

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

DISEÑO DE UN EVAPORADOR A VACÍO EN MATERIALES PLÁSTICOS

Autor: Jesica Garrudo Antona

Tutor: Andrés Cubero Moya

Dpto. de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Industrial

DISEÑO DE UN EVAPORADOR A VACÍO EN MATERIALES PLÁSTICOS

Autor:

Jesica Garrudo Antona

Tutor:

Andrés Cubero Moya

Profesor Asociado

Dpto. de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Trabajo Fin de Máster: DISEÑO DE UN EVAPORADOR A VACÍO EN MATERIALES PLÁSTICOS

Autor: Jesica Garrudo Antona

Tutor: Andrés Cubero Moya

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

Académicamente, al tutor del proyecto Don Andrés Cubero Moya por haberme guiado durante la elaboración de éste.

Personalmente, a mi familia. Primordialmente a mis padres por su apoyo y confianza incondicional a lo largo de toda mi vida, pero especialmente en la etapa que culmina con este proyecto, sin ellos nada de esto habría sido posible. A mi hermano. A mis amigos, la familia que se elige. A esos compañeros de la ETSI que han compartido esta etapa conmigo y han llegado a convertirse en amigos.

Sevilla, 2018

En la actualidad, aunque el uso de materiales compuestos reforzados con fibra, en particular el PRFV, es muy común en sectores como el aeronáutico, el náutico, el eólico y en tratamiento de agua no es tan usual en otros sectores de la industria. Esto se debe a que, al tratarse de materiales relativamente modernos, la información y experiencia que hay sobre ellos es escasa comparada con la existente para materiales tradicionales como puede ser el acero, además de que no están tan normalizados como estos últimos. Por otra parte, sus características y prestaciones no son tan conocidas por los diseñadores, contratistas y clientes. Por último, todo esto influye en el aumento del coste de diseño y fabricación.

Con este proyecto se pretende recoger y acercar información sobre el plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) realizando un análisis comparativo entre un equipo diseñado en PRFV y otros equipos análogos diseñados en distintos metales. Además, se quiere conseguir recoger en este documento información acerca de normativa, procedimientos de diseño y cálculo, y métodos de simulación FEM relacionados con el PRFV.

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Índice	xi
Índice de Tablas	xv
Índice de Ilustraciones	xvii

I. MEMORIA DESCRIPTIVA

1 Antecedentes	1
2 Objeto	2
3 Desarrollo del proyecto	3
3.1. <i>Documentación</i>	3
3.2. <i>Cálculo analítico</i>	4
3.3. <i>Programación Excel</i>	4
3.4. <i>Análisis FEM</i>	4
4 Normativa	5
4.1. <i>BS-4994-1987</i>	5
4.2. <i>Código ASME, Sección VIII, División 1</i>	6
5 Materiales	7
5.1. <i>Plástico reforzado con fibra de vidrio</i>	7
5.2. <i>Acero</i>	9
5.3. <i>Titanio</i>	10
5.4. <i>Comparación entre los plásticos reforzados y los metales</i>	10
6 Descripción del equipo	15
6.1. <i>Geometría del evaporador</i>	16
6.2. <i>Contenido del evaporador</i>	18
6.3. <i>Condiciones de operación y diseño</i>	18
7 Conclusiones	19

II. MEMORIA JUSTIFICATIVA

1	Cálculo analítico BS-4994	1
1.1.	<i>General</i>	1
1.2.	<i>Materiales y cargas de diseño</i>	1
1.2.1.	Cargas unitarias de diseño admisibles	2
1.3.	<i>Diseño</i>	10
1.3.1.	Calculo del cuerpo del evaporador	12
1.3.2.	Calculo del techo del evaporador	15
1.3.3.	Calculo del fondo del evaporador	20
1.3.4.	Diseño de detalles	27
2	Diseño mediante PV-ELITE	31
2.1.	<i>Diseño del evaporador de acero</i>	31
2.2.	<i>Diseño del evaporador de acero inoxidable</i>	33
2.3.	<i>Diseño del evaporador de titanio</i>	36
3	Análisis económico de las soluciones	39
3.1.	<i>Evaporador de PRFV</i>	39
3.2.	<i>Evaporadores de metal</i>	40
4	Análisis mediante FEM	41
4.1.	<i>Método de cálculo</i>	41
4.1.1.	Fase 1: Modelo	41
4.1.2.	Fase 2: Análisis elástico	41
4.1.3.	Fase 3: Evaluación de resultados	41
4.2.	<i>Análisis FEM del evaporador en PRFV</i>	42
4.2.1.	Geometría	42
4.2.2.	Malla	43
4.2.3.	Definición del laminado	43
4.2.4.	Condiciones de contorno	56
4.2.5.	Cargas	57
4.2.6.	Tipo de análisis	61
4.2.7.	Resultados del análisis FEM	61
4.2.8.	Conclusión análisis FEM evaporador en PRFV	68
4.3.	<i>Análisis FEM del evaporador en acero al carbono</i>	70
4.3.1.	Geometría	70
4.3.2.	Malla	71
4.3.3.	Materiales	71
4.3.4.	Condiciones de contorno	72

4.3.5.	Cargas	72
4.3.6.	Tipo de análisis	77
4.3.7.	Resultados del análisis FEM	77
4.3.8.	Conclusión análisis FEM evaporador en acero al carbono	79
4.4.	<i>Análisis FEM del evaporador en acero inoxidable</i>	81
4.4.1.	Geometría	81
4.4.2.	Malla	82
4.4.3.	Materiales	82
4.4.4.	Condiciones de contorno	83
4.4.5.	Cargas	83
4.4.6.	Tipo de análisis	88
4.4.7.	Resultados del análisis FEM	88
4.4.8.	Conclusión análisis FEM evaporador en acero inoxidable	90
4.5.	<i>Análisis FEM del evaporador en titanio</i>	92
4.5.1.	Geometría	92
4.5.2.	Malla	93
4.5.3.	Materiales	93
4.5.4.	Condiciones de contorno	94
4.5.5.	Cargas	94
4.5.6.	Tipo de análisis	99
4.5.7.	Resultados del análisis FEM	99
4.5.8.	Conclusión análisis FEM evaporador en titanio	102
Bibliografía		103

ANEXOS

ANEXO I: INFORME DE CÁLCULO DEL EVAPORADOR EN PRFV

ANEXO II: REPORT PV-ELITE: DISEÑO EVAPORADOR ACERO y DISEÑO EVAPORADOR TITANIO

Índice de Tablas

Tabla 1 – Comparativa evaporadores: Desplazamientos	19
Tabla 2 - Comparativa evaporadores: Tensiones	19
Tabla 3 – Comparativa evaporadores: Coste	20
Tabla 4 - Propiedades mínimas admisibles para las capas de laminado	1
Tabla 5 – Valores de densidad superficial para las capas de laminado	2
Tabla 6 - Propiedades mínimas admisibles para las capas de laminado (Cargas unitarias)	2
Tabla 7 - Factor k_1	3
Tabla 8 – Valores de carga unitaria límite admisible	5
Tabla 9 – Valores de carga unitaria máxima en deformación	6
Tabla 10 – Valores de deformación admisible de cada capa	7
Tabla 11 – Valores de carga unitaria de diseño para cada capa	7
Tabla 12 - Valores de los módulos unitarios circunferencial y longitudinal	9
Tabla 13 – Valores de los factores circunferenciales y longitudinales	9
Tabla 14 – Valores de cargas unitarias de diseño circunferencial y longitudinal	10
Tabla 15 – Factor K_s para techos abovedados	18
Tabla 16 – PV Elite: Propiedades generales acero al carbono	31
Tabla 17 - PV Elite: Propiedades placa plana fondo acero al carbono	31
Tabla 18 - PV Elite: Propiedades fondo acero al carbono	32
Tabla 19 - PV Elite: Propiedades cuerpo acero al carbono	32
Tabla 20 - PV Elite: Propiedades techo acero al carbono	32
Tabla 21 – PV Elite: Espesores de evaporador acero al carbono	33
Tabla 22 – PV Elite: Propiedades generales acero inoxidable	33
Tabla 23 - PV Elite: Propiedades placa plana fondo acero inoxidable	34
Tabla 24 - PV Elite: Propiedades fondo acero inoxidable	34
Tabla 25 - PV Elite: Propiedades cuerpo acero inoxidable	34
Tabla 26 - PV Elite: Propiedades techo acero inoxidable	34
Tabla 27 – PV Elite: Espesores de evaporador acero inoxidable	35
Tabla 28 – PV Elite: Propiedades generales	36
Tabla 29 - PV Elite: Propiedades placa plana fondo	36
Tabla 30 - PV Elite: Propiedades fondo	36
Tabla 31 - PV Elite: Propiedades cuerpo	37
Tabla 32 - PV Elite: Propiedades techo	37

Tabla 33 – PV Elite: Espesores de evaporador	38
Tabla 34 – Evaporador PRFV: Propiedades Tejido	44
Tabla 35 - Evaporador PRFV: Propiedades Mat	45
Tabla 36 - Evaporador PRFV: Propiedades Filamento	45
Tabla 37 - ACP Fabrics definición	46
Tabla 38 - ACP Orientación de las fibras del cuerpo del evaporador: Propiedades	49
Tabla 39 - Evaporador PRFV: Resultados en desplazamientos	68
Tabla 40 - Evaporador PRFV: Resultados en tensiones de tracción	69
Tabla 41 - Evaporador PRFV: Resultados en tensiones de compresión	69
Tabla 42 – Propiedades acero S275JR	71
Tabla 43 - Evaporador acero S275JR: Resultados en desplazamientos	79
Tabla 44 - Evaporador acero S275JR: Resultados en tensiones	80
Tabla 45 – Propiedades acero inoxidable	82
Tabla 46 - Evaporador acero inoxidable: Resultados en desplazamientos	90
Tabla 47 - Evaporador acero inoxidable: Resultados en tensiones	91
Tabla 48 – Propiedades titanio	93
Tabla 49 - Evaporador titanio: Resultados en desplazamientos	102
Tabla 50 - Evaporador titanio: Resultados en tensiones	102

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 - Mat de fibra de vidrio.....	8
Ilustración 2 - Tejido fibra de vidrio	8
Ilustración 3 – Filamento fibra de vidrio.....	8
Ilustración 4 - Velo fibra de vidrio	9
Ilustración 5 - Láminas de acero	9
Ilustración 6 - Evaporador a vacío con recirculación de mezcla.....	16
Ilustración 7 – Dimensiones generales del evaporador	17
Ilustración 8 – Dimensiones del evaporador. Detalle techo korboggen.....	17
Ilustración 9 - Factor k_3	3
Ilustración 10 - Factor k_4	4
Ilustración 11 - Valores de los módulos unitarios circunferencial y longitudinal	8
Ilustración 12 - Techos tipo domo.....	16
Ilustración 13 - Bridas ciegas en general.....	16
Ilustración 14 - Bridas ciegas: no adecuado para recipientes al vacío	17
Ilustración 15 - Techo Korboggen	17
Ilustración 16 - Fondos cónicos y secciones reductoras.....	21
Ilustración 17 - Longitud efectiva para secciones cónicas sometidas a presión externa	22
Ilustración 18 - Juntas de unión típicas para recipientes sin revestimiento termoplástico.....	28
Ilustración 19 - Juntas de unión principal típicas para recipientes sin revestimiento termoplástico	28
Ilustración 20 - Juntas de costura típicas para recipientes sin revestimiento termoplástico	29
Ilustración 21 - Evaporador de acero al carbono diseñado en PV Elite.....	32
Ilustración 22 - Evaporador de acero inoxidable diseñado en PV Elite.....	35
Ilustración 22 - Evaporador de titanio diseñado en PV Elite.....	37
Ilustración 23 – Evaporador PRFV: Geometría.....	42
Ilustración 24 - Evaporador PRFV: Geometría elementos.....	42
Ilustración 25 - Evaporador PRFV: Malla	43
Ilustración 26 – ACP árbol de trabajo.....	43
Ilustración 27 - ACP Material Data.....	44
Ilustración 28 – ACP Materials	44
Ilustración 29 – ACP Fabrics	46
Ilustración 30 - ACP Stackup.....	46
Ilustración 31 – ACP Sub Laminates	47

Ilustración 32 – ACP Elements Sets.....	47
Ilustración 33 – ACP Rosettes.....	47
Ilustración 34 – ACP: Rosettes	48
Ilustración 35 – ACP Oriented Selection Sets.....	49
Ilustración 36 – ACP Orientación de las fibras del fondo del evaporador: Propiedades	49
Ilustración 37 – ACP OrientedSelectionSet.Fondo.....	49
Ilustración 38 - ACP OrientedSelectionSet.Cuerpo	50
Ilustración 39 - ACP Orientación de las fibras del techo del evaporador: Propiedades.....	50
Ilustración 40 - ACP OrientedSelectionSet.Techo.....	50
Ilustración 41 – ACP Modeling Groups.....	51
Ilustración 42 – ACP ModelingPly.Fondo	51
Ilustración 43 - ACP ModelingPly.Cuerpo	52
Ilustración 44 - ACP ModelingPly.Techo.....	53
Ilustración 45 – ACP Capas del laminado.....	54
Ilustración 46 – ACP Orientación de las fibras	54
Ilustración 47 - ACP Orientación de las fibras: Fondo	55
Ilustración 48- ACP Orientación de las fibras: Cuerpo.....	55
Ilustración 49 - ACP Orientación de las fibras: Techo	56
Ilustración 50 – Evaporador PRFV: Condiciones de contorno 4 patas	56
Ilustración 51 - Evaporador PRFV: Efecto de la gravedad.....	57
Ilustración 52 - Evaporador PRFV: Hipótesis 1 - Presión interior fondo.....	58
Ilustración 53 – Evaporador PRFV: Hipótesis 1 - Presión interior en el cuerpo.....	58
Ilustración 54 – Evaporador PRFV: Hipótesis 1 - Presión interior en el techo.....	59
Ilustración 55 - Evaporador PRFV: Hipótesis 2 - Presión interior fondo.....	59
Ilustración 56 – Evaporador PRFV: Hipótesis 2 - Presión interior en el cuerpo.....	60
Ilustración 57 – Evaporador PRFV: Hipótesis 2 - Presión interior en el techo.....	60
Ilustración 58 – Evaporador PRFV: Presión Hidrostática	61
Ilustración 59 – Evaporador PRFV: Sistema de referencia global.	62
Ilustración 60 - Evaporador PRFV: Sistema de referencia elemental	62
Ilustración 61 - Evaporador PRFV: Sistema de referencia elemental Eje X.....	63
Ilustración 62 - Evaporador PRFV: Sistema de referencia elemental Eje Y.....	63
Ilustración 63 - Evaporador PRFV: Sistema de referencia elemental Eje Z	64
Ilustración 64 – Evaporador PRFV – Hipótesis 1: Resultados en desplazamientos	64
Ilustración 65 - Evaporador PRFV – Hipótesis 1: Resultados en tensiones EJE X	65
Ilustración 66 - Evaporador PRFV – Hipótesis 1: Resultados en tensiones EJE Y	65
Ilustración 67 - Evaporador PRFV – Hipótesis 1: Resultados en tensiones EJE Z.....	66
Ilustración 68 – Evaporador PRFV – Hipótesis 2: Resultados en desplazamientos	66
Ilustración 69 - Evaporador PRFV – Hipótesis 2: Resultados en tensiones EJE X	67

Ilustración 70 - Evaporador PRFV – Hipótesis 2: Resultados en tensiones EJE Y.....	67
Ilustración 71 - Evaporador PRFV – Hipótesis 2: Resultados en tensiones EJE Z.....	68
Ilustración 72 – Evaporador acero S275JR: Geometría	70
Ilustración 73 - Evaporador acero S275JR: Geometría elementos.....	70
Ilustración 74 - Evaporador acero S275JR: Malla.....	71
Ilustración 75 – Evaporador acero S275JR: Condiciones de contorno 4 patas	72
Ilustración 76 – Evaporador acero S275JR: Efecto de la gravedad	72
Ilustración 77 - Evaporador acero S275JR: Hipótesis 1 - Presión interior fondo.....	73
Ilustración 78 – Evaporador acero S275JR: Hipótesis 1 - Presión interior en el cuerpo.....	74
Ilustración 79 – Evaporador acero S275JR: Hipótesis 1 - Presión interior en el techo	74
Ilustración 80 - Evaporador acero S275JR: Hipótesis 2 - Presión interior fondo.....	75
Ilustración 81 – Evaporador acero S275JR: Hipótesis 2 - Presión interior en el cuerpo.....	75
Ilustración 82 – Evaporador acero S275JR: Hipótesis 2 - Presión interior en el techo	76
Ilustración 83 – Evaporador acero S275JR: Presión Hidrostática.....	76
Ilustración 84 – Evaporador acero S275JR – Hipótesis 1: Resultados en desplazamientos	77
Ilustración 85 - Evaporador acero S275JR – Hipótesis 1: Resultados en tensiones	78
Ilustración 86 – Evaporador acero S275JR – Hipótesis 2: Resultados en desplazamientos	78
Ilustración 87 - Evaporador acero S275JR – Hipótesis 2: Resultados en tensiones	79
Ilustración 72 – Evaporador acero inoxidable: Geometría.....	81
Ilustración 73 - Evaporador acero inoxidable: Geometría elementos	81
Ilustración 74 - Evaporador acero inoxidable: Malla	82
Ilustración 75 – Evaporador acero inoxidable: Condiciones de contorno 4 patas	83
Ilustración 76 – Evaporador acero inoxidable: Efecto de la gravedad.....	83
Ilustración 77 - Evaporador acero inoxidable: Hipótesis 1 - Presión interior fondo	84
Ilustración 78 – Evaporador acero inoxidable: Hipótesis 1 - Presión interior en el cuerpo	85
Ilustración 79 – Evaporador acero inoxidable: Hipótesis 1 - Presión interior en el techo.....	85
Ilustración 80 - Evaporador acero inoxidable: Hipótesis 2 - Presión interior fondo	86
Ilustración 81 – Evaporador acero inoxidable: Hipótesis 2 - Presión interior en el cuerpo	86
Ilustración 82 – Evaporador acero inoxidable: Hipótesis 2 - Presión interior en el techo.....	87
Ilustración 83 – Evaporador acero inoxidable: Presión Hidrostática	87
Ilustración 84 – Evaporador acero inoxidable – Hipótesis 1: Resultados en desplazamientos	88
Ilustración 85 - Evaporador acero inoxidable – Hipótesis 1: Resultados en tensiones.....	89
Ilustración 86 – Evaporador acero inoxidable – Hipótesis 2: Resultados en desplazamientos	89
Ilustración 87 - Evaporador acero inoxidable – Hipótesis 2: Resultados en tensiones.....	90
Ilustración 88 – Evaporador titanio: Geometría.....	92
Ilustración 89 - Evaporador titanio: Geometría elementos.....	92
Ilustración 90 - Evaporador titanio: Malla	93
Ilustración 91 – Evaporador titanio: Condiciones de contorno 4 patas.....	94

Ilustración 92 – Evaporador titanio: Efecto de la gravedad.....	94
Ilustración 93 - Evaporador titanio: Hipótesis 1 - Presión interior fondo.....	95
Ilustración 94 – Evaporador titanio: Hipótesis 1 - Presión interior en el cuerpo.....	96
Ilustración 95 – Evaporador titanio: Hipótesis 1 - Presión interior en el techo.....	96
Ilustración 96 - Evaporador titanio: Hipótesis 2 - Presión interior fondo.....	97
Ilustración 97 – Evaporador titanio: Hipótesis 2 - Presión interior en el cuerpo.....	98
Ilustración 98 – Evaporador titanio: Hipótesis 2 - Presión interior en el techo.....	98
Ilustración 99 – Evaporador titanio: Presión Hidrostática	99
Ilustración 100 – Evaporador titanio – Hipótesis 1: Resultados en desplazamientos	100
Ilustración 101 - Evaporador titanio – Hipótesis 1: Resultados en tensiones.....	100
Ilustración 102 – Evaporador titanio – Hipótesis 2: Resultados en desplazamientos	101
Ilustración 103 - Evaporador titanio – Hipótesis 2: Resultados en tensiones.....	101

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

DISEÑO DE UN EVAPORADOR A VACÍO EN MATERIALES PLÁSTICOS

I. MEMORIA DESCRIPTIVA

Autor: Jesica Garrudo Antona

Tutor: Andrés Cubero Moya

Dpto. de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



1 ANTECEDENTES

En el siglo XIX los materiales característicos en la industria fueron el hierro y el acero, y no fue hasta la segunda mitad del siglo XX y el siglo XXI cuando comienzan a ser conocidos los productos sintéticos: plásticos, composites, fibras artificiales, etc.

En particular, el PRFV empezó a utilizarse durante la II Guerra Mundial para fabricar componentes para aviones y cubiertas para equipos de radares electrónicos. El PRFV se continuó utilizando después porque, aunque era caro, se hizo muy popular entre los diseñadores por su gran facilidad para adquirir formas complejas. Los materiales compuesto de fibra de vidrio llegaron a la industria de la construcción en los años 60 y gracias a eso fue aumentando el interés en su investigación y desarrollo.

Durante los últimos años se han realizado interesantes progresos en calidades de fibras, resinas y preimpregnados, mecánica de materiales compuestos, métodos de diseño y fabricación, métodos de ensayos no destructivos...

En la actualidad, el PRFV se ha convertido en una alternativa a los metales a considerar a la hora de diseñar y fabricar equipos como tanques, depósitos, evaporadores, cristalizadores... Es por eso por lo que cuando surgió la necesidad de diseñar los equipos para un proceso de evaporación en una planta industrial, aunque la primera opción que se propuso para el material del evaporador fue el metal (ya sea acero al carbono, inoxidable o titanio), también se planteó la posibilidad de que el evaporador se diseñase en material compuesto, en concreto PRFV.

Las características a destacar de este diseño es que el evaporador va a trabajar con contenido corrosivo, a vacío y a alta temperatura. Se trabaja a vacío para disminuir la temperatura, consiguiendo de esta manera mejores condiciones en el proceso, utilizando menos energía térmica y mejorando el problema de corrosión.

2 OBJETO

El objeto del presente proyecto es llevar a cabo un análisis comparativo entre el evaporador diseñado en fibra de vidrio y otros evaporadores análogos diseñados en metal (acero al carbono, acero inoxidable y titanio respectivamente), para obtener información en la que basarse a la hora decidir qué evaporador interesará más instalar.

Se van a realizar unos cálculos analíticos justificativos, para diseñar el equipo, y un análisis mediante el Método de los Elementos Finitos de cada uno de los tres evaporadores. Todo ello para:

- estudiar el comportamiento de cada uno frente a las cargas a las que se verían sometidos y en las condiciones de contorno correspondientes.
- comprobar si el diseño analítico previo es correcto y el equipo no fallará estructuralmente.
- realizar una comparación del comportamiento de cada uno de los tres evaporadores.

La finalidad es encontrar una solución para el evaporador que funcione correctamente a vacío, a alta temperatura y con contenido corrosivo, que tenga buen comportamiento mecánico y que sea lo más económica posible.

3 DESARROLLO DEL PROYECTO

El presente proyecto se ha ido desarrollando en diferentes fases que son:

- Documentación
- Normativa
- Cálculos analíticos
- Programación Excel
- Análisis FEM

Si bien es verdad que cada fase está claramente identificada, no siempre se han ido desarrollando de forma sucesiva e independiente. Se ha tratado de un proceso en el que, en muchos casos, ha sido necesario trabajar en paralelo en dos o más fases. En ocasiones, también se han aplicado métodos iterativos ya que algunas fases están relacionadas entre sí, una decisión o modificación en una de ellas afecta directamente a la otra.

A continuación, se describe brevemente cada una de las fases:

3.1. Documentación

En esta fase se ha ido recopilando toda la información que ha ido siendo necesaria a lo largo del desarrollo del proyecto. La documentación está claramente dividida en:

- Documentación de los materiales: información acerca de los materiales compuestos, en concreto del PRFV, e información acerca de los metales, en concreto del acero y el titanio.
- Documentación acerca de la normativa: identificación de las normativas que fuesen de aplicación y, dentro de las distintas posibilidades, elección de las que finalmente se iban a utilizar para el desarrollo del proyecto.
- Documentación acerca de los evaporadores: información sobre el proceso de evaporación y los equipos que participan.
- Documentación FEM: cursos sobre el módulo ACP para materiales compuestos del programa ANSYS para poder llevar a cabo el análisis mediante el Método de los Elementos Finitos.

3.2. Cálculo analítico

Para diseñar el evaporador, en base a la BS-4994, se han realizado los cálculos analíticos que se encuentran desarrollados en el Apartado 1 “Cálculo analítico BS-4994” de la Memoria Justificativa de este Proyecto. Para llevar a cabo esta fase se tenían algunos datos de partida, pero en ocasiones ha sido necesario estudiar distintas posibilidades y observar como influía en el diseño la variación de determinado factor. En algunos apartados, se han aplicado procesos iterativos suponiendo un valor inicial de cierto parámetro, se han repetido los cálculos hasta alcanzar el conjunto de valores que ha cumplido con los requisitos del estándar y entonces se ha ajustado el valor del parámetro que se había supuesto.

3.3. Programación Excel

A medida que se fue desarrollando la fase de cálculo analítico surgió la idea de crear una herramienta que facilitase tanto los cálculos que requerían de procesos iterativos como aquellas partes en las que hacía falta estudiar distintas variaciones de ciertos parámetros para elegir la más favorable.

Utilizando la aplicación Excel se ha creado un programa que, introduciendo los datos de entrada, calcula los valores necesarios para diseñar el evaporado en PRFV. Además, se ha aprovechado esta fase para obtener un informe que recoge toda la información acerca del desarrollo de los cálculos para el diseño del evaporador en PRFV.

El informe generado se ha incluido en el Anexo 1 “Informe de diseño del evaporador” de este Proyecto.

3.4. Análisis FEM

En esta fase, se han llevado a cabo distintas simulaciones aplicando el Método de los Elementos Finitos para poder estudiar el comportamiento del evaporador en PRFV diseñado según la BS-4994 y, además, comparar dicho comportamiento con el de un evaporador análogo diseñado en acero al carbono, otro de acero inoxidable y otro diseñado en titanio.

El Método de los Elementos Finitos (FEM) permite resolver problemas que requieren la solución de ecuaciones diferenciales, cuya solución analítica directa sería muy compleja o directamente imposible, discretizándolos en elementos y planteando los problemas como una serie de ecuaciones algebraicas.

Para llevar a cabo este análisis se ha utilizado el programa ANSYS Workbench, que es una herramienta de simulación que ayuda a predecir cómo se comportará el elemento estudiado bajo un entorno real. ANSYS está dividido en tres herramientas principales llamados módulos:

- Pre-procesador: donde se lleva a cabo la creación de geometría, se definen los materiales de cada elemento y se genera la malla (dividiendo el problema en elementos y nodos)
- Procesador: donde se definen las condiciones de contorno, las cargas aplicadas y se resuelve el problema.

- Post-procesador: donde se visualizan y/o listan los resultados.

4 NORMATIVA

Para el diseño del evaporador en PRFV se ha utilizado el estándar británico BS-4994-1987 mientras que para diseñar el equipo en acero al carbono, en acero inoxidable y en titanio se ha consultado el Código ASME, Sección VIII, División 1 (2015) que es el código de diseño de recipientes a presión en el que se basa el programa PV Elite.

4.1. BS-4994-1987

Este estándar especifica los requisitos para el diseño, materiales, construcción, inspección, prueba y montaje de recipientes y tanques en plásticos reforzados. Este tipo de material consiste en un sistema de resina de poliéster, epoxi o furano reforzado con fibras de vidrio, fabricado mediante el proceso de colocación en húmedo. Se incluyen construcciones con y sin revestimiento termoplástico. El rango de temperaturas que cubre está entre -30°C y 110°C.

La información sobre las propiedades mecánicas de los plásticos reforzados es algo limitada y esto se aplica particularmente a los cambios en tales propiedades durante el tiempo. En ausencia de propiedades consistentes a largo plazo, las propiedades del material utilizado para el diseño se basan en pruebas a corto plazo.

Los recipientes metálicos, que están hechos de materiales que normalmente son isotrópicos, se diseñan mediante el cálculo de las tensiones admisibles, en función de las propiedades de tracción y ductilidad medidas. Por el contrario, las construcciones laminares suelen ser anisotrópicas y el método basado en cargas unitarias, que se utiliza en este estándar, es particularmente adecuado para el diseño de materiales compuestos de plásticos reforzados.

Esta especificación se divide en las siguientes secciones:

Sección 1. General

Sección 2. Materiales y cargas de diseño

Sección 3. Diseño

Sección 4. Fabricación y ejecución

Sección 5. Inspección y pruebas

Sección 6. Levantamiento

4.2. Código ASME, Sección VIII, División 1

El Código ASME reúne una serie de reglas para la construcción de calderas de vapor y recipientes a presión formuladas por “Boiler and Pressure Vessel Committee of American Society of Mechanical Engineers”.

Está compuesto por 12 secciones que se agrupan en:

- Códigos de Construcción.
- Códigos de Referencia.
- Reglas para el cuidado, operación e inspección en servicio.

En concreto, la Sección VIII está formada por 3 divisiones:

- División 1: General.
- División 2: Reglas alternativas.
- División 3: Reglas alternativas para la construcción de recipientes para alta presión.

El alcance de la Sección VIII está previsto para cubrir, pero no está limitado a:

- Recipientes que contengan agua a presión que exceda:
 - Una presión de diseño de 300 psi (21 kg/cm²).
 - Una temperatura de diseño de 210 °F (99 °C).
- Recipientes que contengan agua caliente calentada por medios indirectos, que excedan:
 - 200 000 BTU/h.
 - 210°F.
 - 120 galones (450 litros).
- Recipientes que tengan un diámetro interior mayor a 6”.
- Recipientes que tengan una presión de operación interna o externa mayor a 15 psi (1 kg/cm²).
- Recipientes cuya presión de operación no exceda 3000 psi (210 kg/cm²).

5 MATERIALES

5.1. Plástico reforzado con fibra de vidrio

El PRFV es un material compuesto por resinas termoestables y fibra de vidrio. Las fibras de vidrio, con una alta resistencia mecánica, conforman la parte estructural mientras que la matriz plástica (resina de poliéster) aglomera las fibras, aporta la resistencia química propia de ella y hace el producto impermeable al medio en contacto. Esta composición, junto a unas buenas técnicas de bobinados de la fibra de vidrios y la elección de las resinas adecuadas, permite realizar formas complejas fáciles de reparar y muy rentables.

El PRFV o RTP (Reinforced Thermoset Plastic) tiene grandes cualidades: alta resistencia mecánica, poco peso, resistencia a la temperatura y a la corrosión, superficie interna lisa además de permitir formas complejas. Todos esto lo convierten en una material muy rentable a la hora de fabricar equipos.

Las resinas solo se utilizaban como base para las capas de refuerzo pero, gracias al avance de la tecnología, actualmente se utilizan como barreras químicas anticorrosión para depósitos y recipientes contenedores.

Las principales resinas que se utilizan son:

- Resina ortoftálica.
- Resina isoftálica.
- Resina isoftálica neopentilglicol.
- Resina bisfenólica.
- Resina tereftálica.
- Resina de éster de vinilo.
- Resina pirorretardante.

Las formas más comunes en las que se suele presentar la fibra de vidrio son las siguientes:

- **Mantas de fibra de vidrio MAT:** es una tela no tejida de fibra de vidrio, resultado de picar el hilo roving en máquinas especiales. Es el material más usual para laminados de PRFV, es fácil de moldear y el más económico. La fibra MAT, se diferencia por su densidad/grosor, especificación que se llama gramaje. En el mercado se puede encontrar tela MAT de 225, 300, 450 y 600 (gramos por metros cuadrado).



Ilustración 1 - Mat de fibra de vidrio

- **Tejidos de fibra de vidrio WOVEN ROVING:** son una clase de tela tejida en dos direcciones que se elabora en telares especiales hilando el roving continuo. Son laminados más resistentes por la mayor resistencia a la tracción. El problema que a veces presentan es que la adherencia interlaminar puede ser localmente débil por problemas de desgomadura, esto se puede mejorar intercalando mat entre los tejidos o usando tejidos más gruesos. Al igual que las otras telas de fibra de vidrio, el “woven roving” también se caracteriza por su gramaje, encontrándose en el mercado de 200 a 900 gramos por metro cuadrado.



Ilustración 2 - Tejido fibra de vidrio

- **Filamentos de fibra de vidrio ROVING:** se utilizan para reforzar las capas de tejido de vidrio y también para conferir resistencia y dureza.



Ilustración 3 – Filamento fibra de vidrio

- **Velos:** es una tela “no tejida” similar al mat, con bajos gramajes que usualmente oscilan entre 30 y 45 gramos por metro cuadrado. Se puede usar de amortiguamiento entre la capa de gelcoat y las principales de refuerzo y como capa de refuerzo del propio gelcoat, dando así algo de consistencia a esta capa.

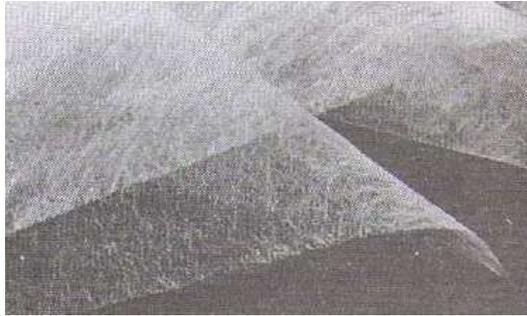


Ilustración 4 - Velo fibra de vidrio

5.2. Acero

El acero es un material ferroso cuyo porcentaje de carbono está comprendido entre 0,05 y 1,7 %.

Se trata de uno de los materiales de fabricación y construcción más versátil y adaptable. Es uno de los que más se utilizan y tiene un precio relativamente económico. Este material combina la resistencia y la trabajabilidad, permitiendo así fabricaciones diversas. Además, sus propiedades pueden adaptarse a las necesidades concretas aplicando tratamientos con calor, mediante trabajo mecánico o utilizando aleaciones.



Ilustración 5 - Láminas de acero

El Acero funde entre 1400 y 1500°C y es moldeable. Aunque es un metal más resistente que el hierro, hay que decir también que es más propenso a la corrosión, además, es maleable mientras que el hierro es rígido.

Para clasificar un acero hay que indicar, además del porcentaje de carbono, su resistencia. Se consideran aceros a los productos ferrosos que poseen una resistencia a tracción mínima de 40 Kg/mm², identificando como hierro forjado al resto.

Se pueden considerar los siguientes tipos de aceros:

- **Acero al Carbono:** forman más del 90% de todos los aceros. Contienen carbono en proporciones que pueden variar y menos del 1,65% de manganeso, el 0,60% de silicio y el 0,60% de cobre.
- **Acero Aleado:** estos aceros contienen una proporción determinada de vanadio, molibdeno y otros elementos, además de cantidades mayores de manganeso, silicio y cobre que los aceros al carbono normales. Estos aceros son más caros que los aceros al carbono. El acero inoxidable es un acero aleado y se caracteriza por su resistencia a la corrosión y a la oxidación.
- **Acero de Baja Aleación Ultrarresistente:** los aceros de baja aleación son más baratos que los aceros aleados convencionales, ya que contienen cantidades menores de los elementos de aleación costosos. Sin embargo, reciben un tratamiento especial que les da una resistencia mucho mayor que la que tiene el acero al carbono.

5.3. Titanio

El titanio se considera un metal de transición. Es fuerte, muy resistente, ligero y posee una densidad baja.

Destaca por su gran resistencia frente a la corrosión y su alta resistencia química, es un material muy resistente a ácidos fuertes y al agua, especialmente al agua del mar. Se considera un material inerte y además, es dimórfico.

Este material solamente es dúctil si está libre de oxígeno. En su estado natural el titanio es sólido y su punto de fusión es de 1941 K o 1668,85 °C.

El titanio es tan fuerte como el acero pero su peso es la mitad.

5.4. Comparación entre los plásticos reforzados y los metales

En este apartado se pretenden presentar las principales características del PRFV separadas en aquellas que se pueden considerar positivas o ventajosas y aquellas que se pueden considerar negativas o desfavorables comparándose con las características de los metales.

VENTAJAS DEL PRFV:

- **BAJO PESO**

La propiedad de bajo peso de los plásticos reforzados con fibra de vidrio resulta muy llamativa al compararlos con materiales como el acero, esto se debe a que la densidad del acero es cuatro veces mayor que la de los plásticos reforzados. Si lo comparamos con el titanio, aunque la diferencia es menor, éste sería dos veces más denso que el PRFV.

El peso más ligero de la fibra de vidrio permite ahorrar en costos de transporte y costos de instalación.

- **BUENA RELACIÓN RESISTENCIA-PESO**

Otra ventaja característica de los materiales compuestos es su gran relación peso-resistencia. Hablando exclusivamente del peso, como se ha indicado anteriormente, el PRFV es sólo un cuarto del peso del acero, y si se comparan para la misma resistencia, la fibra de vidrio pesará aproximadamente un séptimo menos que si el producto fuera de acero.

Los productos fabricados con plásticos reforzados con fibra de vidrio pueden ser hasta un 80% más ligeros que el mismo producto fabricado en acero o un 50% del de titanio. Esta disminución de peso ayuda a minimizar los riesgos relacionados con la manipulación manual y reduce los costes de instalación, eliminando el requisito de los equipos de elevación pesados.

Esta propiedad es la razón por la que se utilizan los materiales compuestos para construir, por ejemplo, aviones que necesitan un material con muy alta resistencia, pero reduciendo el peso lo máximo posible. Los materiales compuestos permiten fabricar un producto para resistir la flexión en una dirección concreta, en cambio con el metal si se necesita mayor resistencia en una dirección normalmente es necesario aumentar el espesor, lo que hace que aumente peso. Los plásticos reforzados pueden ser fuertes sin ser pesados. Los plásticos reforzados mediante fibra de vidrio tienen las proporciones más altas de resistencia a peso.

- **ALTA RESISTENCIA QUÍMICA Y A LA CORROSIÓN**

Puede que una de las razones principales para utilizar plástico reforzado con fibra de vidrio (PRFV) es su resistencia inherente a la corrosión. Conseguir que los metales sean resistentes a la corrosión implica tratamientos adicionales y un mantenimiento continuado. Es por eso que, al compararlos, el producto fabricado en PRFV puede ser la solución más económica en una situación en la que afecte la corrosión.

En cuanto a las condiciones externas, los plásticos reforzados resisten daños causados por el clima, por estar ubicados a la intemperie, resisten al clima severo y a grandes cambios de temperatura. Además, resisten una amplia gama de productos químicos y no se ven afectados por la humedad o la inmersión en el agua, por lo que son ideales para superficies que puedan estar en contacto con productos químicos. En comparación con materiales tradicionales, el PRFV resiste el daño de los insectos, la oxidación y la corrosión.

En este punto si hay que decir que tanto el acero inoxidable como el titanio pueden ser interesantes competidores ya que, como se ha dicho anteriormente, también son característicos por su buena resistencia a la corrosión.

- **BAJOS COSTES DE MANTENIMIENTO**

Como consecuencia de lo dicho hasta ahora, los productos fabricados en PRFV requieren muy poco o ningún mantenimiento ya que no necesitan reparación o el reemplazo de componentes debido a problemas de oxidación o corrosión. En cambio, otros materiales metálicos, aunque tienen quizás un coste de material inicial menor que el plástico reforzado con fibra de vidrio, éste último tiene un menor costo de instalación y mantenimiento que se traduce en un menor costo de ciclo de vida en general, reduciéndolos o incluso llegando a eliminarlos.

- **LARGA VIDA ÚTIL**

Los plásticos reforzados con fibra de vidrio proporcionan una durabilidad excepcional en aplicaciones exigentes, debido, por ejemplo, a su resistencia a la corrosión y a los ambientes agresivos. Consiguiendo así una vida mejorada del producto al compararlos con esos mismos productos en materiales tradicionales. La vida útil del acero al carbono y del acero inoxidable es menor. De nuevo, el titanio puede ser comparable en este punto.

El rendimiento y la durabilidad de las estructuras de PRFV proporcionan una vida útil extremadamente larga, en medio siglo de desarrollo las estructuras de fibra de vidrio bien diseñadas todavía no se han degradado.

- **FLEXIBILIDAD EN EL DISEÑO**

Otra característica que puede resultar muy interesante es la gran flexibilidad y diversidad de usos prácticos del PRFV. La Fibra de Vidrio ha abierto muchas nuevas vías para los diseñadores creativos, sus propiedades físicas únicas permiten que se moldee fácilmente y se fabrique para satisfacer casi cualquier especificación, ya que las restricciones en tamaño, forma, color o acabado son mínimas. El PRFV es un material adaptable y versátil con un enorme alcance para ser moldeado en prácticamente cualquier forma.

Adicionalmente, una ventaja que ofrecen los plásticos reforzados sobre los materiales tradicionales, que resulta muy interesante, es la posibilidad de proyectar y construir grandes estructuras concebidas en su conjunto y no como un ensamble de elementos individuales que tendrían que unirse mecánicamente.

- **RESISTENCIA AL IMPACTO**

Los plásticos reforzados se pueden diseñar para absorber impactos. La fibra de vidrio no se deformará ni se romperá permanentemente bajo el impacto como si sucede con los materiales de construcción tradicionales. La capa de fibra de vidrio en las piezas distribuye la carga del impacto para evitar daños superficiales, incluso en temperaturas bajo cero.

- **OTRAS VENTAJAS**

Los plásticos reforzados con fibra de vidrio se caracterizan, además, por:

- Conductividad eléctrica nula, todo lo contrario que los metales.
- Conductividad térmica muy baja por lo que son buenos aislantes a diferencia de los metales, como el acero, que conducen el calor. La resistencia del PRFV al calor hace que tenga éxito incluso en condiciones húmedas y pantanosas. Hay que indicar que el coeficiente de dilatación térmica para ambos casos es del mismo orden.
- No ser magnéticos por no contener metales. Esto favorece a que se puedan utilizar alrededor de equipos electrónicos sensibles, por ejemplo.
- Transparencia a radares; es decir, las señales de radar pasan a través del PRFV, esto hace que sea ideal para su uso en cualquier equipo de radar que esté operando, ya sea en tierra o en el aire.

DESVENTAJAS DEL PRFV:

- **MAL COMPORTAMIENTO A MUY ALTAS TEMPERATURAS**

El PRFV trabaja bien a altas temperaturas, pero su comportamiento deja de ser adecuado cuando éstas superan los 100-120°C.

- **MENOR RIGIDEZ RELATIVA**

Para un mismo espesor de material, la rigidez del laminado de PRFV será menor que la rigidez del laminado análogo de metal. Para conseguir la misma rigidez es necesario aumentar el espesor del laminado en PRFV añadiendo más material o utilizar elementos rigidizadores.

- **MENOR DUCTILIDAD**

Al comparar el PRFV con los metales destaca su peor ductilidad. El alargamiento a la rotura generalmente está comprendido entre 1 y 2%, para el PRFV, en comparación con alrededor del 40% para el acero. La deformación del plástico reforzado es casi elástica hasta la carga de rotura, mientras que el límite elástico del acero es de alrededor del 0.2%.

- **MENOS EXPERIENCIA A LARGO PLAZO**

La información sobre las propiedades mecánicas de los plásticos reforzados con fibra es algo limitada, en particular, por los cambios de las propiedades a lo largo del tiempo. Como no hay propiedades exhaustivas a largo plazo, las propiedades de los materiales que se utilizan para el diseño se basan en pruebas a corto plazo.

En cambio, los recipientes metálicos, que están hechos de materiales que normalmente son isotrópicos, se diseñan en función de las tensiones admisibles, en función de las propiedades de tracción y ductilidad conocidas. Por el contrario, los materiales laminados suelen ser anisotrópicos y el método de diseño se basa en cargas unitarias, que es adecuado para el diseño de materiales compuestos de plásticos reforzados.

6 DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Los evaporadores son equipos que se utilizan para producir vapor y/o para concentrar sales, consiguiendo mediante el proceso de evaporación una solución final con una concentración cercana al punto de saturación. El proceso de evaporación consiste en la retirada de agua, generalmente, de una solución mediante calentamiento empleando una fuente de calor. Dicho calor puede obtenerse gracias a una caldera, una turbina de gas, un compresor de vapor, otros evaporadores o una combinación de distintas fuentes.

Existen varios tipos dependiendo de la clase de agua de alimentación al evaporador:

- Circulación forzada y tipo calandria cuando el agua tiene muchas sales.
- Tubo vertical cuando el agua de alimentación contiene pocas sales.

Las aplicaciones de este tipo de equipos son múltiples: industria química, fertilizantes, acabado de metales, industria alimenticia, industria textil, plantas de fibra sintética, destilerías...

Los usos más comunes para este tipo de equipos son los siguientes:

- Sistemas ZLD (Cero descarga líquida).
- Creación de vapor para diferentes procesos industriales.
- Cristalización de sales.

En concreto, el equipo objeto de este proyecto forma parte de un conjunto de evaporador a vacío con recirculación de mezcla. Este tipo de evaporadores funcionan en modo continuo y siempre van acompañados de un sistema de generación de vacío y otro sistema de recirculación y recalentamiento de la mezcla de la solución.

El esquema de este evaporador se muestra a continuación:

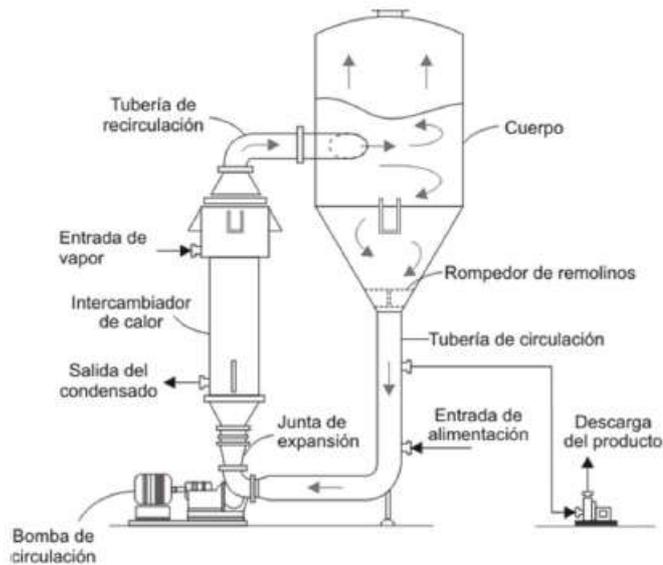


Ilustración 6 - Evaporador a vacío con recirculación de mezcla

El evaporador consta por tanto de:

- Evaporador
- Intercambiadores de calentamiento
- Bombas de recirculación
- Sistema de vacío

El equipo en el que se centra este proyecto es el evaporador como tal, el que en el esquema se identifica como cuerpo.

6.1. Geometría del evaporador

La geometría general del equipo se puede dividir en 3 partes principales: el fondo, el cuerpo y el techo. Sus características globales son las siguientes:

- El fondo es cónico, tiene un ángulo de inclinación de 60° con respecto a la horizontal y mide 1594 mm de profundidad y la tubuladura inferior es de 560 mm de diámetro.
- El cuerpo es cilíndrico tiene 2400 mm de diámetro y una altura de 2700 mm.
- El techo es abovedado tipo domo o toriesférico, en concreto es el que se conoce como tipo Korboggen. La altura total del techo es 667 mm, la altura del tramo recto que hay a continuación del cuerpo es de 57 mm, el radio mayor del techo es de 1950 mm y el radio de acuerdo entre el tramo recto y la parte superior del techo es de 375 mm.

La altura total del equipo es de 4961 mm y su dimensión mayor en el plano horizontal es 2400 mm, el diámetro del cuerpo.

Este equipo tendrá dos tubuladuras principale:, una en el cuerpo, mediante la que se conecta la tubería de recirculación con el evaporador, y otra en el fondo del cono, por la que se conecta el equipo a la tubería de circulación.

El evaporador estará sustentado por cuatro patas que salen de la parte inferior del cuerpo hacia la base en la que se encuentra apoyado.

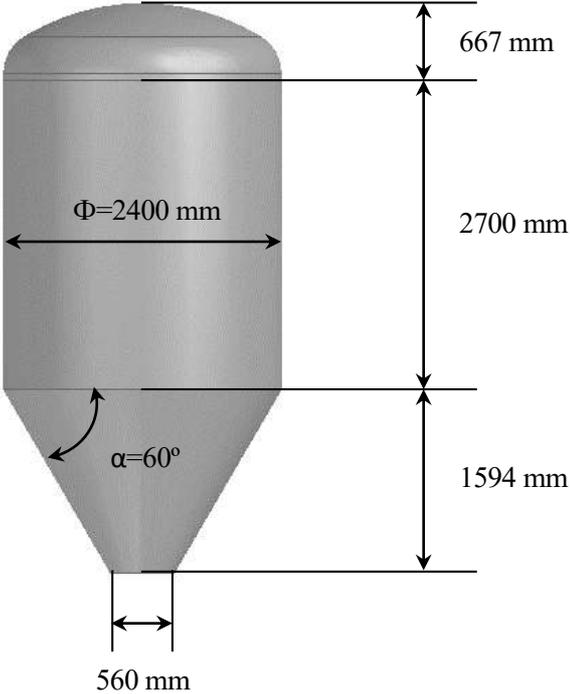


Ilustración 7 – Dimensiones generales del evaporador

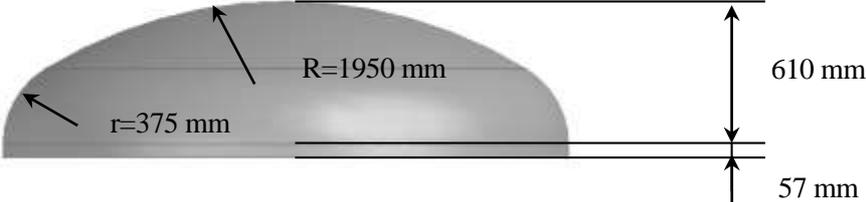


Ilustración 8 – Dimensiones del evaporador. Detalle techo korboggen

6.2. Contenido del evaporador

El contenido del equipo es N 9/ P 0/ K 12,3 cuya densidad es $\rho_{\text{contenido}}=1250 \text{ kg/m}^3$.

6.3. Condiciones de operación y diseño

Las condiciones normales de operación en las que trabajará el evaporador son:

$$T_{\text{operación}} = 30 \text{ a } 50^{\circ}\text{C},$$

$$P_{\text{operación}} = 35\text{-}500 \text{ mbar}$$

Las condiciones de diseño consideradas para el evaporador son:

$$T_{\text{diseño}} = 65^{\circ}\text{C}.$$

$$P_{\text{diseño}} = \text{vacío absoluto}.$$

En resumen, las tres características a destacar con las que va a trabajar este equipo son:

- ***contenido muy corrosivo***
- ***presión de vacío***
- ***alta temperatura***

7 CONCLUSIONES

Tras realizar el análisis mediante el Método de los Elementos Finitos de los evaporadores de PRFV, acero al carbono, acero inoxidable y titanio, incluidos en la Memoria Justificativa de este proyecto, y observar los resultados se tiene que:

Comparando los desplazamientos máximos obtenidos en cada caso:

DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS (mm)	
EVAPORADOR PRFV	0,030
EVAPORADOR S275JR	1,377
EVAPORADOR A.INOX.	1,430
EVAPORADOR TITANIO	2,819

Tabla 1 – Comparativa evaporadores: Desplazamientos

El evaporador que tiene menores valores de desplazamientos es el diseñado en PRFV. Los valores más favorables se obtienen por tanto para el evaporador en PRFV, después para los evaporadores de acero y, por último, el que obtiene los valores de desplazamientos más desfavorables es el evaporador de titanio.

En cuanto a las tensiones, si se comparan los mayores valores obtenidos en cada caso para la relación entre la tensión de cálculo y la tensión máxima admisible ($\sigma_{\text{CALC}}/\sigma_{\text{ADM}}$):

COMPROBACIÓN $\sigma_{\text{CALC}}/\sigma_{\text{ADM}}$	
EVAPORADOR PRFV	0,017
EVAPORADOR S275JR	0,83
EVAPORADOR A.INOX.	0,99
EVAPORADOR TITANIO	0,27

Tabla 2 - Comparativa evaporadores: Tensiones

El evaporador que tiene valores de tensiones más favorables, por estar más alejados del valor de tensión máxima admisible, es el evaporador diseñado en PRFV, el siguiente sería el diseñado en Titanio, después el evaporador

de acero al carbono y, por último, el que tiene mayor grado de aprovechamiento pero también mayores tensiones sería el diseñado en acero inoxidable.

Destaca la diferencia de los valores obtenidos tanto en desplazamientos como en aprovechamiento (relación de tensiones) para el PRFV y los metales, siendo mucho más bajo para el PRFV. Una posible justificación para este suceso es que los espesores del equipo diseñado en PRFV son mucho mayores que los necesarios para los evaporadores metálicos, también que proponen la colocación de refuerzos o rigidizadores adicionales para el equipo de PRFV cuando por cálculo mecánico no serían rigurosamente necesarios. Esto se debe a que el estándar BS-4994 y las normas en general para diseñar equipos en PRFV son muy conservadoras, aplican coeficientes de seguridad mucho mayores que los que se aplican en los diseños metálicos, como ya se ha explicado anteriormente, por falta de experiencia a largo plazo. Además, las uniones entre elementos del equipo para PRFV se realizan por solape con capas adicionales de material, en cambio para los equipos metálicos estas uniones se llevan a cabo mediante fusión de los materiales.

Otro factor para tener en cuenta es que el contenido del evaporador es altamente corrosivo por lo que el evaporador de PRFV, de acero inoxidable o de titanio serían más aconsejables que el de acero al carbono ya que éste último tendría que tener un recubrimiento interior considerable y un engomado para que no se viese afectado por la corrosión, pero el engomado es algo que no funciona bien cuando el equipo se encuentra a vacío.

Con lo dicho hasta ahora, se puede optar por descartar el evaporador de acero al carbono ya que, aunque el comportamiento mecánico es válido y tiene un buen porcentaje de aprovechamiento (83%), el problema de la corrosión y el tener que trabajar, además, a vacío hace que este material no sea adecuado.

Por último, se han obtenido unos presupuestos estimados de coste de fabricación (aplicándole un factor de mayoración del 30%) de los dos evaporadores que quedan. El desarrollo de la estimación del coste del evaporador de PRFV se recoge en el Apartado 3 “Análisis económico de las soluciones” de la Memoria Justificativa de este proyecto, mientras que el coste del evaporador de acero inoxidable y de titanio se han obtenido consultando presupuestos de distintos proveedores y también se han recogido en el Apartado 3 “Análisis económico de las soluciones” de la Memoria Justificativa de este proyecto. Estos valores se han mayorado un 30% para considerar posibles variaciones que puedan afectar al precio. Los costes son los siguientes:

COSTE (€)	
EVAPORADOR PRFV	23.890,00 €
EVAPORADOR A.INOX.	38.780,00 €
EVAPORADOR TITANIO	66.700,00 €

Tabla 3 – Comparativa evaporadores: Coste

Con lo indicado anteriormente, se puede concluir que el evaporador que cumple mejor las condiciones necesarias para el uso deseado y que, además, es la alternativa más económica es el evaporador de PRFV. De esta manera se ha conseguido diseñar un evaporador que soluciona el problema mecánico válido para trabajar a vacío y con una temperatura alta, pero siempre menor que 100°C, y con un buen comportamiento ante la corrosión.

Queda así demostrado que, en ocasiones, a la hora de diseñar un equipo puede interesar plantearse utilizar alternativas fabricadas en materiales compuestos frente a las fabricadas en materiales tradicionales.

Por último, se plantean las siguientes líneas de desarrollo:

- Comprobar y asegurar los datos estimados de costes.
- Desarrollar detalladamente la geometría final incluyendo tubuladuras y otros accesorios.
- Implementar un modelo piloto.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

DISEÑO DE UN EVAPORADOR A VACÍO EN MATERIALES PLÁSTICOS

II. MEMORIA JUSTIFICATIVA

Autor: Jesica Garrudo Antona

Tutor: Andrés Cubero Moya

Dpto. de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



1 CÁLCULO ANALÍTICO BS-4994

Para llevar a cabo el diseño del evaporador en PRFV, como ya se ha dicho anteriormente, se ha utilizado el estándar BS-4994.

1.1. General

British Estándar es un estándar británico que especifica los requisitos para el diseño, materiales, construcción, inspección, prueba y montaje de recipientes y tanques en plásticos reforzados. Estos materiales consisten en un sistema de resina de poliéster, epoxi o furano reforzado con fibras de vidrio, fabricado mediante el proceso de colocación en húmedo. Se incluyen construcciones con y sin forro de termoplásticos.

Esta norma cubre los recipientes y tanques sujetos a temperaturas entre -30°C y 110°C .

1.2. Materiales y cargas de diseño

Las propiedades mecánicas de las capas de laminado deben ser acordadas entre el comprador y el fabricante, y no deben ser menores que los valores dados en la Tabla 1. Se aplican los valores dados en la Tabla 1 a laminados que incorporan sólo refuerzos de fibra de vidrio tipo E que cumplen con BS 3396, BS 3496, BS 3691 o BS 3749 y que tienen un contenido de vidrio por masa dentro del rango de 28% a 45% para Mat (CSM), 45% a 55% para Tejidos (WR) y el 65% al 75% para Filamentos.

TIPO DE REFUERZO		UTUS (Resistencia a tracción) (N/mm ancho por kg/m ² vidrio)	Xz UNIT MODULUS (Módulo unitario) (N/mm ancho por kg/m ² vidrio)	LAP SHEAR STRENGTH (Resistencia a la cizalladura) (N/mm ²)
MAT	CSM (Resinas distintas de furano)	200	14000	7
	CSM (Furano)	140	14000	5
TEJIDO	Tela WR tejido liso (Direcciones de deoformación y trama) (Resinas distintas de furano)	250	16000	6
	Tela WR tejido liso (Direcciones de deoformación y trama) (Furano)	160	16000	4
FILAMENTO	Filamento unidireccional (dirección de la fibra)	500	28000	6

Tabla 4 - Propiedades mínimas admisibles para las capas de laminado

1.2.1. Cargas unitarias de diseño admisibles

Cuando se diseña en plásticos reforzados interesa trabajar en términos de carga unitaria (fuerza por ancho unitario) en lugar de tensiones (fuerza por unidad de área). Estos valores están definidos por kg/m² de material, teniendo en cuenta los valores de la densidad superficial para cada tipo de laminado se pueden obtener los valores en las unidades deseadas.

TIPO DE REFUERZO		DENSIDAD SUPERFICIAL (kg/m ²)
MAT	CSM (Resinas distintas de furano)	0.45
	CSM (Furano)	
TEJIDO	Tela WR tejido liso (Direcciones de deoformación y trama) (Resinas distintas de furano)	0.8
	Tela WR tejido liso (Direcciones de deoformación y trama) (Furano)	
FILAMENTO	Filamento unidireccional (dirección de la fibra)	0.689

Tabla 5 – Valores de densidad superficial para las capas de laminado

TIPO DE REFUERZO		UTUS (Resistencia a tracción) (N/m de ancho)	Xz UNIT MODULUS (Módulo unitario) (N/m de ancho)
MAT	CSM (Resinas distintas de furano)	90000	6300000
	CSM (Furano)	63000	6300000
TEJIDO	Tela WR tejido liso (Direcciones de deoformación y trama) (Resinas distintas de furano)	200000	12800000
	Tela WR tejido liso (Direcciones de deoformación y trama) (Furano)	128000	12800000
FILAMENTO	Filamento unidireccional (dirección de la fibra)	344500	19292000

Tabla 6 - Propiedades mínimas admisibles para las capas de laminado (Cargas unitarias)

1.2.a.1. Cálculo del Factor K

El factor de diseño K se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$K = 3 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \quad (1)$$

donde el factor 3 representa una constante que permite la reducción de la resistencia del material causada por la carga a largo plazo (requerida incluso para la carga en el aire), y k₁ a k₅ representan factores determinados por el método de fabricación y las condiciones de operación. Ningún depósito o tanque deberá tener un factor de diseño K con un valor inferior a 8.

Los valores para cada k_i se determinan a continuación:

Factor del método de fabricación, k_1 :

El valor de este factor se obtiene de la Tabla 4, según el método de fabricación.

TIPO DE REFUERZO	k_1
Fabricado a mano	1.5
Devanado de filamentos a máquina	1.5
Aplicación del spray a máquina	1.5
Aplicación del spray a mano	3

Tabla 7 - Factor k_1

Para este caso, dependiendo de la parte del evaporador, se utilizará fabricación manual, fabricarán mediante devanado de filamentos a máquina o aplicación de espray a máquina. Para cualquiera de los tres tipos de métodos de fabricación el valor del factor es $k_1=1.5$.

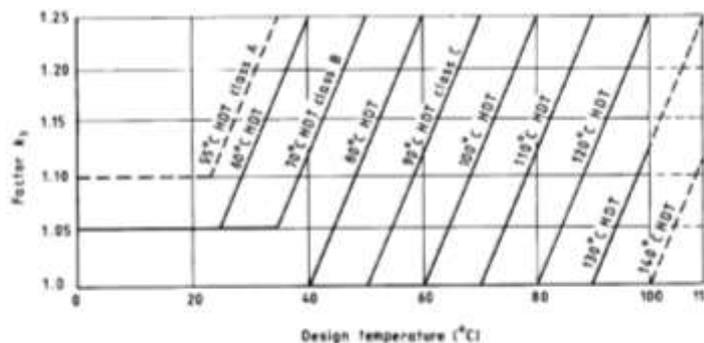
Factor del ambiente químico, k_2 :

El valor de este factor es de 1,2 para los recipientes que tienen un forro termoplástico a menos que la falta de experiencia o los datos de prueba adecuados sugieran que se requiere un valor más alto. El factor para los buques sin forro de termoplástico se seleccionará dentro del rango de 1.2 a 2.0.

Para este caso, se ha optado por tomar el mayor valor para estar del lado de la seguridad $k_2=2$.

Factor de temperatura, k_3 :

Este factor tiene un valor que está dentro del rango de 1 a 1.25, dependiendo de la temperatura de diseño. Para determinarlo hay que consultar la siguiente ilustración.



NOTE: Experience in the range above 100 °C is limited and it is therefore recommended there is a full discussion between the manufacturer and the purchaser if a vessel is required to operate in this range.

Ilustración 9 - Factor k_3

Teniendo en cuenta que la temperatura de diseño es de 65°, el valor que se obtiene para el factor es $k_3=1.1$.

Factor de cargas cíclicas, k_4 :

Dependiendo de las condiciones de funcionamiento en las que se encuentra el depósito se obtiene, utilizando la siguiente ilustración, el valor de este factor.

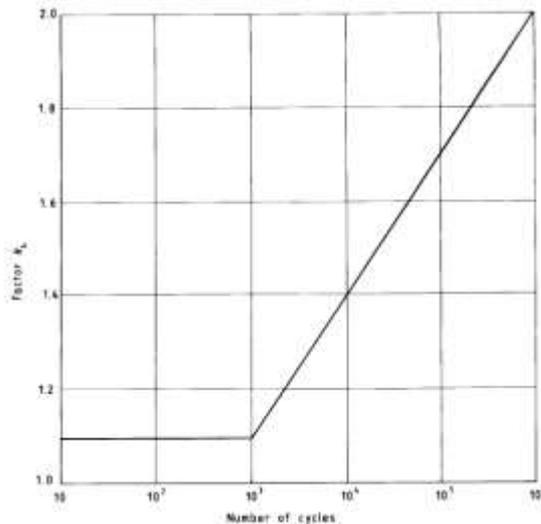


Ilustración 10 - Factor k_4

Para el presente caso en concreto, se ha tomado el valor más desfavorable, para estar del lado de la seguridad (10^6 ciclos), por lo que el valor del factor es $k_4=2$.

Factor del procedimiento de curado, k_5 :

Cuando el recipiente se somete a un procedimiento de curado completo, incluido un postcurado completo a temperatura elevada apropiada para el sistema de resina, en las instalaciones del fabricante el factor k_5 se tomará como 1.1.

Los recipientes que no se sometan a procedimiento de postcurado completo tendrán un valor del factor k_5 de 1.3 cuando estén diseñados para operar a temperaturas de hasta 45 °C y 1,5 cuando están diseñadas para temperaturas de funcionamiento a 45 °C o más.

En el caso del presente estudio, teniendo en cuenta que puede que no se someta a un proceso de postcurado y que la temperatura de funcionamiento es de 65° C, el valor del factor es $k_5=1.5$.

Una vez calculados los valores de los cinco factores necesarios se puede calcular el valor del Factor de diseño K, aplicando la ecuación (1):

$$K = 3 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 = 29.7 \rightarrow \boxed{K = 29.7} \text{ FACTOR DE DISEÑO}$$

1.2.a.2. Carga unitaria límite admisible

La carga unitaria límite admisible se calcula con la siguiente ecuación:

$$u_L = \frac{u}{K} \quad (2)$$

donde:

u: UTUS recogido en la Tabla 3

K: factor de diseño, calculado según la ecuación (1)

Los valores calculados de u_L , para cada tipo de capa de laminado, se recogen en la siguiente tabla:

TIPO DE REFUERZO		u_L Carga unitaria límite admisible (N/m de ancho)
MAT	CSM (Resinas distintas de furano)	3030
	CSM (Furano)	2121
TEJIDO	Tela WR tejido liso (Direcciones de deoformación y trama) (Resinas distintas de furano)	6734
	Tela WR tejido liso (Direcciones de deoformación y trama) (Furano)	4310
FILAMENTO	Filamento unidireccional (dirección de la fibra)	11599

Tabla 8 – Valores de carga unitaria límite admisible

1.2.a.3. Carga unitaria admisible a deformación

La carga unitaria admisible a deformación se calcula aplicando la siguiente ecuación:

$$u_S = X_z \cdot \epsilon \quad (3)$$

donde:

X_z : módulo unitario (kg/m^2)

ϵ : máxima deformación admisible $\epsilon = \min(0.1 \cdot \epsilon_R, 0.2\%) = \min(0.1 \cdot 4.5\%, 0.2\%) = 0.2\%$
ya que para la Resina Drakane 441 se tiene que $\epsilon_R = 4.5\%$

Los valores calculados de u_s , para cada tipo de capa de laminado, se recogen en la siguiente tabla:

TIPO DE REFUERZO		u_s Carga unitaria admisible a deformación (N/m de ancho)
MAT	CSM (Resinas distintas de furano)	12600
	CSM (Furano)	12600
TEJIDO	Tela WR tejido liso (Direcciones de deformación y trama) (Resinas distintas de furano)	25600
	Tela WR tejido liso (Direcciones de deformación y trama) (Furano)	25600
FILAMENTO	Filamento unidireccional (dirección de la fibra)	38584

Tabla 9 – Valores de carga unitaria máxima en deformación

1.2.a.4. Carga unitaria de diseño

La carga unitaria de diseño para cada capa se calcula teniendo en cuenta que:

- Si u_s es menor que u_L , para todas las capas, el valor apropiado de u_s se tomará como el valor de la carga unitaria de diseño (u_z) para cada capa.
- Si u_L es menor que u_s , para algunas o todas las capas, la tensión para cada capa en cuestión se determinará a partir de la siguiente ecuación:

$$\epsilon_L = \frac{u_L}{X_z} \quad (4)$$

donde:

u_L : carga unitaria límite admisible (N/m de ancho)

X_z : módulo unitario (kg/m^2)

En este caso, se cumple la condición b) por lo que se aplica la ecuación (4) para calcular los valores de ϵ_L , los valores obtenidos se recogen en la siguiente tabla:

TIPO DE REFUERZO		ϵ_L Deformación de cada capa %
MAT	CSM (Resinas distintas de furano)	0.048%
	CSM (Furano)	0.034%
TEJIDO	Tela WR tejido liso (Direcciones de deoformación y trama) (Resinas distintas de furano)	0.053%
	Tela WR tejido liso (Direcciones de deoformación y trama) (Furano)	0.034%
FILAMENTO	Filamento unidireccional (dirección de la fibra)	0.060%

Tabla 10 – Valores de deformación admisible de cada capa

Considerando todas las capas que componen el laminado, la deformación admisible para ese laminado, ϵ_d , será el valor más pequeño entre los valores de ϵ_L calculados para cada capa. En este caso en particular, se concluye que $\epsilon_d=0.048\%$.

La carga unitaria de diseño para cada capa, u_z , se determinará a partir de la ecuación siguiente ecuación:

$$u_z = X_z \cdot \epsilon_d \quad (5)$$

donde:

X_z : módulo unitario (kg/m^2)

ϵ_d : deformación admisible para ese laminado

Los valores calculados para la carga unitaria de diseño de cada capa se recogen en la siguiente tabla:

TIPO DE REFUERZO		u_z Carga unitaria de diseño PARA LA CAPA (N/m de ancho)
MAT	CSM (Resinas distintas de furano)	3030
	CSM (Furano)	3030
TEJIDO	Tela WR tejido liso (Direcciones de deoformación y trama) (Resinas distintas de furano)	6157
	Tela WR tejido liso (Direcciones de deoformación y trama) (Furano)	6157
FILAMENTO	Filamento unidireccional (dirección de la fibra)	9279

Tabla 11 – Valores de carga unitaria de diseño para cada capa

Las cargas unitarias de diseño para cada tipo de capa, u_z se sustituirán según se vaya necesitando en las ecuaciones de diseño del Apartado 1.3. Diseño.

Este procedimiento no se aplica cuando los filamentos estén enrollados en con un ángulo de Θ (en grados) con respecto al eje del depósito o del tanque y, en este caso, se obtendrán valores de módulo unitario circunferencial y longitudinal (X_ϕ y X_x) para cada capa de la siguiente ilustración.

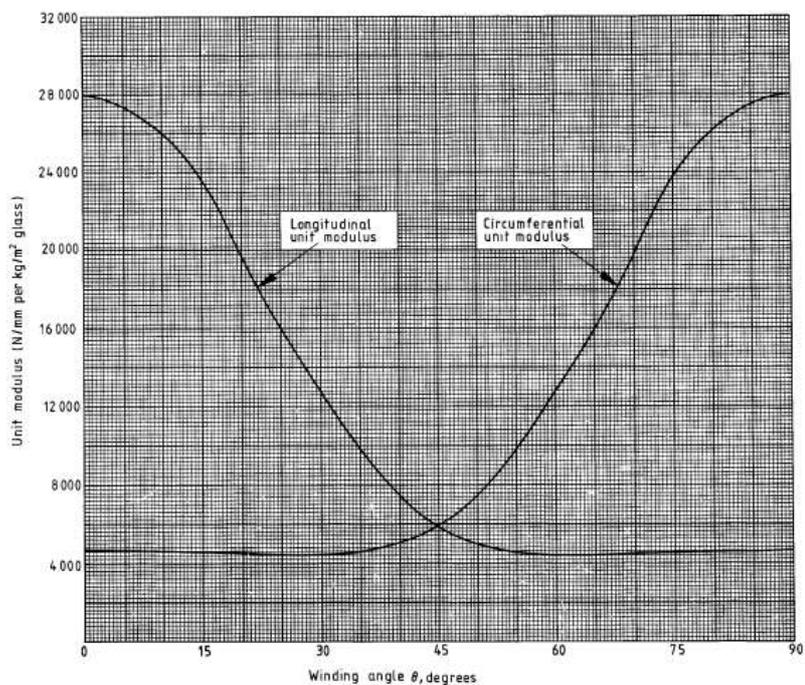


Ilustración 11 - Valores de los módulos unitarios circunferencial y longitudinal

Por simplicidad, estos valores de módulos unitarios circunferencial y longitudinal se han recogido en la siguiente tabla para cada valor del ángulo del filamento (Θ):

ÁNGULO θ (°)	MÓDULO CIRCUNFERENCIAL X_ϕ (N/mm)	MÓDULO LONGITUDINAL X_x (N/mm)
0	4700	28000
5	4600	27400
10	4600	26000
15	4550	23600
20	4500	19600
25	4400	16000
30	4400	12700
35	4600	9800
40	5000	7500
45	5900	5900
50	7500	5000
55	9800	4600
60	12700	4400
65	16000	4400
70	19600	4500
75	23600	4550
80	26000	4600
85	27400	4600
90	28000	4700

Tabla 12 - Valores de los módulos unitarios circunferencial y longitudinal

Los valores de las cargas unitarias de diseño circunferencial y longitudinal se determinarán a partir de las siguientes ecuaciones y aplicando los factores indicados en la Tabla 10, según corresponda.

Módulo unitario en dirección circunferencial:

$$u_z = X_\phi \cdot \epsilon_d \cdot F_\phi \quad (6)$$

Módulo unitario en dirección longitudinal:

$$u_z = X_x \cdot \epsilon_d \cdot F_x \quad (7)$$

Filament winding angle to axis θ degrees	Circumferential factor F_ϕ	Longitudinal factor F_x
$0 < \theta \leq 15$	0	1
$15 < \theta \leq 75$	0.5	0.5
$75 < \theta \leq 90$	1	0

NOTE Higher values may be used for these factors if a rigorous anisotropic elastic analysis is carried out. This analysis allows for the contribution from each layer in the laminate and for the interaction between normal and shear strains (see references [9], [10] and [11]).

Tabla 13 – Valores de los factores circunferenciales y longitudinales

Teniendo todo esto en cuenta, se calculan los valores de cargas unitarias de diseño circunferencial y longitudinal para los filamentos arrollados con un ángulo de 90°, que son los que se van a utilizar en el evaporador. Los valores obtenidos se recogen en la siguiente tabla:

	Circunferencial $u_{z\phi}$ (N/m de ancho)	Longitudinal u_{zx} (N/m de ancho)
Carga unitaria de diseño PARA EL FILAMENTO 90°	9279	0

Tabla 14 – Valores de cargas unitarias de diseño circunferencial y longitudinal

1.3. Diseño

El depósito o tanque debe diseñarse para la combinación más desfavorable de condiciones que puede incluir:

- a) presión interna o externa;
- b) cargas estáticas (condiciones de operación y prueba);
- c) peso del depósito o tanque y de su contenido;
- d) temperatura de diseño;
- e) sobrecargas y cargas de viento;
- f) momentos de flexión debido a cargas excéntricas;
- g) cargas localizadas que actúan en los soportes, orejetas y otros accesorios;
- h) cargas de sismo;
- i) cargas debidas a calentamiento o enfriamiento y gradientes térmicos;
- j) cargas aplicadas durante el transporte o montaje;
- k) cargas impuestas por el personal durante el montaje y la operación;
- l) fatiga.

El objetivo de los cálculos de esta sección es determinar una distribución de laminados aceptable para cada parte y detalle; por ejemplo, cuerpo, tapa y fondo, extremos, bocas de hombre, soportes...

La temperatura de diseño debe ser la temperatura máxima que es posible que alcance el depósito o tanque en condiciones de operación (incluyendo ebullición si correspondiese).

En cuanto a la presión de diseño, presión que se utilizará en los cálculos para establecer la resistencia requerida de las partes que forman el depósito o el tanque, decir que no será menor que:

- a) la presión que existirá en dichas partes del recipiente o depósito cuando el (los) dispositivo (s) de alivio de presión comience (n) a liberarse o la presión establecida del (los) dispositivo (s) de alivio de presión, el que sea mayor;
- b) la presión o altura máxima que se puede lograr en condiciones de operación cuando no está limitada por los dispositivos de alivio.

El valor de la (s) presión (es) de diseño que se utilizará (n) en el cálculo incluirá la carga estática de contenido o medio de prueba, según corresponda, teniendo en cuenta la densidad relativa.

Los depósitos sometidos a presión externa se diseñarán para la máxima presión diferencial a la que pueda estar sometido en condiciones de operación.

NOTA 1 Se recomienda que los recipientes sometidos a presión de vacío se diseñen para una presión negativa completa de 1 bar a menos que se proporcione una válvula de vacío o un dispositivo similar, en cuyo caso se puede acordar una menor presión de diseño entre el comprador y el fabricante.

Para cada parte del depósito o tanque, las capas de laminado propuestas se determinarán teniendo en cuenta la carga unitaria de diseño para cada una de las capas del laminado (calculada de acuerdo con el Apartado 1.2).

Las cargas unitarias se calcularán más adelante, teniendo en cuenta la geometría del equipo. La mayor de estas cargas unitarias se utilizará en la ecuación (8).

Para que el laminado propuesto para cada parte del equipo sea idóneo debe cumplir la siguiente ecuación:

$$u_1 \cdot m_1 \cdot n_1 + u_2 \cdot m_2 \cdot n_2 + \dots u_z \cdot m_z \cdot n_z \geq Q \quad (8)$$

donde:

u_z : carga unitaria de diseño en una capa de laminado tipo z (N/mm por kg/m²)

m_z : masa por unidad de área en una capa de laminado tipo z (kg/m²)

n_z : número de capas de laminado tipo z (para los filamentos enrollados hay que considerar dos hélices enrolladas a $\pm \Theta^\circ$)

Decir que puede darse el caso en el que el valor de más de un n_z sea indeterminado. La comprobación deberá realizarse de forma iterativa mediante un método de prueba y error, pudiéndose encontrar más de una solución aceptable en estas circunstancias. Otra opción es que todos menos uno (o dos interdependientes) valores de n_z sean fijos y el valor restante determinado.

Si la suma de los términos es menor que Q, se aumentarán uno o más de los valores de n_z o se propondrá una construcción de laminado diferente y los cálculos se repetirán hasta que se cumpla la condición requerida. Si la suma de los términos excede Q por un margen grande, el laminado está sobrediseñado para la región en cuestión y sería interesante ajustarlo para aprovechar mejor el material.

Cuando se necesite el valor del espesor en las ecuaciones, el espesor del laminado en la región considerada se tomará como la suma de los espesores de las capas individuales que lo componen.

En ningún caso el espesor del laminado debe ser inferior a 3 mm para tanques sujetos solo a la carga hidrostática del contenido líquido, y 5 mm para los recipientes sujetos a presión interna o de vacío.

Se deben evitar cambios abruptos en el espesor del laminado. El estrechamiento de mezcla entre regiones de diferente grosor no debe mayor pendiente de 1/6.

A continuación, comienza el cálculo del equipo propiamente dicho. Se va a dividir en 3 partes: los cálculos para el diseño del cuerpo, los cálculos para el diseño del techo y los cálculos para el diseño del fondo.

1.3.1. Cálculo del cuerpo del evaporador

Para llevar a cabo el diseño del cuerpo del evaporador se ha consultado el Apartado 14: “Cylindrical and spherical shells” del documento BS 4994:1987. Los siguientes cálculos se han desarrollado teniendo en cuenta de que este evaporador tiene cuerpo cilíndrico y está sometido a presión interna de vacío.

La carga unitaria circunferencial, Q_{θ} , se determina con la siguiente ecuación:

$$Q_{\theta} = \frac{p \cdot D_i}{2} \quad (9)$$

donde:

p: presión total efectiva (N/mm^2). Suma de la presión interna y la presión hidrostática.

$$p = p_i + \rho \cdot g \cdot h \quad (10)$$

D_i : diámetro interior del cuerpo (mm).

La carga unitaria longitudinal, Q_x , se obtiene de la combinación de los efectos de:

- presión efectiva total;
- momento de flexión debido a cargas de viento u otras causas;
- peso total del buque o tanque, accesorios y contenidos;

y se obtiene aplicando la siguiente ecuación:

$$Q_x = \frac{p \cdot D_i}{4} + \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D_i^2} \pm \frac{W}{\pi \cdot D_i} \quad (11)$$

donde:

p: presión total efectiva (N/mm^2). Suma de la presión interna y la presión hidrostática.

$$p = p_i + \rho \cdot g \cdot h \quad (10)$$

D_i : diámetro interior del cuerpo (mm).

M : momento de flexión (N·mm).

W : peso del recipiente y del contenido (N). Su valor será negativo para puntos situados por encima del soporte del equipo se encuentra por encima del equipo y negativos para puntos situados por debajo.

$$W = ((2 \cdot \pi \cdot R \cdot H_T) \cdot e \cdot \rho_{PRFV} + V \cdot \rho_{\text{contenido}}) \cdot g \quad (12)$$

NOTA: inicialmente no se conoce el valor del espesor del evaporador, para comenzar el proceso iterativo se toma un valor inicial y cuando se obtiene el valor real se reajustan los cálculos.

Para el caso concreto del evaporador, se obtienen los siguientes valores:

Presión total efectiva: $p=36,50$ N/mm

Momento de flexión: $M=0$. No hay momento de flexión ya que no se considera el viento por estar el equipo en una nave cerrada

Peso total: $W= 46,738$ kg = 467 N

Con todo ello se concluye que:

Carga unitaria circunferencial: $Q_\theta = 73$ N/mm

Carga unitaria longitudinal: $Q_x = - 36.56$ N/mm

El mayor de estos valores se sustituirá en la ecuación (8), quedando la restricción que debe cumplir el laminado así:

$$u_1 \cdot m_1 \cdot n_1 + u_2 \cdot m_2 \cdot n_2 + \dots + u_z \cdot m_z \cdot n_z \geq Q = \max(Q_\theta, |Q_x|) = 73 \text{ N/mm}$$

Para cumplir con esta restricción se propone la siguiente distribución de laminado: 8 capas de Tejido y 22 capas de filamento a 90° (doble hélice), que proporciona el siguiente valor de los siguientes valores de cargas unitarias de diseño:

Carga unitaria de diseño circunferencial: $u_{LAM_\theta} = 251.72$ N/mm

Carga unitaria de diseño longitudinal: $u_{LAM_x} = 39.40$ N/mm

Cumpliendo ambas con la restricción de la ecuación (8) y obteniéndose un espesor para el cuerpo cilíndrico del evaporador con valor:

$$t_{\text{cuerpo}} = 19 \text{ mm}$$

El módulo compuesto del laminado también se determinará a partir de la siguiente ecuación:

$$E_{\text{LAM}} = \frac{X_{\text{LAM}}}{t} \quad (13)$$

donde:

X_{LAM} : modulo unitario total del laminado (N/mm)

$$X_{\text{LAM}} = X_1 m_1 n_1 + X_2 m_2 n_2 + \dots + X_z m_z n_z \quad (14)$$

donde:

X_z : módulo unitario de la capa tipo z (N/mm por kg/m²)

m_z : masa por unidad de área en una capa de laminado tipo z (kg/m²)

n_z : número de capas de laminado tipo z (para los filamentos enrollados hay que considerar dos hélices enrolladas a $\pm \Theta^\circ$)

t: espesor del laminado del cuerpo (mm)

Sustituyendo los valores numéricos actuales se obtiene que:

$$X_{\text{LAM}} = 743040 \text{ N/mm} \rightarrow E_{\text{LAM}} = 39107.37 \text{ N/mm}^2$$

Por otra parte, el espesor de laminado mínimo admisible, t_m , para evitar el pandeo se determinará a partir de las siguientes ecuaciones, según corresponda:

$$\text{Si } \frac{L}{D_o} \geq 1.35 \cdot \left(\frac{E_{\text{LAM}}}{p \cdot F} \right)^{0.17} \rightarrow t_m = D_o \left(\frac{p \cdot F}{2 \cdot E_{\text{LAM}}} \right)^{0.33} \quad (15)$$

$$\text{Si } \frac{L}{D_o} < 1.35 \cdot \left(\frac{E_{\text{LAM}}}{p \cdot F} \right)^{0.17} \rightarrow t_m = D_o \left(\frac{0.4 \cdot p \cdot F}{E_{\text{LAM}}} \cdot \frac{L}{D_o} \right)^{0.4} \quad (16)$$

donde:

Se debe tomar $F=4$.

L: longitud efectiva (mm)

D_o : diámetro exterior del cuerpo (mm).

E_{LAM} : módulo compuesto del laminado (N/mm²)

p: presión total efectiva (N/mm²).

Para el caso concreto del cuerpo del evaporador, se tiene que:

$$\frac{L}{D_o} = 1.33 < 1.35 \cdot \left(\frac{E_{LAM}}{p \cdot F} \right)^{0.17} = 10.36 \rightarrow t_m = D_o \left(\frac{0.4 \cdot p \cdot F}{E_{LAM}} \cdot \frac{L}{D_o} \right)^{0.40} = 15.65$$

Dado este valor del espesor de laminado mínimo admisible, t_m , se concluye que $t > t_m$, por lo que se cumple la restricción.

1.3.2. Calculo del techo del evaporador

Para realizar el diseño del techo del evaporador se ha aplicado el Apartado 18: “Ends” del documento BS 4994:1987.

Los distintos tipos de techos que se consideran en el BS4994:1987 son:

- a) hemisférico
- b) semielipsoide
- c) toriesférico
- d) cónico
- e) plano: totalmente soportado o acanalado
- f) cubiertas planas atornilladas

Algunos de ellos se muestran en las siguientes ilustraciones:

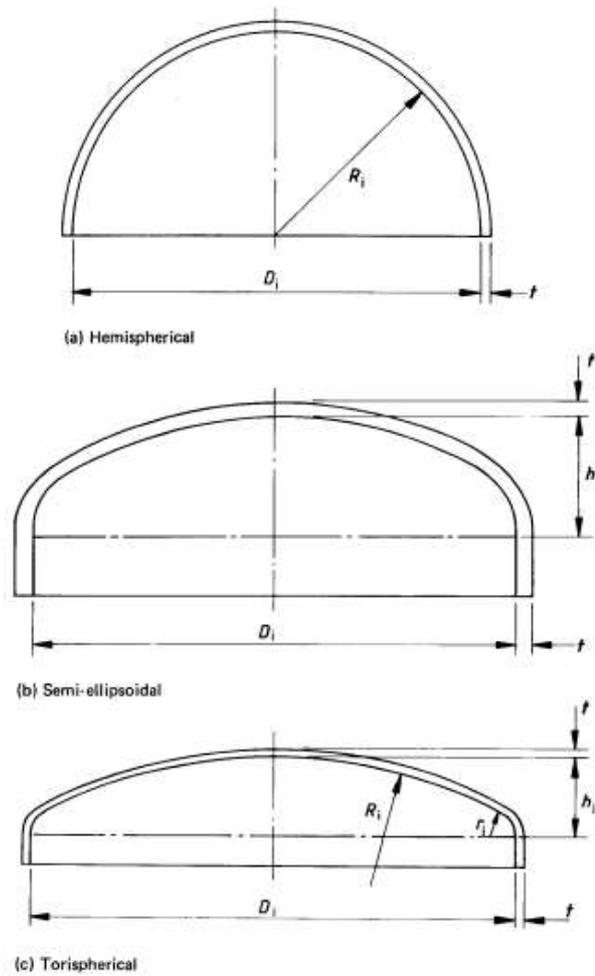


Ilustración 12 - Techos tipo domo

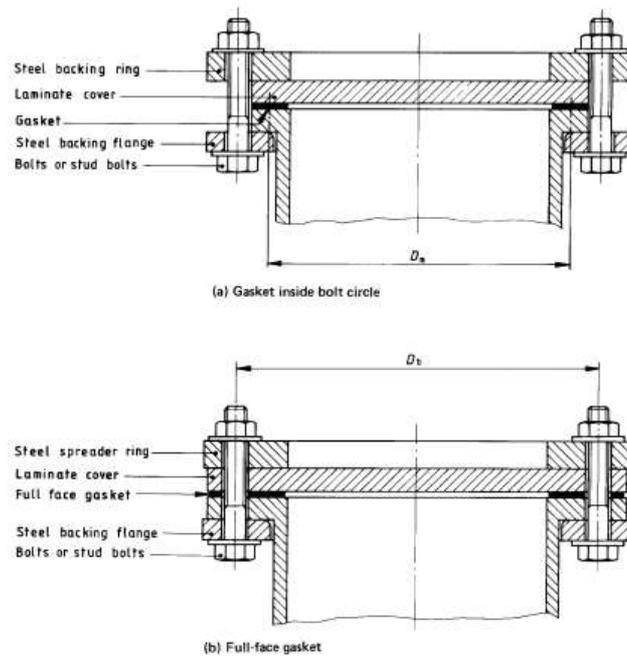


Ilustración 13 - Bridas ciegas en general

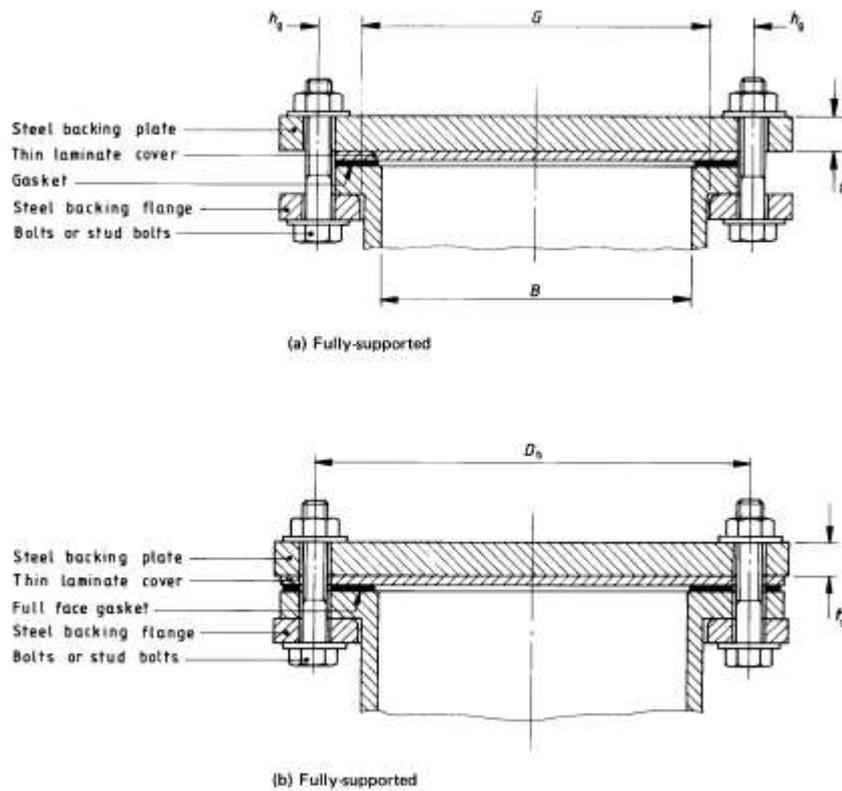


Ilustración 14 - Bridas ciegas: no adecuado para recipientes al vacío

El techo del evaporador se ha diseñado tipo domo; en concreto es un techo toriesférico que se denomina Korboggen. Las dimensiones dependen del diámetro del equipo y del espesor del cuerpo, se han considerado las siguientes:

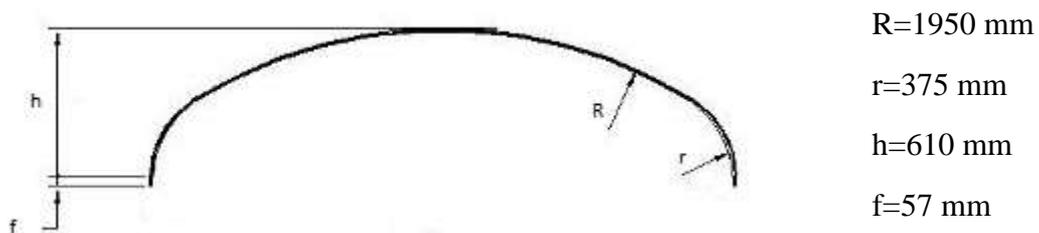


Ilustración 15 - Techo Korboggen

Considerando que se trata de un techo toriesférico sometido a presión de vacío se aplican las fórmulas que se indican a continuación.

La carga unitaria, que se sustituirá en la ecuación (8), se determinará a partir de la ecuación:

$$Q = 0.66 \cdot p \cdot D_i \cdot K_s \quad (17)$$

donde:

p: presión total efectiva (N/mm²). Suma de la presión interna y la presión hidrostática.

$$p = p_i + \rho \cdot g \cdot h \quad (10)$$

D_i: diámetro interior del cuerpo (mm).

K_s: factor de forma para techos abovedados. Se obtiene de la siguiente tabla:

h _i /D _i	t/D _i	Shape factor K _s		
		Torispherical		Semi-ellipsoidal
		0,1 ≤ r _i /D _i ≤ 0,15	r _i /D _i > 0,15	
0.20	0.005	2.95	Not permitted since r _i > D _i	2.00
	0.01	2.85		2.10
	0.02	2.65		2.20
	0.04	2.35		2.25
	0.05	2.25		2.35
0.25	0.005	2.35	1.90	1.30
	0.01	2.25	1.80	1.35
	0.02	2.10	1.75	1.45
	0.04	1.85	1.70	1.45
	0.05	1.75	1.70	1.45
0.32			0.15 < r _i /D _i ≤ 0.25	
	0.005	1.95	1.45	0.85
	0.01	1.85	1.45	0.95
	0.02	1.60	1.40	1.0
	0.04	1.40	1.35	1.05
	0.05	1.30	1.30	1.10
0.50 (hemispherical)	All values	0.6	0.6	0.6

Tabla 15 – Factor K_s para techos abovedados

Sustituyendo los valores numéricos se obtiene que:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{h_i}{D_i} = 0.25 \\ \frac{t}{D_i} = 0.025 \\ \frac{r_i}{D_i} = 0.16 > 0.15 \end{array} \right\} \rightarrow K_s = 1,74$$

Por lo que se concluye que el valor de la carga unitaria, ecuación (17), para el techo del evaporador es:

$$Q = 167,4 \text{ N/mm}$$

Sustituyendo este valor en la restricción impuesta en la ecuación (8), se tiene que:

$$u_1 \cdot m_1 \cdot n_1 + u_2 \cdot m_2 \cdot n_2 + \dots u_z \cdot m_z \cdot n_z \geq Q = 167,4 \text{ N/mm}$$

Para cumplir con esta restricción se propone la siguiente distribución de laminado: 37 capas de Mat y 25 capas de Tejido, que proporciona el siguiente valor de carga unitaria de diseño:

Carga unitaria de diseño: $u_{LAM} = 173.59 \text{ N/mm}$

Cumpliendo ésta con la restricción de la ecuación (8) y obteniéndose un espesor para el techo Korboggen del evaporador con valor:

$$t_{\text{techo}} = 60,15 \text{ mm}$$

Además, el espesor mínimo del laminado admisible, t_m , para evitar el pandeo se determinará a partir de la siguiente ecuación:

$$t_m = 1.7 \cdot R_o \sqrt{\frac{p \cdot F}{E_{LAM}}} \quad (18)$$

donde:

R_o : diámetro exterior del cuerpo

p : presión total efectiva (N/mm^2). Suma de la presión interna y la presión hidrostática.

$$p = p_i + \rho \cdot g \cdot h \quad (10)$$

F : debe tomarse $F=4$

E_{LAM} : Módulo de Young (N/mm^2) del laminado considerado

$$E_{LAM} = \frac{X_{LAM}}{t} \quad (15)$$

donde:

X_{LAM} : modulo unitario total del laminado (N/mm)

$$X_{LAM} = X_1 m_1 n_1 + X_2 m_2 n_2 + \dots + X_z m_z n_z \quad (16)$$

donde:

X_z : módulo unitario de la capa tipo z (N/mm por kg/m^2)

m_z : masa por unidad de área en una capa de laminado tipo z (kg/m^2)

n_z : número de capas de laminado tipo z (para los filamentos enrollados hay que considerar dos hélices enrolladas a $\pm \Theta^\circ$)

t : espesor del laminado del cuerpo (mm)

Se garantizará que t no sea inferior a t_m :

$$t \geq t_m \quad (19)$$

Si esta condición no se cumple en el diseño propuesto, el laminado se rediseñará y los cálculos se repetirán hasta que se consiga una construcción laminada aceptable.

Para la comprobación de la ecuación (19) con respecto a los espesores es necesario calcular t_m , para el caso concreto del evaporador se obtienen los siguientes valores:

$$X_{LAM} = 553100 \frac{N}{mm} \rightarrow E_{LAM} = 9195.34 \frac{N}{mm^2} \rightarrow t_m = 10.66 \text{ mm}$$

Comparando los valores, se concluye que como $t = 60.15 \text{ mm} \geq t_m = 10.74 \text{ mm}$, queda comprobado que se cumple la restricción que exige la ecuación (19).

1.3.3. Cálculo del fondo del evaporador

Para diseñar el fondo del evaporador se ha utilizado de nuevo el contenido del Apartado 18: “Ends” del documento BS 4994:1987.

Los distintos tipos de fondos que se consideran en el BS4994:1987 son:

- a) hemisférico
- b) semielipsoide
- c) torisférico
- d) cónico
- e) plano: totalmente soportado o acanalado
- f) cubiertas planas atornilladas

Las terminaciones tipo domo y las tapas planas se incluyeron en el apartado anterior de diseño del techo del evaporador, la forma que tienen que tener tanto los fondos de tipo cónico como las secciones reductoras se muestran en la siguiente ilustración:

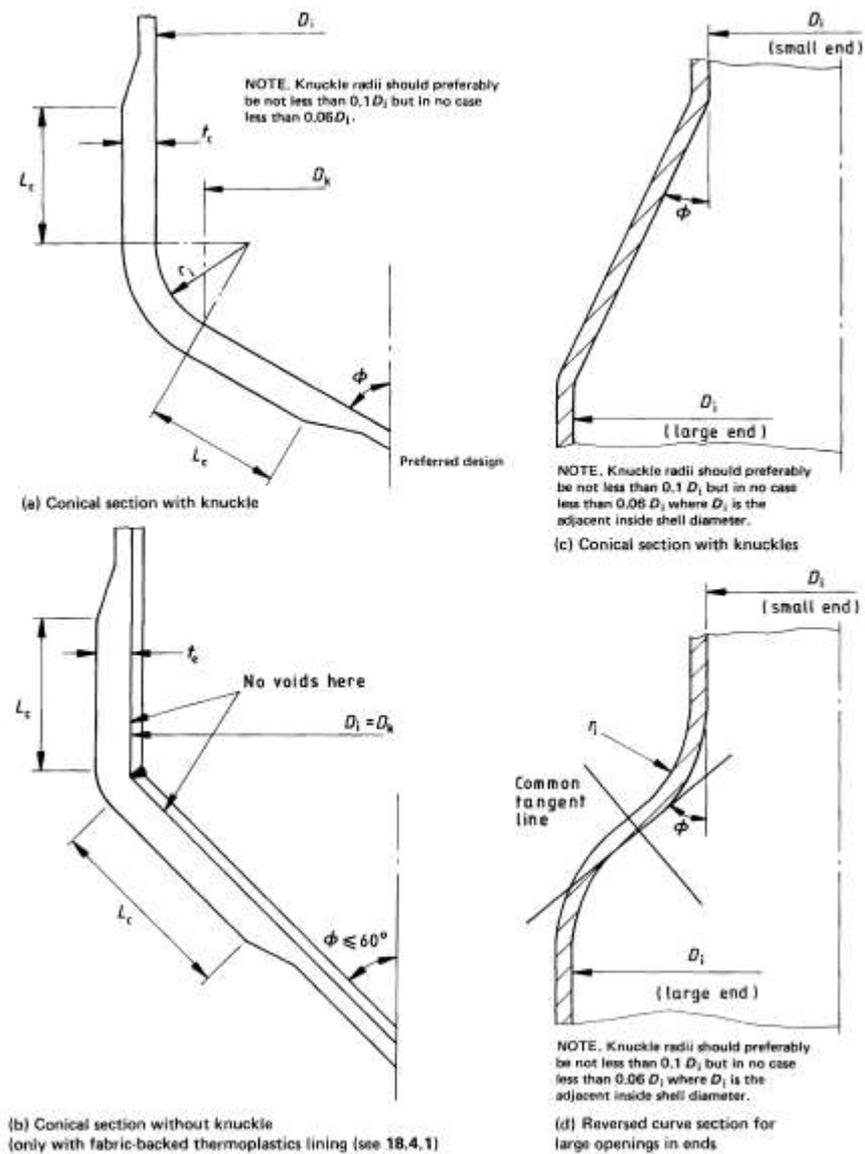


Ilustración 16 - Fondos cónicos y secciones reductoras

Los extremos cónicos poco profundos; es decir, aquellos que tengan un ángulo de inclinación con respecto al eje del depósito o tanque de más de 75° se diseñarán como extremos planos. Para los que dicho ángulo de inclinación sea menor o igual a 75° hay que diferenciar entre los que están sometidos a presión interna y los que están sometidos a presión externa.

El caso concreto del evaporador tiene un ángulo de inclinación de 60° y está sometido a presión de vacío.

Los extremos cónicos con un ángulo de inclinación menor o igual a 70° sometidos a presión externa se determinarán aplicando un razonamiento análogo al aplicado para llevar a cabo el diseño del cuerpo cilíndrico sometido a presión externa, pero al aplicar estos cálculos, se incorporarán las siguientes modificaciones:

a) Se sustituirá D_o por $\frac{D_o}{\cos\phi}$, donde D_o es el diámetro exterior principal de la sección cónica que se considera;

b) la longitud efectiva (L) del fondo debe ser la altura inclinada de la sección cónica o la altura inclinada entre los anillos de refuerzo efectivos, el valor que sea menor.

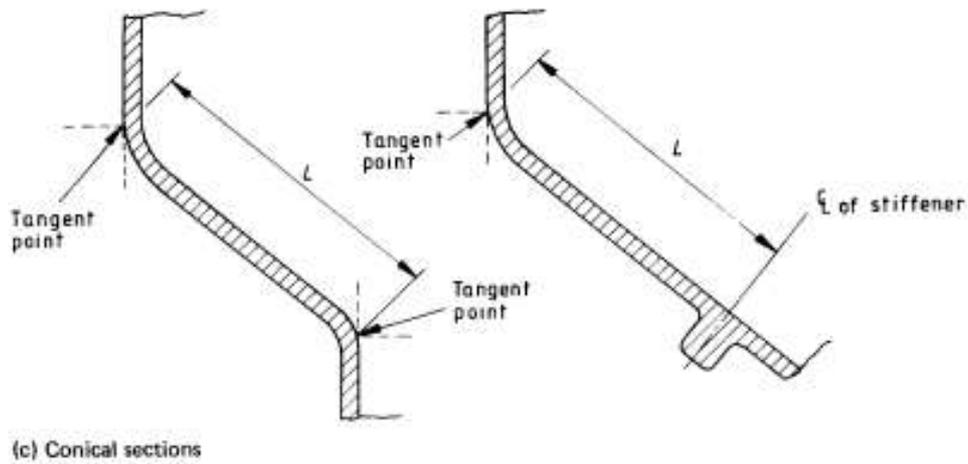


Ilustración 17 - Longitud efectiva para secciones cónicas sometidas a presión externa

Teniendo todo esto en cuenta:

La carga unitaria circunferencial, Q_{ϕ} , se determina con la siguiente ecuación:

$$Q_{\phi} = \frac{p \cdot D_i}{2} \quad (9)$$

donde:

p: presión total efectiva (N/mm^2). Suma de la presión interna y la presión hidrostática.

$$p = p_i + \rho \cdot g \cdot h \quad (10)$$

D_i : diámetro interior del cuerpo (mm).

La carga unitaria longitudinal, Q_x , se obtiene de la combinación de los efectos de:

- presión efectiva total;
- momento de flexión debido a cargas de viento u otras causas;
- peso total del buque o tanque, accesorios, accesorios y contenidos;

y se obtiene aplicando la siguiente ecuación:

$$Q_x = \frac{p \cdot D_i}{4} + \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D_i^2} \pm \frac{W}{\pi \cdot D_i} \quad (11)$$

donde:

p: presión total efectiva (N/mm²). Suma de la presión interna y la presión hidrostática.

$$p = p_i + \rho \cdot g \cdot h \quad (10)$$

D_i: diámetro interior del cuerpo (mm).

M: momento de flexión (N·mm).

W: peso del recipiente y del contenido (N). Su valor será negativo para puntos situados por encima del soporte del equipo se encuentra por encima del equipo y negativos para puntos situados por debajo.

$$W = ((2 \cdot \pi \cdot R \cdot H_T) \cdot e \cdot \rho_{PRFV} + V \cdot \rho_{\text{contenido}}) \cdot g \quad (12)$$

NOTA: inicialmente no se conoce el valor del espesor del evaporador, para comenzar el proceso iterativo se toma un valor inicial e=20mm. Cuando se obtiene el valor real se reajustan los cálculos.

Para el caso concreto del evaporador, se obtienen los siguientes valores:

Presión total efectiva: p=36,50 N/mm

Momento de flexión: M=0. No hay momento de flexión ya que no se considera el viento por estar el equipo en una nave cerrada

Peso total: W= 46,738 kg = 467 N

Con todo ello se concluye que:

Carga unitaria circunferencial: Q_φ = 73 N/mm

Carga unitaria longitudinal: Q_x = - 37,42 N/mm

El mayor de estos valores se sustituirá en la ecuación (8), quedando la restricción que debe cumplir el laminado así:

$$u_1 \cdot m_1 \cdot n_1 + u_2 \cdot m_2 \cdot n_2 + \dots + u_z \cdot m_z \cdot n_z \geq Q = \max(Q_\phi, |Q_x|) = 73 \text{ N/mm}$$

Para cumplir con esta restricción se propone la siguiente distribución de laminado: 16 capas de Mat y 11 capas de Tejido, que proporciona un valor de carga de diseño superior al valor máximo de las cargas unitarias:

Carga unitaria de diseño: u_{LAM} = 76 N/mm

Cumpliendo de esta manera con la restricción de la ecuación (8) y obteniéndose un espesor para el fondo del evaporador con valor:

$$t_{\text{fondo}} = 26,20 \text{ mm}$$

El módulo compuesto del laminado, al igual que se hizo para el cuerpo, se determinará a partir de la siguiente ecuación:

$$E_{LAM} = \frac{X_{LAM}}{t} \quad (15)$$

donde:

X_{LAM} : modulo unitario total del laminado (N/mm)

$$X_{LAM} = X_1 m_1 n_1 + X_2 m_2 n_2 + \dots + X_z m_z n_z \quad (16)$$

donde:

X_z : módulo unitario de la capa tipo z (N/mm por kg/m²)

m_z : masa por unidad de área en una capa de laminado tipo z (kg/m²)

n_z : número de capas de laminado tipo z (para los filamentos enrollados hay que considerar dos hélices enrolladas a $\pm \Theta^\circ$)

t: espesor del laminado del cuerpo (mm)

Sustituyendo los valores numéricos actuales se obtiene que:

$$X_{LAM} = 241600 \text{ N/mm} \rightarrow E_{LAM} = 9221,37 \text{ N/mm}^2$$

Por otra parte, el espesor de laminado mínimo admisible, t_m , para evitar el pandeo se determinará a partir de las siguientes ecuaciones, según corresponda:

$$\text{Si } \frac{L}{\frac{D_o}{\cos\Phi}} \geq 1.35 \cdot \left(\frac{E_{LAM}}{p \cdot F} \right)^{0.17} \rightarrow t_m = \frac{D_o}{\cos\Phi} \left(\frac{p \cdot F}{2 \cdot E_{LAM}} \right)^{0.33}$$

$$\text{Si } \frac{L}{\frac{D_o}{\cos\Phi}} < 1.35 \cdot \left(\frac{E_{LAM}}{p \cdot F} \right)^{0.17} \rightarrow t_m = \frac{D_o}{\cos\Phi} \left(\frac{0.4 \cdot p \cdot F}{E_{LAM}} \cdot \frac{L}{D_o} \right)^{0.4}$$

donde:

Se debe tomar $F=4$.

L: longitud efectiva (mm)

D_o : diámetro exterior del cuerpo (mm).

Φ : ángulo de inclinación del fondo cónico respecto al eje del equipo (°)

E_{LAM} : módulo compuesto del laminado (N/mm²)

p: presión total efectiva (N/mm²).

Para el caso concreto del fondo del evaporador, se tiene que:

$$\frac{L}{\frac{D_o}{\cos\phi}} = 0.37 < 1.35 \cdot \left(\frac{E_{LAM}}{p \cdot F}\right)^{0.17} = 8.06 \rightarrow t_m = \frac{D_o}{\cos\phi} \left(\frac{0.4 \cdot p \cdot F}{E_{LAM}} \cdot \frac{L}{\frac{D_o}{\cos\phi}}\right)^{0.40} = 55.61$$

Dado este valor del espesor de laminado mínimo admisible, t_m , se concluye que $t < t_m$. Como no se cumple la condición es necesario rediseñar el fondo, pudiéndose aumentar el espesor del laminado o bien incluir en el diseño anillos rigidizadores.

Se opta por intentar cumplir la restricción exigida manteniendo el espesor del laminado y añadiendo anillos rigidizadores. Tras reiterados cálculos se obtiene que, para 16 capas de Mat, 11 capas de Tejido y 3 anillos rigidizadores, puede cumplirse la restricción de pandeo.

Al añadir 3 anillos rigidizadores, se reduce la longitud L , teniendo en cuenta la información recogida en la Ilustración 12. Ahora $L=460$ mm.

Rehaciendo los cálculos para este nuevo diseño:

$$X_{LAM} = 241600 \text{ N/mm} \rightarrow E_{LAM} = 9221,37 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{L}{\frac{D_o}{\cos\phi}} = 0,38 < 1.35 \cdot \left(\frac{E_{LAM}}{p \cdot F}\right)^{0.17} = 8.10 \rightarrow$$

$$\rightarrow t_m = \frac{D_o}{\cos\phi} \left(\frac{0.4 \cdot p \cdot F}{E_{LAM}} \cdot \frac{L}{\frac{D_o}{\cos\phi}}\right)^{0.40} = 19,45 \text{ mm} \leq t = 26,20 \text{ mm}$$

Al añadir los tres anillos rigidizadores, para un perfil y composición de anillo de refuerzo dado, es necesario determinar el diámetro, D_s , desde el eje neutro. Hay que garantizar que el segundo momento de inercia del área de la sección de los anillos de refuerzo, I_{s2} cumpla que:

$$I_{s2} \geq 0.18 \cdot \frac{D_o}{\cos\phi} \cdot L \cdot D_s^2 \cdot \frac{p}{E_{LAM}} \quad (20)$$

donde:

D_o : diámetro exterior del cuerpo (mm).

Φ : ángulo de inclinación del fondo cónico respecto al eje del equipo ($^\circ$)

L : longitud efectiva del tramo del cuerpo (mm)

D_s : diámetro del eje neutro del anillo rigidizador (mm)

p: presión total efectiva (N/mm²). Suma de la presión interna y la presión hidrostática.

$$p = p_i + \rho \cdot g \cdot h \quad (10)$$

E_{LAM}: Módulo de Young (N / mm²) del laminado considerado

$$E_{LAM} = \frac{X_{LAM}}{t} \quad (15)$$

donde:

X_{LAM}: modulo unitario total del laminado (N/mm)

$$X_{LAM} = X_1 m_1 n_1 + X_2 m_2 n_2 + \dots + X_z m_z n_z \quad (16)$$

donde:

X_z: módulo unitario de la capa tipo z (N/mm por kg/m²)

m_z: masa por unidad de área en una capa de laminado tipo z (kg/m²)

n_z: número de capas de laminado tipo z (para los filamentos enrollados hay que considerar dos hélices enrolladas a ± Θ°)

t: espesor del laminado del cuerpo (mm)

Para los valores numéricos del caso concreto del evaporador:

$$I_{s2} \geq 1,41 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Teniendo esto en cuenta se puede utilizar como anillo rigidizador un perfil tubular 80.80.10.

Por otra parte, la longitud del cuerpo, L_s, que puede considerarse que contribuye al segundo momento de inercia del área de la sección del anillo de refuerzo será:

$$L_s = 0.75 \sqrt{t \cdot \frac{D_o}{\cos\Phi}} \quad (21)$$

donde:

t: espesor del laminado del cuerpo (mm)

D_o: diámetro exterior del cuerpo (mm).

Φ: ángulo de inclinación del fondo cónico respecto al eje del equipo (°)

Siempre tiene que cumplirse que:

$$L \geq L_s \quad (22)$$

Además, los anillos de refuerzo se extenderán completamente alrededor de la circunferencia de la carcasa y las juntas se diseñarán de manera que desarrollen la rigidez completa del anillo. No debe haber espacios entre la pared del equipo y el anillo.

Sustituyendo los valores numéricos, se tiene que:

$$L_s = 0.75 \sqrt{t \cdot \frac{D_o}{\cos\phi}} = 268,86 \text{ mm} \rightarrow L = 460 \text{ mm} \geq L_s = 268,86 \text{ mm}$$

Quedando así comprobada la última restricción necesaria del fondo.

Dicho esto, se concluye que en el fondo se colocarán tres anillos rigidizadores, que se colocarán equidistantes y se utilizarán perfiles tubulares 80.80.10. El espesor del fondo será:

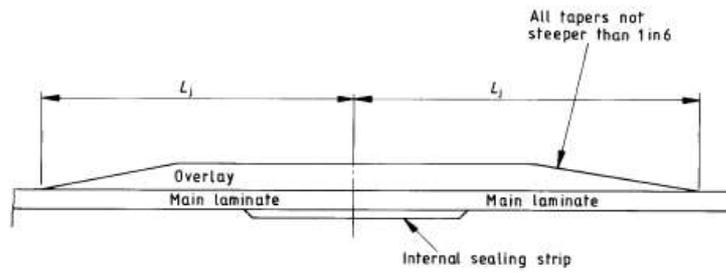
$$t_{\text{fondo}} = 26,20 \text{ mm}$$

1.3.4. Diseño de detalles

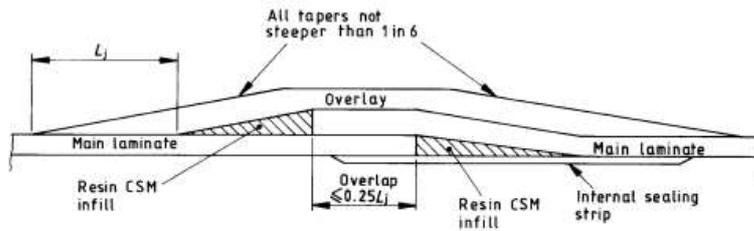
Para llevar a cabo las uniones cuerpo-techo y cuerpo-fondo hay que tener en cuenta las consideraciones indicadas en Apartado 19: “Circunferential seams” del documento BS 4994:1987 para realizar las costuras en las juntas.

El sobreespesor del laminado se diseñará de manera que su carga de diseño U_{OVL} , tanto en dirección circunferencial como longitudinal, no sea inferior a la del laminado principal de la carcasa en las direcciones circunferencial y longitudinal respectivamente, excepto en los fondos cónicos.

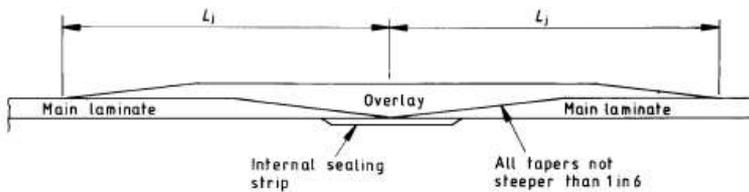
La superposición se terminará con un ahusamiento no más pronunciado que 1 en 6, y se mezclará suavemente en el laminado principal en sus extremos, según se puede observar en las siguientes ilustraciones.



(a) Butt joint with single overlay, limited to main laminate of 6 mm or less

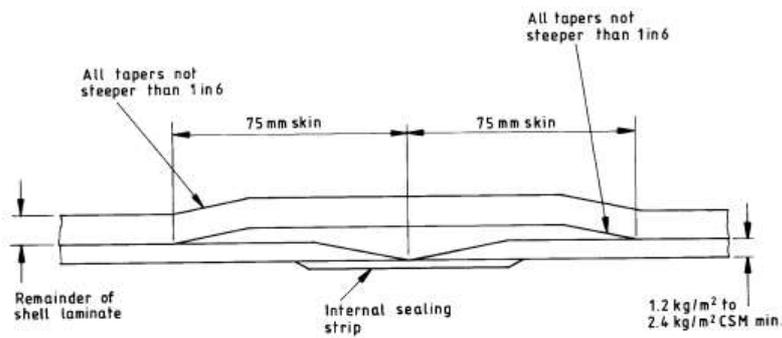


(b) Spigot and socket joint, limited to main laminate of 6 mm or less

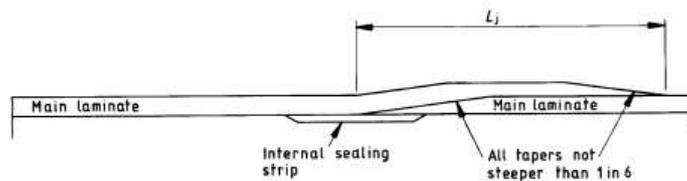


(c) Feathered joint

Ilustración 18 - Juntas de unión típicas para recipientes sin revestimiento termoplástico



(d) Skin form



(e) Main laminate overlay joint

Ilustración 19 - Juntas de unión principal típicas para recipientes sin revestimiento termoplástico

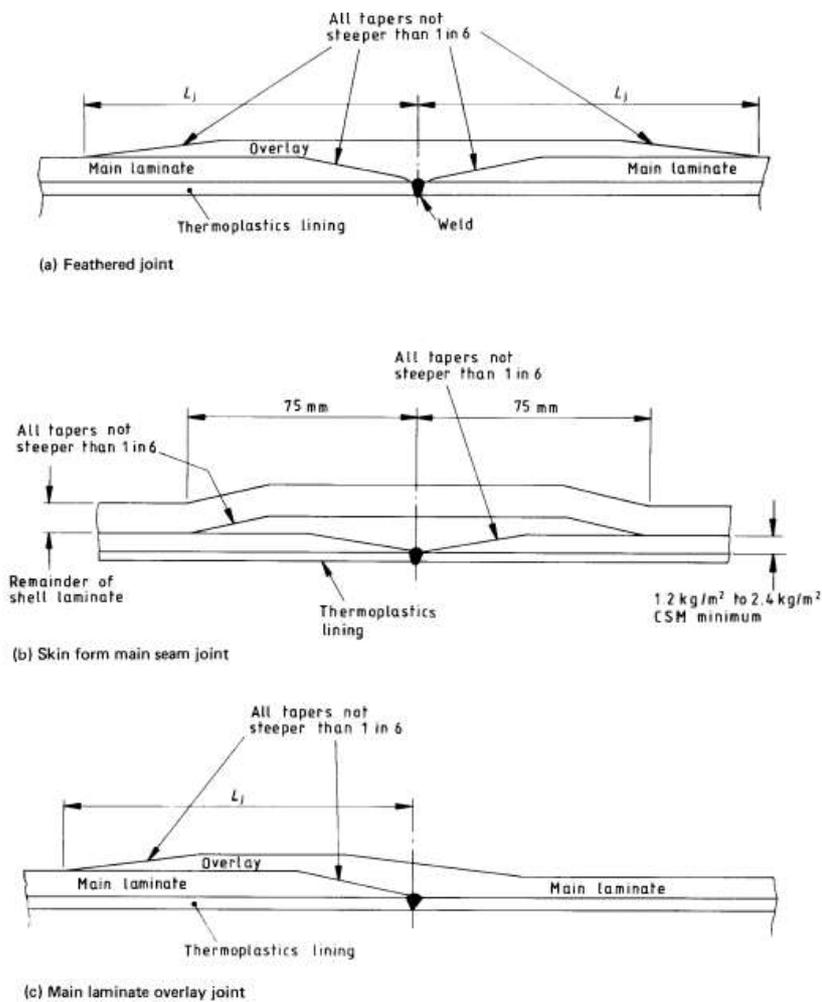


Ilustración 20 - Juntas de costura típicas para recipientes sin revestimiento termoplástico

Las juntas deben realizarse intentando evitar zonas donde haya concentradores de tensiones, por ejemplo, nudillos, ramas o transiciones.

La longitud efectiva para cada tipo de unión se determinará a partir de esta ecuación:

$$L_j = \frac{Q_a \cdot K_{OVL}}{\text{Lap shear strength}} \quad (23)$$

donde:

Q_a : carga aplicada (N/mm).

K_{OVL} : factor de diseño. Determinado en el Apartado “1.2.1.1. Cálculo del Factor K” del presente documento.

Lap shear strength (resistencia a cortadura por solape): es el valor mínimo dado en la Tabla 1 para el tipo de sistema de refuerzo y resina empleado en la construcción de la capa superior y el laminado principal en la región de la junta.

Tanto la carga de diseño del laminado principal del equipo U_{LAM} , como la del laminado del sobreespesor, U_{OVL} , se determinará a partir de la siguiente ecuación:

$$U_{LAM} \text{ o } U_{OVL} = u_1 m_1 n_1 + u_2 m_2 n_2 + \dots u_z m_z n_z \quad (24)$$

que se le añadirá al laminado existente que ya se ha seleccionado anteriormente.

Para el caso concreto de las uniones del evaporador se tiene que:

$$Q_a = -37.510 \text{ N/mm}$$

$$K_{OVL} = 29.7$$

$$\text{Lap shear strength} = 6 \text{ N/mm}^2$$

Por lo que el valor para la longitud efectiva es el siguiente:

$$L_j = 180.98 \text{ mm}$$

2 DISEÑO MEDIANTE PV-ELITE

2.1. Diseño del evaporador de acero

Para llevar a cabo el diseño del evaporador en acero, como ya se ha indicado anteriormente, se ha utilizado el programa PV Elite. PV-Elite es un programa que permite realizar diseños, cálculos mecánicos y verificaciones de recipientes a presión e intercambiadores de calor. PV Elite maneja la entrada de datos separando la información en hojas, estas divisiones corresponden a los principales elementos del recipiente.

PV Elite se ha basado en la norma ASME Sección VIII División 1 para el cálculo del evaporador.

Cada elemento se define entre dos nodos y el elemento siguiente debe definirse de forma consecutiva. Se ha definido un espesor inicial en cada elemento, para comenzar el cálculo, y este valor se ha ido afinando hasta conseguir los espesores mínimos necesarios para cumplir los requisitos de presión interna, presión externa definidos.

Los elementos en los que se ha dividido el evaporador para trabajar en PV Elite son: placa del fondo, fondo, cuerpo y techo. Para cada elemento se han ido introduciendo una serie de parámetros, los 4 elementos comparten los siguientes:

PROPIEDAD	VALOR
Material	SA-36 (acero S275JR)
Espesor de corrosión (mm)	1.5
Presión interna (MPa)	0
Presión externa (MPa)	0.1
Temperatura interna (°C)	50
Temperatura externa (°C)	20
Eficiencia de junta longitudinal	0,85 (radiografía spot)
Eficiencia de junta circunferencial	0,85 (radiografía spot)

Tabla 16 – PV Elite: Propiedades generales acero al carbono

Los valores propios de cada elemento son los siguientes:

PLACA PLANA DEL FONDO:

De nodo	10
A nodo	20
Tipo de elemento	Placa plana
Diámetro interior (mm)	500

Tabla 17 - PV Elite: Propiedades placa plana fondo acero al carbono

FONDO

De nodo	20
A nodo	30
Tipo de elemento	Cónico
Longitud del cono (mm)	1594
Diámetro final (mm)	500

Tabla 18 - PV Elite: Propiedades fondo acero al carbono

CUERPO

De nodo	30
A nodo	40
Tipo de elemento	Cilíndrico
Longitud del cilindro (mm)	2700
Diámetro interior (mm)	2400

Tabla 19 - PV Elite: Propiedades cuerpo acero al carbono

TECHO

De nodo	40
A nodo	50
Tipo de elemento	Toriesférico
Diámetro interior (mm)	2400
Longitud del tramo recto (mm)	192

Tabla 20 - PV Elite: Propiedades techo acero al carbono

La geometría resultante es la que se muestra en la siguiente imagen:

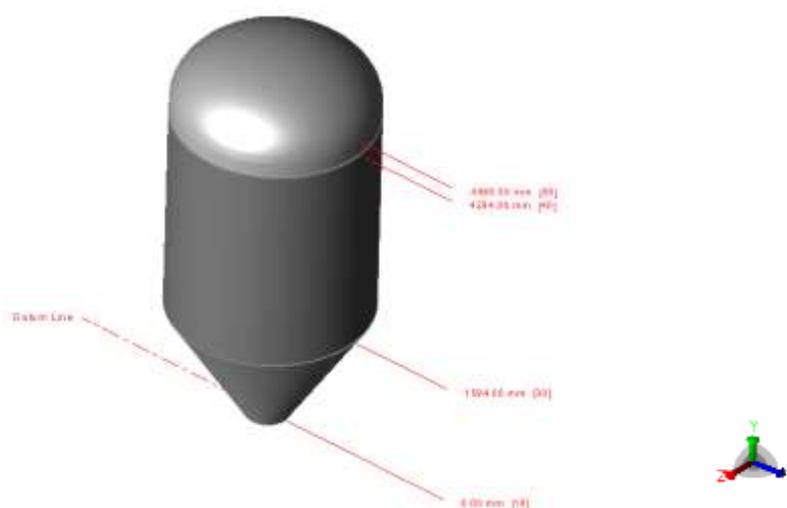


Ilustración 21 - Evaporador de acero al carbono diseñado en PV Elite

Con todo ello, los resultados de espesores para cada elemento que cumplen con los requisitos para presión interior y presión exterior son los siguientes:

ELEMENTO	Espesor (mm)
PLACA DEL FONDO	16.5
FONDO CÓNICO	13
CUERPO CILÍNDRICO	11
TECHO TORIESFÉRICO	9

Tabla 21 – PV Elite: Espesores de evaporador acero al carbono

La información que se ha obtenido del programa PV Elite acerca de los espesores de cada elemento del evaporador de acero era necesaria para poder realizar el modelo en ANSYS, realizar el análisis FEM y la comparación con el evaporador análogo en PRFV.

2.2. Diseño del evaporador de acero inoxidable

Para diseñar el evaporador en acero inoxidable (super dúplex) se ha procedido de la misma manera, utilizando de nuevo el programa PV Elite.

De igual forma, se ha dividido el evaporador en cuatro elementos para trabajar en PV Elite, dichos elementos son: placa del fondo, fondo, cuerpo y techo. Para cada elemento se han ido introduciendo una serie de parámetros, los 4 elementos comparten los siguientes:

PROPIEDAD	VALOR
Material	SA 240 (Acero Inoxidable)
Espesor de corrosión (mm)	1.5
Presión interna (MPa)	0
Presión externa (MPa)	0,1
Temperatura interna (°C)	50
Temperatura externa (°C)	20
Eficiencia de junta longitudinal	0.85 (radiografía spot)
Eficiencia de junta circunferencial	0.85 (radiografía spot)

Tabla 22 – PV Elite: Propiedades generales acero inoxidable

Los valores propios de cada elemento son los siguientes:

PLACA PLANA DEL FONDO:

De nodo	10
A nodo	20
Tipo de elemento	Placa plana
Diámetro interior (mm)	500

Tabla 23 - PV Elite: Propiedades placa plana fondo acero inoxidable

FONDO

De nodo	20
A nodo	30
Tipo de elemento	Cónico
Longitud del cono (mm)	1594
Diámetro final (mm)	500

Tabla 24 - PV Elite: Propiedades fondo acero inoxidable

CUERPO

De nodo	30
A nodo	40
Tipo de elemento	Cilíndrico
Longitud del cilindro (mm)	2700
Diámetro interior (mm)	2400

Tabla 25 - PV Elite: Propiedades cuerpo acero inoxidable

TECHO

De nodo	40
A nodo	50
Tipo de elemento	Toriesférico
Diámetro interior (mm)	2400
Longitud del tramo recto (mm)	192

Tabla 26 - PV Elite: Propiedades techo acero inoxidable

La geometría resultante es la que se muestra en la siguiente imagen:

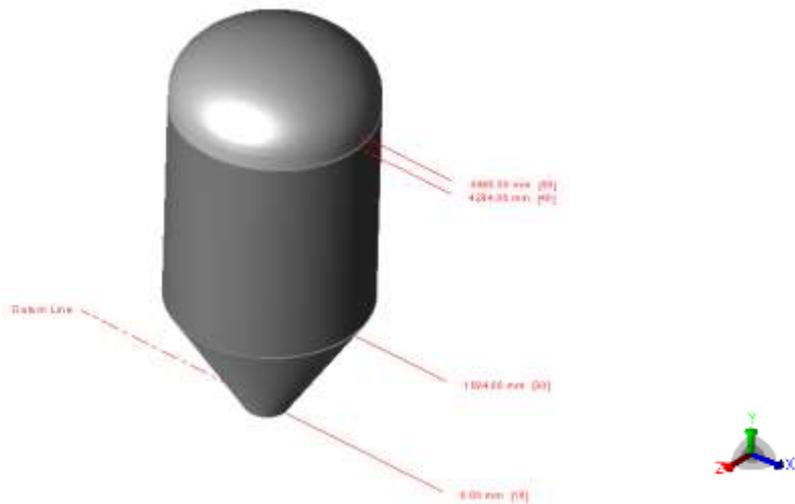


Ilustración 22 - Evaporador de acero inoxidable diseñado en PV Elite

Con todo ello, los resultados de espesores para cada elemento que cumplen con los requisitos para presión interior y presión exterior son los siguientes:

ELEMENTO	Espesor (mm)
PLACA DEL FONDO	15.5
FONDO CÓNICO	12.5
CUERPO CILÍNDRICO	10.5
TECHO TORIESFÉRICO	9

Tabla 27 – PV Elite: Espesores de evaporador acero inoxidable

La información acerca de los espesores de cada elemento del evaporador de acero inoxidable del programa PV Elite se ha obtenido porque era necesaria para poder realizar el modelo en ANSYS, realizar el análisis FEM y la comparación con el evaporador análogo en PRFV.

2.3. Diseño del evaporador de titanio

Para diseñar el evaporador en titanio se ha procedido de forma análoga, usando también el programa PV Elite.

De nuevo se ha dividido el evaporador en cuatro elementos para trabajar en PV Elite, dichos elementos son: placa del fondo, fondo, cuerpo y techo. Para cada elemento se han ido introduciendo una serie de parámetros, los 4 elementos comparten los siguientes:

PROPIEDAD	VALOR
Material	SA 517 E (Titanio)
Espesor de corrosión (mm)	1.5
Presión interna (MPa)	0
Presión externa (MPa)	0,1
Temperatura interna (°C)	50
Temperatura externa (°C)	20
Eficiencia de junta longitudinal	0.85 (radiografía spot)
Eficiencia de junta circunferencial	0.85 (radiografía spot)

Tabla 28 – PV Elite: Propiedades generales

Los valores propios de cada elemento son los siguientes:

PLACA PLANA DEL FONDO:

De nodo	10
A nodo	20
Tipo de elemento	Placa plana
Diámetro interior (mm)	500

Tabla 29 - PV Elite: Propiedades placa plana fondo

FONDO

De nodo	20
A nodo	30
Tipo de elemento	Cónico
Longitud del cono (mm)	1594
Diámetro final (mm)	500

Tabla 30 - PV Elite: Propiedades fondo

CUERPO

De nodo	30
A nodo	40
Tipo de elemento	Cilíndrico
Longitud del cilindro (mm)	2700
Diámetro interior (mm)	2400

Tabla 31 - PV Elite: Propiedades cuerpo

TECHO

De nodo	40
A nodo	50
Tipo de elemento	Toriesférico
Diámetro interior (mm)	2400
Longitud del tramo recto (mm)	192

Tabla 32 - PV Elite: Propiedades techo

La geometría resultante es la que se muestra en la siguiente imagen:

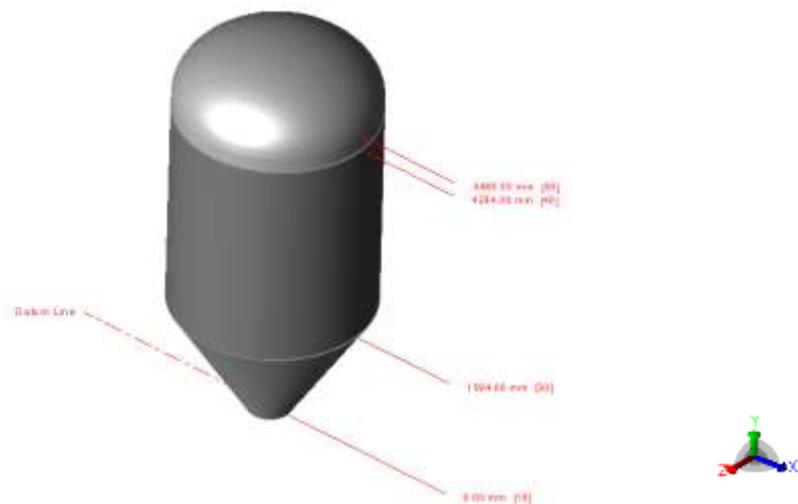


Ilustración 23 - Evaporador de titanio diseñado en PV Elite

Con todo ello, los resultados de espesores para cada elemento que cumplen con los requisitos para presión interior y presión exterior son los siguientes:

ELEMENTO	Espesor (mm)
PLACA DEL FONDO	13.5
FONDO CÓNICO	12
CUERPO CILÍNDRICO	10
TECHO TORIESFÉRICO	9

Tabla 33 – PV Elite: Espesores de evaporador

En este caso también se ha obtenido la información acerca de los espesores de cada elemento del evaporador de titanio del programa PV Elite porque era necesaria para poder realizar el modelo en ANSYS, realizar el análisis FEM y la comparación con el evaporador análogo en PRFV.

3 ANÁLISIS ECONÓMICO DE LAS SOLUCIONES

Uno de los factores a comparar a la hora de elegir qué equipo es el que más interesa es el factor económico, en ocasiones este factor resulta decisivo para tomar la decisión. En este capítulo se desarrollan los cálculos necesarios para estimar un presupuesto para el evaporador de PRFV anteriormente diseñado.

3.1. Evaporador de PRFV

Los datos necesarios para realizar la estimación del presupuesto son los siguientes:

DENSIDADES:

$$\rho_{\text{Mat y Tejido}}=1500 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{Filamento}}=1800 \text{ kg/m}^3$$

RATIOS DE TRABAJO

$$R_{\text{Bovinado}}=50 \text{ kg/h}$$

$$R_{\text{Manual}}=4 \text{ kg/h}$$

$$R_{\text{Soldadura}}=2 \text{ kg/h}$$

COSTES

$$C_{\text{Material por kg}}=5 \text{ €/kg}$$

$$R_{\text{HH}}=30 \text{ €/h}$$

Con los datos de partida para diseñar el evaporador y los obtenidos acerca de la geometría se puede calcular el volumen de material que hay en cada parte del equipo:

VOLÚMENES:

$$V_{\text{Fondo}}=0,224 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{Cuerpo}}=0,387 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{Techo}}=0,404 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{Soldaduras}}=0,045 \text{ m}^3$$

Con todos estos valores, se puede calcular:

$$\text{MASA: } m(\text{kg}) = V(\text{m}^3) \cdot \rho(\text{kg/m}^3) \quad (23)$$

$$\text{COSTE DEL MATERIAL: } C_{\text{material}}(\text{€}) = m(\text{kg}) \cdot C_{\text{material por kg}}(\text{€/kg}) \quad (24)$$

$$\text{COSTE DE LA MANO DE OBRA: } C_{\text{mano de obra}}(\text{€}) = m(\text{kg}) \cdot C_{\text{HH}}(\text{€/h}) \cdot R_i(\text{kg/h}) \quad (25)$$

$$\text{COSTE TOTAL: } C_T(\text{€}) = 1,2 \cdot (C_{\text{material}}(\text{€}) + C_{\text{mano de obra}}(\text{€})) \quad (26)$$

Teniendo todo esto en cuenta, los valores calculados se recoge en la siguiente tabla:

	VOLUMEN (m ³)	MASA (kg)	COSTE MATERIAL (€)	COSTE MANO DE OBRA (€)	COSTE TOTAL (€)
FONDO	0,224	336	1680	2520	4200
CUERPO	0,387	696	3482	418	3899
TECHO	0,404	606	3029	4543	7572
SOLDADURA	0,045	135	675	2026	2702

Por lo que el coste total del evaporador aplicando un coeficiente de mayoración de seguridad del 30%, asciende a:

$$\boxed{\text{COSTE TOTAL EVAPORADOR PRFV} = 23.890 \text{ €}}$$

3.2. Evaporadores de metal

Los evaporadores de metal de los que interesa conocer el coste son el de acero inoxidable y el de titanio. Para obtener estos valores se han consultado comparativos de varios proveedores para equipos de características similares y se ha obtenido que los precios son los siguientes:

$$\boxed{\text{COSTE TOTAL EVAPORADOR A. INOXIDABLE} = 38.780 \text{ €}}$$

$$\boxed{\text{COSTE TOTAL EVAPORADOR PRFV} = 66.700 \text{ €}}$$

A los valores obtenidos se le ha aplicado un coeficiente de mayoración de seguridad del 30%

4 ANÁLISIS MEDIANTE FEM

En este apartado se describe cómo se ha llevado a cabo el análisis mediante el Método de los Elementos Finitos. Este análisis se ha realizado utilizando el programa ANSYS que, como ya se ha explicado anteriormente, es una herramienta de simulación que, basándose en el Método de los Elementos Finitos, ayuda a predecir cómo se comportará el elemento estudiado bajo las condiciones del entorno real.

Se han analizado tanto el comportamiento del evaporador diseñado en PRFV como el de los evaporadores análogos diseñados en acero S275JR y titanio, también para poder realizar un estudio comparativo entre ellos.

4.1. Método de cálculo

El proceso de cálculo se ha realizado en tres fases:

4.1.1. Fase 1: Modelo

En primer lugar, se ha identificado la geometría, los materiales, las condiciones de contorno y las cargas a las que estará sometida la estructura. Es importante que esta información esté lo más clara posible, ya que de ello dependerán los resultados obtenidos.

4.1.2. Fase 2: Análisis elástico

A continuación, se lleva a cabo un análisis elástico del modelo anteriormente descrito mediante la aplicación del Método de los Elementos Finitos.

Para ello se siguen los siguientes pasos:

1. Preproceso: Preparación del modelo de elementos finitos.
 - I. Construcción del modelo geométrico.
 - II. Definición de propiedades de los materiales.
 - III. Definición de atributos y propiedades del mallado.
 - IV. Definición del laminado.
2. Aplicación de cargas y condiciones de contorno al modelo mallado.
3. Resolución del análisis y post-procesado de resultados para el estado de carga considerado.

4.1.3. Fase 3: Evaluación de resultados

Tras el proceso de cálculo, se evalúan los resultados obtenidos y, por último, se pasa a comprobar que el material no supera las tensiones máximas admisibles.

4.2. Análisis FEM del evaporador en PRFV

En este apartado se pretende reportar el cálculo justificativo, así como el análisis mediante el método de elementos finitos del evaporador diseñado en PRFV.

4.2.1. Geometría

A continuación, se muestra la geometría empleada en la simulación:



Ilustración 24 – Evaporador PRFV: Geometría

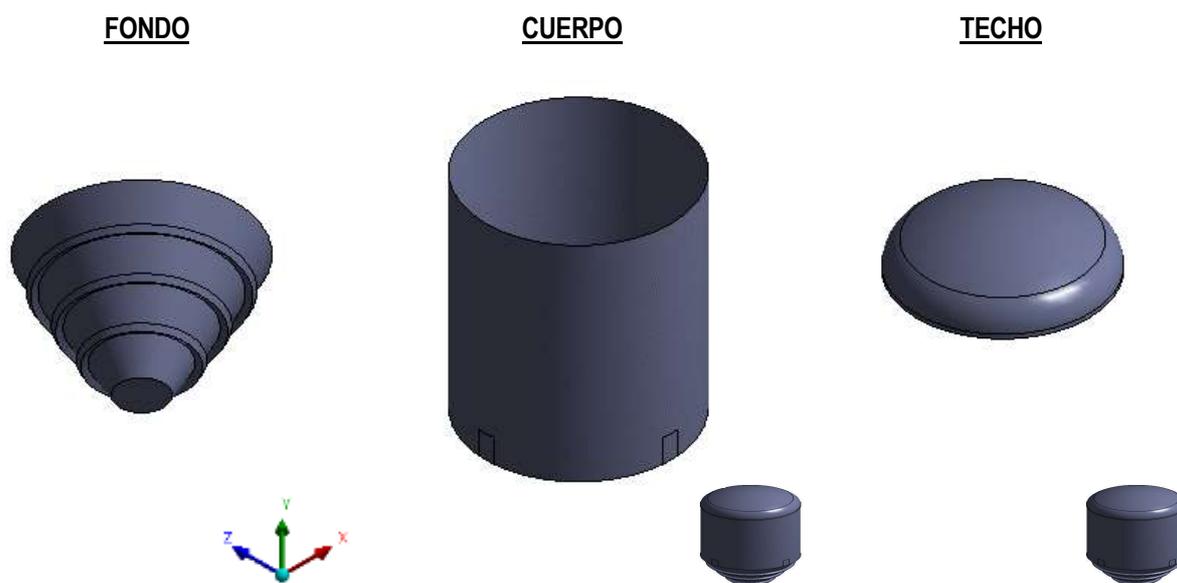


Ilustración 25 - Evaporador PRFV: Geometría elementos

4.2.2. Malla

Nodes	44009
Elements	44853

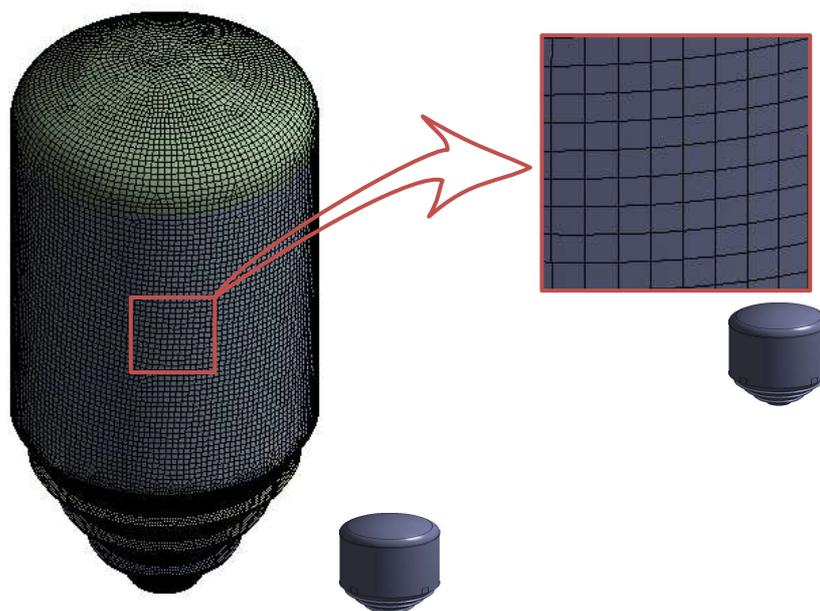


Ilustración 26 - Evaporador PRFV: Malla

4.2.3. Definición del laminado

Para definir el laminado de cada parte del equipo se ha utilizado el módulo de ANSYS ACP (ANSYS Composite PrepPost), que es un módulo complementario dedicado al modelado de estructuras compuestas en capas. La manera de proceder ha sido prácticamente siguiendo el orden que da el árbol de este módulo, que se muestra a continuación:

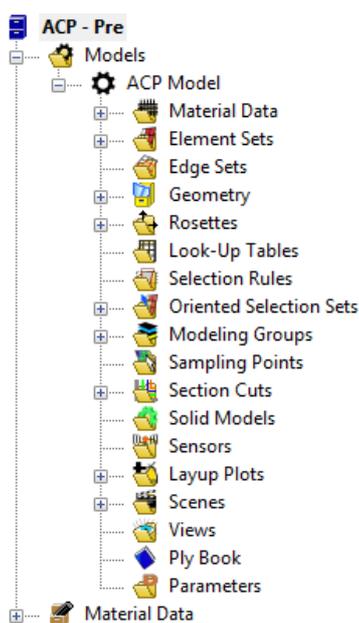


Ilustración 27 – ACP árbol de trabajo

DATOS DE LOS MATERIALES

En primer lugar, se han definido los datos de los materiales (material data) que se van a utilizar:

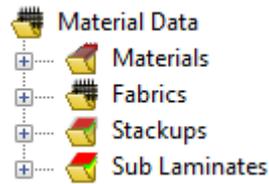


Ilustración 28 - ACP Material Data

- **Materiales:**

Se han considerado 3 tipos de materiales (materials): Tejido, Mat y Filamento. Estos materiales han sido previamente definidos en la biblioteca de materiales, en este módulo aparecerán únicamente los que se hayan activado.

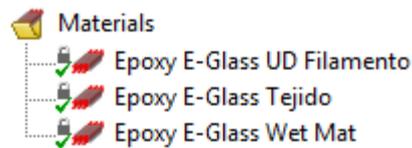


Ilustración 29 – ACP Materials

A continuación, se indican las propiedades de cada material:

TEJIDO		
PROPIEDAD		VALOR
DENSIDAD (Kg/m ³)		1850
MÓDULO DE POISSON (adm)	XY	0.28
	YZ	0.4
	XZ	0.28
MÓDULO DE YOUNG (adm)	XY	35000
	YZ	9000
	XZ	9000
MODULO DE CIZALLADURA (MPa)	XY	4700
	YZ	3500
	XZ	4700
TENSIÓN MÁXIMA ADMISIBLE A TRACCIÓN (MPa)	X	780
	Y	31
	Z	31
TENSIÓN MÁXIMA ADMISIBLE A COMPRESIÓN (MPa)	X	-480
	Y	-100
	Z	-100

Tabla 34 – Evaporador PRFV: Propiedades Tejido

MAT		
PROPIEDAD		VALOR
DENSIDAD (Kg/m ³)		1295
MÓDULO DE POISSON (adm)	XY	0.5
	YZ	0.71
	XZ	0.5
MÓDULO DE YOUNG (adm)	XY	21200
	YZ	5400
	XZ	5400
MODULO DE CIZALLADURA (MPa)	XY	3300
	YZ	3000
	XZ	3300
TENSIÓN MÁXIMA ADMISIBLE A TRACCIÓN (MPa)	X	550
	Y	27
	Z	27
TENSIÓN MÁXIMA ADMISIBLE A COMPRESIÓN (MPa)	X	-335
	Y	-85
	Z	-85

Tabla 35 - Evaporador PRFV: Propiedades Mat

FILAMENTO		
PROPIEDAD		VALOR
DENSIDAD (Kg/m ³)		2000
MÓDULO DE POISSON (adm)	XY	0.3
	YZ	0.4
	XZ	0.3
MÓDULO DE YOUNG (adm)	XY	45000
	YZ	10000
	XZ	10000
MODULO DE CIZALLADURA (MPa)	XY	5000
	YZ	3850
	XZ	5000
TENSIÓN MÁXIMA ADMISIBLE A TRACCIÓN (MPa)	X	1100
	Y	35
	Z	35
TENSIÓN MÁXIMA ADMISIBLE A COMPRESIÓN (MPa)	X	-675
	Y	-120
	Z	-120

Tabla 36 - Evaporador PRFV: Propiedades Filamento

- **Capas:**

Se han definido tres capas básicas (fabrics) una para cada material, asignándole el material y el espesor que le corresponde a cada una:

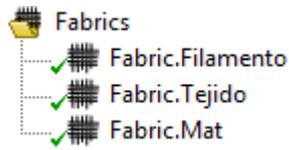


Ilustración 30 – ACP Fabrics

FABRICS	Material	Espesor (mm)
Fabric.Filamento	Epoxy E-Glass UD Filamento	0,5
Fabric.Tejido	Epoxy E-Glass Tejido	1
Fabric.Mat	Epoxy E-Glass Wet Mat	0,95

Tabla 37 - ACP Fabrics definición

- **Apilados:**

Tras haber estudiado la disposición de capas y materiales que eran necesarios para cada parte del evaporador, se observa que hay agrupaciones de capas que se repetían por lo que, para facilitar el trabajo, se agruparon en lo que se han denominado apilados (stackups). Se han definido cinco variantes de apilados:

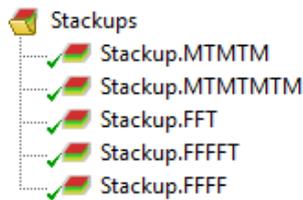


Ilustración 31 - ACP Stackup

Para cada apilado se han definido las capas (fabrics) que lo forman, en qué orden van dispuestas y con qué orientación.

Indicar que las capas de barrera química no se han incluido en la simulación porque no se consideran a la hora de calcular la resistencia mecánica.

- **Sublaminados:**

Por último, para acabar de definir los datos necesarios de los materiales, se han creado 3 sub-laminados (sub laminates) uno para cada parte del equipo:

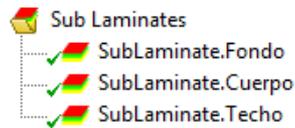


Ilustración 32 – ACP Sub Laminates

Al crear cada sub-laminado se ha especificado qué apilados lo forman, en qué orden están dispuestos y con qué orientación

ELEMENTOS

Se han definido 3 conjuntos de elementos (elements sets), uno para cada parte del evaporador.



Ilustración 33 – ACP Elements Sets

ROSETAS

Se han creado 3 rosetas de las que dependerá la orientación de las fibras de los materiales. Para cada una de ellas se ha definido de qué tipo es (paralela, radial, cilíndrica, esférica, alineada a un eje), un punto de origen y dos ejes de referencia. Decir que las rosetas del fondo y del cuerpo son cilíndricas mientras que la roseta del techo es esférica.

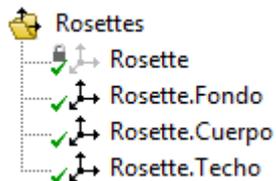


Ilustración 34 – ACP Rosettes

En la siguiente ilustración pueden observarse las rosetas definidas.

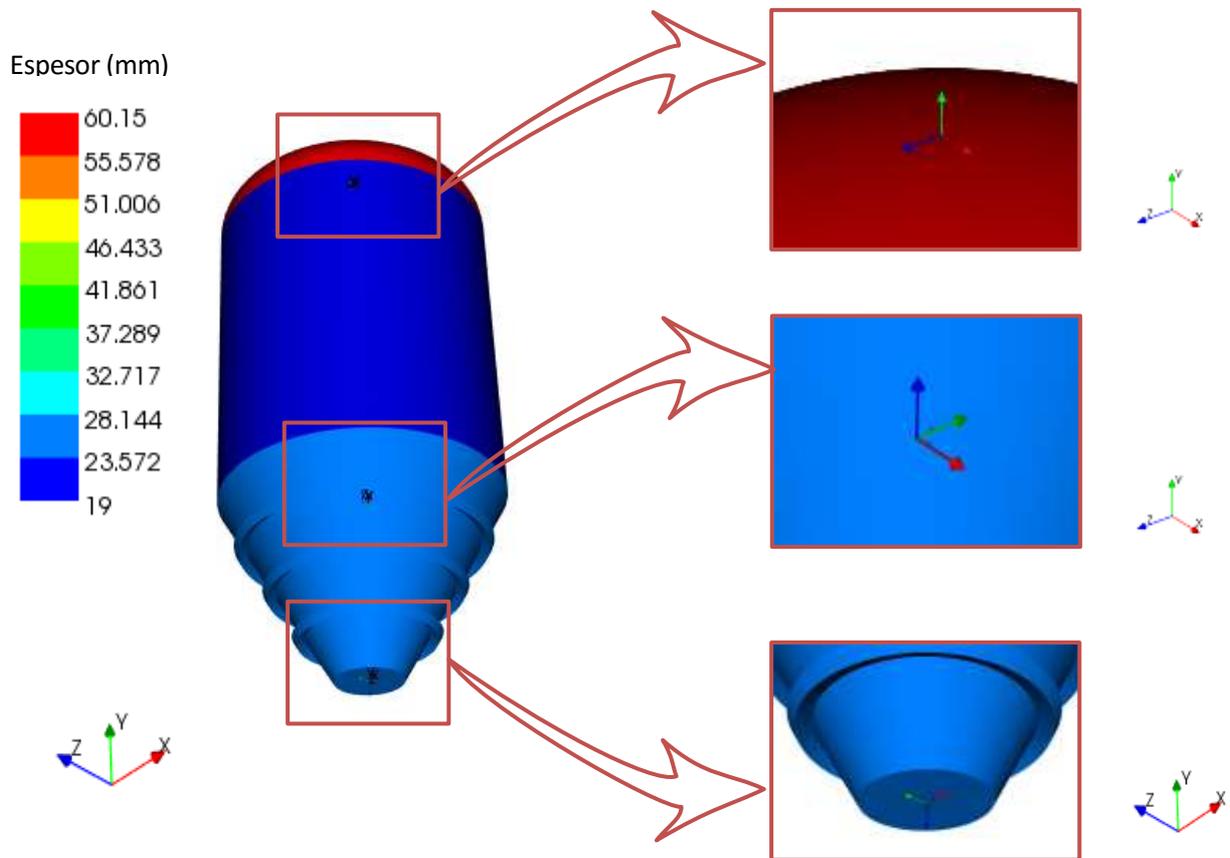


Ilustración 35 – ACP: Rosettes

ORIENTACIÓN DE LAS FIBRAS

Ahora se define la orientación que tendrán las fibras en cada parte del evaporador, este elemento marcará hacia donde crecerá el laminado. Para ello es necesario asignarle a ese conjunto de orientaciones (oriented selection sets) los siguientes elementos (algunos ya se han definido previamente):

- Elemento
- Punto
- Dirección
- Roseta

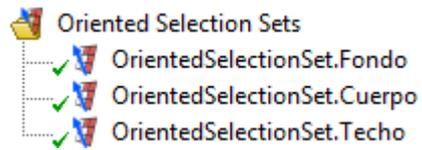


Ilustración 36 – ACP Oriented Selection Sets

A continuación, se indica cómo se han definido cada uno de los tres conjuntos de orientaciones de fibras:

OrientedSelectionSet.Fondo	
Element Sets	Fondo
Point	(0.0000,-1.5935,0.0000)
Direction	(0.0000,-1.0000,0.0000)
Rosettes	Rosette.Fondo

Ilustración 37 – ACP Orientación de las fibras del fondo del evaporador: Propiedades

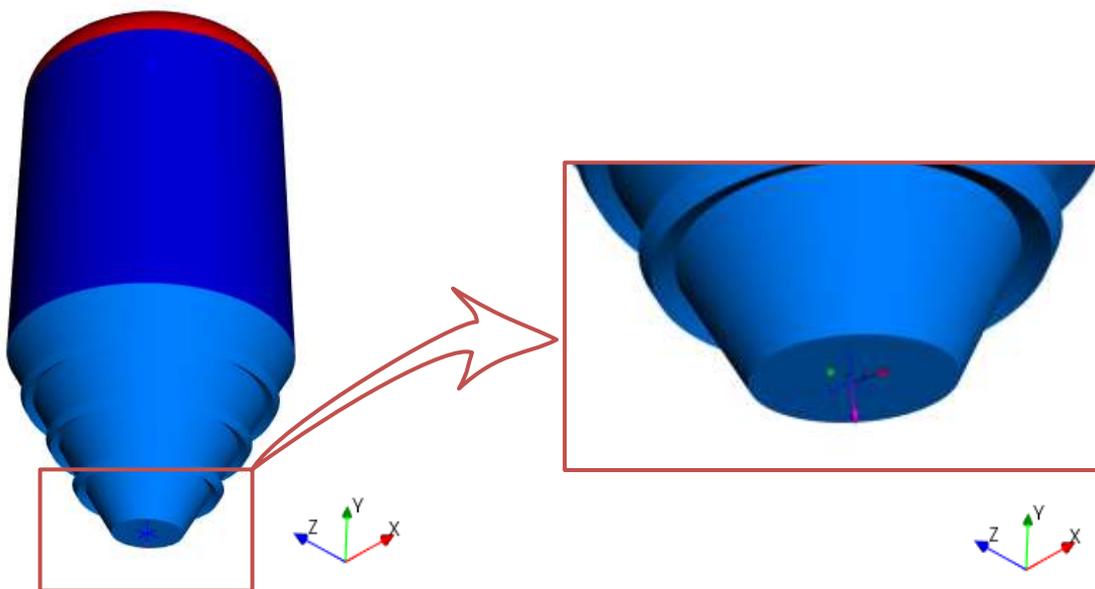


Ilustración 38 – ACP OrientedSelectionSet.Fondo

OrientedSelectionSet.Cuerpo	
Element Sets	Cuerpo
Point	(1.2000,1.0000,0.0000)
Direction	(1.0000,0.0000,0.0000)
Rosettes	Rosette.Cuerpo

Tabla 38 - ACP Orientación de las fibras del cuerpo del evaporador: Propiedades

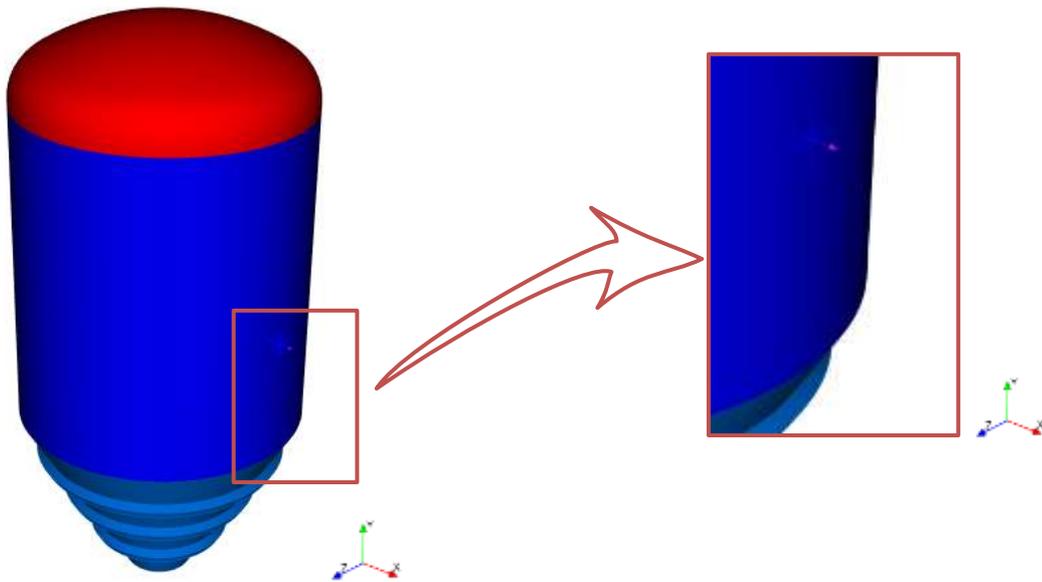


Ilustración 39 - ACP OrientedSelectionSet.Cuerpo

OrientedSelectionSet.Techo	
Element Sets	Techo
Point	(0.0000,3.3670,0.0000)
Direction	(0.0000,1.0000,0.0000)
Rosettes	Rosette.Techo

Ilustración 40 - ACP Orientación de las fibras del techo del evaporador: Propiedades

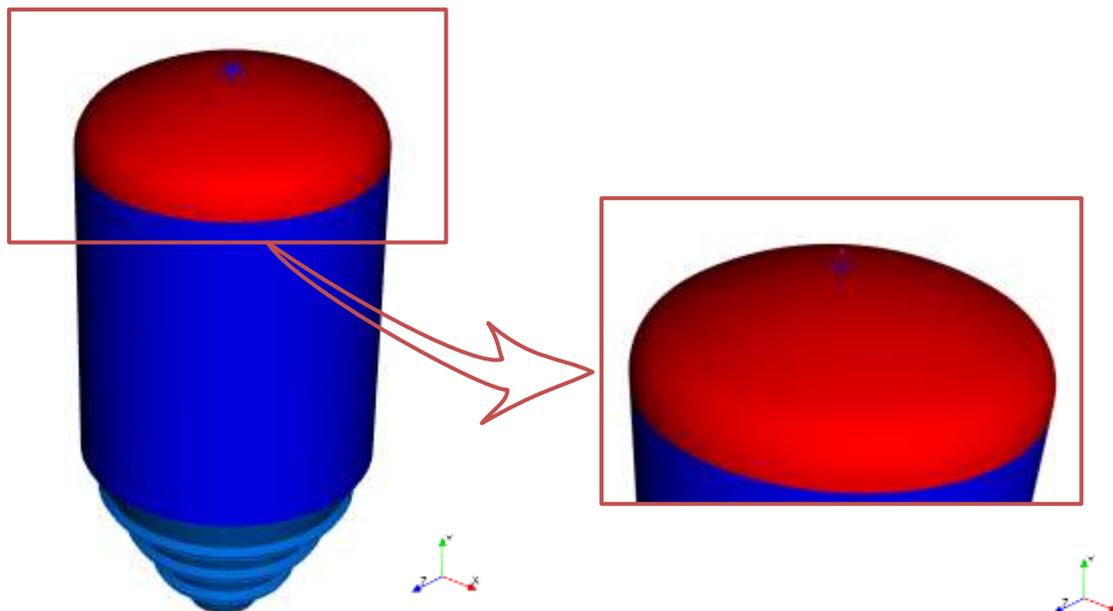


Ilustración 41 - ACP OrientedSelectionSet.Techo

CONJUNTO DEL MODELO

Es ahora cuando se define el conjunto de laminados completo (modeling group), uno para cada parte del evaporador. Se pueden identificar los tres siguientes conjuntos:

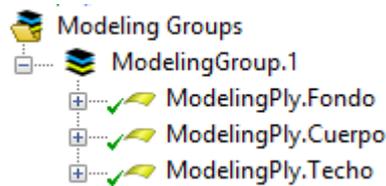


Ilustración 42 – ACP Modeling Groups

Para crear cada uno, se le ha tenido que asignar la orientación de las fibras (OrientedSelectionSet) y el sublaminado (SubLaminate) correspondientes, ya definidos previamente para cada parte.

Dependiendo de cómo se han ido definiendo los elementos anteriores para cada parte, el conjunto de laminado ha ido variando. A continuación, se puede observar cómo se ha desarrollado cada uno de los tres:

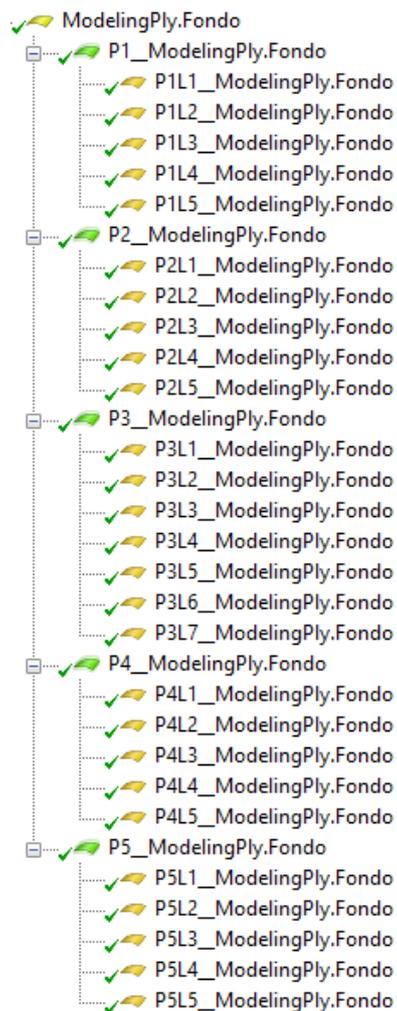


Ilustración 43 – ACP ModelingPly.Fondo

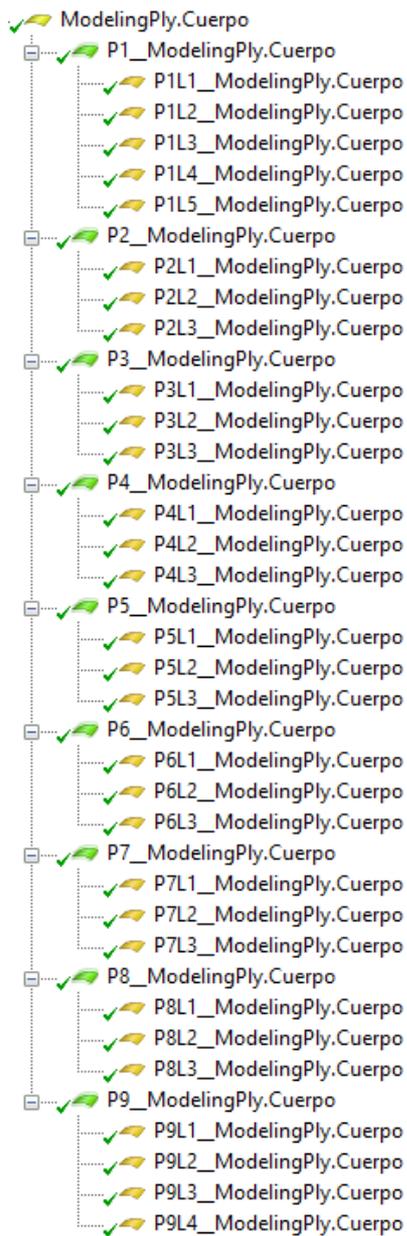


Ilustración 44 - ACP ModelingPly.Cuerpo

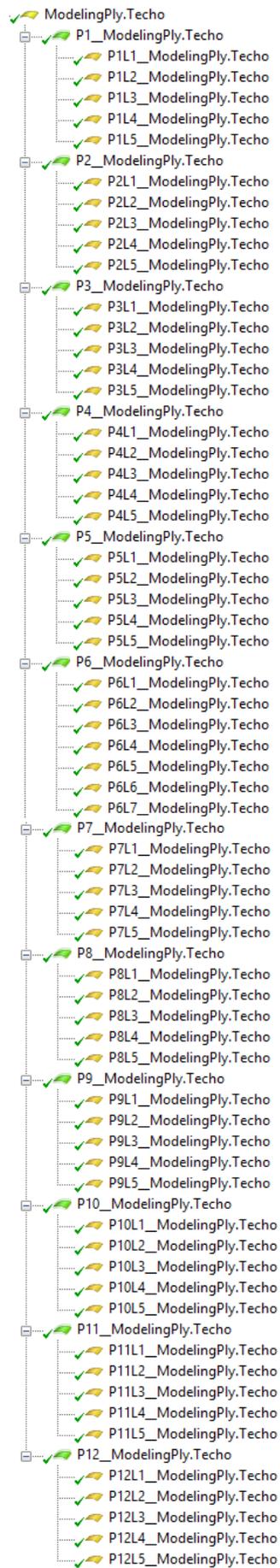


Ilustración 45 - ACP ModelingPly.Techo

Tras todo este proceso, se obtiene tanto la disposición de las capas del laminado para cada parte del evaporador como la definición de la orientación y dirección de las fibras.

En la siguiente ilustración se puede observar cómo han quedado definidas las capas de laminado para cada parte del evaporador:

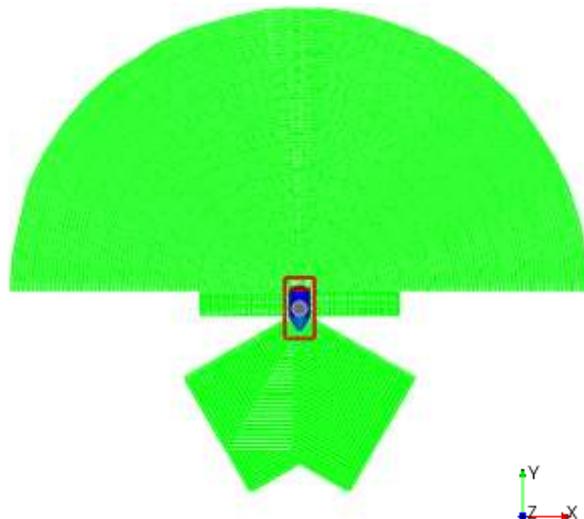


Ilustración 46 – ACP Capas del laminado

A continuación, se muestran las orientaciones y dirección de las fibras para cada elemento del evaporador:

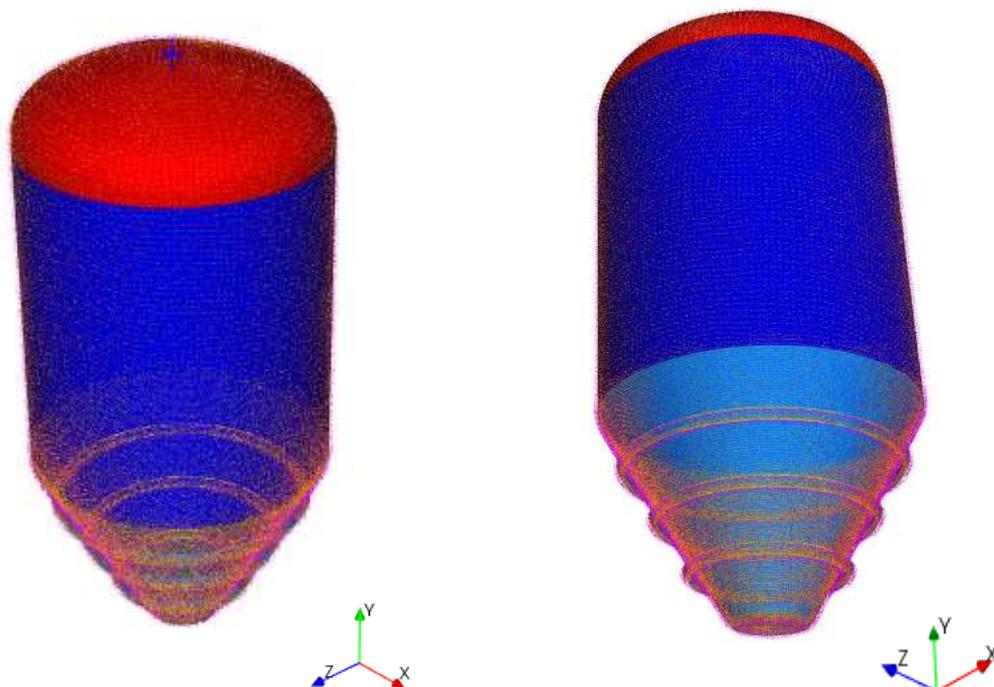


Ilustración 47 – ACP Orientación de las fibras

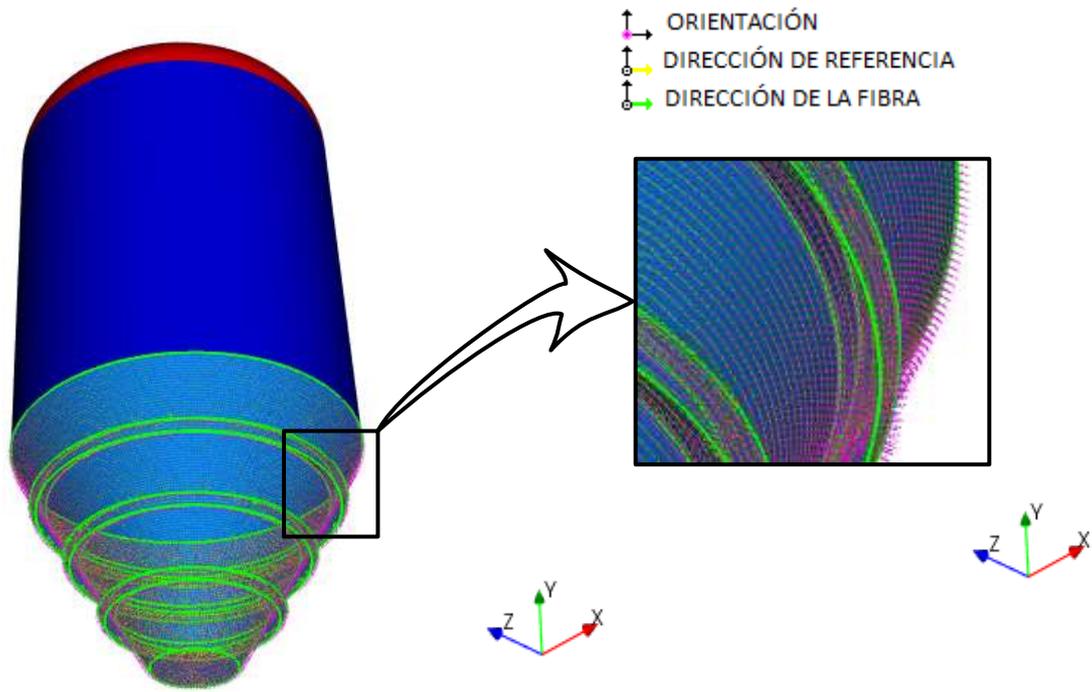


Ilustración 48 - ACP Orientación de las fibras: Fondo

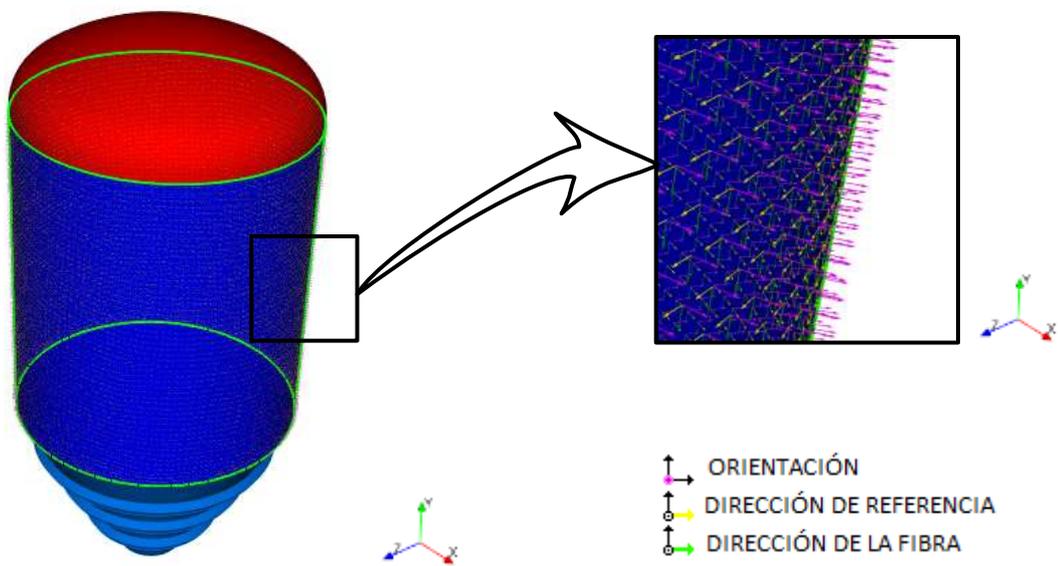


Ilustración 49- ACP Orientación de las fibras: Cuerpo

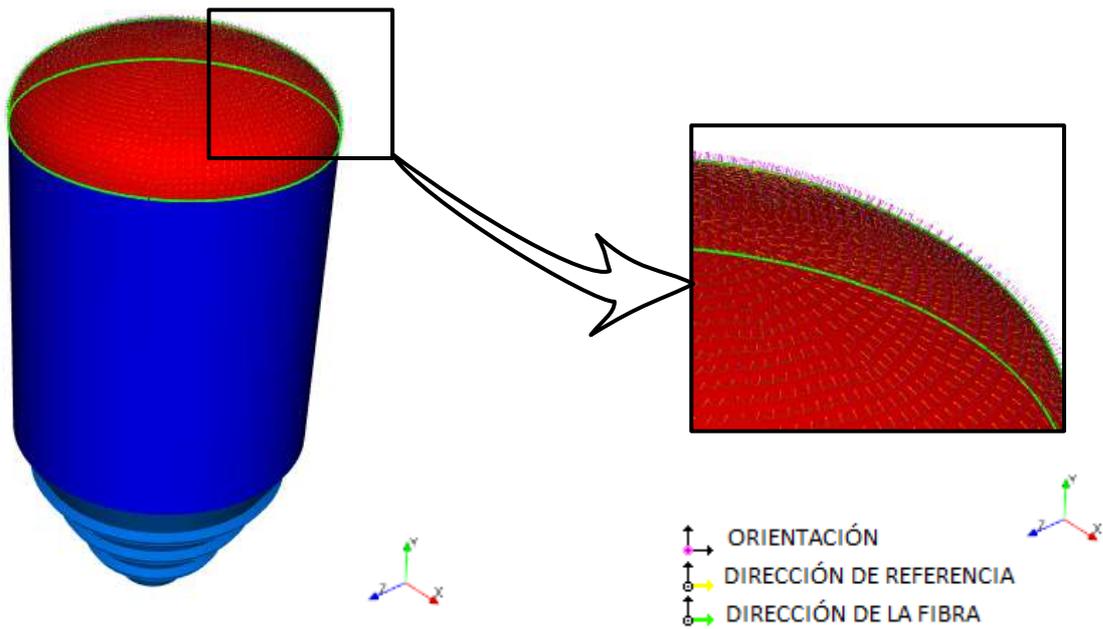


Ilustración 50 - ACP Orientación de las fibras: Techo

4.2.4. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno que se han impuesto en el modelo de cálculo han sido fijar las zonas de unión con las 4 patas del evaporador, que no se han modelado por simplicidad y teniendo en cuenta que esta situación que se va a simular es más desfavorable que la real por lo que se encuentra del lado de la seguridad:

■ Fixed Support

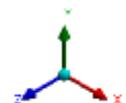
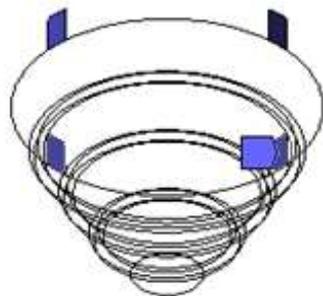
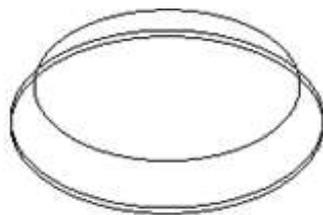


Ilustración 51 – Evaporador PRFV: Condiciones de contorno 4 patas

4.2.5. Cargas

Se ha tenido en cuenta el efecto de la gravedad actuando sobre el modelo completo:

■ Standard Earth Gravity: 9806.6 mm/s²
Components: 0,-9806.6;0. mm/s²

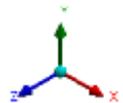


Ilustración 52 - Evaporador PRFV: Efecto de la gravedad

En cuanto a la presión interior del equipo, se han estudiado dos situaciones:

- HIPÓTESIS 1: presión de diseño
- HIPÓTESIS 2: presión de operación

HIPÓTESIS 1: Condiciones de Diseño

Esta hipótesis representa la situación en la que la presión interior del equipo es la presión de diseño, que corresponde con la presión de vacío, con un valor de $P=0,1$ MPa. Esta presión está actuando sobre todas las caras interiores de los elementos del equipo: fondo, cuerpo y techo.

Esta hipótesis correspondería con las siguientes ilustraciones:

■ Pressure_Fondo: -0.1 MPa

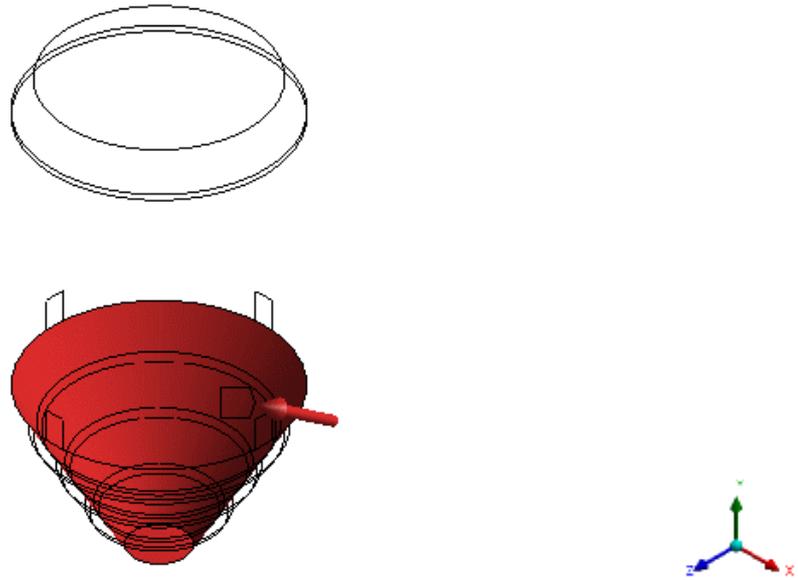


Ilustración 53 - Evaporador PRFV: Hipótesis 1 - Presión interior fondo

■ Pressure_Cuerpo: -0.1 MPa

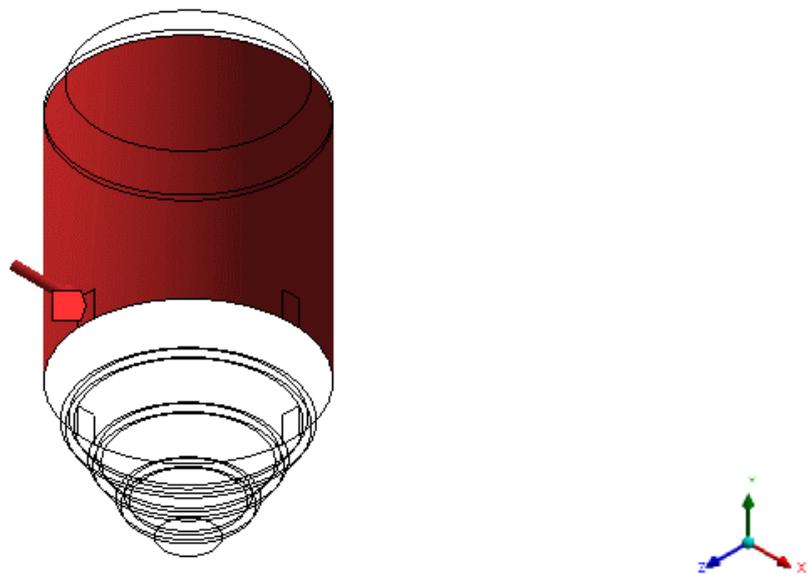


Ilustración 54 – Evaporador PRFV: Hipótesis 1 - Presión interior en el cuerpo

■ Pressure_Techo: -0.1 MPa

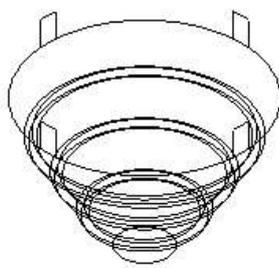


Ilustración 55 – Evaporador PRFV: Hipótesis 1 - Presión interior en el techo

HIPÓTESIS 2: Condiciones de Operación

Esta hipótesis corresponde con la situación en la que la presión interior es la presión de operación cuyo valor es de $P=0,05$ MPa de vacío. Esta presión está actuando sobre todas las caras interiores de los elementos del equipo: fondo, cuerpo y techo.

Esta hipótesis correspondería con las siguientes ilustraciones:

■ Pressure_Fondo: -5.e-002 MPa

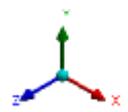
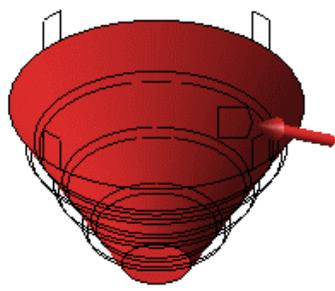
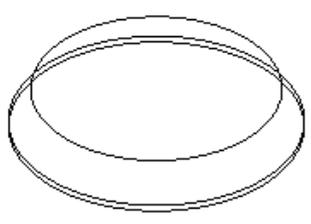


Ilustración 56 - Evaporador PRFV: Hipótesis 2 - Presión interior fondo

Pressure_Cuerpo: -5.e-002 MPa

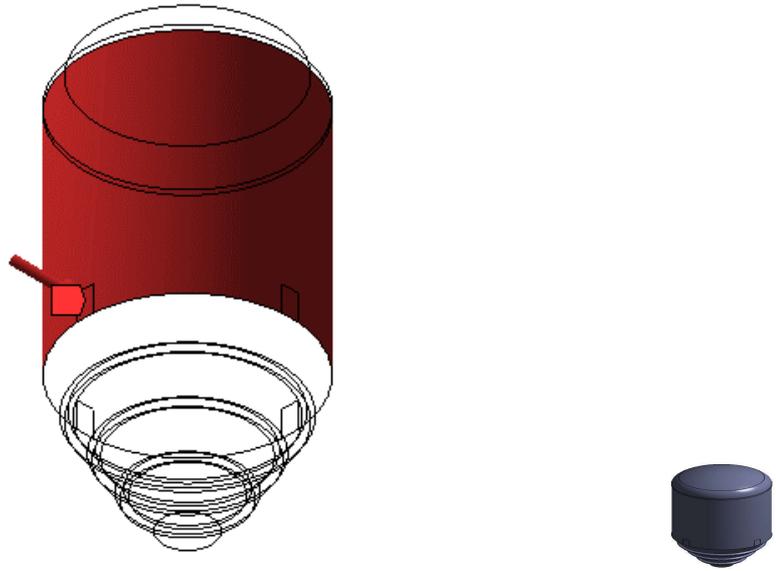


Ilustración 57 – Evaporador PRFV: Hipótesis 2 - Presión interior en el cuerpo

Pressure_Techo: -5.e-002 MPa

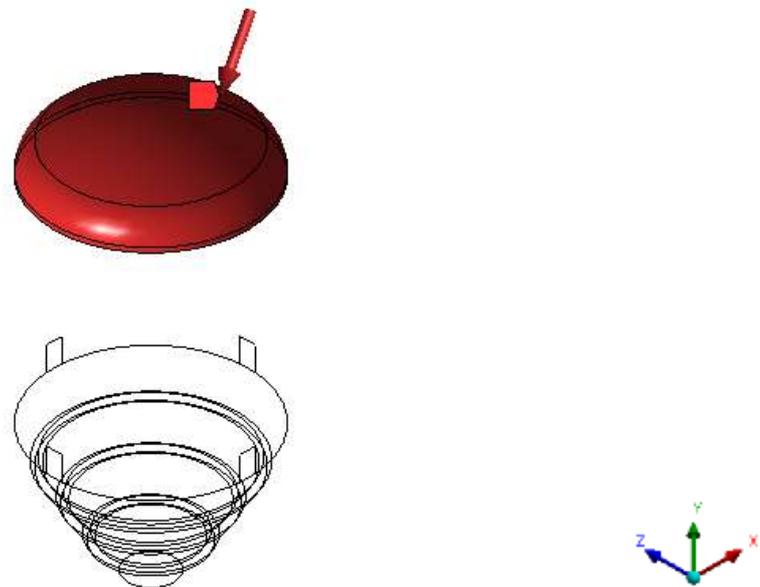


Ilustración 58 – Evaporador PRFV: Hipótesis 2 - Presión interior en el techo

Además, se ha considerado la presión hidrostática del contenido del evaporador teniendo en cuenta que la densidad es $\rho=1250 \text{ Kg/m}^3$ y que el equipo está lleno hasta la zona superior del cuerpo cilíndrico.

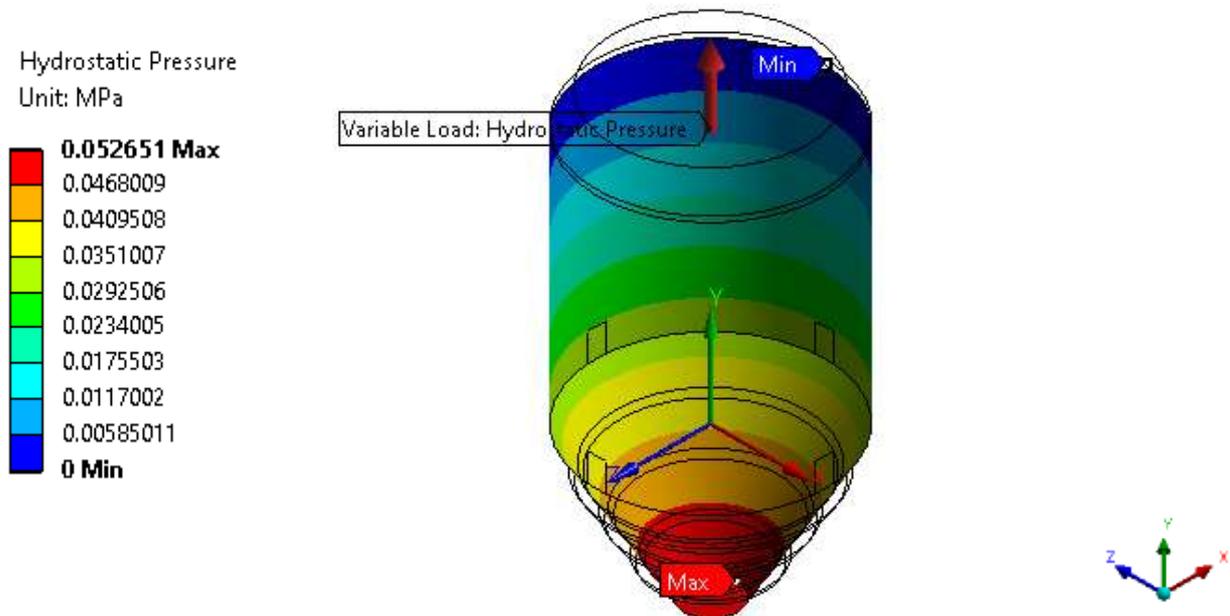


Ilustración 59 – Evaporador PRFV: Presión Hidrostática

4.2.6. Tipo de análisis

Para los cálculos llevados a cabo se ha realizado un análisis estructural estático lineal. Este análisis estático es lineal porque no se han considerado no linealidades dentro del modelo. Además, sería correcto considerar también lineal el comportamiento del PRFV porque no se produce el fenómeno de plastificación, sino que directamente parte.

4.2.7. Resultados del análisis FEM

En este apartado se muestran los resultados obtenidos para la simulación del evaporador en PRFV tanto en deformaciones como en tensiones para cada una de las dos hipótesis simuladas, según los siguientes sistemas de referencia:

- Desplazamientos: Sistema de Referencia Global
- Tensiones: Sistema de Referencia Elemental: ejes X e Y contenidos en el plano de los elementos y el eje Z perpendicular a este (con el objetivo de poder evaluar las tensiones obtenidas en cada una de las direcciones de la fibra).

SISTEMA DE REFERENCIA GLOBAL

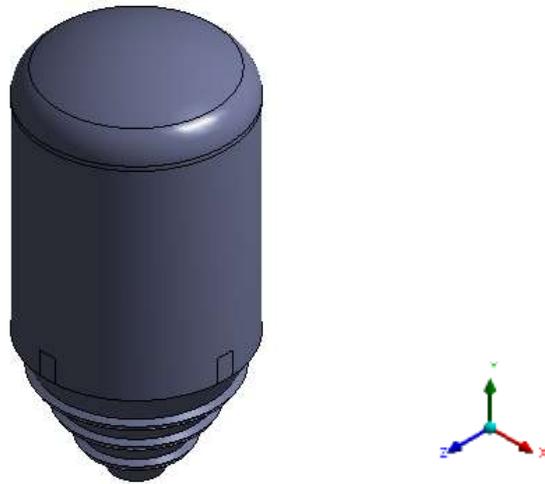


Ilustración 60 – Evaporador PRFV: Sistema de referencia global.

- X Axis
- Y Axis
- Z Axis

SISTEMA DE REFERENCIA ELEMENTAL

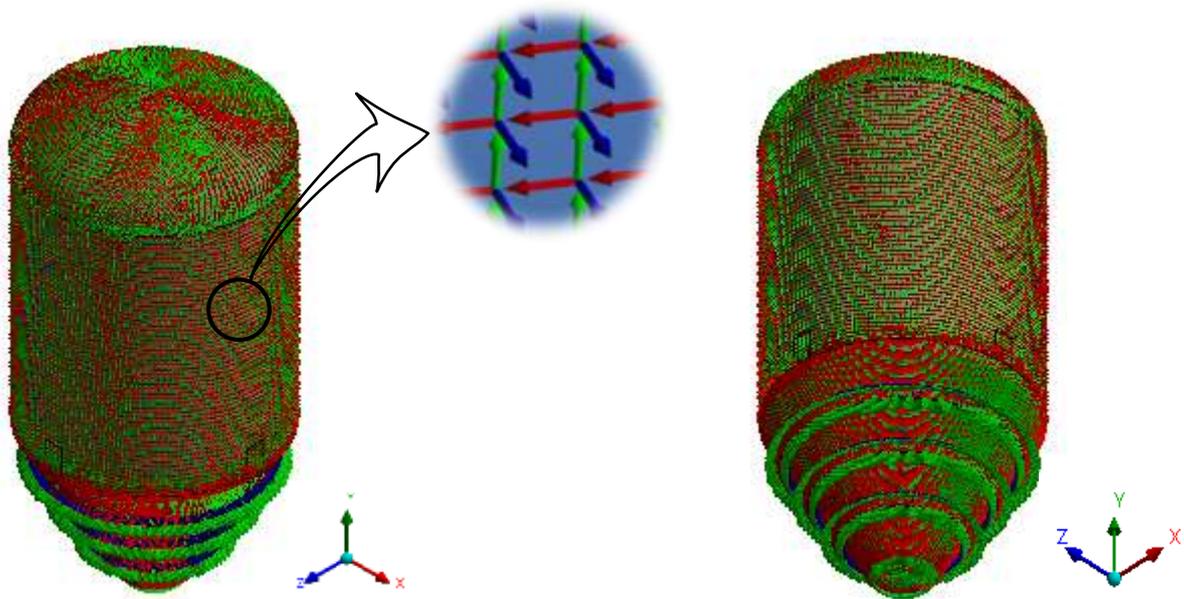


Ilustración 61 - Evaporador PRFV: Sistema de referencia elemental

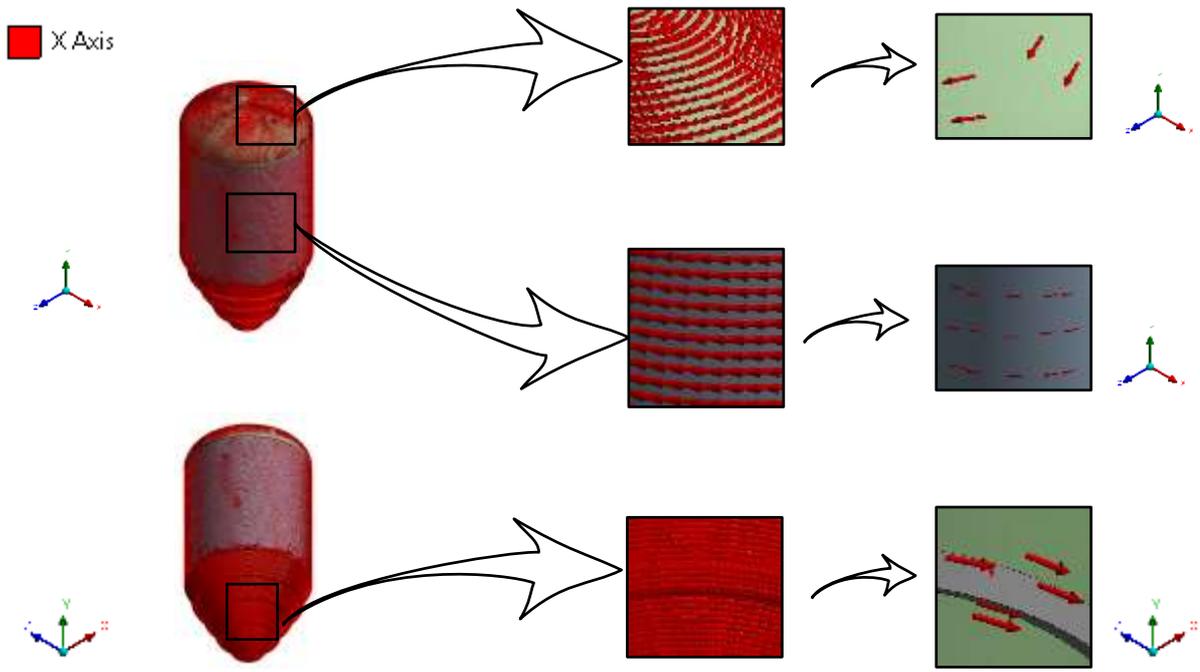


Ilustración 62 - Evaporador PRFV: Sistema de referencia elemental Eje X

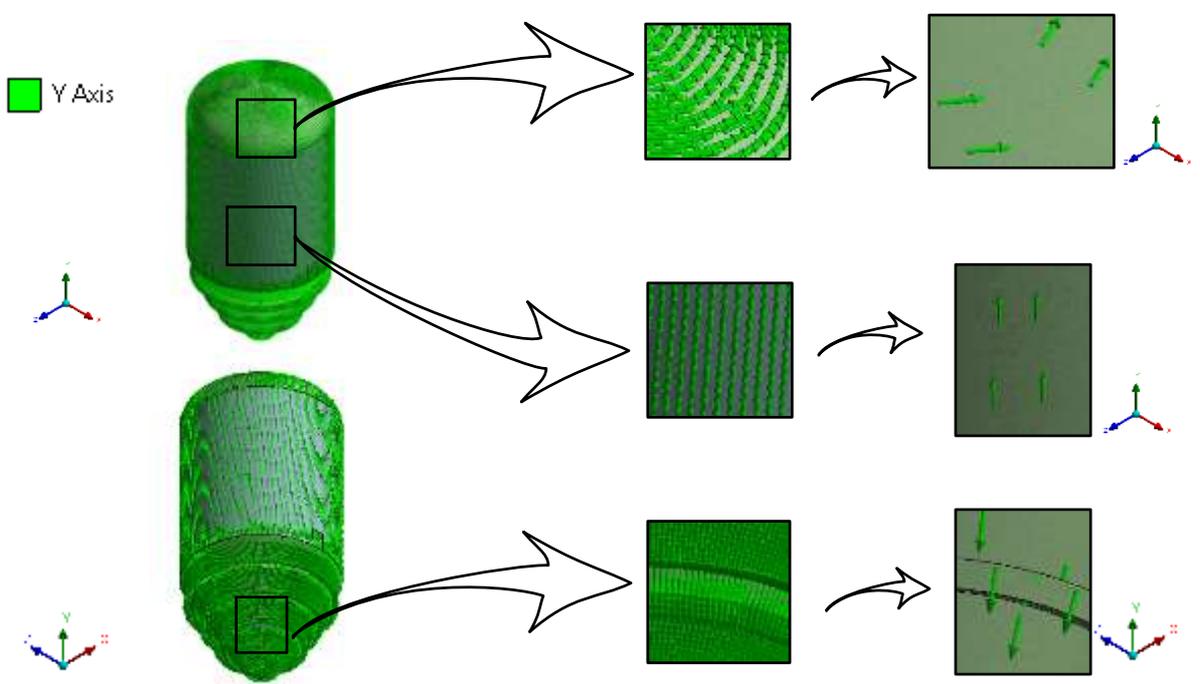


Ilustración 63 - Evaporador PRFV: Sistema de referencia elemental Eje Y

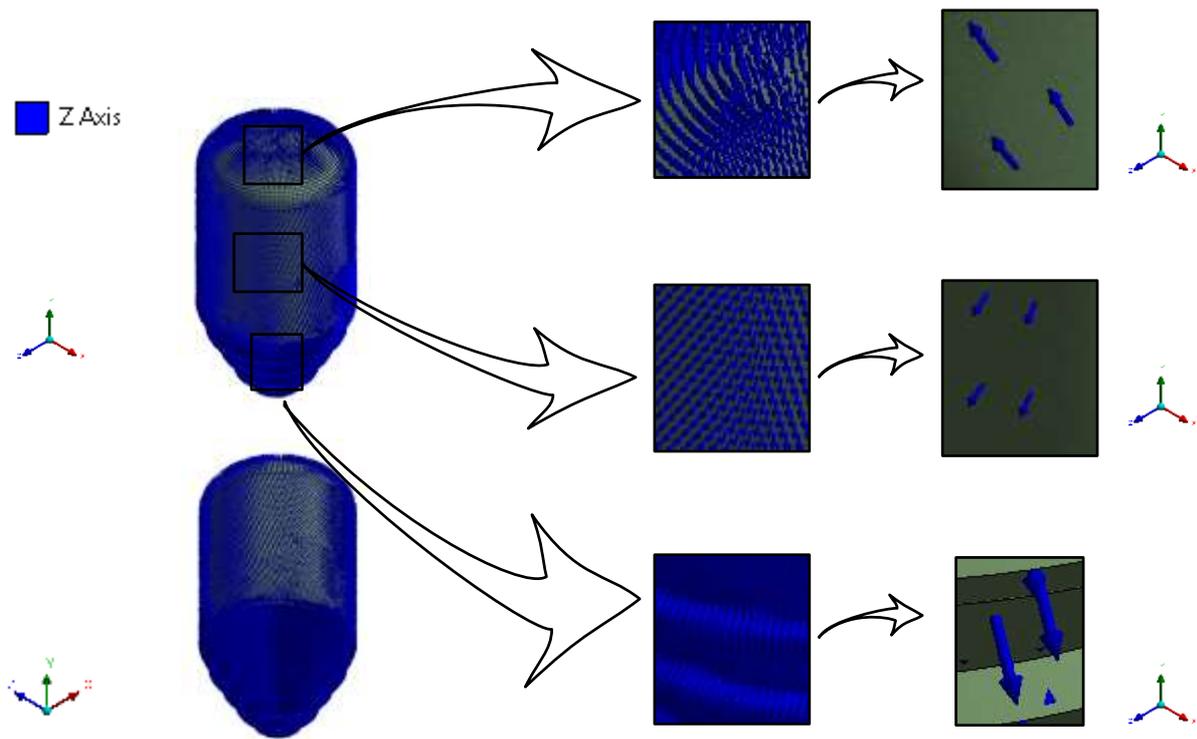


Ilustración 64 - Evaporador PRFV: Sistema de referencia elemental Eje Z

HIPÓTESIS 1: Presión de Diseño

Los resultados en desplazamientos obtenidos, en coordenadas globales, para esta hipótesis son los que se muestran a continuación:

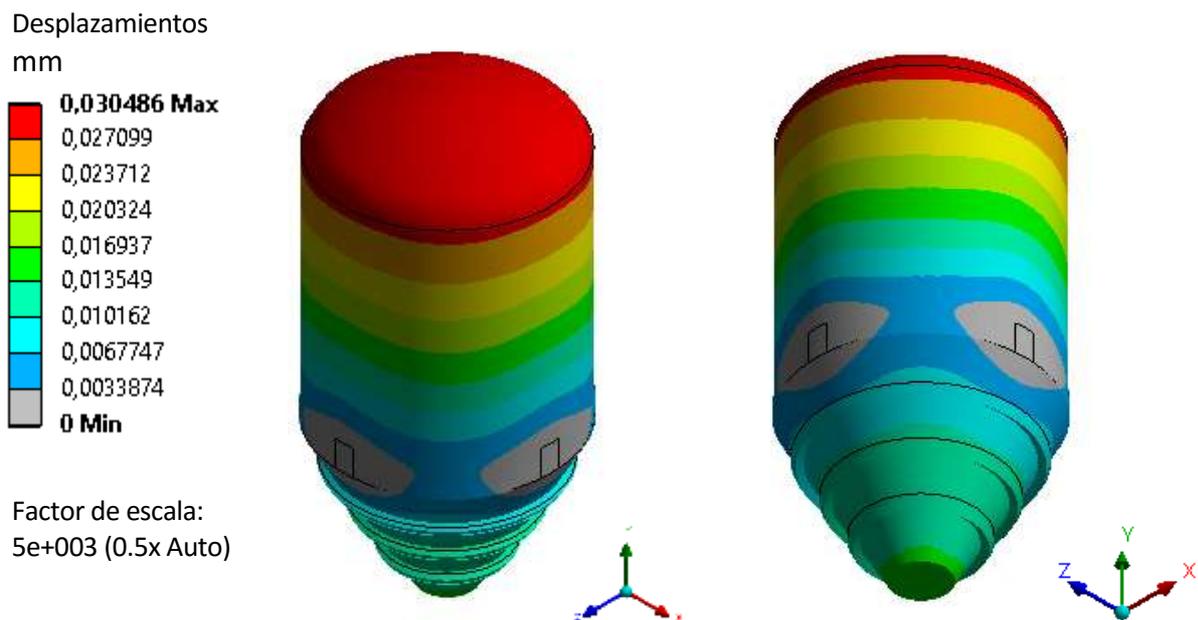


Ilustración 65 – Evaporador PRFV – Hipótesis 1: Resultados en desplazamientos

En cuanto a los resultados obtenidos en tensiones para esta hipótesis, se muestran de forma independiente para cada uno de los tres ejes elementales:

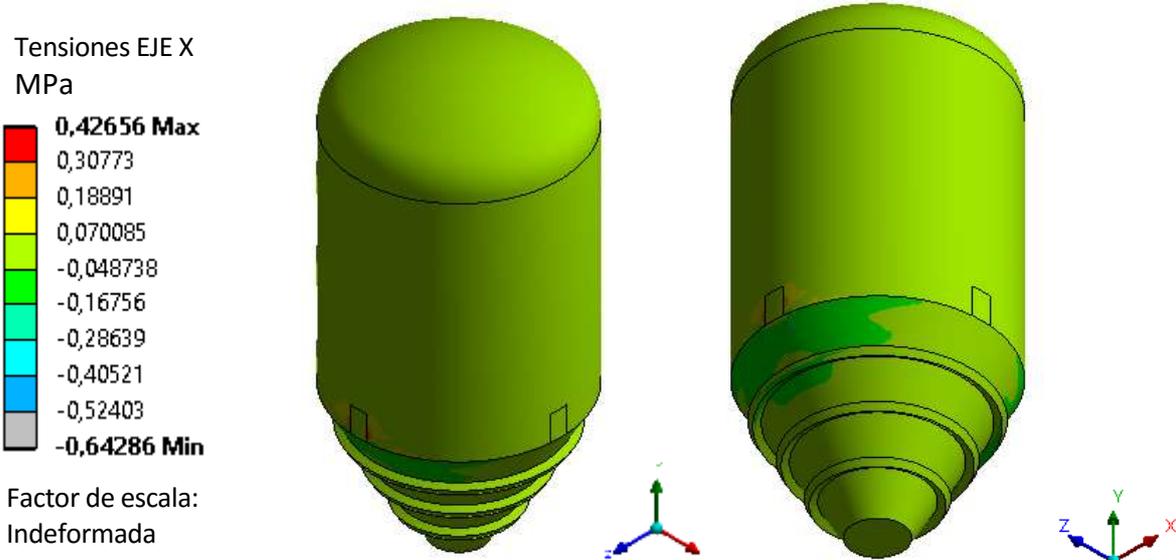


Ilustración 66 - Evaporador PRFV – Hipótesis 1: Resultados en tensiones EJE X

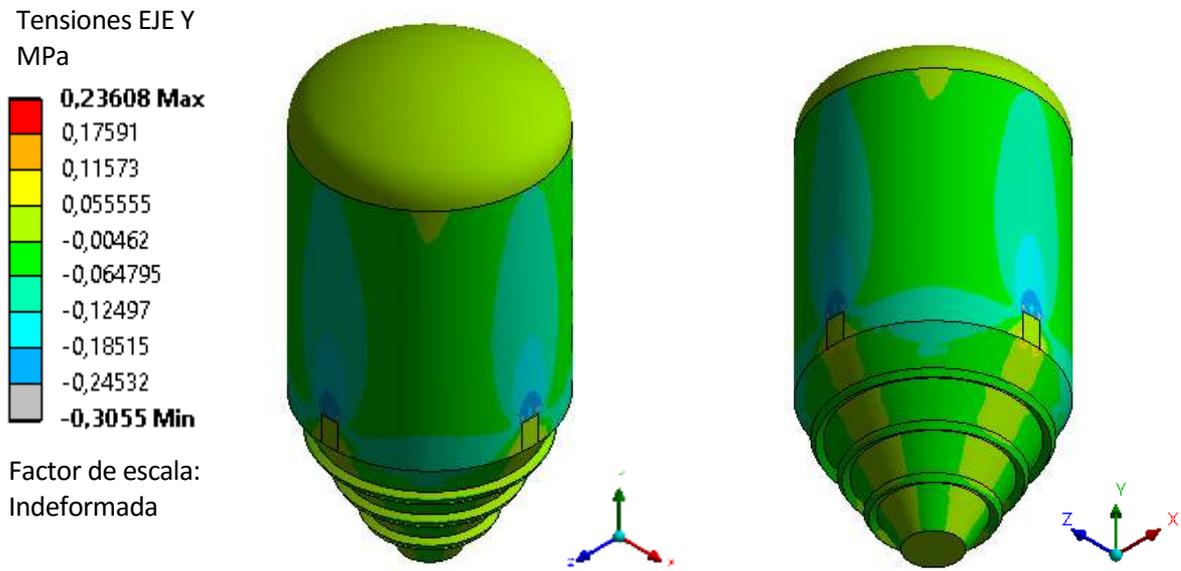


Ilustración 67 - Evaporador PRFV – Hipótesis 1: Resultados en tensiones EJE Y

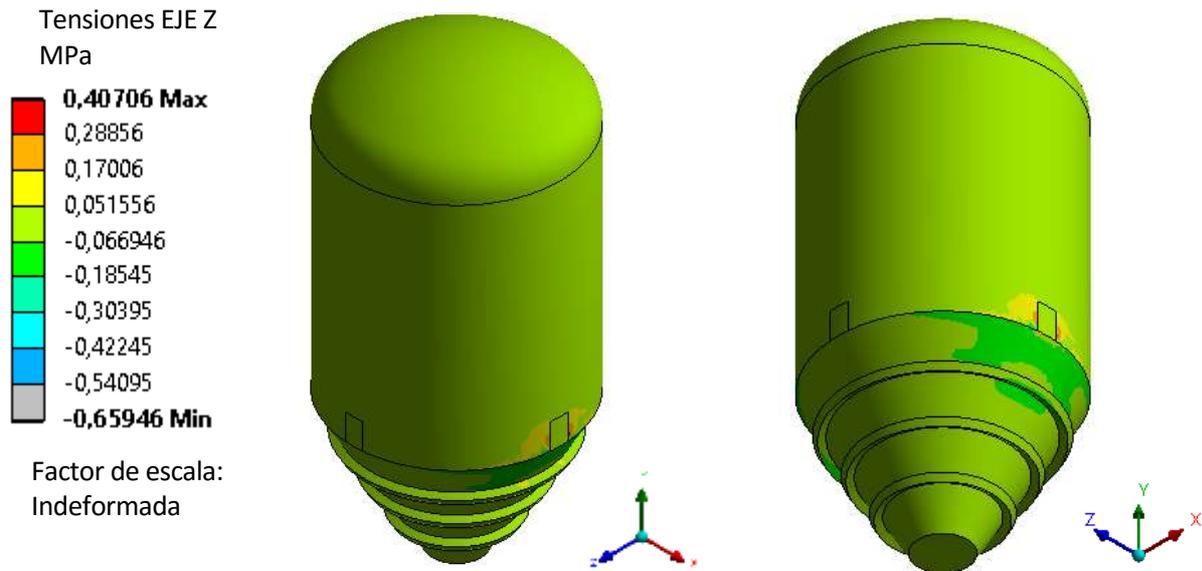


Ilustración 68 - Evaporador PRFV – Hipótesis 1: Resultados en tensiones EJE Z

HIPÓTESIS 2: Presión de Operación

Los resultados en desplazamientos obtenidos, en coordenadas globales, para esta hipótesis son los que se muestran a continuación:

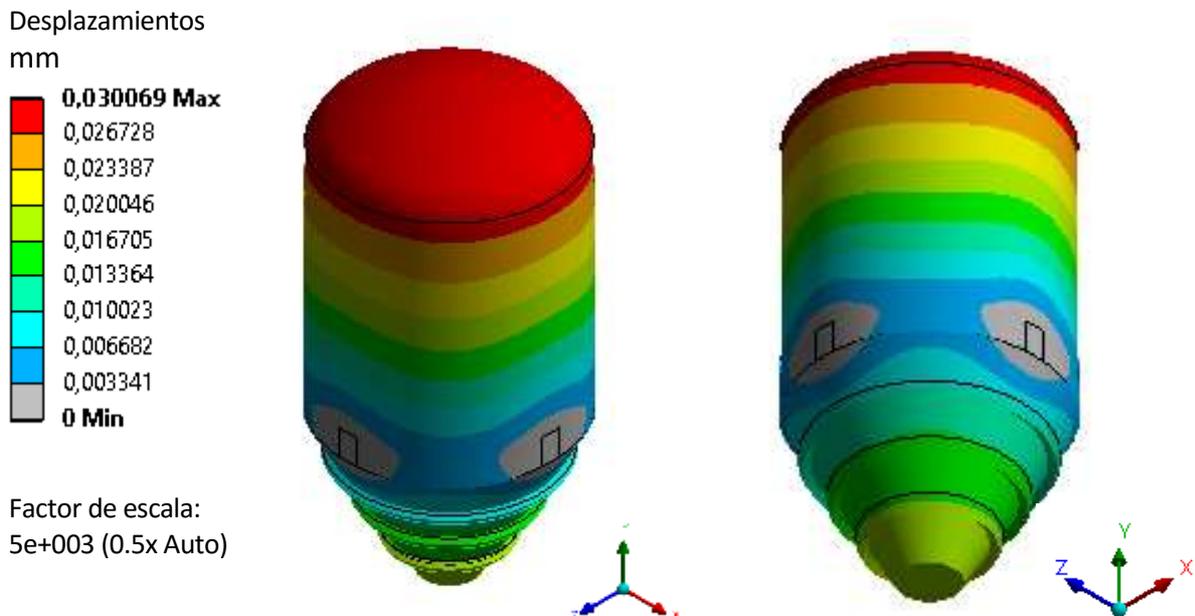


Ilustración 69 – Evaporador PRFV – Hipótesis 2: Resultados en desplazamientos

En cuanto a los resultados obtenidos en tensiones para esta hipótesis, se muestran de forma independiente para cada uno de los tres ejes elementales:

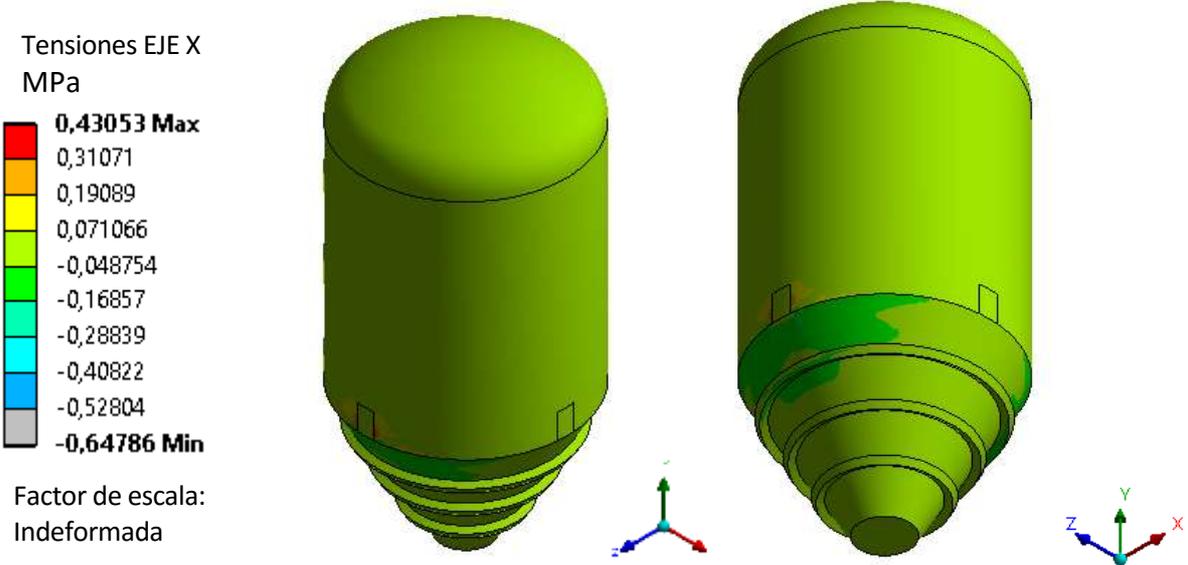


Ilustración 70 - Evaporador PRFV – Hipótesis 2: Resultados en tensiones EJE X

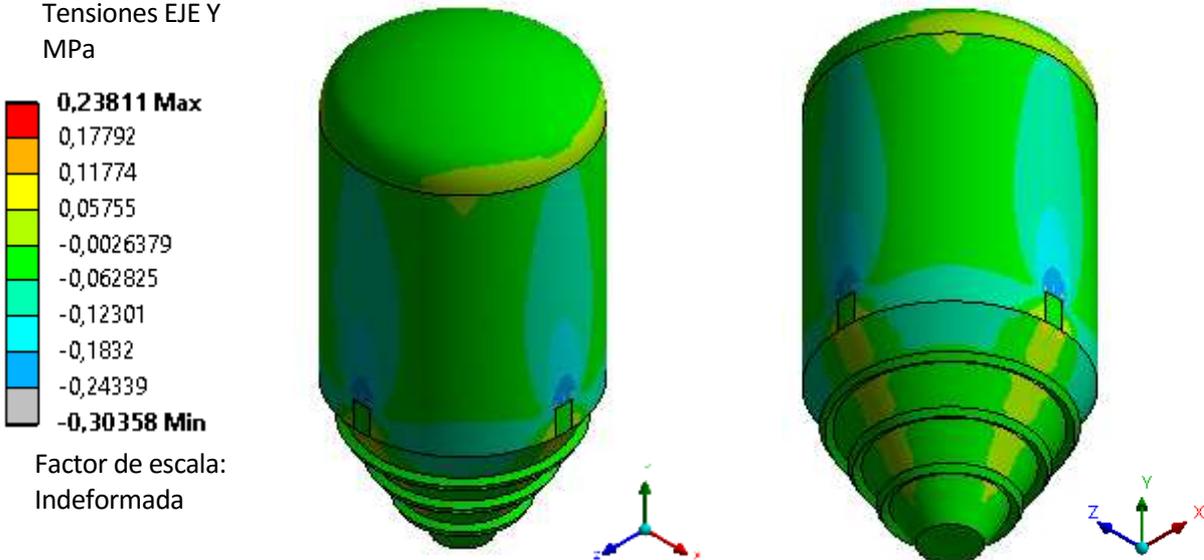


Ilustración 71 - Evaporador PRFV – Hipótesis 2: Resultados en tensiones EJE Y

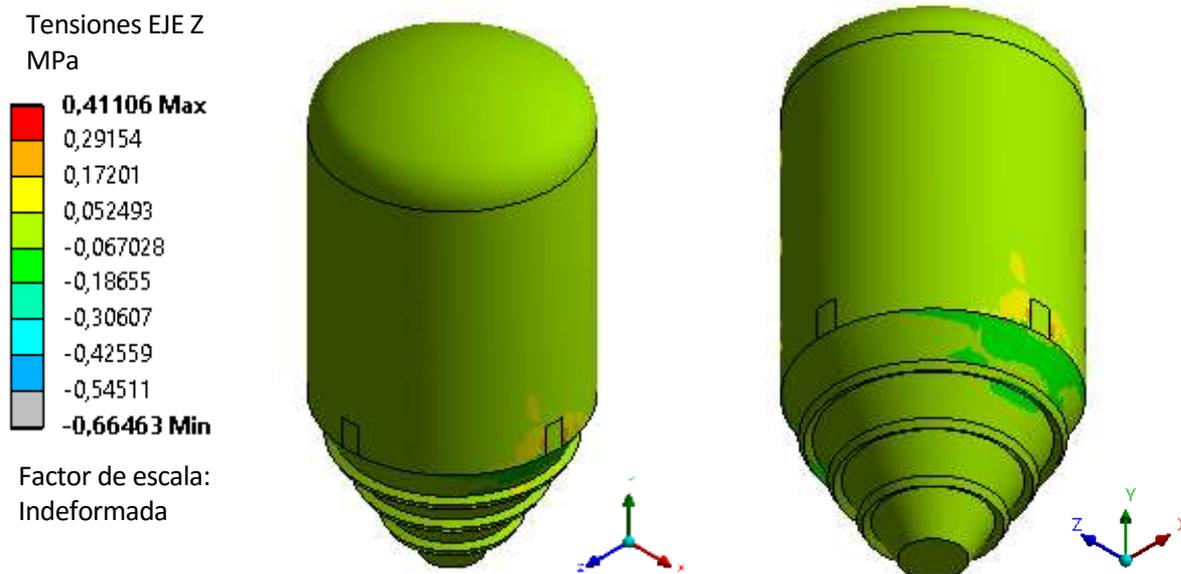


Ilustración 72 - Evaporador PRFV – Hipótesis 2: Resultados en tensiones EJE Z

4.2.8. Conclusión análisis FEM evaporador en PRFV

A modo resumen, se recogen en las siguientes tablas los valores máximos de deformaciones para cada una de las dos simulaciones que se han llevado a cabo (Hipótesis 1 e Hipótesis 2).

EVAPORADOR PRFV	
DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS (mm)	
Hipótesis 1	0,030486
Hipótesis 2	0,030069

Tabla 39 - Evaporador PRFV: Resultados en desplazamientos

Como se puede observar, para ambas hipótesis se obtienen desplazamientos máximos muy pequeños, aunque son valores muy similares es algo menor para la segunda hipótesis. Estos valores máximos se obtienen en el techo, que se desplaza en la dirección del eje y, en el sentido negativo.

Además, se recogen en las siguientes tablas los valores máximos en tensiones (en tracción y compresión y para cada uno de los 3 ejes elementales) obtenidos para cada una de las dos simulaciones que se han llevado a cabo (Hipótesis 1 e Hipótesis 2), comparándolos con los valores máximos admisibles del material.

EVAPORADOR PRFV - TENSIONES DE TRACCIÓN				
HIPÓTESIS		TENSIÓN DE CÁLCULO (MPa)	TENSIÓN MAX. ADMISIBLE AMINORADA ($\gamma=1,2$) (MPa)	COMPROBACIÓN $\sigma_{CAL}/\sigma_{ADM}$
Hipótesis 1	EJE ELEMENTAL X	0.42656	538	0.001
	EJE ELEMENTAL Y	0.23608	24	0.010
	EJE ELEMENTAL Z	0.40706	24	0.017
Hipótesis 2	EJE ELEMENTAL X	0.43053	538	0.001
	EJE ELEMENTAL Y	0.23811	24	0.010
	EJE ELEMENTAL Z	0.41106	24	0.017

Tabla 40 - Evaporador PRFV: Resultados en tensiones de tracción

EVAPORADOR PRFV - TENSIONES DE COMPRESIÓN				
HIPÓTESIS		TENSIÓN DE CÁLCULO (MPa)	TENSIÓN MAX. ADMISIBLE AMINORADA ($\gamma=1,2$) (MPa)	COMPROBACIÓN $\sigma_{CAL}/\sigma_{ADM}$
Hipótesis 1	EJE ELEMENTAL X	-0.64286	-330	0.002
	EJE ELEMENTAL Y	-0.3055	-76	0.004
	EJE ELEMENTAL Z	-0.65946	-76	0.009
Hipótesis 2	EJE ELEMENTAL X	-0.64786	-330	0.002
	EJE ELEMENTAL Y	-0.30358	-76	0.004
	EJE ELEMENTAL Z	-0.66463	-76	0.009

Tabla 41 - Evaporador PRFV: Resultados en tensiones de compresión

Para calcular los valores de las tensiones máximas admisibles, partiendo de los valores correspondientes para el tejido, el mat y el filamento, se han calculado estos valores para el fondo, el cuerpo y el techo considerando el laminado de cada uno. Una vez calculados estos valores se han comparado (el del fondo, el del cuerpo y el del techo para cada caso) y se ha seleccionado el menor, por ser el más desfavorable. Por último, a estos valores se le ha aplicado un factor de minoración.

Como se muestran en las tablas, tanto las tensiones máximas obtenidas a tracción como a compresión para ambas hipótesis de cálculo están muy por debajo de los valores que se han impuesto como tensiones máximas admisibles por lo que se concluye que el modelo diseñado de evaporador es válido.

4.3. Análisis FEM del evaporador en acero al carbono

4.3.1. Geometría

En las siguientes imágenes se muestra la geometría empleada en la simulación:

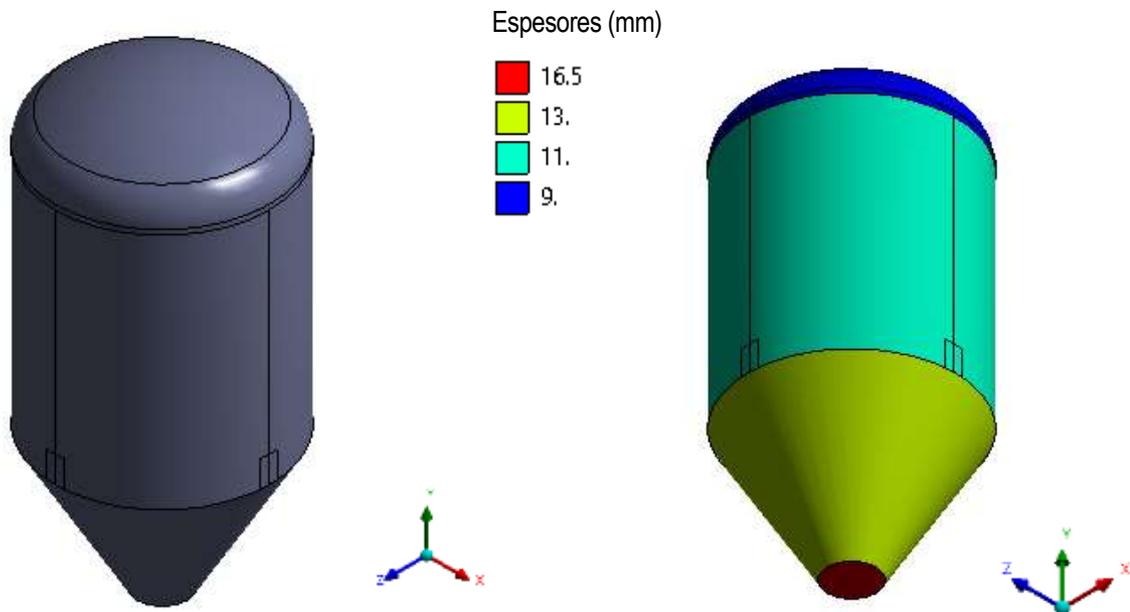


Ilustración 73 – Evaporador acero S275JR: Geometría

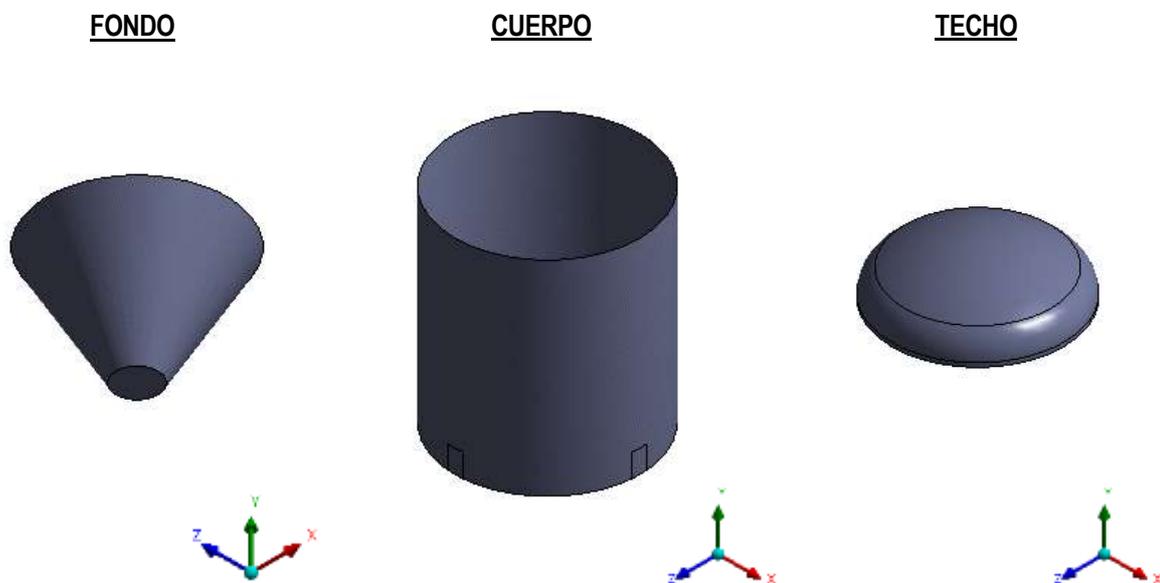


Ilustración 74 - Evaporador acero S275JR: Geometría elementos

4.3.2. Malla

Nodes	14223
Elements	14260

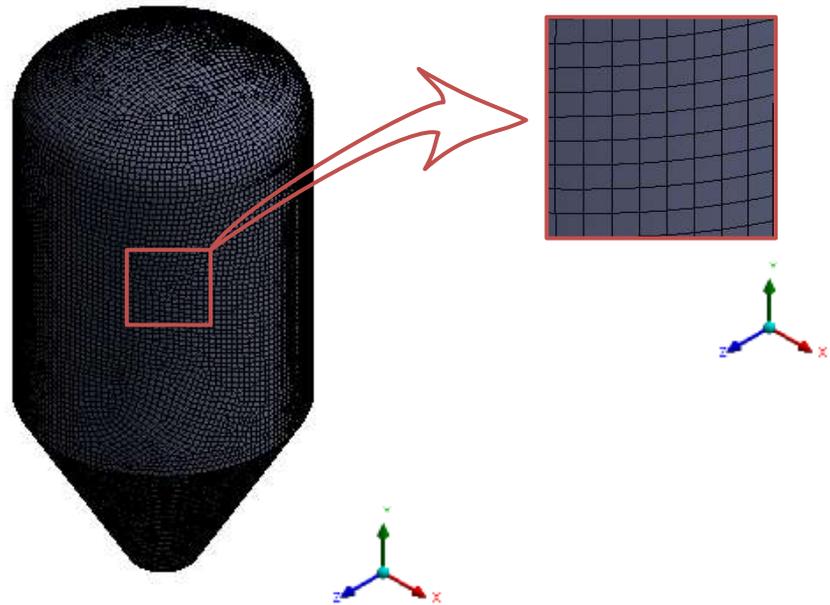


Ilustración 75 - Evaporador acero S275JR: Malla

4.3.3. Materiales

Se ha considerado que el evaporador está fabricado en acero S275JR. A continuación, se indican las propiedades de dicho material:

ACERO S275JR	
PROPIEDAD	VALOR
DENSIDAD (Kg/m ³)	7850
COEFICIENTE DE POISSON (adm)	0.3
MÓDULO DE ELASTICIDAD (GPa)	200
TENSIÓN MÁXIMA ADMISIBLE (MPa)	195

Tabla 42 – Propiedades acero S275JR

Decir que se ha tomado como tensión máxima admisible el valor del límite elástico a T=65°C para asegurar que el material está trabajando dentro de la zona de comportamiento elástico lineal.

4.3.4. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno que se han impuesto en el modelo de cálculo han sido fijar las zonas de unión con las 4 patas del evaporador, que no se han modelado por simplicidad y teniendo en cuenta que esta situación que se va a simular es más desfavorable que la real por lo que se encuentra del lado de la seguridad:

 Fixed Support

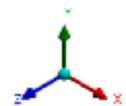
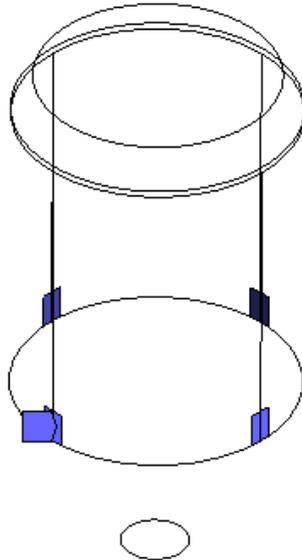


Ilustración 76 – Evaporador acero S275JR: Condiciones de contorno 4 patas

4.3.5. Cargas

Se ha tenido en cuenta el efecto de la gravedad actuando sobre el modelo completo:

 Standard Earth Gravity: 9806.6 mm/s^2
Components: 0; -9806.6; 0. mm/s^2

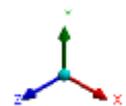


Ilustración 77 – Evaporador acero S275JR: Efecto de la gravedad

En cuanto a la presión interior del equipo, al igual que para el evaporador de PRFV, se han estudiado dos situaciones:

- HIPÓTESIS 1: presión de diseño
- HIPÓTESIS 2: presión de operación

HIPÓTESIS 1: Condiciones de Diseño

Esta hipótesis representa la situación en la que la presión interior del equipo es la presión de diseño, que corresponde con la presión de vacío, con un valor de $P=0,1$ MPa. Esta presión está actuando sobre todas las caras interiores de los elementos del equipo: fondo, cuerpo y techo.

Esta hipótesis correspondería con las siguientes ilustraciones:

 Pressure_Fondo: -0.1 MPa

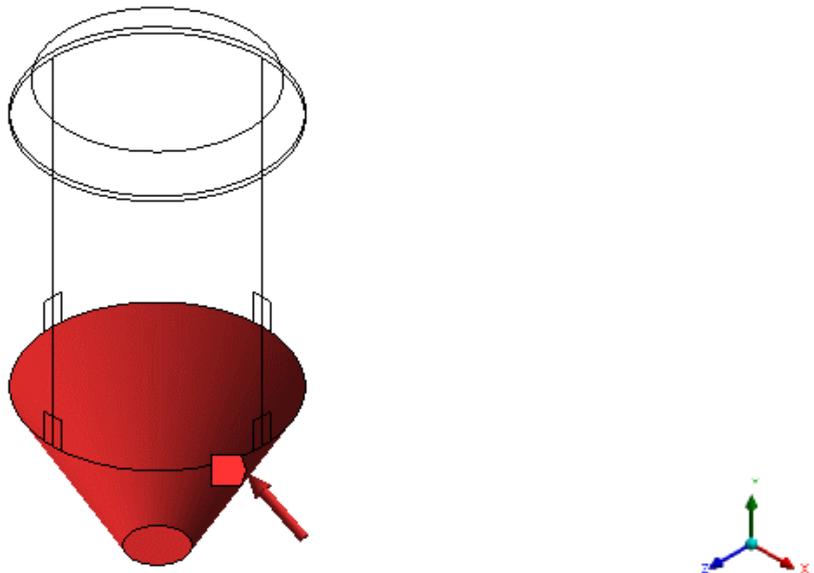


Ilustración 78 - Evaporador acero S275JR: Hipótesis 1 - Presión interior fondo

Pressure_Cuerpo: -0.1 MPa

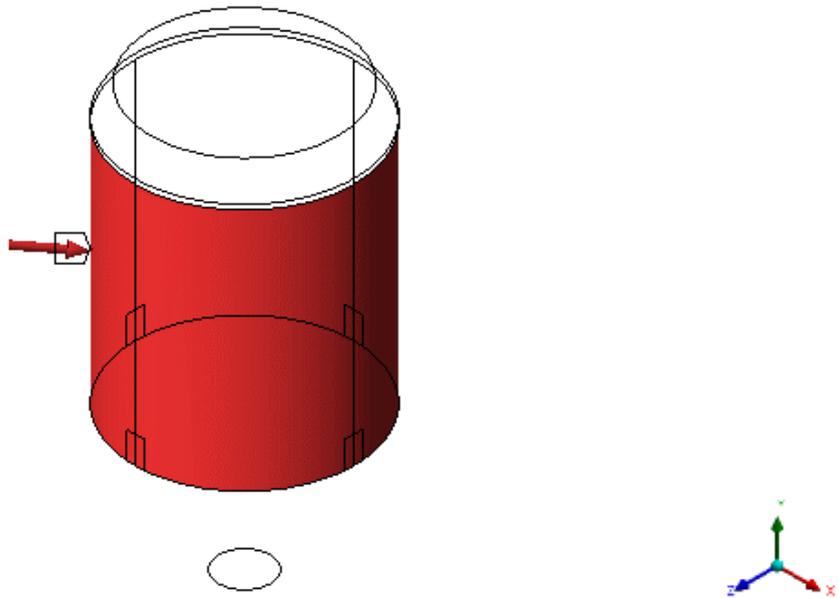


Ilustración 79 – Evaporador acero S275JR: Hipótesis 1 - Presión interior en el cuerpo

Pressure_Techo: -0.1 MPa

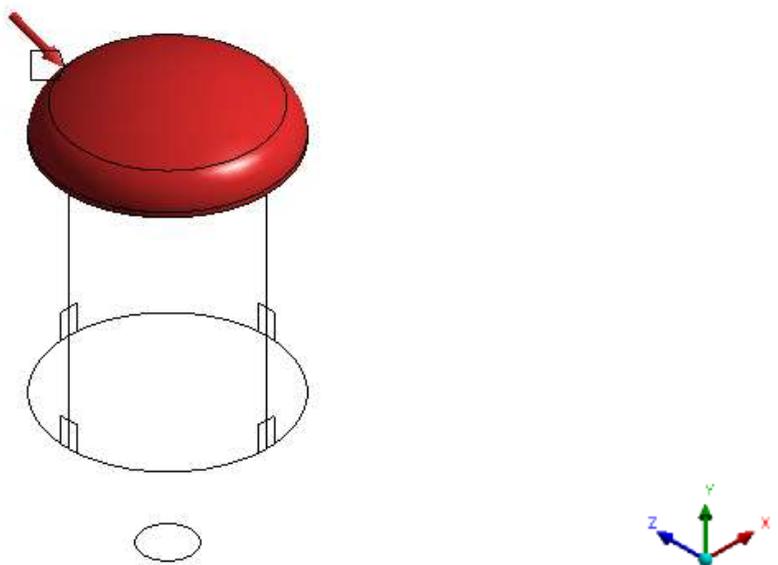


Ilustración 80 – Evaporador acero S275JR: Hipótesis 1 - Presión interior en el techo

HIPÓTESIS 2: Condiciones de Operación

Esta hipótesis corresponde con la situación en la que la presión interior es la presión de operación cuyo valor es de $P=0,05$ MPa de vacío. Esta presión está actuando sobre todas las caras interiores de los elementos del equipo: fondo, cuerpo y techo.

Esta hipótesis correspondería con las siguientes ilustraciones:

■ Pressure_Fondo: -5.e-002 MPa

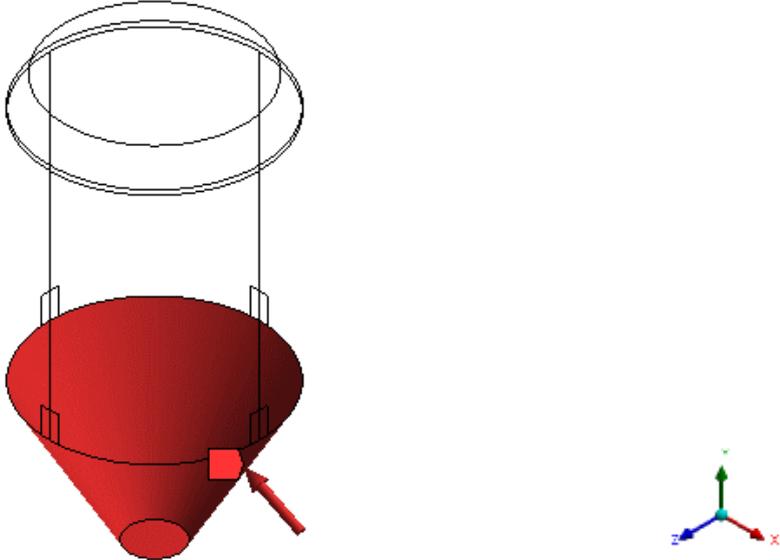


Ilustración 81 - Evaporador acero S275JR: Hipótesis 2 - Presión interior fondo

■ Pressure_Cuerpo: -5.e-002 MPa

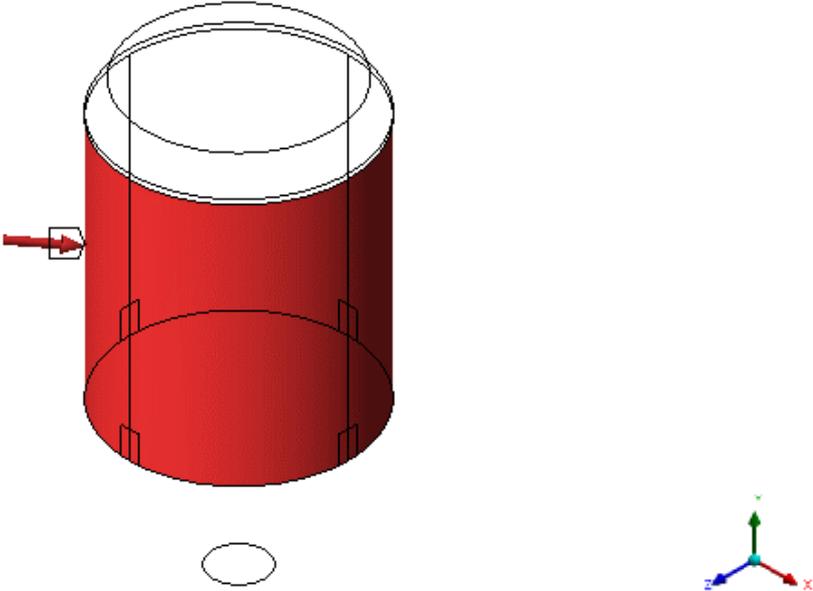


Ilustración 82 – Evaporador acero S275JR: Hipótesis 2 - Presión interior en el cuerpo

Pressure_Techo: -5.e-002 MPa

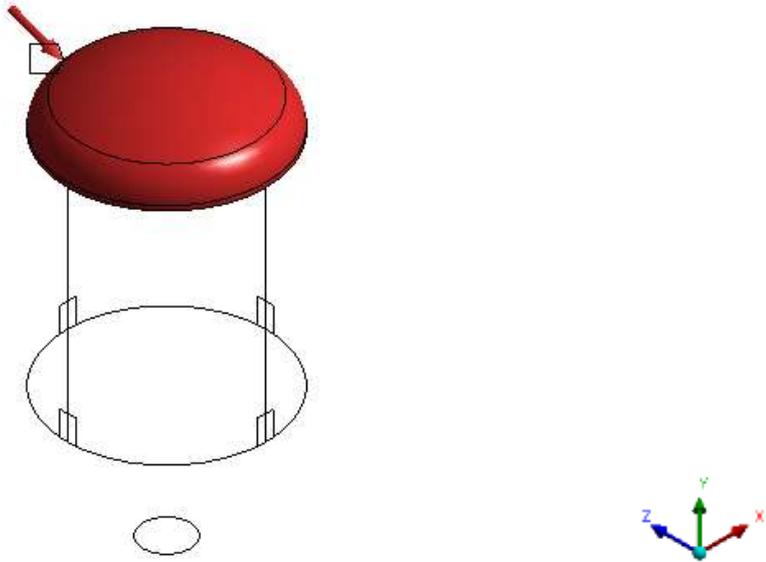


Ilustración 83 – Evaporador acero S275JR: Hipótesis 2 - Presión interior en el techo

Además, se ha considerado la presión hidrostática del contenido del evaporador teniendo en cuenta que la densidad es $\rho=1250 \text{ Kg/m}^3$ y que el equipo está lleno hasta la zona superior del cuerpo cilíndrico.

Hydrostatic Pressure
Unit: MPa

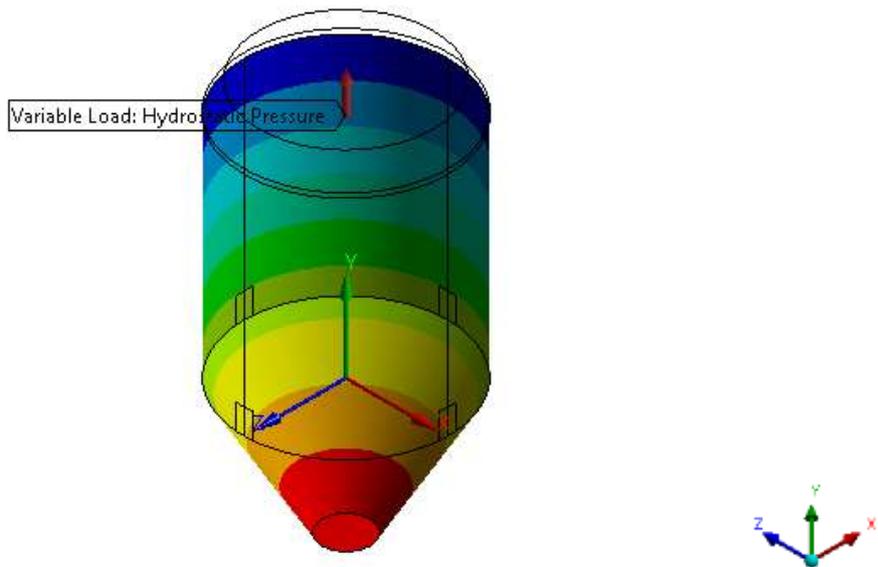
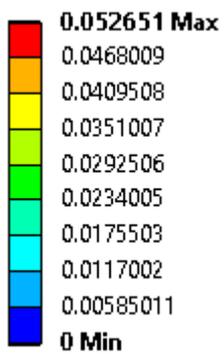


Ilustración 84 – Evaporador acero S275JR: Presión Hidrostática

4.3.6. Tipo de análisis

Para los cálculos llevados a cabo se ha realizado un análisis estructural estático lineal. Este análisis estático es lineal porque no se han considerado no linealidades dentro del modelo. Si bien es cierto que el acero es un material que tiene zonas no lineales en su curva de comportamiento cuando éste plastifica, al estar trabajando por debajo del límite elástico del material se puede asegurar que su comportamiento será lineal. Se va a suponer que el material está trabajando por debajo del valor de su límite elástico y cuando se obtengan los resultados habrá que comprobar si realmente es así.

4.3.7. Resultados del análisis FEM

En este apartado se muestran los resultados obtenidos para la simulación del evaporador en acero tanto en deformaciones como en tensiones para cada una de las dos hipótesis simuladas, en este caso ambos con el sistema de referencias global.

HIPÓTESIS 1: Presión de Diseño

Los resultados en desplazamientos obtenidos, en coordenadas globales, para esta hipótesis son los que se muestran a continuación:

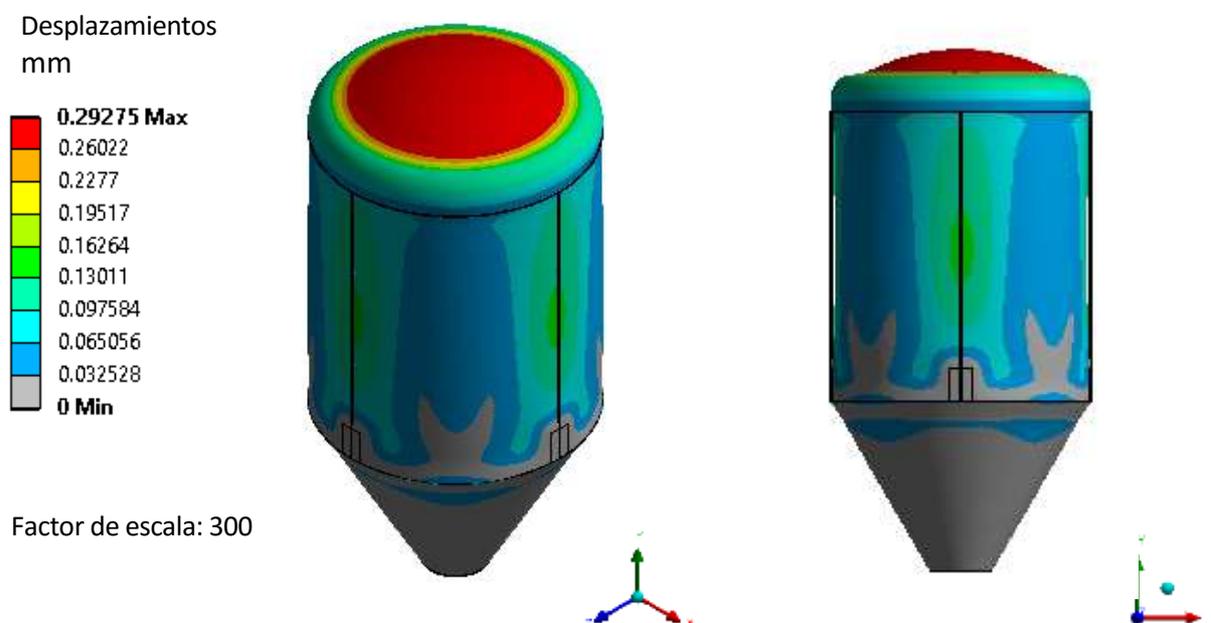


Ilustración 85 – Evaporador acero S275JR – Hipótesis 1: Resultados en desplazamientos

En cuanto a los resultados obtenidos en tensiones para esta hipótesis, se muestran también para coordenadas globales:

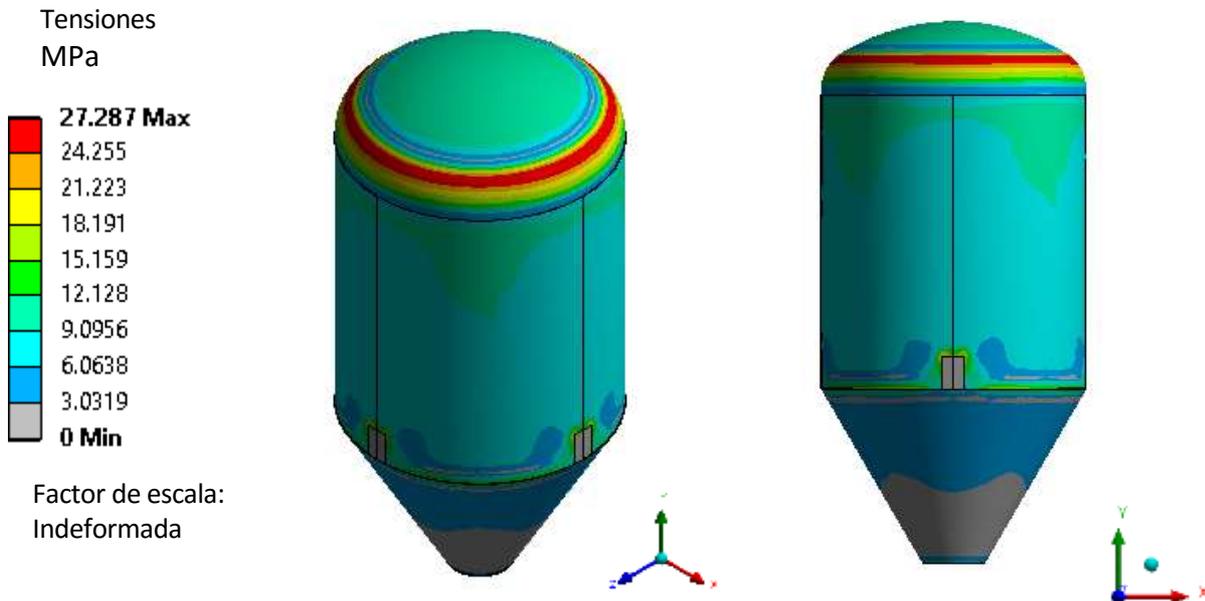


Ilustración 86 - Evaporador acero S275JR – Hipótesis 1: Resultados en tensiones

HIPÓTESIS 2: Presión de Operación

Los resultados en desplazamientos obtenidos, en coordenadas globales, para esta hipótesis son los que se muestran a continuación:

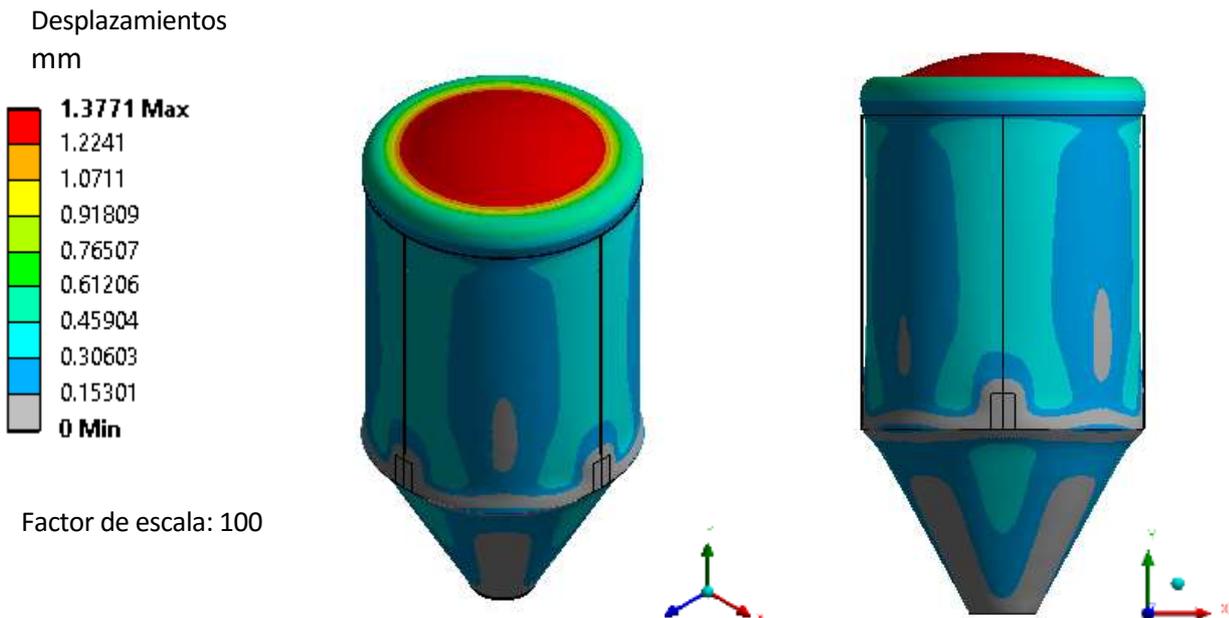


Ilustración 87 – Evaporador acero S275JR – Hipótesis 2: Resultados en desplazamientos

En cuanto a los resultados obtenidos en tensiones para esta hipótesis, se muestran también para coordenadas globales:

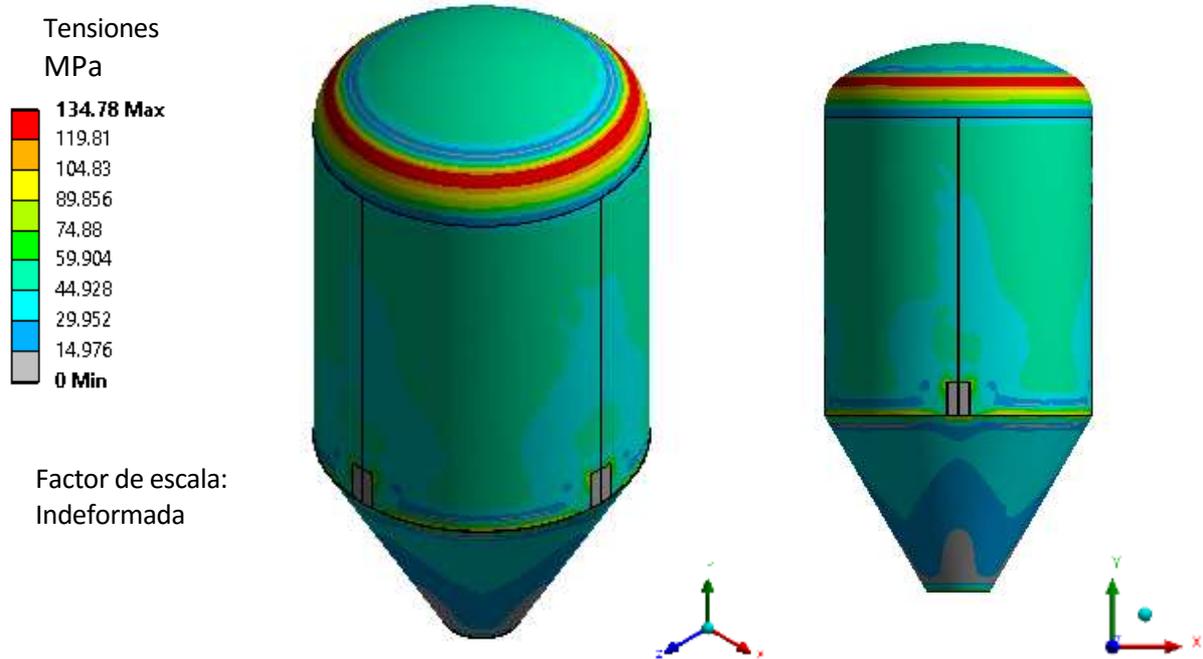


Ilustración 88 - Evaporador acero S275JR – Hipótesis 2: Resultados en tensiones

4.3.8. Conclusión análisis FEM evaporador en acero al carbono

A modo resumen, se recogen en las siguientes tablas los valores máximos de deformaciones para cada una de las dos simulaciones que se han llevado a cabo (Hipótesis 1 e Hipótesis 2).

EVAPORADOR S275JR	
DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS (mm)	
Hipótesis 1	0.2928
Hipótesis 2	1.3771

Tabla 43 - Evaporador acero S275JR: Resultados en desplazamientos

Comparando los resultados para ambas hipótesis, se observa que se obtienen desplazamientos mayores para la Hipótesis 2. Estos valores máximos se obtienen en el techo que se desplaza en la dirección del eje y, en el sentido negativo.

Además, se recogen en las siguientes tablas los valores máximos en tensiones obtenidos para cada una de las dos simulaciones que se han llevado a cabo (Hipótesis 1 e Hipótesis 2), comparándolos con los valores máximos admisibles del material.

EVAPORADOR S275JR - TENSIONES			
HIPÓTESIS	TENSIÓN DE CÁLCULO (MPa)	TENSIÓN MAX. ADMISIBLE AMINORADA ($\gamma=1,2$) (MPa)	COMPROBACIÓN $\sigma_{CAL}/\sigma_{ADM}$
Hipótesis 1	27.29	163	0.17
Hipótesis 2	134.78	163	0.83

Tabla 44 - Evaporador acero S275JR: Resultados en tensiones

Como se puede observar, las tensiones máximas obtenidas en ambas hipótesis se encuentran por debajo del valor de tensión máxima admisible aminorado (aplicando un coeficiente $\gamma=1,2$) por lo que se puede concluir que el modelo es válido y que, además, el material está trabajando por debajo del valor del límite elástico por lo que se puede asegurar que se encuentra dentro de la zona de comportamiento elástico lineal.

Comparando los resultados obtenidos para ambas hipótesis se puede observar que las tensiones obtenidas para la Hipótesis 2 son más altas que las obtenidas para la Hipótesis 1. En ambos casos esos valores se obtienen en el techo del evaporador.

4.4. Análisis FEM del evaporador en acero inoxidable

4.4.1. Geometría

En las siguientes imágenes se muestra la geometría empleada en la simulación:

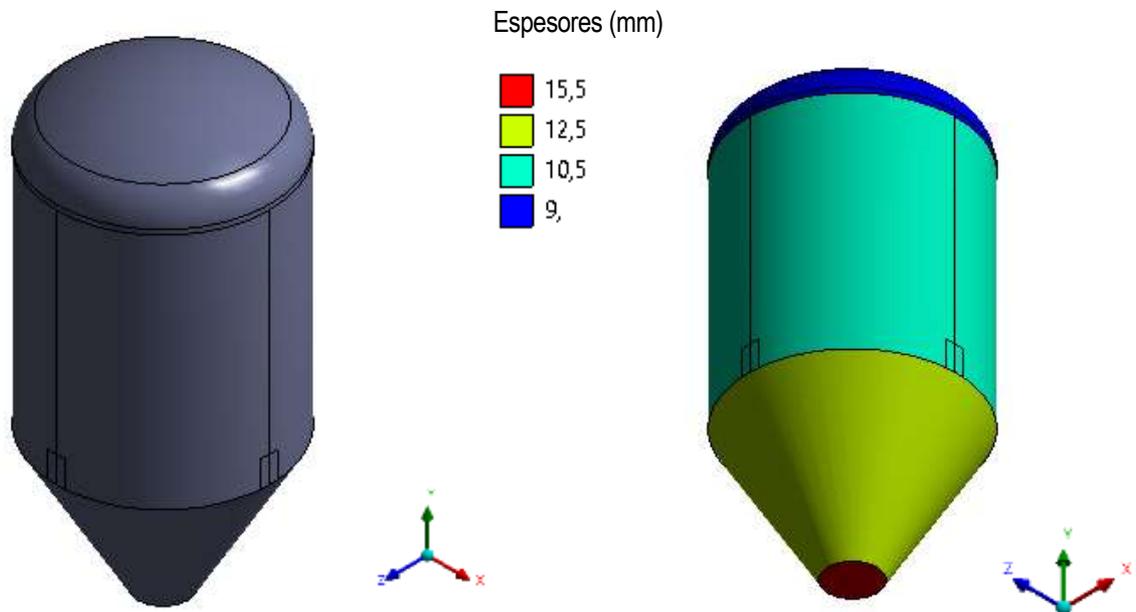


Ilustración 89 – Evaporador acero inoxidable: Geometría

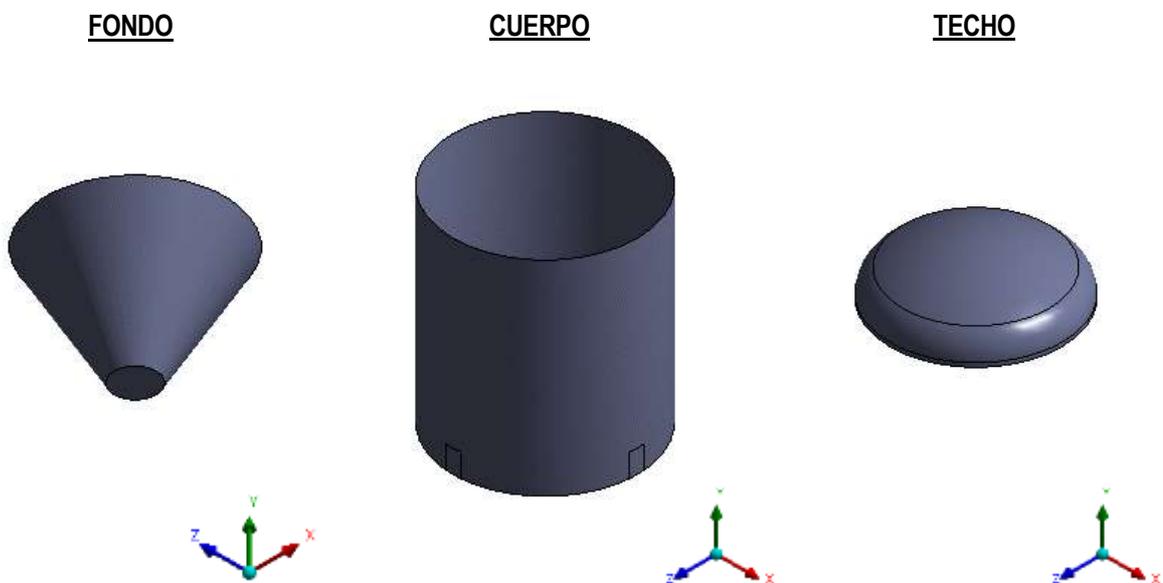


Ilustración 90 - Evaporador acero inoxidable: Geometría elementos

4.4.2. Malla

Nodes	14427
Elements	14462

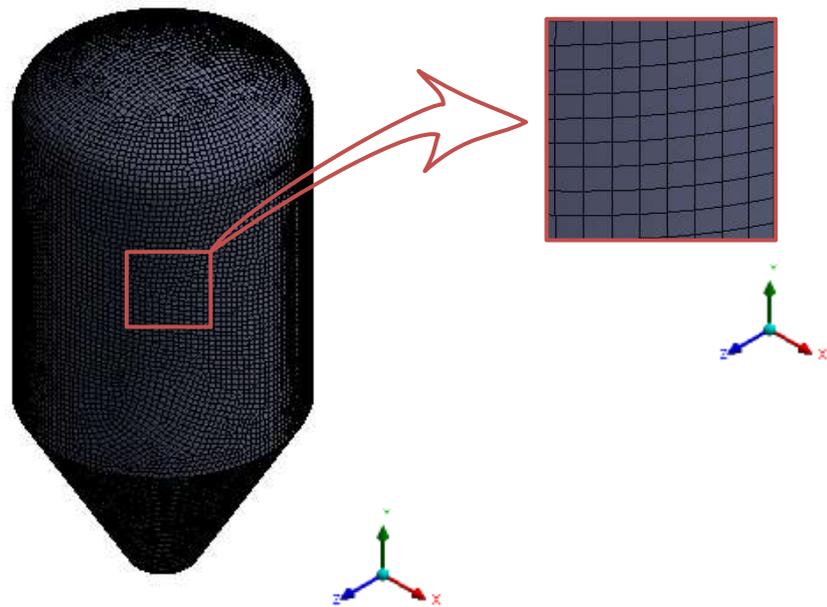


Ilustración 91 - Evaporador acero inoxidable: Malla

4.4.3. Materiales

Se ha considerado que el evaporador está fabricado en acero inoxidable. A continuación, se indican las propiedades de dicho material:

ACERO INOXIDABLE A240/316L	
PROPIEDAD	VALOR
DENSIDAD (Kg/m ³)	7750
COEFICIENTE DE POISSON (adm)	0.31
MÓDULO DE ELASTICIDAD (GPa)	200
TENSIÓN MÁXIMA ADMISIBLE (MPa)	159

Tabla 45 – Propiedades acero inoxidable

Decir que se ha tomado como tensión máxima admisible el valor del límite elástico a T=65°C para asegurar que el material está trabajando dentro de la zona de comportamiento elástico lineal.

4.4.4. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno que se han impuesto en el modelo de cálculo han sido fijar las zonas de unión con las 4 patas del evaporador, que no se han modelado por simplicidad y teniendo en cuenta que esta situación que se va a simular es más desfavorable que la real por lo que se encuentra del lado de la seguridad:

■ Fixed Support

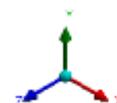
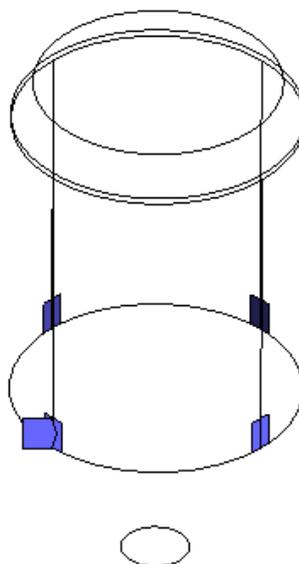


Ilustración 92 – Evaporador acero inoxidable: Condiciones de contorno 4 patas

4.4.5. Cargas

Se ha tenido en cuenta el efecto de la gravedad actuando sobre el modelo completo:

■ Standard Earth Gravity: 9806.6 mm/s^2
Components: 0,-9806.6;0. mm/s^2

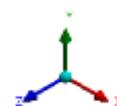


Ilustración 93 – Evaporador acero inoxidable: Efecto de la gravedad

En cuanto a la presión interior del equipo, al igual que para el evaporador de PRFV, se han estudiado dos situaciones:

- HIPÓTESIS 1: presión de diseño
- HIPÓTESIS 2: presión de operación

HIPÓTESIS 1: Condiciones de Diseño

Esta hipótesis representa la situación en la que la presión interior del equipo es la presión de diseño, que corresponde con la presión de vacío, con un valor de $P=0,1$ MPa. Esta presión está actuando sobre todas las caras interiores de los elementos del equipo: fondo, cuerpo y techo.

Esta hipótesis correspondería con las siguientes ilustraciones:

■ Pressure_Fondo: -0.1 MPa

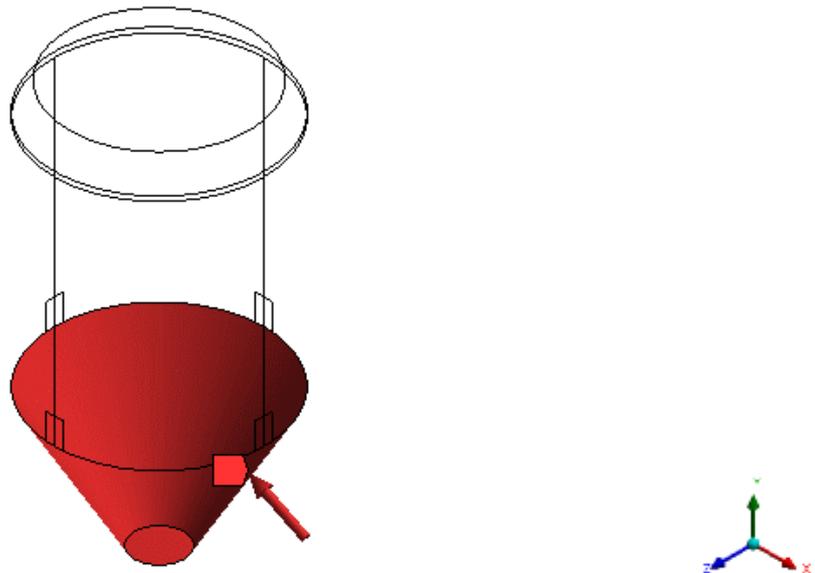


Ilustración 94 - Evaporador acero inoxidable: Hipótesis 1 - Presión interior fondo

■ Pressure_Cuerpo: -0.1 MPa

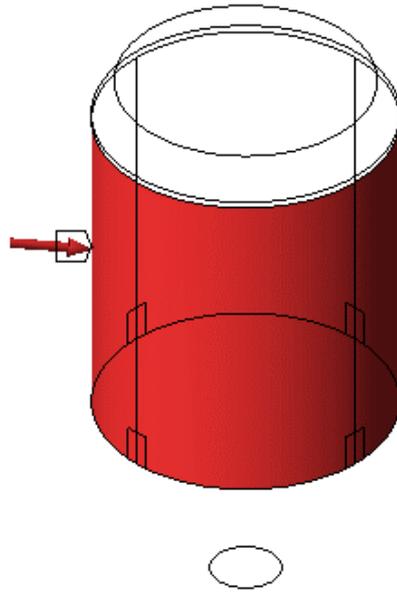


Ilustración 95 – Evaporador acero inoxidable: Hipótesis 1 - Presión interior en el cuerpo

■ Pressure_Techo: -0.1 MPa

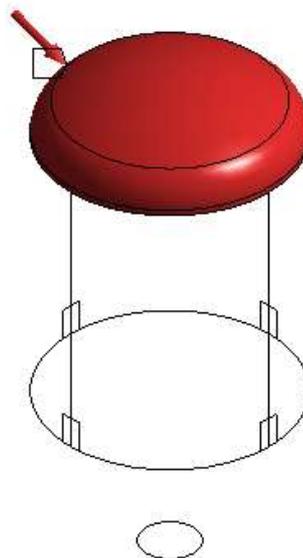


Ilustración 96 – Evaporador acero inoxidable: Hipótesis 1 - Presión interior en el techo

HIPÓTESIS 2: Condiciones de Operación

Esta hipótesis corresponde con la situación en la que la presión interior es la presión de operación cuyo valor es de $P=0,05$ MPa de vacío. Esta presión está actuando sobre todas las caras interiores de los elementos del equipo: fondo, cuerpo y techo.

Esta hipótesis correspondería con las siguientes ilustraciones:

■ Pressure_Fondo: -5.e-002 MPa

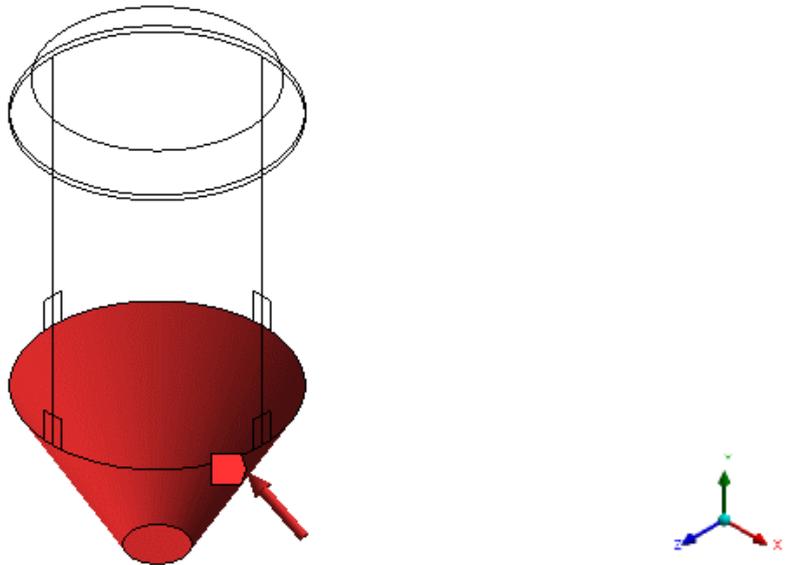


Ilustración 97 - Evaporador acero inoxidable: Hipótesis 2 - Presión interior fondo

■ Pressure_Cuerpo: -5.e-002 MPa

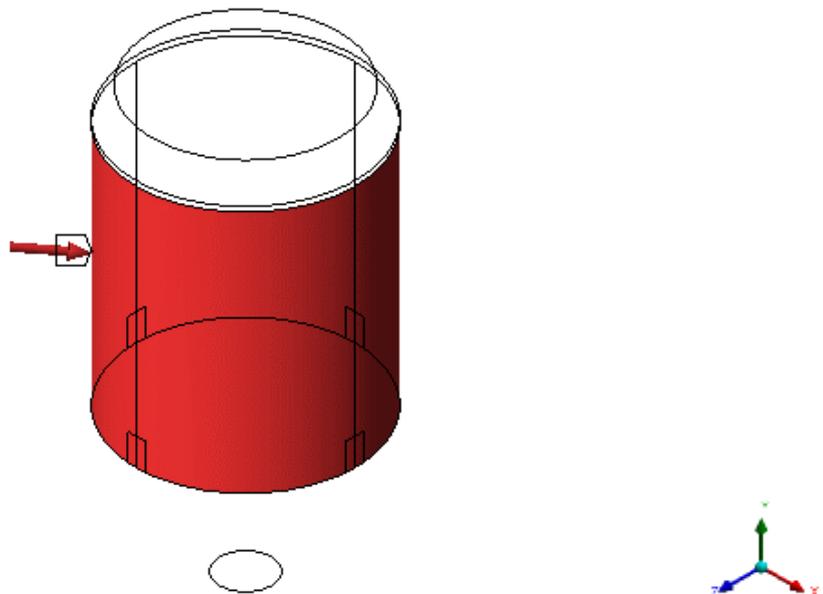


Ilustración 98 – Evaporador acero inoxidable: Hipótesis 2 - Presión interior en el cuerpo

Pressure_Techo: -5.e-002 MPa

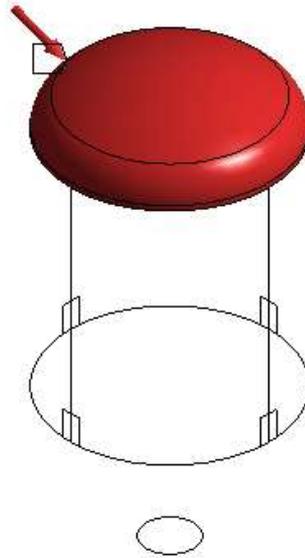


Ilustración 99 – Evaporador acero inoxidable: Hipótesis 2 - Presión interior en el techo

Además, se ha considerado la presión hidrostática del contenido del evaporador teniendo en cuenta que la densidad es $\rho=1250 \text{ Kg/m}^3$ y que el equipo está lleno hasta la zona superior del cuerpo cilíndrico.

Hydrostatic Pressure
Unit: MPa

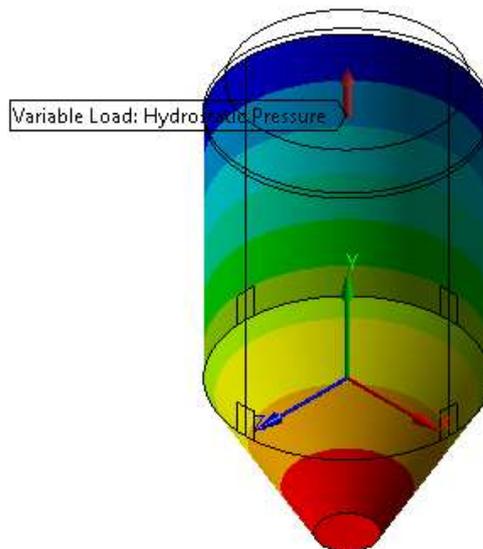
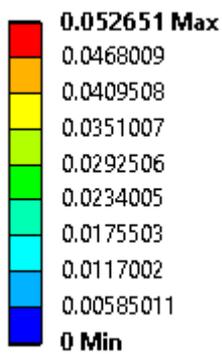


Ilustración 100 – Evaporador acero inoxidable: Presión Hidrostática

4.4.6. Tipo de análisis

Para los cálculos llevados a cabo se ha realizado un análisis estructural estático lineal. Este análisis estático es lineal porque no se han considerado no linealidades dentro del modelo. Si bien es cierto que el acero es un material que tiene zonas no lineales en su curva de comportamiento cuando éste plastifica, al estar trabajando por debajo del límite elástico del material se puede asegurar que su comportamiento será lineal. Se va a suponer que el material está trabajando por debajo del valor de su límite elástico y cuando se obtengan los resultados habrá que comprobar si realmente es así.

4.4.7. Resultados del análisis FEM

En este apartado se muestran los resultados obtenidos para la simulación del evaporador en acero tanto en deformaciones como en tensiones para cada una de las dos hipótesis simuladas, en este caso ambos con el sistema de referencias global.

HIPÓTESIS 1: Presión de Diseño

Los resultados en desplazamientos obtenidos, en coordenadas globales, para esta hipótesis son los que se muestran a continuación:

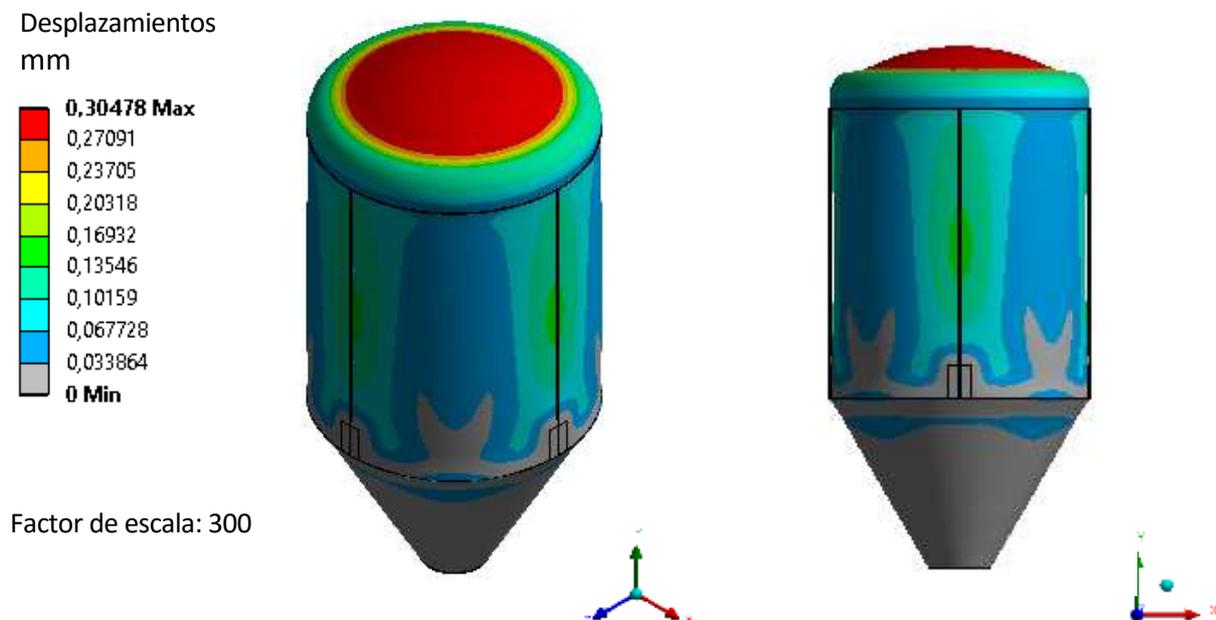


Ilustración 101 – Evaporador acero inoxidable – Hipótesis 1: Resultados en desplazamientos

En cuanto a los resultados obtenidos en tensiones para esta hipótesis, se muestran también para coordenadas globales:

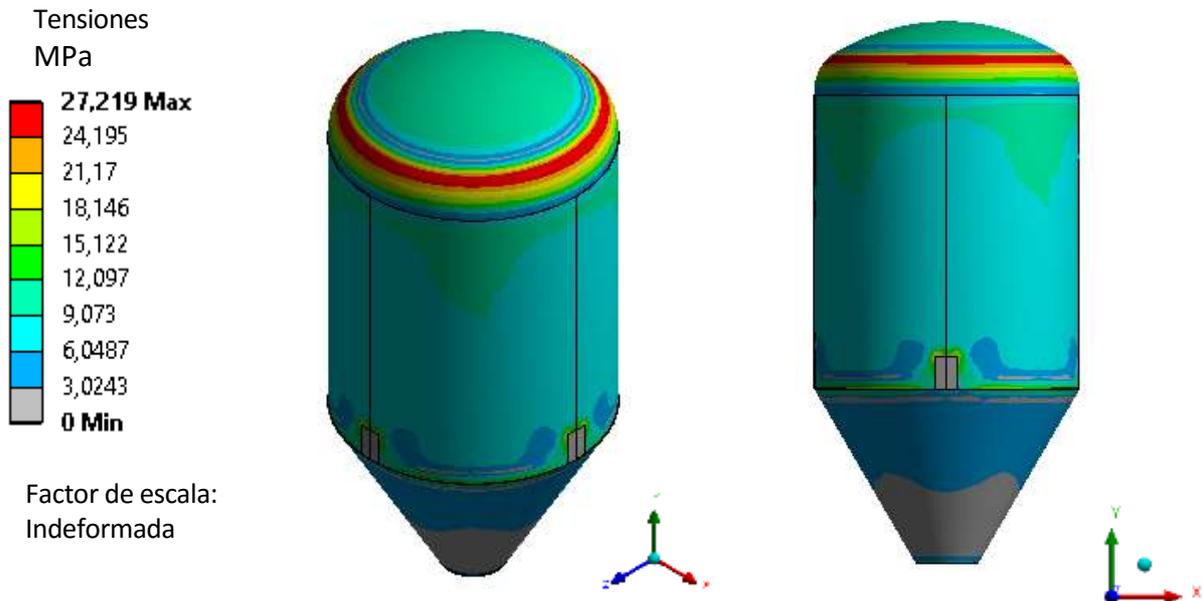


Ilustración 102 - Evaporador acero inoxidable – Hipótesis 1: Resultados en tensiones

HIPÓTESIS 2: Presión de Operación

Los resultados en desplazamientos obtenidos, en coordenadas globales, para esta hipótesis son los que se muestran a continuación:

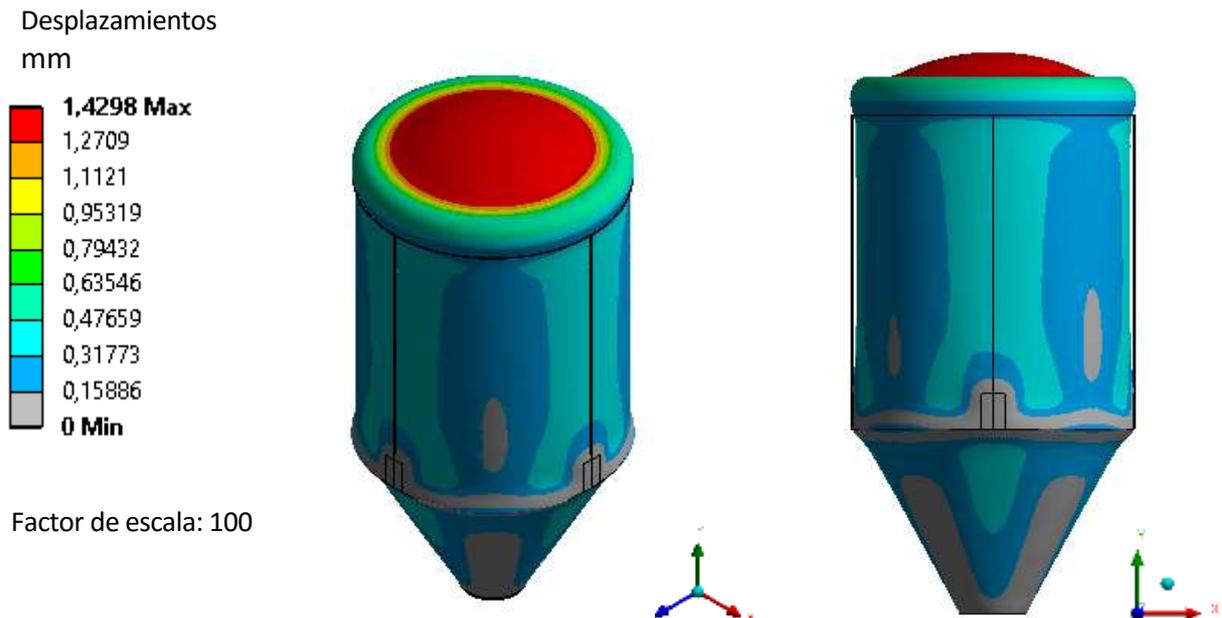


Ilustración 103 – Evaporador acero inoxidable – Hipótesis 2: Resultados en desplazamientos

En cuanto a los resultados obtenidos en tensiones para esta hipótesis, se muestran también para coordenadas globales:

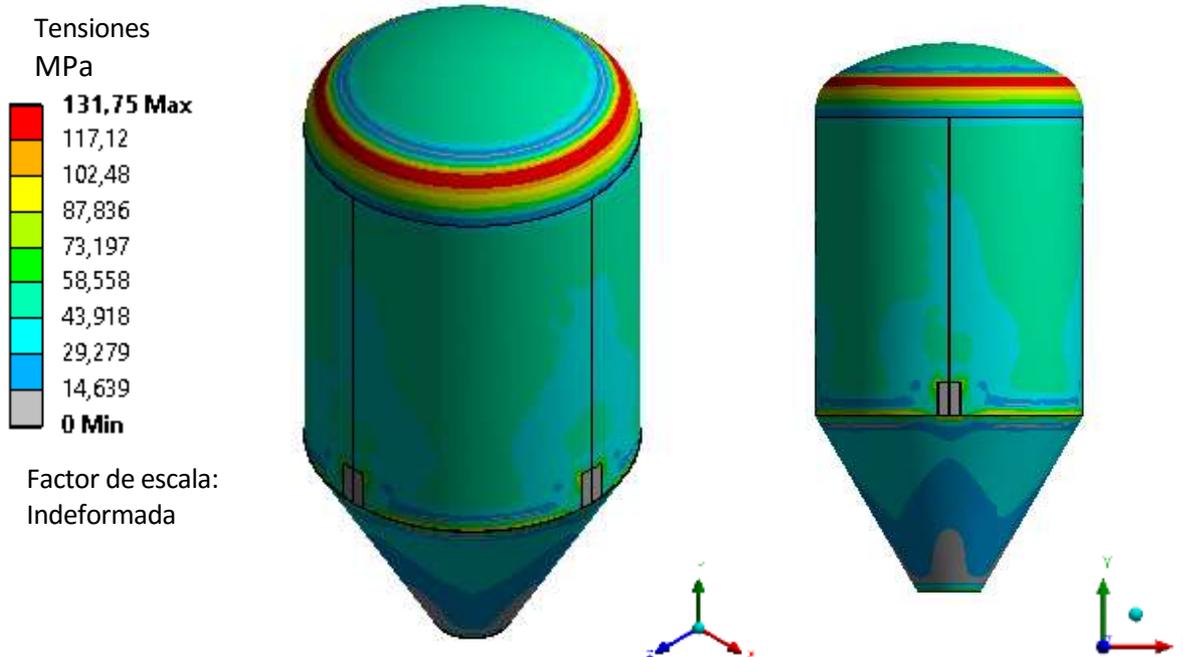


Ilustración 104 - Evaporador acero inoxidable – Hipótesis 2: Resultados en tensiones

4.4.8. Conclusión análisis FEM evaporador en acero inoxidable

A modo resumen, se recogen en las siguientes tablas los valores máximos de deformaciones para cada una de las dos simulaciones que se han llevado a cabo (Hipótesis 1 e Hipótesis 2).

EVAPORADOR A. INOXIDABLE	
DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS (mm)	
Hipótesis 1	0.30478
Hipótesis 2	1.4298

Tabla 46 - Evaporador acero inoxidable: Resultados en desplazamientos

Comparando los resultados para ambas hipótesis, se observa que se obtienen desplazamientos mayores para la Hipótesis 2. Estos valores máximos se obtienen en el techo que se desplaza en la dirección del eje y, en el sentido negativo.

Además, se recogen en las siguientes tablas los valores máximos en tensiones obtenidos para cada una de las dos simulaciones que se han llevado a cabo (Hipótesis 1 e Hipótesis 2), comparándolos con los valores máximos admisibles del material.

EVAPORADOR A.INOXIDABLE - TENSIONES			
HIPÓTESIS	TENSIÓN DE CÁLCULO (MPa)	TENSIÓN MAX. ADMISIBLE AMINORADA ($\gamma=1,2$) (MPa)	COMPROBACIÓN $\sigma_{CAL}/\sigma_{ADM}$
Hipótesis 1	27,22	133	0,21
Hipótesis 2	131,75	133	0,99

Tabla 47 - Evaporador acero inoxidable: Resultados en tensiones

Como se puede observar, las tensiones máximas obtenidas en ambas hipótesis se encuentran por debajo del valor de tensión máxima admisible aminorado (aplicando un coeficiente $\gamma=1,2$) por lo que se puede concluir que el modelo es válido y que, además, el material está trabajando por debajo del valor del límite elástico por lo que se puede asegurar que se encuentra dentro de la zona de comportamiento elástico lineal.

Comparando los resultados obtenidos para ambas hipótesis se puede observar que las tensiones obtenidas para la Hipótesis 2 son más altas que las obtenidas para la Hipótesis 1. En ambos casos esos valores se obtienen en el techo del evaporador.

4.5. Análisis FEM del evaporador en titanio

4.5.1. Geometría

En las siguientes imágenes se muestra la geometría empleada en la simulación:

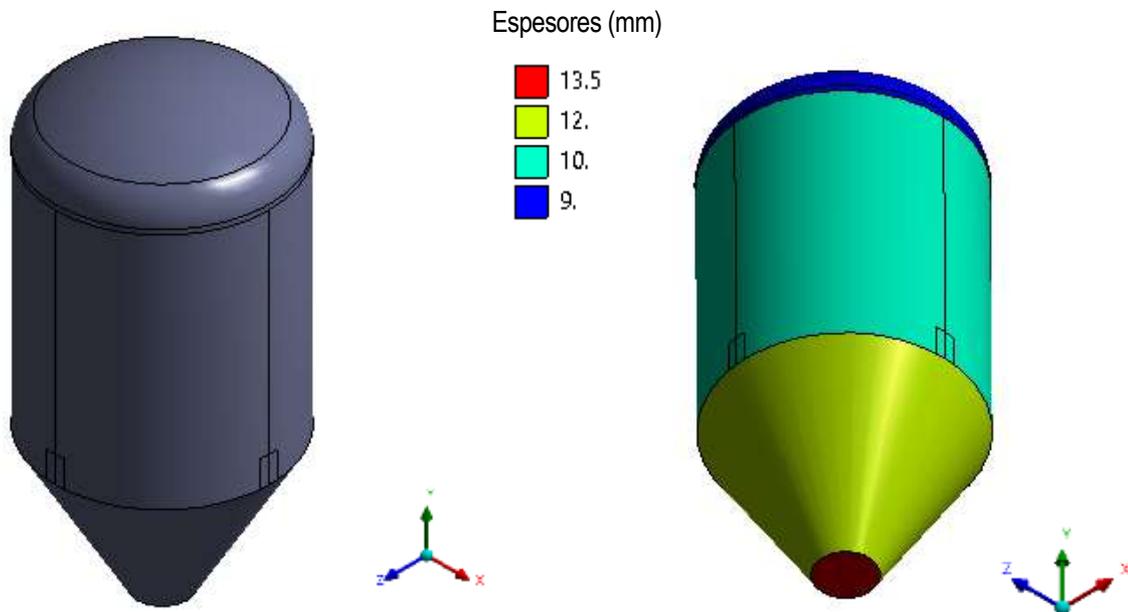


Ilustración 105 – Evaporador titanio: Geometría

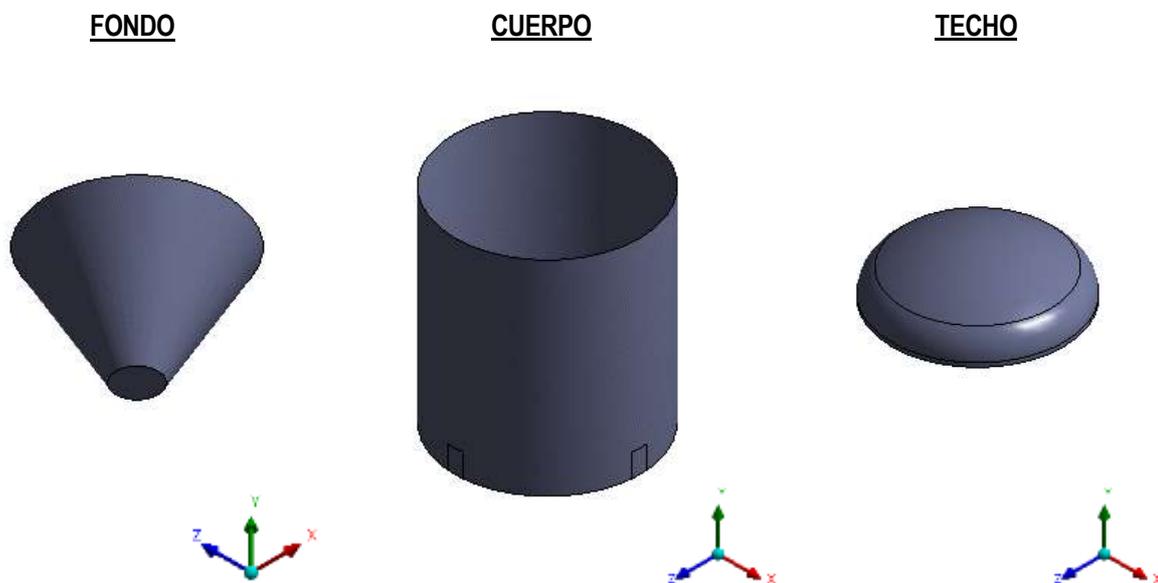


Ilustración 106 - Evaporador titanio: Geometría elementos

4.5.2. Malla

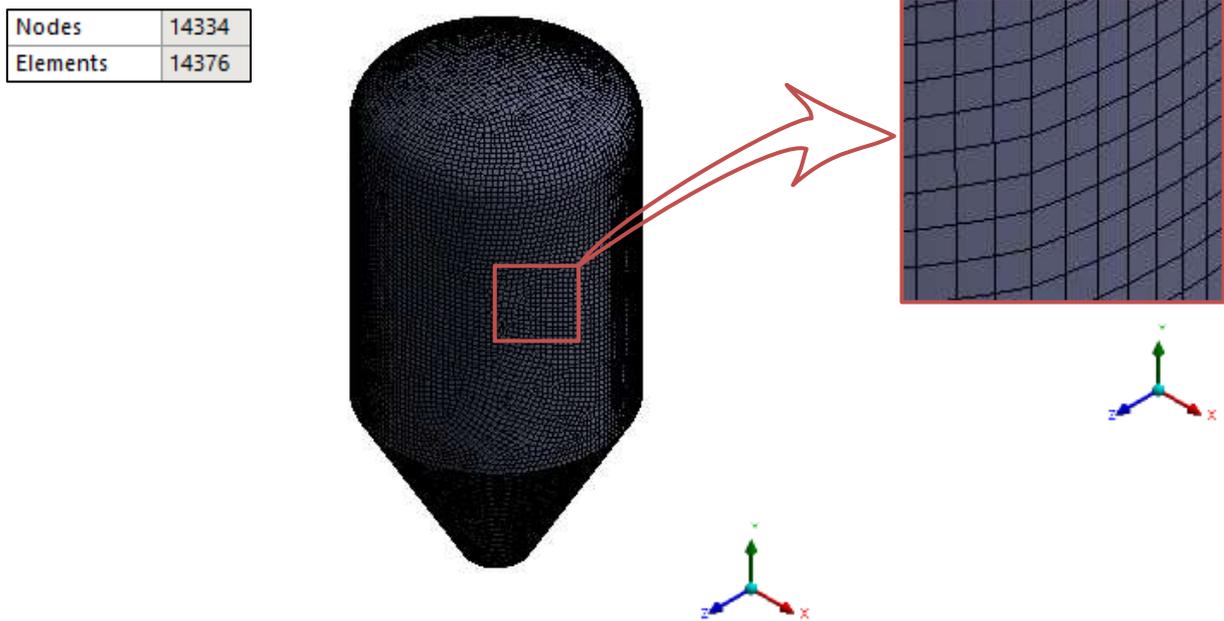


Ilustración 107 - Evaporador titanio: Malla

4.5.3. Materiales

Se ha considerado que el evaporador está fabricado en titanio. A continuación, se indican las propiedades de dicho material a temperatura ambiente:

TITANIO	
PROPIEDAD	VALOR
DENSIDAD (Kg/m ³)	4620
COEFICIENTE DE POISSON (adm)	0.36
MÓDULO DE ELASTICIDAD (GPa)	96
TENSIÓN MÁXIMA ADMISIBLE (MPa)	604

Tabla 48 – Propiedades titanio

Decir que se ha tomado como tensión máxima admisible el valor del límite elástico a T=65°C para asegurar que el material está trabajando dentro de la zona de comportamiento elástico lineal.

4.5.4. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno que se han impuesto en el modelo de cálculo han sido fijar las zonas de unión con las 4 patas del evaporador, que no se han modelado por simplicidad y teniendo en cuenta que esta situación que se va a simular es más desfavorable que la real por lo que se encuentra del lado de la seguridad:

 Fixed Support

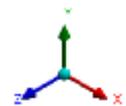
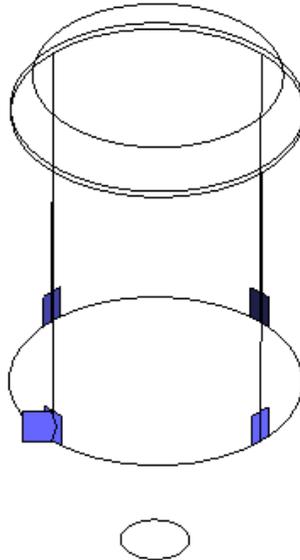


Ilustración 108 – Evaporador titanio: Condiciones de contorno 4 patas

4.5.5. Cargas

Se ha tenido en cuenta el efecto de la gravedad actuando sobre el modelo completo:

 Standard Earth Gravity: 9806.6 mm/s^2
Components: 0; -9806.6; 0. mm/s^2

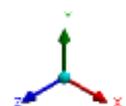


Ilustración 109 – Evaporador titanio: Efecto de la gravedad

En cuanto a la presión interior del equipo, al igual que para el resto de los evaporadores, se han estudiado dos situaciones:

- HIPÓTESIS 1: presión de diseño
- HIPÓTESIS 2: presión de operación

HIPÓTESIS 1: Condiciones de Diseño

Esta hipótesis representa la situación en la que la presión interior del equipo es la presión de diseño, que corresponde con la presión de vacío, con un valor de $P=0,1$ MPa. Esta presión está actuando sobre todas las caras interiores de los elementos del equipo: fondo, cuerpo y techo.

Esta hipótesis correspondería con las siguientes ilustraciones:

■ Pressure_Fondo: -0.1 MPa

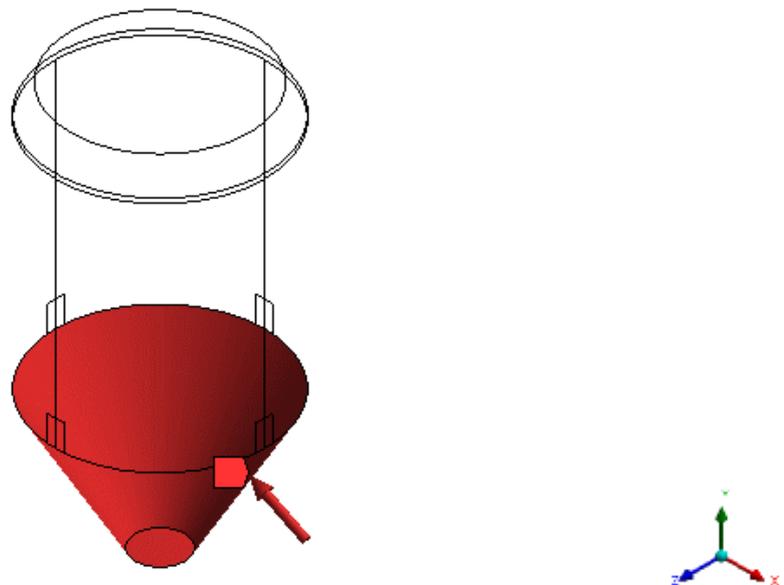


Ilustración 110 - Evaporador titanio: Hipótesis 1 - Presión interior fondo

Pressure_Cuerpo: -0.1 MPa

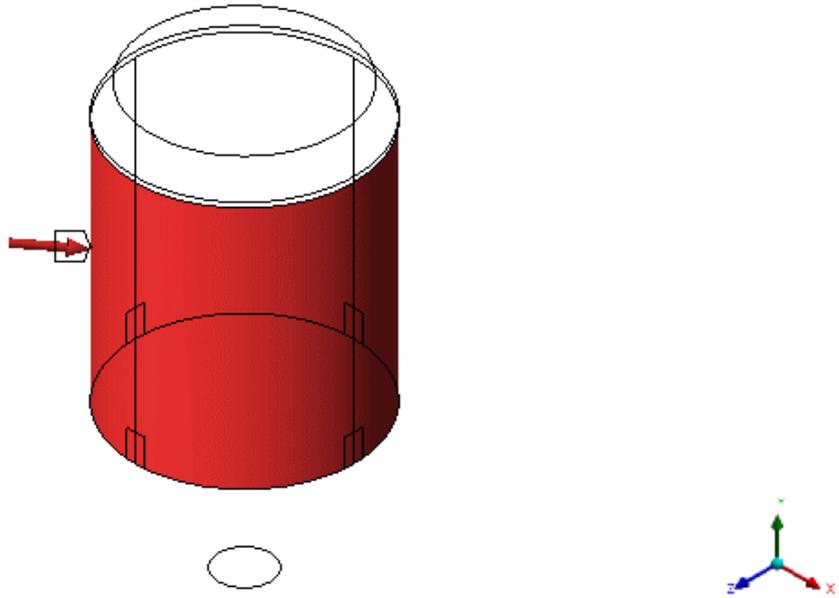


Ilustración 111 – Evaporador titanio: Hipótesis 1 - Presión interior en el cuerpo

Pressure_Techo: -0.1 MPa

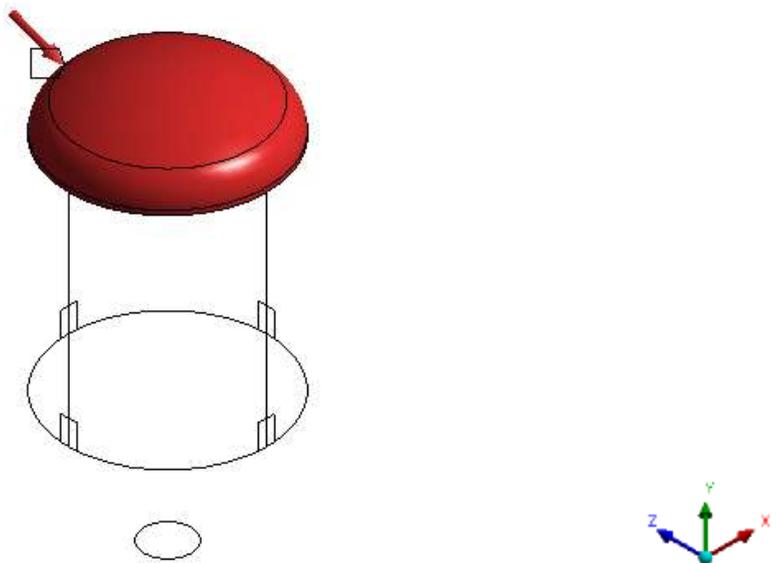


Ilustración 112 – Evaporador titanio: Hipótesis 1 - Presión interior en el techo

HIPÓTESIS 2: Condiciones de Operación

Esta hipótesis corresponde con la situación en la que la presión interior es la presión de operación cuyo valor es de $P=0,05$ MPa de vacío. Esta presión está actuando sobre todas las caras interiores de los elementos del equipo: fondo, cuerpo y techo.

Esta hipótesis correspondería con las siguientes ilustraciones:

 Pressure_Fondo: -5.e-002 MPa

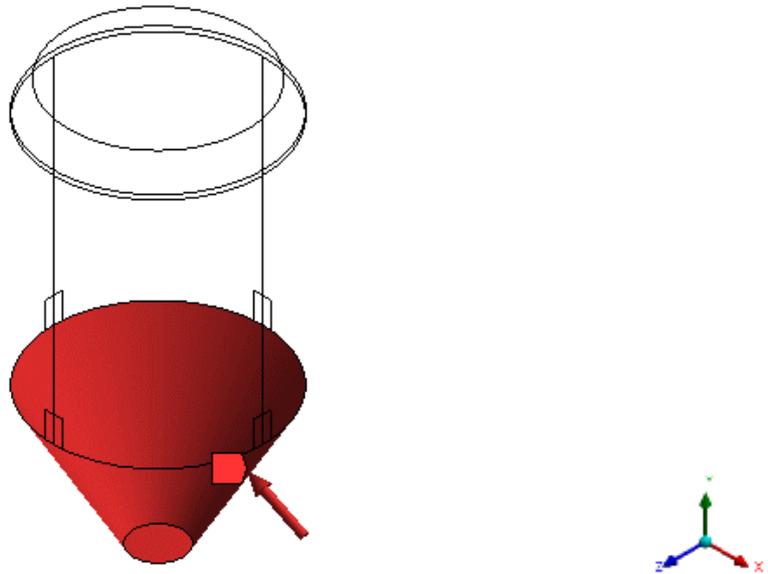


Ilustración 113 - Evaporador titanio: Hipótesis 2 - Presión interior fondo

■ Pressure_Cuerpo: -5.e-002 MPa

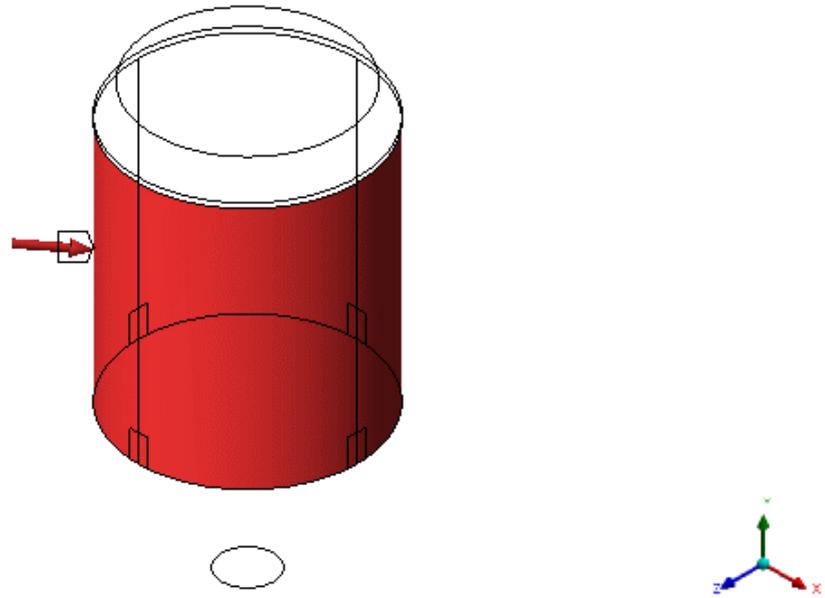


Ilustración 114 – Evaporador titanio: Hipótesis 2 - Presión interior en el cuerpo

■ Pressure_Techo: -5.e-002 MPa

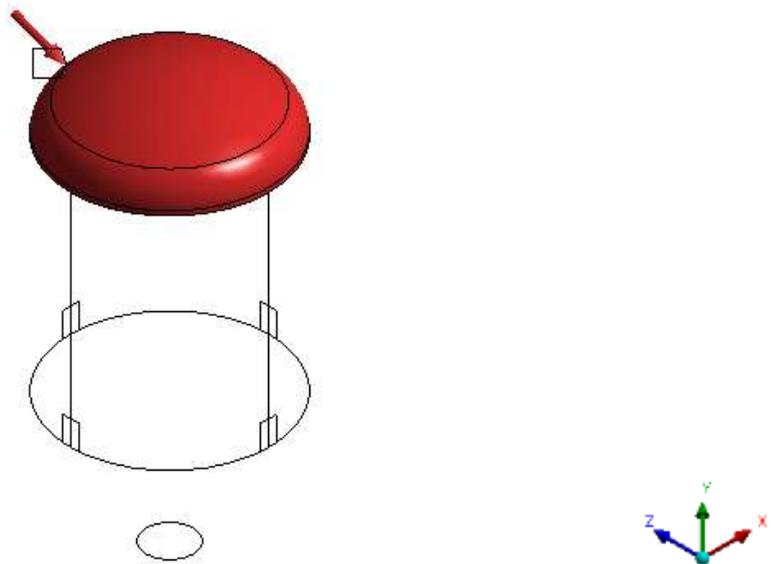


Ilustración 115 – Evaporador titanio: Hipótesis 2 - Presión interior en el techo

Además, se ha considerado la presión hidrostática del contenido del evaporador teniendo en cuenta que la densidad es $\rho=1250 \text{ Kg/m}^3$ y que el equipo está lleno hasta la zona superior del cuerpo cilíndrico.

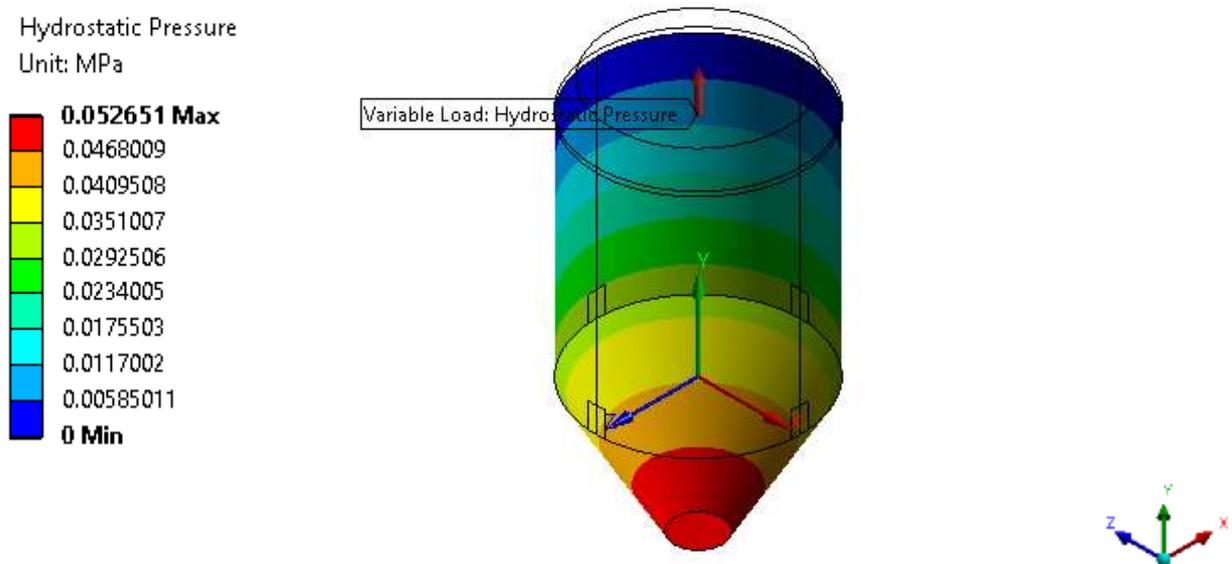


Ilustración 116 – Evaporador titanio: Presión Hidrostática

4.5.6. Tipo de análisis

Para los cálculos llevados a cabo se ha realizado un análisis estructural estático lineal. Este análisis estático es lineal porque no se han considerado no linealidades dentro del modelo. Si bien es cierto que el titanio es un material que tiene zonas no lineales en su curva de comportamiento cuando éste plastifica, al estar trabajando por debajo del límite elástico del material se puede asegurar que su comportamiento será lineal.

4.5.7. Resultados del análisis FEM

En este apartado se muestran los resultados obtenidos para la simulación del evaporador en titanio tanto en deformaciones como en tensiones para cada una de las dos hipótesis simuladas, en este caso ambos con el sistema de referencias global.

HIPÓTESIS 1: Presión de Diseño

Los resultados en desplazamientos obtenidos, en coordenadas globales, para esta hipótesis son los que se muestran a continuación:

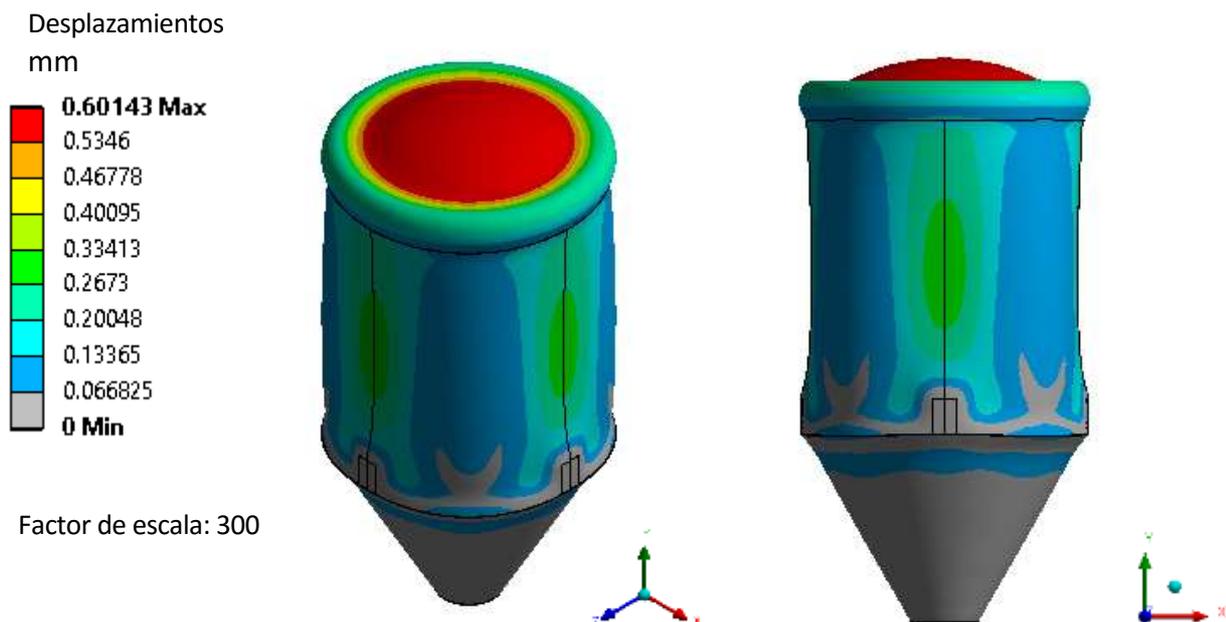


Ilustración 117 – Evaporador titanio – Hipótesis 1: Resultados en desplazamientos

En cuanto a los resultados obtenidos en tensiones para esta hipótesis, se muestran también para coordenadas globales:

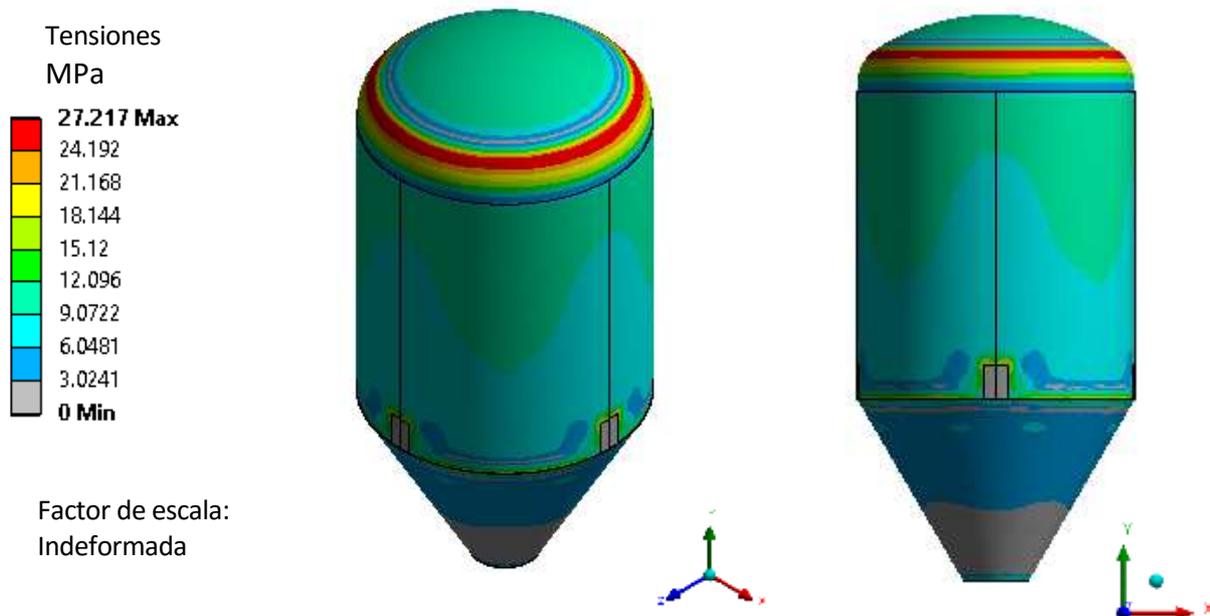


Ilustración 118 - Evaporador titanio – Hipótesis 1: Resultados en tensiones

HIPÓTESIS 2: Presión de Operación

Los resultados en desplazamientos obtenidos, en coordenadas globales, para esta hipótesis son los que se muestran a continuación:

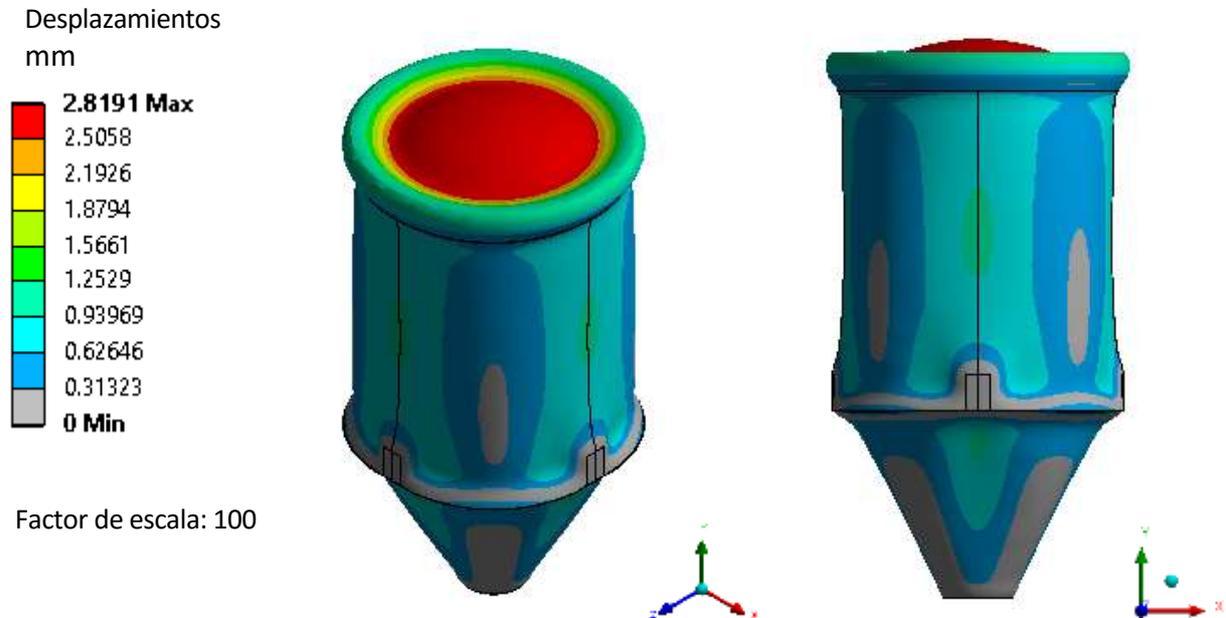


Ilustración 119 – Evaporador titanio – Hipótesis 2: Resultados en desplazamientos

En cuanto a los resultados obtenidos en tensiones para esta hipótesis, se muestran también para coordenadas globales:

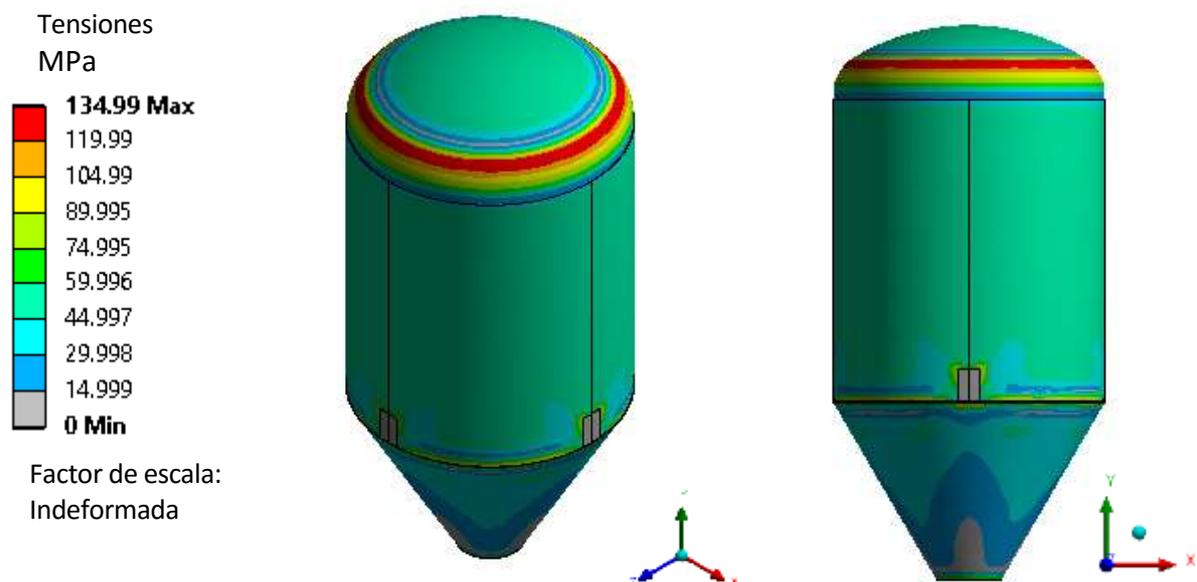


Ilustración 120 - Evaporador titanio – Hipótesis 2: Resultados en tensiones

4.5.8. Conclusión análisis FEM evaporador en titanio

A modo resumen, se recogen en las siguientes tablas los valores máximos de deformaciones para cada una de las dos simulaciones que se han llevado a cabo (Hipótesis 1 e Hipótesis 2).

EVAPORADOR TITANIO	
DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS (mm)	
Hipótesis 1	0.60143
Hipótesis 2	2.8191

Tabla 49 - Evaporador titanio: Resultados en desplazamientos

Comparando los resultados para ambas hipótesis, se observa que se obtienen desplazamientos mayores para la Hipótesis 2. Estos valores máximos se obtienen en el techo que se desplaza en la dirección del eje y, en el sentido negativo.

Además, se recogen en las siguientes tablas los valores máximos en obtenidos para cada una de las dos simulaciones que se han llevado a cabo (Hipótesis 1 e Hipótesis 2), comparándolos con los valores máximos admisibles del material.

EVAPORADOR TITANIO - TENSIONES			
HIPÓTESIS	TENSIÓN DE CÁLCULO (MPa)	TENSIÓN MAX. ADMISIBLE AMINORADA ($\gamma=1,2$) (MPa)	COMPROBACIÓN $\sigma_{CAL}/\sigma_{ADM}$
Hipótesis 1	27.217	503	0.05
Hipótesis 2	134.99	503	0.27

Tabla 50 - Evaporador titanio: Resultados en tensiones

Como se puede observar, las tensiones máximas obtenidas en ambas hipótesis se encuentran por debajo del valor de tensión máxima admisible aminorado (aplicando un coeficiente $\gamma=1,2$) por lo que se puede concluir que el modelo es válido y que, además, el material está trabajando por debajo del valor del límite elástico por lo que se puede asegurar que se encuentra dentro de la zona de comportamiento elástico lineal.

Comparando los resultados obtenidos para ambas hipótesis se puede observar que las tensiones obtenidas para la Hipótesis 2 son más altas que las obtenidas para la Hipótesis 1. En ambos casos esos valores se obtienen en el techo del evaporador.

BIBLIOGRAFÍA

Estándar BS-4994-1987

Código ASME

Webinar ANSYS Composites Pre Post.

Cursos ANSYS ACP – Material Compuesto

Manual practico sobre poliester (plasticos) reforzado con fibra de vidrio (PRFV). Carlos Andres Quintero Portocarrero.

<http://emaningenieria.com/plastico-reforzado-con-fibra-de-vidrio-prfv-o-rtp/>

<https://fividrio.es/por-que-prfv/>

<https://prfv.wordpress.com/>

<http://www.construmatica.com/construpedia/Hierro>

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

DISEÑO DE UN EVAPORADOR A VACÍO EN MATERIALES PLÁSTICOS

III. ANEXOS

Autor: Jesica Garrudo Antona

Tutor: Andrés Cubero Moya

Dpto. de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



ANEXO I:
INFORME DE CÁLCULO DEL
EVAPORADOR EN PRFV



INFORME DE CÁLCULO DE UN EVAPORADOR DE PRFV
BS 4994-1987

- 1) **CONDICIONES DE DISEÑO**
- 2) **PROPIEDADES MÍNIMAS DE LAS CAPAS DE LAMINADO**
- 3) **FACTOR DE DISEÑO**
- 4) **COEFICIENTE DE SEGURIDAD AL COLAPSO**
- 5) **DEFORMACIÓN ADMISIBLE**
- 6) **UNIDAD DE CARGA LÍMITE ADMISIBLE**
- 7) **CARGA UNITARIA ADMISIBLE A DEFORMACIÓN**
- 8) **CARGA UNITARIA DE DISEÑO**
- 9) **CÁLCULO DEL CUERPO**
- 10) **CÁLCULO DEL TECHO**
- 11) **CÁLCULO DEL FONDO**
- 12) **COSTURAS CIRCUNFERENCIALES**
- 13) **ESTIMACIÓN DEL PRESUPUESTO**

1) CONDICIONES DE DISEÑO Y OPERACIÓN

Contenido	N 9/ P 0/ K 12,3			
Densidad	1250	kg/m ³	=	1.25E-06 kg/mm ³
T_{diseño}	65	°C	T_{operación}	50 °C
P_{diseño}	0	barg (vacío absoluto)	P_{operación}	3.5
Vacío_{diseño}	FV			
Material	PRFV		TECHO	
Densidad	940	kg/m ³	Radio (R_i)	1950 mm
Diámetro	2400	mm	Acuerdo (r_i)	375 mm
Altura_{cilindro}	2700	mm	Altura (h_i)	610 mm
Altura_{total}	4961	mm	Altura tramo recto (f_i)	57 mm
Altura_{cilindro}+A_{techo}	3367	mm	Altura techo total	667 mm
L_{efectiva cuerpo}	3234	mm	FONDO	
			L_{efectiva}	1840 mm
			Ángulo (φ)	60 °

Tipo	Seleccione tipo de depósito...	
	Techo	Korboggen
	Fondo	Cónico

Capacidad

Ángulo fibras °

V_{viento} m/s No hay viento (No está a la interperie)

Apoyo

2) PROPIEDADES MÍNIMAS DE LAS CAPAS DE LAMINADO

TIPO DE REFUERZO		UTUS (Resistencia a tracción) (N/mm ancho por kg/m ² vidrio)	Xz UNIT MODULUS (Módulo unitario) (N/mm ancho por kg/m ² vidrio)	LAP SHEAR STRENGTH (Resistencia a la cizalladura) (N/mm ²)	DENSIDAD SUPERFICIAL (kg/m ²)
MAT	CSM (Resinas distintas de furano)	200	14000	7	0.45
	CSM (Furano)	140	14000	5	
TEJIDO	Tela WR tejido liso (Direcciones de deformación y trama) (Resinas distintas de furano)	250	16000	6	0.8
	Tela WR tejido liso (Direcciones de deformación y trama) (Furano)	160	16000	4	
FILAMENTO	Filamento unidireccional (dirección de la fibra)	500	28000	6	0.689

En SI:

TIPO DE REFUERZO		UTUS (Resistencia a tracción) (N/m de ancho)	Xz UNIT MODULUS (Módulo unitario) (N/m de ancho)
MAT	CSM (Resinas distintas de furano)	90000	6300000
	CSM (Furano)	63000	6300000
TEJIDO	Tela WR tejido liso (Direcciones de deformación y trama) (Resinas distintas de furano)	200000	12800000
	Tela WR tejido liso (Direcciones de deformación y trama) (Furano)	128000	12800000
FILAMENTO	Filamento unidireccional (dirección de la fibra)	344500	19292000

3) FACTOR DE DISEÑO

K1	1.5
K2	2
K3	1.1
K4	2
K5	1.5

K	29.7
---	------

K₁ Método de Fabricación

Aplicación del spray a máquina **1.5**

K₂ Ambiente químico

Sin revestimiento termoplástico **2**

K₃ Temperatura

Consultar **Figure 1**

PARA RELLENAR F24

T = 65 °C **1.1**

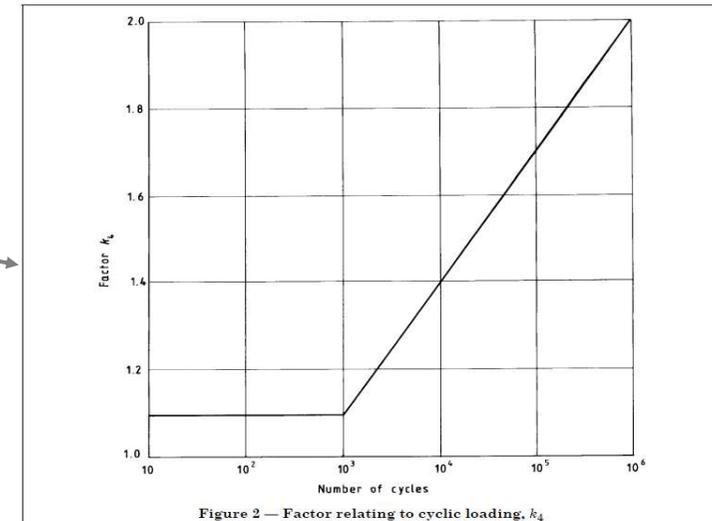
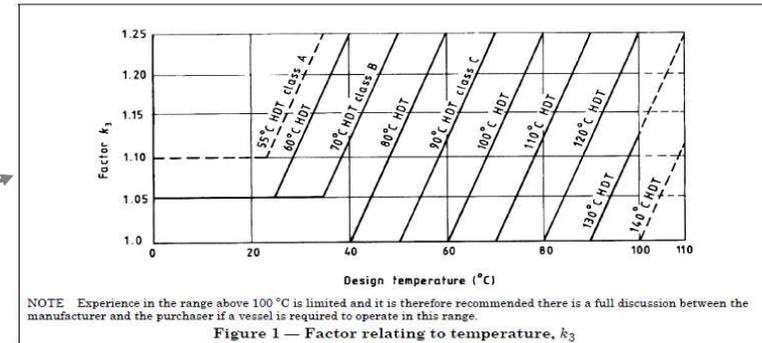
K₄ Cargas cíclicas

Consultar **Figure 2**

Nº de ciclos = e 10⁵ y 10⁶ ciclos **2**

K₅ Proceso de curado

Sin post-curado **1.5**



4) COEFICIENTE DE SEGURIDAD AL COLAPSO

F	4
---	---

Para los casos más desfavorables

5) MÁXIMA DEFORMACIÓN ADMISIBLE

Máxima deformación admisible $\epsilon = 0.2\%$ 0.0045

Utilizando Resina Drakane 441 $\epsilon = 4.5\%$ *

* Si se usa otro tipo de Resina hay que modificar la celda F15 con el valor de deformación que le corresponda

6) UNIDAD DE CARGA LÍMITE ADMISIBLE

7) CARGA UNITARIA ADMISIBLE A DEFORMACIÓN

TIPO DE REFUERZO		u_L Carga unitaria límite admisible (N/m de ancho)	u_S Carga unitaria admisible a deformación (N/m de ancho)
MAT	CSM (Resinas distintas de furano)	3030	12600
	CSM (Furano)	2121	12600
TEJIDO	Tela WR tejido liso (Direcciones de deoformación y trama) (Resinas distintas de furano)	6734	25600
	Tela WR tejido liso (Direcciones de deoformación y trama) (Furano)	4310	25600
FILAMENTO	Filamento unidireccional (dirección de la fibra)	11599	38584

8) CARGA UNITARIA DE DISEÑO

TIPO DE REFUERZO		U_z Carga unitaria de diseño PARA LA CAPA (N/m de ancho)
MAT	CSM (Resinas distintas de furano)	3030
	CSM (Furano)	3030
TEJIDO	Tela WR tejido liso (Direcciones de deformación y trama) (Resinas distintas de furano)	6157
	Tela WR tejido liso (Direcciones de deformación y trama) (Furano)	6157
FILAMENTO	Filamento unidireccional (dirección de la fibra)	9279

Deformación de diseño admisible para todas las capas

0.048%

Θ Ángulo de devanado de la fibra	F_ϕ Factor circunferencial	F_x Factor longitudinal
$0^\circ < \Theta < 15^\circ$	0	1
$15^\circ < \Theta < 75^\circ$	0.5	0.5
$75^\circ < \Theta < 90^\circ$	1	0

Θ Ángulo de devanado de la fibra	F_ϕ Factor Circunferencial	F_x Factor Longitudinal	X_ϕ Módulo unitario Circunferencial (N/mm)
90°	1	0	28000
70°	0.5	0.5	19600

	Circunferencial $u_{z\phi}$ (N/m de ancho)	Longitudinal u_{zx} (N/m de ancho)
Carga unitaria de diseño PARA EL FILAMENTO 90°	9279	0
Carga unitaria de diseño PARA EL FILAMENTO 70°	3248	746

ÁNGULO Θ (°)	MÓDULO CIRCUNFERENCIAL X_ϕ (N/mm)	MÓDULO LONGITUDINAL X_x (N/mm)
0	4700	28000
5	4600	27400
10	4600	26000
15	4550	23600
20	4500	19600
25	4400	16000
30	4400	12700
35	4600	9800
40	5000	7500
45	5900	5900
50	7500	5000
55	9800	4600
60	12700	4400
65	16000	4400
70	19600	4500
75	23600	4550
80	26000	4600
85	27400	4600
90	28000	4700

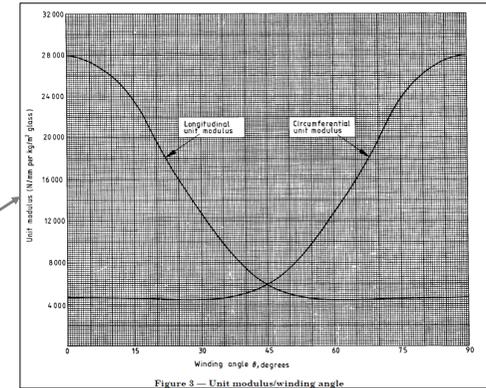


Figure 3 — Unit modulus/winding angle

9) CARGA MÁXIMA UNITARIA CIRCUNFERENCIAL

Carga máxima unitaria circunferencial

$$Q_{\phi} = 73.00 \text{ N/mm}$$

$$p = 0.061 \text{ N/mm}^2$$

CARGA UNITARIA LONGITUDINAL

Carga máxima unitaria longitudinal

$$Q_x = -36.56 \text{ N/mm}$$

Presión efectiva $P_e = 36.50 \text{ N/mm}$

Momento de flexión $M_f = 0 \text{ Nm}$

Peso total del equipo $P_T = 46.738 \text{ Kg}$

COMPOSICIÓN DE LA BARRERA ESTRUCTURAL

Nº de capas de Mat	$n_{Mat} =$	0		
Nº de capas de Tejido	$n_{Tejido} =$	8	8	9
Nº de capas de Filamento a 70°	$n_{F70} =$	0		2
Nº de capas de Filamento a 90°	$n_{F90} =$	22	10	2
Nº TOTAL DE CAPAS		14		

$$U_{LAM} = n_{Mat} \cdot m_{Mat} \cdot U_{Mat} + n_{Tejido} \cdot m_{Tejido} \cdot U_{Tejido} + n_{F70} \cdot m_{F70} \cdot U_{F70} + n_{F90} \cdot m_{F90} \cdot U_{F90} \quad 90 \text{ T T } 70 \text{ - } 70 \text{ T T T } 70 \text{ - } 70 \text{ T T } 90$$

	U_{LAM} (N/mm)	Q_{max} (N/mm)
Circunferencial (ϕ)	251.72	73.00
Longitudinal (x)	39.40	-36.56

¿ $U_{LAM} \geq Q$?

¡CUMPLE!
¡CUMPLE!

CÁLCULO DE ESPESORES

Espesor de pared

$$t = 19.00 \text{ mm}$$

MÓDULOS DEL LAMINADO

MÓDULO COMPUESTO DEL LAMINADO $E_{LAM} = X_{LAM}/t = 39107.37 \text{ N/mm}^2$

MÓDULO UNITARIO DEL LAMINADO $X_{LAM} = \sum X_i \cdot m_i \cdot n_i =$
 $= n_{Mat} \cdot m_{Mat} \cdot X_{Mat} + n_{Tejido} \cdot m_{Tejido} \cdot X_{Tejido} + n_{F70} \cdot m_{F70} \cdot X_{F70} + n_{F90} \cdot m_{F90} \cdot X_{F90} = 743040 \text{ N/mm}$

$L/Do = 1.33 < 10.36 \rightarrow t_m = 15.65 \text{ mm}$

$t \geq t_m \rightarrow$ CUMPLE

10) TECHO TORIESFÉRICO

CARGA MÁXIMA UNITARIA TEÓRICA

Carga unitaria aplicada máxima

$$Q_{\phi} = 167.4 \text{ N/mm}$$

$$\begin{aligned} \rho &= 0.061 \text{ N/mm}^2 \\ K_s &= 1.74 \text{ [adm]} \end{aligned}$$

COMPOSICIÓN DE LA BARRERA ESTRUCTURAL

	n_{Mat}			
Nº de capas de Mat	37	0	1	0
Nº de capas de Tejido	25	4	3	4
Nº de capas de Filamento a 70°	0	12	12	12
Nº de capas de Filamento a 90°	0	0	0	0
Nº TOTAL DE CAPAS	62	10	9.95	10

$$\begin{aligned} u_{\text{LAM}} &= n_{\text{Mat}} \cdot m_{\text{Mat}} \cdot u_{\text{Mat}} + n_{\text{Tejido}} \cdot m_{\text{Tejido}} \cdot u_{\text{Tejido}} + n_{F70} \cdot m_{F70} \cdot u_{F70} + n_{F90} \cdot m_{F90} \cdot u_{F90} = \\ &= 173.59 \text{ N/mm} \\ Q &= 167.43 \text{ N/mm} \end{aligned}$$

¿ $u_{\text{LAM}} \geq Q$? ¡CUMPLE!

CÁLCULO DE ESPESORES

Espesor de pared

$$t = 60.15 \text{ mm}$$

MÓDULOS DEL LAMINADO

MÓDULO COMPUESTO DEL LAMINADO $E_{\text{LAM}} = X_{\text{LAM}}/t = 9195.34 \text{ N/mm}^2$

MÓDULO UNITARIO DEL LAMINADO $X_{\text{LAM}} = \sum X_i \cdot m_i \cdot n_i =$
 $= n_{\text{Mat}} \cdot m_{\text{Mat}} \cdot X_{\text{Mat}} + n_{\text{Tejido}} \cdot m_{\text{Tejido}} \cdot X_{\text{Tejido}} + n_{F70} \cdot m_{F70} \cdot X_{F70} + n_{F90} \cdot m_{F90} \cdot X_{F90} = 553100 \text{ N/mm}$

ESPESOR DE LAMINADO MÍNIMO PERMITIDO $t_m = 10.66 \text{ mm}$ ¡CUMPLE!

h_i/D_i	t/D_i	r_i/D_i
0.25	0.025	0.16

Table 11 — Shape factor for domed ends

h_i/D_i	t/D_i	Shape factor K_s		
		Torispherical		Semi-ellipsoidal
		$0.1 \leq r_i/D_i \leq 0.15$	$r_i/D_i > 0.15$	
0.20	0.005	2.95	Not permitted since $r_i > D_i$	2.00
	0.01	2.85		2.10
	0.02	2.65		2.20
	0.04	2.35		2.25
	0.05	2.25		2.35
0.25	0.005	2.35	1.90	1.30
	0.01	2.25	1.80	1.35
	0.02	2.10	1.75	1.45
	0.04	1.85	1.70	1.45
	0.05	1.75	1.70	1.45
0.32	0.005	1.95	0.15 < r_i/D_i ≤ 0.25	
	0.01	1.85	1.45	0.85
	0.02	1.60	1.45	0.95
	0.04	1.40	1.40	1.0
	0.05	1.30	1.35	1.05
0.50 (hemispherical)	All values	1.30	1.30	1.10
		0.6	0.6	0.6

11) FONDO CÓNICO

Carga máxima unitaria circunferencial

$$Q_c = 73.00 \text{ N/mm}$$

$$p = 0.061 \text{ N/mm}^2$$

CARGA UNITARIA LONGITUDINAL

Carga máxima unitaria longitudinal

$$Q_L = -37.42 \text{ N/mm}$$

Presión efectiva $P_e = 36.50 \text{ N/mm}$

Momento de flexión $M_f = 0$

Peso total del equipo $P_T = 703 \text{ Kg}$

COMPOSICIÓN DE LA BARRERA ESTRUCTURAL

Nº de capas de Mat

$$n_{Mat} = 16$$

Nº de capas de Tejido

$$n_{Tejido} = 11$$

Nº de capas de Filamento a 70°

$$n_{70} = 0$$

Nº de capas de Filamento a 90°

$$n_{90} = 0$$

Nº TOTAL DE CAPAS

$$27$$

$$u_{LAM} = n_{Mat} m_{Mat} u_{Mat} + n_{Tejido} m_{Tejido} u_{Tejido} + n_{70} m_{70} u_{70} + n_{90} m_{90} u_{90} =$$

$$= 76.00 \text{ N/mm}$$

$$Q = 73.00 \text{ N/mm}$$

¿ $u_{LAM} \geq Q$? ¡CUMPLE!

CÁLCULO DE ESPESORES

Espesor de pared

$$t = 26.20 \text{ mm}$$

MÓDULOS DEL LAMINADO

MÓDULO COMPUESTO DEL LAMINADO

$$E_{LAM} = X_{LAM}/t = 9221.37 \text{ N/mm}^2$$

MÓDULO UNITARIO DEL LAMINADO

$$X_{LAM} = \sum X_i m_i n_i =$$

$$= n_{Mat} m_{Mat} X_{Mat} + n_{Tejido} m_{Tejido} X_{Tejido} + n_{70} m_{70} X_{70} + n_{90} m_{90} X_{90} = 241600 \text{ N/mm}$$

$$L/Do \cdot \cos(\phi) = 0.38 < 8.10 \longrightarrow t_m = 54.80 \text{ mm}$$

$t < t_m \rightarrow$ NO CUMPLE

Hay que rediseñar

- Aumentar espesor del laminado
- Incluir anillos rigidizadores

11) FONDO CÓNICO CON RIGIDIZADORES

Carga máxima unitaria circunferencial

$$Q_c = 73.00 \text{ N/mm}$$

$$p = 0.061 \text{ N/mm}^2$$

CARGA UNITARIA LONGITUDINAL

Carga máxima unitaria longitudinal

$$Q_L = 36.50 \text{ N/mm}$$

Presión efectiva $P_e = 36.50 \text{ N/mm}$

Momento de flexión $M_f = 0$

Peso total del equipo $P_T = 703 \text{ Kg}$

COMPOSICIÓN DE LA BARRERA ESTRUCTURAL

Nº de capas de Mat	$n_{Mat} =$	16	2	0	2
Nº de capas de Tejido	$n_{Tejido} =$	11	2	4	2
Nº de capas de Filamento a 70°	$n_{F70} =$	0	8	8	8
Nº de capas de Filamento a 90°	$n_{F90} =$	0	4	4	4
Nº TOTAL DE CAPAS		27	9.9	10	9.9

$$U_{LAM} = n_{Mat} \cdot m_{Mat} \cdot U_{Mat} + n_{Tejido} \cdot m_{Tejido} \cdot U_{Tejido} + n_{F70} \cdot m_{F70} \cdot U_{F70} + n_{F90} \cdot m_{F90} \cdot U_{F90} =$$

$$= 76.00 \text{ N/mm}$$

$$Q = 73.00 \text{ N/mm}$$

¿ $U_{LAM} \geq Q$? ¡CUMPLE!

CÁLCULO DE ESPESORES

Espesor de pared

$$t = 26.20 \text{ mm}$$

MÓDULOS DEL LAMINADO

MÓDULO COMPUESTO DEL LAMINADO $E_{LAM} = X_{LAM}/t = 9221.37 \text{ N/mm}^2$

MÓDULO UNITARIO DEL LAMINADO $X_{LAM} = \sum X_i \cdot m_i \cdot n_i =$

$$= n_{Mat} \cdot m_{Mat} \cdot X_{Mat} + n_{Tejido} \cdot m_{Tejido} \cdot X_{Tejido} + n_{F70} \cdot m_{F70} \cdot X_{F70} + n_{F90} \cdot m_{F90} \cdot X_{F90} = 241600 \text{ N/mm}$$

$L/Do \cdot \cos(\phi) = 0.38 < 8.10 \rightarrow t_m = 19.45 \text{ mm}$

$t \geq t_m \rightarrow$ CUMPLE

MÓDULOS DEL LAMINADO

Nº de anillos rigidizadores

$$n_{a, rigidizadores} = 3$$

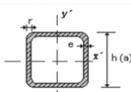
LONGITUD PERMITIDA DEL CUERPO

$L_s = 268.86 \text{ mm} \leq L = 460.00 \text{ mm}$

$L_s \leq L \rightarrow$ CUMPLE

SEGUNDO MOMENTO DE INERCIA DEL ÁREA DE LA SECCIÓN DEL ANILLO DE REFUERZO

$I_{s2} \geq 9.44E+05 \text{ mm}^4$



Elige el tamaño del anillo rigidizador

$e = 10 \text{ mm}$

$h = 80 \text{ mm}$

SEGUNDO MOMENTO DE INERCIA DEL ÁREA DE UNA SECCIÓN CUADRADA HUECA PARA EL ANILLO DE REFUERZO

$I_{s2} = 1.41E+06 \text{ mm}^4$ El anillo cumple

12) COSTURAS CIRCUNFERENCIALES

Longitud efectiva	$L_j =$	180.98	mm
$Q_a =$	-36.561	N/mm	
$K_{OVL} =$	29.7	adm	
Lap shear strength =	6	N/mm ²	

	ρ (kg/m ³)
Mat+Tejido	1500
Filamento	1800

RATIOS DE TRABAJO

	RATIO (kg/h)
Bovinado	50
Manual	4
Soldadura	2

COSTES

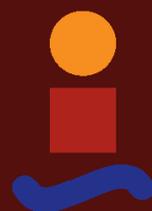
C	COSTES	
Material	5	€/kg
HH	30	€/h

	VOLUMEN (m ³)	MASA (kg/m ³)	COSTE MATERIAL (€)	COSTE MANO DE OBRA (€)	COSTE TOTAL (€)
FONDO	0.224	336	1680	2520	4200
CUERPO	0.387	696	3482	418	3899
TECHO	0.404	606	3029	4543	7572
SOLDADURA	0.045	135	675	2026	2702
TOTAL	1.060	1773	8866	9508	18373

COSTE EVAPORADOR =	<u>23,886</u>	€
---------------------------	----------------------	----------

(Factor de mayoración: 30%)

ANEXO II:
REPORT PV-ELITE
DISEÑO EVAPORADOR ACERO
DISEÑO EVAPORADOR TITANIO



FileName : Evaporador_metal275

External Pressure Calculations: Step: 5 1:38pm Jun 25,2018

External Pressure Calculation Results :

External Pressure Calculations:

From	To	Section Length mm	Outside Diameter mm	Corroded Thickness mm	Factor A	Factor B MPa
10	20	No Calc	...	15	No Calc	No Calc
20	30	969.804	2452	11.5	0.00039747	39.7378
30	40	3137.11	2422	9.50001	0.00024923	24.9178
40	50	No Calc	2031	7.50001	0.0004616	46.1492

External Pressure Calculations:

From	To	External Actual T. mm	External Required T. mm	External Design Pressure MPa	External M.A.W.P. MPa
10	20	16.5	No Calc	0.1	No Calc
20	30	13	12.0464	0.1	0.12425
30	40	11	10.035	0.1	0.13032
40	50	9	7.24535	0.1	0.17042
Minimum					0.124

External Pressure Calculations:

From	To	Actual Length Bet. Stiffeners mm	Allowable Length Bet. Stiffeners mm	Ring Inertia Required mm^4	Ring Inertia Available mm^4
10	20	No Calc	No Calc	No Calc	No Calc
20	30	969.804	969.804	No Calc	No Calc
30	40	3137.11	4044.95	No Calc	No Calc
40	50	No Calc	No Calc	No Calc	No Calc

Elements Suitable for External Pressure.

ASME Code, Section VIII Division 1, 2017

Welded Flat Head

Note: This element's required thickness was computed in the internal Pressure Report using the maximum of the Internal and External pressures.

Cone From 20 to 30 Ext. Chart: CS-2 at 20 °C

Elastic Modulus from Chart: CS-2 at 20 °C : 0.200E+06 MPa

Results for Maximum Allowable External Pressure (MAEP):

Tca	OD	SLEN	D/t	L/D	Factor A	B
5.750	2452.00	969.80	426.43	0.3955	0.0003975	39.74

EMAP = (4*B) / (3*(D/t)) = (4*39.74) / (3*426.4) = 0.124 MPa

Note: The cone thickness used in the calculation has been modified per UG-33(f), $t_e = t * \cos(\alpha)$.

FileName : Evaporador_metal275

External Pressure Calculations: Step: 5 1:38pm Jun 25, 2018

Results for Required Thickness (Tca):

Tca	OD	SLEN	D/t	L/D	Factor A	B
5.273	2452.00	969.80	464.99	0.3955	0.0003488	34.88

EMAP = $(4*B)/(3*(D/t)) = (4*34.88)/(3*465) = 0.1$ MPa

Note: The cone thickness used in the calculation has been modified per UG-33(f), $t_e = t * \cos(\alpha)$.

Cylindrical Shell From 30 to 40 Ext. Chart: CS-2 at 20 °C

Elastic Modulus from Chart: CS-2 at 20 °C : 0.200E+06 MPa

Results for Maximum Allowable External Pressure (MAEP):

Tca	OD	SLEN	D/t	L/D	Factor A	B
9.500	2422.00	3137.11	254.95	1.2953	0.0002492	24.92

EMAP = $(4*B)/(3*(D/t)) = (4*24.92)/(3*254.9) = 0.13$ MPa

Results for Required Thickness (Tca):

Tca	OD	SLEN	D/t	L/D	Factor A	B
8.535	2422.00	3137.11	283.77	1.2953	0.0002129	21.28

EMAP = $(4*B)/(3*(D/t)) = (4*21.28)/(3*283.8) = 0.1$ MPa

Results for Maximum Stiffened Length (Slen):

Tca	OD	SLEN	D/t	L/D	Factor A	B
9.500	2422.00	4044.95	254.95	1.6701	0.0001914	19.14

EMAP = $(4*B)/(3*(D/t)) = (4*19.14)/(3*254.9) = 0.1$ MPa

Torispherical Head From 40 to 50 Ext. Chart: CS-2 at 20 °C

Elastic Modulus from Chart: CS-2 at 20 °C : 0.200E+06 MPa

Results for Maximum Allowable External Pressure (MAEP):

Tca	Crown Rad	Ro/t	Factor A	B
7.500	2031.00	270.80	0.0004616	46.15

EMAP = $B/(Ro/t) = 46.15/270.8 = 0.17$ MPa

Results for Required Thickness (Tca):

Tca	Crown Rad	Ro/t	Factor A	B
5.745	2031.00	353.50	0.0003536	35.35

EMAP = $B/(Ro/t) = 35.35/353.5 = 0.1$ MPa

Check the requirements of UG-33(a)(1) using $P = 1.67 * \text{External Design pressure for this head}$.

Material UNS Number: K02700

Inside Corroded Head Depth [h]:

$$= L - \sqrt{(L - D_i / 2) * (L + D_i / 2 - 2 * r)}$$

$$= 2023 - \sqrt{(2023 - 2403/2) * (2023 + 2403/2 - 2 * 605.5)}$$

$$= 736.8 \text{ mm}$$

M factor for Torispherical Heads (Corroded):

$$= (3 + \sqrt{(L+C)/(r+C)})/4 \text{ per Appendix 1-4 (b \& d)}$$

$$= (3 + \sqrt{(2022 + 1.5)/(604 + 1.5)})/4$$

$$= 1.2070$$

Required Thickness due to Internal Pressure [tr]:

$$= (P*L*M)/(2*S*E - 0.2*P) \text{ per Appendix 1-4 (d)}$$

$$= (0.167*2023*1.207)/(2*137.9*1 - 0.2*0.167)$$

$$= 1.4791 + 1.5000 = 2.9791 \text{ mm}$$

FileName : Evaporador_metal275

External Pressure Calculations: Step: 5 1:38pm Jun 25,2018

Max. Allowable Working Pressure at given Thickness, corroded [MAWP]:
= $((2 * S * E * t) / (M * L + 0.2 * t)) / 1.67$ per Appendix 1-4 (d)
= $((2 * 137.9 * 1 * 7.5) / (1.207 * 2023 + 0.2 * 7.5)) / 1.67$
= 0.507 MPa

Maximum Allowable External Pressure [MAEP]:
= min(MAEP, MAWP)
= min(0.17, 0.507)
= 0.170 MPa

Thickness requirements per UG-33(a)(1) do not govern the required thickness of this head.

PV Elite is a trademark of Intergraph CADWorx & Analysis Solutions, Inc. 2018

Element Thickness, Pressure, Diameter and Allowable Stress :

From	To	Int. Press + Liq. Hd MPa	Nominal Thickness mm	Total Corr Allowance mm	Element Diameter mm	Allowable Stress (SE) MPa
10	20	0.1	8	1.5	500	117.21
20	30	...	3	1.5	2400	117.21
30	40	...	7	1.5	2400	117.21
40	50	0.69	7	1.5	2400	117.21

Element Required Thickness and MAWP :

From	To	Design Pressure MPa	M.A.W.P. Corroded MPa	M.A.W.P. New & Cold MPa	Minimum Thickness mm	Required Thickness mm
10	20	...	0.10424	0.12765	16.5	16.1918
20	30	...	0.55865	0.63286	13	3
30	40	...	0.92242	1.06859	11	3
40	50	0.69	0.71943	0.86357	9	8.69298
Minimum			0.104	0.128		

MAWP: 0.104 MPa, limited by: Flat Head.

Internal Pressure Calculation Results :

ASME Code, Section VIII Division 1, 2017

Welded Flat Head From 10 To 20 SA-516 70 , UCS-66 Crv. B at 50 °C

Material UNS Number: K02700

Required Thickness due to Internal Pressure [tr]:
 = $d \cdot \sqrt{Z \cdot C \cdot P / (S \cdot E)}$ per UG-34 (c) (3)
 = $503 \cdot \sqrt{1 \cdot 1 \cdot 0.1 / (137.9 \cdot 0.85)}$
 = $14.6918 + 1.5000 = 16.1918$ mm

Max. Allowable Working Pressure at given Thickness, corroded [MAWP]:
 = $(t/d)^2 \cdot ((S \cdot E) / (C \cdot Z))$ UG-34 (c) (3)
 = $(15/503)^2 \cdot ((137.9 \cdot 0.85) / (1 \cdot 1))$
 = 0.104 MPa

Maximum Allowable Pressure, New and Cold [MAPNC]:
 = $(t/d)^2 \cdot ((S \cdot E) / (C \cdot Z))$ per UG-34 (c) (3)
 = $(16.5/500)^2 \cdot ((137.9 \cdot 0.85) / (1 \cdot 1))$
 = 0.128 MPa

Actual stress at given pressure and thickness, corroded [Sact]:
 = $(Z \cdot C \cdot P) / (((t/d)^2) \cdot E)$
 = $(1 \cdot 1 \cdot 0.1) / (((15/503)^2) \cdot 0.85)$
 = 132.292 MPa

Minimum Design Metal Temperature Results:

tg = 4.125, tg_sr = 16.5, tr = 15, c = 1.5 mm, E* = 0.85
 Thickness Ratio = $tr \cdot (E^*) / (tg_sr - c) = 0.85$, Temp. Reduction = 8 °C

Min Metal Temp. w/o impact per UCS-66, Curve B -29 °C
 Min Metal Temp. at Required thickness (UCS 66.1) -37 °C

FileName : Evaporador_metal275

Internal Pressure Calculations: Step: 4 1:38pm Jun 25,2018

Conical Section From 20 To 30 SA-516 70 , UCS-66 Crv. B at 50 °C

Material UNS Number: K02700

Max. Allowable Working Pressure at given Thickness, corroded [MAWP]:

$$= (2 * S * E * t * \cos(a)) / (D + 1.2 * t * \cos(a)) \text{ per App 1-4 (e)}$$

$$= (2 * 137.9 * 0.85 * 11.5 * 0.5) / (2406 + 1.2 * 11.5 * 0.5)$$

$$= 0.559 \text{ MPa}$$

Maximum Allowable Pressure, New and Cold [MAPNC]:

$$= (2 * S * E * t * \cos(a)) / (D + 1.2 * t * \cos(a)) \text{ per App 1-4 (e)}$$

$$= (2 * 137.9 * 0.85 * 13 * 0.5) / (2400 + 1.2 * 13 * 0.5)$$

$$= 0.633 \text{ MPa}$$

% Elongation per Table UG-79-1 (50*tnom/Rf*(1-Rf/Ro)) 2.471 %

Note: The Pressure at the Large Diameter is used in the TR calculation.

Minimum Design Metal Temperature Results:

Govrn. thk, tg = 13, tr = 2.141, c = 1.5 mm, E* = 0.85

Thickness Ratio = tr * (E*)/(tg - c) = 0.158, Temp. Reduction = 78 °C

Min Metal Temp. w/o impact per UCS-66, Curve B -21 °C

Min Metal Temp. at Required thickness (UCS 66.1) -104 °C

Cylindrical Shell From 30 To 40 SA-516 70 , UCS-66 Crv. B at 50 °C

Material UNS Number: K02700

Max. Allowable Working Pressure at given Thickness, corroded [MAWP]:

$$= (S * E * t) / (R + 0.6 * t) \text{ per UG-27 (c) (1)}$$

$$= (137.9 * 0.85 * 9.5) / (1202 + 0.6 * 9.5)$$

$$= 0.922 \text{ MPa}$$

Maximum Allowable Pressure, New and Cold [MAPNC]:

$$= (S * E * t) / (R + 0.6 * t) \text{ per UG-27 (c) (1)}$$

$$= (137.9 * 0.85 * 11) / (1200 + 0.6 * 11)$$

$$= 1.069 \text{ MPa}$$

% Elongation per Table UG-79-1 (50*tnom/Rf*(1-Rf/Ro)) 0.456 %

Minimum Design Metal Temperature Results:

Govrn. thk, tg = 11, tr = 1.5, c = 1.5 mm, E* = 0.85

Thickness Ratio = tr * (E*)/(tg - c) = 0.134, Temp. Reduction = 78 °C

Min Metal Temp. w/o impact per UCS-66, Curve B -26 °C

Min Metal Temp. at Required thickness (UCS 66.1) -104 °C

Torispherical Head From 40 To 50 SA-516 70 , UCS-66 Crv. B at 50 °C

Material UNS Number: K02700

Inside Corroded Head Depth [h]:

$$= L - \sqrt{(L - D_i / 2) * (L + D_i / 2 - 2 * r)}$$

$$= 2023 - \sqrt{(2023 - 2403 / 2) * (2023 + 2403 / 2 - 2 * 605.5)}$$

$$= 736.8 \text{ mm}$$

FileName : Evaporador_metal275

Internal Pressure Calculations: Step: 4 1:38pm Jun 25,2018

M factor for Torispherical Heads (Corroded):

$$= (3+\sqrt{(L+C)/(r+C)})/4 \text{ per Appendix 1-4 (b \& d)}$$

$$= (3+\sqrt{(2022 + 1.5)/(604 + 1.5)})/4$$

$$= 1.2070$$

Required Thickness due to Internal Pressure [tr]:

$$= (P*L*M)/(2*S*E-0.2*P) \text{ per Appendix 1-4 (d)}$$

$$= (0.69*2023*1.207)/(2*137.9*0.85-0.2*0.69)$$

$$= 7.1930 + 1.5000 = 8.6930 \text{ mm}$$

Max. Allowable Working Pressure at given Thickness, corroded [MAWP]:

$$= (2*S*E*t)/(M*L+0.2*t) \text{ per Appendix 1-4 (d)}$$

$$= (2*137.9*0.85*7.5)/(1.207*2023+0.2*7.5)$$

$$= 0.719 \text{ MPa}$$

M factor for Torispherical Heads (New & Cold):

$$= (3+\sqrt{(L/r)})/4 \text{ per Appendix 1-4 (b \& d)}$$

$$= (3+\sqrt{(2022/604)})/4$$

$$= 1.2074$$

Maximum Allowable Pressure, New and Cold [MAPNC]:

$$= (2*S*E*t)/(M*L+0.2*t) \text{ per Appendix 1-4 (d)}$$

$$= (2*137.9*0.85*9)/(1.207*2022+0.2*9)$$

$$= 0.864 \text{ MPa}$$

Actual stress at given pressure and thickness, corroded [Sact]:

$$= (P*(M*L+0.2*t))/(2*E*t)$$

$$= (0.69*(1.207*2023+0.2*7.5))/(2*0.85*7.5)$$

$$= 132.258 \text{ MPa}$$

Straight Flange Required Thickness:

$$= (P*R)/(S*E-0.6*P) + c \text{ per UG-27 (c) (1)}$$

$$= (0.69*1202)/(137.9*0.85-0.6*0.69)+1.5$$

$$= 8.598 \text{ mm}$$

Straight Flange Maximum Allowable Working Pressure:

$$= (S*E*t)/(R+0.6*t) \text{ per UG-27 (c) (1)}$$

$$= (137.9 * 0.85 * 7.5)/(1202 + 0.6 * 7.5)$$

$$= 0.729 \text{ MPa}$$

Percent Elong. per UCS-79, VIII-1-01-57 $(75*t_{nom}/R_f)*(1-R_f/R_o)$ 1.109 %**MDMT Calculations in the Knuckle Portion:**

Govrn. thk, tg = 9, tr = 1.5, c = 1.5 mm, E* = 0.85

Thickness Ratio = tr * (E*)/(tg - c) = 0.17, Temp. Reduction = 78 °C

Min Metal Temp. w/o impact per UCS-66, Curve B	-29 °C
Min Metal Temp. at Required thickness (UCS 66.1)	-104 °C

MDMT Calculations in the Head Straight Flange:

Govrn. thk, tg = 9, tr = 1.069, c = 1.5 mm, E* = 0.85

Thickness Ratio = tr * (E*)/(tg - c) = 0.121, Temp. Reduction = 78 °C

Min Metal Temp. w/o impact per UCS-66, Curve B	-29 °C
Min Metal Temp. at Required thickness (UCS 66.1)	-104 °C

[Elements Suitable for Internal Pressure.](#)

PV Elite is a trademark of Intergraph CADWorx & Analysis Solutions, Inc. 2018

External Pressure Calculation Results :

External Pressure Calculations:

From	To	Section Length mm	Outside Diameter mm	Corroded Thickness mm	Factor A	Factor B MPa
10	20	No Calc	...	14	No Calc	No Calc
20	30	969.546	2450	11	0.00037259	35.9662
30	40	3137.11	2421	9	0.00023079	22.2782
40	50	No Calc	2031	7.5	0.0004616	44.5578

External Pressure Calculations:

From	To	External Actual T. mm	External Required T. mm	External Design Pressure MPa	External M.A.W.P. MPa
10	20	15.5	No Calc	0.1	No Calc
20	30	12.5	12.1847	0.1	0.10765
30	40	10.5	10.1508	0.1	0.11042
40	50	9	7.34703	0.1	0.16454
Minimum					0.108

External Pressure Calculations:

From	To	Actual Length Bet. Stiffeners mm	Allowable Length Bet. Stiffeners mm	Ring Inertia Required mm^4	Ring Inertia Available mm^4
10	20	No Calc	No Calc	No Calc	No Calc
20	30	969.546	969.546	No Calc	No Calc
30	40	3137.11	3449.76	No Calc	No Calc
40	50	No Calc	No Calc	No Calc	No Calc

Elements Suitable for External Pressure.

ASME Code, Section VIII Division 1, 2017

Welded Flat Head

Note: This element's required thickness was computed in the internal Pressure Report using the maximum of the Internal and External pressures.

Cone From 20 to 30 Ext. Chart: HA-1 at 20 °C

Elastic Modulus from Chart: HA-1 at 20 °C : 0.193E+06 MPa

Results for Maximum Allowable External Pressure (MAEP):

Tca	OD	SLEN	D/t	L/D	Factor A	B
5.500	2450.00	969.55	445.45	0.3957	0.0003726	35.97

EMAP = (4*B) / (3*(D/t)) = (4*35.97) / (3*445.5) = 0.108 MPa

Note: The cone thickness used in the calculation has been modified per UG-33(f), $t_e = t * \cos(\alpha)$.

Results for Required Thickness (Tca):

Tca	OD	SLEN	D/t	L/D	Factor A	B
5.342	2450.00	969.55	458.60	0.3957	0.0003563	34.40

FileName : Evaporador_ac.inox

External Pressure Calculations: Step: 5 8:08am Jul 5,2018

$$EMAP = (4*B) / (3*(D/t)) = (4*34.4) / (3*458.6) = 0.1 \text{ MPa}$$

Note: The cone thickness used in the calculation has been modified per UG-33(f), $t_e = t * \cos(\alpha)$.

Cylindrical Shell From 30 to 40 Ext. Chart: HA-1 at 20 °C

Elastic Modulus from Chart: HA-1 at 20 °C : 0.193E+06 MPa

Results for Maximum Allowable External Pressure (MAEP):

Tca	OD	SLEN	D/t	L/D	Factor A	B
9.000	2421.00	3137.11	269.00	1.2958	0.0002308	22.28

EMAP = (4*B) / (3*(D/t)) = (4*22.28) / (3*269) = 0.11 MPa

Results for Required Thickness (Tca):

Tca	OD	SLEN	D/t	L/D	Factor A	B
8.651	2421.00	3137.11	279.86	1.2958	0.0002174	20.99

EMAP = (4*B) / (3*(D/t)) = (4*20.99) / (3*279.9) = 0.1 MPa

Results for Maximum Stiffened Length (Slen):

Tca	OD	SLEN	D/t	L/D	Factor A	B
9.000	2421.00	3449.76	269.00	1.4249	0.0002091	20.19

EMAP = (4*B) / (3*(D/t)) = (4*20.19) / (3*269) = 0.1 MPa

Torispherical Head From 40 to 50 Ext. Chart: HA-1 at 20 °C

Elastic Modulus from Chart: HA-1 at 20 °C : 0.193E+06 MPa

Results for Maximum Allowable External Pressure (MAEP):

Tca	Crown Rad	Ro/t	Factor A	B
7.500	2031.00	270.80	0.0004616	44.56

EMAP = B / (Ro/t) = 44.56 / 270.8 = 0.165 MPa

Results for Required Thickness (Tca):

Tca	Crown Rad	Ro/t	Factor A	B
5.847	2031.00	347.36	0.0003599	34.74

EMAP = B / (Ro/t) = 34.74 / 347.4 = 0.1 MPa

Check the requirements of UG-33(a)(1) using $P = 1.67 * \text{External Design pressure for this head.}$

Material UNS Number: S30601

Inside Corroded Head Depth [h]:

$$= L - \sqrt{(L - D_i / 2) * (L + D_i / 2 - 2 * r)}$$

$$= 2023 - \sqrt{(2023 - 2403 / 2) * (2023 + 2403 / 2 - 2 * 605.5)}$$

$$= 736.8 \text{ mm}$$

M factor for Torispherical Heads (Corroded):

$$= (3 + \sqrt{(L+C) / (r+C)}) / 4 \text{ per Appendix 1-4 (b \& d)}$$

$$= (3 + \sqrt{(2022 + 1.5) / (604 + 1.5)}) / 4$$

$$= 1.2070$$

Required Thickness due to Internal Pressure [tr]:

$$= (P*L*M) / (2*S*E - 0.2*P) \text{ per Appendix 1-4 (d)}$$

$$= (0.167 * 2023 * 1.207) / (2 * 137.9 * 1 - 0.2 * 0.167)$$

$$= 1.4791 + 1.5000 = 2.9791 \text{ mm}$$

Max. Allowable Working Pressure at given Thickness, corroded [MAWP]:

$$= ((2*S*E*t) / (M*L + 0.2*t)) / 1.67 \text{ per Appendix 1-4 (d)}$$

$$= ((2 * 137.9 * 1 * 7.5) / (1.207 * 2023 + 0.2 * 7.5)) / 1.67$$

$$= 0.507 \text{ MPa}$$

Maximum Allowable External Pressure [MAEP]:

PV Elite 2018 Licensee: SPLM Licensed User

FileName : Evaporador_ac.inox

External Pressure Calculations: Step: 5 8:08am Jul 5,2018

= min(MAEP, MAWP)
= min(0.165, 0.507)
= 0.165 MPa

Thickness requirements per UG-33(a)(1) do not govern the required thickness of this head.

PV Elite is a trademark of Intergraph CADWorx & Analysis Solutions, Inc. 2018

Element Thickness, Pressure, Diameter and Allowable Stress :

From	To	Int. Press + Liq. Hd MPa	Nominal Thickness mm	Total Corr Allowance mm	Element Diameter mm	Allowable Stress (SE) MPa
10	20	0.1	8	1.5	500	130.73
20	30	...	3	1.5	2400	130.73
30	40	...	7	1.5	2400	130.73
40	50	0.69	7	1.5	2400	117.21

Element Required Thickness and MAWP :

From	To	Design Pressure MPa	M.A.W.P. Corroded MPa	M.A.W.P. New & Cold MPa	Minimum Thickness mm	Required Thickness mm
10	20	...	0.10127	0.12563	15.5	15.4117
20	30	...	0.59605	0.67876	12.5	3
30	40	...	0.97487	1.13791	10.5	3
40	50	0.69	0.71943	0.86357	9	8.69298
Minimum			0.101	0.126		

MAWP: 0.101 MPa, limited by: Flat Head.

Internal Pressure Calculation Results :

ASME Code, Section VIII Division 1, 2017

Welded Flat Head From 10 To 20 SA-240 at 50 °C

Material UNS Number: S30601

Required Thickness due to Internal Pressure [tr]:

$$= d * \sqrt{Z * C * P / (S * E)} \text{ per UG-34 (c) (3)}$$

$$= 503 * \sqrt{1 * 1 * 0.1 / (153.8 * 0.85)}$$

$$= 13.9117 + 1.5000 = 15.4117 \text{ mm}$$

Max. Allowable Working Pressure at given Thickness, corroded [MAWP]:

$$= (t/d)^2 * ((S * E) / (C * Z)) \text{ UG-34 (c) (3)}$$

$$= (14/503)^2 * ((153.8 * 0.85) / (1 * 1))$$

$$= 0.101 \text{ MPa}$$

Maximum Allowable Pressure, New and Cold [MAPNC]:

$$= (t/d)^2 * ((S * E) / (C * Z)) \text{ per UG-34 (c) (3)}$$

$$= (15.5/500)^2 * ((153.8 * 0.85) / (1 * 1))$$

$$= 0.126 \text{ MPa}$$

Actual stress at given pressure and thickness, corroded [Sact]:

$$= (Z * C * P) / (((t/d)^2) * E)$$

$$= (1 * 1 * 0.1) / (((14/503)^2) * 0.85)$$

$$= 151.866 \text{ MPa}$$

Conical Section From 20 To 30 SA-240 at 50 °C

Material UNS Number: S30601

FileName : Evaporador_ac.inox

Internal Pressure Calculations: Step: 4 8:08am Jul 5,2018

Max. Allowable Working Pressure at given Thickness, corroded [MAWP]:

$$= (2 * S * E * t * \cos(a)) / (D + 1.2 * t * \cos(a)) \text{ per App 1-4 (e)}$$

$$= (2 * 153.8 * 0.85 * 11 * 0.5) / (2406 + 1.2 * 11 * 0.5)$$

$$= 0.596 \text{ MPa}$$

Maximum Allowable Pressure, New and Cold [MAPNC]:

$$= (2 * S * E * t * \cos(a)) / (D + 1.2 * t * \cos(a)) \text{ per App 1-4 (e)}$$

$$= (2 * 153.8 * 0.85 * 12.5 * 0.5) / (2400 + 1.2 * 12.5 * 0.5)$$

$$= 0.679 \text{ MPa}$$

% Elongation per Table UG-79-1 $(50 * t_{nom} / R_f) * (1 - R_f / R_o)$ 2.381 %

Note: Please Check Requirements of Table UHA-44 for Elongation limits.

Note: The Pressure at the Large Diameter is used in the TR calculation.

Cylindrical Shell From 30 To 40 SA-240 at 50 °C

Material UNS Number: S30601

Max. Allowable Working Pressure at given Thickness, corroded [MAWP]:

$$= (S * E * t) / (R + 0.6 * t) \text{ per UG-27 (c) (1)}$$

$$= (153.8 * 0.85 * 9) / (1202 + 0.6 * 9)$$

$$= 0.975 \text{ MPa}$$

Maximum Allowable Pressure, New and Cold [MAPNC]:

$$= (S * E * t) / (R + 0.6 * t) \text{ per UG-27 (c) (1)}$$

$$= (153.8 * 0.85 * 10.5) / (1200 + 0.6 * 10.5)$$

$$= 1.138 \text{ MPa}$$

% Elongation per Table UG-79-1 $(50 * t_{nom} / R_f) * (1 - R_f / R_o)$ 0.436 %

Note: Please Check Requirements of Table UHA-44 for Elongation limits.

Torispherical Head From 40 To 50 SA-240 at 50 °C

Material UNS Number: S30601

Inside Corroded Head Depth [h]:

$$= L - \sqrt{(L - D_i / 2) * (L + D_i / 2 - 2 * r)}$$

$$= 2023 - \sqrt{(2023 - 2403 / 2) * (2023 + 2403 / 2 - 2 * 605.5)}$$

$$= 736.8 \text{ mm}$$

M factor for Torispherical Heads (Corroded):

$$= (3 + \sqrt{(L + C) / (r + C)}) / 4 \text{ per Appendix 1-4 (b \& d)}$$

$$= (3 + \sqrt{(2022 + 1.5) / (604 + 1.5)}) / 4$$

$$= 1.2070$$

Required Thickness due to Internal Pressure [tr]:

$$= (P * L * M) / (2 * S * E - 0.2 * P) \text{ per Appendix 1-4 (d)}$$

$$= (0.69 * 2023 * 1.207) / (2 * 137.9 * 0.85 - 0.2 * 0.69)$$

$$= 7.1930 + 1.5000 = 8.6930 \text{ mm}$$

Max. Allowable Working Pressure at given Thickness, corroded [MAWP]:

$$= (2 * S * E * t) / (M * L + 0.2 * t) \text{ per Appendix 1-4 (d)}$$

$$= (2 * 137.9 * 0.85 * 7.5) / (1.207 * 2023 + 0.2 * 7.5)$$

$$= 0.719 \text{ MPa}$$

FileName : Evaporador_ac.inox

Internal Pressure Calculations: Step: 4 8:08am Jul 5,2018

M factor for Torispherical Heads (New & Cold):

$$\begin{aligned}
 &= (3+\sqrt{L/r})/4 \text{ per Appendix 1-4 (b \& d)} \\
 &= (3+\sqrt{2022/604})/4 \\
 &= 1.2074
 \end{aligned}$$

Maximum Allowable Pressure, New and Cold [MAPNC]:

$$\begin{aligned}
 &= (2*S*E*t)/(M*L+0.2*t) \text{ per Appendix 1-4 (d)} \\
 &= (2*137.9*0.85*9)/(1.207*2022+0.2*9) \\
 &= 0.864 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Actual stress at given pressure and thickness, corroded [Sact]:

$$\begin{aligned}
 &= (P*(M*L+0.2*t))/(2*E*t) \\
 &= (0.69*(1.207*2023+0.2*7.5))/(2*0.85*7.5) \\
 &= 132.258 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Straight Flange Required Thickness:

$$\begin{aligned}
 &= (P*R)/(S*E-0.6*P) + c \text{ per UG-27 (c) (1)} \\
 &= (0.69*1202)/(137.9*0.85-0.6*0.69)+1.5 \\
 &= 8.598 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Straight Flange Maximum Allowable Working Pressure:

$$\begin{aligned}
 &= (S*E*t)/(R+0.6*t) \text{ per UG-27 (c) (1)} \\
 &= (137.9 * 0.85 * 7.5)/(1202 + 0.6 * 7.5) \\
 &= 0.729 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

% Elongation per Table UG-79-1 $(75*t_{nom}/R_f)*(1-R_f/R_o)$ 1.109 %

Note: Please Check Requirements of Table UHA-44 for Elongation limits.

[Elements Suitable for Internal Pressure.](#)[PV Elite is a trademark of Intergraph CADWorx & Analysis Solutions, Inc. 2018](#)

External Pressure Calculation Results :

External Pressure Calculations:

From	To	Section Length mm	Outside Diameter mm	Corroded Thickness mm	Factor A	Factor B MPa
10	20	No Calc	...	12	No Calc	No Calc
20	30	969.289	2448	10.5	0.00034688	36.1157
30	40	3137.11	2420	8.5	0.00021161	22.0312
40	50	No Calc	2031	7.5	0.0004616	48.0588

External Pressure Calculations:

From	To	External Actual T. mm	External Required T. mm	External Design Pressure MPa	External M.A.W.P. MPa
10	20	13.5	No Calc	0.1	No Calc
20	30	12	11.8716	0.1	0.10327
30	40	10	9.89829	0.1	0.10318
40	50	9	7.13006	0.1	0.17747
Minimum					0.103

External Pressure Calculations:

From	To	Actual Length Bet. Stiffeners mm	Allowable Length Bet. Stiffeners mm	Ring Inertia Required mm ⁴	Ring Inertia Available mm ⁴
10	20	No Calc	No Calc	No Calc	No Calc
20	30	969.289	969.289	No Calc	No Calc
30	40	3137.11	3230.7	No Calc	No Calc
40	50	No Calc	No Calc	No Calc	No Calc

Elements Suitable for External Pressure.

ASME Code, Section VIII Division 1, 2017

Welded Flat Head

Note: This element's required thickness was computed in the internal Pressure Report using the maximum of the Internal and External pressures.

Cone From 20 to 30 Ext. Chart: CS-5 at 20 °C

Elastic Modulus from Chart: CS-5 at 20 °C : 0.208E+06 MPa

Results for Maximum Allowable External Pressure (MAEP):

Tca	OD	SLEN	D/t	L/D	Factor A	B
5.250	2448.00	969.29	466.29	0.3960	0.0003469	36.12

EMAP = (4*B) / (3*(D/t)) = (4*36.12) / (3*466.3) = 0.103 MPa

Note: The cone thickness used in the calculation has been modified per UG-33(f), $t_e = t * \cos(\alpha)$.

Results for Required Thickness (Tca):

Tca	OD	SLEN	D/t	L/D	Factor A	B
5.186	2448.00	969.29	472.06	0.3960	0.0003401	35.41

FileName : Evaporador_metal_Titanio

External Pressure Calculations: Step: 5 3:43pm Jun 26,2018

$$EMAP = (4*B) / (3*(D/t)) = (4*35.41) / (3*472.1) = 0.1 \text{ MPa}$$

Note: The cone thickness used in the calculation has been modified per UG-33(f), $t_e = t * \cos(\alpha)$.

Cylindrical Shell From 30 to 40 Ext. Chart: CS-5 at 20 °C

Elastic Modulus from Chart: CS-5 at 20 °C : 0.208E+06 MPa

Results for Maximum Allowable External Pressure (MAEP):

Tca	OD	SLEN	D/t	L/D	Factor A	B
8.500	2420.00	3137.11	284.71	1.2963	0.0002116	22.03

$$EMAP = (4*B) / (3*(D/t)) = (4*22.03) / (3*284.7) = 0.103 \text{ MPa}$$

Results for Required Thickness (Tca):

Tca	OD	SLEN	D/t	L/D	Factor A	B
8.398	2420.00	3137.11	288.15	1.2963	0.0002076	21.61

$$EMAP = (4*B) / (3*(D/t)) = (4*21.61) / (3*288.2) = 0.1 \text{ MPa}$$

Results for Maximum Stiffened Length (Slen):

Tca	OD	SLEN	D/t	L/D	Factor A	B
8.500	2420.00	3230.70	284.71	1.3350	0.0002053	21.37

$$EMAP = (4*B) / (3*(D/t)) = (4*21.37) / (3*284.7) = 0.1 \text{ MPa}$$

Torispherical Head From 40 to 50 Ext. Chart: CS-5 at 20 °C

Elastic Modulus from Chart: CS-5 at 20 °C : 0.208E+06 MPa

Results for Maximum Allowable External Pressure (MAEP):

Tca	Crown Rad	Ro/t	Factor A	B
7.500	2031.00	270.80	0.0004616	48.06

$$EMAP = B / (Ro/t) = 48.06 / 270.8 = 0.177 \text{ MPa}$$

Results for Required Thickness (Tca):

Tca	Crown Rad	Ro/t	Factor A	B
5.630	2031.00	360.74	0.0003465	36.08

$$EMAP = B / (Ro/t) = 36.08 / 360.7 = 0.1 \text{ MPa}$$

Check the requirements of UG-33(a)(1) using $P = 1.67 * \text{External Design pressure for this head.}$

Material UNS Number: K21604

Inside Corroded Head Depth [h]:

$$= L - \sqrt{(L - Di / 2) * (L + Di / 2 - 2 * r)}$$

$$= 2023 - \sqrt{(2023 - 2403 / 2) * (2023 + 2403 / 2 - 2 * 605.5)}$$

$$= 736.8 \text{ mm}$$

M factor for Torispherical Heads (Corroded):

$$= (3 + \sqrt{(L+C) / (r+C)}) / 4 \text{ per Appendix 1-4 (b \& d)}$$

$$= (3 + \sqrt{(2022 + 1.5) / (604 + 1.5)}) / 4$$

$$= 1.2070$$

Required Thickness due to Internal Pressure [tr]:

$$= (P*L*M) / (2*S*E - 0.2*P) \text{ per Appendix 1-4 (d)}$$

$$= (0.167 * 2023 * 1.207) / (2 * 137.9 * 1 - 0.2 * 0.167)$$

$$= 1.4791 + 1.5000 = 2.9791 \text{ mm}$$

Max. Allowable Working Pressure at given Thickness, corroded [MAWP]:

$$= ((2*S*E*t) / (M*L + 0.2*t)) / 1.67 \text{ per Appendix 1-4 (d)}$$

$$= ((2 * 137.9 * 1 * 7.5) / (1.207 * 2023 + 0.2 * 7.5)) / 1.67$$

$$= 0.507 \text{ MPa}$$

Maximum Allowable External Pressure [MAEP]:

PV Elite 2018 Licensee: SPLM Licensed User

FileName : Evaporador_metal_Titanio

External Pressure Calculations: Step: 5 3:43pm Jun 26,2018

= min(MAEP, MAWP)
= min(0.177, 0.507)
= 0.177 MPa

Thickness requirements per UG-33(a)(1) do not govern the required thickness of this head.

PV Elite is a trademark of Intergraph CADWorx & Analysis Solutions, Inc. 2018

Element Thickness, Pressure, Diameter and Allowable Stress :

From	To	Int. Press + Liq. Hd MPa	Nominal Thickness mm	Total Corr Allowance mm	Element Diameter mm	Allowable Stress (SE) MPa
10	20	0.1	8	1.5	500	175.87
20	30	...	3	1.5	2400	175.82
30	40	...	7	1.5	2400	175.87
40	50	0.69	7	1.5	2400	117.21

Element Required Thickness and MAWP :

From	To	Design Pressure MPa	M.A.W.P. Corroded MPa	M.A.W.P. New & Cold MPa	Minimum Thickness mm	Required Thickness mm
10	20	...	0.10009	0.12821	13.5	13.4944
20	30	...	0.7653	0.87648	12	3
30	40	...	1.2389	1.45825	10	3
40	50	0.69	0.71943	0.86357	9	8.69298
Minimum			0.100	0.128		

MAWP: 0.100 MPa, limited by: Flat Head.

Internal Pressure Calculation Results :

ASME Code, Section VIII Division 1, 2017

Welded Flat Head From 10 To 20 SA-517 E , UCS-66 Crv. A at 50 °C

Material UNS Number: K21604

Required Thickness due to Internal Pressure [tr]:
 = $d \cdot \sqrt{Z \cdot C \cdot P / (S \cdot E)}$ per UG-34 (c) (3)
 = $503 \cdot \sqrt{1 \cdot 1 \cdot 0.1 / (206.9 \cdot 0.85)}$
 = $11.9944 + 1.5000 = 13.4944$ mm

Max. Allowable Working Pressure at given Thickness, corroded [MAWP]:
 = $(t/d)^2 \cdot ((S \cdot E) / (C \cdot Z))$ UG-34 (c) (3)
 = $(12/503)^2 \cdot ((206.9 \cdot 0.85) / (1 \cdot 1))$
 = 0.100 MPa

Maximum Allowable Pressure, New and Cold [MAPNC]:
 = $(t/d)^2 \cdot ((S \cdot E) / (C \cdot Z))$ per UG-34 (c) (3)
 = $(13.5/500)^2 \cdot ((206.9 \cdot 0.85) / (1 \cdot 1))$
 = 0.128 MPa

Actual stress at given pressure and thickness, corroded [Sact]:
 = $(Z \cdot C \cdot P) / (((t/d)^2) \cdot E)$
 = $(1 \cdot 1 \cdot 0.1) / (((12/503)^2) \cdot 0.85)$
 = 206.707 MPa

Minimum Design Metal Temperature Results:

$t_g = 3.375$, $t_{g_sr} = 13.5$, $t_r = 12$, $c = 1.5$ mm, $E^* = 0.85$
 Thickness Ratio = $t_r \cdot (E^*) / (t_{g_sr} - c) = 0.85$, Temp. Reduction = 8 °C

Min Metal Temp. w/o impact per UCS-66, Curve A -8 °C
 Min Metal Temp. at Required thickness (UCS 66.1) -16 °C

FileName : Evaporador_metal_Titanio

Internal Pressure Calculations: Step: 4 3:43pm Jun 26,2018

Conical Section From 20 To 30 SA-517 E , UCS-66 Crv. A at 50 °C

Material UNS Number: K21604

Max. Allowable Working Pressure at given Thickness, corroded [MAWP]:

$$= (2 * S * E * t * \cos(a)) / (D + 1.2 * t * \cos(a)) \text{ per App 1-4 (e)}$$

$$= (2 * 206.9 * 0.85 * 10.5 * 0.5) / (2406 + 1.2 * 10.5 * 0.5)$$

$$= 0.765 \text{ MPa}$$

Maximum Allowable Pressure, New and Cold [MAPNC]:

$$= (2 * S * E * t * \cos(a)) / (D + 1.2 * t * \cos(a)) \text{ per App 1-4 (e)}$$

$$= (2 * 206.9 * 0.85 * 12 * 0.5) / (2400 + 1.2 * 12 * 0.5)$$

$$= 0.876 \text{ MPa}$$

% Elongation per Table UG-79-1 (50*tnom/Rf*(1-Rf/Ro)) 2.290 %

Note: The Pressure at the Large Diameter is used in the TR calculation.

Minimum Design Metal Temperature Results:

Govrn. thk, tg = 12, tr = 1.5, c = 1.5 mm, E* = 0.85

Thickness Ratio = tr * (E*)/(tg - c) = 0.121, Temp. Reduction = 78 °C

Min Metal Temp. w/o impact per UCS-66, Curve A -3 °C

Min Metal Temp. at Required thickness (UCS 66.1) -104 °C

Cylindrical Shell From 30 To 40 SA-517 E , UCS-66 Crv. A at 50 °C

Material UNS Number: K21604

Max. Allowable Working Pressure at given Thickness, corroded [MAWP]:

$$= (S * E * t) / (R + 0.6 * t) \text{ per UG-27 (c) (1)}$$

$$= (206.9 * 0.85 * 8.5) / (1202 + 0.6 * 8.5)$$

$$= 1.239 \text{ MPa}$$

Maximum Allowable Pressure, New and Cold [MAPNC]:

$$= (S * E * t) / (R + 0.6 * t) \text{ per UG-27 (c) (1)}$$

$$= (206.9 * 0.85 * 10) / (1200 + 0.6 * 10)$$

$$= 1.458 \text{ MPa}$$

% Elongation per Table UG-79-1 (50*tnom/Rf*(1-Rf/Ro)) 0.415 %

Minimum Design Metal Temperature Results:

Govrn. thk, tg = 10, tr = 1.5, c = 1.5 mm, E* = 0.85

Thickness Ratio = tr * (E*)/(tg - c) = 0.15, Temp. Reduction = 78 °C

Min Metal Temp. w/o impact per UCS-66, Curve A -8 °C

Min Metal Temp. at Required thickness (UCS 66.1) -104 °C

Torispherical Head From 40 To 50 SA-517 E , UCS-66 Crv. A at 50 °C

Material UNS Number: K21604

Inside Corroded Head Depth [h]:

$$= L - \sqrt{(L - D_i / 2) * (L + D_i / 2 - 2 * r)}$$

$$= 2023 - \sqrt{(2023 - 2403 / 2) * (2023 + 2403 / 2 - 2 * 605.5)}$$

$$= 736.8 \text{ mm}$$

FileName : Evaporador_metal_Titanio

Internal Pressure Calculations: Step: 4 3:43pm Jun 26,2018

M factor for Torispherical Heads (Corroded):

$$= (3+\sqrt{(L+C)/(r+C)})/4 \text{ per Appendix 1-4 (b \& d)}$$

$$= (3+\sqrt{(2022 + 1.5)/(604 + 1.5)})/4$$

$$= 1.2070$$

Required Thickness due to Internal Pressure [tr]:

$$= (P*L*M)/(2*S*E-0.2*P) \text{ per Appendix 1-4 (d)}$$

$$= (0.69*2023*1.207)/(2*137.9*0.85-0.2*0.69)$$

$$= 7.1930 + 1.5000 = 8.6930 \text{ mm}$$

Max. Allowable Working Pressure at given Thickness, corroded [MAWP]:

$$= (2*S*E*t)/(M*L+0.2*t) \text{ per Appendix 1-4 (d)}$$

$$= (2*137.9*0.85*7.5)/(1.207*2023+0.2*7.5)$$

$$= 0.719 \text{ MPa}$$

M factor for Torispherical Heads (New & Cold):

$$= (3+\sqrt{(L/r)})/4 \text{ per Appendix 1-4 (b \& d)}$$

$$= (3+\sqrt{(2022/604)})/4$$

$$= 1.2074$$

Maximum Allowable Pressure, New and Cold [MAPNC]:

$$= (2*S*E*t)/(M*L+0.2*t) \text{ per Appendix 1-4 (d)}$$

$$= (2*137.9*0.85*9)/(1.207*2022+0.2*9)$$

$$= 0.864 \text{ MPa}$$

Actual stress at given pressure and thickness, corroded [Sact]:

$$= (P*(M*L+0.2*t))/(2*E*t)$$

$$= (0.69*(1.207*2023+0.2*7.5))/(2*0.85*7.5)$$

$$= 132.258 \text{ MPa}$$

Straight Flange Required Thickness:

$$= (P*R)/(S*E-0.6*P) + c \text{ per UG-27 (c) (1)}$$

$$= (0.69*1202)/(137.9*0.85-0.6*0.69)+1.5$$

$$= 8.598 \text{ mm}$$

Straight Flange Maximum Allowable Working Pressure:

$$= (S*E*t)/(R+0.6*t) \text{ per UG-27 (c) (1)}$$

$$= (137.9 * 0.85 * 7.5)/(1202 + 0.6 * 7.5)$$

$$= 0.729 \text{ MPa}$$

Percent Elong. per UCS-79, VIII-1-01-57 $(75*t_{nom}/R_f)*(1-R_f/R_o)$ 1.109 %

MDMT Calculations in the Knuckle Portion:

Govrn. thk, tg = 9, tr = 1.5, c = 1.5 mm, E* = 0.85
 Thickness Ratio = tr * (E*)/(tg - c) = 0.17, Temp. Reduction = 78 °C

Min Metal Temp. w/o impact per UCS-66, Curve A -8 °C
 Min Metal Temp. at Required thickness (UCS 66.1) -104 °C

MDMT Calculations in the Head Straight Flange:

Govrn. thk, tg = 9, tr = 1.027, c = 1.5 mm, E* = 0.85
 Thickness Ratio = tr * (E*)/(tg - c) = 0.116, Temp. Reduction = 78 °C

Min Metal Temp. w/o impact per UCS-66, Curve A -8 °C
 Min Metal Temp. at Required thickness (UCS 66.1) -104 °C

Elements Suitable for Internal Pressure.