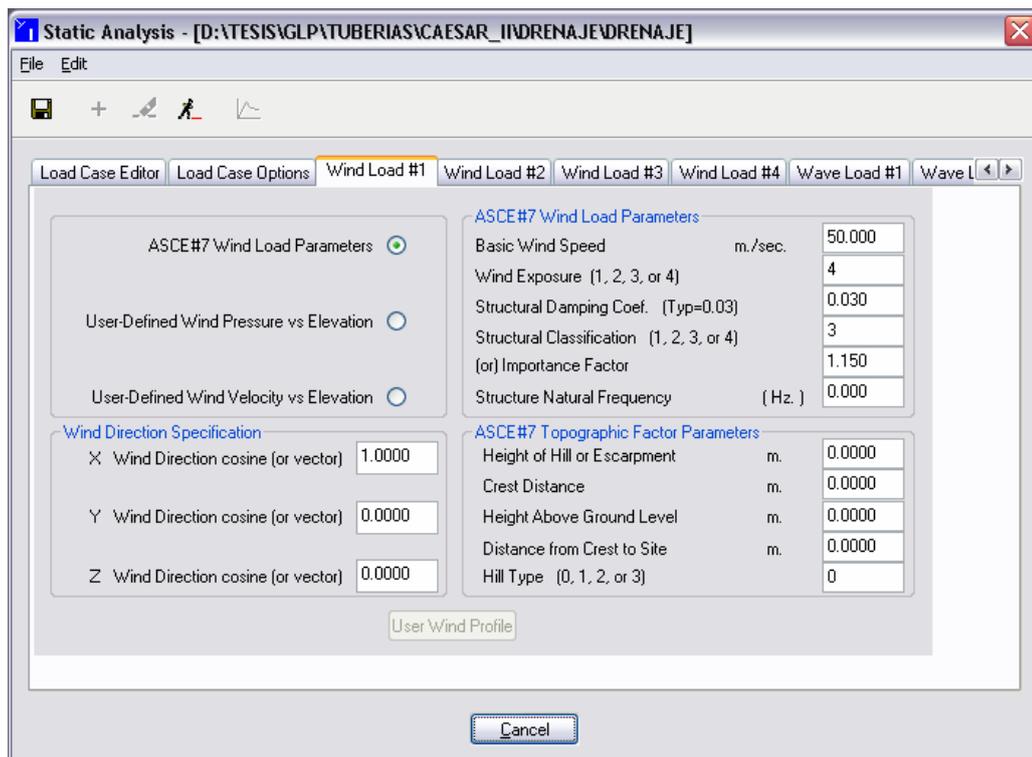


Figura 4.5. Pantalla de introducción de datos de viento, CAESAR II.

La carga de viento es aplicada al sistema de tuberías a lo largo y a lo ancho de la planta en ambos sentidos.

4.2.3.2. Carga Sísmica.

El sistema de tuberías debe ser diseñado para fuerzas sísmicas horizontales². El método de análisis seleccionado es el descrito por la norma ASCE 7: Cargas de Diseño Mínimas para Edificios y otras Estructuras (Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures), que es uno de los recomendados por la norma B31.3. Este código es válido en tanto que tiene los mismos principios y usa ecuaciones similares a las del Código Ecuatoriano de la Construcción.

La carga sísmica se calcula como un equivalente estático que reemplaza sus efectos, esto es mediante el cálculo de una fuerza que se distribuye horizontalmente a lo largo de la tubería. Para simular esta fuerza en CAESAR II se introduce un valor de aceleración gravitacional horizontal que produzca el mismo efecto.

Para determinar la carga sísmica se debe determinar el período fundamental de la tubería. Se han determinado 10 modos de vibración para cada línea de tubería con los siguientes períodos para la línea de drenaje.

Tabla 4.16. Períodos fundamentales, línea de drenaje.

Modo	Frecuencia (hz)	Período (s)
1	0.495	2.019
2	0.683	1.464
3	0.940	1.063
4	1.018	0.983
5	1.410	0.709
6	1.550	0.645
7	1.950	0.513
8	2.650	0.377
9	2.678	0.373
10	2.763	0.362

Los valores de períodos para todas las líneas de tuberías exceden el valor máximo establecido por la norma ASCE 7, que ha sido calculado y es igual a

² ASME B31.3, Dynamic Effects 301.5.3

0.209 segundos por lo que se ha hecho un cálculo sísmico único para todo el sistema.

En algunos nodos se han aumentado algunos tipos de soportes que impiden el desplazamiento lateral de la tubería que en un principio eran simplemente apoyados y hacía que la línea de tubería falle por carga sísmica.

4.2.3.2.1. Cálculo de Carga Sísmica para el Sistema de Tubería

$$F_p := \frac{a_p \cdot A_p \cdot I_p \cdot W_p}{R_p} \quad \text{ASCE 7 ecuación 9.3.1.3-2}$$

$$a_p := 2.5 \quad \text{Factor de amplificación. Tabla 9.3.3.2}$$

$$R_p := 4 \quad \text{Factor de modificación de respuesta. Tabla 9.3.3.2}$$

$$I_p := 1.5 \quad \text{Factor de importancia. Sección 9.3.1.5}$$

Según la sección 9.2.3.3, el período no puede exceder $C_u \cdot T_a$:

$$h_n := 2\text{m} \quad \text{Altura de la estructura.}$$

$$C_t := 0.073 \quad \text{Coeficiente para el período aproximado}$$

$$T_a := C_t \cdot h_n^{\frac{3}{4}} \quad \text{Período fundamental aproximado.}$$

$$T_a = 0.123$$

$$C_u := 1.7 \quad \text{Coeficiente para límite superior de período}$$

$$T_{\max} := C_u \cdot T_a \quad \text{Período fundamental máximo.}$$

$$T_{\max} = 0.209$$

Como el período calculado excede el máximo, se toma el período máximo.

$$T := T_{\max}$$

Tipo de suelo: D

$$A_a := 0.1$$

Coefficiente sísmico máximo efectivo de aceleración

$$A_v := 0.1$$

Coefficiente sísmico máximo efectivo de aceleración relacionado a la velocidad

$$C_a := 0.16$$

Coefficiente sísmico basado en el tipo de suelo y el valor de A_a : Tabla 9.1.4.2.4A

$$C_v := 0.17$$

Coefficiente sísmico basado en el tipo de suelo y el valor de A_v : Tabla 9.1.4.2.4B

$$A_s := \frac{1.2 \cdot C_v}{T^3}$$

Coefficiente de aceleración correspondiente al sistema de tubería.

$$A_s = 0.58$$

A_s como máximo puede tomar el valor de

$$4C_a$$

$$A_r := 2 \cdot A_s$$

Coefficiente del componente de aceleración a nivel mas alto del sistema de tubería

$$A_r = 1.16$$

$$A_r := 4 \cdot C_a$$

$$A_r = 0.64$$

$$x := 2\text{m}$$

Altura del centro de gravedad en la tubería

$$h := 2\text{m}$$

Altura promedio del techo del sistema de tubería

$$A_p := C_a + (A_r - C_a) \cdot \left(\frac{x}{h}\right)$$

$$A_p = 0.64$$

Coefficiente del componente de aceleración para un punto del sistema de tubería

$$F_p := \frac{a_p \cdot A_p \cdot I_p \cdot W_p}{R_p}$$

Para simular en CAESAR II esta fuerza que debe ser distribuida en el sistema, introducimos un coeficiente de aceleración que producirá la fuerza determinada. Considerando que Fuerza = (masa)(aceleración), este coeficiente viene determinado por:

$$p := \frac{ap \cdot Ap \cdot Ip}{Rp}$$

$$p = 0.6$$

4.2.3.3. Línea de Drenaje.

Para la línea de drenaje y para las otras líneas en el estudio dinámico se han establecido los siguientes casos de carga:

Tabla 4.17. Casos de carga, estudio dinámico.

Caso de Carga	Tipo de Carga	Cargas Consideradas
Caso 5	Ocasional	W+T2+P1+U1
Caso 6	Ocasional	W+T2+P1-U1
Caso 7	Ocasional	W+T2+P1+U2
Caso 8	Ocasional	W+T2+P1-U2
Caso 9	Ocasional	W+T2+P1+WIN1
Caso 10	Ocasional	W+T2+P1-WIN1
Caso 11	Ocasional	W+T2+P1+WIN2
Caso 12	Ocasional	W+T2+P1-WIN2
Caso 13	Expansión	L2-L4
Caso 14	Expansión	L3-L4
Caso 15	Fatiga	L2-L4
Caso 16	Fatiga	L3-L4

Para la verificación con el código de las cargas de fatiga se debe hacer una evaluación combinada de los casos de fatiga ya que cada uno contribuye a una posible falla por fatiga. Para esta evaluación se debe definir una curva de fatiga del material. Se han seleccionado los datos de la figura 5-110.1 de ASME Sección VIII División 2, para materiales de acero al carbono entre otros con esfuerzo último a la tensión menor a 80 ksi (552 Mpa).

	Butt Weld		Fillet Weld	
	Cycles	Stress	Cycles	Stress
1	10.000	7997918.	10.000	7997918.
2	100.000	2826850.	100.000	2826850.
3	1000.000	1144529.	1000.000	1144529.
4	10000.00	524001.5	10000.00	524001.5
5	100000.0	275790.2	100000.0	275790.2
6	500000.0	186158.4	500000.0	186158.4
7	1000000.	172368.9	1000000.	172368.9
8				

Figura 4.6. Curva de fatiga para la tubería.

El factor de reducción de rango de esfuerzos es obtenido de la tabla 302.3.5 de la norma B31.3 y es función de los ciclos a los que está sometida la tubería.

La presión y temperaturas son las siguientes:

$$P1 = 1724 \text{ kPa}$$

$$T1 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T2 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Densidad del fluido} = 1000 \text{ kg/m}^3.$$

Los resultados de verificación de código para cada caso dicen que pasan los requerimientos de esfuerzos:

Tabla 4.18. Esfuerzos de código estudio dinámico, línea de drenaje.

Caso	Nodo	Esfuerzo de Código (kPa)	Esfuerzo Admisible (kPa)
5 (OCC) W+T2+P1+U1	380	153135	183401
6 (OCC) W+T2+P1-U1	130	146413	183401
7 (OCC) W+T2+P1+U2	100	156659	183401
8 (OCC) W+T2+P1-U2	100	157355	183401

9 (OCC) W+T2+P1+WIN1	310	56637	183401
10 (OCC) W+T2+P1-WIN1	480	53087	183401
11 (OCC) W+T2+P1+WIN2	200	46393	183401
12(OCC) W+T2+P1-WIN2	550	46790	183401
13 (EXP) L13=L2-L4	528	31854	292484
14 (EXP) L14=L3-L4	640	5134	298729
15 (FAT) L15=L2-L4	528	45780	583048
16 (FAT) L16=L3-L4	640	7369	583048

Las cargas debido a fatiga son extremadamente bajas como se puede apreciar en los reportes del anexo C. El análisis conjunto por la combinación de los dos ciclos de carga considerados muestra que tampoco se sobrepasa los límites.

4.2.3.4. Línea de Entrada y Salida

La presión y temperaturas son las siguientes:

$$P1 = 2413 \text{ kPa}$$

$$T1 = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T2 = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Densidad del fluido} = 540 \text{ kg/m}^3.$$

Los resultados de verificación de código para cada caso dicen que pasan los requerimientos de esfuerzos:

Tabla 4.19. Esfuerzos de código estudio dinámico, línea de entrada y salida.

Caso	Nodo	Esfuerzo de Código (kPa)	Esfuerzo Admisible (kPa)
5 (OCC) W+T2+P1+U1	1550	166860	183401
6 (OCC) W+T2+P1-U1	1550	181767	183401
7 (OCC) W+T2+P1+U2	2000	150132	183401
8 (OCC) W+T2+P1-U2	2000	152029	183401
9 (OCC) W+T2+P1+WIN1	1940	91564	183401
10 (OCC) W+T2+P1-WIN1	1940	91743	183401
11 (OCC) W+T2+P1+WIN2	1940	91595	183401
12 (OCC) W+T2+P1-WIN2	1940	91594	183401
13 (EXP) L13=L2-L4	330	88763	289235
14 (EXP) L14=L3-L4	2000	39296	289180
15 (FAT) L15=L2-L4	330	89217	583048
16 (FAT) L16=L3-L4	2000	39483	583048

4.2.3.5. Línea de Alivio

En esta línea existen 3 válvulas de alivio para protección contra una sobre presión. Al abrirse estas válvulas se ejerce una fuerza de reacción que debe ser considerada en la tubería. Esta fuerza ha sido calculada mediante el apéndice II de la norma B31.1.

4.2.3.5.1. Cálculo de la Fuerza en las Válvulas de Alivio

$$F := \left[\frac{W \cdot V}{g} + (P - P_a) \cdot A \right]$$

$$W := 71.41 \frac{\text{kg}}{\text{sec}}$$

Flujo Másico

$$V := 71.255 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$$

Velocidad de Salida

$$P := 1519604.51 \text{Pa}$$

Presión Atmosférica

$$P_a := 101352.93 \text{Pa}$$

Presión a la Salida

$$A := 0.0167742 \text{m}^2$$

Área de salida de la Válvula JBS-45-8T10

$$F := 28874.47 \text{N}$$

Fuerza que se tiene a la salida de la Válvula

Esta fuerza se considera un caso de carga adicional de tipo ocasional, quedando los casos de carga de la línea de alivio de la siguiente manera:

Tabla 4.20. Casos de carga, estudio dinámico línea de alivio.

Caso de Carga	Tipo de Carga	Cargas Consideradas
Caso 5	Ocasional	W+T2+P1+U1
Caso 6	Ocasional	W+T2+P1-U1
Caso 7	Ocasional	W+T2+P1+U2
Caso 8	Ocasional	W+T2+P1-U2
Caso 9	Ocasional	W+T2+P1+WIN1
Caso 10	Ocasional	W+T2+P1-WIN1
Caso 11	Ocasional	W+T2+P1+WIN2
Caso 12	Ocasional	W+T2+P1-WIN2
Caso 13	Ocasional	W+T1+P1+F1
Caso 14	Expansión	L2-L4
Caso 15	Expansión	L3-L4
Caso 16	Fatiga	L2-L4
Caso 17	Fatiga	L3-L4

La presión y temperaturas son las siguientes:

$$P1 = 1724 \text{ kPa}$$

$$T1 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T2 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Densidad del fluido} = 19.7 \text{ kg/m}^3.$$

Los resultados de verificación de código para cada caso dicen que pasan los requerimientos de esfuerzos:

Tabla 4.21. Esfuerzos de código estudio dinámico, línea de alivio.

Caso	Nodo	Esfuerzo de Código (kPa)	Esfuerzo Admisible (kPa)
5 (OCC) W+T2+P1+U1	1030	43465	183401
6 (OCC) W+T2+P1-U1	1030	42329	183401
7 (OCC) W+T2+P1+U2	1030	42683	183401
8 (OCC) W+T2+P1-U2	1030	43273	183401
9 (OCC) W+T2+P1+WIN1	1030	43939	183401
10 (OCC) W+T2+P1-WIN1	1999	47733	183401
11 (OCC) W+T2+P1+WIN2	820	42541	183401
12 (OCC) W+T2+P1-WIN2	1030	44088	183401
13(OCC) W+T1+P1+F1	1410	153817	183401
14 (EXP) L13=L2-L4	100	51704	292488
15 (EXP) L14=L3-L4	270	8730	291895
16 (FAT) L15=L2-L4	100	76648	583048
17 (FAT) L16=L3-L4	270	12939	583048

4.2.3.6. Línea de Vapor.

La presión y temperaturas son las siguientes:

$$P1 = 1724 \text{ kPa}$$

$$T1 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T2 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Densidad del fluido} = 24 \text{ kg/m}^3.$$

Los resultados de verificación de código para cada caso dicen que pasan los requerimientos de esfuerzos:

Tabla 4.22. Esfuerzos de código estudio dinámico, línea de vapor.

Caso	Nodo	Esfuerzo de Código (kPa)	Esfuerzo Admisible (kPa)
5 (OCC) W+T2+P1+U1	550	76453	183401
6 (OCC) W+T2+P1-U1	550	71765	183401
7 (OCC) W+T2+P1+U2	60	71762	183401
8 (OCC) W+T2+P1-U2	60	74614	183401
9 (OCC) W+T2+P1+WIN1	550	63167	183401
10 (OCC) W+T2+P1-WIN1	550	60393	183401
11 (OCC) W+T2+P1+WIN2	880	43528	183401
12 (OCC) W+T2+P1-WIN2	770	43462	183401
13 (EXP) L13=L2-L4	330	41279	296819
14 (EXP) L14=L3-L4	598	8308	296750
15 (FAT) L15=L2-L4	330	56056	583048
16 (FAT) L16=L3-L4	598	11338	583048

4.2.3.7. Línea Slop-Bullet.

La presión y temperaturas son las siguientes:

$$P1 = 1724 \text{ kPa}$$

$$T1 = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T2 = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Densidad del fluido} = 1000 \text{ kg/m}^3.$$

Los resultados de verificación de código para cada caso dicen que pasan los requerimientos de esfuerzos:

Tabla 4.23. Esfuerzos de código estudio dinámico, línea slop – bullet.

Caso	Nodo	Esfuerzo de Código (kPa)	Esfuerzo Admisible (kPa)
5 (OCC) W+T2+P1+U1	888	90436	183401
6 (OCC) W+T2+P1-U1	798	101767	183401
7 (OCC) W+T2+P1+U2	699	109455	183401
8 (OCC) W+T2+P1-U2	810	90643	183401
9 (OCC) W+T2+P1+WIN1	660	57764	183401
10 (OCC) W+T2+P1-WIN1	550	58179	183401
11 (OCC) W+T2+P1+WIN2	560	59799	183401
12 (OCC) W+T2+P1-WIN2	660	58653	183401
15 (FAT) L15=L2-L4	900	131603	583048
16 (FAT) L16=L3-L4	900	14129	583048

4.2.4. SOPORTERÍA

Para el diseño de la soportería se han clasificado en diferentes modelos agrupándolos para que soporten geometrías y cargas similares. Las cargas definidas en cada modelo han sido obtenidas de las reacciones en CAESAR II con los valores más altos en cada uno de las componentes y en todos los casos de carga, considerando el intervalo de nodos para ese soporte (desde – hasta).

4.2.4.1. Esfuerzos en los soportes

El factor de seguridad en todos los soportes está sobre 1.5. El material seleccionado es ASTM A36 que tiene un esfuerzo a la fluencia de 248 MPa, con perfiles tipo W.

4.2.4.1.1. Soporte 1

Tabla 4.24. Cargas soporte 1.

	Desde	Hasta	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
Entrada Salida	1800	2130	29180	-77363	45657
	1140	1350	28144	-75202	-27873
	3300	3320	84249	-34078	-18104

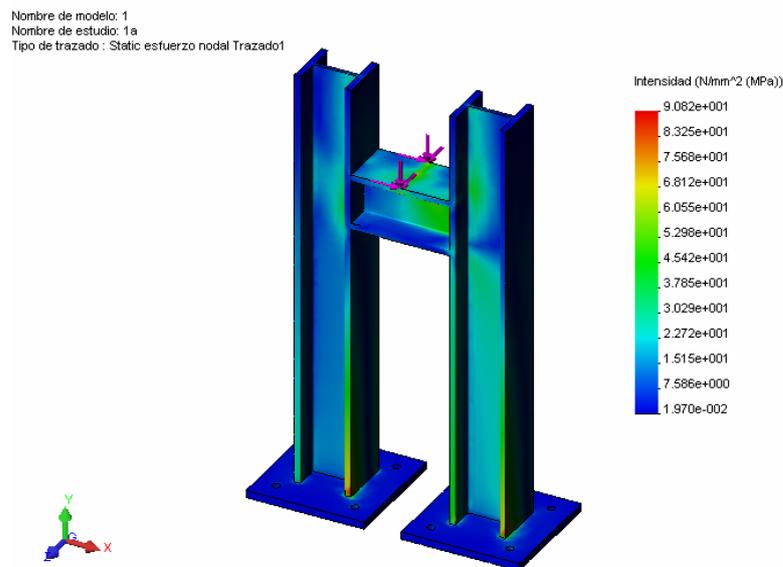


Figura 4.7. Distribución de esfuerzos soporte 1.

Esfuerzo Máximo: 90.8 MPa

4.2.4.1.2. Soporte 2

Tabla 4.25. Cargas soporte 2.

	Desde	Hasta	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
Entrada Salida	1800	2130	29180	-77363	45657
	1140	1350	28144	-75202	-27873
	3300	3320	84249	-34078	-18104

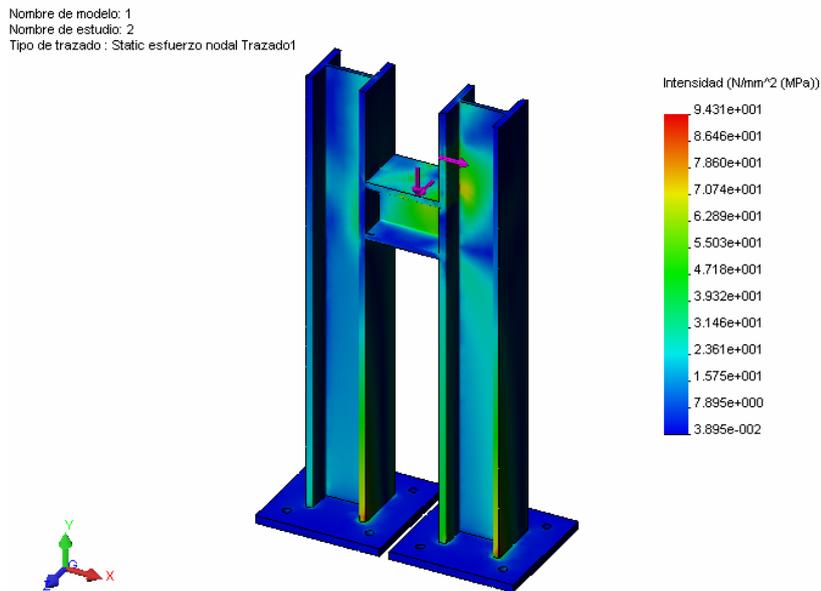


Figura 4.8. Distribución de esfuerzos soporte 2.

Esfuerzo Máximo: 94.3 Mpa

4.2.4.1.3. Soporte 3

Tabla 4.26. Cargas soporte 3.

	Desde	Hasta	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
Alivio	110	360	-2153	-11592	2042
Vapor	340	590	930	-3065	805
Drenaje	280	520	-703	-1802	-698
Entrada	2230	2420	2478	-7429	-2335
Salida	1570	1780	3510	-10342	3180

Nombre de modelo: 3
 Nombre de estudio: 2
 Tipo de trazado: Static esfuerzo nodal Trazado1

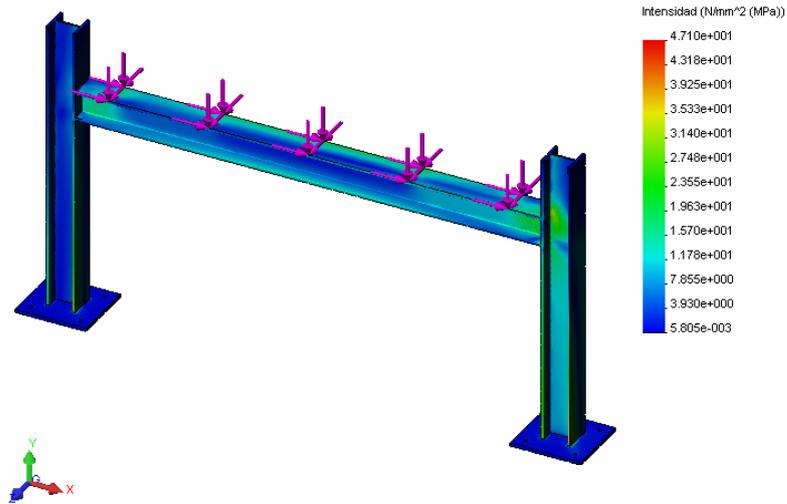


Figura 4.9. Distribución de esfuerzos soporte 3.

Esfuerzo Máximo: 47.1 MPa

4.2.4.1.4. Soporte 3a

Tabla 4.27. Cargas soporte 3a.

	Desde	Hasta	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
Slop - Bullet	880	880	-427	-1103	-418
Salida	1130	1130	1472	-4653	1446

Nombre de modelo: 3a
 Nombre de estudio: 2
 Tipo de trazado: Static esfuerzo nodal Trazado1

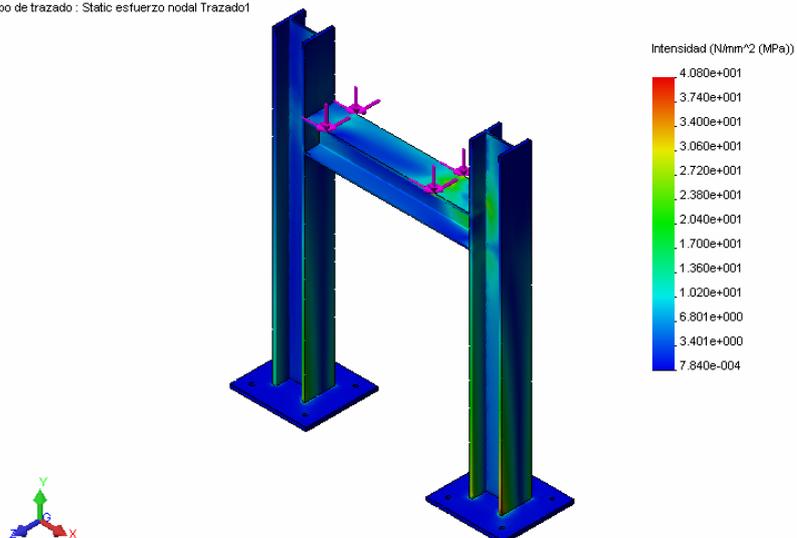


Figura 4.10. Distribución de esfuerzos soporte 3a.

Esfuerzo Máximo: 40.1 MPa

4.2.4.1.5. Soporte 3b

Tabla 4.28. Cargas soporte 3b.

	Desde	Hasta	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
Alivio	110	360	-2153	-11592	2042
Vapor	340	590	930	-3065	805
Drenaje	280	520	-703	-1802	-698
Entrada	2230	2420	2478	-7429	-2335
Salida	1570	1780	3510	-10342	3180
Salida	1040	1090	5827	-15151	4417

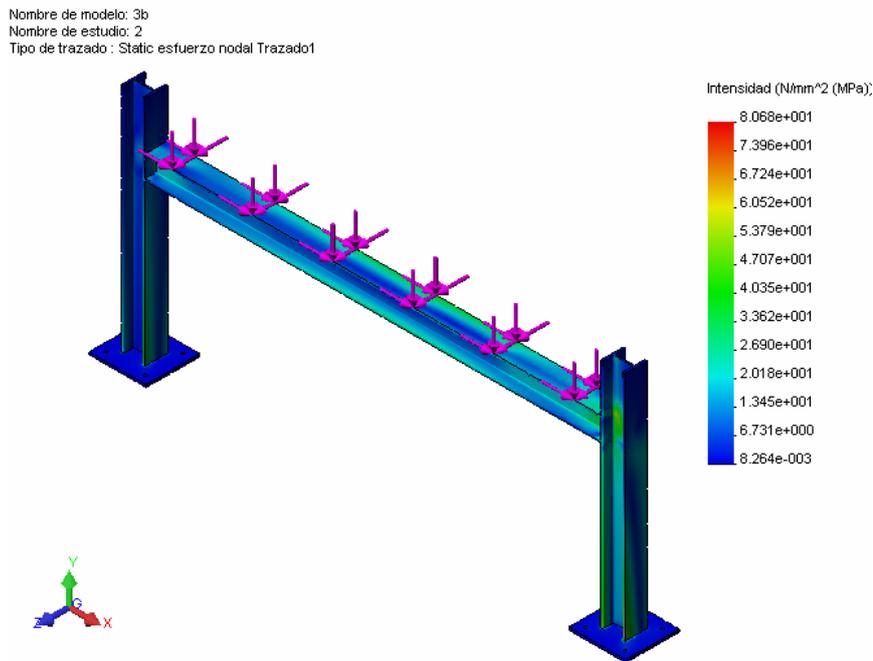


Figura 4.11. Distribución de esfuerzos soporte 3b.

Esfuerzo Máximo: 80.7 MPa

4.2.4.1.6. Soporte 4

Tabla 4.29. Cargas soporte 4.

	Desde	Hasta	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
Vapor	620	670	-2011	-5760	2495
Drenaje	550	600	1125	-2918	2220
Entrada	2670	2720	8892	-26035	12709
Salida	2450	2500	-6081	-20244	5373
Alivio	390	420	5058	-8630	10520

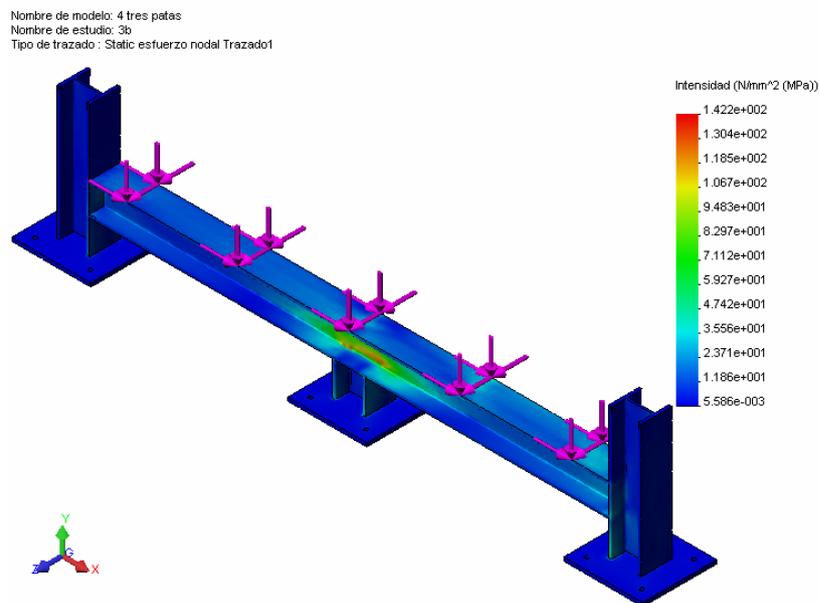


Figura 4.12. Distribución de esfuerzos soporte 4.

Esfuerzo Máximo: 142 Mpa

4.2.4.1.7. Soporte 5

Tabla 4.30. Cargas soporte 5.

	Desde	Hasta	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
Vapor	620	670	-2011	-5760	2495
Drenaje	550	600	1125	-2918	2220
Entrada	2670	2720	8892	-26035	12709
Salida	2450	2500	-6081	-20244	5373
Alivio	390	420	5058	-8630	10520

Nombre de modelo: 5
 Nombre de estudio: 1
 Tipo de trazado : Static esfuerzo nodal Trazado1

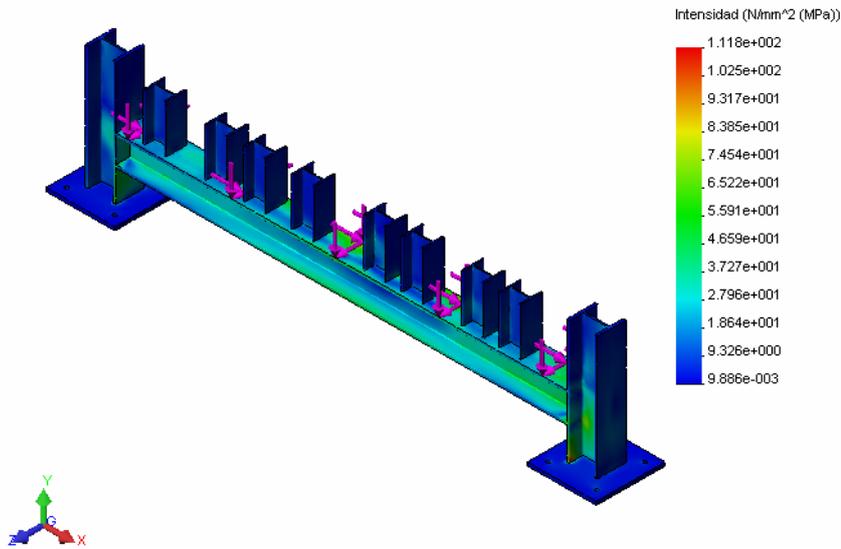


Figura 4.13. Distribución de esfuerzos soporte 5.

Esfuerzo Máximo: 111.8 MPa

4.2.4.1.8. Soporte 6

Tabla 4.31. Cargas soporte 6.

	Desde	Hasta	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
Alivio	820	820	-3527	-10871	1397
	1660	1660	-2633	-9408	-1552
	940	940	2429	-6228	1001

Nombre de modelo: 6
 Nombre de estudio: 1
 Tipo de trazado : Static esfuerzo nodal Trazado1

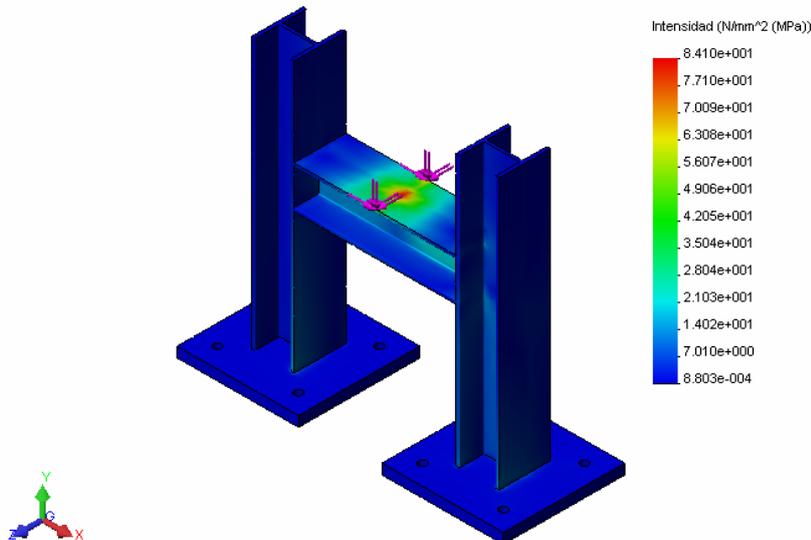


Figura 4.14. Distribución de esfuerzos soporte 6.

Esfuerzo Máximo: 84.1 MPa

4.2.4.1.9. Soporte 6b

Tabla 4.32. Cargas soporte 6b.

	Desde	Hasta	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
Alivio	430	430	-4809	-19363	-3990

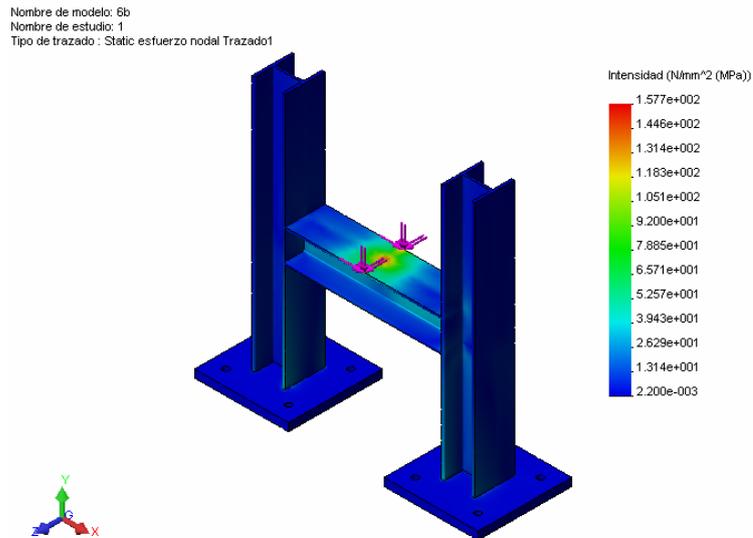


Figura 4.15. Distribución de esfuerzos soporte 6b.

Esfuerzo Máximo: 157.7 MPa

4.2.4.1.10. Soporte 7

Tabla 4.33. Cargas soporte 7.

	Desde	Hasta	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
Vapor	120	190	-3661	-10613	3243
Alivio	50	80	5222	-23491	-10582
Drenaje	180	250	-1383	-3648	2282
Slop Bullet	920	990	-2313	-5978	2082

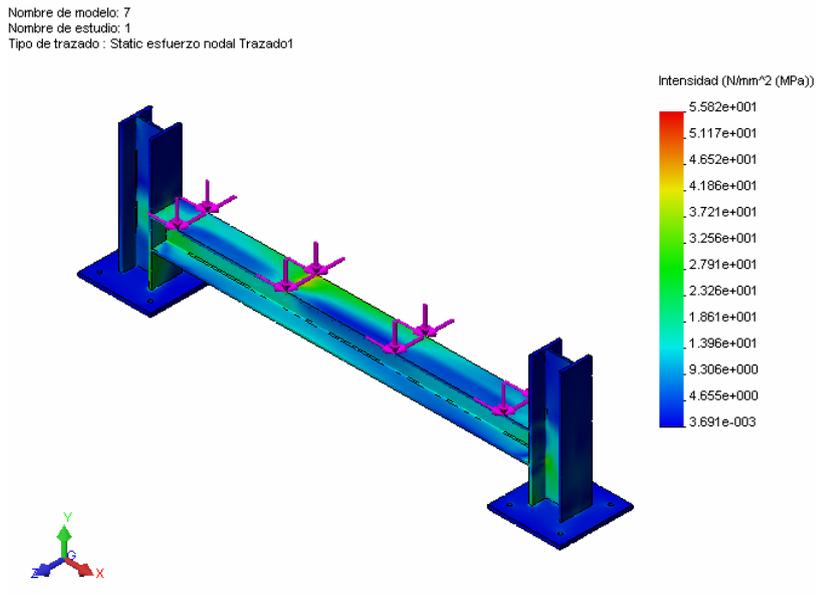


Figura 4.16. Distribución de esfuerzos soporte 7.

Esfuerzo Máximo: 55.8Mpa

4.2.4.1.11. Soporte 8

Tabla 4.34. Cargas soporte 8.

	Desde	Hasta	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
Vapor	120	190	-3661	-10613	3243
Alivio	50	80	5222	-23491	-10582
Drenaje	180	250	-1383	-3648	2282
Slop Bullet	920	990	-2313	-5978	2082

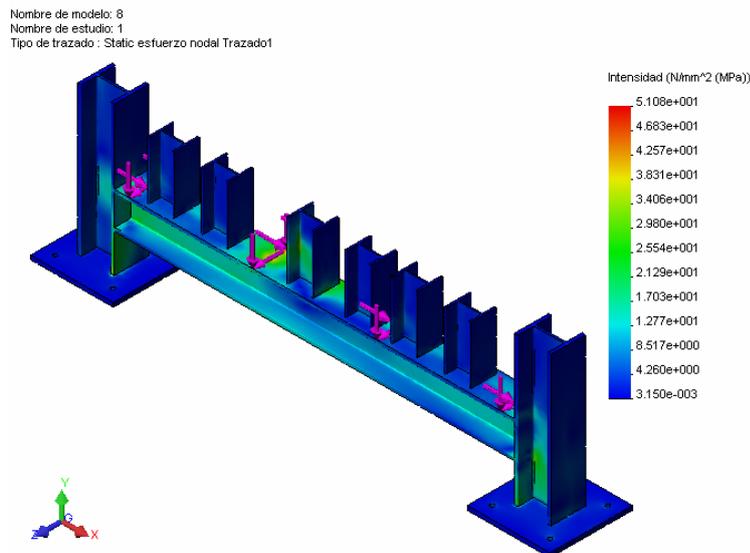


Figura 4.17. Distribución de esfuerzos soporte 8.

Esfuerzo Máximo: 51.1 MPa

4.2.4.1.12. Soporte 9

Tabla 4.35. Cargas soporte 9.

	Desde	Hasta	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
Vapor	120	190	-3661	-10613	3243
Alivio	50	80	5222	-23491	-10582
Drenaje	180	250	-1383	-3648	2282
Slop Bullet	920	990	-2313	-5978	2082

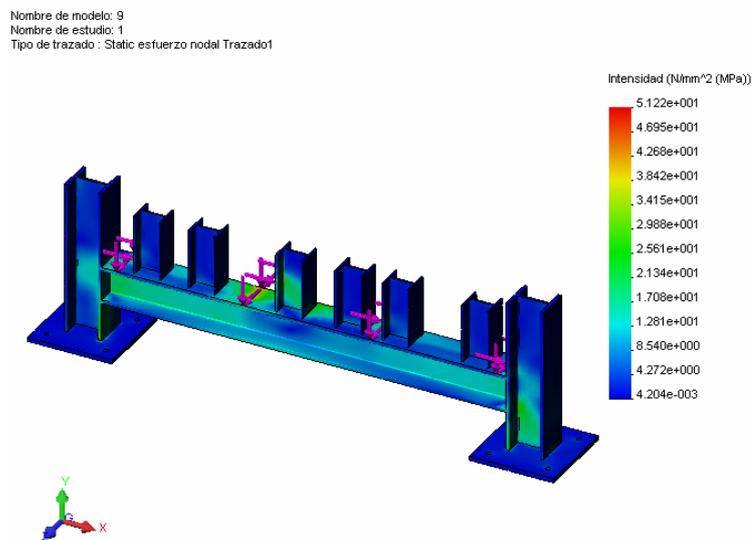


Figura 4.18. Distribución de esfuerzos soporte 9.

Esfuerzo Máximo: 51.22 MPa

4.2.4.1.13. Soporte 10

Tabla 4.36. Cargas soporte 10.

	Desde	Hasta	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
Salida	3360	3400	-1375	-3688	-2384
Vapor	260	310	-4466	-12544	4293

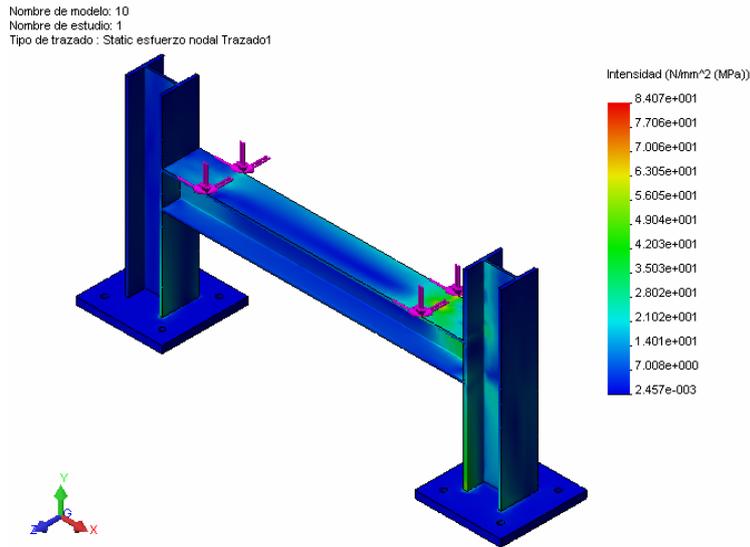


Figura 4.19. Distribución de esfuerzos soporte 10.

Esfuerzo Máximo: 84.1 MPa

4.2.4.1.14. Soporte 10a

Tabla 4.37. Cargas soporte 10a.

	Desde	Hasta	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
Salida	3360	3400	-1375	-3688	-2384
Vapor	260	310	-4466	-12544	4293

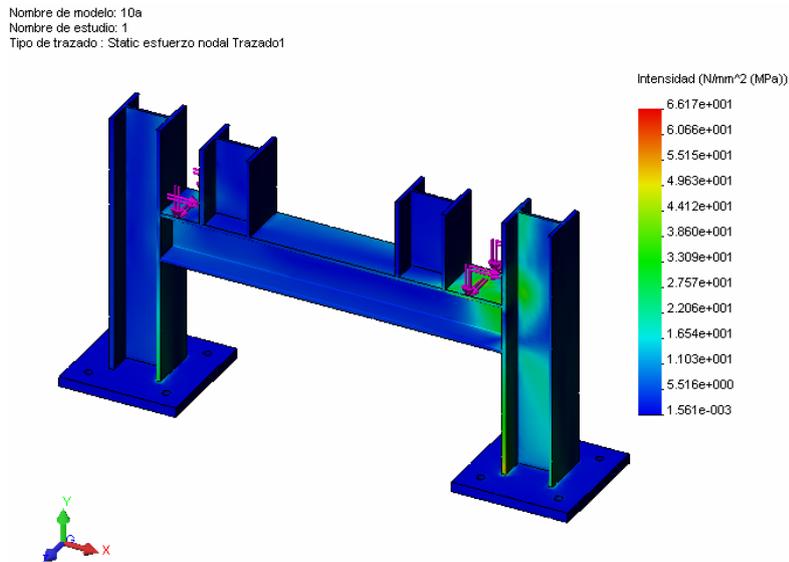


Figura 4.20. Distribución de esfuerzos soporte 10a.

Esfuerzo Máximo: 66.2 MPa

4.2.4.1.15. Soporte 10b

Tabla 4.38. Cargas soporte 10b.

	Desde	Hasta	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
Salida	3360	3400	-1375	-3688	-2384
Vapor	260	310	-4466	-12544	4293

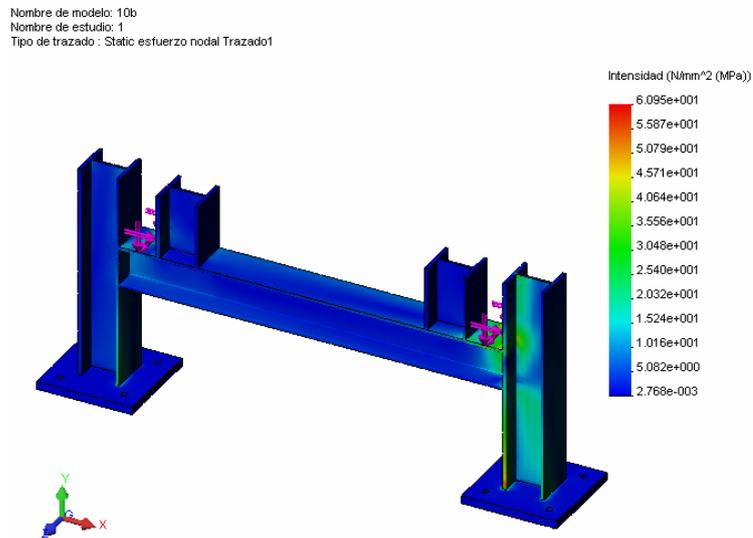


Figura 4.21. Distribución de esfuerzos soporte 10b.

Esfuerzo Máximo: 60.1 MPa

4.2.4.1.16. Soporte 11

Tabla 4.39. Cargas soporte 11.

	Desde	Hasta	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
Slop Bullet	350	440	-1406	-3612	1397
	1050	1180	-6441	-15346	2300

Nombre de modelo: 11
 Nombre de estudio: 1
 Tipo de trazado : Static esfuerzo nodal Trazado1

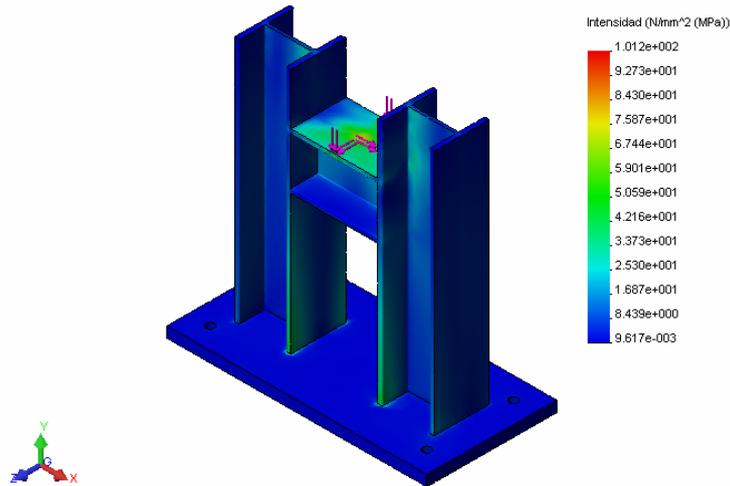


Figura 4.22. Distribución de esfuerzos soporte 11.

Esfuerzo Máximo: 101.2 MPa

4.2.4.1.17. Soporte 12

Tabla 4.40. Cargas soporte 12.

	Desde	Hasta	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
Salida sur	320	320	-5796	-9728	-19661
Salida norte	1020	1020	-5845	-9101	-16530

Nombre de modelo: 12
 Nombre de estudio: 1
 Tipo de trazado : Static esfuerzo nodal Trazado1
 Escala de deformación: 0

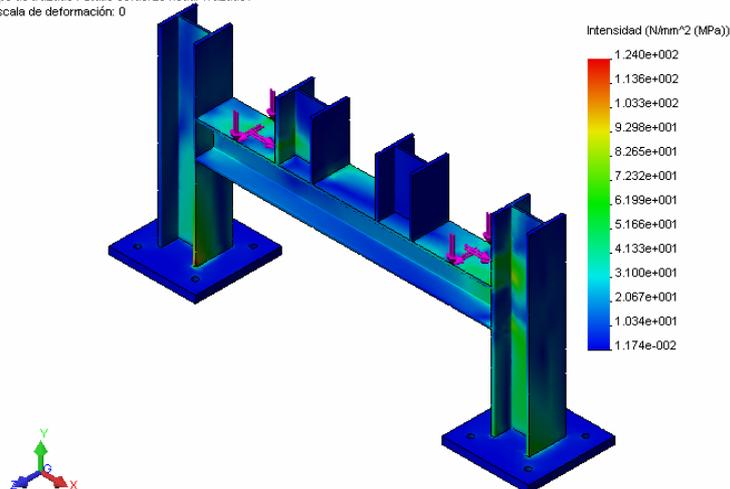


Figura 4.23. Distribución de esfuerzos soporte 12.

Esfuerzo Máximo: 124 MPa

4.2.4.1.18. Soporte 13

Tabla 4.41. Cargas soporte 13.

	Desde	Hasta	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
Salida sur	290	300	-4982	-12860	2651
Salida norte	990	1000	2318	-7429	2740

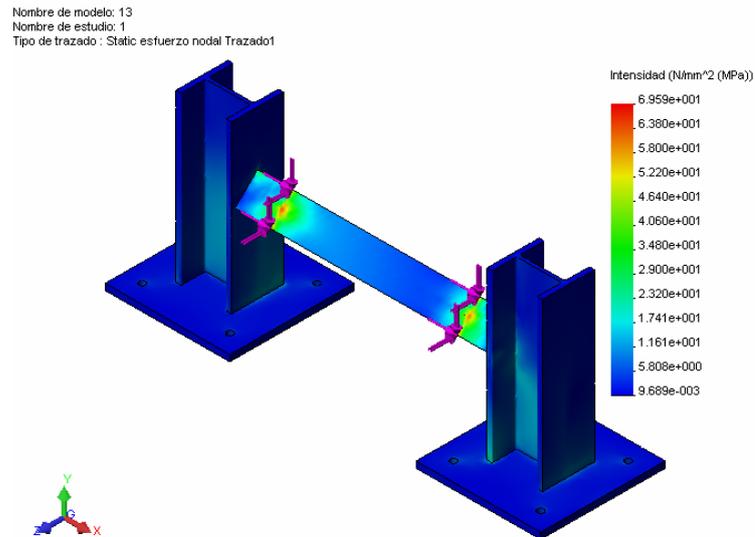


Figura 4.24. Distribución de esfuerzos soporte 13.

Esfuerzo Máximo: 69.6 MPa

4.2.4.1.19. Soporte 14

Tabla 4.42. Cargas soporte 14.

	Desde	Hasta	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
Salida	270	270	11414	-30221	7415
	190	190	6076	-15587	3229
	460	460	8412	-22824	8839
	370	370	7651	-26329	10151
	140	140	1575	-4186	1455
	960	960	5445	-14461	4515
	40	40	5338	-14390	4960
	120	120	4119	-11610	4190
	690	690	8412	-22824	8839
	600	600	7660	-26342	10151
	940	940	2153	-6659	2269

Nombre de modelo: 14
 Nombre de estudio: 1
 Tipo de trazado : Static esfuerzo nodal Trazado1

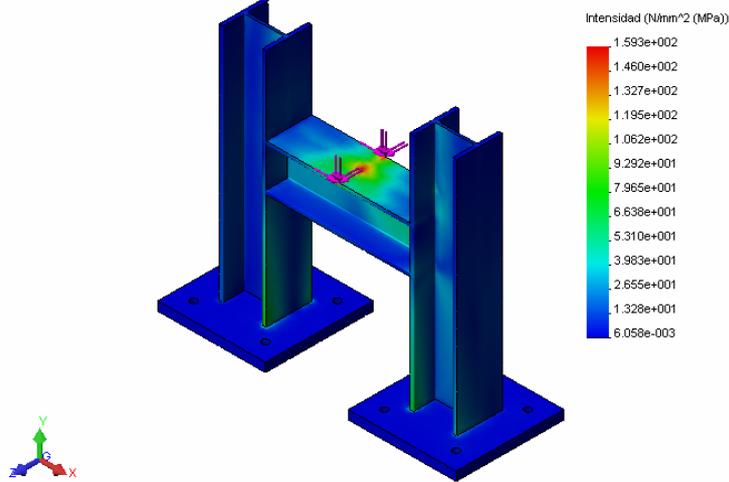


Figura 4.25. Distribución de esfuerzos soporte 14.

Esfuerzo Máximo: 159 MPa

4.2.4.1.20. Soporte 15

Tabla 4.43. Cargas soporte 15.

	Desde	Hasta	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
Salida	530	530	2153	-11263	4248
	1430	1430	5614	-15524	4595
	760	760	2153	-11263	4248
	860	860	3510	-9595	3354
	910	910	4155	-11788	4337

Nombre de modelo: 15
 Nombre de estudio: 1
 Tipo de trazado : Static esfuerzo nodal Trazado1

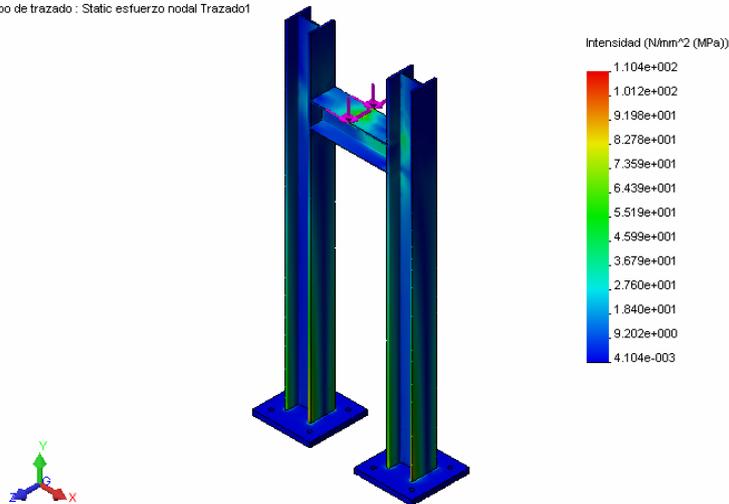


Figura 4.26. Distribución de esfuerzos soporte 15.

Esfuerzo Máximo: 110.4 MPa

4.2.4.1.21. Soporte 16

Tabla 4.44. Cargas soporte 16.

	Desde	Hasta	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
Slop Bullet	690	690	1268	-3354	1010
	640	640	1041	-2789	934
	520	520	1210	-3207	1254
	570	570	1059	-2727	1036

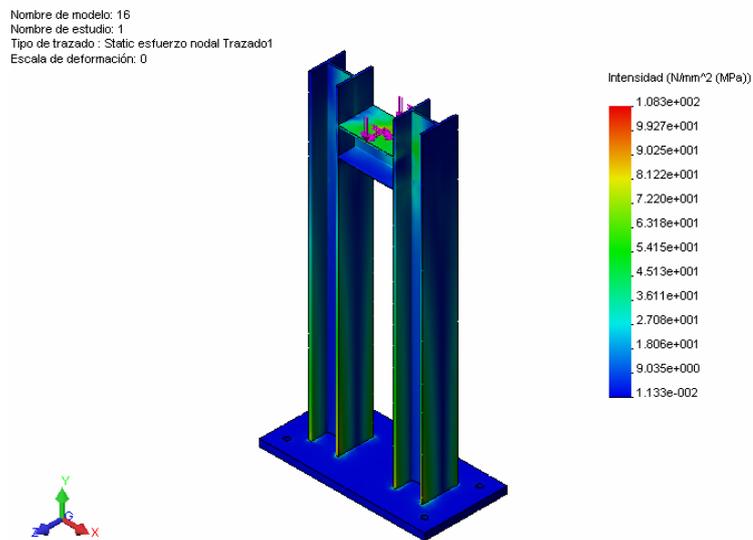


Figura 4.27. Distribución de esfuerzos soporte 16.

Esfuerzo Máximo: 108.3 MPa

4.2.4.2. Soldadura.

El análisis de la soldadura se lo hace con la ayuda del programa Archon Weld Calculator version 6.0 de Archon Engineering, en donde se ingresa la geometría del cordón con fuerzas y momentos y se obtiene el tamaño del cordón de soldadura para un determinado esfuerzo admisible. El factor de seguridad empleado está sobre 1.5. Se muestra la pantalla del programa para el soporte 1:

Cordón a:

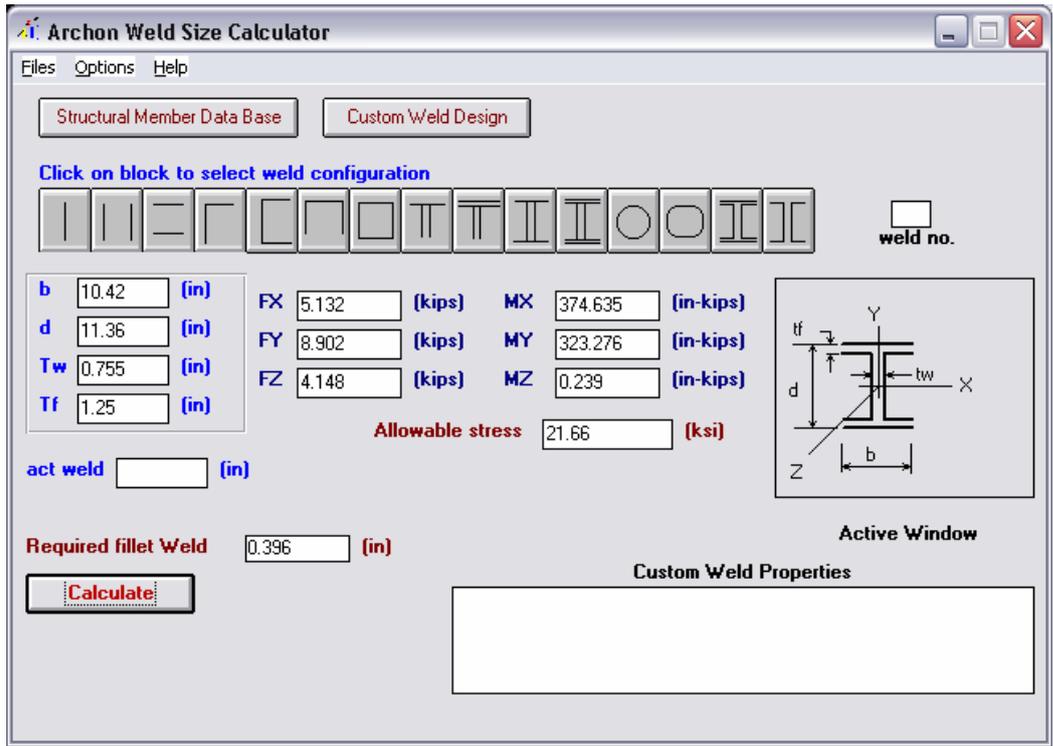


Figura 4.28. Pantalla Archon Weld, soporte 1 cordón a.

Cordón b:

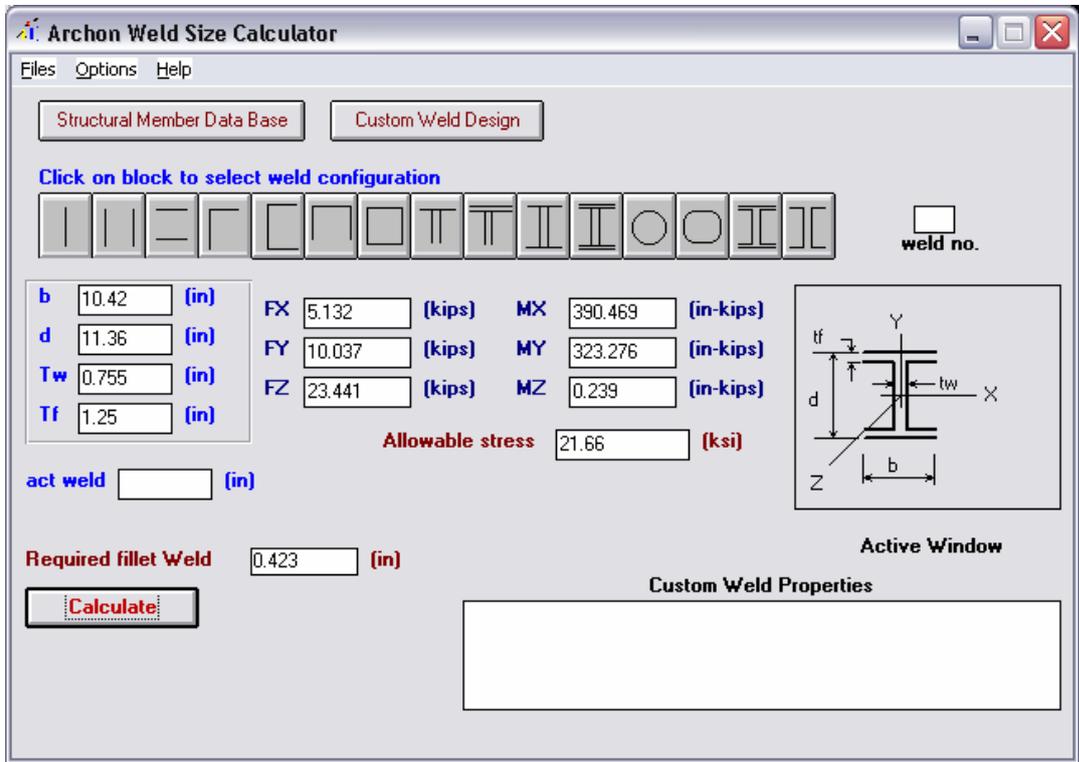


Figura 4.29. Pantalla Archon Weld, soporte 1 cordón b.

Cordón c:

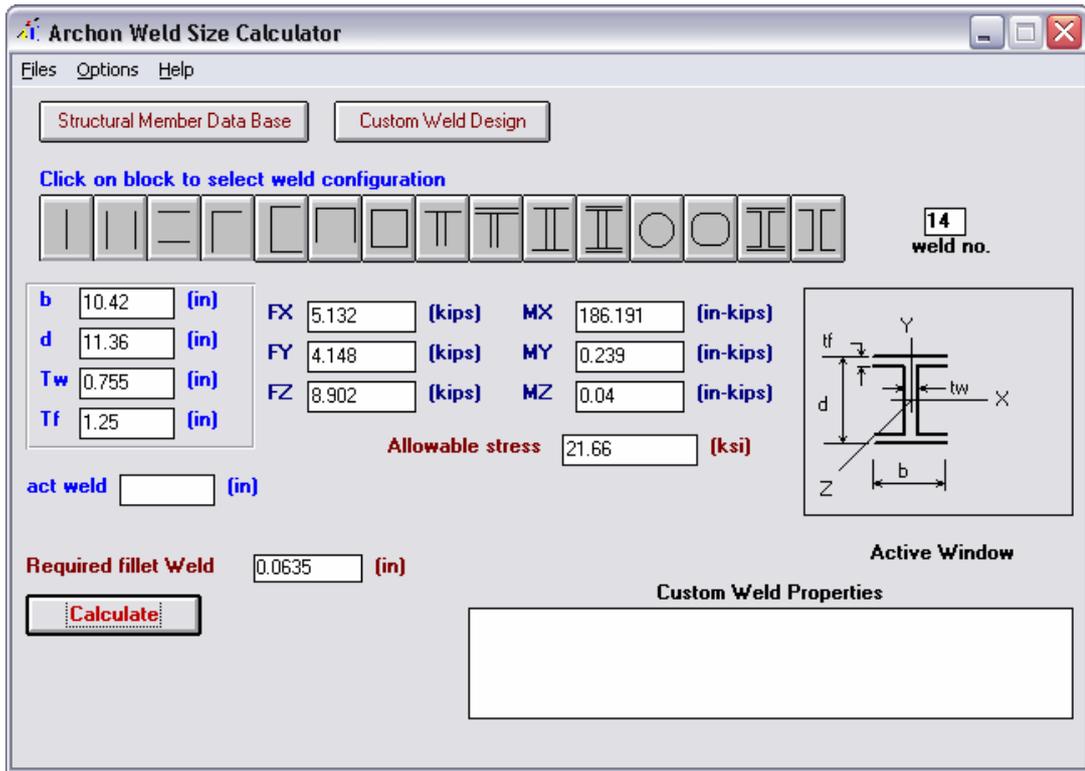


Figura 4.30. Pantalla Archon Weld, soporte 1 cordón c.

Cordón d:

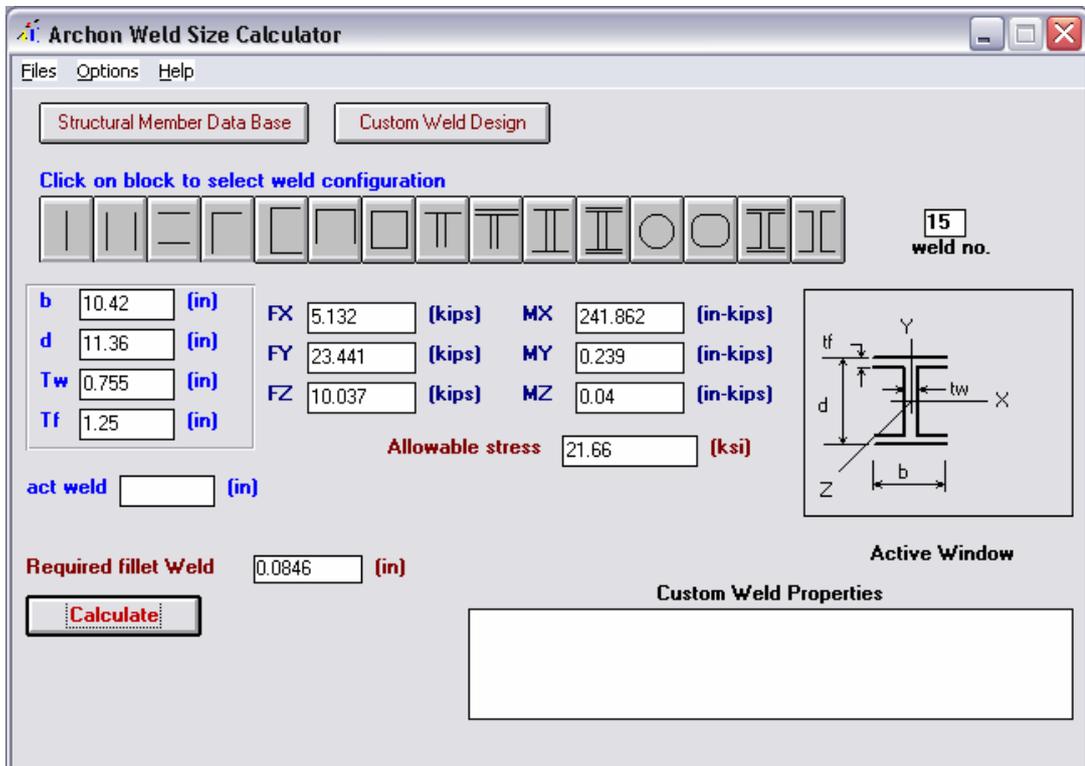


Figura 4.31. Pantalla Archon Weld, soporte 1 cordón d.

Adicionalmente al tamaño de cordón calculado, estos deben tener un tamaño mínimo establecido por AISC, basado en el espesor del metal base. Bajo estas dos consideraciones se han seleccionado los cordones mostrados en cada tabla como se resumen a continuación:

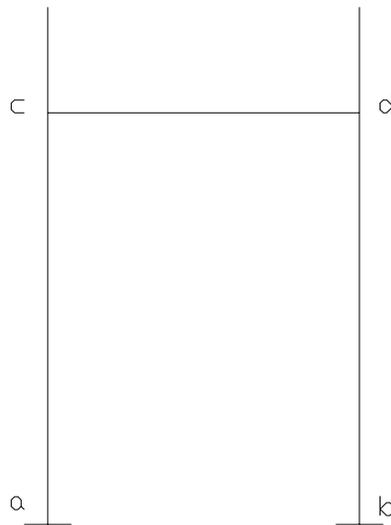


Figura 4.32. Posición de los cordones en los soportes.

4.2.4.2.1. Soporte 1

Tabla 4.45. Cordones de soldadura, soporte 1.

	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)	Cordón calculado (mm)	Cordón seleccionado (mm)
a	22828	-39598	18451	-42354	-36548	27	10.1	12
b	22828	-44647	104271	-44145	-36548	-27	10.7	12
c	22828	18451	-39598	21050	27	5	1.6	12
d	22828	104271	-44647	27344	-27	5	2.1	12

4.2.4.2.2. Soporte 2

Tabla 4.46. Cordones de soldadura, soporte 2.

	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)	Cordón calculado (mm)	Cordón seleccionado (mm)
a	22828	-44491	-60723	-50278	-36662	18	10.9	12
b	22828	-39754	146315	-48881	-36662	-18	11.3	12
c	22828	-60723	-44491	20961	18	-110	1.7	12
d	22828	146315	44496	44751	-18	-110	3.3	12

4.2.4.2.3. Soporte 3

Tabla 4.47. Cordones de soldadura, soporte 3.

	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)	Cordón calculado (mm)	Cordón seleccionado (mm)
a	3754	156	18242	-3526	-6171	49	2.5	8
b	5293	-12064	22864	-8795	-8674	-42	3.9	8
c	3754	18242	156	-3775	49	-160	0.4	8
d	5293	22864	-12064	10521	-42	-199	1.2	8

4.2.4.2.4. Soporte 4

Tabla 4.48. Cordones de soldadura, soporte 4.

	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)	Cordón calculado (mm)	Cordón seleccionado (mm)
a	1770	-2420	6156	-1686	-665	19	0.4	8
b	9533	-8016	16321	1664	-3519	-101	1.4	8
c	1770	6156	-2420	-825	19	-35	0.1	8
d	9533	16321	-8016	4517	-101	-127	0.6	8
e	22005	-560	46146	-2407	-8083	37	3.2	8
f	22005	-560	46146	-2208	-253	37	0.7	8

4.2.4.2.5. Soporte 5

Tabla 4.49. Cordones de soldadura, soporte 5.

	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)	Cordón calculado (mm)	Cordón seleccionado (mm)
a	13082	11459	23745	-11937	-4832	2388	3.0	8
b	20231	-34625	44180	18342	-7470	-2140	4.6	8
c	13082	23745	11459	-16014	2388	-177	2.5	8
d	20231	44180	-29567	32115	-2140	-271	4.2	8

4.2.4.2.6. Soporte 6

Tabla 4.50. Cordones de soldadura, soporte 6.

	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)	Cordón calculado (mm)	Cordón seleccionado (mm)
a	774	-654	4542	-413	-332	1	0.7	7
b	774	-2869	6686	-548	-331	-1	0.8	7
c	774	4542	-654	-130	1	2	0.1	7
d	774	6686	-2869	692	-1	3	0.4	7

4.2.4.2.7. Soporte 6b

Tabla 4.51. Cordones de soldadura, soporte 6b.

	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)	Cordón calculado (mm)	Cordón seleccionado (mm)
a	2398	520	8865	-393	-1026	4	1.7	7
b	2406	-4510	10934	-694	-1029	-4	1.8	7
c	2398	8865	520	-618	4	10	0.3	7
d	2406	10934	-4510	1254	-4	11	0.6	7

4.2.4.2.8. Soporte 7

Tabla 4.52. Cordones de soldadura, soporte 7.

	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)	Cordón calculado (mm)	Cordón seleccionado (mm)
a	7344	1379	28651	-9537	-2711	189	2.1	8
b	5236	-19568	19043	1918	-1934	-170	1.0	8
c	7344	28651	1379	-10028	189	-98	1.1	8
d	5236	19043	-19568	8880	-170	-71	1.1	8

4.2.4.2.9. Soporte 8

Tabla 4.53. Cordones de soldadura, soporte 8.

	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)	Cordón calculado (mm)	Cordón seleccionado (mm)
a	627	623	27285	-8567	-234	107	1.2	8
b	4626	-18812	20760	1376	1707	-110	0.9	8
c	627	27285	623	-8788	107	-11	1.0	8
d	4626	20760	-16730	8440	-110	3353	2.6	8

4.2.4.2.10. Soporte 9

Tabla 4.54. Cordones de soldadura, soporte 9.

	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)	Cordón calculado (mm)	Cordón seleccionado (mm)
a	7353	463	27045	-8455	-2708	151	1.9	8
b	5222	-18651	20893	1312	-1924	-135	0.9	8
c	7353	27045	463	-8619	151	-92	1.0	8
d	5222	20893	-16570	8372	-135	-66	1.0	8

4.2.4.2.11. Soporte 10

Tabla 4.55. Cordones de soldadura, soporte 10.

	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)	Cordón calculado (mm)	Cordón seleccionado (mm)
a	1939	-943	4706	-891	-806	10	1.0	7
b	3897	-5729	12233	-743	-1613	-9	1.8	7
c	1939	4706	-943	-508	10	-17	0.2	7
d	3897	12233	-5729	1587	-9	-29	0.6	7

4.2.4.2.12. Soporte 10a

Tabla 4.56. Cordones de soldadura, soporte 10a.

	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)	Cordón calculado (mm)	Cordón seleccionado (mm)
a	1895	-2046	3857	-984	-788	6	1.0	7
b	3941	-4626	13109	-952	-1631	-5	1.8	7
c	1895	3857	-2046	-152	6	-18	0.1	7
d	3941	13109	-334	1475	-5	-28	0.5	7

4.2.4.2.13. Soporte 10b

Tabla 4.57. Cordones de soldadura, soporte 10b.

	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)	Cordón calculado (mm)	Cordón seleccionado (mm)
a	1659	-1953	3701	-988	-690	7	0.9	7
b	4177	-4720	13354	-946	-1730	-6	1.9	7
c	1659	3701	-1953	-194	7	-15	0.1	7
d	4177	13354	-427	1518	-6	-31	0.5	7

4.2.4.2.14. Soporte 11

Tabla 4.58. Cordones de soldadura, soporte 11.

	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)	Cordón calculado (mm)	Cordón seleccionado (mm)
a	3229	-632	6561	-400	-1338	1	1.3	7
b	3207	-1664	9203	-391	1330	-1	1.4	7
c	3229	6561	-632	-143	1	-25	0.1	7
d	3207	9203	636	578	-1	2634	0.8	7

4.2.4.2.15. Soporte 11a

Tabla 4.59. Cordones de soldadura, soporte 11a.

	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)	Cordón calculado (mm)	Cordón seleccionado (mm)
a	3198	-814	5689	-359	-1367	1	1.3	7
b	3198	-1481	9920	-407	-1367	-1	1.4	7
c	3198	5689	-814	-7	1	15	0.1	7
d	3198	9920	818	467	-1	15	0.2	7

4.2.4.2.16. Soporte 12

Tabla 4.60. Cordones de soldadura, soporte 12.

	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)	Cordón calculado (mm)	Cordón seleccionado (mm)
a	6054	-16187	2664	-5546	-2509	19	3.7	7
b	5583	-20004	16939	-5629	-2314	-20	3.8	7
c	6054	2664	-16187	1036	19	-47	0.5	7
d	5583	16939	-3474	4606	-20	-44	1.4	7

4.2.4.2.17. Soporte 13

Tabla 4.61. Cordones de soldadura, soporte 13.

	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)	Cordón calculado (mm)	Cordón seleccionado (mm)
a	-6957	-17272	11939	-8245	2701	-144	4.8	8
b	-4684	-18918	8416	-5522	1818	151	3.2	8
c	-6957	11939	-17272	-1660	-144	49	0.8	8
d	-4684	8416	-18918	1690	151	33	0.9	8

4.2.4.2.18. Soporte 14

Tabla 4.62. Cordones de soldadura, soporte 14.

	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)	Cordón calculado (mm)	Cordón seleccionado (mm)
a	5707	-2673	12144	-1482	-2364	6	2.6	7
b	5707	-7473	17272	-1363	-2364	-6	2.6	7
c	5707	12144	-2673	-395	6	-43	0.2	7
d	5707	17272	-7473	1676	-6	-43	0.6	7

4.2.4.2.19. Soporte 15

Tabla 4.63. Cordones de soldadura, soporte 15.

	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)	Cordón calculado (mm)	Cordón seleccionado (mm)
a	2807	-1886	3100	-1733	-4027	1	4.0	7
b	2807	-2705	13558	-2086	-4027	-1	4.2	7
c	2807	3100	-1886	951	1	-33	0.3	7
d	2807	13558	-2705	1763	-1	-33	0.6	7

4.2.4.2.20. Soporte 16

Tabla 4.64. Cordones de soldadura, soporte 16.

	FX (N)	FY (N)	FZ (N)	MX (Nm)	MY (Nm)	MZ (Nm)	Cordón calculado (mm)	Cordón seleccionado (mm)
a	3225	-925	4146	-657	-3318	0	4.7	7
b	3212	-1370	11712	-797	-3301	-1	4.9	7
c	3225	4146	-925	283	0	-39	0.2	7
d	3212	11712	930	830	-1	-36	0.4	7

4.2.4.3. Pernos.

Para el cálculo de los pernos se ha calculado la fuerza cortante y la fuerza a tracción en cada perno a partir de las fuerzas de reacción en los soportes, luego se ha definido el perno crítico y en este se ha calculado el esfuerzo equivalente que se lo ha comparado con la resistencia del perno. El factor de seguridad para todos los pernos está sobre 3. El esfuerzo equivalente se lo ha calculado mediante la teoría del esfuerzo cortante máximo con la siguiente fórmula:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma + 4\tau}$$

Ec. 4.6

Los pernos empleados son de designación ASTM A325 tipo 1 que tienen una resistencia de fluencia mínima a la tensión de 634 MPa para los pernos de 1/2 a 1 pulgada, y de 558 MPa para los pernos de 1 1/8 a 1 1/2 pulgadas.

La numeración de los pernos se refiere a la distribución indicada en la figura, para cada uno de los soportes.

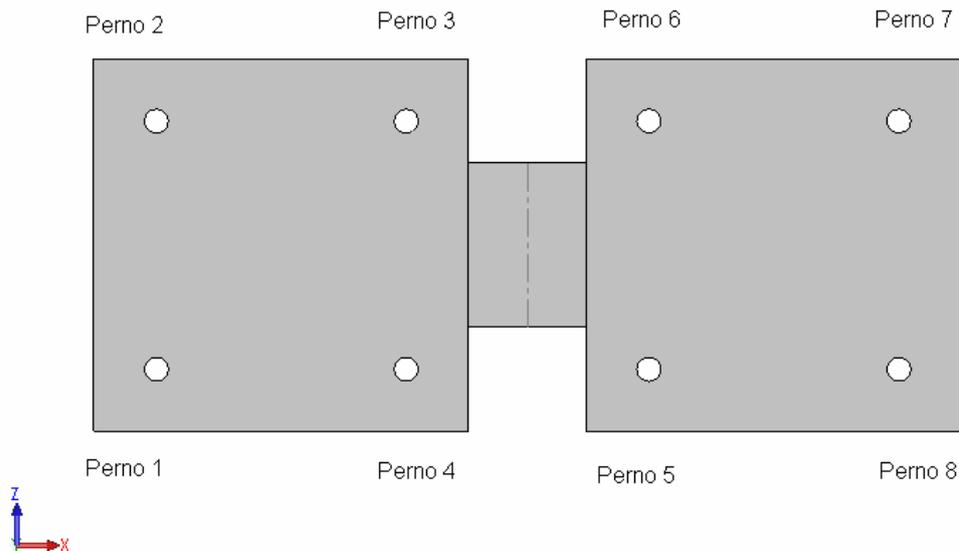


Figura 4.33. Distribución de pernos en los soportes.

4.2.4.3.1. Soporte 1

Tabla 4.65. Fuerzas en los pernos, soporte 1.

Perno N°	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fxz (N)
1	13781	122513	13073	18994
2	5970	122513	-3025	6690
3	12855	122513	13402	18571
4	5556	122513	-556	5583
5	14030	122513	13273	19314
6	6748	122513	-525	6770
7	16507	122513	15075	22357
8	8692	122513	-5071	10062

Tabla 4.66. Esfuerzos en el perno crítico, soporte 1.

Perno Crítico	Diámetro (pulg)	Área tensión (mm ²)	Área mínima (mm ²)	σ (kPa)	τ (kPa)	σ_{eq} (kPa)
7	1 1/2	1020	981	120113	22780	128463

4.2.4.3.2. Soporte 2

Tabla 4.67. Fuerzas en los pernos, soporte 2.

Perno N°	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fxz (N)
1	15805	170456	14688	21574
2	7989	170456	-4586	9212
3	14168	170456	14030	19937
4	6846	170456	-1241	6957
5	12072	170456	12188	17157
6	4782	170456	547	4813
7	15208	170456	15137	21458
8	7384	170456	-5040	8941

Tabla 4.68. Esfuerzos en el perno crítico, soporte 2.

Perno Crítico	Diámetro (pulg)	Área tensión (mm ²)	Área mínima (mm ²)	σ (kPa)	τ (kPa)	σ_{eq} (kPa)
1	1 1/2	1020	981	167115	21987	172803

4.2.4.3.3. Soporte 3

Tabla 4.69. Fuerzas en los pernos, soporte 3.

Perno N°	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fxz (N)
1	730	39990	1045	1277
2	-520	39990	520	734
3	876	39990	1632	1855
4	-267	39990	565	623
5	3456	39990	2989	4568
6	1819	39990	-13	1819
7	3772	39990	3029	4840
8	2028	39990	-694	2144

Tabla 4.70. Esfuerzos en el perno crítico, soporte 3.

Perno Crítico	Diámetro (pulg)	Área tensión (mm ²)	Área mínima (mm ²)	σ (kPa)	τ (kPa)	σ_{eq} (kPa)
7	1	428	403	93493	11997	96520

4.2.4.3.4. Soporte 3b

Tabla 4.71. Fuerzas en los pernos, soporte 3b.

Perno N°	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fxz (N)
1	-609	61973	-1134	1286
2	1081	61973	-774	1330
3	-734	61973	-2028	2157
4	738	61973	-1036	1272
5	-5583	61973	-4800	7362
6	-3083	61973	62	3083
7	-6143	61973	-4737	7758
8	-3403	61973	1241	3621

Tabla 4.72. Esfuerzos en el perno crítico, soporte 3b.

Perno Crítico	Diámetro (pulg)	Área tensión (mm ²)	Área mínima (mm ²)	σ (kPa)	τ (kPa)	σ_{eq} (kPa)
7	1	428	403	144886	19236	149906

4.2.4.3.5. Soporte 4

Tabla 4.73. Fuerzas en los pernos, soporte 4.

Perno N°	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fxz (N)
1	-3585	43121	-1112	3754
2	-6695	43121	1788	6930
3	-4359	43121	5009	6641
4	-5013	43121	6904	8532
5	11481	43121	12224	16770
6	9292	43121	5698	10898
7	13509	43121	5382	14541
8	672	43121	-191	698

Tabla 4.74. Esfuerzos en el perno crítico, soporte 4.

Perno Crítico	Diámetro (pulg)	Área tensión (mm ²)	Área mínima (mm ²)	σ (kPa)	τ (kPa)	σ_{eq} (kPa)
5	1	428	403	100808	41589	130697

4.2.4.3.6. Soporte 5

Tabla 4.75. Fuerzas en los pernos, soporte 5.

Perno N°	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fxz (N)
1	-2811	39976	-783	2918
2	-5809	39976	1784	6076
3	-3594	39976	5115	6250
4	-4226	39976	8656	9635
5	10542	39976	12095	16045
6	8656	39976	5387	10195
7	12566	39976	5658	13781
8	7833	39976	-2584	8247

Tabla 4.76. Esfuerzos en el perno crítico, soporte 5.

Perno Crítico	Diámetro (pulg)	Área tensión (mm ²)	Área mínima (mm ²)	σ (kPa)	τ (kPa)	σ_{eq} (kPa)
5	1	428	403	93458	39790	122747

4.2.4.3.7. Soporte 6

Tabla 4.77. Fuerzas en los pernos, soporte 6

Perno N°	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fxz (N)
1	222	2753	245	329
2	-13	2753	44	44
3	334	2753	476	583
4	89	2753	9	89
5	756	2753	618	979
6	512	2753	-89	520
7	930	2753	698	1161
8	694	2753	-400	801

Tabla 4.78. Esfuerzos en el perno crítico, soporte 6.

Perno Crítico	Diámetro (pulg)	Área tensión (mm ²)	Área mínima (mm ²)	σ (kPa)	τ (kPa)	σ_{eq} (kPa)
7	3/4	241	226	11445	5137	15375

4.2.4.3.8. Soporte 6b

Tabla 4.79. Fuerzas en los pernos, soporte 6b.

Perno N°	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fxz (N)
1	147	6147	374	400
2	-556	6147	574	801
3	347	6147	925	988
4	-356	6147	574	676
5	1321	6147	1188	1775
6	618	6147	311	694
7	1584	6147	1214	1997
8	881	6147	-311	934

Tabla 4.80. Esfuerzos en el perno crítico, soporte 6b.

Perno Crítico	Diámetro (pulg)	Área tensión (mm ²)	Área mínima (mm ²)	σ (kPa)	τ (kPa)	σ_{eq} (kPa)
7	3/4	241	226	25545	8811	31033

4.2.4.3.9. Soporte 7

Tabla 4.81. Fuerzas en los pernos, soporte 7.

Perno N°	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fxz (N)
1	-649	10952	489	814
2	-2322	10952	956	2513
3	-632	10952	3252	3314
4	-1592	10952	2700	3136
5	6001	10952	4364	7420
6	5413	10952	-53	5413
7	6570	10952	2998	7224
8	5400	10952	-2131	5805

Tabla 4.82. Esfuerzos en el perno crítico, soporte 7.

Perno Crítico	Diámetro (pulg)	Área tensión (mm ²)	Área mínima (mm ²)	σ (kPa)	τ (kPa)	σ_{eq} (kPa)
5	1	428	403	25600	18402	44830

4.2.4.3.10. Soporte 8

Tabla 4.83. Fuerzas en los pernos, soporte 8.

Perno N°	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fxz (N)
1	-267	10613	672	721
2	-1935	10613	939	2148
3	-218	10613	3296	3305
4	-1259	10613	2567	2860
5	-5636	10613	4132	6988
6	5009	10613	-4	5009
7	6183	10613	2931	6841
8	5044	10613	-1966	5413

Tabla 4.84. Esfuerzos en el perno crítico, soporte 8.

Perno Crítico	Diámetro (pulg)	Área tensión (mm ²)	Área mínima (mm ²)	σ (kPa)	τ (kPa)	σ_{eq} (kPa)
5	1	428	403	24814	17333	42630

4.2.4.3.11. Soporte 9

Tabla 4.85. Fuerzas en los pernos, soporte 9.

Perno N°	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fxz (N)
1	-222	10538	685	721
2	-1886	10538	930	2104
3	-173	10538	3278	3283
4	-1205	10538	2522	2793
5	5596	10538	4137	6957
6	4960	10538	22	4960
7	6139	10538	2927	6801
8	4986	10538	1926	5347

Tabla 4.86. Esfuerzos en el perno crítico, soporte 9.

Perno Crítico	Diámetro (pulg)	Área tensión (mm ²)	Área mínima (mm ²)	σ (kPa)	τ (kPa)	σ_{eq} (kPa)
5	1	428	403	24635	17258	42410

4.2.4.3.12. Soporte 10

Tabla 4.87. Fuerzas en los pernos, soporte 10.

Perno N°	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fxz (N)
1	431	10111	436	614
2	-93	10111	62	111
3	520	10111	1010	1134
4	4	10111	360	360
5	1873	10111	1948	2705
6	756	10111	827	1121
7	2148	10111	1552	2651
8	1036	10111	-360	1099

Tabla 4.88. Esfuerzos en el perno crítico, soporte 10.

Perno Crítico	Diámetro (pulg)	Área tensión (mm ²)	Área mínima (mm ²)	σ (kPa)	τ (kPa)	σ_{eq} (kPa)
5	3/4	241	226	42017	11935	48318

4.2.4.3.13. Soporte 10a

Tabla 4.89. Fuerzas en los pernos, soporte 10a.

Perno N°	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fxz (N)
1	689	10253	578	899
2	178	10253	-62	187
3	770	10253	1090	1334
4	258	10253	218	338
5	1601	10253	1855	2451
6	480	10253	907	1028
7	1908	10253	1521	2442
8	783	10253	-267	827

Tabla 4.90. Esfuerzos en el perno crítico, soporte 10a.

Perno Crítico	Diámetro (pulg)	Área tensión (mm ²)	Área mínima (mm ²)	σ (kPa)	τ (kPa)	σ_{eq} (kPa)
5	3/4	241	226	42017	11935	48318

4.2.4.3.14. Soporte 10b

Tabla 4.91. Fuerzas en los pernos, soporte 10b.

Perno N°	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fxz (N)
1	645	10996	538	841
2	196	10996	-102	222
3	712	10996	1005	1232
4	271	10996	147	307
5	1655	10996	1939	2549
6	458	10996	992	1094
7	1957	10996	1552	2500
8	765	10996	-240	801

Tabla 4.92. Esfuerzos en el perno crítico, soporte 10b.

Perno Crítico	Diámetro (pulg)	Área tensión (mm ²)	Área mínima (mm ²)	σ (kPa)	τ (kPa)	σ_{eq} (kPa)
5	3/4	241	226	45692	11259	50938

4.2.4.3.15. Soporte 11

Tabla 4.93. Fuerzas en los pernos, soporte 11.

Perno N°	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fxz (N)
1	1673	16027	1628	2335
2	-1165	16027	1588	1971
3	2313	16027	2104	3127
4	-525	16027	1112	1228

Tabla 4.94. Esfuerzos en el perno crítico, soporte 11.

Perno Crítico	Diámetro (pulg)	Área tensión (mm ²)	Área mínima (mm ²)	σ (kPa)	τ (kPa)	σ_{eq} (kPa)
3	3/4	241	226	66603	13810	72098

4.2.4.3.16. Soporte 11a

Tabla 4.95. Fuerzas en los pernos, soporte 11a.

Perno N°	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fxz (N)
1	1579	15840	1673	2300
2	-921	15840	1544	1797
3	2077	15840	2086	2945
4	-431	15840	1134	1214

Tabla 4.96. Esfuerzos en el perno crítico, soporte 11a.

Perno Crítico	Diámetro (pulg)	Área tensión (mm ²)	Área mínima (mm ²)	σ (kPa)	τ (kPa)	σ_{eq} (kPa)
3	3/4	241	226	65824	13004	70775

4.2.4.3.17. Soporte 12

Tabla 4.97. Fuerzas en los pernos, soporte 12.

Perno N°	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fxz (N)
1	4897	29082	3643	6103
2	3269	29082	-1948	3808
3	4964	29082	4942	7006
4	3350	29082	-854	3456
5	5560	29082	5058	7517
6	3923	29082	921	4030
7	5934	29082	4364	7366
8	4284	29082	-2647	5035

Tabla 4.98. Esfuerzos en el perno crítico, soporte 12.

Perno Crítico	Diámetro (pulg)	Área tensión (mm ²)	Área mínima (mm ²)	σ (kPa)	τ (kPa)	σ_{eq} (kPa)
5	3/4	241	226	120851	33191	137881

4.2.4.3.18. Soporte 13

Tabla 4.99. Fuerzas en los pernos, soporte 13.

Perno N°	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fxz (N)
1	3608	18376	1748	4008
2	4484	18376	-2602	5182
3	3883	18376	609	3932
4	4404	18376	-4026	5965
5	4377	18376	-512	4408
6	5369	18376	-5138	7433
7	4261	18376	1673	4577
8	5805	18376	-3398	6726

Tabla 4.100. Esfuerzos en el perno crítico, soporte 13.

Perno Crítico	Diámetro (pulg)	Área tensión (mm ²)	Área mínima (mm ²)	σ (kPa)	τ (kPa)	σ_{eq} (kPa)
5	3/4	241	226	76359	32819	100691

4.2.4.3.19. Soporte 14

Tabla 4.101. Fuerzas en los pernos, soporte 14.

Perno N°	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fxz (N)
1	1214	14799	1214	1717
2	-396	14799	534	663
3	1450	14799	2664	3034
4	-142	14799	1290	1299
5	2598	14799	2785	3808
6	996	14799	1170	1535
7	3020	14799	2277	3781
8	1410	14799	-520	1503

Tabla 4.102. Esfuerzos en el perno crítico, soporte 14.

Perno Crítico	Diámetro (pulg)	Área tensión (mm ²)	Área mínima (mm ²)	σ (kPa)	τ (kPa)	σ_{eq} (kPa)
5	3/4	241	226	61501	16816	70092

4.2.4.3.20. Soporte 15

Tabla 4.103. Fuerzas en los pernos, soporte 15.

Perno N°	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fxz (N)
1	1219	25319	1174	1690
2	-356	25319	156	387
3	1263	25319	1330	1833
4	-316	25319	142	347
5	1343	25319	1272	1850
6	-245	25319	214	325
7	1650	25319	1624	2313
8	58	25319	-302	307

Tabla 4.104. Esfuerzos en el perno crítico, soporte 15.

Perno Crítico	Diámetro (pulg)	Área tensión (mm ²)	Área mínima (mm ²)	σ (kPa)	τ (kPa)	σ_{eq} (kPa)
7	3/4	241	226	105214	10225	107186

4.2.4.3.21. Soporte 16

Tabla 4.105. Fuerzas en los pernos, soporte 16.

Perno N°	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)	Fxz (N)
1	1877	39976	1788	2593
2	-1090	39976	1428	1797
3	2242	39976	2153	3109
4	-730	39976	1068	1294

Tabla 4.106. Esfuerzos en el perno crítico, soporte 16.

Perno Crítico	Diámetro (pulg)	Área tensión (mm ²)	Área mínima (mm ²)	σ (kPa)	τ (kPa)	σ_{eq} (kPa)
3	3/4	241	226	166122	13727	168377

4.2.5. SOLDADURA

La soldadura de la tubería cumple con los requerimientos de ASME B31.3 Tuberías de Proceso (Process Piping) la que considera lo siguiente:

Los materiales a ser soldados deben ser del mismo número P, conforme son enlistados en el ASME Sección IX Artículo IV Datos de Soldadura (Welding Data). El material a ser utilizado en la tubería considerando tramos rectos, codos y reducciones o ampliaciones es SA-106-B, y el material de las bridas es SA-105, siendo el número P igual a 1 para estos materiales.

El párrafo 328.4 Preparación de la Soldadura (Preparation for Welding), establece que:

- Las superficies internas y externas a ser soldada debe estar libres de pintura, aceites, corrosión y otros materiales que puedan ser perjudiciales para la soldadura.
- La preparación de la junta se la realiza conforme a ASME B16.25 Finales de las Soldaduras a Tope (Buttwelding Ends).

El proceso de soldadura seleccionado es una combinación de dos tipos de soldadura: para el cordón de raíz se utiliza GTAW, soldadura de arco con electrodo de tungsteno y gas de protección (conocido también como TIG) que tiene una alta calidad de soldadura y para el cordón de relleno SMAW, soldadura con arco con electrodo revestido.

Para este proceso de soldadura, según ASME B16.25, para espesores entre 3mm y 10 mm se realiza la preparación de la junta conforme al siguiente diagrama:

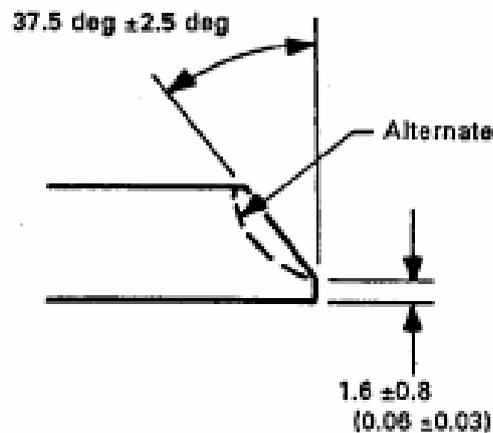


Figura 3.34. Preparación de la junta para tuberías

4.3. CONSIDERACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN.

La disposición de la tubería se desarrollo de acuerdo a la ubicación de las esferas y los equipos necesarios, en un terreno horizontal que tiene un cambio de nivel para la sala de bombas que se encuentra mas abajo con respecto al resto de la planta.

Para el montaje mecánico del sistema de tuberías se debe tener listo la obra civil la cual consiste en tener una superficie apta y que brinde las facilidades para el montaje, además de los cimientos en donde serán fijados primero los soportes y luego la tubería.

Para la construcción de este sistema se considerara la necesidad de fuentes de electricidad ya que parte de la soldadura se la realiza en el montaje en el campo. Parte de esta tubería es ensamblada o armada en el taller para luego se trasladada y montada en el lugar fijo donde va a operar.

De igual manera se debe disponer de la cantidad suficiente de agua principalmente para el desarrollo de la prueba hidrostática.

El diseño, fabricación, ensamblaje, pruebas e inspecciones del sistema de tuberías será adecuado para la presión y temperatura de trabajo esperadas y para los máximos esfuerzos combinados debido a presiones, dilataciones u otras semejantes en las condiciones normales o transitorias de puesta en marcha y/o situaciones anormales de emergencia. Todas las tuberías serán soldadas a tope.

Las superficies a ser soldadas deben estar limpias y libres de grasa, óxido, pintura, y suciedades de cualquier tipo. Un método adecuado de limpieza química o mecánica debe ser usado si es necesario para proveer una superficie para soldadura limpia.

Una vez que la soldadura esté lista se deben realizar procedimientos de inspección para garantizar la integridad de la misma. Estos procedimientos deben estar de acuerdo a la norma B31.3 entre los que se encuentran procedimientos visuales, magnéticos, de líquidos penetrantes, de radiografiado o ultrasónicos.

La prueba hidrostática se la realiza para verificación contra fugas. Se debe emplear una bomba para agua que alcance la presión de prueba hidrostática y se debe dejar que el aire salga completamente de la tubería luego de lo cual se la aísla para alcanzar la presión necesaria.

Uno de los pasos después del montaje de la tubería, es considerar el tipo de pintura con la cual será cubierta la tubería como protección de la corrosión, radiación solar.

Los accesorios como válvulas, filtro, válvulas reductoras, bombas entre otros deberán tener las protecciones necesarias para proteger estos equipos, tanto en el almacenaje como hasta el montaje y operación del sistema.

Se debe proveer de una bodega provisional de almacenamiento para los diferentes materiales, equipos y accesorios que necesiten protección contra el medio ambiente. Así mismo se debe disponer de instalaciones que alberguen las máquinas para las diferentes operaciones en campo.

CAPÍTULO 5

ESPECIFICACIÓN DE EQUIPOS

5.1. COMPRESORES

Los compresores están incluidos en la unidad de relicuefacción, ya que es un sistema conjunto en el que viene incorporado diferentes subsistemas.

5.2. BOMBAS

Las bombas son seleccionadas de acuerdo con los requerimientos de la norma NFPA 58 en donde se establece la presión de diseño mínima de estos equipos y especificaciones de algunos materiales. Estas bombas deben ser designadas para servicio de GLP.

Existen dos grupos de bombas en la planta: bombas de despacho de GLP y bombas de descarga Bullet-Slop. En los dos casos existen bombas de respaldo en stand by.

Para la selección de las bombas se requiere el cálculo hidráulico, de donde se obtienen las pérdidas en la tubería tanto en la succión como en la descarga de las bombas. Las pérdidas en la tubería de succión de las bombas ya han sido calculadas para el dimensionamiento de las tuberías, por lo que en esta sección se ha añadido el cálculo de las pérdidas en la tubería de descarga.

Consideraciones:

La línea de succión asegura un valor de cabeza de succión positiva neta adecuado. Se consideró además que el fluido puede tener impurezas por lo que se instalará un filtro en la línea de succión manteniendo los sólidos fuera de la bomba. El flujo se controla con una válvula instalada en la misma línea,

cerca de la bomba, ubicándose de forma horizontal para evitar burbujas o bolsas de aire. Se han utilizado reducciones excéntricas por la misma razón.

La línea de descarga considera las pérdidas de presión desde la descarga de la bomba hasta el punto de entrega. Esta línea tiene una válvula cerca de la bomba que permite dar servicio o aislarla conjuntamente con la válvula de la succión. Adicionalmente se asegura la dirección del flujo con una válvula check la cual no permite que se el flujo ingrese a la bomba cuando no esté en operación.

Para estas líneas se escogió una velocidad y pérdidas permisibles en el cálculo de dimensionamiento.

5.2.1. BOMBAS DE DESPACHO DE GLP.

Estas bombas sirven para el despacho de GLP de las esferas y el transvase que se puede realizar de una esfera a otra. Para el cálculo de la cabeza de presión necesaria para la bomba se han considerado los siguientes accesorios que han definido el coeficiente de resistencia k:

Tabla 5.1. Coeficientes de resistencia, bombas despacho de GLP

Cant.	Diámet.	Descripción	f_T	Le/D	K
2	10"	Codo de 90° radio largo	0.014	20	0.56
3	10"	Te	0.014	33.3	1.40
14	10"	Brida	0.014	0	0.00
14	10"	Empaque	0.014	0	0.00
1	10"	Válvula check	0.014	100	1.40
4	10"	Válvula globo	0.014	340	19.04
1	10"	Filtro	0.014	340	4.76
k total:					27.16

En esta línea se han considerado una te con flujo con cambio de dirección y dos tes con flujo sin cambio de dirección.

La sala de bombas ha sido reubicada dado que en un principio la cabeza de succión positiva neta disponible era demasiado baja haciendo que se vaporice el GLP a la entrada de las bombas. Para solucionar esto, se tomaron dos

acciones. La primera fue incrementar la diferencia de altura entre las esferas y las bombas, colocándolas en una depresión. La segunda fue colocar dos bombas en serie, de las cuales la primera bomba tiene una cabeza de presión menor para que la cabeza de succión positiva neta requerida por la bomba también disminuya. Considerándose que necesitamos otro par de bombas en stand by el número de estas bombas son de cuatro.

Pérdidas en la línea de descarga de la bomba de despacho:

$$Q_o := 0.1104078 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad \text{Caudal de despacho (2500 bph)}$$

Número de Reynolds

$$Nr := 2.312 \times 10^6 \quad \text{Número de Reynolds}$$

Flujo Turbulento

Factor de fricción

$$f := 0.014$$

Pérdidas con longitud real y accesorios:

Tramo considerado desde la descarga de la bomba hasta el punto de entrega.

$$L := 49.513\text{m} \quad \text{Longitud real.}$$

$$v := 2.170 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{Velocidad promedio del flujo}$$

$$D := 10.02 \text{ in}$$

$$D = 0.255 \text{ m} \quad \text{Diámetro interno}$$

$$\rho := 514.91 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Densidad del fluido}$$

$$k := 27.16 \quad \text{Coeficiente de resistencia}$$

Ecuación de Darcy

$$h_l := \left(k + f \cdot \frac{L}{D} \right) \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

$$h_l = 7.175 \text{ m}$$

$$P_l := h_l \cdot g \cdot \rho$$

Pérdidas en Pa para la línea de descarga de las bombas de despacho.

$$P_l = 3.623 \times 10^4 \text{ Pa}$$

Selección de la bomba:

No existe cambio de velocidades.

$$P_1 := 6.211 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Presión en la esfera (Presión de vapor del GLP a 70 °F)

$$P_2 := 1.517 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

Presión de despacho de la planta

$$z_1 := .113 \text{ m}$$

Altura en la esfera respecto al despacho

$$z_2 := 0 \text{ m}$$

Altura en el despacho

$$h_l := 6.204 \text{ m} + 7.175 \text{ m}$$

Pérdidas en la tubería

$$h_a := h_l + (z_2 - z_1) + \frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g}$$

$$h_a = 190.688 \text{ m}$$

Cabeza total (625 ft)

Cabeza de succión positiva neta disponible:

$$h_{sp} := \frac{14.7 \text{ psi} + P_1}{\rho \cdot g}$$

$$h_{sp} = 143.073 \text{ m}$$

Cabeza de presión estática absoluta aplicada al GLP

$$h_s := 9 \text{ m}$$

Diferencia de elevación entre el GLP de la esfera y la succión.

$$h_f := 6.204 \text{ m}$$

Pérdidas por fricción en la tubería de succión.

$$h_{vp} := 143.04 \text{ m}$$

Presión de vapor del GLP a 70°F

$$NPSH_a := h_{sp} + h_s - h_f - h_{vp}$$

$$NPSH_a = 2.829 \text{ m}$$

Se seleccionan dos bombas en serie:

1- Para una cabeza de 200 ft y un caudal de 1750 gal/min con una NPSH requerida baja:

Marca GOULDS PUMPS,

Modelo 3700,

Tamaño: 10x12-21N,

Tamaño del impeler: 21 in.

RPM: 1190

Potencia requerida: 125 HP

NPSHr: 2.133 m.

Para un caudal de 1750 gal/min esta bomba produce una cabeza total de 200 ft.

2- Para una cabeza de 425 ft:

Marca GOULDS PUMPS,

Modelo 3700

Tamaño: 6x8-11,

Tamaño del impeler: 11.125 in.

RPM: 3570,

Potencia requerida: 260 HP.

Para un caudal de 1750 gal/min esta bomba produce una cabeza total de 480 ft.

Entre las 2 bombas producen una cabeza de presión de 680 ft a 1750 gal/min.

Cabeza de presión máxima a la descarga de las 2 bombas:

$$h_o := 200\text{ft} + 520\text{ft} + h_{vp} + \text{NPSH}_a$$

$$h_o = 365.325 \text{ m}$$

Cabeza total de la bomba con la geometría definitiva:

$L := 188.251\text{m}$ Longitud total desde la esfera más lejana hasta la descarga.

$v := 2.170 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ Velocidad promedio del Flujo

$D := 10.02 \text{ in}$ Diámetro interno

$\rho := 514.91 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ Densidad del Fluido

$k := 64.036$ Coeficiente de resistencia

Ecuación de Darcy

$$h_l := \left(k + f \cdot \frac{L}{D} \right) \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

$$h_l = 17.86 \text{ m}$$

Pérdidas en la tubería

$$P_1 = 6.211 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Presión en la esfera (Presión de vapor del
GLP a 70 °F)

$$P_2 = 1.517 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Presión de despacho de la planta

$$z_1 := .113 \text{ m}$$

Altura en la esfera respecto al despacho

$$z_2 := 0 \text{ m}$$

Altura en el despacho

$$h_l = 17.86 \text{ m}$$

$$h_a := h_l + (z_2 - z_1) + \frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g}$$

$$h_a = 195.169 \text{ m}$$

Cabeza total (640 ft)

Se ha verificado que las bombas seleccionadas son las adecuadas dado que pueden producir más de 640 ft a 1750 gal/min. (Anexo E)

Para la línea de descarga de este sistema se utiliza una válvula la cual permite el retorno del líquido en caso de que la línea de descarga se sobre presione, protegiendo así la bomba y la tubería de descarga.

5.2.2. BOMBAS DE DESCARGA BULLET-SLOP.

Estas bombas son necesarias para:

- Descarga del Tanque Bullet hacia el tanque Slop.
- Descarga del Slop, hacia una línea de descarga la cual puede ser a una isla de carga de auto tanques.

Para el cálculo de la cabeza de presión necesaria para la bomba se han considerado los siguientes accesorios que han definido el coeficiente de resistencia k:

Tabla 5.2. Coeficientes de resistencia, bombas descarga bullet – slop

Cant.	Diámt.	Descripción	ft	Lc/D	K
4	4"	Codo de 90° radio largo	0.017	20	1.36
2	4"	Te	0.017	40	1.36
7	4"	Brida	0.017	0	0
7	4"	Empaque	0.017	0	0
1	4"	Válvula check	0.017	100	1.7
2	4"	Válvula globo	0.017	340	11.56
1		Isla de carga			10
				k total:	25.98

En esta línea se han considerado una te con flujo con cambio de dirección y una te con flujo sin cambio de dirección.

BOMBAS DE DESPACHO PARA EL TANQUE SLOP

Pérdidas en la línea de descarga de la bomba de despacho para agua:

$$Q_o := 0.0189 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad \text{Caudal de despacho (300 gal/min)}$$

Número de Reynolds

$$Nr := 237929.2 \quad \text{Número de Reynolds}$$

Flujo Turbulento

Factor de fricción

$$f := 0.018$$

Pérdidas con longitud real y accesorios:

Tramo considerado desde la descarga de la bomba hasta el punto de entrega.

$$L := 53.821\text{m} \quad \text{Longitud real.}$$

$$v := 2.305 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \text{Velocidad promedio del Flujo}$$

$$D := 4.026\text{in} \quad \text{Diámetro interno}$$

$$D = 0.102 \text{ m}$$

$$\rho := 1000 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Densidad del Fluido

$$k := 25.98$$

Coefficiente de resistencia

Ecuación de Darcy

$$h_l := \left(k + f \cdot \frac{L}{D} \right) \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

$$h_l = 9.604 \text{ m}$$

$$P_l := h_l \cdot g \cdot \rho$$

Pérdidas en Pa para la línea de descarga de las bombas de despacho del tanque slop.

$$P_l = 9.418 \times 10^4 \text{ Pa}$$

Selección de la bomba:

$$P_1 := 0 \text{ Pa}$$

Presión en el tanque Slop

$$P_2 := 1.37895 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Presión en el despacho al autotanque.

Altura en la descarga del tanque Slop.

$$z_1 := 0 \text{ m}$$

Altura en el despacho al autotanque respecto a la descarga del Tanque Slop.

$$z_2 := 4 \text{ m}$$

$$h_l := 9.116 \text{ m} + 9.604 \text{ m}$$

$$h_a := h_l + (z_2 - z_1) + \frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g}$$

$$h_a = 36.781 \text{ m}$$

Cabeza total (120.6 ft)

Cabeza de succión positiva neta disponible:

Considerando el fluido más crítico para este cálculo: gasolina.

Se han aplicado las mismas pérdidas en la tubería que para el agua.

$$\rho := 625 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Densidad de la Gasolina tomada como Pentano a 70 °F (Chemical Handbook, Perry, Tabla 2-370)

$$P := 101325 \text{ Pa}$$

$$h_{sp} := \frac{P}{\rho \cdot g}$$

Presión estática absoluta aplicada a la gasolina

$$h_{sp} = 16.532 \text{ m}$$

Cabeza de presión estática absoluta aplicada a la gasolina

$$h_s := 7.625 \text{ m}$$

Diferencia de elevación entre el tanque slop y la succión.

$$h_f := 9.116 \text{ m}$$

Perdidas por fricción en la tubería de succión.

$$h_{vp} := 9 \text{ m}$$

Presión de vapor del Gasolina tomada del Pentano a 70c °F (API Recommended Practice 500 Fig D-1)

$$\text{NPSHa} := h_{sp} + h_s - h_f - h_{vp}$$

$$\text{NPSHa} = 6.041 \text{ m}$$

Bomba seleccionada:

Para una cabeza de 120 ft y un caudal de 300 gal/min:

Marca GOULDS PUMPS,

Modelo 3700,

Tamaño: 2x4-7,

Tamaño del impeler: 6.5 in.

RPM: 3540,

Potencia requerida: 17 HP

NPSHr: 3.657 m

Para un caudal de 300 gal/min esta bomba produce una cabeza total de 148 ft.

(Anexo E)

5.3. SISTEMA DE RELICUEFACCIÓN.

El sistema de relicuefacción sirve para mantener en los recipientes de almacenamiento la presión dentro de los límites de operación, esta unidad de relicuefacción transforma las fracciones de vapor en líquido para luego ser reingresado a las esferas.

El funcionamiento de la unidad de relicuefacción está dado en las siguientes condiciones:

Cuando existe un incremento en la temperatura ambiente ya que hace que aumente la presión en el tanque al aumentar la presión de vapor de la mezcla. Al ingresar GLP líquido, ya que va desplazando al GLP vapor que se encuentra ocupando espacio en la esfera, que no es evacuado por la unidad de relicuefacción, se irá comprimiendo y aumentando la presión progresivamente. Para relicuar los vapores de GLP existentes en el tanque bullet.

Las partes de la unidad de relicuefacción son:

- Compresión.- las fracciones de vapor ingresan a un compresor después de haber pasado por un separador de fases líquido-vapor, elevando su presión y temperatura.
- Enfriador.- este vapor sobrecalentado que entrega el compresor ingresa a un intercambiador de calor que lo enfría, haciendo que la mayor parte de este se condense, luego estas dos fases ingresan a un separador de fases líquido-vapor, del cual la fase vapor reingresa nuevamente al proceso de relicuefacción y la fase líquida ingresa nuevamente a la esfera.

La unidad de relicuefacción está formada por dos compresores en paralelo, un equipo está stand by, y un sistema de enfriamiento de aire forzado, la capacidad de relicuefacción de la unidad de relicuefacción es de 0.26498 m³/s (6000 bph), con una presión de 1241 kPa.

La marca seleccionada es Hamworthy KSE, el cual cumple con las necesidades bajo pedido las capacidades especificadas. (Anexo E)

5.4. SISTEMA DE VAPORIZACIÓN.

El vaporizador sirve para mantener la presión en el recipiente esférico al ser evacuado el GLP líquido, mediante la utilización de una pequeña cantidad de GLP líquido de la línea de descarga que se vaporiza y se lo vuelve a reingresar por la línea de vapor.

El funcionamiento del vaporizador esta dado en las siguientes condiciones:

- Al evacuar el GLP líquido de un recipiente, la presión baja y se la mantiene mediante el ingreso de vapor a la esfera.
- Al existir variaciones de temperatura dentro de los rangos normales, la presión puede caer, siendo necesario mantener la presión de vapor en el recipiente.

La capacidad de este sistema de vaporización es: 0.11041 m³/s (2500 bph) y una presión de 1400 kPa, la línea de entrada de GLP líquido de 4" y la línea de salida de vapor de 6".

El vaporizador seleccionado es: AQUA-GAS WB-H Serie 12500. (Anexo E)

5.5. SISTEMA DE MEDICIÓN.

El sistema de medición debe ser adecuado para GLP, esta formado por dos líneas paralelas las cuales constan de:

- Válvula globo.
- Válvula reductora de presión.
- Filtro.
- Medidor de flujo.
- Válvula globo.

Las válvulas globo sirven para aislar cada línea cuando necesite mantenimiento o cuando esté en stand by, y son seleccionadas de acuerdo a las siguientes características considerando la tabla 2.4.4.1, NFPA 58, que permite establecer las presiones para las que deben ser diseñadas:

Diámetro: 14"
Clase ANSI: 300 (Presión de diseño 2413 kPa)
Válvula bridada.
(Anexo E).

Las válvulas reductoras de presión son seleccionadas de acuerdo a las siguientes características:

Diámetro: 14"
Clase ANSI: 300 (Presión de diseño 2413 kPa)
Caudal: 0.26498 m³/s (6000 bph)
Rango de ajuste 206 a 2068 kPa (30 a 300 psi)
Válvula bridada.
(Anexo E)

Las válvulas reductoras fijan la presión de salida al valor deseado. Una vez fijada, esta presión de salida, se mantiene constante independientemente de las variaciones de caudal y de la presión de entrada. Asimismo, cuando el consumo es nulo, la válvula se cierra para mantener esa presión de salida regulada.

El filtro necesario para el sistema de reducción, es seleccionado de acuerdo a los siguientes requerimientos:

Diámetro: 14"
Clase ANSI: 300 (presión de diseño 2413 kPa)
Filtro bridado.
(Anexo E)

El medidor de flujo es seleccionado de acuerdo a los siguientes requerimientos:

Diámetro: 14"
Clase ANSI: 300 (Presión de diseño 2413 kPa)
Caudal: 0.26498 m³/s (4200 GPM)
Válvula Bridada.
(Anexo E).

En todo el sistema de tuberías se utiliza la misma marca de válvulas globo y filtros especificados en sistema de medición de acuerdo a cada requerimiento de cada línea de tubería.

CAPÍTULO 6

PRESUPUESTO REFERENCIAL

El objetivo de este capítulo es presentar un costo referencial de la parte mecánica del proyecto. Este costo es únicamente referencial ya que los precios pueden tener variaciones al momento de cerrar los contratos con los diferentes proveedores.

A continuación se presenta un listado de todos los rubros del proyecto general, en donde se señalan únicamente los costos de la parte mecánica que están dentro del alcance del proyecto, debido a políticas establecidas y razones de confidencialidad ya que no se han proporcionado datos que comprometan los intereses de la empresa como se ha indicado en la carta presentada a la facultad.

Tabla 6.1. Presupuesto referencial

OBRA MECÁNICA	USD
Esferas	52600000
Sistema de tuberías	3350000
Equipos	1900000

AMBIENTAL	
Estudio ambiental	

OBRA CIVIL	
Terreno	
Ingeniería	
Movimiento de tierras	
Cerramiento	
Edificaciones	
Bloque administrativo	
Servicios generales	
Talleres	
Sistema sanitario	
Agua potable	
Sistema contra incendio	
Obras civiles en esferas y tuberías	

SISTEMA CONTRA INCENDIO	
Ingeniería	
Red y aspersores	
Hidrantes	
Bombas	
Tomas de agua	
Reservorio	
Sistema de tubería	
Sistema control de fugas	
Instrumentación	

OBRAS ELÉCTRICAS	
Ingeniería	
Subestación eléctrica	
Generador de emergencia	
Caseta de control	
Instalación edificios	
Alumbrado	
Instalación planta	

SCADA	
Sistema de control	
Tableros de control	
Instalación	
Dirección	
Gastos varios	
Red	
Comunicaciones	

Total Obra Mecánica:	57850000
-----------------------------	-----------------

Los siguientes puntos exponen los rubros generales que se han considerado en cada uno de ellos.

6.1. ESFERAS

En términos generales los rubros considerado en la parte mecánica de las esferas son los siguientes:

- Ingeniería
- Planchas de acero
- Bridas y accesorios

- Válvulas
- Columnas y tensores
- Prefabricación de esferas
- Montaje de esferas
- Suelda
- Pintura
- Mano de obra
- Tratamiento térmico
- Ensayos no destructivos

6.2. SISTEMA DE TUBERÍAS

En términos generales los rubros considerado en la parte mecánica del sistema de tuberías son los siguientes:

- Ingeniería
- Tuberías y accesorios
- Suelda
- Pintura
- Ensayos no destructivos
- Mano de obra
- Soportería
- Válvulas
- Bombas
- Instalación bombas

6.3. EQUIPOS

En términos generales los rubros considerado en la parte mecánica de los equipos son los siguientes:

- Recipiente Bullet
- Recipiente Slop
- Sistema de relicuefacción

Sistema de vaporización

Sistema de medición

Válvulas y accesorios de conexión

CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

- En este proyecto se diseñaron las esferas de almacenamiento necesarias para 16000 toneladas métricas de gas licuado de petróleo y las líneas de transporte de fluidos necesarias en el proceso de almacenamiento de GLP.
- Las dimensiones aproximadas para el terreno necesario para las esferas de almacenamiento con el sistema de tuberías y equipos son de 80 m x 160 m.
- Se definieron las especificaciones para la selección de los equipos y accesorios empleados en la planta de almacenamiento de GLP, considerando las normas que rigen esta área del sector petrolero.
- Se estableció la distribución de planta (layout) de las esferas y las líneas de tuberías para el almacenamiento de GLP, de una manera ordenada que ayude a optimizar la tubería, los soportes y la operación de la planta.
- Se han elaborado los planos del diseño mecánico tanto de las esferas almacenamiento como de las líneas de tuberías, cumpliendo con diferentes normas como son la NFPA 58, ASME Sección VIII División 2, ASME B31.3 y otras normas a las que estas hacen referencia.
- Se han utilizado los programas computacionales Solidworks, Cosmosworks, Cosmosfloworks, Caesar II, Cadworx, Archon Weld Calculador.

- Para diseño de las esferas y de las tuberías se han considerado diversos casos de carga, y de los resultados se puede apreciar que frecuentemente el caso más crítico es el de carga sísmica.
- Los casos de carga de expansión térmica influyen significativamente en el diseño del sistema de tuberías ya que dependiendo de su configuración pueden causar esfuerzos demasiado altos para los requerimientos de la norma, por lo que se han hecho redistribuciones de los sistemas de tuberías.
- Con la realización del presente proyecto se ha demostrado que en el país existe la capacidad necesaria para realizar proyectos que en su gran mayoría son desarrollados en el exterior.

7.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un plan de integración que contemple las diferentes áreas de la ingeniería del proyecto como son la parte mecánica, civil, eléctrica, ambiental, control y automatización (SCADA), que ayude a la implementación del proyecto global.
- La utilización de las diferentes normas requieren conocimientos y criterios de ingeniería previos por lo que no deben ser empleadas como una fuente única para diseñar sino como una guía mínima.
- En los diseños en los que las fallas pueden producir perjuicios humanos, es necesario prestar mayor atención en cada uno de los aspectos del diseño. Para esto se puede hacer uso de las normas existentes que son aplicables a diferentes procesos y que tienen consideraciones específicas para cada uno de ellos.
- En sistemas de tuberías, especialmente en longitudes grandes, debe darse especial atención a la expansión térmica que puede afectar al

sistema. Para solucionarlo se puede hacer uso de las juntas de expansión o de una redistribución de la tubería.

- Gran parte de la información necesaria para el desarrollo de este proyecto se ha obtenido a partir de la observación de campo en plantas relacionadas en el área petrolera por lo que recomendamos la permanente vinculación de los estudiantes de la facultad con las empresas en las diferentes áreas.
- Los programas computacionales utilizados son empleados ampliamente en esta rama de la ingeniería mecánica por lo que debería considerarse incluirlos en las cátedras de la facultad.
- En vista al permanente desarrollo de la tecnología a nivel mundial, se recomienda la continua capacitación de los profesionales nacionales en el campo del diseño utilizando las diferentes herramientas computacionales que ayudan a ser más competitivos.

