

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



ESTUDIO Y REINGENIERÍA DE EQUIPOS Y DUCTOS PARA COCCIÓN DE AZÚCAR
EN VACÍO

Informe de Habilitación Profesional
presentado en conformidad a los requisitos
para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:
Sr. Jorge Fernández

SERGIO ERNESTO MATUS CONTRERAS
CONCEPCION-CHILE
2015

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas aquellas personas que me apoyaron directa e indirectamente en este largo camino pero en especial a mis dos hermanos, madre y pareja.

Agradecer a los docentes del Departamento de Ingeniería Mecánica de mi querida Universidad del Bío Bío quienes me guiaron durante largos años por la senda del conocimiento y en especial al Sr. Jorge Fernández por ayudarme a dar este último gran paso.

Mis más sinceros agradecimientos al Sr. Rubén Baeza Díaz perteneciente al equipo de IANSA S.A quien me brindo apoyo y motivación constante durante el desarrollo de este trabajo de habilitación profesional.

Hacer mención especial a mis compañeros y amigos Diego, Herno, Ricardo, Francisco, Felipe, Bernabé y José Luis quienes me brindaron su amistad y apoyo incondicional y aún siguen haciéndolo.

RESUMEN

El uso de ductos y recipientes sometidos a presión en la industria de elaboración de productos alimenticios es de suma importancia para poder llevar a cabo gran cantidad de procesos y transiciones entre los mismos. Para garantizar un seguro y continuo funcionamiento de los sistemas es necesario ser cuidadosos al momento de diseñar, construir y mantener los equipos y partes que los componen.

Existe un código creado por la ASME (American Society of Mechanical Engineers) que instruye a los ingenieros en el diseño, cálculo y construcción de calderas y recipientes sometidos a presión, y que establece los más altos estándares de calidad y seguridad con gran aceptación a nivel mundial.

El presente Proyecto de Título tiene por objetivo el mejoramiento en la confiabilidad y operatividad de un sistema de vacío, usado para cocción de azúcar en la planta de IANSA S.A Chillán, el cual ha presentado colapso en algunos de sus elementos constituyentes debido a las extremas condiciones de presión a las cuales es sometido de forma continua.

El primer paso para el desarrollo de este trabajo es conocer el sistema a evaluar, el proceso en que es usado y los equipos que lo componen para luego dar lugar al estudio y comprensión del Código ASME que pone a nuestra disposición varios procedimientos y criterios aptos para cumplir con el objetivo de este proyecto. Los procedimientos mencionados, que permiten obtener las presiones admisibles en ductos y equipos según su espesor de pared, son explicados paso a paso con el fin de permitir una mejor y más clara aplicabilidad de ellos.

En consideración de todo lo anteriormente mencionado se generan dos casos de cálculo, el primero para analizar la presiones admisibles y de operación alcanzables por el sistema en condiciones actuales y sin correr riesgo de falla y el segundo que corresponde al recálculo de espesores de los equipos y partes que componen el sistema para lograr operar a presión interna de 0,01 MPa absoluto o bien una presión externa de 0,09 MPa la cual se establece como ideal para este tipo de proceso.

Una vez obtenidos los resultados de los dos casos de cálculo se proponen dos opciones para lograr la operación del sistema bajo las condiciones deseadas, una de reparación de los elementos existentes, que se detalla y formula conforme a lo exigido por el código ASME, y otro caso que considera la instalación de un nuevo sistema el cual cumpliría con las dimensiones de diseño a partir de la misma herramienta (Código ASME).

Mediante el uso de software se analiza y respalda el apoyo que realmente proporcionan las mejoras propuestas para finalmente establecer un análisis económico simple que permite aclarar cuál es la mejor opción en estos términos.

INDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO 1. ANTECEDENTES GENERALES	1
1.1 ORIGEN DEL TEMA	1
1.2 JUSTIFICACIÓN DEL TEMA.....	2
1.2.1 Importancia del sistema de vacío en la producción de azúcar	2
1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO	2
1.3.1 Objetivo general	2
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
CAPITULO 2. LA EMPRESA	4
2.1 GENERAL.....	4
2.2 NEGOCIOS	4
CAPITULO 3. MARCO TEÓRICO	6
3.1 AZÚCAR Y SU PROCESO DE ELABORACIÓN.....	6
3.1.1 General	6
3.1.2 Origen de la materia prima.....	6
3.1.3 Proceso industrial	7
3.2 ORGANIZACIÓN INTERNA DE PROCESOS	10
3.2.1 Codificación de áreas y sub áreas	10
3.2.2 Producción de vacío	11
3.3 ASME (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS)	15
3.3.1 CÓDIGOS Y NORMAS	15
3.3.2 Boilers and pressure vessels code (BPVC)	16
3.4 METODOLOGÍAS DE CÁLCULO PARA ESPESORES Y PRESIONES ADMISIBLES EN CONDICIONES DE PRESIÓN EXTERNA	19

3.4.1	Cálculo de presión admisible en mantos de recipientes y ductos cilíndricos sometidos a presión externa	19
3.4.2	Cálculo de presión admisible en reducciones cónicas sometidas a presión externa	25
3.4.3	Cálculo de espesor requerido por tapas toriesféricas sometidas a presión externa	27
3.4.4	Cálculo de espesor requerido por tapas panas soldadas sometidas a presión externa..	29
3.4.5	Cálculo dimensional de anillos rigidizantes para mantos de recipientes o ductos sometidos a presión externa	31
3.4.6	Metodología de cálculo dimensional de ponchos de refuerzo para aperturas en mantos de recipientes sometidos a presión externa	36
CAPITULO 4. DESARROLLO DEL TEMA		39
4.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	39
4.2	ASPECTOS A CONSIDERAR.....	39
4.3	RESULTADOS ENTREGADOS POR CÓDIGO ASME	40
4.3.1	Presión admisible por el sistema con respecto a espesores mínimos	40
4.3.2	Espesores mínimos requeridos por elementos del sistema para operar a 0,01 MPa de presión absoluta	42
4.3.3	Propuesta de reparación del sistema de vacío	44
4.4	Efectos de elementos rigidizantes en equipos	51
4.4.1	Modelo	51
4.4.2	Simulación modelo sin anillos en condiciones de operación deseadas.....	52
4.4.3	Análisis estático recipiente sin anillos	53
4.4.4	Análisis de carga crítica de pandeo	55
4.4.5	Modelo con anillos	57
4.4.6	Simulación modelo con anillos en condiciones de operación deseadas.....	57
4.4.7	Evaluación económica.....	60
CAPITULO 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN		64

BIBLIOGRAFÍA	66
ANEXO A – Isométrico sistema de vacío y planos equipos.....	67
ANEXO B – Tabla de máximo esfuerzo admisible sección II Código ASME.....	72
ANEXO C – Figura y tabla G sección VIII Código ASME	77
ANEXO D – Tabla de eficiencia en juntas según tipo y nivel de inspección	80
ANEXO E – Dimensiones disponibles de materiales comerciales	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Recipiente afectado por condiciones de operación	1
Figura 2.1 Emplazamiento empresas Iansa S.A.....	4
Figura 3.1 Mantos o ductos cilíndricos con dimensiones a considerar.....	20
Figura 3.2 Carta para determinar el factor B de componentes de acero al carbono o de baja aleación bajo presión externa (esfuerzo de fluencia mínimo de 205 MPa y mayor).....	22
Figura 3.3 Diagrama de flujo para metodología de cálculo de presión admisible en mantos y ductos cilíndricos sometidos a presión externa.	24
Figura 3.4 Reducción cilíndrica con las dimensiones a considerar.	25
Figura 3.5 Tapa toriesférica con las dimensiones a considerar.....	28
Figura 3.6 Tapa plana con dimensiones a considerar.	30
Figura 3.7 Sección anillo - pared con dimensiones a considerar.	34
Figura 3.8 Diagrama de flujo para metodología de cálculo dimensional de anillos rigidizantes para mantos de recipientes o ductos sometidos a presión externa.	35
Figura 3.9 Poncho de refuerzo en apertura de manto de recipiente.	36
Figura 3.10 Cálculo de áreas disponibles en zona de unión de boquillas.....	37
Figura 4.1 Esquema de rigidización de columnas barométricas.....	46
Figura 4.2 Esquema simplificado rigidización separador de mieles A.....	47
Figura 4.3 Esquema simplificado rigidización separador de mieles BC	47
Figura 4.4 Métodos aceptables de instalación de anillos rigidizantes.	48
Figura 4.5 Exigencias de uniones soldadas para elementos rigidizantes.	48
Figura 4.6 Esquema simplificado de instalación de ponchos de refuerzo en entrada de vahos columnas barométricas.	49
Figura 4.7 Esquema simplificado de instalación de poncho de refuerzo en boquillas de separador de mieles A.....	49
Figura 4.8 Esquema simplificado de instalación de poncho de refuerzo en boquillas de separador de mieles A.....	50
Figura 4.9 Esquema simplificado de dimensiones requeridas por uniones soldadas de ponchos de refuerzo (Fuente: elaboración propia).	50
Figura 4.10 Modelo recipiente de prueba (Fuente: elaboración propia).	51
Figura 4.11 Discretización modelo recipiente de prueba (Fuente: elaboración propia).	52

Figura 4.12	Esfuerzo de Von Mises y factor de seguridad en recipiente de prueba.	53
Figura 4.13	Primer esfuerzo principal en recipiente de prueba.	53
Figura 4.14	Tercer esfuerzo principal recipiente de prueba.	54
Figura 4.15	Primer modo de falla en análisis de carga crítica de pandeo.	55
Figura 4.16	Segundo modo de falla en análisis de carga crítica de pandeo.	55
Figura 4.17	Tercer modo de falla en análisis de carga crítica de Pandeo.	56
Figura 4.18	Modelo recipiente de prueba con anillos rigidizantes.	57
Figura 4.19	Discretización recipiente de prueba con anillos rigidizantes.	58
Figura 4.20	Esfuerzo de Von Mises y factor de seguridad en recipiente de prueba.	58
Figura 4.21	Primer modo de falla carga crítica de pandeo recipiente con anillos rigidizantes.	59
Figura 4.22	Segundo modo de falla carga crítica de pandeo recipiente con anillos rigidizantes.	59
Figura 4.23	Tercer modo de falla carga crítica de pandeo recipiente con anillos rigidizantes.	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Codificación de Áreas	10
Tabla 3.2 Codificación de Sub-áreas.....	11
Tabla 3.3 Codificación de elementos del sistema de vacío.....	12
Tabla 3.4 Valores tabulados de Factor B.	22
Tabla 4.1 Resultados de presión admisible en mantos con espesores mínimos actuales.	40
Tabla 4.2 Resultados de presión admisible por cabezales y tapas de equipos con espesores mínimos actuales.	41
Tabla 4.3 Espesores mínimos requeridos por mantos para operar a 0,01MPa absoluto.	42
Tabla 4.4 Espesores mínimos requeridos por tapas de equipos para operar a 0,01 MPa Absoluto. .	43
Tabla 4.5 Propuesta de reparación para sistema de vacío.	44
Tabla 4.6 Costos estimados de reparación del sistema de vacío según propuesta de mejora.	62
Tabla 4.7 Costos estimados de instalación de elementos nuevos para el sistema de vacío.	62
Tabla 4.8 Comparación de proyectos con criterio de CAE.....	63

CAPITULO 1. ANTECEDENTES GENERALES

1.1 ORIGEN DEL TEMA

La línea de producción de la planta Chillán de empresas IANSA S.A posee un sistema generador de vacío, compuesto por una serie de recipientes y ductos que los comunican, el cual se encarga de reducir la presión y temperatura de cocción del azúcar. Gran parte del sistema data de la fecha de instalación de la planta (60-65 años), además se encuentra operando en un ambiente altamente corrosivo y bajo presiones de vacío, razones por las cuales se han producido fallas en los mantos y elementos constituyentes de algunos recipientes y ductos pertenecientes al mismo. Para solucionar los eventos mencionados se hace necesario detener repentinamente la línea de producción disminuyendo considerablemente la productividad de la planta

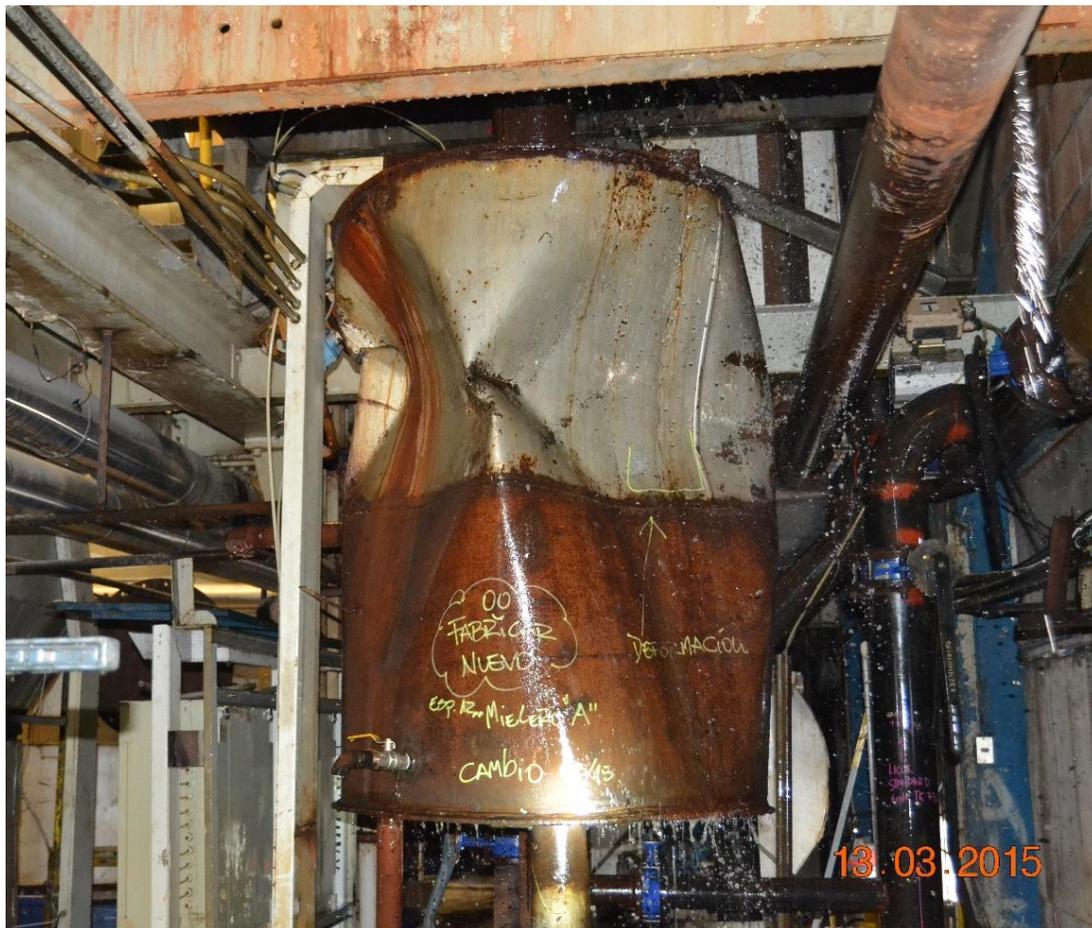


Figura 1.1 Recipiente afectado por condiciones de operación (Fuente: Fotografía en terreno).

1.2 JUSTIFICACIÓN DEL TEMA

El equipo de producción de IANSA S.A busca poder volver a operar su sistema de vacío a la presión ideal de 0,01 MPa absoluto (condición establecida por industria azucarera EBRO) para hacer su proceso más eficiente. Para esto se necesita tener la seguridad de que el sistema soportara las nuevas condiciones de operación por lo cual se hace necesario un recálculo dimensional de los equipos y elementos que lo constituyen. Para este fin se elige el código ASME debido a los altos estándares de seguridad e ingeniería ofrecidos por el mismo.

1.2.1 Importancia del sistema de vacío en la producción de azúcar

El proceso de cocción y cristalización del azúcar se lleva a cabo en una serie de recipientes denominados tachos de cocción los cuales están conectados al sistema generador de vacío. Este sistema cumple un rol fundamental en la producción del azúcar ya que permite disminuir la presión de trabajo de los tachos muy por debajo de la atmosférica logrando así reducir la temperatura de ebullición de la mezcla de agua y azúcar que contienen para finalmente obtener un producto con un color, consistencia y calidad apta para su comercialización y consumo. La caída de presión es producida por dos columnas barométricas apoyadas por una serie de bombas de vacío que además de eliminar los no condensables del sistema soportan en cierto grado la reducción de presión. De forma paralela al disminuir la temperatura en el proceso de cocción se logra generar una reducción considerable en la energía requerida, esto conlleva una disminución en el consumo de combustible traducido en una importante baja en los costos de producción.

1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.3.1 Objetivo general

Evaluar técnicamente las opciones que permitan una operación lo más continua y segura posible del sistema generador de vacío, parte fundamental del proceso productivo, mediante el mejoramiento del mismo usando el código ASME para tener como resultado final una mayor productividad en la planta.

1.3.2 Objetivos específicos

- i) Analizar el estado actual del sistema de vacío con respecto a espesores en los componentes más representativos de recipientes y ductos para establecer las presiones de trabajo admisibles.
- ii) Establecer los espesores mínimos de las partes principales de los equipos y ductos del sistema para operación a presión nominal de 0,01 MPa absoluto.
- iii) Establecer una propuesta de mejora del sistema que permita su operación, con total normalidad y sin dar lugar a eventuales fallas, a una presión nominal de 0,01 MPa absoluto.
- iv) Respalda los efectos de mejoramiento generados por la propuesta de reparación apoyado por software de ingeniería.
- v) Evaluar la mejor opción económicamente hablando para regularizar el funcionamiento del sistema generador de vacío.

CAPITULO 2. LA EMPRESA

2.1 GENERAL

Empresas Iansa S.A. es una de las principales compañías agroindustriales del país, con más de 60 años de historia y plantas a lo largo de todo el territorio nacional, reconocida por la producción, comercialización y distribución de azúcar y coproductos de la remolacha. La planta relacionada con este trabajo de habilitación profesional es la que se encuentra ubicada en la ciudad de Chillán, específicamente en la carretera Panamericana sur Km 385.



Figura 2.1 Emplazamiento empresas Iansa S.A (Fuente: Google Earth).

2.2 NEGOCIOS

Desde sus inicios, el negocio azucarero ha sido el eje central y ha representado parte importante de los ingresos de la empresa, es por esto que la compañía ha focalizado sus esfuerzos en consolidar la posición de liderazgo que siempre ha tenido y en desarrollar segmentos que buscan entregar valor agregado tanto a clientes industriales, como a consumidores finales.

Además de la elaboración propia, la empresa importa azúcar refinada desde distintos países de Sudamérica y Centroamérica para generar la estabilidad necesaria del negocio y el fortalecimiento de su posición de liderazgo en la industria.

Desde el 2012, la planta en cuestión cuenta con una línea que se dedica exclusivamente a la refinación de azúcar cruda, la que permite diversificar la matriz de abastecimiento y hacer más eficiente su operación.

Empresas Iansa mantiene un fuerte foco en el mercado de los endulzantes y ha logrado mantener una destacada participación de mercado en el segmento de los edulcorantes no calóricos representados por la marca “Cero K”. Asimismo, ha logrado una consolidada posición en los mercados de alimentos para nutrición animal y alimento para mascotas, siendo el principal productor de alimento para ganado y caballos en el país. La empresa ha logrado una destacada presencia en la comercialización de insumos agrícolas y financiamiento a agricultores remolacheros.

El compromiso con los clientes, consumidores y agricultores y el interés de cumplir con las altas exigencias que impone el mercado, sitúan a Empresas Iansa en su privilegiada posición actual.

CAPITULO 3. MARCO TEÓRICO

3.1 AZÚCAR Y SU PROCESO DE ELABORACIÓN

3.1.1 General

El azúcar es un endulzante de origen natural, sólido y constituido esencialmente por cristales sueltos de sacarosa obtenidos a partir de la caña de azúcar o de la remolacha azucarera mediante procesos industriales especializados. En nuestro país es producida solamente a partir de remolacha.

3.1.2 Origen de la materia prima

Todos los organismos vegetales de color verde sintetizan carbohidratos, este es el grupo alimenticio al que pertenece la sacarosa, comúnmente conocida como azúcar. La mayoría de las especies vegetales guarda los carbohidratos como almidón y muy pocas tienen la capacidad de almacenarlos como azúcar en altas concentraciones, entre estas excepciones se encuentra la remolacha azucarera la cual acumula en su raíz una cantidad de azúcar equivalente al 16% de su propio peso. Alrededor de un 30% del azúcar del mundo se produce a partir de remolacha azucarera y los principales productores son Brasil, India y EE.UU. En las regiones tropicales se obtiene azúcar a partir de la caña azucarera y en el hemisferio sur el único país que produce azúcar de remolacha es Chile.

La siembra de la remolacha en nuestro país se lleva a cabo durante el invierno. A lo largo de 6 meses la planta se desarrolla con ayuda de la luz solar, agua y el anhídrido carbónico del aire, factores que permiten sintetizar el azúcar en la raíz.

A principios de la estación otoñal, en el mes de abril, se inicia el proceso de cosecha cuya duración se prolonga por alrededor de 6 a 7 meses, periodo que corresponde prácticamente al doble del que tienen en otras regiones, esto gracias al clima invernal poco extremo de nuestro país. Luego de ser cosechada, la remolacha es transportada a las plantas productoras para así finalmente ser sometida a todos los procesos necesarios para obtener el producto final, azúcar.

3.1.3 Proceso industrial

La operación de la fábrica es una labor netamente automatizada que permite supervisar rigurosamente cada etapa del proceso desde una sala de control en la cual los ingenieros y técnicos operan moderno equipamiento computacional.

Luego de haber llegado la materia prima a la planta, se llevan a cabo una serie de procesos que dan paso al producto final. Estos son descritos a continuación:

a) Llegada y preparación de la materia prima

La llegada de la remolacha sucede gracias a un gran número de camiones que la transportan desde los campos de cosecha. Al momento de ingresar a la zona de descarga se toma una muestra aleatoria para comprobar la calidad de la misma mediante ensayos de laboratorio y así dar paso a la descarga del material por medio de un chorro de agua disparado con una gran presión. Luego de esto ya puesta la remolacha en la cancha de acopio, se deposita en una serie de canales de flotación que la transportan hasta una lavadora rotacional que elimina todo tipo de impurezas presentes. Con el proceso de lavado ya realizado se puede ingresar la materia prima a la línea de proceso industrial.

b) Proceso de corte

Es la primera etapa dentro de la fábrica. Se hace ingresar la remolacha mediante una correa transportadora a una máquina cortadora que produce tiras largas y delgadas que en su conjunto se denominan COSETA, en la cual está contenido el azúcar.

c) Extracción

Dado que la coqueta es bastante soluble, se utiliza agua caliente para extraer el azúcar desde sus células. Este proceso se desarrolla en las torres de difusión donde la coqueta y agua de extracción, calentada a 60°, fluyen a contracorriente.

El azúcar es disuelta en el agua dando origen así a una mezcla denominada JUGO CRUDO el cual tiene un contenido de azúcar del orden de 12 a 14% y posee un color gris dado que contiene varias sustancias solubles en agua como por ejemplo proteínas, sodio, potasio y otros compuestos nitrogenados.

El remanente de coseta sigue su propio camino como un subproducto del proceso y pasa a ser denominada COSETA AGOTADA ya que no es posible seguir obteniendo sacarosa desde ella.

d) Purificación

Este proceso se centra en la eliminación de materiales orgánicos e inorgánicos que no corresponden a azúcares. Se separa el azúcar de los no-azúcares mediante la adición de cal y anhídrido carbónico (CO₂) los cuales se retiran posteriormente mediante filtración y decantación. La cal reacciona con el CO₂ formando carbonato de calcio el que envuelve y precipita los elementos no deseados dejando así prácticamente solo azúcares en el jugo.

e) Filtrado

El jugo purificado se somete a un doble filtrado que le transfiere un aspecto amarillo y cristalino pasando así a llamarse JUGO CLARO. El carbonato de calcio atrapado en los filtros pasa a convertirse en un nuevo subproducto del proceso.

f) Evaporación

Dado que el azúcar a pesar de no tener impurezas está disuelto en agua, se necesita llevar a cabo un proceso de evaporación que permite un aumento en la concentración de la mezcla. Este proceso ocurre en varias etapas denominadas EFECTOS, los cuales corresponden a grandes recipientes que hierven la mezcla con el fin de evaporar la mayor cantidad de agua posible dando paso así a un líquido mucho más viscoso llamado JUGO DENSO.

Para evaporar los grandes volúmenes de agua se necesita una gran cantidad de energía por lo cual se hace necesaria la reutilización del calor del vapor producido en cada etapa para optimizar la posterior. El jugo denso alcanza una concentración de azúcar muy alta que puede variar entre 65 y 70%.

g) Cristalización

Este proceso se lleva a cabo en los tachos de cristalización y cocción y busca saturar la mezcla lo cual se logra mediante la evaporación del ya pobre contenido de agua presente en ella.

Con el objeto de evitar sobre coloración del producto debido al calentamiento se aplica el principio físico de la evaporación en vacío la cual permite concretar el proceso de eliminación de agua a una temperatura mucho menor de la que se necesitaría en condiciones de presión atmosférica produciéndose así también un gran ahorro de energía. Una vez hirviendo la mezcla, se comienza a dar paso a la saturación y la cristalización ocurre de forma espontánea dejando entrever pequeños cristales de azúcar fina que van aumentando de tamaño a medida que el proceso va avanzando. La formación de cristales también se puede inducir agregando azúcar fina a la mezcla no saturada. El producto del proceso de cristalización se denomina MASA COCIDA y consiste en una mezcla de granos de azúcar y un jarabe con extrema viscosidad de color dorado. El jarabe de alta densidad no cristalizado, llamado SIROPO y separado en un proceso posterior, se vuelve a procesar dos veces más obteniendo como producto cristales de azúcar de menor calidad y como subproducto la MELAZA (jugo sin contenido de azúcares).

Luego de terminar la evaporación en los tachos, el sirope es depositado en varias bateas horizontales dotadas de agitadores llamadas cristalizadores los cuales revuelven lentamente la mezcla para generar un crecimiento de grano homogéneo y más eficiente.

A medida que la temperatura de mezcla disminuye se hace evidente el crecimiento de grano de la misma obteniendo finalmente una masa con una concentración de por lo menos 45% de cristales en la mezcla.

h) Centrifugación

Luego de haber culminado su paso por los tachos de cocción y cristalización, la mezcla es depositada a una centrífuga en donde se procesa para eliminar finalmente todo contenido de agua. En una primera instancia se centrifuga la mezcla, para luego dentro del mismo equipo inyectar agua que permite un lavado de la misma para mejorar su color, finalmente se vuelve a centrifugar logrando así eliminar casi la totalidad del agua contenida.

i) Secado

El azúcar cristalizada proveniente de las centrífugas tiene una humedad de aproximadamente 1% por lo cual se hace circular por un gran tambor rotativo alimentado con aire caliente el que permite así la eliminación total de agua en el producto.

j) Envasado y distribución

Finalmente el azúcar producido pasa a la estación de envasado en donde es empacado en bolsas de distintos tamaños que permiten satisfacer las necesidades de todo tipo de clientes. Luego es cargada en camiones que la distribuyen a lo largo de todo el país.

3.2 ORGANIZACIÓN INTERNA DE PROCESOS

En el área de producción se cuenta con un gran número de sistemas los cuales a su vez están compuestos por gran cantidad de equipos que permiten su funcionamiento, es por esto que se hace necesario organizar de forma adecuada todos los elementos existentes dentro de la fábrica. A través de un sistema de gestión de recursos para la empresa se codifican las áreas, sub-áreas y equipos presentes en ellas lo que facilita la identificación de estos últimos cuando se requieren mejoras, reparaciones y mantenciones.

3.2.1 Codificación de áreas y sub áreas

A continuación, en la tabla 3.1 se muestra la codificación de todas las áreas existentes en la empresa dentro de las cuales se encuentra la que es de particular interés para este trabajo, la de Refinería.

Tabla 3.1 Codificación de Áreas (Fuente: Sistema de gestión de recursos Iansa S.A planta Chillán).

CÓDIGO	ÁREA
0204-1	Patio
0204-2	Fábrica cruda
0204-3	Refinería
0204-334	Sistema Hidráulico de válvulas tachos al vacío
0204-35300	Centrifugas y repartidores masa C
0204-4	Casa de Azúcar, almacenamiento y Desp. Silos
0204-5	Áreas complementarias
0204-6	Área eléctrica y de instrumentos
0204-7	Edificios, talleres, maestranza y bodegas
0204-8	Equipo móvil industrial
0204-9	Rubros generales
0204-A	Equipos transferidos otras plantas.

Las áreas a su vez están divididas en varias partes funcionales de menor tamaño llamadas sub áreas, estas últimas también codificadas y mostradas a continuación en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Codificación de Sub-áreas (Fuente: Sistema de gestión de recursos Iansa S.A planta Chillán).

CÓDIGO	SUB-ÁREA
0204-30	Refinación azúcar cruda
0204-31	Preparación de licor standard
0204-32	Filtración de licor standard
0204-33	Cocción
0204-34	Cristalizadores
0204-35	Centrifugación
0204-36	Siropes y Melaza
0204-37	Transporte de Azúcar húmeda A,B,C
0204-38	Varios en refinería
0204-39	Producción de vacío

Es necesario centrarse en la última sub-área enlistada en la tabla 3.2, producción de vacío, la cual cuenta con la codificación de los equipos más importantes que la componen para permitir un fácil monitoreo e individualización de los mismos.

3.2.2 Producción de vacío

La planta cuenta con un sistema de vacío compuesto por una red de ductos que interconectan varios equipos para su operación conjunta. El sistema está dividido en dos partes que procesan productos de diferentes calidades categorizadas como A, B y C según la cantidad de veces que es sometido a proceso. El levantamiento del sistema (Isométrico) y algunos planos de los equipos pertenecientes al mismo se encuentran disponibles en el anexo A.

Circuito A

El primer circuito, llamado de la misma forma que el producto que entrega (A), está constituido por los siguientes elementos:

- 1) Columna Barométrica A
- 2) Separador de mieles A

- 3) 5 Tachos de cocción y cristalización (A1, A2, A3, A4 y A5)
- 4) Tacho de siembra
- 5) Recibidor de mieles A
- 6) Red de ductos A
- 7) Pre calentadores de VAHOS
- 8) Bombas de vacío

El producto tipo A resulta del primer proceso de refinación al que es sometido el jugo denso por lo cual posee cualidades de primer nivel.

Circuito BC

El segundo circuito es el encargado de reprocesar el siropo producido en los tachos del circuito A por una segunda y tercera vez dando lugar así a otras dos calidades de azúcar denominadas B y C.

Esta parte del sistema está compuesta por los siguientes elementos:

- 1) Columna barométrica BC
- 2) Separador de mieles BC
- 3) 6 tachos de cocción y cristalización (B1, B2, B3, C1, C2 y C3)
- 4) Recibidor de mieles BC
- 5) Red de ductos BC
- 6) Pre calentadores de VAHOS
- 7) Bombas de vacío

Tabla 3.3 Codificación de elementos del sistema de vacío (Fuente: SAP Iansa S.A planta Chillán).

0204-39	PRODUCCIÓN DE VACÍO
0204-392	CONDENSADORES BAROMETRICOS REFINERÍA
0204-39201	Condensador Barométrico tachos A
0204-39202	Condensador Barométrico tachos b, c y IV efectos
0204-39205	Separador de mieles tachos A
0204-39206	Separador de mieles tachos B y C
0204-393	BOMBAS DE VACÍO
0204-39301	Bomba 1 de vacío tachos cocedores
0204-39302	Bomba 2 de vacío tachos cocedores
0204-39303	Bomba 3 de vacío tachos cocedores
0204-39304	Bomba 4 de vacío tachos cocedores
0204-39308	Circuitos de vacío A y B-C

3.2.2.1 Descripción de los elementos del sistema

A continuación se hará una descripción general de los equipos codificados en la tabla 3.3, además de aquellos que no están considerados en ella pero de igual manera cumplen una función importante en el sistema.

a) Condensador Barométrico (Columna Barométrica)

La columna barométrica es un equipo de alta confiabilidad encargada de condensar el vapor con que es alimentada por medio de la mezcla con agua generando así una fuerte reducción de presión.

Este equipo cuenta fundamentalmente con una pierna barométrica (cuerpo de la estructura), depósito de no condensables y una bomba de vacío, y se clasifican principalmente por el flujo de los fluidos a mezclar el cual puede ser paralelo o a contracorriente.

El vapor hace ingreso a la columna y se mezcla con el agua de refrigeración a lo largo de toda la pierna barométrica generándose así una brusca reducción del volumen específico de éste debido al paso de estado gaseoso a líquido. Los no condensables contenidos en el agua o el vapor, como por ejemplo el aire, pasan a la parte superior de la columna en donde se encuentra el depósito que los alberga, allí son extraídos por la bomba de vacío la cual también cumple la función de apoyar la reducción de presión. Una vez condensado el vapor, el agua obtenida pasa a la parte inferior del equipo en donde es dirigida a un tanque de agua caída para posteriormente bombearla a una torre de enfriamiento que reduce su temperatura para su reutilización.

Es importante tener en cuenta que un aumento en la diferencia entre la temperatura del vapor y el agua de refrigeración produce un mayor rendimiento del proceso. Algunas de las ventajas de este tipo de sistemas son:

- Bajo costo de mantenimiento
- Requieren poco espacio
- No tiene piezas móviles
- Facilidad de instalación
- El agua de refrigeración puede ser descargada por gravedad

b) Tachos de cocción y cristalización

Los tachos de cocción son grandes recipientes cilíndricos usados para producir cristales de azúcar a partir del jarabe dulce con que son alimentados. Generalmente están provistos de un sistema agitador que evita la adhesión del material en las paredes del equipo a causa estancamiento de la mezcla. En general predominan dos tipos de tachos, los de serpentín y los de calandria. Los primeros trabajan con vapor de producción directa para ese propósito lo que restringe bastante la economía que se puede lograr en cuanto a aspectos térmicos, mientras los segundos con un diseño más moderno operan de manera mucho más rápida y son considerados más eficientes ya que usan vapor proveniente de pre-calentadores o de cuerpos de multi-efectos.

c) Separadores de mieles

Corresponden a recipientes cilíndricos de fondo cónico instalados entre los tachos de cocción y la columna barométrica. Su función es extraer las partículas de jarabe denso que pudiese contener el vapor que se genera en los tachos mediante una serie de placas deflectoras instaladas al interior del mismo. Una vez capturadas, las partículas de jarabe caen al fondo del recipiente por efecto de la gravedad para terminar finalmente en un pequeño depósito cilíndrico, dotado de una válvula de descarga, llamado recibidor de mieles.

d) Bombas de vacío

Son las encargadas de extraer los no condensables desde los depósitos de las columnas barométricas. El sistema cuenta con 4 de estos equipos, dos que funcionan constantemente en la extracción del material no deseado y dos adicionales que permiten suplir posibles necesidades de vacío a causa de fallas en las columnas.

e) Pre calentador de VAHOS

Estos equipos son básicamente intercambiadores de calor que permiten aumentar la temperatura del vapor que ingresa a las columnas barométricas. Su carcasa está constituida por un cuerpo cilíndrico principal, dos cuerpos elipsoidales unidos a los extremos del principal y un banco de tubos en su interior que permite el intercambio de calor entre los fluidos que interactúan en él.

f) Ductos y accesorios de circuito

Los ductos forman parte elemental del sistema ya que hacen posible la interacción entre todos los equipos del mismo. Dependiendo de las necesidades funcionales y espaciales se acude también a accesorios como reducciones, tapas, uniones en T o Y, curvas, etc. Es de suma importancia evitar deformaciones en los ductos ya que esto puede producir una considerable disminución en la presión admisible de los mismos.

3.3 ASME (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS)

La Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos fue establecida en 1880 por los ingenieros mecánicos Alexander Lyman Holley (1832-1882), Rossiter Worthington (1817-1880) y Edison (1832-1916) con el fin de ofrecer un punto de confluencia para la discusión de los profesionales del rubro con respecto a los aspectos clave y las preocupaciones generadas por la creciente industrialización y mecanización de aquella época, particularmente para la optimización de lo que respecta a confiabilidad y seguridad de las máquinas.

Esta organización desempeña un papel significativo en la sociedad actual la cual busca la utilización de la tecnología para mejorar las condiciones de vida, garantizar la seguridad y además crear oportunidades enriquecedoras y benéficas para todas las personas.

3.3.1 CÓDIGOS Y NORMAS

ASME desarrolla códigos y estándares que mejoran la seguridad, proporcionan aprendizaje constante y ofrecen oportunidades de intercambio técnico que benefician a la comunidad global de ingenieros.

El proceso de desarrollo de códigos y normas de ASME aseguran un criterio uniforme y ampliamente aceptado para diseñar, fabricar y verificar sistemas mecánicos además de una amplia sección de herramientas, procurando la intercambiabilidad entre las piezas, lo que constituye la base misma de la producción en masa de las mercancías comercializadas alrededor de todo el mundo.

Las normas no solo proporcionan pautas técnicas comunes y universales que resultan esenciales, sino que reflejan el acuerdo general de las muchas partes interesadas respecto de los procesos de ingeniería más efectivos para diseñar y probar equipos mecánicos. De esta manera se garantiza que los productos comercializados en el mercado internacional son de buena calidad, confiables y seguros.

3.3.2 Boilers and pressure vessels code (BPVC)

Con la revolución industrial y el auge del vapor como medio de generación de movimiento y energía, nace la necesidad de producir y contener dicho fluido para su uso, es así que se crean las calderas y recipientes para operación bajo presión.

Entre los años 1870 y 1910 fueron registradas al menos 10.000 explosiones de calderas en los Estados Unidos las cuales cobraron las vidas de gran número de trabajadores de las grandes industrias. Desde 1910 la tasa de colapso de estos equipos alcanzó valores entre los 1300 a 1400 eventos por año, datos que preocuparon enormemente a las autoridades gubernamentales, industriales y académicas del país por lo cual se comenzó la búsqueda de soluciones que permitiesen reducir la gran accidentabilidad existente en la época.

El colapso de las calderas y elementos sometidos a presión sucedía a causa de las deficientes condiciones de fabricación e inspección de ellos, además de que los primeros equipos carecían de sistemas de seguridad básicos como por ejemplo los dispositivos de alivio de presión y los de bloqueo de combustible.

En el año 1911 la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos ordenó la creación de un comité encargado de formular la estandarización de las reglas de construcción de calderas y recipientes sometidos a presión. Este grupo de profesionales logro resultados alentadores en el año 1914 dando origen así al “Código de calderas y recipientes sometidos a presión” el cual centra su contenido en aspectos como seguridad, métodos aptos de construcción y verificación, transporte de recipientes e integridad de ellos en condiciones de presión.

El código se actualiza periódicamente cada 3 años emitiendo una versión completamente nueva del mismo por vez. Para mantener una actualización completa del código, se emiten anualmente adendas con el fin de corregir, mejorar y actualizar los contenidos existentes.

3.3.2.1 Estructura del código

Actualmente existen 28 volúmenes del código los cuales se separan en 11 secciones que consideran distintos tópicos. Los contenidos de cada sección son descritos a continuación:

Sección I (1914): Calderas de Potencia.

Sección II (Sección de referencia): Se usa como fuente de información y adquisición de datos para ser aplicados en los procedimientos de otras secciones ya que contiene las especificaciones de los materiales aprobados para ser usados en procesos de fabricación. Está compuesto por varias partes que se clasifican según el tipo de material a consultar.

Parte A: Materiales ferrosos

Parte B: Materiales no ferrosos

Parte C: Materiales para soldaduras

Parte D: Contiene datos tales como Tensiones de fluencia y rotura de los materiales, gráficos sobre presiones externas e información requerida para la aprobación de materiales.

Sección III (1965): Componentes para centrales nucleares. Esta sección también incluye requisitos para cañerías, bombas y válvulas.

Sección IV (1923): Calderas de calefacción.

Sección V: Ensayos No Destructivos. Solo se describen los métodos de ensayo, dejando los criterios de aceptación en las secciones de construcción dado que son diferentes para cada tipo de recipiente.

Sección VI: Reglas recomendadas para el cuidado y operación de calderas de calefacción y calentadores.

Sección VII: Lineamientos recomendados para el cuidado de calderas de potencia.

Sección VIII (1928): Recipientes a presión sin aplicación de fuego directo. En el año 1998 se aprobó la reducción del factor de seguridad de diseño de 4 a 3.5 (basado en la tensión máxima de rotura).

División 1: Reglas de diseño tradicionales.

División 2: Reglas alternativas de diseño.

Apéndice R → Requerimientos para pre-calentamiento.

Apéndice UHT → Requerimientos para post-calentamiento.

Sección IX: Calificación de soldaduras y Brazing. Se refiere específicamente a inspección de soldaduras, calificación de soldadores y calificación de procedimientos de soldadura para recipientes a presión.

Sección X (1969): Recipientes a presión de plásticos reforzados con fibra de vidrio.

Sección XI: Inspección de Servicios de Centrales Nucleares. Contiene reglas para la inspección periódica y sistemática de soldaduras, ensayos de presión, ensayos funcionales de bombas y válvulas y actividades de reparación y reemplazo.

Sección XII: Actualmente se encuentra en proceso de elaboración la sección XII del código, la cual establecerá las normas de diseño y seguridad de los recipientes para transporte.

3.3.2.2 Sección VIII división 1

En esta parte del código se establecen los requerimientos generales para el diseño, fabricación e inspección de recipientes sometidos a presión según los estándares establecidos por la ASME.

La estructura de esta sección está compuesta por varias subsecciones que cubren los distintos tópicos a considerar al momento de generar o considerar proyectos. Las subsecciones son las siguientes:

Subsección A: Tiene como eje central la parte UG que considera los requerimientos generales para fabricación de recipientes sometidos a presión.

Subsección B: Esta subsección considera los requerimientos de fabricación y se divide en 3 partes:

Parte UW: Entrega los requerimientos para recipientes que serán fabricados mediante procedimientos de soldadura.

Parte UF: Entrega los requerimientos para recipientes que serán fabricados por forja.

Parte UB: Entrega los requerimientos para recipientes que serán fabricados usando materiales de aporte no ferrosos, proceso conocido como Brazing.

Subsección C: En esta subsección se exponen los requerimientos de materiales a utilizar. Se estructura por 8 partes expuestas a continuación.

Parte UCS: Requerimientos de materiales para los recipientes construidos con aceros al carbono o de baja aleación.

Parte UNF: Requerimientos de materiales no ferrosos para construcción de recipientes.

Parte UCI: Requerimientos de materiales de recipientes fabricados con fierro fundido.

Parte UCL: Requerimientos de materiales de recipientes construidos con placa Clad integral o con recubrimiento lining.

Parte UCD: Requerimientos de materiales para recipientes fabricados con fierro fundido dúctil.

Parte UNT: Requerimientos de materiales para recipientes fabricados con aceros ferríticos con propiedades mecánicas mejoradas mediante tratamientos térmicos.

Parte ULW: Requerimientos de materiales usados para recipientes construidos con planchas de composición multilaminar.

Parte ULT: Requerimientos de recipientes construidos con materiales de mejores propiedades mecánicas a bajas temperatura.

Es importante tener en cuenta que la subsección A entrega las herramientas de evaluación de prestaciones de los recipientes fabricados en cualquiera de las tres subsecciones, no así la guía de construcción de ellos que es exclusiva de cada una de ellas.

3.4 METODOLOGÍAS DE CÁLCULO PARA ESPESORES Y PRESIONES ADMISIBLES EN CONDICIONES DE PRESIÓN EXTERNA

Como ha sido mencionado anteriormente el código ASME entregan las guías para el análisis de las prestaciones que ofrecen los recipientes, ductos y accesorios en la parte UG, subsección B de la sección VIII con respecto a su geometría y material. Se recurre al documento para así encontrar las metodologías que permiten el cálculo de los espesores en las paredes de ductos, reducciones, mantos, cabezales y otros elementos constituyentes en concordancia con lo exigido en él.

3.4.1 Cálculo de presión admisible en mantos de recipientes y ductos cilíndricos sometidos a presión externa

El uso de ductos y recipientes a presión en la industria de elaboración de productos alimenticios es de suma importancia para poder llevar a cabo gran cantidad de procesos y transiciones entre los mismos. Para garantizar un seguro y continuo funcionamiento de estos elementos y los procesos involucrados es necesario ser cuidadosos al momento de diseñar y construir los equipos en cuestión.

Esta metodología si bien servirá para el cálculo que respecta a mantos de recipientes y ductos cilíndricos también servirá como guía o base para la evaluación de las otras partes consideradas en el proyecto ya que sus metodologías de cálculo comparten pasos similares.

PASO 1

Dimensiones

Se deben identificar las siguientes dimensiones del recipiente o ducto a evaluar cuyos valores serán la base del procedimiento.

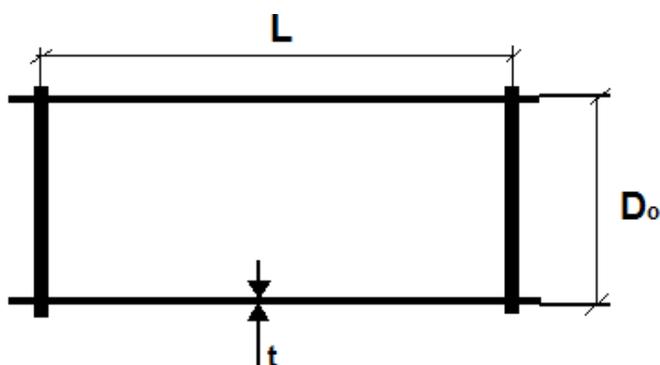


Figura 3.1 Mantos o ductos cilíndricos con dimensiones a considerar (Fuente: elaboración propia).

Siendo:

- ❖ D_o : Diámetro exterior del ducto o manto a evaluar.
- ❖ L : Longitud total. Corresponde a la distancia entre el inicio y final del elemento analizado o a la distancia entre los elementos que generan un soporte de rigidez al mismo como por ejemplo los anillos rigidizantes.
- ❖ t : Espesor del ducto o manto a evaluar. Cuando se diseña es propuesto por el diseñador.

PASO 2

Cálculo de factores

En conocimiento de las dimensiones anteriores se procede a calcular los siguientes cocientes:

$$\text{i) } D_o/t \quad (3.1)$$

$$\text{ii) } L/D_o \quad (3.2)$$

El uso de los cocientes (3.1) y (3.2) permite la obtención de dos factores clave a utilizar, A y B, los cuales serán usados en el cálculo de presión admisible del elemento a evaluar.

a) Obtención del Factor A (factor dimensional):

Para la obtención de este factor se presentan dos opciones:

- Opción 1: Con los valores obtenidos de las ecuaciones (3.1) y (3.2) se ingresa a la Figura N°1 del anexo B (Figura G, Parte D, Sección II del Código ASME, Páginas 706-707). El primero de los cocientes se debe buscar entre las curvas ascendentes que se presentan en la carta geométrica, mientras el valor del segundo de ellos debe ser buscado en el eje horizontal de la misma. Luego de tener identificada la intersección de los dos parámetros se realiza un desplazamiento horizontal hacia la derecha encontrando así el valor del Factor A.
- Opción 2: Cuando se vuelve difícil obtener la intersección de los coeficientes calculados es preciso recurrir a la Tabla N°1 del Anexo B (Tabla G, Parte D, Sección II del Código ASME) e interpolar linealmente los valores allí presentados para obtener con mayor exactitud el ya mencionado Factor A.

b) Obtención del Factor B (factor de propiedades del material)

Para obtener el valor de este factor se necesita tener claridad acerca de las propiedades mecánicas del material con el que se está trabajando y también las condiciones de temperatura a las que es sometido dado que de estos parámetros depende la elección de la carta de material a utilizar. A continuación se presentan dos opciones para su obtención:

- Opción 1: Para saber el valor de este factor se debe tomar como referencias el Módulo Elasticidad (E), temperatura de operación (T°) y el valor del esfuerzo mínimo de fluencia (Y_{\min}) del material. Con estos tres parámetros y el valor del Factor A se debe recurrir a una de las gráficas presentes en el código para este propósito. Para el caso de este trabajo el material a usar es acero al carbono A-36 y la temperatura de operación varía entre los 65°C y 70°C por lo cual es indicado usar la gráfica de la Figura 3.2.

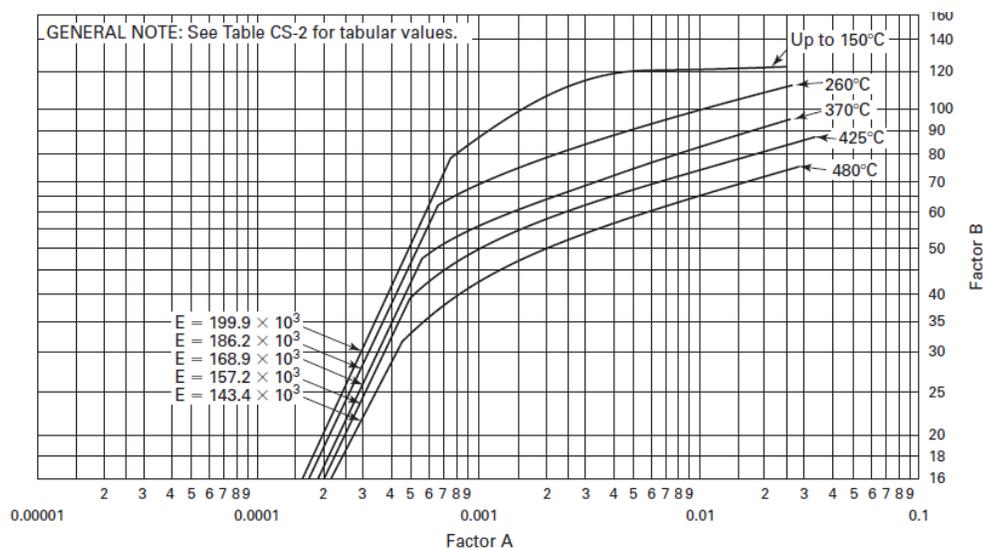


Figura 3.2 Carta para determinar el factor B de componentes de acero al carbono o de baja aleación bajo presión externa (esfuerzo de fluencia mínimo de 205 MPa y mayor). (Fuente: Código ASME, Sección II).

- Opción 2: Cuando se quiere obtener este coeficiente de forma más precisa se debe hacer uso de la tabla 3.4 en la cual se tabulan los valores mostrados en la Figura 3.2 con la cual se puede usar interpolación lineal.

Tabla 3.4 Valores tabulados de Factor B (Fuente: Sección II, código ASME).

Temp., °C	A	B, MPa	Temp., °C	A	B, MPa		
150	1.76 -05	1.72 +00	370	2.13 -05	1.72 +00		
	7.83 -04	7.79 +01		5.64 -04	4.69 +01		
	8.00	7.86		1.00 -03	5.52		
	9.00	8.14		3.00	6.96		
	1.00 -03	8.48		1.00 -02	8.34		
	2.00	1.03 +02		2.64	9.51		
	3.00	1.12		1.00 -01	9.51		
	4.00	1.16		425	2.23 -05	1.72 +00	
	5.00	1.19			5.05 -04	3.94 +01	
	2.50 -02	1.21			1.00 -03	4.90	
1.00 -01	1.21	1.50	5.48				
260	1.94 -05	1.72 +00	2.00	5.79			
			3.00	6.14			
			3.19 -02	8.55			
			1.00 -01	8.55			
			480	2.37 -05	1.72 +00	4.28 -04	3.10 +01
						1.00 -03	4.14
						1.50	4.69
						2.00	5.07
						3.00	5.45
						8.00	6.34
3.00 -02	7.65						
1.00 -01	7.65						

Si no es posible obtener el valor del Factor B desde el gráfico 3.2 o la tabla 3.4 debido a que el Factor A no se encuentra dentro del rango considerado se presenta una solución alternativa entregada por el código para el cálculo de presión admisible la cual es presentada en el paso siguiente.

PASO 3

Cálculo de Presión admisible

Para calcular la presión admisible existen dos casos mostrados a continuación:

- Caso 1: Una vez obtenido el valor del Factor B se procede al cálculo de la presión admisible por el ducto o manto de espesor estimado t sometido a presión externa. Para esto se usa la fórmula que se presenta a continuación.

$$P_a = \frac{4B}{3(D_o/t)} \quad (3.3)$$

Siendo:

- ❖ P_a : Presión de trabajo admisible (MPa)
- ❖ B : Valor de Factor B

El resultado entregado por (3.3) corresponde a una presión manométrica, por lo cual es preciso ser cuidadoso al momento de interpretar el resultado.

- Caso 2: Como se mencionó en el paso anterior, existe la posibilidad de que el valor del Factor B no pueda ser obtenido a partir de la tabla ni del gráfico indicados para este propósito. En este caso se puede calcular el valor de presión admisible usando la fórmula alternativa (entregada por el código) presentada a continuación.

$$P_a = \frac{2AE}{3(D_o/t)} \quad (3.4)$$

Siendo:

- ❖ A : Valor del Factor A
- ❖ E : Módulo Elasticidad del material (MPa)

PASO 4

Verificación

En caso que el resultado de presión admisible obtenido cumpla con lo que se requiere, se procede a asignar un valor de sobre-espesor a criterio del diseñador que permita compensar los efectos de la corrosión (si existe) y luego a la selección del material comercial que más se adecue dimensionalmente a los resultados obtenidos (siempre tendiendo a valores superiores).

En caso que el resultado obtenido no cumpla con lo que se requiere es necesario seleccionar nuevamente un valor de espesor t mayor y repetir esta metodología de trabajo hasta que los resultados obtenidos sean adecuados.

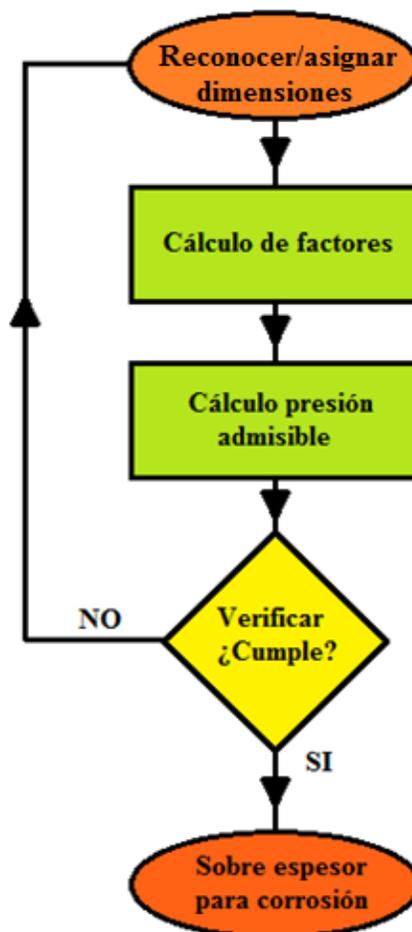


Figura 3.3 Diagrama de flujo para metodología de cálculo de presión admisible en mantos y ductos cilíndricos sometidos a presión externa (Fuente: Elaboración propia).

3.4.2 Cálculo de presión admisible en reducciones cónicas sometidas a presión externa

Al momento de comunicar dos elementos o equipos es necesario muchas veces un cambio dimensional en las secciones involucradas, en estos casos es muy útil el uso de las llamadas reducciones. Las reducciones son las encargadas de generar un cambio de diámetro gradual en los ductos a conectar mediante la instalación adecuada de ellas permitiendo a su vez evitar grandes pérdidas singulares en el sistema.

PASO 1

Dimensiones

Nuevamente el primer paso consiste en identificar las dimensiones de la reducción a evaluar.

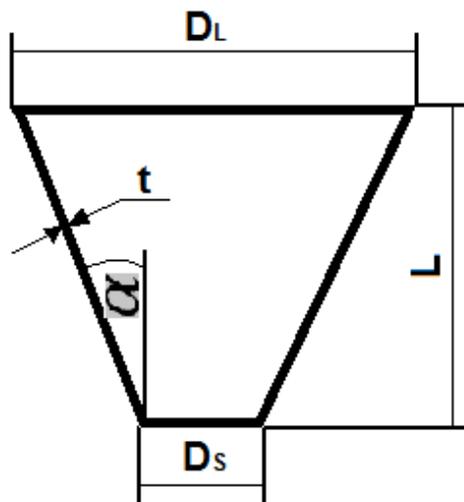


Figura 3.4 Reducción cilíndrica con las dimensiones a considerar (Fuente: elaboración propia).

Siendo:

- ❖ D_L : Diámetro exterior de la sección mayor de la reducción (mm).
- ❖ D_S : Diámetro exterior de la sección menor de la reducción (mm).
- ❖ L : Longitud entre los dos extremos de la reducción medida de forma paralela al eje central de la misma (mm).
- ❖ α : Ángulo de transición de la reducción ($^\circ$).
- ❖ t : Espesor de pared de la reducción. Cuando se diseña es propuesto por el diseñador (mm).

Cuando el ángulo de transición de la reducción es mayor a 60° se debe considerar la reducción como una tapa plana y el cálculo de espesor se realiza en base a esa metodología.

PASO 2

Cálculo de factores

Una vez identificadas y conocidas las dimensiones de la reducción a evaluar se procede al cálculo de las siguientes dimensiones equivalentes:

$$L_e = \frac{L}{2} \cdot \left(1 + \frac{D_S}{D_L}\right) \quad (3.5)$$

Siendo:

- ❖ L_e : Longitud equivalente de la reducción (mm).
- ❖ D_L : Diámetro exterior de la sección mayor de la reducción (mm).
- ❖ D_S : Diámetro exterior de la sección menor de la reducción (mm)

$$t_e = t \cdot \cos \alpha \quad (3.6)$$

Siendo:

- ❖ t_e : Espesor efectivo de la sección cónica de la reducción (mm).
- ❖ t : Espesor de pared de la reducción (mm).
- ❖ α : Ángulo de transición de la reducción ($^\circ$).

Además debemos calcular los siguientes cocientes:

$$a) \frac{L_e}{D_L} \quad (3.7)$$

$$b) \frac{D_L}{t_e} \quad (3.8)$$

Con los cocientes calculados con (3.7) y (3.8) se hacen las siguientes equivalencias:

$$a) \frac{L_e}{D_L} = \frac{L}{D_o} \quad (3.9)$$

$$b) \frac{D_L}{t_e} = \frac{D_o}{t} \quad (3.10)$$

Es posible notar en los nuevos coeficientes obtenidos en (3.9) y (3.10) son idénticos a los usados en la metodología de cálculo de presión admisible en mantos de recipientes y ductos cilíndricos.

Esto sucede ya que esta metodología se basa en una adaptación dimensional que permite considerar la reducción como un ducto normal mediante longitudes equivalentes.

Luego de establecer las equivalencias se procede a calcular los factores A y B de la misma forma descrita en 3.4.1, PASO 2.

PASO 3

Cálculo de presión admisible

Para concretar el cálculo se hace uso de la fórmula (3.3) o (3.4) según corresponda el caso.

PASO 4

Verificación

Se procede de igual manera que en el paso 4 de la metodología de cálculo de presión admisible en mantos y ductos sometidos a presión externa. El diagrama de flujo de este procedimiento es igual al de la figura 3.3.

3.4.3 Cálculo de espesor requerido por tapas toriesféricas sometidas a presión externa

Todo recipiente a presión cuenta con una serie de elementos que conforman su estructura, uno de ellos es la tapa. Existen varios tipos y también varias formas de instalarlas en los recipientes. Las tapas toriesféricas son las de mayor aceptación en la industria debido a su bajo costo y a las grandes presiones que son capaces de soportar pero su principal característica es que el radio de abombado es aproximadamente igual al diámetro del recipiente a cerrar.

A continuación se muestra el procedimiento paso a paso que permite seleccionar correctamente el espesor de las tapas toriesféricas en función del material de la misma y el tamaño del recipiente a cerrar.

PASO 1**Dimensiones**

Se deben identificar las siguientes dimensiones antes de realizar cualquier tipo de cálculo:

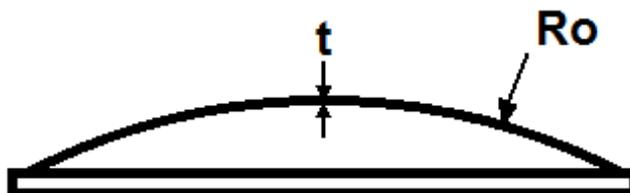


Figura 3.5 Tapa toriesférica con las dimensiones a considerar (Fuente: elaboración propia).

Siendo:

- ❖ R_o : Radio exterior de abombado de la tapa (mm).
- ❖ t : Espesor de la semiesfera de la tapa (mm).

PASO 2**Cálculo de factores**

Como en las metodologías anteriores se deben calcular los factores A y B para lo cual se usaran las dimensiones identificadas en el paso 1.

Obtención del Factor A (Factor dimensional)

Para obtener el valor de este factor se utiliza la siguiente fórmula:

$$A = \frac{0.125}{(R_o/t)} \quad (3.11)$$

Obtención del factor B (factor de propiedades del material)

La obtención de este factor se lleva a cabo según lo expuesto en 3.4.1, paso 2, parte a).

PASO 3**Cálculo de Presión admisible**

Para el cálculo de presión admisible existen dos casos posibles:

- Caso 1: En este caso el Factor B se obtiene de la gráfica o tabla correspondiente y el cálculo se realiza con la siguiente fórmula:

$$P_a = \frac{B}{(Ro/t)} \quad (3.12)$$

Siendo:

- ❖ P_a : Presión admisible (MPa).

- Caso 2: En este caso no es posible obtener el valor del Factor B por lo cual se hace presente la siguiente formula:

$$P_a = \frac{0.0625 \cdot E}{(Ro/t)^2} \quad (3.13)$$

Siendo:

- ❖ E : Módulo elasticidad del material (MPa).

PASO 4

Verificación

Se procede de igual manera que en el paso 4 de la metodología de cálculo de presión admisible en mantos y ductos sometidos a presión externa. El diagrama de flujo de este procedimiento es igual al de la figura 3.3.

3.4.4 Cálculo de espesor requerido por tapas planas soldadas sometidas a presión externa

Este tipo de tapas es muy comúnmente usado en la industria y aunque su aplicación principal es en condiciones de presión atmosférica también se opta por su uso en recipientes sometidos a presión, esto se debe a que tienen el menor costo entre las tapas para recipientes. En el sistema que se está analizando solo existen tapas planas instaladas en los equipos por medio de soldadura.

Se muestra a continuación la metodología, descrita paso a paso, que permite el cálculo del espesor requerido por una tapa plana según la presión a la que se quiere operar.

PASO 1**Dimensiones**

Se identifican las dimensiones de la tapa y recipiente a cerrar indicadas en la figura 3.6.

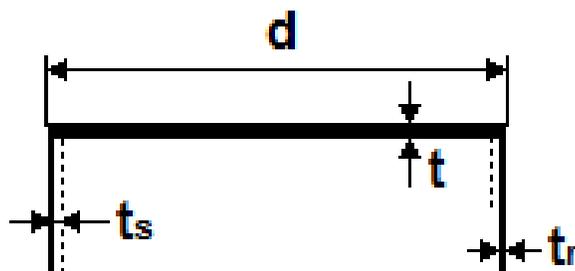


Figura 3.6 Tapa plana con dimensiones a considerar (Fuente: elaboración propia).

Siendo:

- ❖ t : espesor mínimo de la tapa (mm).
- ❖ d : Diámetro exterior del recipiente (mm)
- ❖ t_r : Espesor mínimo requerido por el manto del recipiente para soportar la presión de diseño (mm)
- ❖ t_s : Espesor nominal del manto del recipiente (considerando el sobre espesor para compensar corrosión) (mm).

PASO 2**Cálculo de espesor**

Para obtener el valor del espesor requerido por la tapa se deben tener en cuenta algunos coeficientes y propiedades del material los cuales se presentan a continuación:

- i) Primero se debe conocer el valor de Esfuerzo máximo admisible en tracción S del material a usar. Para obtener este parámetro se debe recurrir a la tabla N°1 del Anexo C, buscar la fila del material deseado y la sección del código para la cual será aplicado el valor.
- ii) Relación dimensional m del recipiente a cerrar

$$m = t_r / t_s \quad (3.14)$$

iii) Coeficiente dimensional c para tapas planas

$$c = 0,33 \cdot m \quad (3.15)$$

El coeficiente c depende del método de fijación de la tapa. Para el caso particular de tapas soldadas el código establece que se debe incluir un factor de 0.667 el cual a su vez aumenta efectivamente el valor del esfuerzo máximo admisible de tracción a $1.5 \cdot S$.

iv) Eficiencia de junta de la tapa (E_j)

La eficiencia de la junta está determinada por el nivel de inspección radiográfica de la soldadura que produce la unión entre la tapa y el manto del recipiente. Para determinar el valor se debe recurrir a la tabla N°1 del Anexo D.

v) Presión de diseño P

Con los 5 parámetros anteriores clarificados es posible proceder al cálculo del espesor mínimo requerido por la tapa usando la siguiente fórmula:

$$t = d \cdot \sqrt{\frac{0.667 \cdot C \cdot P}{1.5 \cdot S \cdot E_j}} \quad (3.16)$$

No es necesario asignar un valor de sobre espesor adicional ya que está considerado dentro de la relación dimensional m .

3.4.5 Cálculo dimensional de anillos rigidizantes para mantos de recipientes o ductos sometidos a presión externa

El uso de anillos rigidizantes permiten aumentar la rigidez del sistema en que son instalados, en el caso de este sistema permiten aumentar la presión admisible por el equipo al que son fijados.

PASO 1

Dimensiones

Se deben identificar las dimensiones a usar en los cálculos a realizar, los cuales se basan en la satisfacción de necesidades inerciales del equipo:

a) D_o : Diámetro exterior del ducto o recipiente a rigidizar (mm).

- b) L_S : Distancia entre elementos rigidizantes. Equivalente a L en figura 3.1 (mm).
- c) t : Espesor del manto o ducto a rigidizar (mm).
- d) A_S : Área de la sección transversal del elemento rigidizante (solo rectangulares) (mm^2).

PASO 2

Cálculo de factores

Una vez identificadas las dimensiones a usar, se continúa con el cálculo de los factores A y B a utilizar posteriormente en los cálculos de inercias requeridas por el equipo o parte evaluada. A diferencia del general de los procedimientos de cálculo de esta índole, en esta ocasión se calculara primero el valor del Factor B y a partir de él se hallara el valor de A.

Obtención del Factor B (factor de propiedades del material)

Para la obtención del valor del coeficiente es preciso hacer uso de la siguiente fórmula:

$$B = \frac{3}{4} \cdot \left(\frac{P \cdot D_o}{t + A_S / L_S} \right) \quad (3.17)$$

Siendo:

- ❖ P : Presión de diseño (MPa).

Obtención del Factor A (factor dimensional)

Se presentan dos opciones que permiten conocer el valor de A

- Opción 1: Con el valor de B, el módulo elasticidad y temperatura de operación del material se debe ingresar a la figura 3.2, intersectar los parámetros mencionados en el gráfico y luego descender al semieje horizontal para encontrar el valor de A.
- Opción 2: Cuando los valores de A no se encuentran dentro del rango presentado en el gráfico de la figura 3.2 o en la tabla 3.1 se calcula el valor de A con la siguiente ecuación:

$$A = \frac{2 \cdot B}{E} \quad (3.19)$$

Siendo:

- ❖ E : Módulo elasticidad del material (MPa).

Una vez calculado el Factor A se pueden realizar los cálculos inerciales pertinentes.

PASO 3

Cálculo de inercias

Se calcula la inercia requerida por el sistema en dos condiciones, la primera con el anillo rigidizante en solitario y la segunda como el conjunto pared-anillo. Luego se calculan las inercias disponibles en las mismas dos condiciones para hacer la comparación que permite decidir si las dimensiones del anillos cumplen con los requerimientos del recipiente o parte a rigidizar.

Cálculo de inercia requerida por el anillo en solitario

Primero se calcula el momento de inercia requerido por la sección transversal del anillo con respecto al eje neutro del mismo, paralelo al eje central del ducto o manto a rigidizar, usando la siguiente fórmula:

$$I_S = \frac{D_o^2 \cdot L_S \cdot (t + A_S / L_S) \cdot A}{14} \quad (3.20)$$

Siendo:

- ❖ I_S : Inercia requerida a anillo (mm^4).
- ❖ A : Factor A

Cálculo de inercia requerida por el conjunto anillo-pared

Junto con el anillo es preciso asumir que una porción de manto actúa como parte rigidizante del conjunto. La porción de pared considerada es proporcional a las dimensiones del recipiente y se calcula con la siguiente fórmula:

$$P_p = 1,1 \cdot \sqrt{D_o \cdot t} \quad (3.21)$$

Siendo:

- ❖ P_p : Porción de pared a considerar (mm).

En la figura 3.6 se ilustra la forma en que debe ser considerado el conjunto anillo-pared y la porción de pared a incluir dentro del cálculo.

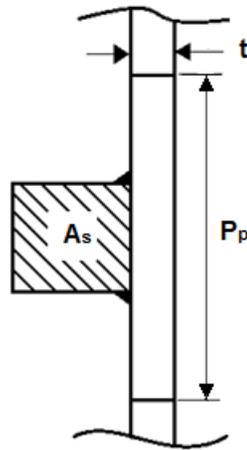


Figura 3.7 Sección anillo - pared con dimensiones a considerar (Fuente: elaboración propia).

Se observa que la sección transversal del anillo y la porción de pared producen una nueva área la que será usada para el cálculo de la inercia requerida por el conjunto. Para este efecto se utiliza la siguiente fórmula:

$$I'_S = \frac{D_o^2 \cdot L_S \cdot (t + A_s/L_S) \cdot A}{10.9} \quad (3.22)$$

Siendo:

- ❖ I'_S : Momento de inercia requerido por el conjunto anillo-pared con respecto al eje neutro paralelo al eje central del ducto o manto a rigidizar (mm^4).
- ❖ A_s : Suma de la sección transversal del anillo y la sección transversal generada por la porción de pared considerada (mm^2).
- ❖ A: Factor A

PASO 4

Verificación

Con los valores de momento de inercia requerida calculados se da paso al cálculo de los respectivos momentos de inercia generados por ambas situaciones presentadas, el anillo en solitario y el conjunto anillo-pared.

Es de suma importancia recordar que la inercia generada por el anillo y el conjunto anillo – pared debe ser calculada con respecto al eje neutro de la sección que es paralelo al eje central del recipiente.

Con todos los valores ya calculados se hace la siguiente evaluación:

$$I_s < \text{Momento de inercia generado por el anillo}$$

$$I'_s < \text{Momento de inercia generado por conjunto anillo – pared}$$

Si se cumplen estas dos condiciones de inercia se puede asegurar que el desempeño del anillo será óptimo y sus dimensiones están correctamente seleccionadas. En el caso contrario se deben aumentar las dimensiones del anillo hasta que se cumplan los dos requisitos anteriores.

El procedimiento completo puede ser esquematizado como sigue:

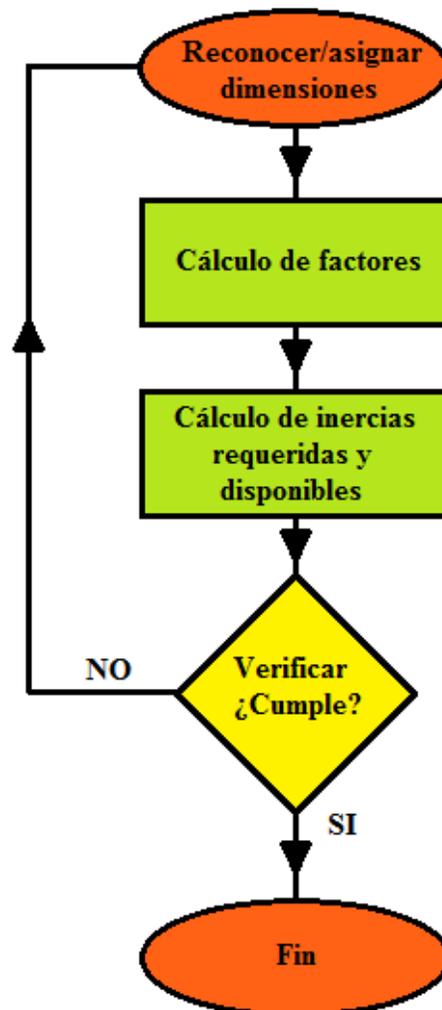


Figura 3.8 Diagrama de flujo para metodología de cálculo dimensional de anillos rigidizantes para mantos de recipientes o ductos sometidos a presión externa (Fuente: Elaboración propia).

3.4.6 Metodología de cálculo dimensional de ponchos de refuerzo para aperturas en mantos de recipientes sometidos a presión externa

El cálculo de los ponchos de refuerzo depende de una serie de variables dimensionales basadas principalmente en requerimientos de áreas transversales.

PASO 1

Reconocimiento de dimensiones

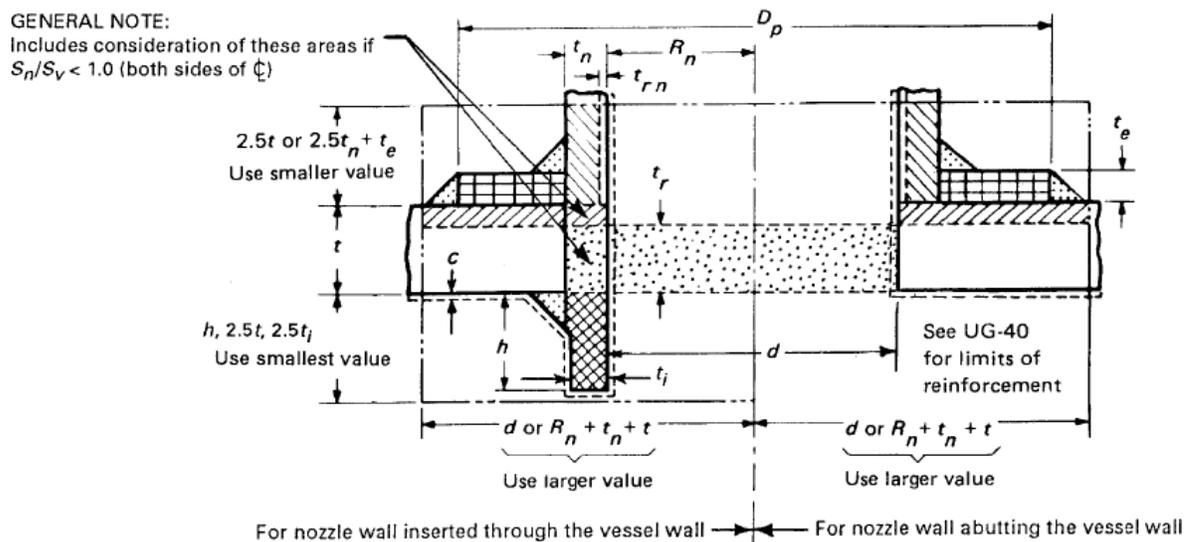


Figura 3.9 Poncho de refuerzo en apertura de manto de recipiente (Fuente: Código ASME).

Siendo:

- ❖ D_p : diámetro del poncho de refuerzo (mm).
- ❖ t_n : espesor de pared de boquilla (mm).
- ❖ d : diámetro de apertura (mm).
- ❖ t_r : espesor mínimo requerido en manto (mm).
- ❖ t_e : espesor de poncho de refuerzo (mm).
- ❖ t : espesor nominal de manto (mm).
- ❖ c : espesor para corrosión en manto (mm).
- ❖ t_{rn} : espesor requerido por boquilla sin costura (mm).
- ❖ t_i : espesor nominal de proyección interior de boquilla (mm).

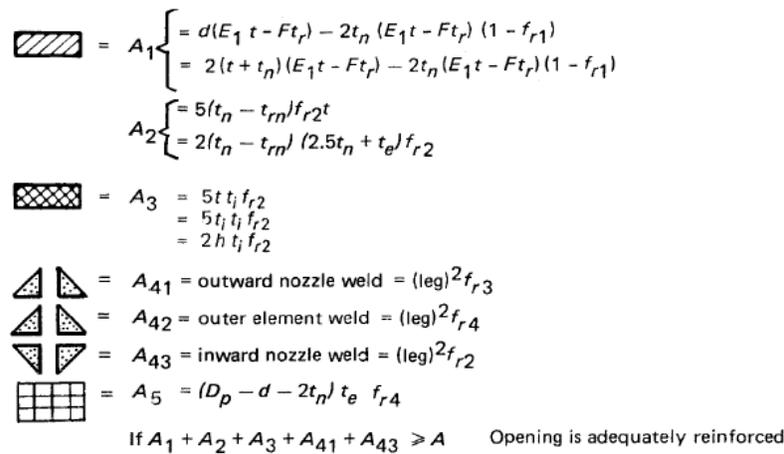
PASO 2

Cálculo de área de refuerzo requerida

Área total requerida:

$$A = d \cdot t_r \cdot F + 2 \cdot t_n \cdot t_r \cdot F \cdot (1 - f_{r1}) \quad (3.23)$$

Las áreas disponibles son las mostradas en la figura algo.1 y su cálculo se realiza según lo mostrado a continuación:



$$\begin{aligned}
 \text{Hatched rectangle} &= A_1 \begin{cases} = d(E_1 t - Ft_r) - 2t_n (E_1 t - Ft_r) (1 - f_{r1}) \\ = 2(t + t_n)(E_1 t - Ft_r) - 2t_n (E_1 t - Ft_r) (1 - f_{r1}) \end{cases} \\
 \text{Cross-hatched rectangle} &= A_2 \begin{cases} = 5(t_n - t_{rn})f_{r2}t \\ = 2(t_n - t_{rn})(2.5t_n + t_e)f_{r2} \end{cases} \\
 \text{Cross-hatched rectangle} &= A_3 = 5t_i f_{r2} \\
 &= 5t_i t_j f_{r2} \\
 &= 2h t_j f_{r2} \\
 \text{Two triangles} &= A_{41} = \text{outward nozzle weld} = (\text{leg})^2 f_{r3} \\
 \text{Two triangles} &= A_{42} = \text{outer element weld} = (\text{leg})^2 f_{r4} \\
 \text{Two triangles} &= A_{43} = \text{inward nozzle weld} = (\text{leg})^2 f_{r2} \\
 \text{Grid} &= A_5 = (D_p - d - 2t_n) t_e f_{r4} \\
 \text{If } A_1 + A_2 + A_3 + A_{41} + A_{43} &\geq A \quad \text{Opening is adequately reinforced}
 \end{aligned}$$

Figura 3.10 Cálculo de áreas disponibles en zona de unión de boquillas (Fuente: Código ASME).

Siendo:

- ❖ E_1 : 1, a menos que se trate de un manto esférico.
- ❖ F : 1, para todo recipiente bajo presión externa.
- ❖ $f_{r1} = S_n / S_v$, para boquillas insertadas a través del manto
- ❖ S_n : Esfuerzo admisible en boquilla (MPa)
- ❖ S_v : Esfuerzo admisible en manto del recipiente (MPa)
- ❖ $f_{r2} = S_n / S_v$
- ❖ h : distancia de proyección interior de la boquilla con respecto al manto (mm).
- ❖ leg : altura del cordón (0.7t) (mm).
- ❖ $f_{r3} = (\text{el más pequeño entre } S_n \text{ o } S_p) / S_v$.
- ❖ S_p : esfuerzo admisible por el poncho (MPa)
- ❖ $f_{r4} = S_p / S_v$

El espesor o el diámetro del poncho de refuerzo son propuestos inicialmente dependiendo de las necesidades espaciales del equipo con respecto a cada una de estas variables. Finalmente cuando el elemento de refuerzo tenga asignadas sus dimensiones se agrega un sobre espesor para compensar los efectos de la corrosión.

CAPITULO 4. DESARROLLO DEL TEMA

4.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La industria del azúcar se ve afectada constantemente por fallas en sus equipos debido a que sus procesos generan ambientes extremadamente corrosivos que los dañan progresivamente. En el caso de los recipientes a presión, son las paredes de los mismos que se ven afectadas enormemente por la corrosión presentando una elevada tasa de desgaste que limita considerablemente la vida útil, operatividad y confiabilidad de estos.

La planta IANSA Chillán opera con una modalidad de campañas durante el año, una de refinación de azúcar cruda (sin refinar) importada y otra de producción a partir de remolacha, al final de las cuales se llevan a cabo detenciones de línea que permiten eliminar o corregir problemas y fallas operacionales durante un periodo de un mes. Debido a lo anterior, se analizara el sistema en su condición actual para así poder establecer las condiciones de presión a las cuales se puede ver sometido sin riesgo de falla.

También se llevara a cabo el análisis que permita determinar los espesores mínimos de los elementos más importantes para poder operar a la presión de 0,01 Mpa absoluto o en su defecto las modificaciones correspondientes que puedan ser aplicadas en la próxima detención de línea.

4.2 ASPECTOS A CONSIDERAR

Dado que esta memoria solo considera partes clave del sistema de vacío que se busca mejorar, la aplicación de las metodologías de cálculo exhibidas busca definir:

- a) Presiones admisibles de ductos, mantos y elementos constituyentes de recipientes según espesores mínimos actuales.
- b) Espesores mínimos requeridos por ductos, mantos y elementos constituyentes de recipientes para soportar una presión nominal de operación de 0,01 Mpa absoluto.
- c) Propuesta de reparación o mejoramiento del sistema para lograr operar bajo condición deseada y siguiendo los requerimientos establecidos por el código.

Todos los cálculos de condiciones actuales son realizados en base a los datos de espesores presentes en el Anexo D y mediante los procedimientos mostrados en el CAPITULO 3.

Para evitar malas interpretaciones se debe recordar:

- a) La presión de operación buscada para el sistema analizado es de 0,01MPa absoluto.
- b) La presión entregada por las formulas del código corresponde a una diferencia de presiones entre el interior y exterior del recipiente, se busca una diferencia de 0,09 MPa.
- c) El material usado para todos los cálculos es acero al carbono ASTM A-36.

4.3 RESULTADOS ENTREGADOS POR CÓDIGO ASME

4.3.1 Presión admisible por el sistema con respecto a espesores mínimos

Tomando los datos y esquemas del ANEXO E se procedió a calcular la presión externa máxima soportada por cada equipo y parte del circuito y en base a los resultados arrojados establecer la presión mínima de operación del sistema considerando como limitante al equipo o parte que presenta menos capacidad de operación en vacío. Se deben considerar las siguientes condiciones para interpretar los resultados de forma correcta:

- a) El tramo de ducto entre la columna barométrica y separador de mieles A se encuentra completamente rigidizado con anillos.
- b) El tramo 3 y 4 entre el separador de mieles y los tachos A se encuentra rigidizado con anillos.

Tabla 4.1 Resultados de presión admisible en mantos con espesores mínimos actuales.

Presión admisible en mantos con espesores mínimos actuales								
Equipo	Datos			Resultados				
	tmin	L	Do	Factor A	Factor B	Pa (man)	Pmo (abs)	Cumple
	mm	mm	mm			Mpa	Mpa	
Columna barometrica A (CBA)	5,2	5000	1816	8,28E-05	8,21	0,031	0,069	NO
Columna barometrica BC (CBBC)	6,2	5000	1816	7,01E-05	6,95	0,047	0,053	NO
Separador de mieles A (SMA)	4,8	3100	2816	8,84E-05	8,77	0,020	0,080	NO
Separador de mieles BC (SMBC)	6	2000	1816	2,39E-04	23,71	0,104	0	SI
Ductos entre CBA y SMA	5,2	2280	900	2,52E-04	25,08	0,193	0	SI
Ductos entre SMA y Tachos A								
Tramo 1	5,4	7500	900	6,73E-05	6,66	0,053	0,047	NO
Tramo 2	9,8	7500	900	1,49E-04	14,82	0,215	0	SI
Tramo 3	6,5	1300	700	6,76E-04	67,24	0,833	0	SI
Tramo 4	5,2	1300	700	4,81E-04	47,84	0,474	0	SI
Tramo 5	5,8	30000	700	7,96E-05	7,89	0,087	0,013	NO
Tramo 6	4,4	35000	700	4,50E-05	4,45	0,037	0,063	NO
Tramo 7	4,6	35000	700	4,79E-05	4,74	0,042	0,058	NO
Ductos entre CBBC y SMBC	5,0	18000	700	5,81E-05	5,76	0,055	0,045	NO
Ductos entre SMBC y tachos BC	4,4	26000	700	4,51E-05	4,46	0,037	0,063	NO
Pre calentador vahos 1	2,5	3000	1300	5,08E-05	5,02	0,013	0,087	NO
Pre calentador vahos 2	3,2	3000	1300	7,31E-05	7,24	0,024	0,076	NO
Pre calentador vahos 3	8,2	3000	2165	2,50E-04	24,90	0,126	0	SI
Pre calentador vahos 4	8	3000	1300	2,93E-04	29,14	0,239	0	SI

Siendo:

- ❖ t_{\min} : Espesor mínimo actual del equipo o parte (mm).
- ❖ L : Longitud característica del equipo o parte (mm).
- ❖ Do : Diámetro exterior de equipo o parte (mm).
- ❖ P_a : Presión externa admisible (MPa)
- ❖ P_{mo} : Presión mínima de operación (absoluta) (MPa).

En la tabla 4.1 se puede apreciar que el manto con mayor nivel de criticidad corresponde al del pre calentador de vahos 1. Su manto, cuyo espesor alcanza apenas 2,5mm, solo le permite operar de a una presión mínima de 0,08713 MPa absoluto. Los elementos interiores de los equipos, como por ejemplo los platos internos de las columnas barométricas y placas deflectoras en separadores de mieles, no fueron considerados en los cálculos debido a que se desconoce su estado no pudiendo ser evaluados como elementos rigidizantes interiores.

Tabla 4.2 Resultados de presión admisible por cabezales y tapas de equipos con espesores mínimos actuales.

Presión admisible por cabezales y tapas de equipos con espesores mínimos actuales						
Equipo y parte	Datos			Resultados		
	Tipo	Esp. Mín. Actual	Observación	P_a	P_{mo}	Cumple
		mm		Mpa	Mpa	
Columna barométrica A						
Tapa superior	Cónica	11	Considerar tapa plana	0,072	0,028	NO
Tapa inferior	Cónica	S/M	No existen datos	-	-	-
Columna barométrica BC						
Tapa superior	Cónica	11,8	Bajo espesor general	0,083	0,017	NO
Tapa inferior	Cónica	S/M	No existen datos	-	-	-
Separador de mieles A						
Tapa superior	Toriesférica	S/M	No existen datos	-	-	-
Tapa inferior	Cónica	5,1	Considerar tapa plana	0,036	0,064	NO
Separador de mieles BC						
Tapa superior	Toriesférica	3,1	Bajo espesor general	0,036	0,064	NO
Tapa inferior	Cónica	3,1	Considerar tapa plana	0,020	0,080	NO
Pre calorador vahos 1	toriesferica	S/M	No existen datos	-	-	-
Pre calorador vahos 2	toriesferica	S/M	No existen datos	-	-	-
Pre calorador vahos 3	toriesferica	S/M	No existen datos	-	-	-
Pre calorador vahos 4	toriesferica	S/M	No existen datos	-	-	-
Reducciones	Cónicas	8,4	Todas iguales	2,580	0	SI

La presión mínima de operación (P_{mo}) deseada es de 0,01 MPa absoluto pero se puede observar que la mayoría de los equipos y ductos no cumple con las condiciones requeridas para alcanzar lo deseado.

En el caso de las tapas y cabezales el equipo más crítico es el separador de mieles BC, marcado con letras rojas en la tabla 4.2, cuyo cabezal cónico inferior tiene un espesor de apenas 3,1mm.

Con la información entregada por las tablas 4.1 y 4.2 se establece que la presión mínima de operación del sistema, en su condición actual y siguiendo la normativa y exigencias del código ASME, es de 0,08 MPa absoluto y debería llegar a 0,01 MPa Absoluto.

4.3.2 Espesores mínimos requeridos por elementos del sistema para operar a 0,01 MPa de presión absoluta

Considerando los equipos con sus dimensiones originales, mostradas en los planos del ANEXO E, se puede calcular el espesor que requiere cada uno de ellos para alcanzar la condición de operación deseada (0,01 MPa). En las tablas 4.3 y 4.4 se muestran los resultados del análisis para el cual se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Los equipos que si cumplen con los requisitos y ya poseen anillos rigidizantes en su estructura serán sometidos a cálculo considerando estos elementos lo cual permitirá conocer el valor de espesor en que dejarían de cumplir con el espesor exigido por el código ASME.

Tabla 4.3 *Espesores mínimos requeridos por mantos para operar a 0,01MPa absoluto.*

Condición mínima requerida por mantos para operar a 0,01MPa absoluto							
Equipo	Datos		Resultados				
	L	Do	Factor A	Factor B	t _{min}	t _{recomendado}	t _{comercial}
	mm	mm			mm	mm	mm
Columna barometrica A (CBA)	5000	1816	1,55E-04	15,355	7,98	9,58	10
Columna barometrica BC (CBBC)	5000	1816	1,55E-04	15,355	7,98	9,58	10
Separador de mieles A (SMA)	3100	2816	2,20E-04	21,899	8,68	10,42	12
Separador de mieles BC (SMBC)	2000	1816	2,20E-04	21,894	5,60	6,72	8
Ductos entre CBA y SMA	2280	900	1,59E-04	15,771	3,85	4,62	6
Ductos entre SMA y Tachos A							
Tramo 1	7500	900	9,20E-05	9,121	6,66	7,99	8
Tramo 2	7500	900	9,20E-05	9,121	6,66	7,99	8
Tramo 3	1300	700	1,77E-04	17,634	2,68	3,22	6
Tramo 4	1300	700	1,77E-04	17,634	2,68	3,22	6
Tramo 5	30000	700	8,09E-05	8,022	5,89	7,07	8
Tramo 6	35000	700	8,07E-05	7,999	5,91	7,09	8
Tramo 7	35000	700	8,07E-05	7,999	5,91	7,09	8
Ductos entre CBBC y SMBC	18000	700	8,32E-05	8,244	5,73	6,88	8
Ductos entre SMBC y tachos BC	26000	700	8,20E-05	8,130	5,81	6,98	8
Pre calentador vahos 1	3000	1300	1,63E-04	16,157	5,43	6,52	8
Pre calentador vahos 2	3000	1300	1,63E-04	16,157	5,43	6,52	8
Pre calentador vahos 3	3000	2165	2,04E-04	20,257	7,22	8,66	10
Pre calentador vahos 4	3000	1300	1,63E-04	16,157	5,43	6,52	8

Tabla 4.4 Espesores mínimos requeridos por tapas de equipos para operar a 0,01 MPa Absoluto.

Condición mínima requerida por tapas, cabezales y reducciones para operar a 0,01Mpa abs.				
Equipo y parte	Datos	Resultados		
	Tipo	$t_{min\ req.}$	$t_{recomendado}$	$t_{comercial}$
		mm	mm	mm
Columna barométrica A				
Tapa superior	Cónica	5,71	6,85	8
Tapa inferior	Cónica	6,52	7,82	8
Columna barométrica BC				
Tapa superior	Cónica	5,71	6,85	8
Tapa inferior	Cónica	6,52	7,82	8
Separador de mieles A				
Tapa superior	Toriesférica	7,58	9,09	10
Tapa inferior	Cónica	8,72	10,46	12
Separador de mieles BC				
Tapa superior	Toriesférica	4,89	5,86	6
Tapa inferior	Cónica	5,31	6,37	8
Pre calentador vahos 1	Toriesférica	Sin datos dimensionales	-	-
Pre calentador vahos 2	Toriesférica	Sin datos dimensionales	-	-
Pre calentador vahos 3	Toriesférica	Sin datos dimensionales	-	-
Pre calentador vahos 4	Toriesférica	Sin datos dimensionales	-	-
Reducciones	Cónicas	2,06	2,47	6

Siendo:

- ❖ t_{min} : Espesor mínimo requerido (mm).
- ❖ t_{rec} : Espesor mínimo recomendado (mm).
- ❖ $t_{comercial}$: Espesor comercial más cercano disponible (mm).

El espesor mínimo recomendado corresponde al mínimo requerido más el sobre espesor para compensar los efectos de la corrosión. Para todos los cálculos se consideró un sobre espesor de 20% dado que el ambiente de operación es bastante agresivo. Los espesores recomendados mostrados deben ser adaptados a las dimensiones comerciales existentes tendiendo siempre a los valores más altos del parámetro en cuestión.

La dimensión más influyente en los cálculos de presión admisible es el diámetro exterior del recipiente, esto se debe a que la mayoría de los cálculos se basa en los cocientes de las fórmulas (3.1) y (3.2) en las cuales el único parámetro que se ocupa para ambas operatorias es el mencionado.

4.3.3 Propuesta de reparación del sistema de vacío

Según los datos entregados por las tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 se puede evaluar la forma de lograr la operación del sistema a 0,01 MPa de presión absoluta. Para este fin se debe recurrir tanto a mejoras como a reemplazo de algunas partes de los equipos o de ductos. Los resultados de la propuesta de reparación se presentan en la tabla 4.5 la cual se organiza en columnas que indican el nombre del equipo, la no conformidad y propuesta de mejora del mismo.

Con la propuesta de reparación se busca establecer una opción que permita lograr el mejoramiento del sistema para operar en las condiciones deseadas sin necesidad de detenerlo por un largo periodo de tiempo para su completo reemplazo lo que significaría para la empresa grandes pérdidas económicas por no poder elaborar su producto, además de una posible pérdida de clientes por el mismo hecho.

Tabla 4.5 Propuesta de reparación para sistema de vacío.

Ítem	Cumple requisitos	Justificación	Propuesta de mejora
Columna barométrica A	No	Manto debería tener espesor mínimo de 7,98 mm el cual no se cumple	Reducir longitud característica de manto instalando anillos atiesadores cada 1000 mm (sección rectangular 10mmx75mm)
		Uniones soldadas de acometidas de vapor presentan corrosión y existen deformaciones leves en manto	Instalar ponchos de refuerzo en entrada de acometida de vapor (espesor de 10mm)
Columna barométrica BC	No	IDEM COLUMNA BAROMÉTRICA A	IDEM COLUMNA BAROMÉTRICA A
Separador de mieles A	No	Manto debería tener espesor mínimo de 8,682 mm el cual no se cumple	Reducir longitud característica instalando anillos atiesadores cada 750 mm (sección rectangular 10mmx100mm)
		Filtraciones en uniones soldadas de aberturas en manto	Instalación de ponchos de refuerzo en boquillas (espesor de 10mm)
		Deformaciones en tapa toriesférica y cabezal cónico inferior con bajo espesor	Fabricar tapa toriesférica (espesor recomendado de 10mm) y cabezal cónico inferior (espesor recomendado de 12 mm)
Separador de mieles BC	No	Espesor de manto al borde de mínimo requerido (espesor de falla)	Reducir longitud característica instalando anillos atiesadores cada 670 mm (sección rectangular de 10mmx63mm)
		Filtraciones en uniones soldadas de aberturas en manto	Reparación uniones soldadas en mal estado y posterior instalación de ponchos de refuerzo en todas las aberturas (espesor mínimo recomendado 8mm)
		Espesores mínimos requeridos por tapa superior toriesférica y cabezal cónico inferior no se cumplen	Fabricar tapa toriesférica (espesor recomendado 6mm) y cabezal cónico inferior (espesor mínimo de 8mm)
Ductos entre columna A y separador de mieles A	No	Porción de ducto y reducciones en mal estado en zona de llegada a columna barométrica	Reemplazar porción de ducto 900 mm de diámetro en mal estado (5 metros en 10mm de espesor)
			Instalar elementos de rigidización cada 1000 mm para optimizar desempeño de nuevo ducto (8mm x 50mm)

Ductos entre separador de mieles A y tachos cocedores A			
Tramo 1	No	No se cumple con los espesores mínimos recomendados.	Instalar porción de ducto de 900 mm nuevo (7,5 metros en 8mm de espesor)
Tramo 2			Rigidizar cada 2000 mm para mejorar desempeño ducto (sección rectangular de 10mm x 50mm)
Tramo 3	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
Tramo 4			
Tramo 5	No	No se cumple con espesor mínimo recomendado en tramos 6 y 7	Instalar porción de ducto de 700 mm nuevo (24 metros en espesor de 8mm)
Tramo 6			Rigidizar cada 2000 mm para mejorar desempeño ducto (sección rectangular de 8mm x 50mm)
Tramo 7			
Ductos entre columna BC y separador de mieles BC	No	No se cumple con espesor mínimo recomendado en zona de llegada a columna	Reemplazar porción de ducto de 700mm en mal estado (6 metros en espesor de 8mm) Rigidizar cada 1500 mm para mejorar desempeño del nuevo ducto (sección rectangular de 8mm x 50 mm)
Ductos entre separador de mieles BC y tachos cocedores BC			
Tramo 1	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
Tramo 2	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
Tramo 3	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
Tramo 4	No	No se cumple con el espesor mínimo recomendado de 5,814 mm	Reemplazar porción de ducto de 700mm donde se presentan bajos espesores (6 metros en espesor 8mm) Rigidizar totalidad del ducto cada 2000mm para mejorar desempeño del mismo (sección rectangular de 8mm x 50mm)
Pre calentador de vahos 1	No	Manto debería tener espesor mínimo de 5,432 mm el cual no se cumple Deformaciones evidentes en manto que reducen presión admisible en ducto	Reemplazar manto de equipo (espesor mínimo recomendado de 8mm)
Pre calentador de vahos 2	No	IDEM PRE CALENTADOR DE VAHOS 1	IDEM PRE CALENTADOR DE VAHOS 1
Pre calentador de vahos 3	Si	CUMPLE	CUMPLE
Pre calentador de vahos 4	Si	CUMPLE	CUMPLE
Eventualidades	No	Reparaciones varias	Reparaciones varias

En esta propuesta de reparación fueron consideradas las dimensiones de materiales comerciales más cercanas a las calculadas con las metodologías pertinentes (siempre tendiendo a los valores mayores más cercanos). Los datos de dimensiones de materiales comerciales disponibles se muestran en el ANEXO F.

4.3.3.1 Esquematización para instalación de anillos rigidizantes en equipos

A continuación se muestran los esquemas simplificados de instalación de anillos rigidizantes en columnas barométricas y separadores de mieles además de las respectivas exigencias y opciones de fijación que ofrece el código.

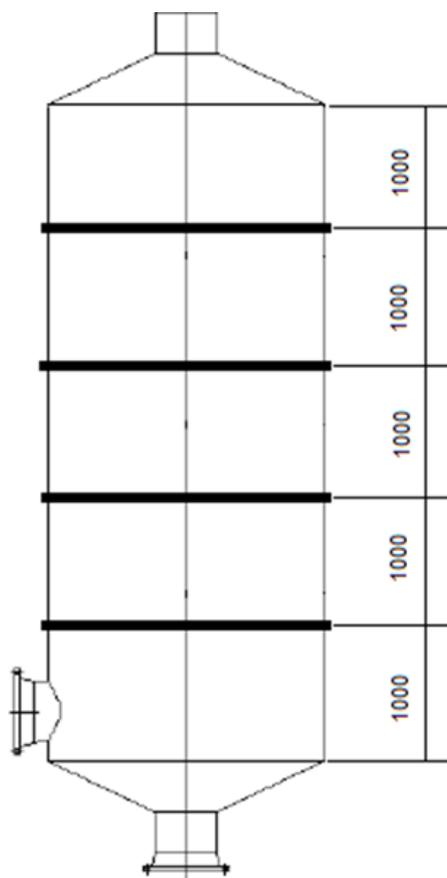


Figura 4.1 Esquema de rigidización de columnas barométricas (Fuente: elaboración propia).

Dado que las columnas barométricas A y BC poseen las mismas dimensiones se adopta la misma configuración de rigidización para ambas. Con esta mejora se garantiza que el equipo puede operar a la presión nominal de 0,01 MPa con una reducida posibilidad presentar problemas o colapso en su manto.

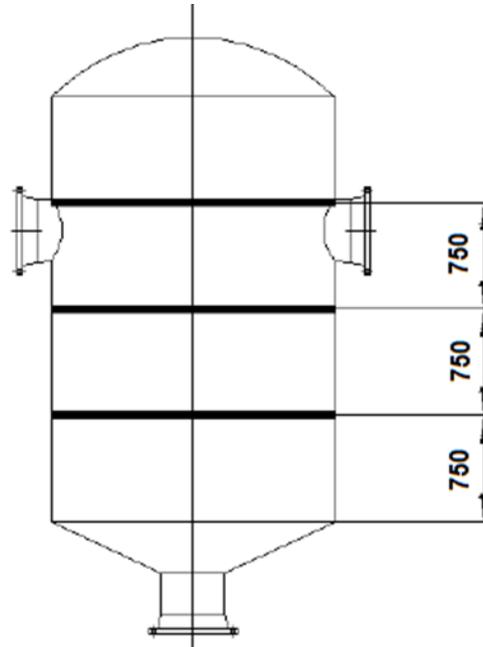


Figura 4.2 Esquema simplificado rigidización separador de mieles A (Fuente: elaboración propia).

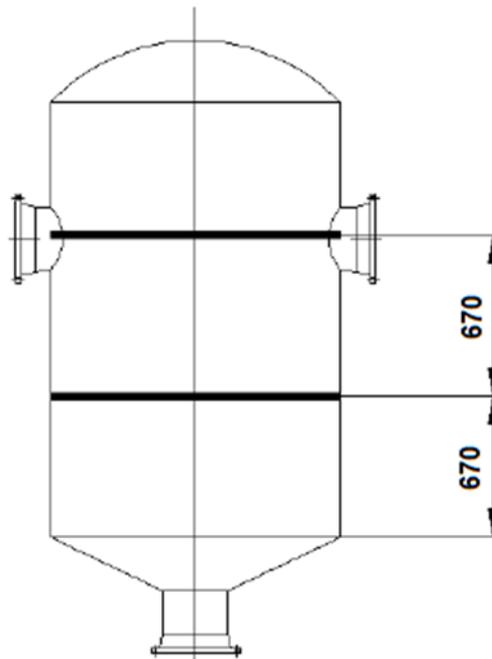


Figura 4.3 Esquema simplificado rigidización separador de mieles BC (Fuente: elaboración propia).

Se consideran dos esquemas dado que los separadores de mieles no poseen las mismas dimensiones. La rigidización de ductos se realiza respetando las dimensiones indicadas en la tabla 4.5 y basándose en la figura 3.1.

➤ Requisitos y condiciones de fijación de anillos rigidizantes

Es muy importante instalar de forma correcta los elementos de rigidización para lograr así que cumplan de forma plena su función, el código entrega las siguientes guías y opciones de uniones por soldadura.

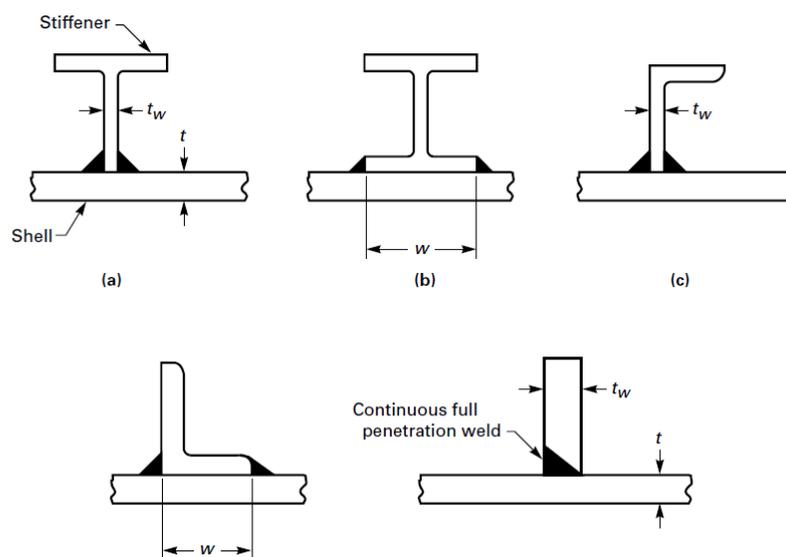
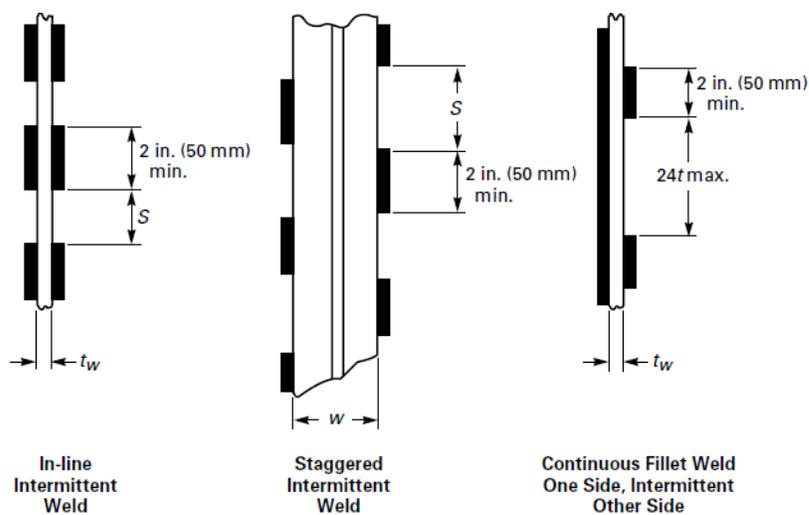


Figura 4.4 Métodos aceptables de instalación de anillos rigidizantes (Fuente: Código ASME).



$$S \leq 8t \text{ external stiffeners}$$

$$S \leq 12t \text{ internal stiffeners}$$

Figura 4.5 Exigencias de uniones soldadas para elementos rigidizantes (Fuente: Código ASME).

4.3.3.2 Esquematación para instalación de ponchos de refuerzo en equipos

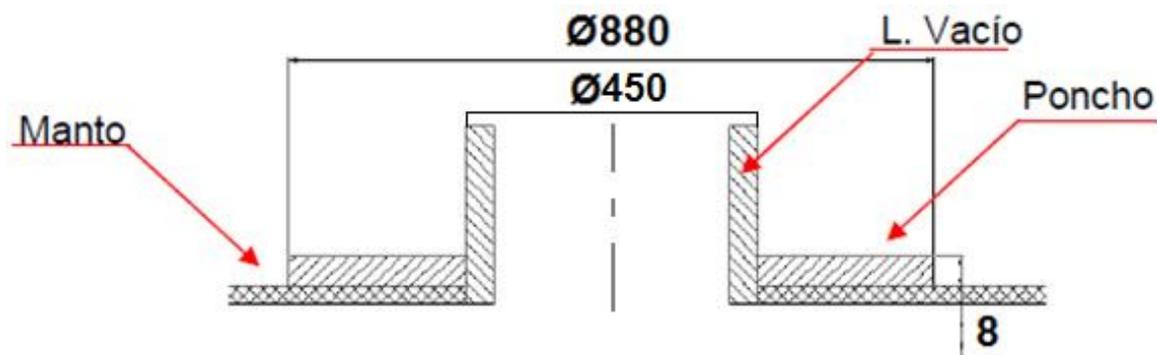


Figura 4.6 Esquema simplificado de instalación de ponchos de refuerzo en entrada de vahos columnas barométricas (Fuente: elaboración propia).

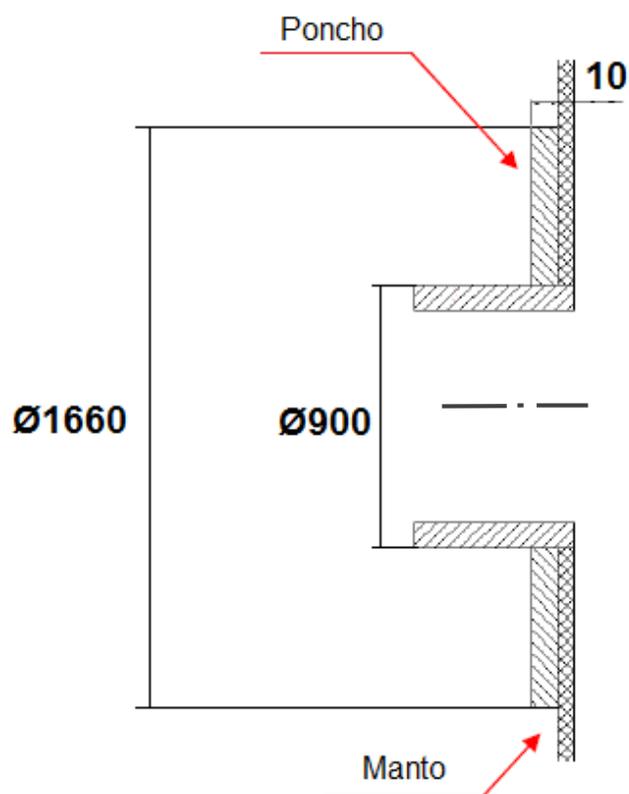


Figura 4.7 Esquema simplificado de instalación de poncho de refuerzo en boquillas de separador de mieles A (Fuente: elaboración propia).

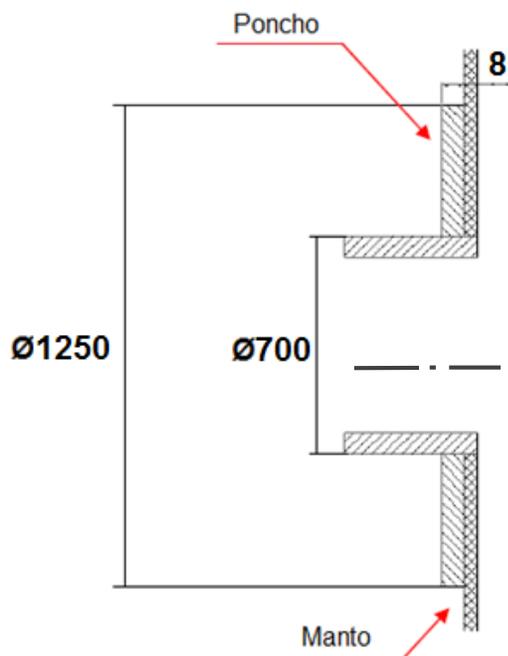


Figura 4.8 Esquema simplificado de instalación de poncho de refuerzo en boquillas de separador de mieles A (Fuente: elaboración propia).

La forma correcta de instalar los ponchos de refuerzo es la que se puede observar en la figura 3.7 la cual contempla uniones soldadas entre el poncho y la boquilla y entre el poncho y el manto del recipiente. La altura requerida en los filetes de soldadura se muestra a continuación:

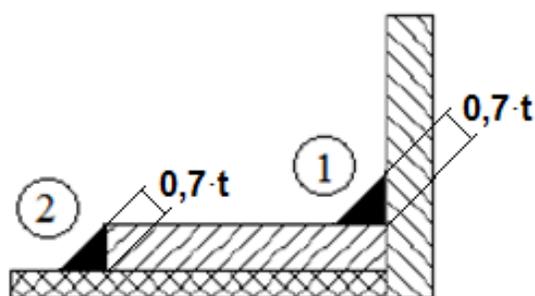


Figura 4.9 Esquema simplificado de dimensiones requeridas por uniones soldadas de ponchos de refuerzo (Fuente: elaboración propia).

- Unión 1: La altura mínima del filete debe ser 0,7 veces el espesor mínimo requerido por el manto del recipiente y debe proyectarse por todo el contorno del poncho.
- Unión 2: la altura mínima del filete debe ser 0,7 veces el espesor del poncho de refuerzo y debe proyectarse por todo el contorno del poncho.

Con las reparaciones anteriormente propuestas en la tabla 4.5 e ilustradas en su mayoría en las figuras 4.1 a 4.9 los equipos y partes analizadas cumplirían con el valor de presión nominal de operación correspondiente a 0,01 MPa absoluto de forma segura.

4.4 Efectos de elementos rigidizantes en equipos

Los elementos rigidizantes tienen como objetivo mejorar el desempeño de los equipos mediante, como su nombre lo indica, la rigidización del sistema en que serán instalados. Para demostrar lo anterior es que se construye un modelo de un recipiente cilíndrico de prueba con un espesor de pared de 2,5 mm, espesor existente en equipo del sistema de vacío que falló, y luego se realiza un análisis de elementos finitos del mismo en condiciones de operación iguales a las buscadas por la empresa (0,01 MPa absoluto). El segundo paso es agregar al modelo un par de anillos rigidizantes y repetir el análisis FEA para establecer las comparaciones y conclusiones pertinentes. La modelación y análisis se realizan por medio de Autodesk Inventor 2015 y Autodesk Simulation 2015 respectivamente.

4.4.1 Modelo

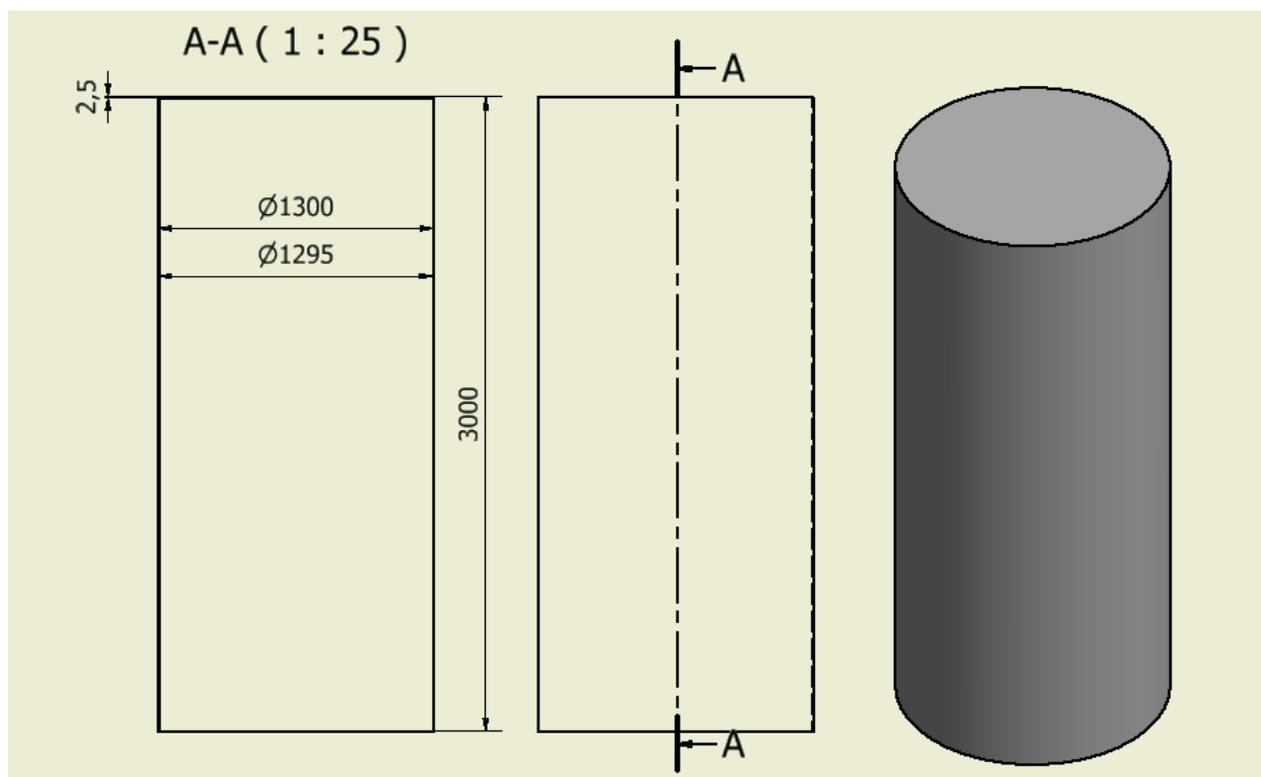


Figura 4.10 Modelo recipiente de prueba (Fuente: elaboración propia).

4.4.2 Simulación modelo sin anillos en condiciones de operación deseadas

Discretización y condiciones de borde de equipo sin anillos rigidizantes:

- Número de elementos: 11402
- Tipo de elemento: Brick
- Restricciones: Cara base sin traslación en ningún eje.
- Material:
 - Tipo: ASTM A-36
 - Límite de fluencia mínimo: 250 MPa
 - Coeficiente de Poisson: 0,26
 - Módulo de elasticidad: 199,95 GPa
- Cargas: Presión de -0,09 MPa aplicada en caras interiores del equipo
- Gravedad: Si

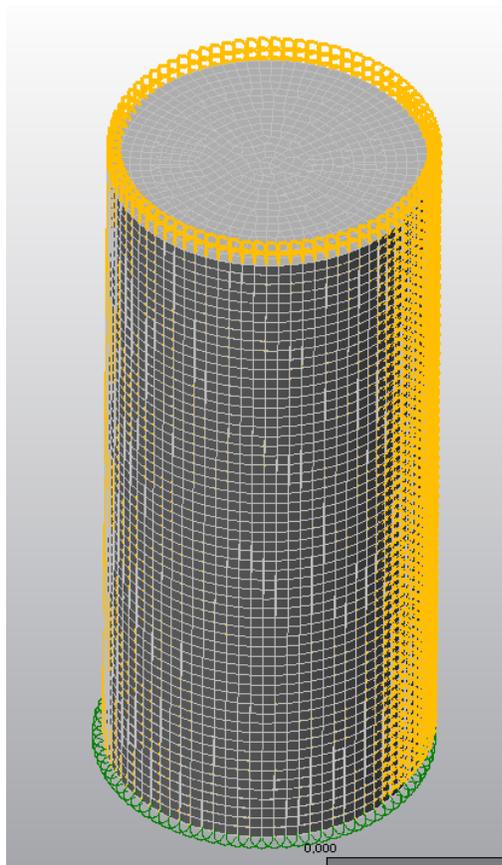


Figura 4.11 Discretización modelo recipiente de prueba (Fuente: elaboración propia).

4.4.3 Análisis estático recipiente sin anillos

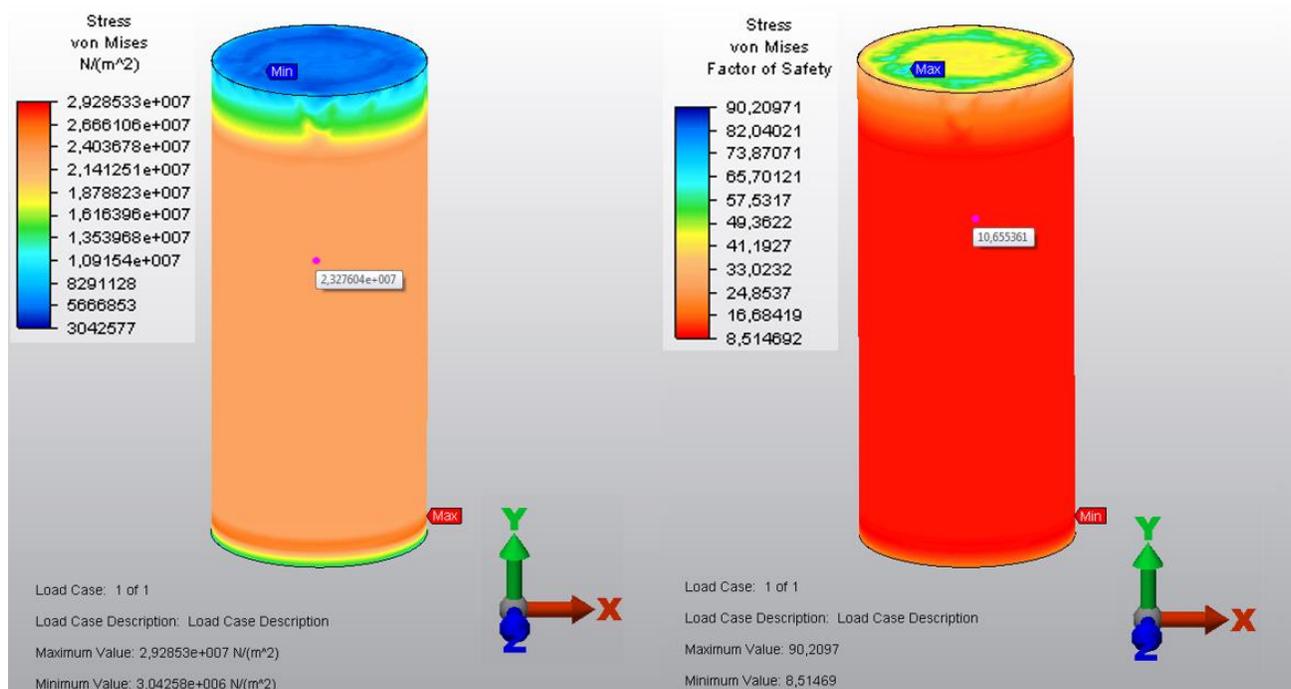


Figura 4.12 Esfuerzo de Von Mises y factor de seguridad en recipiente de prueba.

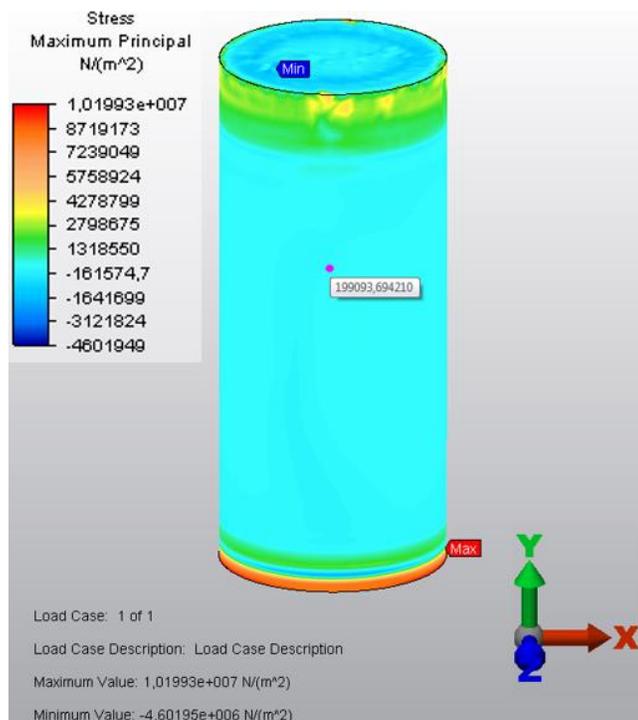


Figura 4.13 Primer esfuerzo principal en recipiente de prueba (Fuente: elaboración propia).

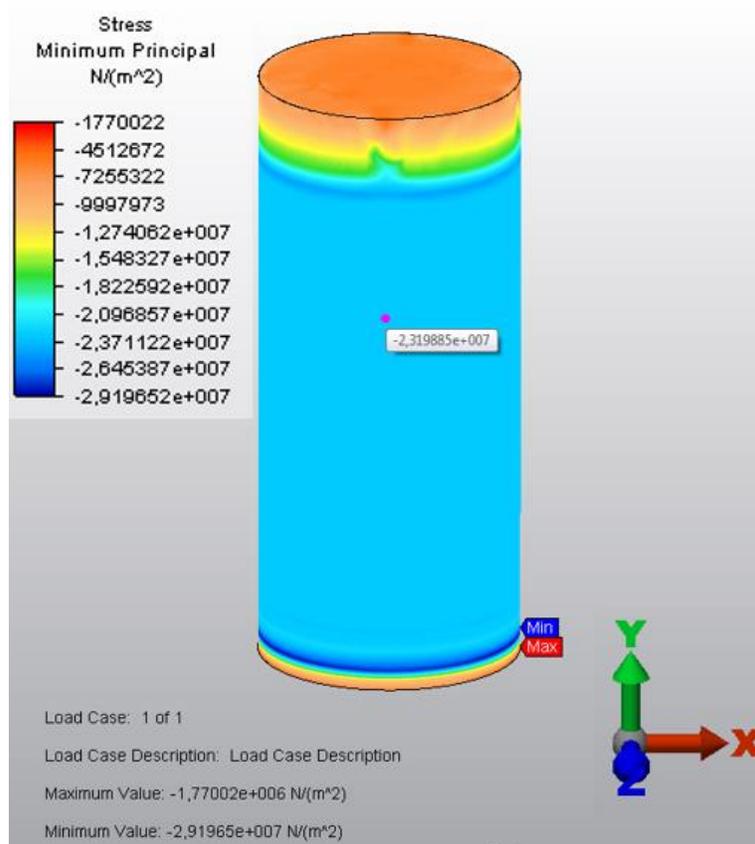


Figura 4.14 Tercer esfuerzo principal recipiente de prueba (Fuente: elaboración propia).

Como es posible observar en las figuras 4.13 y 4.14, el máximo esfuerzo en el manto del recipiente de prueba es producido por cargas de compresión expresadas en las escalas de esfuerzo como números negativos. Es por lo anterior que el criterio de Von Mises no es una buena opción de análisis ya que sus ecuaciones, de cierta forma, mezclan los tipos esfuerzos sin considerar que los efectos que producen cada uno de ellos son distintos.

Cuando un cuerpo esbelto es sometido a esfuerzos de compresión se puede producir un fenómeno llamado pandeo, este puede ser del tipo global o local y consiste en grandes desplazamientos transversales a la dirección del esfuerzo involucrado, produciendo inestabilidad elástica en el sistema. La base de este problema es la falta de rigidez del sistema afectado.

Por todo lo anterior se hace necesario recurrir a un análisis que nos permita visualizar de forma adecuada el problema más importante que afecta al recipiente de prueba y en qué medida ayudan los anillos rigidizantes a solucionarlo. El análisis idóneo es el de carga crítica de pandeo.

4.4.4 Análisis de carga crítica de pandeo

Las condiciones de borde consideradas para este análisis son iguales a las expuestas en 4.4.2 para el análisis estático.

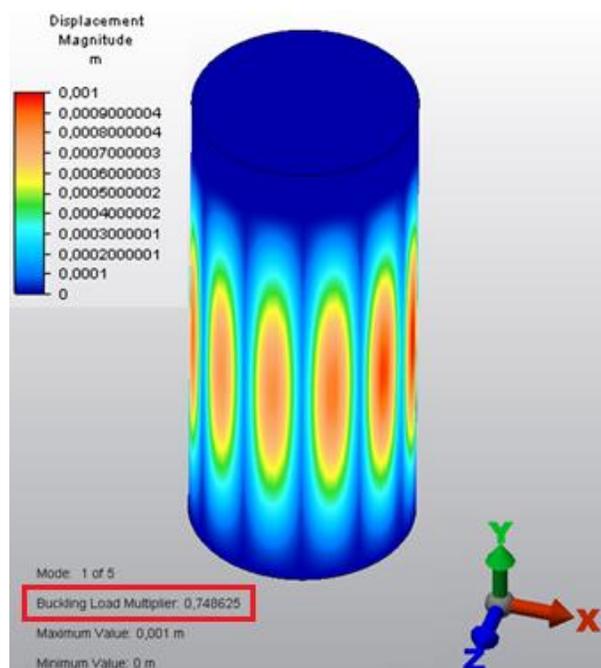


Figura 4.15 Primer modo de falla en análisis de carga crítica de pandeo.

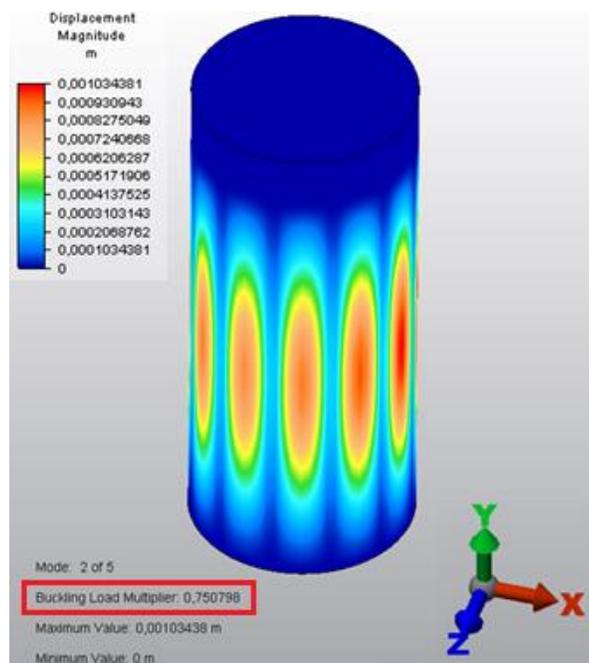


Figura 4.16 Segundo modo de falla en análisis de carga crítica de pandeo.

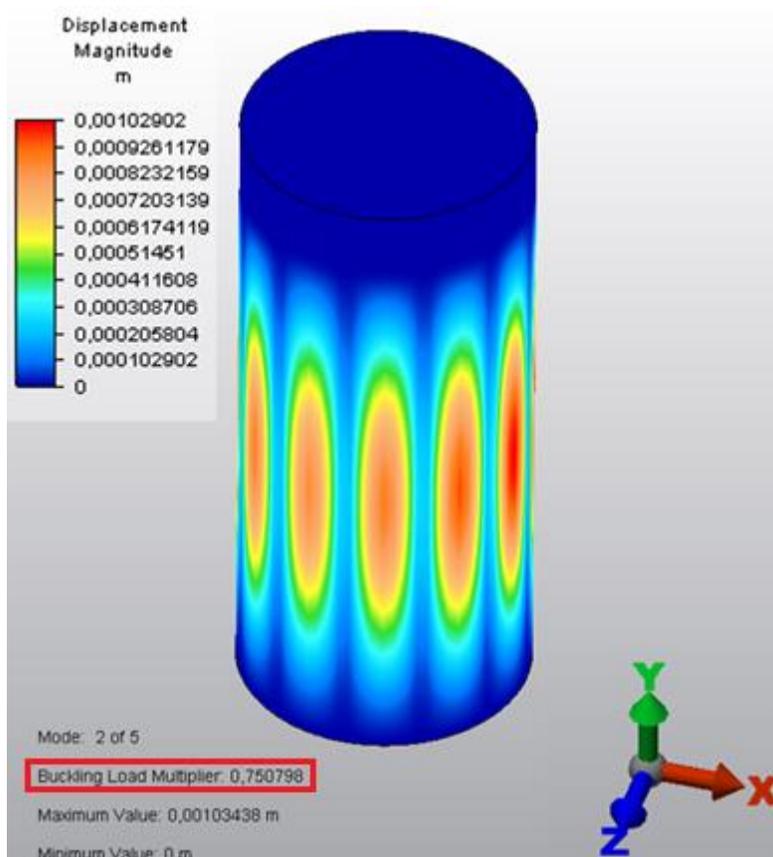


Figura 4.17 Tercer modo de falla en análisis de carga crítica de Pandeo.

Al observar las figuras 4.15, 4.16 y 4.17 es posible observar que el tipo de pandeo presente es global en todos los casos. El multiplicador de carga de pandeo (Buckling Load Multiplier) corresponde al valor por el cual deben ser multiplicadas las cargas existentes en el elemento para que este falle, cuando su valor es igual o inferior a 1 significa que existe falla por pandeo.

En el caso particular del recipiente de prueba se puede concluir que existe falla ya que en sus 3 primeros modos de falla el valor del multiplicador de carga de pandeo es inferior a 1 lo que indica que no existe suficiente rigidez en el sistema.

Luego de observar los resultados entregados por 4.15, 4.16 y 4.17, se repite el ensayo al recipiente de pruebas con 2 anillos rigidizantes en su manto para comprobar el efecto que estos producen con respecto a la rigidez del sistema.

4.4.5 Modelo con anillos

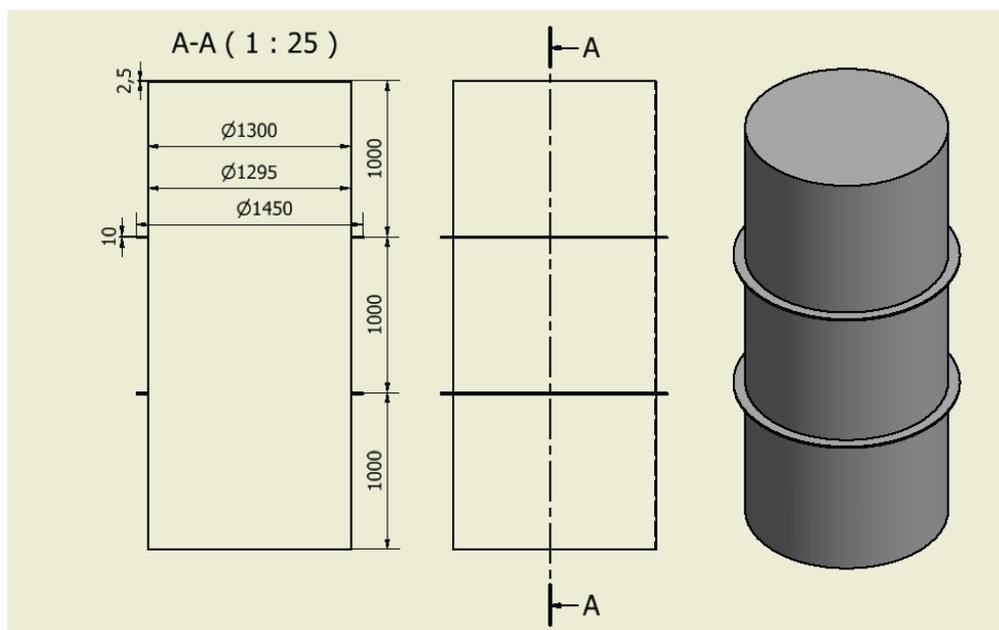


Figura 4.18 Modelo recipiente de prueba con anillos rigidizantes (Fuente: elaboración propia).

NOTA: La sección transversal de los anillos tiene un área de 750 mm^2 (75 mm x 10mm).

4.4.6 Simulación modelo con anillos en condiciones de operación deseadas

Discretización y condiciones de borde de equipo con anillos rigidizantes:

- Número de elementos de área: 11172
- Tipo de elemento: Brick
- Restricciones: Cara base sin traslación en ningún eje.
- Material:
 - Tipo: ASTM A-36
 - Límite de fluencia mínimo: 250 MPa
 - Coeficiente de Poisson: 0,26
 - Módulo de elasticidad: 199,95 GPa
- Cargas: Presión de -0,09 MPa aplicada en caras interiores del equipo
- Gravedad: Si

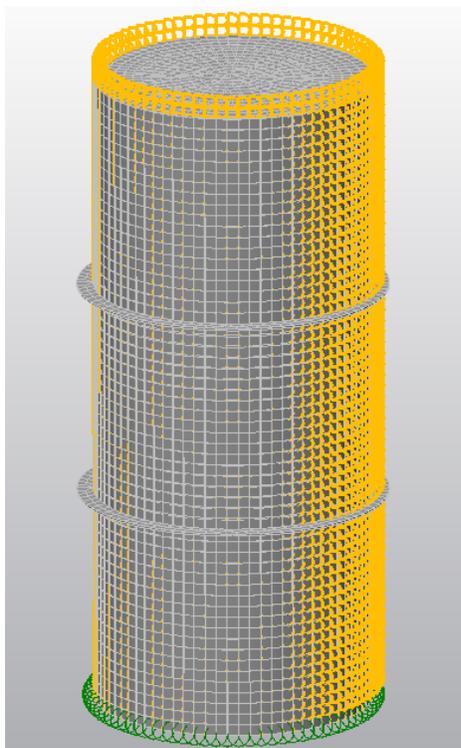


Figura 4.19 Discretización recipiente de prueba con anillos rigidizantes.

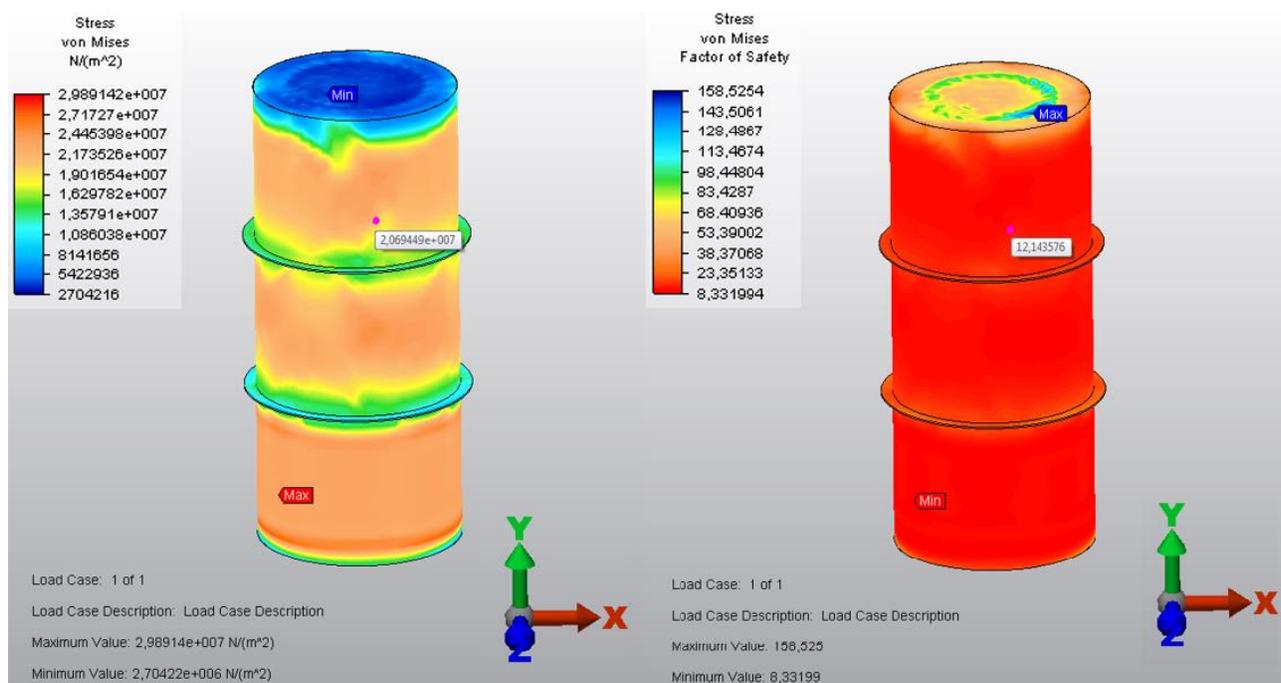


Figura 4.20 Esfuerzo de Von Mises y factor de seguridad en recipiente de prueba.

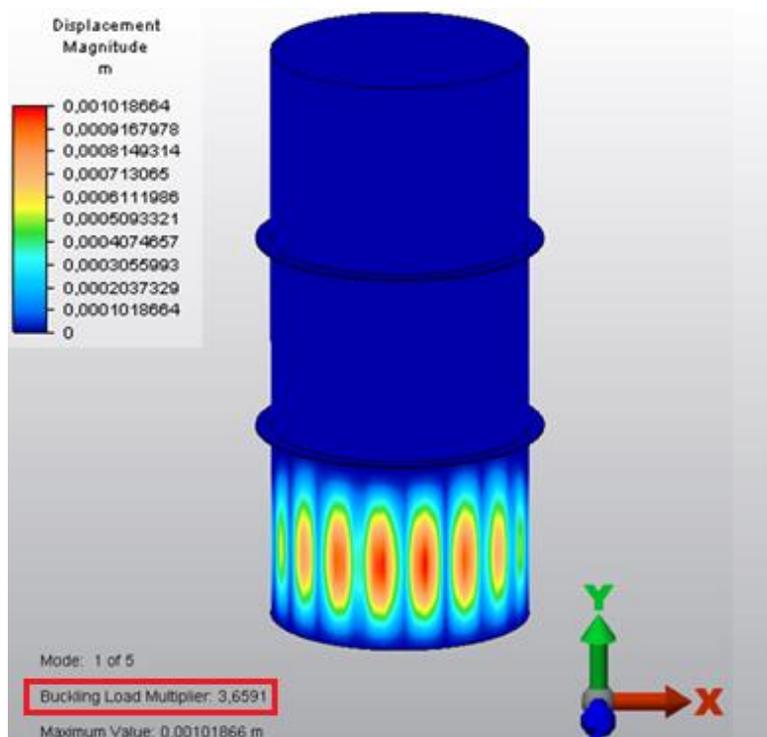


Figura 4.21 Primer modo de falla carga crítica de pandeo recipiente con anillos rigidizantes.

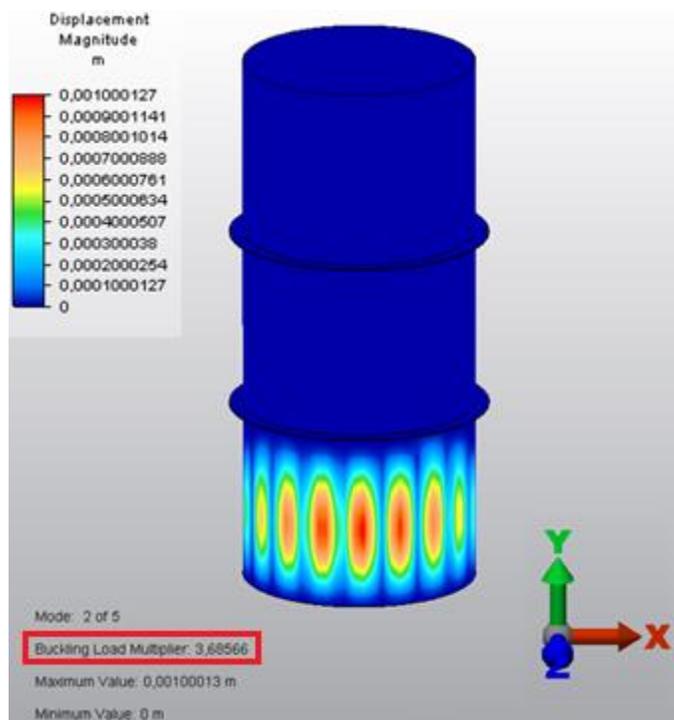


Figura 4.22 Segundo modo de falla carga crítica de pandeo recipiente con anillos rigidizantes.

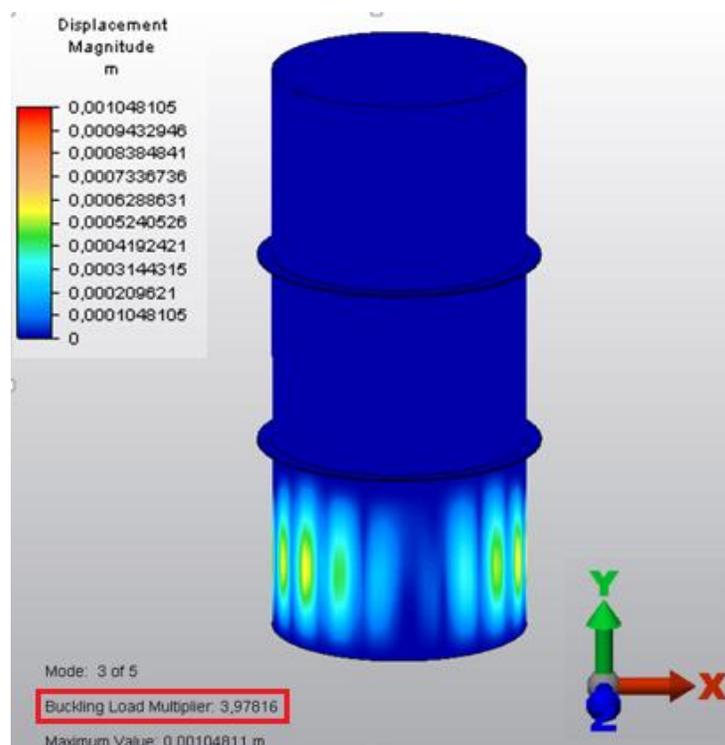


Figura 4.23 Tercer modo de falla carga crítica de pandeo recipiente con anillos rigidizantes.

Al comparar los resultados del análisis de carga crítica de pandeo de los modelos del recipiente de prueba sin anillos y con anillos rigidizantes podemos notar que efectivamente esta aumenta de manera considerable demostrando así mediante análisis de elementos finitos que los elementos rigidizantes aumentan la rigidez del sistema reduciendo el riesgo de pandeo.

4.4.7 Evaluación económica

Brindar seguridad de funcionamiento al sistema de vacío resulta muy importante para la empresa pero al mismo tiempo es necesaria una gran inversión para el logro de este propósito.

En esta parte, correspondiente a evaluación económica, serán considerados dos casos posibles para el aseguramiento del sistema de vacío las cuales consisten en:

- a) Reparación del sistema según Tabla 4.5.
- b) Instalar todos los elementos involucrados en los cálculos según resultados de tablas 4.3 y 4.4 adaptadas a dimensiones comerciales de material.

Al hacer un análisis rápido en cuanto a las dos opciones a considerar se hacen evidentes las siguientes observaciones:

1. La inversión inicial de ambas debería ser considerablemente distinta.
2. La vida útil de cada una ellas debería ser considerablemente distinta.
3. El beneficio que ofrecen ambas opciones es el mismo.

Considerando los tres puntos anteriormente mencionados se puede establecer que el mejor criterio para evaluar la conveniencia entre los dos proyectos es el Costo Anual Equivalente (CAE). Este criterio está asociado básicamente a los costos, vida útil y tasa de descuento de los proyectos a evaluar por lo cual se hace ideal su uso para esta comparación. El cálculo del CAE de un proyecto se hace mediante la siguiente fórmula:

$$CAE = I \cdot \frac{r \cdot (1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (4.1)$$

Siendo:

- ❖ I: inversión inicial
- ❖ r: tasa de descuento
- ❖ n: vida útil del proyecto

Para hacer la evaluación correspondiente se muestran a continuación las tablas de los costos involucrados en cada caso para su posterior evaluación mediante la fórmula (4.1).

a) Reparación del sistema según tabla 4.5:

Los costos totales de reparación son estimados y se basan en experiencias previas de la empresa con respecto a trabajos similares desarrollados en el mismo sistema.

Tabla 4.6 Costos estimados de reparación del sistema de vacío según propuesta de mejora.

Equipo o parte	Mejoras a realizar	Costo final (CLP)	Costo final (USD)
Ductos y accesorios	Rigidizaciones y cambio de algunas porciones	37.376.625	53.625
Columnas barométricas	Rigidización e instalacion de ponchos de refuerzo	8.154.900	11.700
Separadores de mieles	Rigidización, cambio de tapas y cabezales e instalacion de ponchos de refuerzo	8.468.550	12.150
Pre calentadores de VAHOS	Reemplazos de mantos	4.182.000	6.000
Eventualidades	Reparaciones varias	1.394.000	2.000
Costo total proyecto		59.576.075	85.475

Los costos involucrados consideran todas las mejoras propuestas en la tabla 4.5 y las dimensiones de materiales mostradas en el anexo F.

b) Instalación de elementos analizados nuevos

Para este caso las dimensiones de los equipos son las mostradas en los planos del Anexo A.

Los costos de los grandes proyectos en industrias se calculan usando un sistema de tarifas que consideran masa o volumen instalado según corresponda. Para este tipo de proyecto lo más indicado es usar un criterio de precio por masa de material instalado asignado en la tabla a continuación:

Tabla 4.7 Costos estimados de instalación de elementos nuevos para el sistema de vacío.

Equipo o parte	Cantidad	Masa Kg	Costo obra CLP/Kg	Costo final CLP	Costo final USD
Ductos en 900mm	50m	10975	4500,0	49.387.500	98.775
Ductos en 700mm	100m	13655	4500,0	61.447.500	122.895
Accesorios	15	1500	4500,0	6.750.000	13.500
Columna barométrica	2	6700	4500,0	30.150.000	60.300
Separador de mieles	2	5300	4500,0	23.850.000	47.700
Pre calentador de VAHOS	4	7600	4500,0	34.200.000	68.400
Otros	1	1000	4500,0	4.500.000	9.000
Costo estimado de instalación nuevos componentes				210.285.000	420.570
Desinstalar equipos antiguos (20%)				42.057.000	84.114
Costo total proyecto				252.342.000	504.684

Tabla 4.8 Comparación de proyectos con criterio de CAE.

	Inversión	Periodo	Tasa de descuento	CAE	CAE
Proyecto	USD	años	%	CLP/año	USD/año
Reparación de sistema de vacío según propuesta de mejora	59.576.075	5	4%	13.382.402	19.200
Instalación de elementos nuevos en sistema de vacío	252.342.000	30	4%	14.592.963	20.937

CAPITULO 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos en esta habilitación profesional reflejan las exigencias y altos estándares de ingeniería establecidos por el código ASME por lo cual se pueden aplicar con total confianza sobre los equipos y sistemas existentes en la IANSA S.A.

Al detenerse a observar los resultados relacionados con el análisis de la condición actual del sistema es posible notar que la presión externa admisible por el mismo (considerado como un todo) es considerablemente baja y si bien hay algunos equipos que se encuentran en condiciones que pueden ser aceptables hay otros, como es el caso del separador de mieles A y los pre calentadores de VAHOS 1 y 2, que no cumplen de ninguna forma con los requerimientos necesarios para operar bajo la condición que desea alcanzar la empresa (0,01 MPa absoluto como presión de operación equivalente a 0,09 MPa de presión externa admisible) convirtiéndose estos en equipos limitantes que teóricamente no han fallado debido a que las metodologías del código operan mediante el uso del esfuerzo mínimo admisible el cual está muy por debajo del esfuerzo de ruptura del material del que están fabricados. En base a todo lo citado anteriormente se concluye que si el sistema de vacío se repara según lo propuesto en la tabla 4.5 se garantiza que funcionará de forma más segura y continua dado que lo hará bajo condiciones aceptadas y fomentadas por el código formulado para este fin. Al analizar las ecuaciones que permiten el cálculo de presión admisible en mantos de recipientes y ductos, partes elementales del sistema, es posible notar que en esta metodología planteada por el código ASME la dimensión más influyente en lo resultados es el diámetro exterior debido a que se encuentra en los dos cocientes base del cálculo. Lo anterior se condice con los resultados que eventualmente pudiese ofrecer la aplicación de las fórmulas de recipientes de pared delgada, de la mecánica de materiales, con respecto a los mismos equipos en donde siempre el esfuerzo máximo está presente en el eje transversal al recipiente y no al longitudinal.

Con respecto a los análisis de elementos finitos realizados es posible observar que no existe gran diferencia entre los resultados del esfuerzo de Von Mises y factor de seguridad de ambos casos (con y sin anillos rigidizantes), por lo que se hace necesario indagar más profundamente en ambos escenarios para determinar la razón de la pobre variación entre los resultados obtenidos. Observando el primer y tercer esfuerzo principal de ambos casos se hace evidente que el tipo de esfuerzo más influyente en ambas simulaciones es el de compresión.

Debido a que los recipientes de prueba analizados poseen esbeltez y además están sujetos mayormente a cargas de compresión, se concluye que el análisis más idóneo para analizar posibles fallas en ambos

casos es el de carga crítica de pandeo, el cual se produce en presencia de las dos condiciones anteriormente mencionadas. Si bien el pandeo observado en los resultados es del tipo global, la instalación de anillos rigidizantes aumenta considerablemente el valor de la carga crítica que lo produce debido a que aumenta el valor de la rigidez del sistema, causa raíz de los problemas de pandeo.

Aunque la evaluación económica no es planteada como un profundo análisis de costos y beneficios, debido a la inexistencia de una serie de datos necesarios para ello, deja entrever que la propuesta de reparación se convierte en la mejor opción para asegurar el futuro funcionamiento del sistema independiente de la diferencia entre la vida útil proporcionada al mismo por cada una de las opciones. Lo anterior sucede debido a que la gran diferencia de inversiones además de la influencia que tiene la tasa de descuento a lo largo del tiempo se suma a los costos adicionales que surgen al instalar todos los equipos y partes nuevas, como lo es el costo del retiro de los antiguos componentes, que acrecientan desmesuradamente el costo anual equivalente de esta opción.

BIBLIOGRAFÍA

- American Society of Mechanical Engineers. (2004). *Boiler and Pressure Vessels Code*. New York: ASME.
- Beer, F. P., Johnston , E. R., Dewolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2009). *Mecánica de materiales*. McGraw-Hill.
- Castillo, L. J. (2006). *Diseño mecánico de recipientes a presión bajo el código ASME Sección VIII, División 1*. Sartenejas.
- *Catálogo de productos*. (2015). Obtenido de <http://www.sack.cl/productos>
- Mejía Cifuentes, A. G., & Reyes Madrigal, C. A. (2008). *Memoria cálculo, selección y análisis numérico de un recipiente a presión de 600 Ft3 de capacidad* . Distrito Federal de México.
- SII. (2002). *TABLA DE VIDA ÚTIL DE LOS BIENES FÍSICOS DEL ACTIVO INMOVILIZADO* . Obtenido de http://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/bienes_f.htm

ANEXO A

Sistema de vacío – Isométrico sistema de vacío y planos equipos

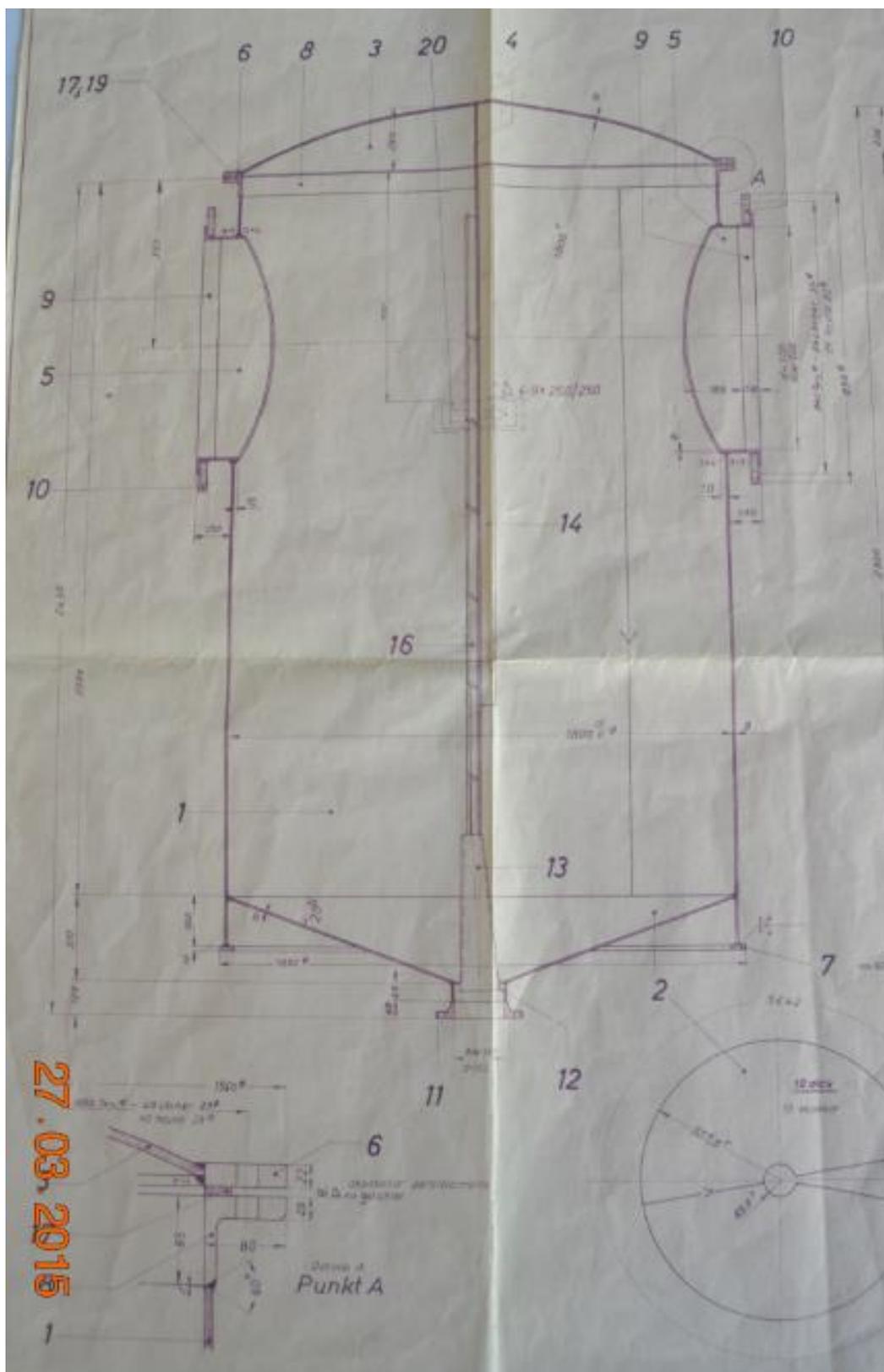


Imagen A-2 Plano separador de mieles BC, circuito BC.

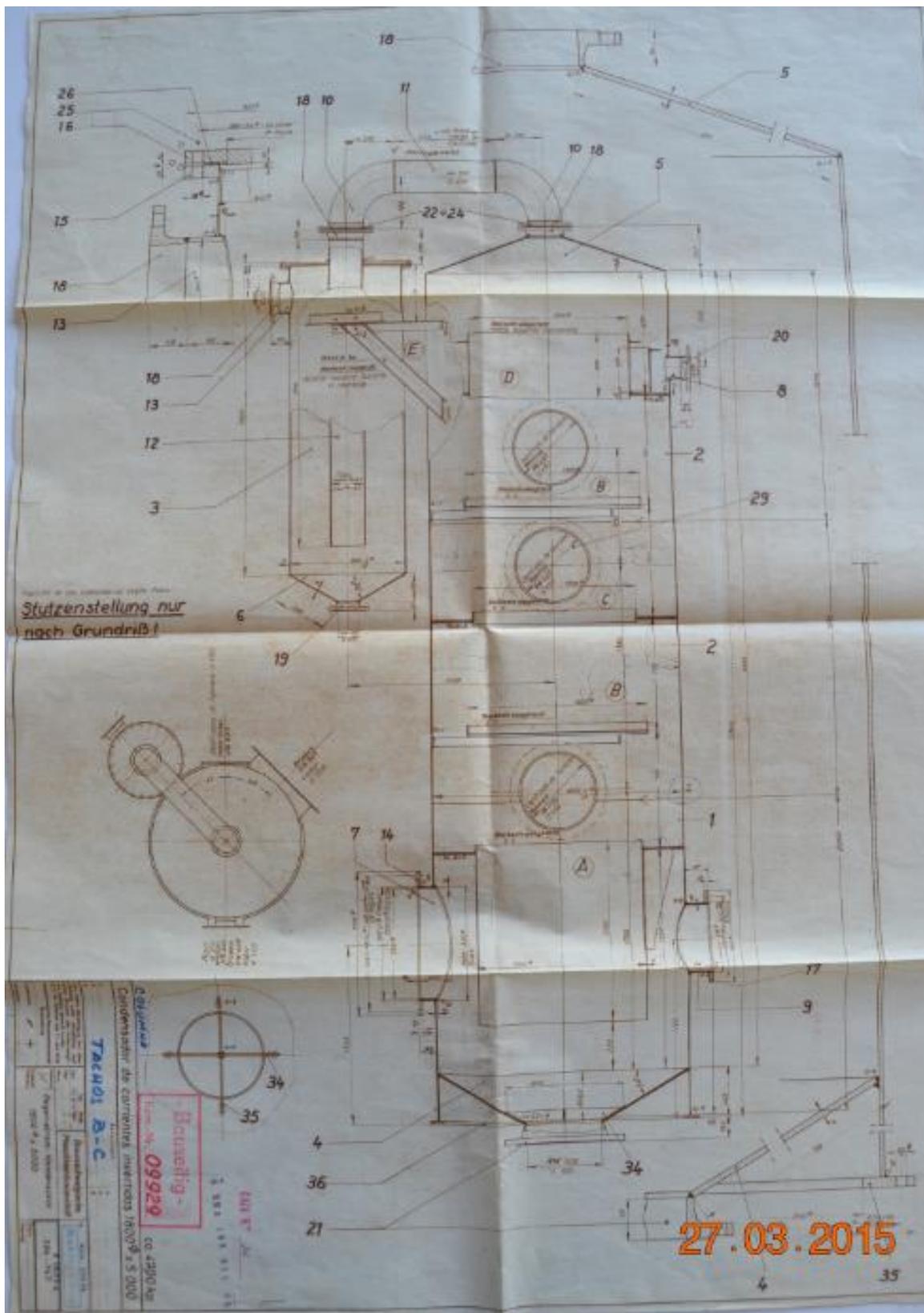


Imagen A-3 Plano columnas barométricas.

ANEXO B

Factor A – Figura y tabla G sección VIII Código ASME

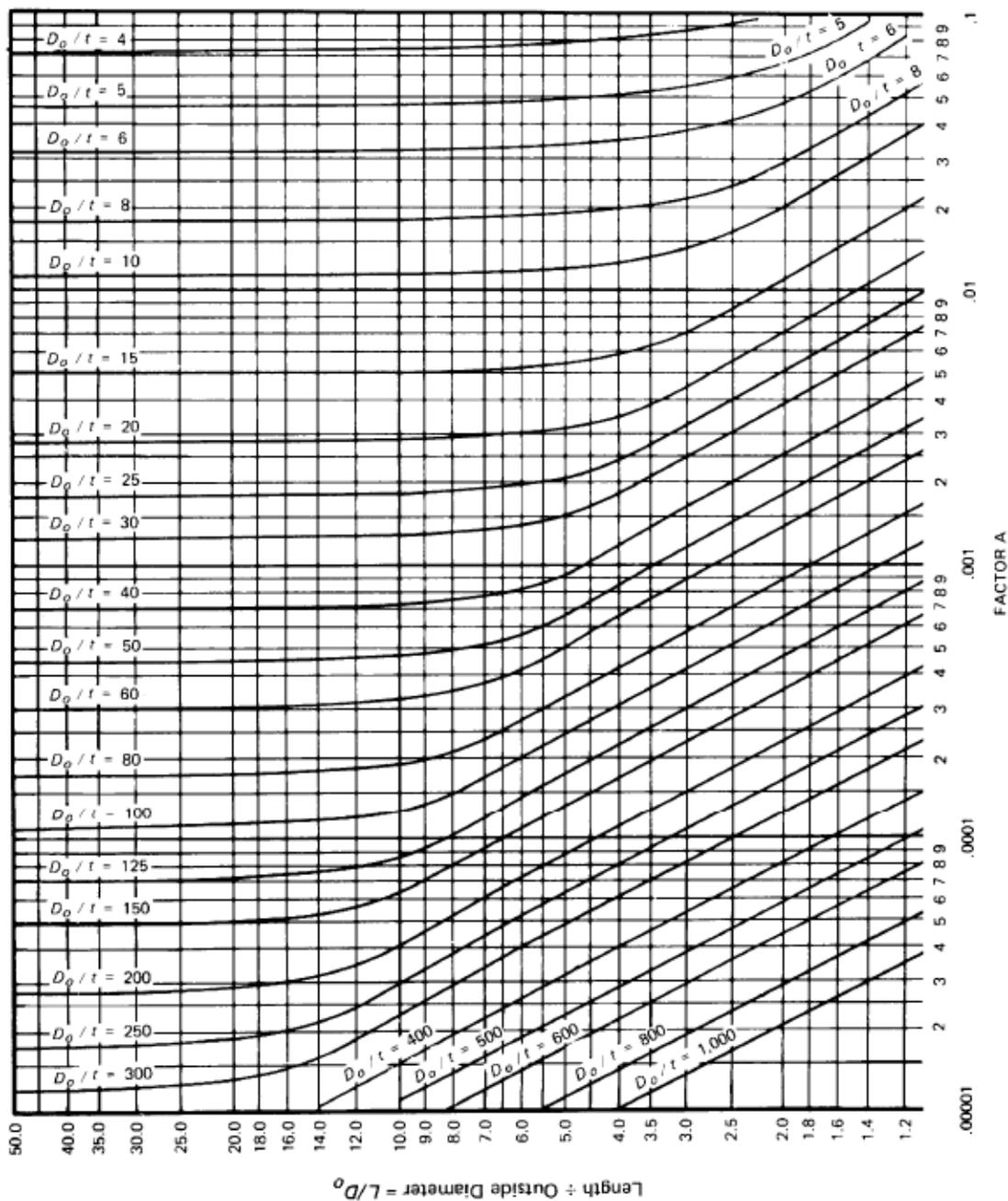


Figura B-1 Carta geométrica para componentes bajo presión externa.

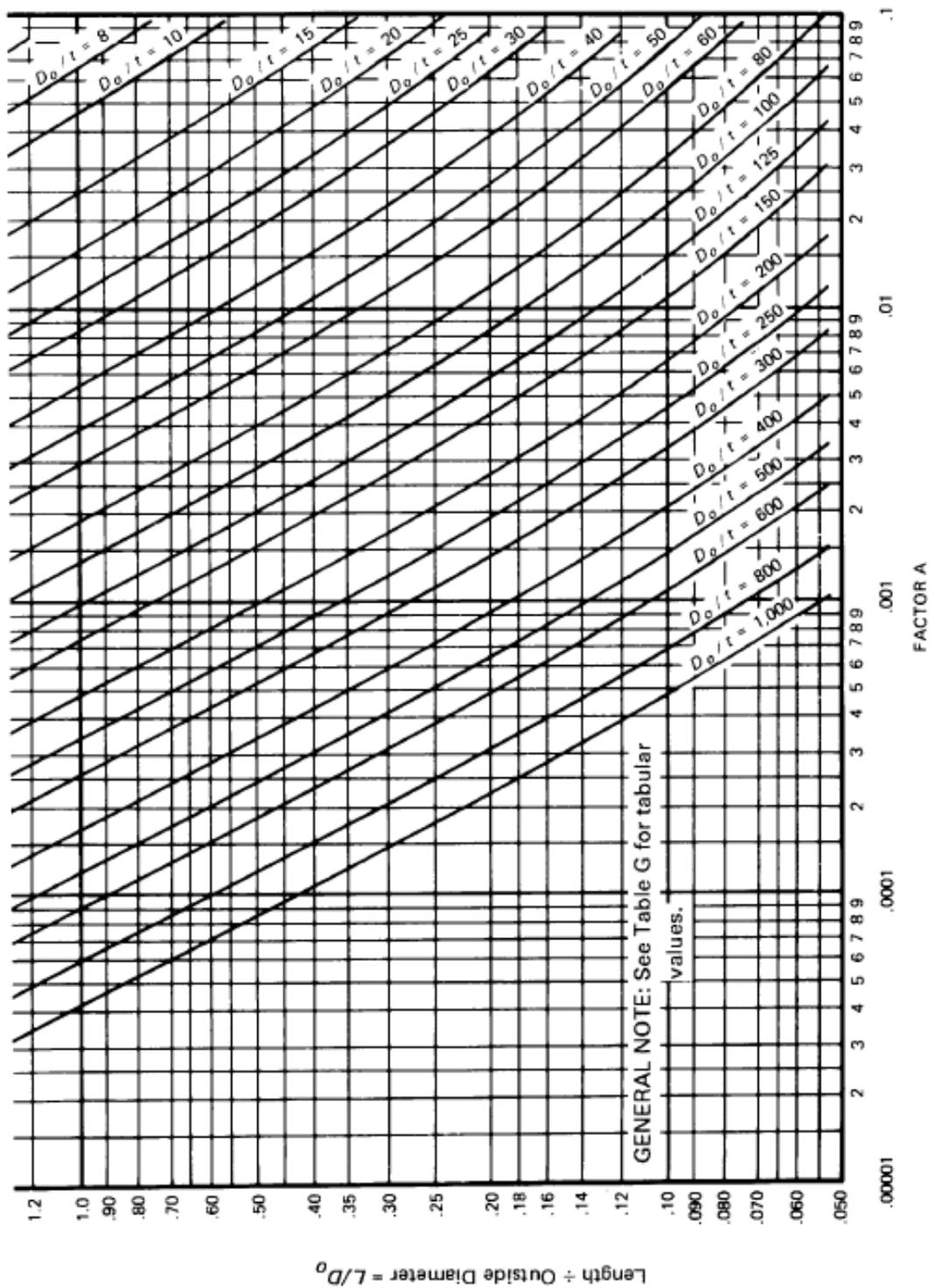


Figura B-1 Carta geométrica para componentes bajo presión externa.

Tabla B-1 Valores tabulados de Factor A

D_0/T	L/D_0	A	D_0/T	L/D_0	A	D_0/T	L/D_0	A	D_0/T	L/D_0	A	D_0/T	L/D_0	A
4	2.2	0.959 -01	8	3.0	0.212 -01	20	0.8	0.203 -01	30	3.0	0.246 -02	50	6.0	0.548 -03
	2.6	0.884		4.0	0.192		1.0	0.156		4.0	0.177		7.0	0.502
	3.0	0.839		5.0	0.184		1.2	0.127		4.4	0.161		8.0	0.478
	4.0	0.783		7.0	0.179		2.0	0.713 -02		5.0	0.147		10.0	0.458
	5.0	0.759		10.0	0.176		3.0	0.446		6.0	0.136		12.0	0.449
	7.0	0.739		20.0	0.174		3.4	0.388		7.0	0.130		16.0	0.444
	10.0	0.729		50.0	0.174		4.0	0.342		10.0	0.125		40.0	0.440
	30.0	0.720					5.0	0.308		30.0	0.122		50.0	0.440
	50.0	0.720	10	0.56	0.964 -01		7.0	0.287		50.0	0.122			
				0.7	0.720		10.0	0.280				60	0.074	0.954 -01
5	1.4	0.929 -01		1.0	0.463		40.0	0.275		0.12	0.864 -01		0.10	0.556
	1.6	0.802		1.2	0.371		50.0	0.275		0.2	0.385		0.14	0.323
	2.0	0.658		2.0	0.201					0.3	0.222		0.2	0.193
	2.4	0.586		2.4	0.165	25	0.2	0.877 -01		0.4	0.155		0.4	0.812 -02
	3.0	0.532		3.0	0.139		0.3	0.484		0.6	0.958 -02		0.6	0.510
	4.0	0.494		4.0	0.124		0.5	0.250		0.8	0.691		0.8	0.371
	5.0	0.478		5.0	0.118		0.8	0.143		1.0	0.539		1.0	0.291
	7.0	0.465		7.0	0.114		1.0	0.111		1.2	0.441		2.0	0.138
	10.0	0.459		10.0	0.112		1.2	0.902 -02		2.0	0.252		3.0	0.886 -03
	30.0	0.454		16.0	0.111		2.0	0.508		4.0	0.117		4.0	0.645
	50.0	0.453		50.0	0.111		3.0	0.323		5.0	0.912 -03		6.0	0.409
							3.4	0.278		6.0	0.804		7.0	0.364
6	1.2	0.837 -01		0.34	0.968 -01		4.0	0.235		7.0	0.756		8.0	0.341
	1.6	0.584		0.4	0.770		4.4	0.219		8.0	0.731		10.0	0.322
	2.0	0.469		0.6	0.453		5.0	0.204		10.0	0.708		14.0	0.310
	2.4	0.411		1.0	0.244		6.0	0.191		16.0	0.692		40.0	0.306
	3.0	0.369		1.2	0.197		7.0	0.186		40.0	0.688		50.0	0.306
	4.0	0.341		2.0	0.109		10.0	0.180		50.0	0.688			
	5.0	0.329		2.4	0.890 -02		30.0	0.176				50	0.088	0.930 -01
	7.0	0.320		3.0	0.691		50.0	0.176		0.1	0.782		0.07	0.608
	10.0	0.316		4.0	0.573					0.2	0.263		0.09	0.391
	30.0	0.312		5.0	0.534		30	0.16	0.904 -01	0.3	0.154		0.10	0.328
	50.0	0.312		6.0	0.516		0.2	0.635		0.4	0.108		0.14	0.196
				10.0	0.497		0.3	0.357		0.4	0.108		0.20	0.120
				40.0	0.490		0.4	0.246		0.6	0.677 -02		0.24	0.950 -02
				50.0	0.490		0.6	0.150		0.8	0.490		0.4	0.516
8	0.74	0.968 -01		0.24	0.982 -01		0.8	0.108		1.0	0.384		0.6	0.328
	0.8	0.875		0.4	0.477		1.0	0.838 -02		2.0	0.181		0.8	0.239
	1.0	0.660		0.6	0.286		1.2	0.683		4.0	0.842 -03		1.0	0.188
	1.6	0.372					2.0	0.388		5.0	0.652		2.0	0.895 -03
	2.0	0.285											2.0	0.141
	2.4	0.242											9.0	0.904 -04

D_o/T	L/D_o	A												
125	10.0	0.837 -04	200	0.08	0.909 -02	250	2.0	0.163 -03	300	40.0	0.123 -04	500	0.6	0.199 -03
	12.0	0.770		0.10	0.659		4.0	0.789 -04		50.0	0.122		0.8	0.148
	14.0	0.740		0.14	0.421		6.0	0.513					1.0	0.118
	20.0	0.713		0.2	0.272		8.0	0.377	400	0.05	0.549 -02		2.0	0.579 -04
	40.0	0.704		0.3	0.171		10.0	0.293		0.06	0.417		4.0	0.282
	50.0	0.704		0.5	0.976 -03		12.0	0.238		0.08	0.278		6.0	0.185
				0.8	0.592		14.0	0.210		0.10	0.208		8.0	0.137
150	0.05	0.338 -01		1.0	0.469		16.0	0.196		0.12	0.166		10.0	0.107
	0.06	0.244		2.0	0.227		20.0	0.118		0.16	0.118		12.0	0.880 -05
	0.08	0.151		4.0	0.110		40.0	0.176		0.2	0.914 -03		4.0	0.140
	0.10	0.108		6.0	0.711 -04		50.0	0.176		0.4	0.429	600	0.05	0.270 -02
	0.12	0.833 -02		8.0	0.520	300	0.05	0.923 -02		0.6	0.280		0.06	0.208
	0.16	0.569		10.0	0.403		0.06	0.690		0.8	0.207		0.08	0.142
	0.2	0.431		12.0	0.338		0.08	0.452		1.0	0.165		0.10	0.108
	0.4	0.194		14.0	0.309		0.10	0.334		2.0	0.808 -04		0.12	0.868 -03
	0.6	0.125		16.0	0.295		0.12	0.264		4.0	0.393		0.16	0.624
	1.0	0.726 -03		20.0	0.283		0.2	0.143		6.0	0.257		0.2	0.486
	2.0	0.349		40.0	0.275		0.4	0.666 -03		8.0	0.189		0.4	0.231
	4.0	0.168		50.0	0.275		0.6	0.433		10.0	0.148		0.6	0.151
	6.0	0.108					0.8	0.321		14.0	0.102		0.8	0.112
	8.0	0.787 -04	250	0.05	0.129 -01		1.0	0.254		16.0	0.882 -05		1.0	0.894 -04
	10.0	0.619		0.06	0.955 -02		2.0	0.124	500	0.05	0.370 -02		2.0	0.439
	12.0	0.553		0.08	0.617		4.0	0.602 -04		0.06	0.284		4.0	0.216
	16.0	0.510		0.10	0.452		6.0	0.393		0.08	0.192		6.0	0.141
	20.0	0.498		0.14	0.293		8.0	0.287		0.10	0.145		8.0	0.104
	40.0	0.489		0.2	0.191		10.0	0.225		0.12	0.116		8.4	0.988 -05
	50.0	0.489		0.4	0.881 -03		14.0	0.156		0.16	0.830 -03	800	0.05	0.165 -02
				0.6	0.572		16.0	0.142		0.2	0.645		0.06	0.129
200	0.05	0.196 -01		0.8	0.422		20.0	0.130		0.4	0.305		0.08	0.892 -03
	0.06	0.143		1.0	0.335								4.2	0.957 -05

ANEXO C

**Esfuerzo admisible – Tabla de máximo esfuerzo admisible sección
II Código ASME**

Tabla C-1 *Máximo esfuerzo admisible S para materiales ferrosos.*

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

Line No.	Min. Tensile Strength, MPa	Min. Yield Strength, MPa	Applicability and Max. Temperature Limits (NP = Not Permitted) (SPT = Supports Only)				External Pressure Chart No.
			I	III	VIII-1	XII	
1	380	205	NP	149 (Cl. 3 only)	NP	NP	CS-2
2	380	205	NP	149 (Cl. 3 only)	343	343	CS-2
3	380	205	482	371	482	343	CS-2
4	380	205	NP	371	343	343	CS-2
5	380	205	NP	371	343	343	CS-2
6	380	205	NP	NP	343	343	CS-2
7	380	205	454	371	538	343	CS-2
8	380	205	NP	NP	538	343	CS-2
9	380	205	NP	371	NP	NP	CS-2
10	380	205	NP	371	NP	NP	CS-2
11	380	205	NP	371	NP	NP	CS-2
12	380	205	NP	371	NP	NP	CS-2
13	380	205	NP	371	NP	NP	CS-2
14	380	205	NP	371	NP	NP	CS-2
15	380	230	NP	371	482	343	CS-2
16	390	265	NP	NP	204	204	CS-2
17	400	250	343	343 (SPT)	482	343	CS-2
18	400	250	NP	371	343	343	CS-2
19	400	275	NP	NP	371	343	CS-2
20	415	205	538	371	538	343	CS-2
21	415	205	538	371	538	343	CS-2
22	415	205	538	371	538	343	CS-2
23	415	205	NP	371	538	343	CS-2
24	415	205	NP	371	NP	NP	CS-2
25	415	205	538	371	NP	NP	CS-2
26	415	205	454	371 (SPT)	NP	NP	CS-2
27	415	205	NP	343 (Cl. 3 only)	482	343	CS-2
28	415	205	NP	NP	538	343	CS-2
29	415	220	538	371	538	343	CS-2
30	415	220	454	371	538	343	CS-2
31	415	220	NP	371	NP	NP	CS-2
32	415	220	NP	371	NP	NP	CS-2
33	415	220	NP	371	NP	NP	CS-2
34	415	220	NP	371	NP	NP	CS-2
35	415	220	NP	371	NP	NP	CS-2
36	415	220	NP	371	NP	NP	CS-2
37	415	230	NP	149 (Cl. 3 only)	NP	NP	CS-2
38	415	230	NP	149 (Cl. 3 only)	343	343	CS-2

ANEXO D

Eficiencia de uniones soldadas – Tabla de eficiencia en juntas según tipo y nivel de inspección

Tabla D-1 Máxima eficiencia de junta permisible para uniones soldadas mediante arco manual o gas.

Type No.	Joint Description	Limitations	Joint Category	Degree of Radiographic Examination		
				(a) Full ²	(b) Spot ³	(c) None
(1)	Butt joints as attained by double-welding or by other means which will obtain the same quality of deposited weld metal on the inside and outside weld surfaces to agree with the requirements of UW-35. Welds using metal backing strips which remain in place are excluded.	None	A, B, C, & D	1.00	0.85	0.70
(2)	Single-welded butt joint with backing strip other than those included under (1)	(a) None except as in (b) below	A, B, C, & D	0.90	0.80	0.65
		(b) Circumferential butt joints with one plate offset; see UW-13(b)(4) and Fig. UW-13.1, sketch (k)	A, B, & C	0.90	0.80	0.65
(3)	Single-welded butt joint without use of backing strip	Circumferential butt joints only, not over $\frac{3}{8}$ in. (16 mm) thick and not over 24 in. (600 mm) outside diameter	A, B, & C	NA	NA	0.60
(4)	Double full fillet lap joint	(a) Longitudinal joints not over $\frac{3}{8}$ in. (10 mm) thick	A	NA	NA	0.55
		(b) Circumferential joints not over $\frac{3}{8}$ in. (16 mm) thick	B & C ^o	NA	NA	0.55
(5)	Single full fillet lap joints with plug welds conforming to UW-17	(a) Circumferential joints ⁴ for attachment of heads not over 24 in. (600 mm) outside diameter to shells not over $\frac{1}{2}$ in. (13 mm) thick	B	NA	NA	0.50
		(b) Circumferential joints for the attachment to shells of jackets not over $\frac{3}{8}$ in. (16 mm) in nominal thickness where the distance from the center of the plug weld to the edge of the plate is not less than $1\frac{1}{2}$ times the diameter of the hole for the plug.	C	NA	NA	0.50
(6)	Single full fillet lap joints without plug welds	(a) For the attachment of heads convex to pressure to shells not over $\frac{5}{8}$ in. (16 mm) required thickness, only with use of fillet weld on inside of shell; or	A & B	NA	NA	0.45
		(b) for attachment of heads having pressure on either side, to shells not over 24 in. (600 mm) inside diameter and not over $\frac{1}{4}$ in. (6 mm) required thickness with fillet weld on outside of head flange only	A & B	NA	NA	0.45
(7)	Corner joints, full penetration, partial penetration, and/or fillet welded	As limited by Fig. UW-13.2 and Fig UW-16.1	C ⁷ & D ⁷	NA	NA	NA
(8)	Angle joints	Design per U-2(g) for Category B and C joints	B, C, & D	NA	NA	NA

2004 SECTION VIII — DIVISION 1

ANEXO E

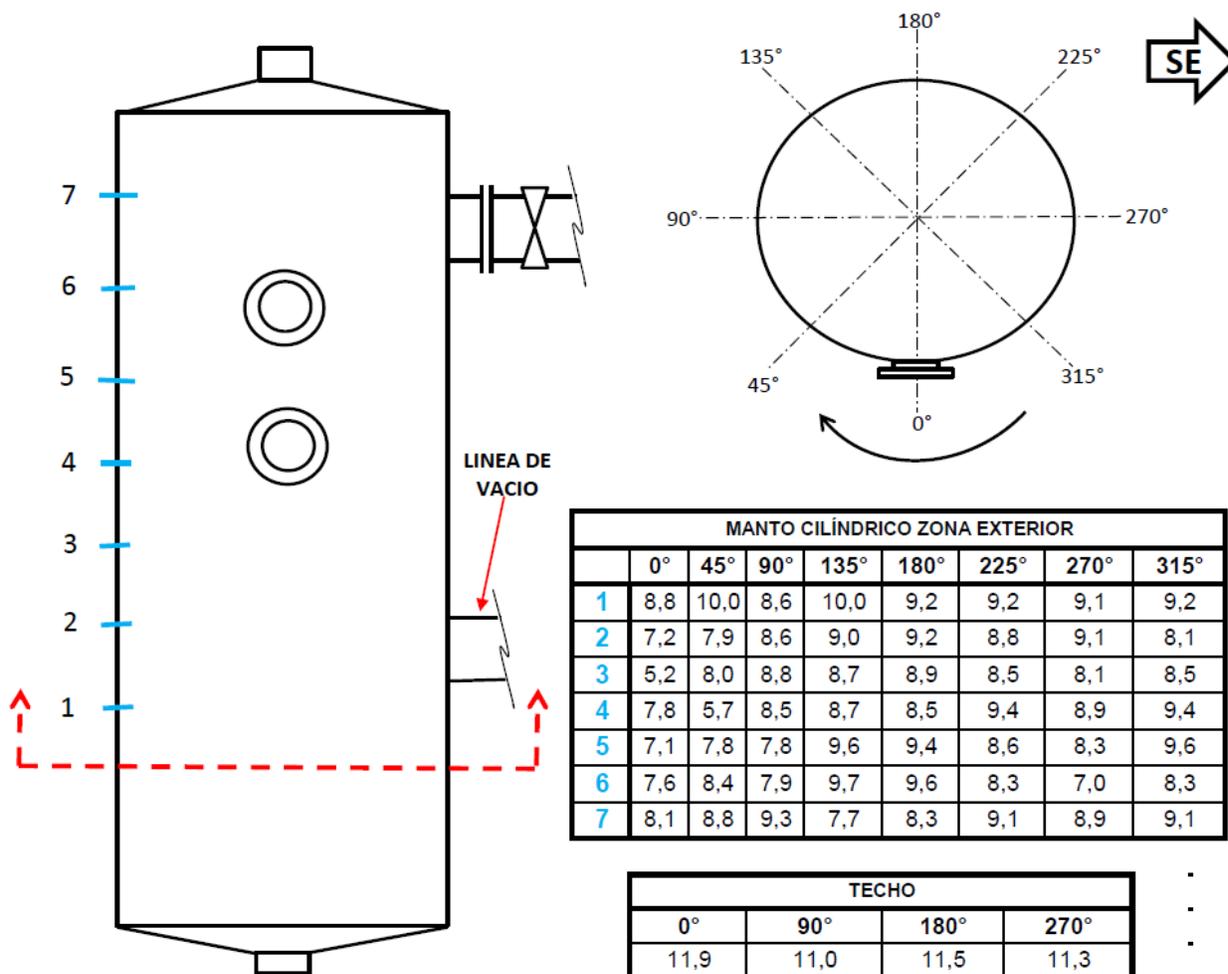
Datos de espesores – Espesores actuales presentes en el sistema de vacío

Los datos presentados en este anexo son resultado de los informes solicitados a la empresa Globaltech Ltda. la cual realizó los ensayos pertinentes al sistema.

Para cada parte del sistema se muestra un esquema que indica la forma en que se realizaron las mediciones acompañadas de las tablas con los resultados obtenidos.

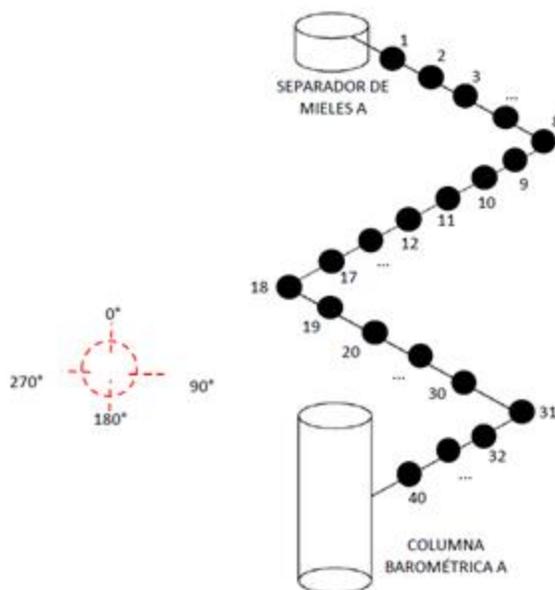
CIRCUITO PRODUCTO A

Columna barométrica A



- La distancia entre cada nivel de medición es de 500mm.

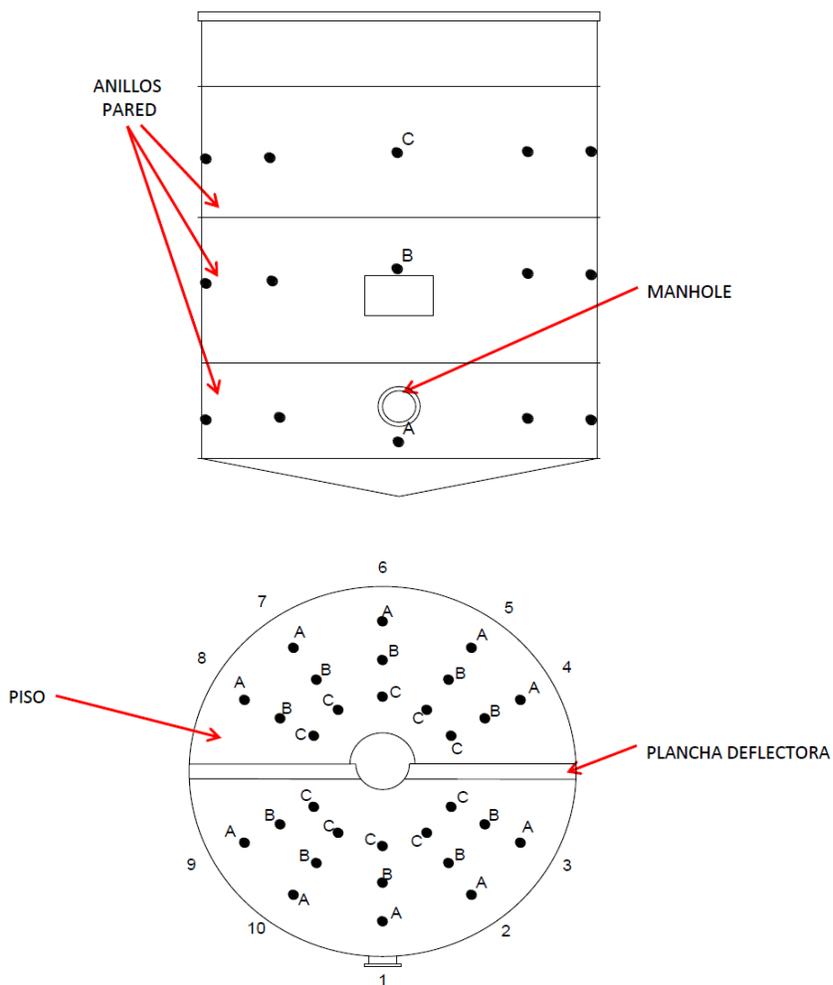
Ductos entre Separador de mieles A y la columna Barométrica A



		TRAMO 1				
		0°	90°	180°	270°	
		1	7.3	7.3	7.4	7.4
		2	7.7	7.6	8.6	8.5
		3	9.0	8.2	7.6	8.5
		4	8.6	8.1	7.8	8.0
		5	9.0	9.2	8.6	9.1
		6	9.0	9.5	8.6	9.1
		7	9.6	9.4	9.1	9.8
CURVA		8	7.0	6.7	6.7	7.0
		9	8.3	8.5	8.7	8.2
		10	8.9	8.8	8.7	8.9
		11	8.7	7.3	7.5	7.8
		12	7.6	7.5	7.9	7.6
		13	9.0	8.8	9.9	9.6
		14	9.2	8.9	9.0	9.2
		15	9.0	9.2	8.6	9.1
		16	9.0	9.5	8.6	9.1
		17	9.0	9.2	8.6	9.1
CURVA		18	9.6	8.7	8.3	8.4
		19	8.6	8.5	8.9	9.0
		20	9.6	10.0	8.4	8.5
		21	8.5	8.6	8.6	8.4
		22	8.7	8.5	8.3	8.4
		23	9.0	9.1	8.8	8.7
		24	8.4	8.5	8.5	8.6
		25	8.5	8.6	8.6	8.4
		26	8.7	8.5	8.3	8.4

		TRAMO 1				
		0°	90°	180°	270°	
		27	8.6	8.5	8.9	9.0
		28	9.6	9.5	8.3	8.5
		29	8.5	8.6	8.6	8.4
		30	8.6	8.5	8.9	8.0
CURVA		31	6.0	6.1	5.7	5.2
		32	5.5	5.6	5.7	5.9
		33	5.7	5.8	5.5	5.7
		34	5.9	5.5	5.7	5.6
		35	5.8	5.8	5.7	5.5
		36	5.7	5.8	5.5	5.7
		37	5.9	5.5	5.7	5.6
		38	5.5	5.6	5.7	5.9
		39	5.7	5.8	5.5	5.7
		40	5.8	5.8	5.7	5.6

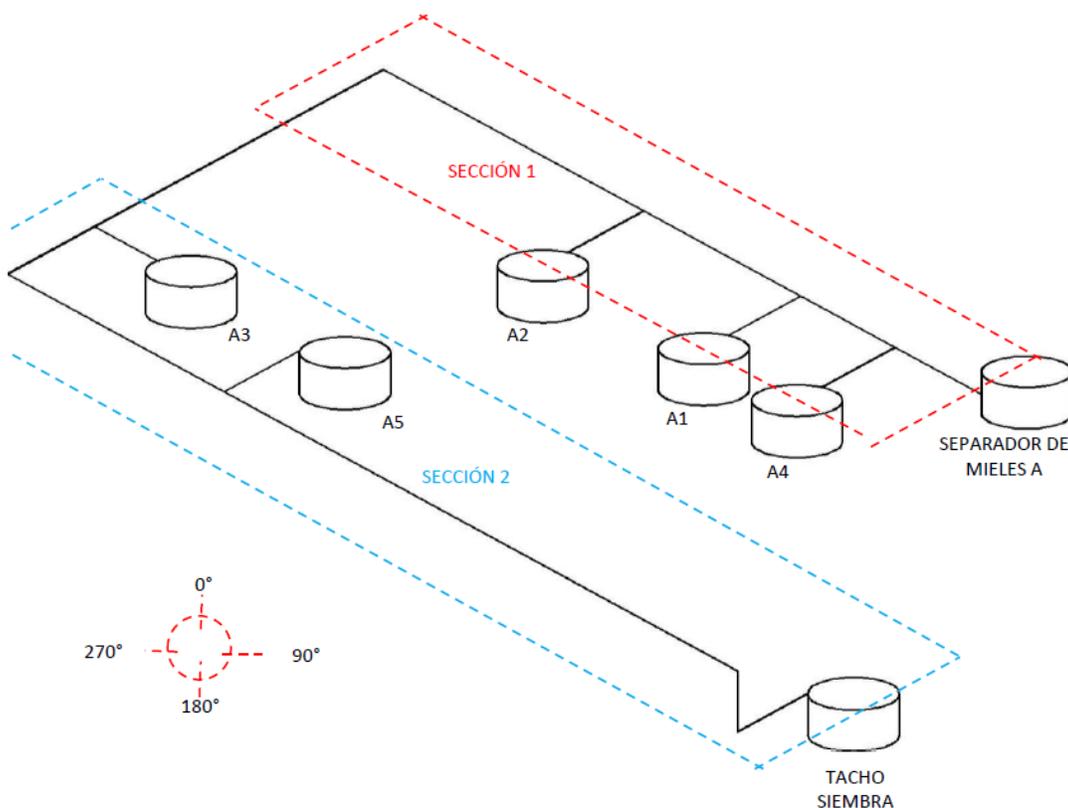
Separador de mieles A



ANILLO PARED			
	A	B	C
1	6.1	6.7	4.9
2	6.0	6.8	6.6
3	6.8	6.7	7.0
4	7.0	6.7	7.0
5	6.9	6.8	6.7
6	4.8	6.4	5.7
7	7.0	6.5	6.5
8	6.9	6.9	7.0
9	7.0	7.4	6.7
10	6.9	7.0	6.5

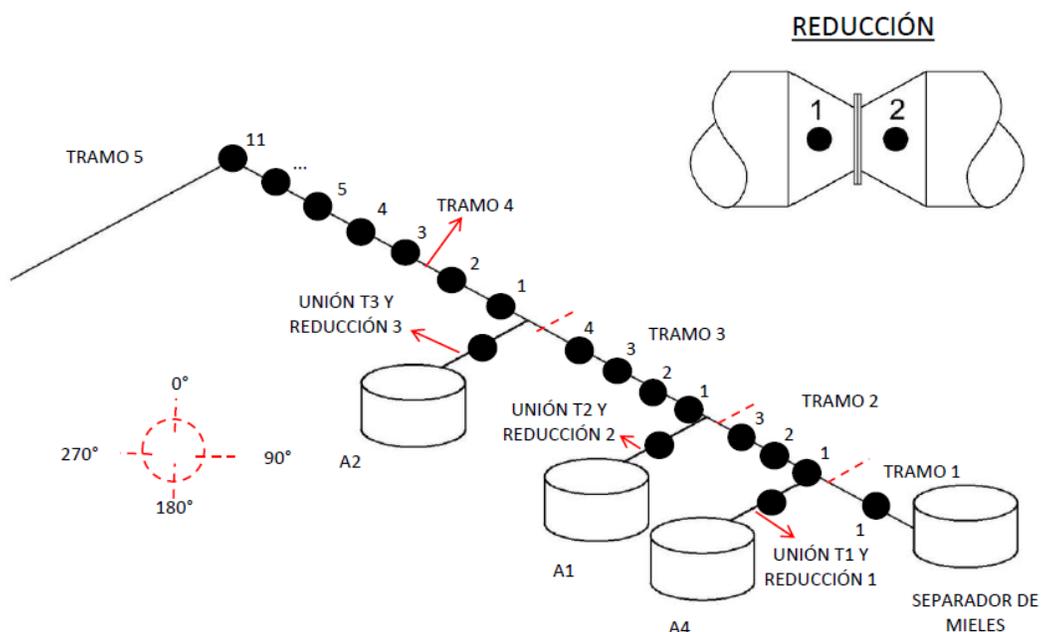
PISO			
	A	B	C
1	6.8	6.8	5.1
2	7.1	5.5	5.1
3	6.5	7.4	6.0
4	6.2	6.4	5.7
5	6.1	6.4	5.6
6	6.1	5.7	5.9
7	6.4	6.4	6.2
8	6.9	6.7	6.0
9	6.8	6.0	5.4
10	6.4	6.0	5.4

Ductos entre Separador de mieles A y Tachos de cocción A



Este tramo de ductos fue separado en dos secciones para la obtención de datos de espesores.

Sección 1:



TRAMO 1				
	0°	90°	180°	270°
1	6.4	5.8	5.4	6.4

TRAMO 2				
	0°	90°	180°	270°
1	10.4	10.4	9.9	10.5
2	9.9	10.5	10.1	9.9
3	10.5	10.2	10.3	9.8

TRAMO 3				
	0°	90°	180°	270°
1	9.9	9.9	10.0	10.8
2	7.3	7.3	7.5	7.1
3	7.4	7.2	7.2	7.8
4	7.6	6.6	6.7	6.5

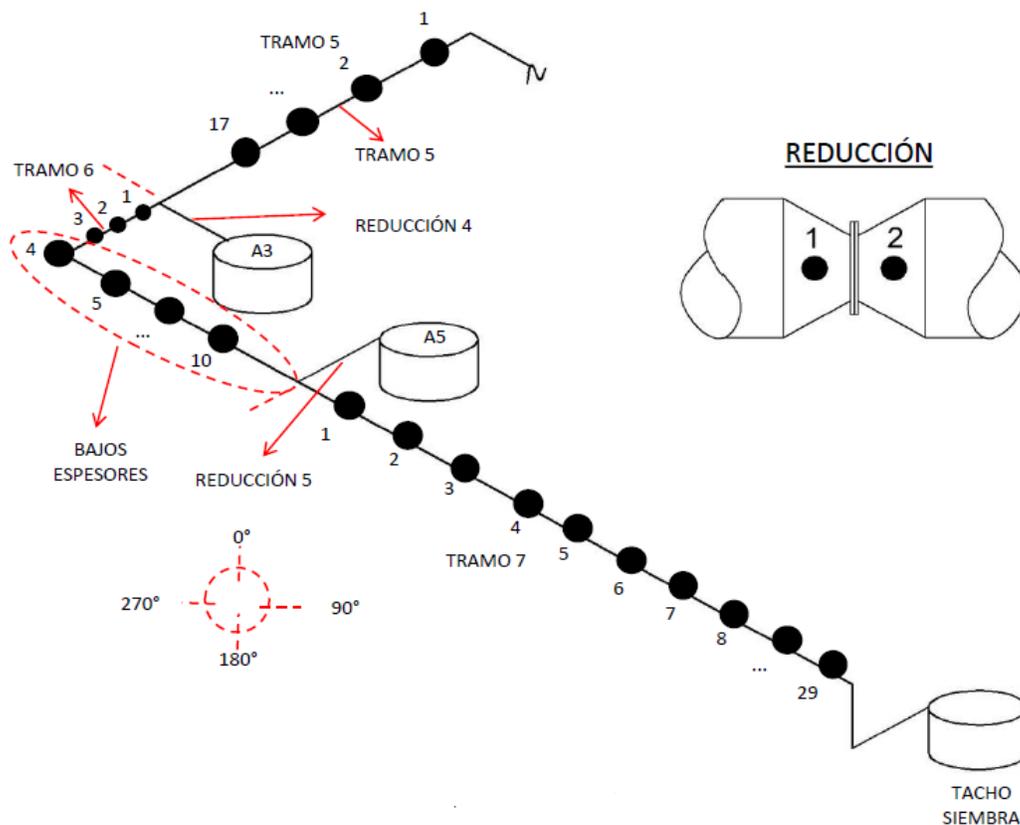
TRAMO 4				
	0°	90°	180°	270°
1	7.6	7.8	7.3	7.4
2	7.4	7.4	7.0	7.4
3	7.6	7.4	6.9	7.0
4	7.9	7.8	7.7	8.0
5	6.2	5.6	5.3	5.2
6	6.3	6.4	6.4	6.4
7	6.4	6.4	6.3	6.3
8	6.4	6.5	6.5	6.5
9	6.3	6.3	6.3	6.5
10	6.3	6.5	6.5	6.5
CURVA	11	6.8	6.6	6.6

REDUCCIÓN 1			TACHO A4	
	0°	90°	180°	270°
1	10.4	10.0	10.1	10.2
2	10.2	10.4	10.4	10.0

REDUCCIÓN 2			TACHO A1	
	0°	90°	180°	270°
1	10.0	10.1	10.4	10.0
2	10.4	10.4	10.2	10.4

REDUCCIÓN 3			TACHO A2	
	0°	90°	180°	270°
1	10.1	10.2	10.3	10.1
2	10.1	10.1	10.0	10.0

Sección 2:



Tramo 5				
Punto	0	90	180	270
1	9	8,5	7,5	7,8
2	6,9	8,1	6,7	8
3	11,4	10,6	10,7	11,1
4	10,4	10,2	9,8	11
5	10,9	10,7	9,6	10,7
6	10,1	10,4	9,5	10,8
7	10,9	10,8	9,6	6,1
8	6,11	5,8	10,9	10,9
9	9,8	10	9,6	11
10	9,9	10,1	9,5	11
11	10,1	10,1	9,7	11,1
12	10,9	10,8	9,6	6,1
13	6,11	5,8	10,9	10,9
14	9,8	10	9,6	11
15	9,9	10,1	9,5	11
16	10,1	10,1	9,7	11,1
17	10,9	10,9	9,8	11

Tramo 6				
Punto	0	90	180	270
1	10,1	10,1	9,7	11,1
2	10,9	10,8	9,6	6,1
3	6,11	5,8	10,9	10,9
4	6,7	6,4	4,9	6,3
5	5,4	4,8	4,4	4,9
6	5,6	5,7	4,6	4,9
7	5,7	5,7	4,8	4,8
8	5,8	5,7	4,8	4,8
9	5,8	5,7	4,9	4,8
10	5,9	5,6	4,5	4,9

TRAMO 7				
	0°	90°	180°	270°
1	4.9	5.4	4.6	4.9
2	5.7	5.6	4.6	5.2
3	5.8	5.8	5.1	5.8
4	5.3	5.5	5.7	5.8
5	5.7	5.6	4.6	5.2
6	5.6	5.8	4.8	5.8
7	5.7	5.3	4.9	5.3
8	5.6	5.7	4.8	5.7
9	5.8	5.6	4.9	5.6
10	5.8	5.7	4.9	5.7
11	5.9	5.6	5.0	5.6
12	5.5	5.8	4.6	5.8
13	5.7	5.8	5.2	5.8
14	5.7	5.9	5.6	5.6
15	5.6	5.8	4.9	5.5
16	5.6	5.3	4.8	5.7
17	5.6	5.7	4.8	5.7
18	5.7	5.6	4.9	5.6
19	5.8	5.7	4.7	5.6
20	5.8	5.6	4.8	5.6
21	5.7	5.8	4.7	5.7
22	5.7	5.8	4.9	5.6

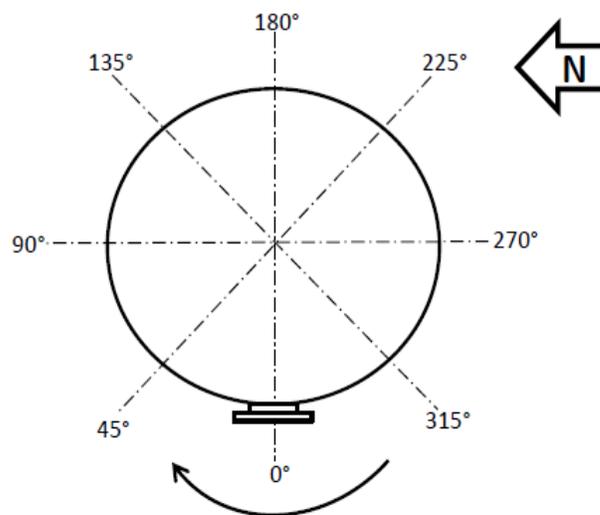
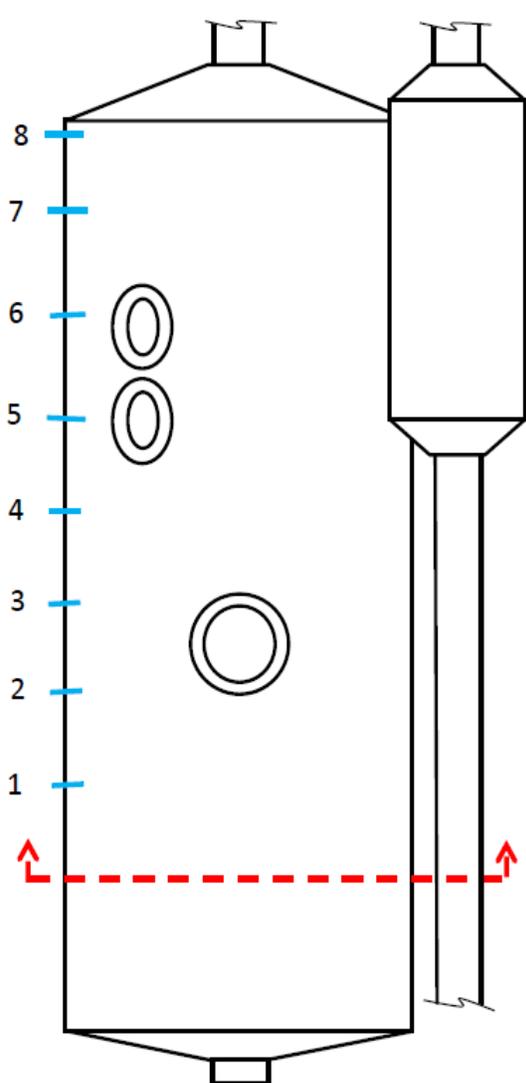
TRAMO 7				
	0°	90°	180°	270°
23	5.8	5.2	4.9	5.5
24	5.8	5.8	5.0	5.2
25	5.9	5.3	5.0	5.8
26	5.8	5.7	4.9	5.3
27	5.3	5.6	4.9	5.7
28	5.7	5.5	5.0	5.6
29	5.6	5.5	5.9	5.5

REDUCCIÓN 4		TACHO A3		
	0°	90°	180°	270°
1	10.4	10.0	10.2	10.2
2	10.2	10.2	10.3	10.3

REDUCCIÓN 5		TACHO A5		
	0°	90°	180°	270°
1	10.4	10.3	10.2	10.3
2	10.2	10.2	10.2	10.3

CIRCUITO PRODUCTO BC

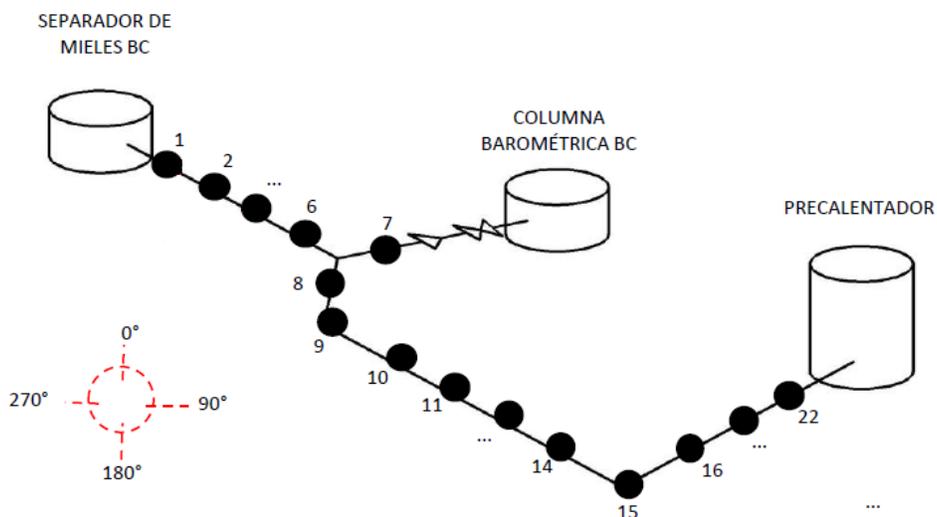
Columna barométrica BC



MANTO CILINDRICO								
	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
1	8.5	8.0	8.0	8.0	8,7	8.9	8.9	8,5
2	7.0	7.0	7,3	7,1	7,5	7,2	7,4	8,3
3	7.1	7.0	6,8	6,8	7,4	7,3	7,3	7,5
4	8.0	8.2	7,8	8,0	6,9	7,9	7,8	8,2
5	s/a	8,2	6,5	s/a	s/a	s/a	s/a	s/a
6	s/a	7,9	9,2	s/a	s/a	s/a	s/a	s/a
7	s/a	7,9	7,6	s/a	s/a	s/a	s/a	s/a
8	s/a	6,2	s/a	s/a	s/a	s/a	s/a	s/a

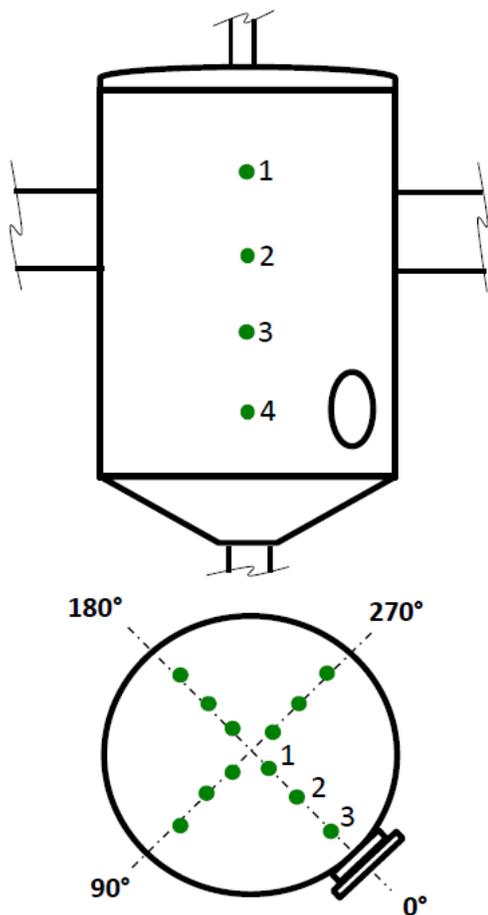
TECHO			
11,8	11,9	12,1	11,7

Ductos entre Separador de mieles BC y Columna barométrica BC



TRAMO 1					
	0°	90°	180°	270°	
1	6.5	6.6	5.9	6.7	
2	6.4	6.4	5.0	6.4	
3	6.4	6.5	6.6	6.9	
4	6.6	6.6	6.8	6.8	
5	6.5	6.6	6.4	6.6	
6	6.4	6.4	6.9	6.4	
7	6.6	5.8	6.6	6.6	
8	6.4	6.5	6.8	6.5	
CURVA	9	6.6	6.6	6.8	6.4
10	6.5	6.6	6.9	6.9	
11	6.4	6.4	6.8	6.4	
12	6.9	6.9	6.8	6.6	
13	6.4	6.5	6.7	7.6	
14	6.6	6.6	6.8	6.5	
CURVA	15	7.6	7.8	6.9	6.4
16	5.5	5.2	5.3	6.3	
17	7.2	7.3	6.8	7.5	
18	7.3	7.3	6.7	7.4	
19	7.5	7.4	6.9	7.5	
20	8.0	8.1	7.9	8.2	
21	7.9	7.9	7.9	7.9	
22	7.6	7.6	6.7	7.3	

Separador de mieles BC

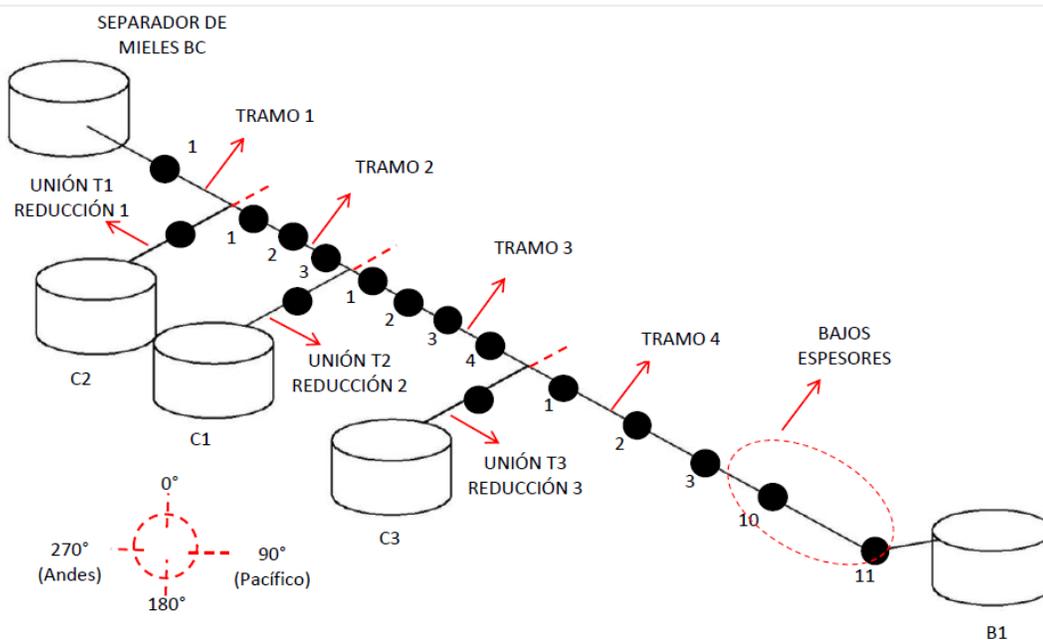


Manto				
	0°	90°	180°	270°
1	7,2	6,1	6,0	6,0
2	6,6	6,0	6,0	6,2
3	7,6	6,3	6,1	6,0
4	6,6	6,2	6,2	6,1

PISO				
	0°	90°	180°	270°
1	3,5	3,3	3,3	3,1
2	3,6	3,5	3,2	3,2
3	5,9	6,0	5,8	6,0

TECHO				
	0°	90°	180°	270°
1	3,1	5,5	6,1	3,2
2	3,1	5,4	5,9	3,1
3	3,1	5,5	5,9	3,2

Ductos entre Separador de mieles BC y tachos de cocción BC



TRAMO 1				
	0°	90°	180°	270°
1	7.3	7.5	7.1	7.5

TRAMO 2				
	0°	90°	180°	270°
1	6.9	6.5	7.0	7.0
2	7.0	6.8	7.2	7.0
3	7.5	7.0	7.0	7.5

TRAMO 3				
	0°	90°	180°	270°
1	7.5	7.3	7.4	7.5
2	7.8	7.3	7.6	7.8
3	7.4	7.0	7.2	7.1
4	7.1	7.1	6.5	7.3

TRAMO 4				
	0°	90°	180°	270°
1	7.3	7.5	6.9	7.0
2	7.6	6.9	7.2	7.5
3	7.4	7.4	7.4	7.0
4	7.4	7.3	7.5	7.5
5	7.7	7.3	7.5	7.5
6	7.3	7.3	7.3	7.3
7	7.7	7.7	7.7	7.7
8	7.7	7.7	7.7	7.6
9	7.6	7.6	7.7	7.7
10	7.6	7.6	7.6	7.7
CURVA	11	5.4	6.0	4.9

REDUCCIÓN 1				TACHO C2
	0°	90°	180°	270°
1	9.2	9.4	9.0	9.1
2	9.2	9.2	9.3	9.2

REDUCCIÓN 2				TACHO C1
	0°	90°	180°	270°
1	8.6	8.4	8.6	8.7
2	8.7	8.4	8.6	8.7

REDUCCIÓN 3				TACHO C3
	0°	90°	180°	270°
1	9.3	9.2	9.5	9.5
2	9.3	9.3	9.5	9.3

Anexo F

Materiales comerciales– Dimensiones disponibles de materiales
comerciales

Tabla N°1 Dimensiones comerciales planchas ASTM A-36 (Fuente: www.sack.cl)

Planchas Gruesas	
Espesor mm	Peso Teórico kg/m ²
6,0	48,0
8,0	64,0
10,0	80,0
12,0	96,0
14,0	112,0
16,0	128,0
18,0	144,0
20,0	160,0
22,0	176,0
25,0	200,0
28,0	224,0
30,0	240,0
32,0	256,0
35,0	280,0
38,0	304,0
40,0	320,0
45,0	360,0
50,0	400,0
63,0	504,0
75,0	600,0
100,0	800,0

Tabla N°2 Dimensiones comerciales de barras planas ASTM A-36 para anillos rigidizantes (Fuente: www.sack.cl)

Barras Planas									
Ancho mm	Espesor en mm								
	3	5	6	8	10	11	12	20	25
Pesos nominales (kg/mt)									
12,00	0,283	0,471	-	-	-	-	-	-	-
16,00	0,377	0,628	-	-	-	-	-	-	-
20,00	0,471	0,785	0,942	1,260	1,570	-	-	-	-
25,00	0,589	0,981	1,180	1,570	1,960	-	-	-	-
32,00	0,754	1,260	1,510	2,010	2,510	-	-	-	-
38,00	0,895	1,490	1,790	2,390	2,980	-	3,580	-	-
50,00	1,180	1,960	2,360	3,140	3,930	-	4,710	-	-
63,00	-	2,470	2,970	3,960	4,950	-	5,930	-	-
75,00	-	2,940	3,530	4,710	5,890	-	7,070	-	-
100,00	-	3,930	4,710	6,280	7,850	-	9,420	-	-