

**OPTIMIZACIÓN DE LA CUBIERTA ESFÉRICA
AUTOPORTANTE DE UN TANQUE INDUSTRIAL DE
GRANDES DIMENSIONES MEDIANTE ANÁLISIS DE
PANDEO ELÁSTICO LINEAL**

CARRERA: INGENIERÍA CIVIL

ALUMNOS:

LEGUIZAMÓN PFEFFER, Facundo Tomás (L-3128/3)

DIRECTORES: Fideleff, Horacio. Möller, Oscar.

ASESORES: Hazan, Andrés. Navarro, Raúl. Portapila, Margarita.

TITULAR DE CÁTEDRA: Navarro, Raúl.

SEPTIEMBRE 2024

ÍNDICE

ÍNDICE	2
ÍNDICE DE FIGURAS.....	4
ÍNDICE DE TABLAS.....	6
GLOSARIO	7
INTRODUCCIÓN	8
1. OBJETIVOS	9
1.1. Generales	9
1.2. Particulares.....	9
MATERIALES Y MÉTODOS.....	10
1. REGLAMENTOS.....	10
2. DESCRIPCIÓN DE LA OBRA	10
2.1. Tipología del tanque y materiales	10
2.2. Geometría inicial	11
3. PREDIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE.....	12
3.1. Limitaciones dimensionales	12
3.2. Modelo base del tanque.....	16
4. ACCIONES SOBRE LA ESTRUCTURA.....	17
4.1. Estados nominales.....	17
4.2. Combinaciones de carga.....	26
4.3. Filosofía de las verificaciones estructurales.....	26
5. MODELO NUMÉRICO DE ELEMENTOS FINITOS.....	27
5.1. Hipótesis Fundamentales – Pandeo Lineal Elástico (LBA)	27
5.2. Parametrización del modelo	28
5.3. Tipología de Elementos Finitos.....	29
5.4. Vinculación	30
5.5. Mallado	31
6. ANÁLISIS ESTRUCTURAL LINEAL ESTÁTICO.....	33
6.1. Filosofía del dimensionamiento	33
6.2. Consideraciones.....	35
6.3. Verificaciones de los perfiles	38
6.4. Verificaciones en la chapa de cubierta	40
6.5. Control de desplazamientos	44
7. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE PANDEO LINEAL DE CHAPA.....	45
7.1. Planteo Teórico.....	45
7.2. Análisis de pandeo lineal	46
8. OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL	50
8.1. Planteo de Mejoras	50

ÍNDICE

8.2.	<i>Función objetivo.....</i>	54
9.	EVALUACIÓN DE LA DIMENSIÓN AMBIENTAL	55
9.1.	<i>Menores tiempos de ejecución</i>	55
9.2.	<i>Necesidad de capacitación de personal.....</i>	56
9.3.	<i>Eliminación de columnas: ausencia de trabajos en altura</i>	57
	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	59
	CONCLUSIONES.....	62
	AGRADECIMIENTOS	63
	REFERENCIAS.....	67
	ANEXO A	69
1.	PLANTEO DEL PROBLEMA	69
2.	DESARROLLO MATEMÁTICO	70
	ANEXO B	73
1.	PERFILES COMPLETOS VC.....	74
1.1.	<i>Mayor flexión con tracción en fibras superiores.....</i>	74
1.2.	<i>Mayor flexión con tracción en fibras inferiores.....</i>	77
1.3.	<i>Mayor compresión</i>	80
2.	PERFILES “DOS TERCIOS” V2/3	83
2.1.	<i>Mayor flexión con tracción en fibras superiores.....</i>	83
2.2.	<i>Mayor flexión con tracción en fibras inferiores.....</i>	86
2.3.	<i>Mayor compresión.</i>	89
3.	PERFILES “UN TERCIO” V1/3.....	92
3.1.	<i>Mayor flexión con tracción en fibras superiores.....</i>	92
3.2.	<i>Mayor flexión con tracción en fibras inferiores.....</i>	95
3.3.	<i>Mayor compresión</i>	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Corte con geometría general e inicial de partida.	11
Figura 3.1: Perfil Ángulo para unión domo-envolvente	13
Figura 3.2: Geometría completa del tanque inicial.	16
Figura 4.1: Representación de los estados nominales Pe y Pt	18
Figura 4.2: Representación del estado nominal Pi	18
Figura 4.3: Determinación de coeficiente Cp para cubierta.....	22
Figura 4.4: Coeficientes de presión para la cubierta vista en planta – Caso $Cp1$	24
Figura 4.5: Coeficientes de presión para la cubierta vista en planta – Caso $Cp2$	25
Figura 5.1: Diferentes tipos de relación constitutivas para el acero.....	27
Figura 5.2: Vista inferior anillo central, unión elementos de vigas y anulares.	29
Figura 5.3: Axonometría del modelado realizado en COMSOL.	29
Figura 5.4: Representación aislada de media viga radial VC (completa) con vigas anulares.....	30
Figura 5.5: En azul - ejes con vinculación fija.	30
Figura 5.6: Discretización de diferentes elementos de viga y de la chapa.	31
Figura 5.7: Modelo COMSOL – Discretización fina de las paredes del tanque, creciente con altura.....	31
Figura 5.8: Modelo COMSOL - Discretización de los elementos de chapa en planta.....	32
Figura 5.9: Modelo COMSOL - Discretización de los elementos de chapa en axonometría.	32
Figura 6.1.: Secciones en las vigas meridianas para las verificaciones estructurales.	33
Figura 6.2: Nomenclatura de las vigas y anillos.	35
Figura 6.3: Vista frontal de primer modo de pandeo flexional en mayor inercia de los perfiles radiales.....	36
Figura 6.4: Luz de pandeo flexional de las vigas completas y 2/3.....	37
Figura 6.5: Condiciones de borde (a) inadecuadas y (b) adecuadas para preservar el estado membranar.....	40
Figura 6.6: Planos de corte X-X e Y-Y para analizar tensiones en cubierta.	41
Figura 6.7: Esfuerzos membranales para caso de presión y succión.	42
Figura 6.8: Tensiones 1-1 en el desarrollo del arco de cubierta. (Signos +T -C).....	42
Figura 6.9: Tensiones 2-2 en el desarrollo del arco de cubierta. (Signos +T -C).....	42
Figura 6.10: Mapa de calor de tensiones 2-2 para estado presión y succión	43
Figura 6.11: Campo de desplazamientos en la cubierta. Valores en centímetros.	44
Figura 7.1: Forma típica del modo de pandeo por carga presión. Planta y axonometría	46
Figura 7.2: Ondulación producida por el abollamiento. Modo típico de pandeo por carga de presión.	47
Figura 7.3: Forma típica del modo de pandeo por carga de succión. Planta y axonometría.....	48
Figura 7.4: Ondulación producida por el abollamiento. Modo típico de pandeo por carga presión.	48
Figura 8.1: Propuesta de cambio de espesor de: primer tercio de cubierta a 1/4" y toda la cubierta a 1/4" ...	50
Figura 8.2: Variación de radios de curvatura de la cubierta: 60m, 50m y 40m.	51

Figura 8.3: Detalle de anillo U rigidizador de borde – Propuesta 3.....	52
Figura 9.1: Objetivos del desarrollo sostenible y matrices involucradas	55
Figura A.1: Acción diferencial de la acción del viento sobre la envolvente.....	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Tipología del tanque a analizar [8] según norma API [2].	10
Tabla 2.2. Dimensiones del tanque a analizar según modelo base de Bahía Blanca S.A.U [8].	11
Tabla 3.1: Cálculo de espesores de las virolas del cuerpo del tanque con el Método de 1 pie.	13
Tabla 3.2: Tabla con geometría resultante.	15
Tabla 4.1: Resumen de consideraciones de viento.	21
Tabla 4.2: Combinaciones de carga de acuerdo a norma API.	26
Tabla 6.1: Parámetros de cálculo para Vigas completas y Vigas 2/3.	36
Tabla 6.2: Parámetros de cálculo para Vigas 1/3.	37
Tabla 6.3: Verificaciones de los perfiles radiales con la fórmula de interacción.	38
Tabla 7.1: Autovalores para pandeo lineal y estados críticos	46
Tabla 8.1: Propuesta de variación de espesores	52
Tabla 8.2: Propuesta de variación de radios.	52
Tabla 8.3: Propuesta de anillo rigidizador.	53

GLOSARIO

<i>ASD</i>	“Allowable Strength Design Methodology” (metodología dimensionamiento por tensiones admisibles). Se realiza el análisis estructural por combinaciones de carga nominales y se contrasta la resistencia requerida con la nominal, reducida en un factor Ω dado por la norma. Ver Sección 4.3 .
<i>AISC</i>	“American Institute of Steel Construction”. Norma norteamericana utilizada para el cálculo de los elementos estructurales de acero.
<i>API</i> <i>API -650</i>	“American Petroleum Institute- Welded Tanks for Oil Storage”. Norma norteamericana que da los lineamientos para la construcción de tanques de combustible que trabajan con presiones cercanas a la atmosférica.
<i>D</i>	Diámetro de la envolvente cilíndrica [m].
<i>D'</i>	Diámetro abertura central [m]. Para evacuación de gases en caso de emergencia.
<i>H</i>	Altura de la envolvente cilíndrica[m].
<i>R</i>	Radio del domo esférico [m].
<i>S</i>	Longitud de arco del domo esférico [m]. Ver Figura 6.5 .
<i>LBA</i>	“Linear Buckling Analysis” (Análisis de pandeo lineal). Implica un análisis de segundo orden que considera linealidad física y geométrica.
Linealidad Física	Hipótesis de que el material (acero) es perfectamente elástico. Concepto desarrollado en Capítulo 5.
Linealidad Geométrica	Hipótesis que permite considerar una relación lineal entre las tensiones y los corrimientos. Concepto desarrollado en Capítulo 5.
Vigas completas	Aquellas vigas radiales que, comenzando en la envolvente cilíndrica, culminan en el anillo menor o superior del tanque. Ver Figura 3.2 . También son abreviadas y denominadas como ‘VC’ ver Figura 6.2 .
Vigas 1/3	Aquellas vigas radiales que, comenzando en la envolvente cilíndrica, culminan en el anillo mayor o inferior del tanque, recorriendo un ángulo de 9.31° . Ver Figura 3.2 . También son abreviadas y denominadas como ‘VA’ ver Figura 6.2 .
Vigas 2/3	Aquellas vigas radiales que, comenzando en la envolvente cilíndrica, culminan en el anillo medio, recorriendo un ángulo de 18.87° . Ver Figura 3.2 . También son abreviadas y denominadas como ‘VB’ ver Figura 6.2 .
λ	Autovalor. Valor por el cual se debe multiplicar a las cargas de una combinación para que se produzca el primer modo de pandeo en la estructura.

INTRODUCCIÓN

El marcado crecimiento que ha desarrollado la industria petroquímica en la República Argentina en los últimos años se ha traducido en una creciente demanda de reservorios para el almacenaje de combustible [1], para los cuales se exigen que sean cada vez de mayores dimensiones para así generar una menor demanda de terreno físico. El marco normativo más utilizado en los tanques de este tipo con presiones de funcionamiento cercanas a la atmosférica es la norma API 650 [2]. Una tipología estructural aceptada por dicho reglamento es la compuesta de una envolvente cilíndrica de chapa de acero y una cubierta domo con geometría de casquete esférico fija en su extremo superior, también de acero. En esta tipología el tanque apoya sobre una platea de fundación y debido a sus grandes dimensiones en la mayor parte de los casos esta íntegramente construido in-situ.

El proceso de construcción tradicional comienza disponiendo el aro inferior de chapa de la envolvente y luego de ello, sobre él, todos los aros subsiguientes hasta completar la altura total de la envolvente [3]. Luego se disponen de columnas de acero interiores al tanque que sirven de apoyo intermedio al entramado de vigas meridianas y paralelas que reciben la chapa de cierre de la cubierta.

Una tendencia emergente que ha cobrado mayor relevancia en los últimos años es la de constituir un tanque con una envolvente cilíndrica perimetral, con un domo esférico como cubierta que es montado a nivel de platea y es elevado mediante el uso de gatos hidráulicos a medida que se realiza el montaje de la envolvente [4]. Este método constructivo (conocido como “Jacking-up method system”), a contraposición de la técnica tradicional, presenta las siguientes ventajas [5]:

- Se reducen al mínimo los trabajos en alturas, con todos los costos adicionales que esto conlleva.
- Se reducen los tiempos de construcción.
- El proceso de montaje permite prescindir del uso de rigidizadores verticales (montantes) en la envolvente, utilizados en la técnica tradicional para garantizar estabilidad de la envolvente durante su montaje.

Como limitación se tiene, sin embargo, que las mayores luces a cubrir por la cubierta sin apoyos intermedios requieren un diseño estructural más cuidadoso [5], el cual será objeto de estudio en el presente trabajo.

En la región, este procedimiento constructivo es aplicado por empresas latinoamericanas (como MRP-S.A [6]) y argentinas (como Cantoni S.A [7]).

En particular, la empresa Refinería Bahía Blanca S.A.U. [8] ejecutó un diseño de un tanque con columnas interiores de 50m de diámetro y 17.5m de altura de la pared cilíndrica con una cubierta en forma de domo que fue construido en la ciudad de Bahía Blanca, Argentina. En el año 2023, dicha empresa ha encargado al Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE) [9], en su carácter de consultora estructural, el trabajo de analizar la viabilidad de la construcción del mismo tanque (diseñado y construido con la técnica tradicional), pero con el nuevo procedimiento que prescinde de las columnas interiores.

Así se ha provisto al IMAE con la documentación gráfica que será utilizada como “modelo base” para en análisis estructural a llevar a cabo y parte de la investigación que se realizará para esta empresa conformará el presente proyecto de investigación.

Experiencias anteriores indican que este tipo de cubiertas autoportantes experimentan grandes deformaciones durante su vida útil en servicio, debido a las grandes luces a cubrir con pequeños espesores de acero. Se ha adoptado entonces esta propuesta como una oportunidad para lograr comprender la influencia que la no linealidad geométrica¹ pueda tener en el tanque.

Se propone un trabajo de dos etapas, en donde primero se busca optimizar el diseño de la cubierta con un análisis que considere la linealidad física² y geométrica del tanque. El desempeño de la estructura se evalúa en base a los valores de las cargas críticas de pandeo lineal y los perfiles metálicos son verificados por la norma AISC 7-22[10]. Luego una segunda etapa, en donde con el diseño final obtenido (del paso anterior) se analice la influencia de los fenómenos de segundo orden dados por la no linealidad geométrica.

El presente trabajo se enfocará en el primero de los dos pasos planteados, en donde se realiza un modelo numérico parametrizado de toda la estructura utilizando elementos de cáscara tipo MITC lagrangeanos cuadráticos en el software COMSOL Multiphysics[11]. Los parámetros a optimizar son el espesor de la chapa de cubierta, la rigidez del anillo de borde de la cubierta y el radio del casquete esférico. Con el modelo se analiza la respuesta estática con análisis de primer orden para combinaciones de carga permanente, presión interna conforme norma API y acción del viento. La función objetivo a minimizar es el peso total de la cubierta, con las restricciones de las normas mencionadas y con factores de carga crítica de pandeo mayores que 1.5. Se busca seleccionar finalmente un modelo ‘óptimo’ y obtener conclusiones de interés para el diseño de este tipo de cubiertas.

1. Objetivos

1.1. Generales

Lograr la optimización estructural de un tanque de grandes dimensiones cuya cubierta esférica no cuenta con columnas interiores, cumpliendo los estándares de la norma norteamericana API-650.

1.2. Particulares

- Arribar a un diseño inicial del tanque, a través de un análisis estático lineal y verificando las prescripciones de la norma API-650 [2] y AISC 360-22 [10], en base a las acciones dadas por la norma ASCE 7-22 [12], utilizando un modelo de elementos finitos tridimensional en el programa COMSOL Multiphysics [11].
- Analizar, comparar y seleccionar alternativas del espesor de la chapa de cubierta, la rigidez del anillo de borde de la cubierta y el radio del casquete esférico para alcanzar un diseño ‘óptimo’ para la estructura del tanque.

¹ La no linealidad geométrica contempla el planteo de las ecuaciones de equilibrio sobre la posición desplazada del sistema. Será un concepto a desarrollar en la [Sección 5.1.](#)

² La no linealidad física contempla que el material en estudio no es completamente elástico para cualquier nivel de deformación. Será un concepto a desarrollar en la [Sección 5.1.](#)

MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se abordarán las prescripciones normativas, los desarrollos teóricos y las metodologías prácticas que permitirán estudiar y entender el comportamiento estructural del tanque. Se partirá de un diseño inicial dado por la empresa Refinería Bahía Blanca S.A.U [8], el cual se discutirá y analizará con ayuda del desarrollo de un modelo numérico en COMSOL Multiphysics. El análisis contempla la linealidad física y geométrica y se encuentra enmarcado en las normas indicadas en la Sección 1. Como resultado de dicho análisis, se propondrán mejoras a la estructura que permitan verificar un análisis de pandeo lineal (basado en las hipótesis mencionadas). Finalmente se comparará y se seleccionará una alternativa superadora.

1. REGLAMENTOS

En general, se utilizarán los lineamientos pactados por la norma API-650 [2] para tanques que trabajan con presiones cercanas a la atmosférica; la cual a su vez se refiere a la norma ASCE 7-22 [12] para el cálculo de las acciones reglamentarias y a la norma AISC 360-22 [10] para la verificación de resistencia de la estructura metálica.

En particular, se utilizarán los reglamentos CIRSOC 102-2005 [13] y CIRSOC 104-2005 [14] para la determinación de la velocidad de viento y carga de nieve a considerar en la metodología ASCE, respectivamente.

2. DESCRIPCIÓN DE LA OBRA

2.1. Tipología del tanque y materiales

Se parte del diseño del tanque de Refinería Bahía Blanca S.A.U [8], ubicado en la ciudad de Bahía Blanca, Argentina, que cuenta con columnas interiores y sobre el que se platea eliminar dichas columnas. Las características de diseño del tanque estudiado se encuentran en la **Tabla 2.1**:

Tabla 2.1. Tipología del tanque a analizar [8] según norma API [2].

Parámetro	Descripción
Tipo de operación	Atmosférica
Fluido almacenado	Crudo liviano [2], de densidad 901 kg/m^3 (8.83 kN/m^3).
Calidad de acero	F-24

Se opta por trabajar con una calidad de acero F-24, que presenta una tensión de fluencia $F_y = 235 \text{ MPa}$. Su módulo de elasticidad longitudinal es $E = 200000 \text{ MPa}$ y el transversal es $G = 78000 \text{ MPa}$. En este análisis se considerarán contemplados todos los procedimientos de cuidado del acero para solucionar los problemas frente a la corrosión.

2.2. Geometría inicial

Las dimensiones del tanque provistas por el fabricante se encuentran en la **Tabla 2.2**:

Tabla 2.2. Dimensiones del tanque a analizar según modelo base de Bahía Blanca S.A.U [8].

Parámetro	Descripción	Valor
D	Diámetro de la envolvente [m].	50
H	Altura de la envolvente cilíndrica[m].	17.5
R	Radio del domo esférico [m].	60
D'	Diámetro abertura central [m]. Para evacuación de gases en caso de emergencia.	2

En esta instancia se desconocen todas las dimensiones, espesores y elementos más allá de lo indicado en la **Tabla 2.2**. Así, el objeto de las próximas etapas de trabajo será el de adoptar las mismas. En la **Figura 2.1** se detalla lo hasta aquí mencionado, con las dimensiones conocidas y su nomenclatura correspondiente:

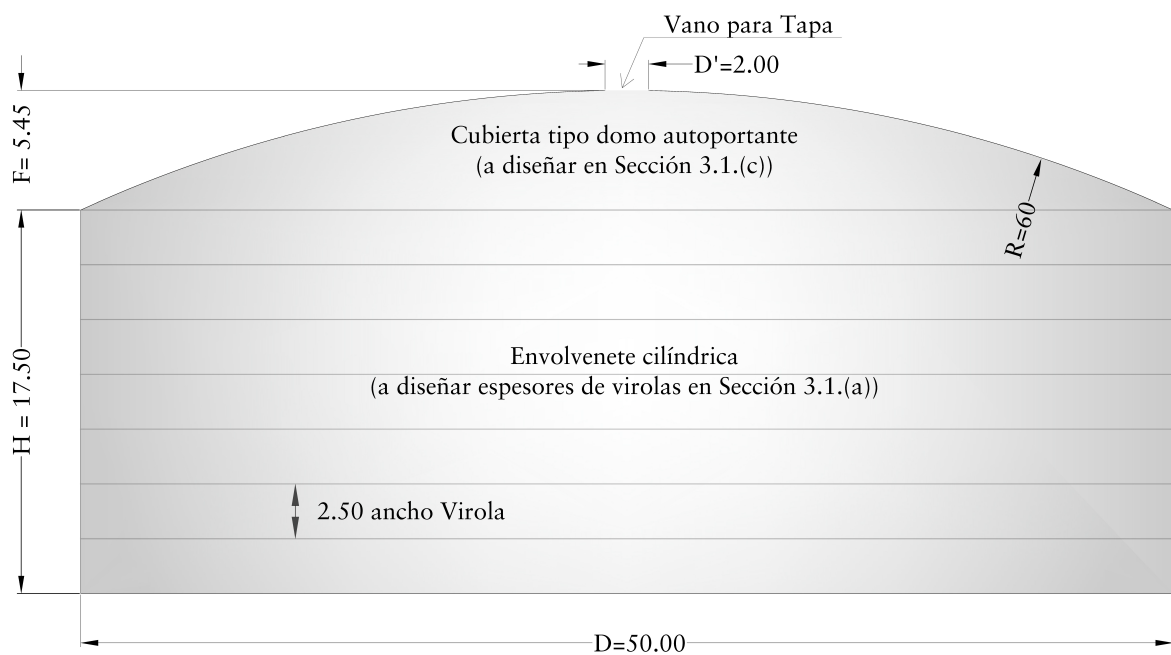


Figura 2.1: Corte con geometría general e inicial de partida. Medidas en metros.

3. PREDIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE

3.1. Limitaciones dimensionales

Se busca arribar a un diseño inicial que cumpla con las dimensiones mínimas reglamentarias para todos los elementos que componen la estructura del tanque, de acuerdo a la norma API-650 [2].

(a) Espesores de la envolvente

La norma API-650 [2] recomienda el “*método de 1 pie*” para calcular el espesor requerido de la pared del tanque, el cual considera una sección transversal del mismo situada a 304,8 mm (1 pie) por debajo de la base de cada virola metálica de 2,5 m de alto¹. Luego, en función de esto, se calculan y se comparan los espesores requeridos para soportar la presión hidrostática y las cargas de diseño por separado, para luego optar por aquel que resulte mayor entre los dos.

Para poder aplicar este método la norma exige que el diámetro del tanque debe ser igual o menor a 200 pies (61 metros aproximadamente) y siendo el diámetro del tanque de 50 m, resulta entonces posible.

A continuación, se presentan las fórmulas obtenidas de la norma, que permiten definir los espesores anteriormente mencionados.

Para la prueba de presión hidrostática:

$$t_d = \frac{4.9 D (H - 0.3) G}{S_d} + CA \quad (3.1)$$

Y para la presión de diseño:

$$t_t = \frac{4.9 D (H - 0.3) G}{S_t} \quad (3.2)$$

Donde:

- t_d es el espesor de diseño del tanque en mm.
- t_t es el espesor necesario por la presión hidrostática en mm.
- $D = 50 \text{ m}$ es el diámetro del tanque.
- $H = 17,50 \text{ m}$ es la altura de la pared envolvente del tanque.
- $G = 0,901 \text{ ton/m}^3$ es la densidad del líquido almacenado.
- $CA = 0 \text{ mm}$ es la tolerancia de corrosión, la cual se considera nula.
- $S_d = 160 \text{ MPa}$ es la tensión admisible para la condición de diseño.
- $S_t = 171 \text{ MPa}$ es la tensión admisible para la evaluación hidrostática.

Estos últimos dos parámetros fueron obtenidos de la Tabla 5.2 “Permissible Plate Materials and Allowable Stresses” de la Norma API-650 [2].

De acuerdo al apartado 5.6.1.1 de la Norma, se especifica el espesor mínimo que debe tener la pared del tanque, en función del diámetro del mismo. Para el caso en estudio, corresponde un valor de 5/16 pulgadas. Así es como resultados de la aplicación del Método de 1 pie se presentan en la **Tabla 3.1** a continuación:

¹ Las chapas metálicas se comercializan en rollos de 2.5 metros de ancho, por lo que es conveniente desde el punto de vista constructivo que las virolas presenten este mismo espaciamiento.

Tabla 3.1: Cálculo de espesores de las virolas del cuerpo del tanque con el Método de 1 pie.

Virola i	H_i [m]	t_{d_i} [mm]	t_{d_i} [mm]	t_{req_i} [mm]	$t_{adoptado_i}$ ["]
1	2.5	3.04	3.15	3.15	5/16
2	5	6.48	6.73	6.73	5/16
3	7.5	9.93	10.32	10.32	1/2
4	10	13.38	13.9	13.9	5/8
5	12.5	16.83	17.48	17.48	3/4
6	15	20.28	21.06	21.06	7/8
7	17.5	23.73	24.64	24.64	1

Adicionalmente a los espesores de chapa, la norma API exige la colocación de un anillo rigidizador ubicado en la tercera cuarta parte de la altura de la envolvente. Este anillo no requiere verificaciones particulares por lo que se utiliza a estos fines un perfil C350x150x65x6, el cual es el mismo que fue adoptado por la empresa [8] en el modelo original.

(b) Unión Domo-Envolvente

La norma exige, para este tipo de cubiertas autoportantes, la incorporación de un perfil anular tipo ángulo en L como se indica en la **Figura 3.1**, que se dispone a nivel del encuentro con la envolvente.

Dicho anillo cumple la doble función de brindar un soporte para las cargas de viento en la envolvente, y de funcionar como un anillo de tracción o compresión para la cubierta. Se discutirá en futuras secciones la importancia que esta rigidez axial presenta. **Se adopta un perfil L 4"x1/2"**, el cual cumple con los mínimos reglamentarios dados en el inciso 5.9.5.9 (b) de la Norma [2]. Las propiedades geométricas de dicho perfil fueron adoptadas en base al fabricante[15].

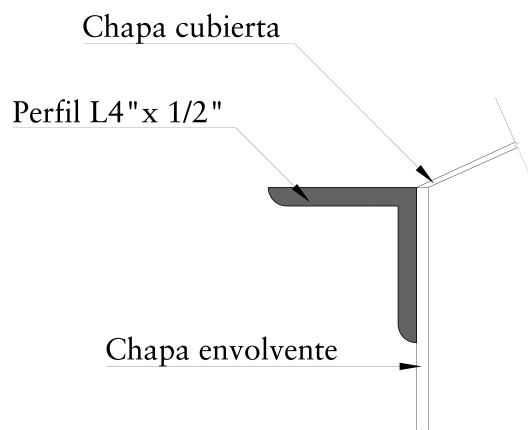


Figura 3.1: Perfil Ángulo para unión domo-envolvente

(c) Cubierta Tipo Domo

Como se ha mencionado, el diseño final de la cubierta será el principal objeto de estudio del presente trabajo, por lo que en esta sección se harán únicamente comentarios de algunas prescripciones normativas a considerar.

Tipología

A partir de las definiciones que brinda la Norma API-650 con respecto a los diferentes tipos de cubierta posibles para estos tanques, específicamente en el inciso 5.10.1: *Definitions*, se puede establecer que el techo del proyecto es tipo Cubierta Domo Autoportante (en inglés: self-supporting dome roof).

Radio (R) del domo

La norma [2] establece en su inciso 5.10.6.1 límites inferiores y superiores para la relación radio domo y diámetro de la envolvente, R/D , siendo sus límites:

$$\left(\frac{R}{D}\right)_{\min} = 0.8 \rightarrow R_{\min} = 40m; \left(\frac{R}{D}\right)_{\max} = 1.2 \rightarrow R_{\max} = 60m$$

Para el diseño inicial se adopta $R = 60m$, por ser este el que poseía el diseño base dado por la empresa, en posteriores secciones se cuestionará este parámetro de diseño. Además, la elección de este parámetro no modifica la capacidad de almacenar combustible del tanque, pues el nivel de llenado de diseño siempre se encuentra por debajo de la unión ‘envolvente-cubierta’.

Espesor

La Norma establece en el mismo inciso un espesor mínimo de 3/16” para las cubiertas de la tipología de cubierta autoportante detallada en (a). Se adopta este espesor en esta instancia inicial.

(d) Rigidizadores de cubierta: vigas radiales y anulares

Debido a que se trata de una cubierta autoportante, se busca rigidizar la misma para poder así prescindir de sus apoyos intermedios. Un análisis estático conducido anteriormente en el IMAE [16], que combinaba en un análisis por el Método de los Elementos Finitos **elementos de placa** con **elementos de barra**, permitió el dimensionamiento de los perfiles, tanto en su disposición en planta como adopción de tamaño comercial.

En el presente trabajo se partirá de dicha geometría ya verificada, pero en el [Capítulo 6](#) se realizarán las mismas verificaciones para un **modelado completo con elementos de placa**, permitiendo comparar los resultados y confirmar a su vez la validez del modelo.

La premisa para la disposición de las vigas en planta es que las mismas circunscriban a regiones de chapa de igual área, siendo los parámetros de la geometría resultantes:

Tabla 3.2: Parámetros de la geometría resultante.

Parámetro	Descripción	Valor
D	Diámetro de la envolvente [m]	50
H	Altura de la envolvente cilíndrica[m]	17.5
R	Radio del domo esférico [m]	60
D'	Diámetro de la abertura central [m]	2
V1/3	Tipo de vigas meridianas "un tercio", desde envolvente hasta primer anillo.	IPE 200
V2/3	Tipo de vigas meridianas "dos tercios", desde envolvente hasta segundo anillo.	IPE 300
VC	Tipo de vigas meridianas "completas", desde envolvente hasta anillo central.	IPE 300
A1/3	Tipo de vigas anulares "un tercio", ubicadas a 9.31° de la envolvente.	IPE 200
A2/3	Tipo de vigas anulares "un tercio", ubicadas a 18.91° de la envolvente.	IPE 200

La geometría compuesta puede encontrarse en la **Figura 3.2**.

(e) Fondo del tanque

Con respecto al fondo del tanque, su diseño se encuentra influenciado por varios factores como ser: método de desalojo del producto, corrosión del fondo, tamaño del tanque, cimientos, entre otros. Sin embargo, como en este proyecto se hace foco en la cubierta del tanque y su comportamiento estructural, se justificará la selección del fondo en forma general. Por tanto, para este caso se supondrá un fondo con placa circular que soportará la carga del material almacenado.

3.2. Modelo base del tanque

Finalmente, tomando en cuenta todas las consideraciones detalladas en el presente capítulo, se detalla en la **Figura 3.2.** el diseño que será utilizado como punto de partida en los próximos capítulos que constituyen el presente informe:

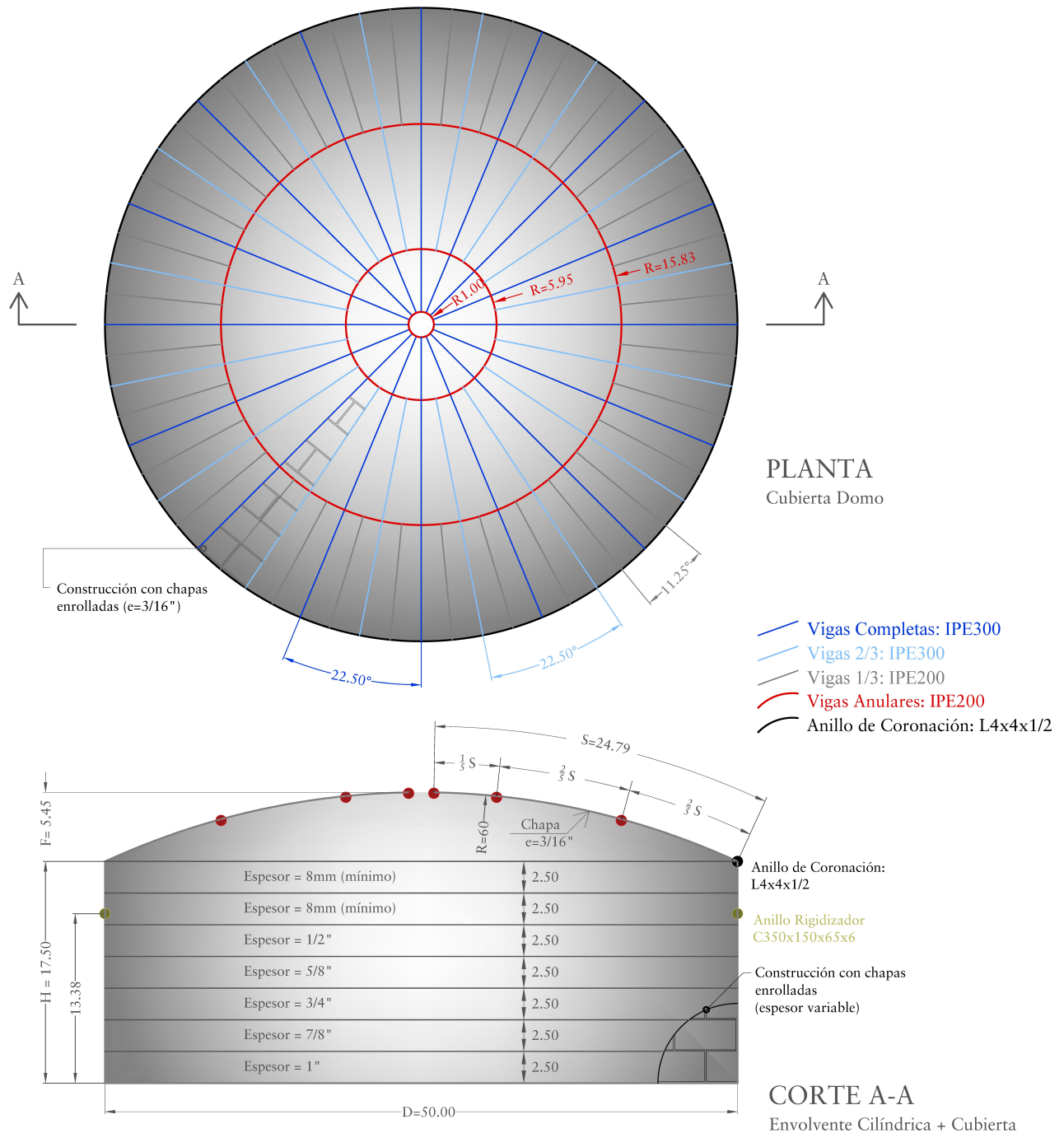


Figura 3.2: Geometría completa del tanque inicial.

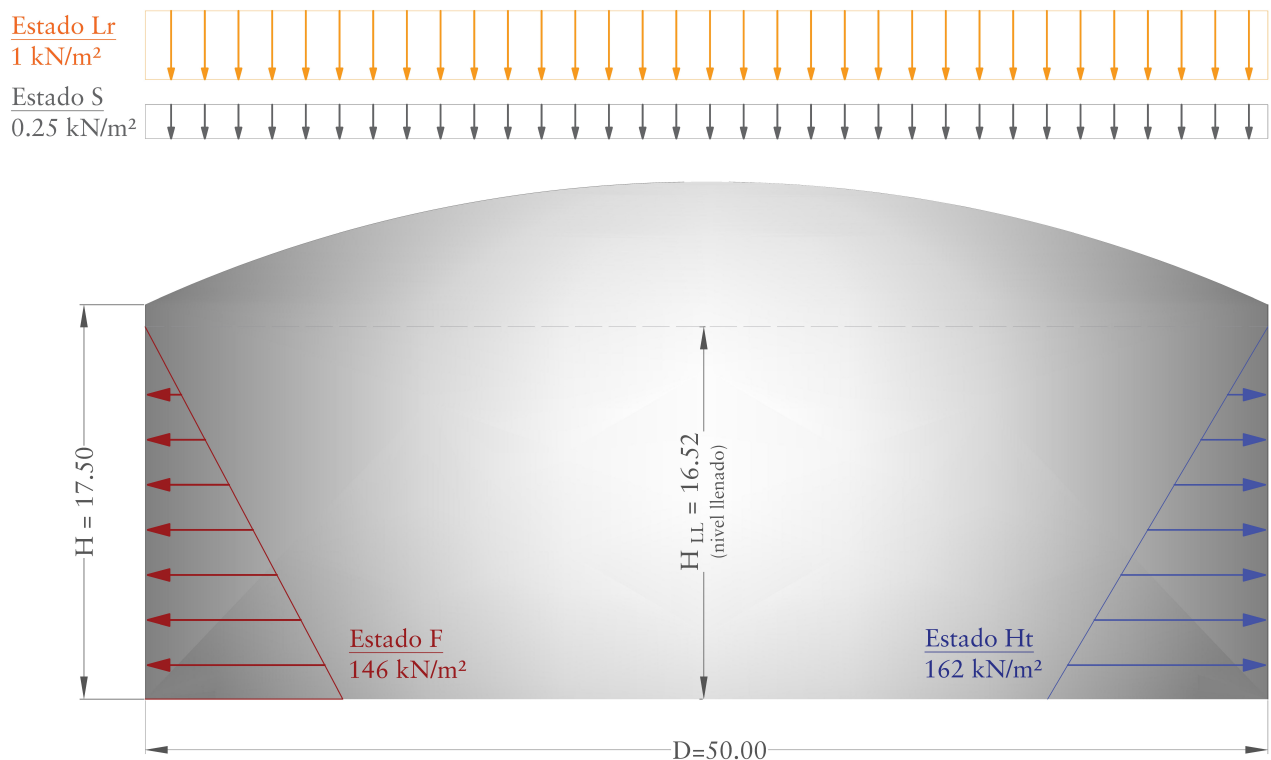
4. ACCIONES SOBRE LA ESTRUCTURA

4.1. Estados nominales

Se considera los estados dados por la norma API [2] en su apartado 5.2.1 *Loads*, a saber:

- D_L : Carga permanente.
- H_t : Presión de fluido con agua. Ver **Figura 4.1**.
- P_e : Presión de diseño exterior (P_e) $0,25 \text{ kN/m}^2$. Ver **Figura 4.2**.
- P_i : Presión de diseño interior (P_i) $0,25 \text{ kN/m}^2$. Ver **Figura 4.3**.
- F : Presión del fluido almacenado hasta la altura $16,52\text{m}$ con $p_e = 8,8 \text{ kN/m}^3$. Ver **Figura 4.1**.
- L_r : Sobrecarga de cubierta (L_r) 1 kN/m^2 . Ver **Figura 4.1**.
- W : Viento según adaptación de reglamento ASCE 7-22 [12] con CIRSOC 102-2005. Ver **ANEXO A**.
- S : Nieve según CIRSOC 104-2005 [14] con valor de $0,248 \text{ kN/m}^2$ en planta. Ver **Figura 4.1**.
- P_t : Presión de prueba $0,123 \text{ kN/m}^2$.

Se desprecia la acción sísmica y sus combinaciones, pues la zona de emplazamiento (Bahía Blanca) no presenta



peligrosidad sísmica de acuerdo con la normativa específica: CIRSOC 103 Parte I (2018) [17].

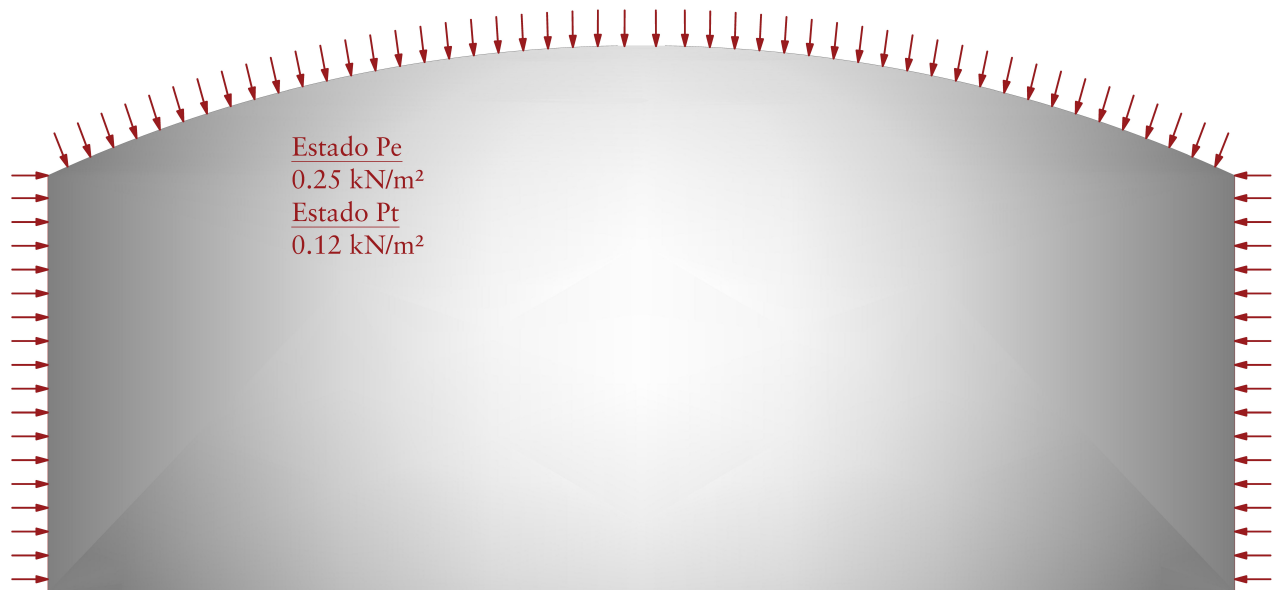


Figura 4.1: Representación de los estados nominales P_e y P_t .

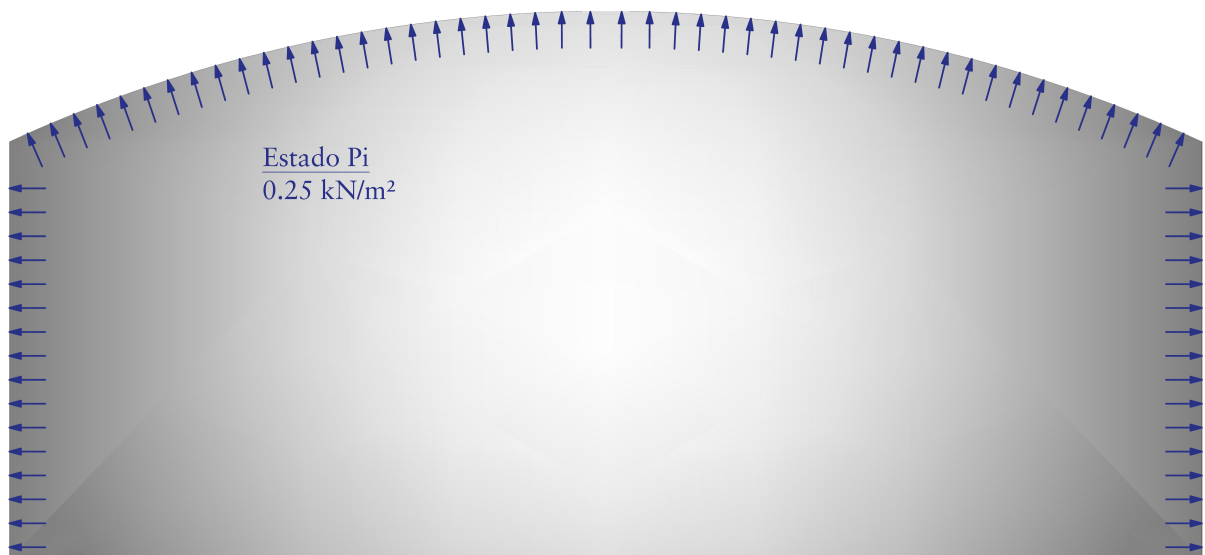


Figura 4.2: Representación del estado nominal P_i .

(a) **D: Carga permanente**

Se debe considerar la totalidad del peso del tanque, incluyendo tolerancias por corrosión (efecto que fue considerado nulo en el presente análisis). Toda la estructura se encuentra construida en acero, para lo cual se considera una densidad de $\gamma_a = 76,98 \text{ kN/m}^3$, con respecto a la calidad F-24 seleccionada y los datos brindados por el fabricante nacional.

(b) P_e : Presión de diseño exterior

Generadas por vacíos parciales que se generan dentro del tanque durante su operación y debe ser considerado igual a 0.25 kN/m^2 , distribuido en todo el contorno interior (paredes y cubierta). El término ‘exterior’ refiere al sentido de la fuerza, siendo la misma hacía adentro del tanque.

(c) P_i : Presión de diseño interior

Debidas a la operación del tanque y las variaciones en la atmosfera interna que pueden producirse durante su operación, se prevé una presión de 0.25 kN/m^2 , distribuido en todo el contorno interior (paredes y cubierta). A contraposición del anterior caso, el término ‘interior’ refiere al sentido de la fuerza, siendo la misma hacía afuera del tanque.

(d) H_t : Presión de agua (testeo hidrostático)

Para el correcto mantenimiento del tanque se realiza un testeo hidráulico. Se debe prever que el mismo será llenado con agua hasta el *nivel de llenado de diseño* H_r , el cual es provisto por el fabricante [8] e igual a 16.52m. De manera que para una densidad del agua $p_{ew} = 9,81 \text{ kN/m}^3$ se tiene una distribución de presiones hidrostática y de valor máximo $p_{ew} * H_r = 162 \text{ kN/m}^2$ en las paredes del tanque.

(e) L_r : Sobrecarga de cubierta

Debe ser considerada como 1 kN/m^2 proyectada en el área horizontal de la cubierta [2].

(f) S : Nieve

Debe ser considerada como $0,248 \text{ kN/m}^2$ proyectada en el área horizontal de la cubierta [2]. De acuerdo a CIRSOC 104-2005 [14].

(g) F : Presión de fluido almacenado

Análogo al anterior caso, pero para el fluido que será almacenado hasta el nivel de diseño H_r . Como se mencionó en la introducción, se trata con un crudo liviano de densidad $p_e = 8.83 \text{ kN/m}^3$. La distribución también es hidrostática y de valor máximo $p_e * H_r = 146 \text{ kN/m}^2$.

(h) P_t : Presión de testeo fluido almacenado

Generadas por vacíos parciales que se generan dentro del tanque durante el proceso de testeo hidráulico y debe ser considerado igual a 0.125 kN/m^2 , distribuido en todo el contorno interior (paredes y cubierta). El término ‘exterior’ refiere al sentido de la fuerza, siendo la misma hacía adentro del tanque.

(i) W : Viento

El viento generará tanto presiones como succiones sobre los elementos exteriores del tanque. Se divide el problema en la determinación de las presiones sobre la cubierta y sobre la envolvente cilíndrica por separado por presentar distintas geometrías.

Para ser completamente coherente con las exigencias de la norma API, **se opta por utilizar la normativa norteamericana asociada ASCE 7-22** [12], en donde se encontrarán las expresiones que permitirán obtener dos funciones de interés:

- $W_{cub}(x, y, z)$: Distribución de presiones sobre la cubierta, en base a las coordenadas x, y, z de los puntos situados sobre la misma ($z \geq H = 17.5m$).
- $W_{env}(x, y, z)$: Distribución de presiones sobre la envolvente, en base a las coordenadas x, y, z de los puntos de la misma ($0 \leq z < H = 17.5m$).

Las velocidades básicas de diseño del reglamento CIRSOC 102-[13] serán utilizadas. Esto no conlleva mayores problemas ya que en la normativa ASCE las velocidades básicas de diseño V tienen el mismo tratamiento estadístico:

- Recurrencias de 50 años.
- Velocidad con ráfagas de intervalos de 3 segundos.
- Medida a 10 metros de altura sobre el nivel de terreno natural.
- Para exposiciones reglamentarias tipo C.

Se recurre al reglamento vigente en Argentina y se obtiene de la Figura 1B un valor de:

$$V = 55 \frac{m}{s} \text{ (Bahía Blanca)}$$

La categoría de importancia (*Risk Category*) y la exposición (*Exposure Category*) son definidas de maneras análogas entre las normativas y corresponde considerar:

- Categoría de importancia tipo 3.
- Exposición tipo C.

La normativa norteamericana provee distintos valores de las velocidades básicas para distintas categorías de importancia. A falta de esto se utilizará lo que el CIRSOC 102 propone, multiplicando por el factor de importancia I al cuadrado de la velocidad básica de diseño, en la determinación de las presiones de viento.

La función que permite obtener las presiones de viento tanto para las cubiertas W_{cub} como para la envolvente W_{env} , similarmente a lo indicado en el CIRSOC 102, viene dado por la siguiente en el capítulo “27.3 WIND LOADS: MAIN WIND FORCE RESISTING SYSTEM” en la norma ASCE:

$$W_{(x,y,z)} = K_d G C_p(x,y) q_z(z) - \overbrace{q_i K_d (G C_{pi})}^{\text{presiones internas nulo por ser estanco}}$$

$$W_{(x,y,z)} = K_d G C_p(x,y) q_z(z) \quad (5.1)$$

De donde se conoce:

- $G = 0.85$ factor de efecto de ráfaga. Definido de acuerdo a *Cap. 26.11.1 Gust-Effect Factor* [12].
- $K_d = 0.95$ factor de direccionalidad. Definido de acuerdo a *Table 26.6-1. Wind Directionality Factor, K_d* [12] (nonaxisymmetric structural systems).

Y se debe determinar:

- $C_p(x,y)$: coeficiente de presión externa que depende de las coordenadas x, y en planta. Existirá una marcada diferencia en la determinación de este valor para la cubierta, como para la envolvente.

- $q_z(z)$: presión dinámica evaluada a la altura z sobre el nivel de terreno. De acuerdo a la expresión 26.10-1.SI de la norma ASCE, se tiene:

$$q_z(z) = 0.613 K_z(z) K_{zt} K_e V^2 \quad (5.2)$$

Dónde:

- K_z : coeficiente de exposición para la presión dinámica. Definido en la Tabla 26.10-1.1 ASCE:

$$K_z(z) = \begin{cases} 2.41 * \left(\frac{4.6}{750}\right)^{\frac{2}{9.8}}, & 0 \leq z < 4.6m \\ 2.41 * \left(\frac{z}{750}\right)^{\frac{2}{9.8}}, & 4.6m \leq z \end{cases} \quad (5.3)$$

- K_{zt} : factor topográfico, considerado igual a 1 por no cumplir con los requisitos del inciso 26.8.1 de la norma correspondiente (H mayor a 4.5 metros para una exposición del tipo C).
- K_e : factor de elevación del terreno natural. Como no se cuenta con datos específicos del emplazamiento y la posible variación en los valores sería muy acotada, la norma ASCE permite adoptar un valor igual a la unidad en su Tabla 26.9-1. Ground Elevation Factor.

Lo que se ha mencionado hasta aquí se encuentra presente en la **Tabla 4.1** a continuación.

Tabla 4.1: Resumen de consideraciones para el cálculo de las acciones del viento.

Parámetro	Valor	Comentarios	Reglamento
Ubicación	Bahía Blanca	Proyecto base de diseño.	CIRSOC 102 -2005
V_0 [m/s]	55.00	Obtenido de mapa de vientos para Bahía Blanca.	
I	1.15	V_0 depende de Risk Category en ASCE. Se adapta al CIRSOC.	
Estructura	Cerrada	<u>26.2 DEFINITIONS</u> -> BUILDING, ENCLOSED	ASCE 7-22
Estructura	Rígida	$f=4.2\text{Hz} > 1\text{ Hz}$ - (*)	
Risk category	III	<u>Table 1.5-1: Risk category.</u>	
G	0.85	Estructura Rígida + <u>26.11 GUST EFFECTS.</u>	
K_d	0.95	<u>Table 26.6-1.</u> Chimneys, tanks, and similar: Round.	
K_e	1.00	<u>26.9 GROUND ELEVATION FACTOR</u> ($K_e = 1$ for all cases).	
K_{zt}	1.00	<u>26.8 TOPOGRAPHIC EFFECTS.</u> Tanque dispuesto en llanura.	
Exposición	C	<u>26.7.2 Surface Roughness Categories + 26.7.3 Exposure Categories.</u>	
α	9.80	<u>Table 26.11-1. Terrain Exposure Constants.</u>	
z_g [m]	750.00	<u>Table 26.11-1. Terrain Exposure Constants.</u>	

(*) f es obtenida de estudio de frecuencias propias en COMSOL. Cambiará cuando se cambie la geometría, pero se encuentra alejada del valor límite por lo que no se considera su recalcu en cada iteración.

Coeficiente de presión externa C_p para envolvente

El tratado de los coeficientes C_p a utilizar en la envolvente cilíndrica presenta un desafío, pues el reglamento únicamente provee información acerca de la resultante total de la acción del viento, y no como tratarla en cada punto del programa, algo que será de especial interés en nuestro caso.

Debido a que el desarrollo de este apartado es extenso, se ha decidido volcar el mismo en el [Anexo A: ACCIONES DEL VIENTO EN LA ENVOLVENTE](#), donde se detalla el razonamiento seguido para su consideración.

Coeficiente de presión externa C_p para cubierta

El tratado de las presiones de viento sobre una cubierta con geometría de domo para el sistema principal resistente al viento (“*Main wind force resisting system*”) se encuentra especificado en la Figura 27.3-2 de la norma ASCE, cuyo extracto se encuentra en la **Figura 4.4**.

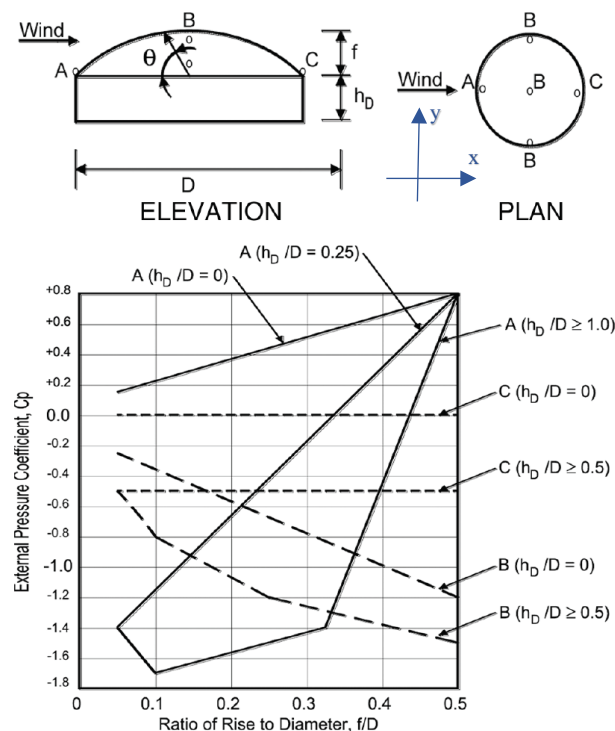


Figura 4.3: Determinación de coeficiente C_p para cubierta [Extracto norma ASCE 7-22].

La misma define el valor del coeficiente C_p para tres zonas en particular, denotadas por las letras A, B y C en función de la relación flecha/diámetro f/D , y especifica que el valor del coeficiente es independiente de la coordenada y (transversal al viento). Se deben considerar **dos estados de carga que se denotarán con $W_{cub 1}$ y $W_{cub 2}$** :

1. C_{p1} : Los valores entre A y B, y entre C y B se deben determinar para interpolación lineal en base a los valores del arco de la circunferencia. La variación se encuentra esquematizada en la **Figura 4.5**.

2. C_{p2} : Para valores de $\theta < 25^\circ$ (ver Figura 5.1) el valor de C_p se considera constante e igual al valor de A. Luego se interpola linealmente entre $\theta = 25^\circ$ y $\theta = 90^\circ$ (valor de B) y entre $\theta = 90^\circ$ y $\theta = 180^\circ$ (valor de C). La variación se encuentra esquematizada en la **Figura 4.6**.

De esta manera y retomando la ecuación (5.1), se pueden definir dos estados de carga a partir de las distintas variaciones de C_p que son especificadas en la norma:

$$W_{cub\ 1\ (x,y,z)} = K_d\ G\ C_{p1\ (x,y)}\ q_z\ (z)$$

$$W_{cub\ 2\ (x,y,z)} = K_d\ G\ C_{p2\ (x,y)}\ q_z\ (z)$$

Para el diseño original detallado en la [Sección 3.2 Modelo base del tanque](#), podemos obtener los valores de los coeficientes punto a punto en la cubierta. Un esquema se encuentra en las **Figuras 4.5 y 4.6**.

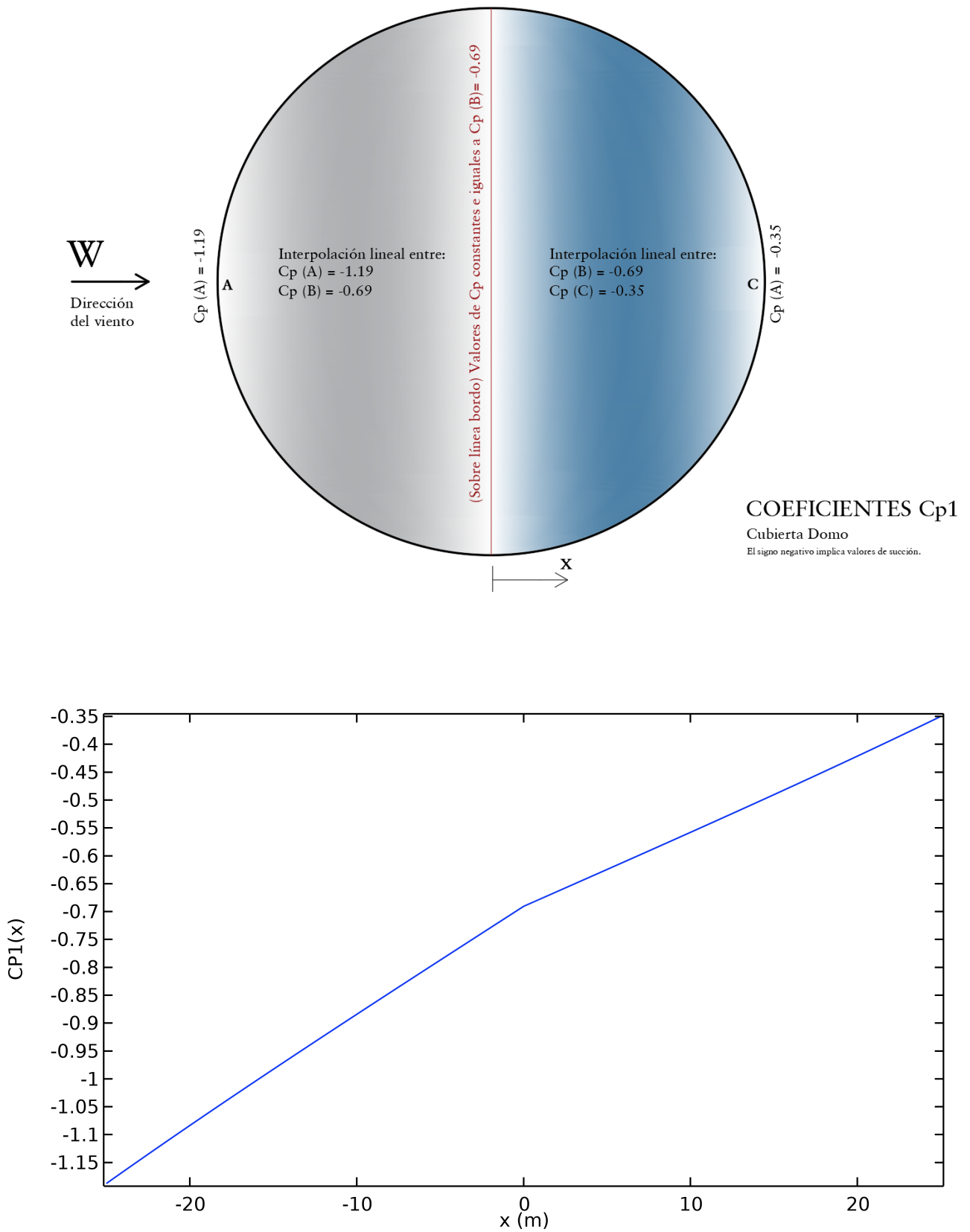


Figura 4.4: Coeficientes de presión para la cubierta vista en planta – Caso C_{p1} .
El signo **negativo** implica valores de **succión**.

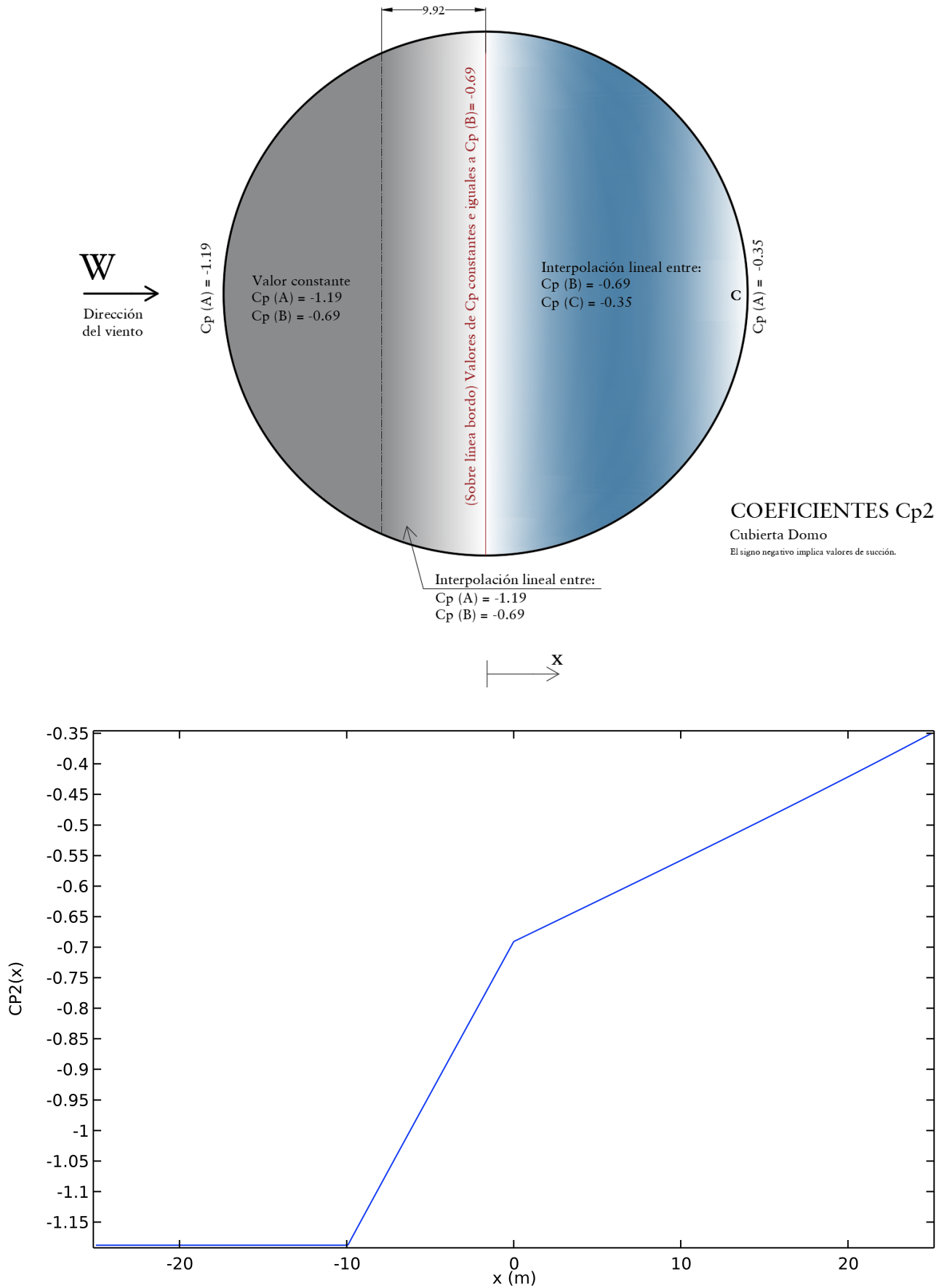


Figura 4.5: Coeficientes de presión para la cubierta vista en planta – Caso C_{p2} .
El signo **negativo** implica valores de **succión**.

4.2. Combinaciones de carga

Tomando como base los estados nominales expresadas anteriormente se efectúan las combinaciones expresadas en la norma API, presentes en la **Tabla 4.2**:

Tabla 4.2: Combinaciones de carga de acuerdo a norma API.

Índice	Descripción API-650
1	a) Fluid and Internal Pressure (D+F+Pi)
2	b) Hydrostatic Test (D+Ht+Pt)
3	c.1) Wind and Internal Pressure (D+0.4Pi+W1)
4	c.2) Wind and Internal Pressure (D+0.4Pi+W2)
5	d.1) Wind and External Pressure (D+0.4Pe+W1)
6	d.2) Wind and External Pressure (D+0.4Pe+W2)
7	e.1) Gravity Loads D+0.4Lr+Pe
8	e.2) Gravity Loads D+0.4S+Pe
9	e.3) Gravity Loads D+S+0.4Pe
10	e.4) Gravity Loads D+Lr+0.4Pe

4.3. Filosofía de las verificaciones estructurales

Una particularidad que presenta la norma API con respecto a otras reglamentaciones es que exige que las verificaciones estructurales se realicen utilizando como metodología de cálculo a “*allowable strength design methodology (ASD)*” (dimensionamiento por tensiones admisibles), a contraposición del dimensionamiento por “*load and resistance factor design (LRFD)*” (Combinaciones de acciones para los Estados Límites Últimos), al que se está acostumbrado en la República Argentina. Sin embargo, esto no revestirá mayores dificultades debido a que la norma complementaria AISC contempla en todas sus expresiones la posibilidad del uso de las dos metodologías.

De esta manera, manteniendo la nomenclatura P_r para denotar a la ‘resistencia requerida¹ de un objeto’ para alguno de las combinaciones denotadas en la [Sección 4.2](#), se tiene que un objeto de resistencia nominal P_n se encontrará en buenas condiciones de resistencia para el método ASD, si se cumple que:

$$P_r \leq \frac{P_n}{\Omega}$$

Siendo $\Omega > 1$ el factor de minoración de tensiones admisibles. En particular, para los estados tensionales con los que se trabajarán, se tiene que:

- **Compresión:** $\Omega = 1.67$ (EI GENERAL PROVISIONS)
- **Flexión:** $\Omega = 1.67$ (F1 GENERAL PROVISIONS)
- **Corte:** $\Omega = 1.50$ (G.2.1.(a) For webs of rolled I-shaped members with $h/t_w < 2.24 EF_y$)

¹ Nótese que se ha eliminado el término ‘último’ en la nomenclatura, y se ha reemplazado por el adjetivo ‘requerido’.

5. MODELO NUMÉRICO DE ELEMENTOS FINITOS

Contando ya con un diseño inicial de la estructura definido en la [Sección 3.2](#), se crea un modelo de elementos finitos que permita realizar el análisis estructural del tanque en el software COMSOL Multiphysics [11]. COMSOL es un software comercial que, mediante la aplicación del método de los elementos finitos, permite resolver problemas de diversas físicas¹ (estática, fluidos, termodinámica, electromagnetismo, etc.). En el caso de estudio, se utilizarán únicamente los módulos correspondientes a la mecánica de sólidos continuos, realizando un análisis estacionario (independiente del tiempo). Se detalla en el presente capítulo las distintas consideraciones adoptadas a la hora de modelar el tanque.

5.1. Hipótesis Fundamentales – Pandeo Lineal Elástico (LBA)

Las hipótesis adoptadas serán utilizadas únicamente como primer acercamiento al comportamiento estructural del tanque ya que permitirán arribar a un diseño que resulte óptimo en el marco de su validez.

Bajo ningún punto de vista las mismas consideran la compleja naturaleza del problema en su totalidad, pero el menor costo computacional que conlleva su análisis justifica su utilización en esta primera etapa. Estas hipótesis serán cuestionadas en futuros trabajos que se realizarán como continuación del presente, en el cual el tanque a analizar será aquel que resulte del presente trabajo como fue mencionado en la introducción.

Las hipótesis planteadas son las correspondientes a un análisis de pandeo elástico y lineal (LBA por sus siglas en inglés), para el cual se considera:

(a) Linealidad Física - Material perfectamente elástico

Se asume la linealidad indefinida del acero. Es decir, que se asume la siguiente relación constitutiva para los materiales involucrados es válida para cualquier nivel de deformación ε :

$$f = E * \varepsilon \quad (6.1)$$

Siendo:

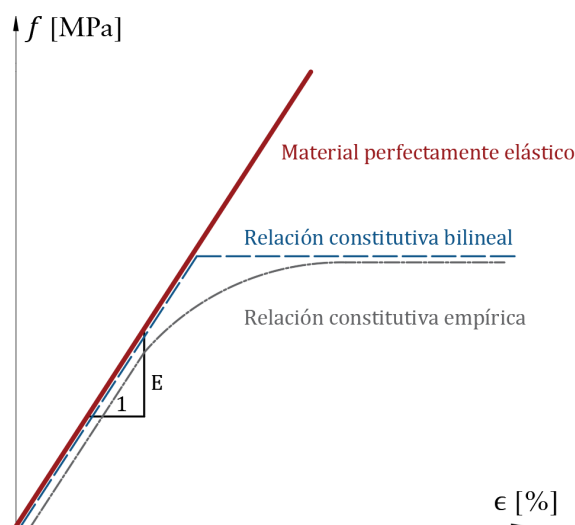


Figura 5.1: Diferentes tipos de relación constitutivas para el acero.

¹ Durante muchos años, los profesionales de distintas áreas científicas se han enfocado por encontrar ecuaciones que permitan predecir el comportamiento de distintos objetos, fluidos, ondas, etc. Cada “física” entonces se caracteriza por una serie de ecuaciones diferenciales a resolver basado en las teorías más aceptadas dentro de cada área de estudio [24].

- f : Tensión a la que está sometida el material.
- E : Módulo de elasticidad del material, en este caso la estructura será ejecutado únicamente con acero por lo que $E = 200000MPa$.

(b) Linealidad Geométrica

A nivel general, la no linealidad geométrica contempla que la relación entre tensiones y corrimientos en la geometría abandona la linealidad, lo que puede derivarse de distintas fuentes:

- El planteo de las ecuaciones de equilibrio en la estructura deformada bajo la acción de cargas, a contraposición de un análisis tradicional donde el análisis se realiza únicamente sobre la posición inicial deformada¹. Este origen de no linealidad es el más comúnmente considerado en los softwares comerciales.
- La no proporcionalidad entre los desplazamientos y las deformaciones.
- Cargas seguidoras: acciones que cambian de dirección conforme la estructura se desplaza.
- Acciones que cambian de magnitud cuando la estructura se desplaza.
- Vínculos cuya reacción depende del grado de desplazamiento de la estructura. Este fenómeno es particularmente estudiado en formulaciones denominadas teorías de contacto.

A diferencia de la linealidad física, diversas experiencias demuestran que la linealidad geométrica posee mayores efectos en estructuras esbeltas de grandes dimensiones como la estudiada [18], ya que su efecto es tanto mayor conforme los desplazamientos crecen en magnitud. Es justamente por este motivo por el cual se busca en futuros trabajos estudiar el efecto que la no linealidad geométrica presenta y así compararlos con un análisis lineal clásico.

Al considerar como válidas *ambas* hipótesis, se tiene como ventaja la posibilidad de prescindir del cálculo recursivo y así evitar calcular sucesivamente la nueva configuración de la estructura, permitiendo aplicar los principios clásicos de la Teoría de la Elasticidad. Esto implica un ***gran ahorro en los tiempos de ejecución de los softwares***, que de otra manera no sería posible ejecutar las numerosas iteraciones en la geometría que se tienen planteadas como objetivo de este trabajo. De esta manera, se limitará la comparación a un diseño optimizado bajo estas hipótesis para simplificar el análisis y tiempos de ejecución numérica.

5.2. Parametrización del modelo

El modelo a utilizar se encontrará ‘parametrizado’ implicando esto que los distintos atributos que se han definido hasta el momento (radio de domo R , diámetro de envolvente D , espesor de cubierta e , etc.) podrán reajustarse para que el modelo se adapte a la nueva geometría.

Así, por ejemplo, las dimensiones de los perfiles rigidizadores, las uniones de los mismos a las chapas y ***toda la geometría queda ligada a los parámetros del tanque***. En particular, se utilizan mayoritariamente superficies paramétricas para el modelado de los elementos ya que como se verá en la próxima sección toda la estructura es representada por elementos de placa (por lo que se requieren dos parámetros para definirlos).

¹ Un desarrollo matemático de lo mencionado se encuentra en el Capítulo 7.

Esto constituye un paso fundamental para las próximas etapas, pues una vez confeccionado y testeado el modelo numérico bastará con cambiar estos parámetros para obtener una geometría del tanque nueva, y poder realizar el análisis estructural correspondiente.

5.3. Tipología de Elementos Finitos

Para la modelización **se adoptaron elementos finitos de cáscara**¹ que se adaptan bien a los elementos estructurales planos y curvos de pequeño espesor con rigidez flexional que forman el tanque. En particular se usó elementos de cascara tipo MITC lagrangeanos cuadráticos implementados en el programa [11].

La adopción de este tipo de elemento *para las vigas* presenta la desventaja de requerir un mayor tiempo de cómputo en los cálculos comparado con los elementos clásicos de barras. Sin embargo, trabajos de investigación respaldan su uso [19][20] y advierten que la convergencia numérica se ve facilitada cuando se involucran otros elementos de cáscara con los que se busca vincular, pues las ecuaciones físicas que gobiernan el problema elástico de ambos elementos son las mismas y no requieren de mayores compatibilizaciones.

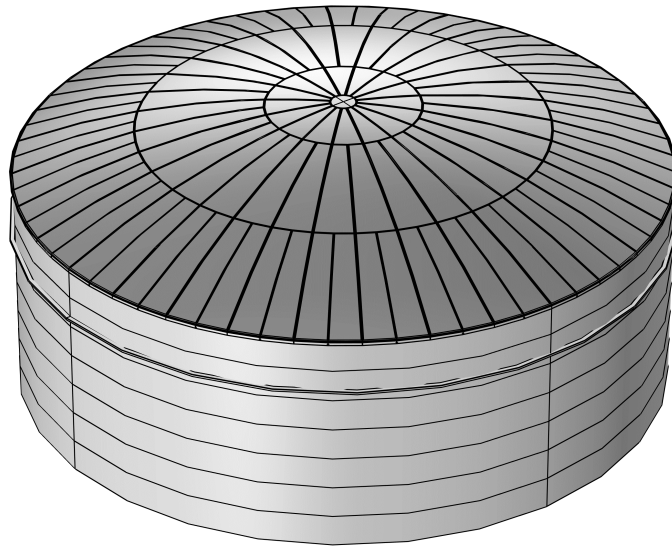


Figura 5.3: Axonometría del modelado realizado en COMSOL.

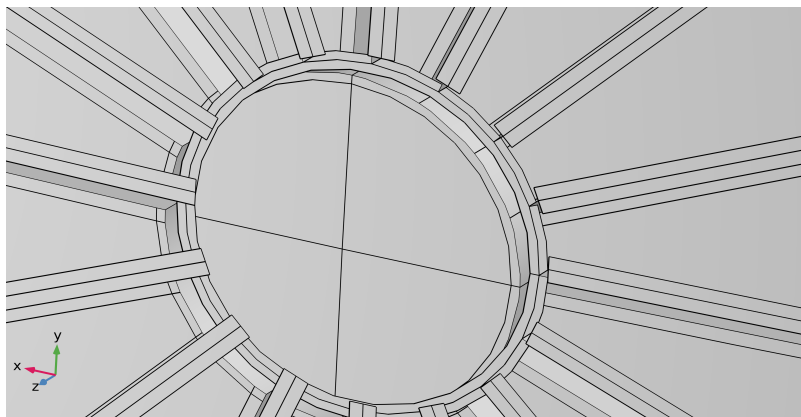


Figura 5.2: Vista inferior anillo central, unión elementos de vigas y

¹ Se denomina elementos de cascara, placa o shell a aquellos en donde dos dimensiones predominan sobre la tercera (espesor). Las ecuaciones diferenciales a resolver por COMSOL están sujetas al tipo de elemento [24].

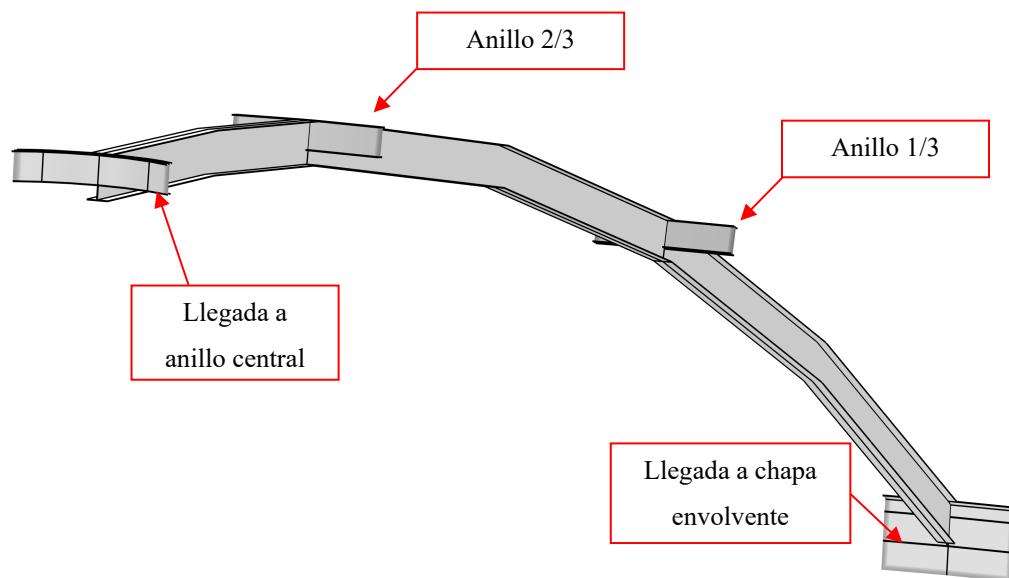


Figura 5.4: Representación aislada de media viga radial VC (completa) con vigas anulares.

5.4. Vinculación

Se considera a la estructura vinculada mediante apoyos fijos simples en el perímetro inferior. Como se mencionó previamente, no se enfocará el análisis en el fondo por lo que se lo excluye del fondo.

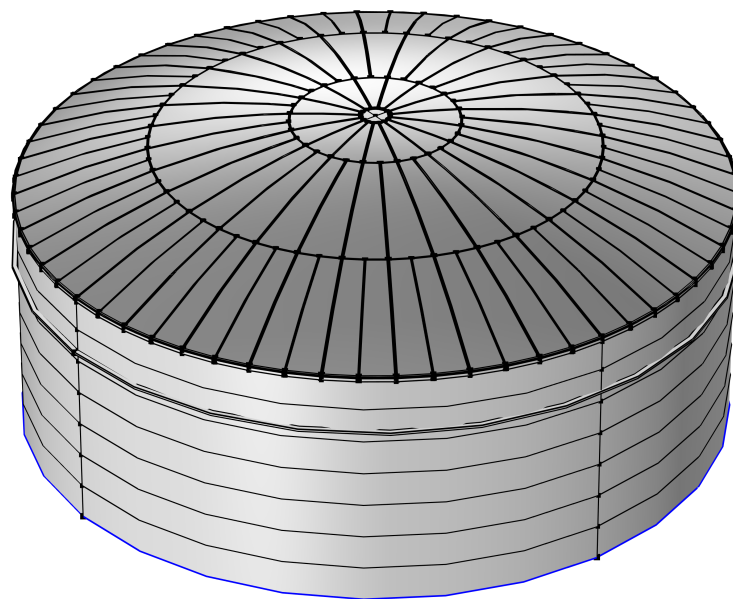


Figura 5.5: En azul - ejes con vinculación fija.

5.5. Mallado

Respetando los elementos de cáscara, la malla consiste en **74957** elementos de contorno y **26569** elementos de arista, lo que se corresponde con un total de **1002618** grados de libertad a resolver. Con estas primicias se puede dar un pantallazo general del modelo ingresado en el programa y que se utilizará en las próximas etapas: En la **Figura 5.6** se observa como en las uniones de los elementos se presenta una mayor densidad de elementos. Esta evaluación se realiza automáticamente por el programa y será reforzada en zonas de interés de resultar así necesario. Se selecciona la discretización ‘Fina’ y se representa en las **Figuras 5.7 y 5.8**.

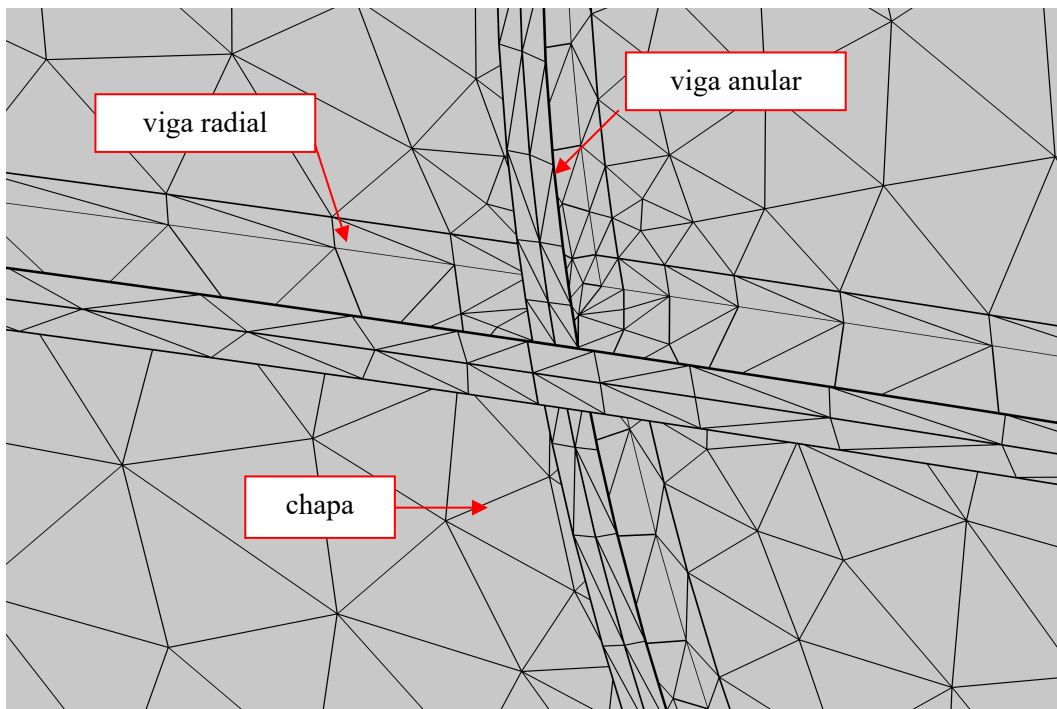


Figura 5.6: Discretización de diferentes elementos de viga y de la chapa.

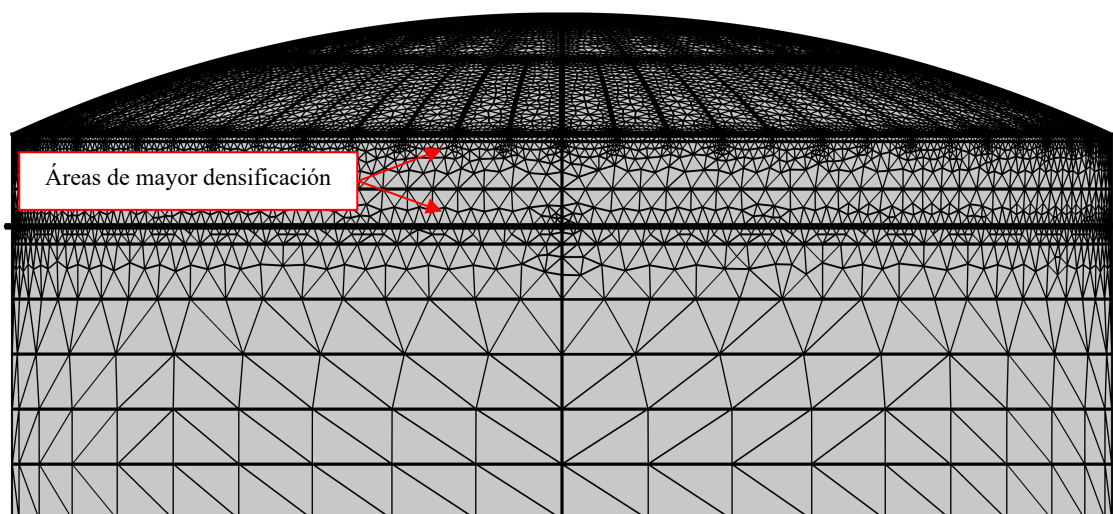


Figura 5.7: Modelo COMSOL – Discretización fina de las paredes del tanque, creciente con altura.

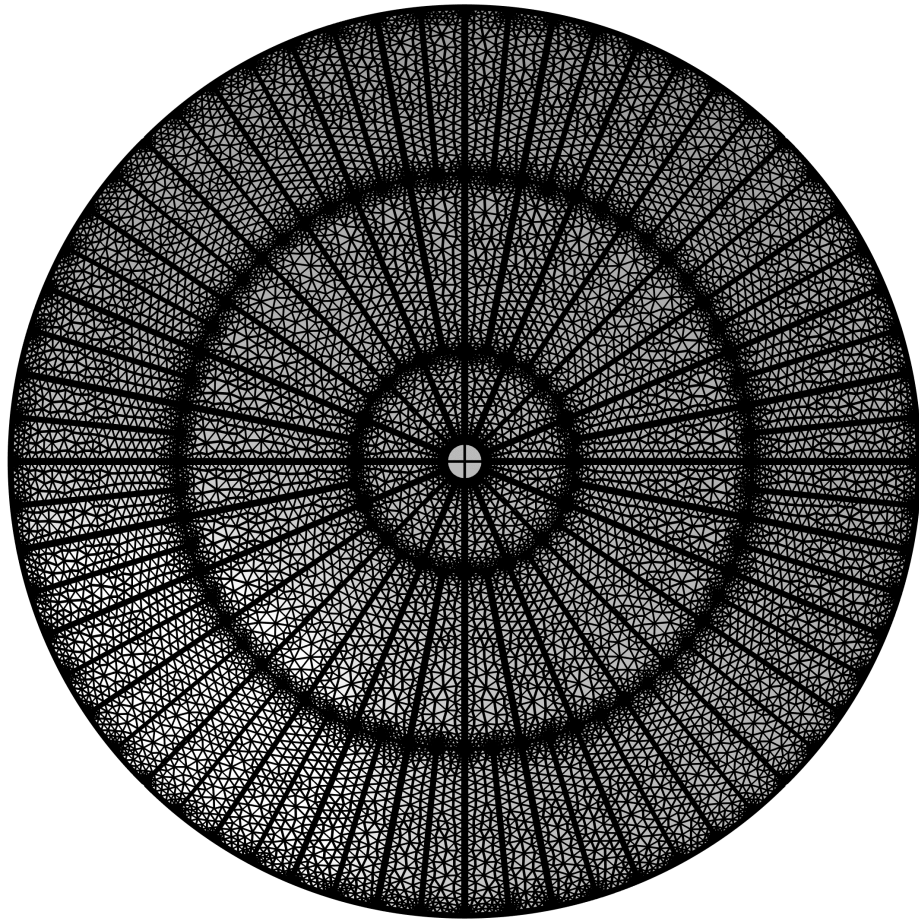


Figura 5.8: Modelo COMSOL - Discretización de los elementos de chapa en planta.

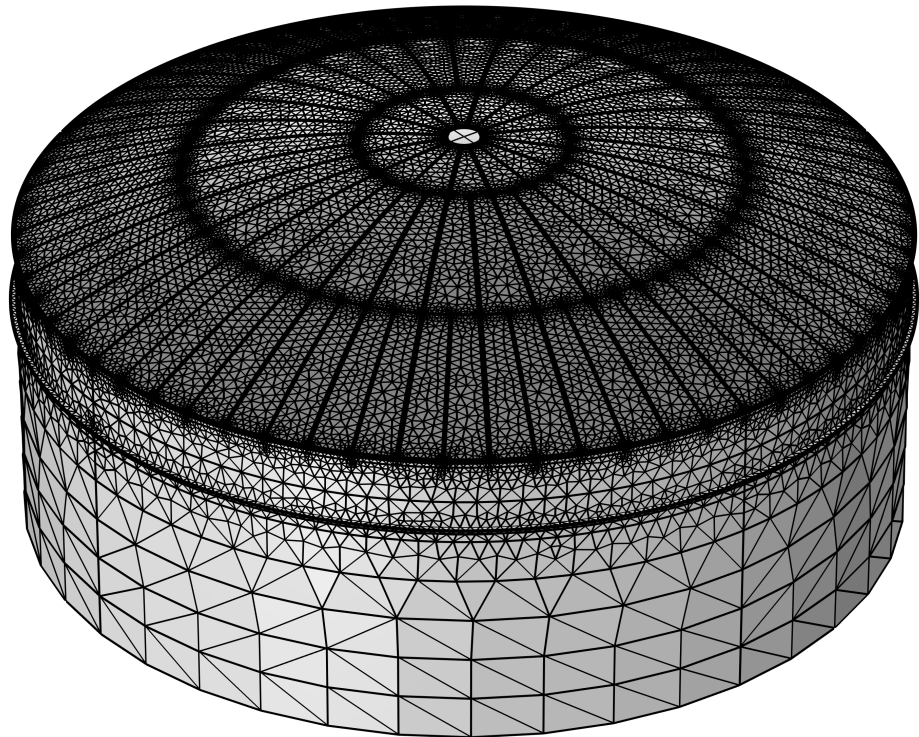


Figura 5.9: Modelo COMSOL - Discretización de los elementos de chapa en axonometría.

6. ANÁLISIS ESTRUCTURAL LINEAL ESTÁTICO

A partir del modelo realizado en el [Capítulo 5](#) de la geometría del tanque inicial propuesto en la [Sección 3.2.](#), el objetivo de esta sección es realizar el análisis lineal y estático de la estructura propuesta, siempre considerando como válidas las hipótesis indicadas en la [Sección 5.1.](#) y así poder dimensionar la estructura en cuestión adoptando dimensiones en los perfiles.

6.1. Filosofía del dimensionamiento

Se verifica el diseño estructural propuesto de acuerdo con los estándares de la norma API [2] y AISC [10] para las ocho combinaciones nominales explicitadas en el [Capítulo 4](#). Se evalúan:

- Los esfuerzos internos a los que están sometidos los elementos estructurales de tipo viga radiales.
- Las tensiones a las que se encuentra sometida la chapa de la cubierta.

Perfiles

Al modelizar la estructura con elementos de placa dichos esfuerzos se obtienen por medio de la integración de tensiones normales en un número finito de secciones propuestas. Con este objetivo se definen un total de cinco secciones por tramo de viga, en los apoyos, a los cuartos y a la mitad de la luz de un tramo. Un ejemplo se indica en la **Figura 6.1.** para las vigas meridionales, con un total de 26 secciones.

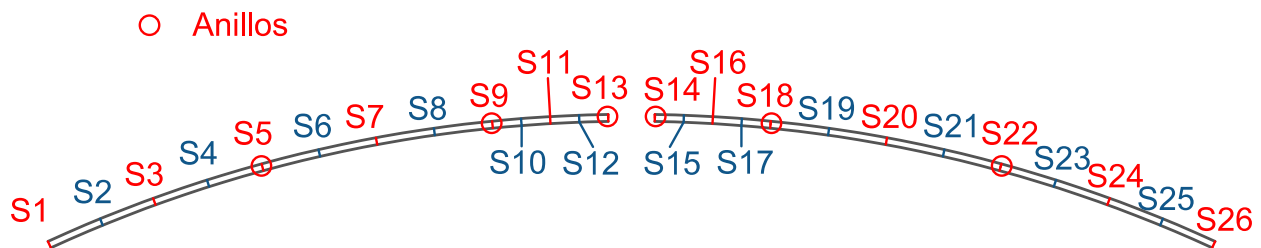


Figura 6.1.: Secciones en las vigas meridianas para las verificaciones estructurales.

Al evaluar el diagrama de corte en dichas secciones y de resultar necesario, se dispondrá una sección adicional en la sección de corte nulo para así obtener el máximo momento flector.

Cabe destacar *que el diseño de los perfiles contempla los efectos de las no linealidades físicas* como lo son las tensiones residuales y plastificaciones parciales, ya que el reglamento contempla en sus verificaciones dichos efectos. Esto marca una diferencia del análisis que se realizará sobre la chapa, puramente elástico.

Los perfiles se encontrarán sometidos a una combinación de esfuerzos axiales, momentos flectores y esfuerzos de corte asociados, que serán verificados con las fórmulas de interacción dados en la sección H1.1 de la norma AISC[10], para perfiles doblemente simétricos, siendo la misma:

$$\begin{aligned} \frac{P_r}{P_c} \geq 0.2 &\rightarrow \frac{P_r}{P_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.00 \\ \frac{P_r}{P_c} < 0.2 &\rightarrow \frac{P_r}{2P_c} + \left(\frac{M_{rx}}{M_{cx}} + \frac{M_{ry}}{M_{cy}} \right) \leq 1.00 \end{aligned} \quad (6.1)$$

Donde:

- P_r : el esfuerzo axial requerido (compresión o tracción).
- M_{rx} : el momento requerido en el eje de mayor inercia del perfil.
- M_{ry} : el momento requerido en el eje de menor inercia del perfil.
- P_c : la resistencia disponible o de diseño de la sección sometida únicamente a esfuerzo axial (compresión o tracción). Se obtiene de dividir la resistencia nominal por $\Omega = 1.67$ ([Sección 4.3](#)).
- M_{rx} : la resistencia disponible o de diseño de la sección sometida únicamente a momento flector en su eje de mayor inercia. Se obtiene de dividir la resistencia nominal por $\Omega = 1.67$ ([Sección 4.3](#)).
- M_{ry} : la resistencia disponible o de diseño de la sección sometida únicamente a momento flector en su eje de menor inercia. Se obtiene de dividir la resistencia nominal por $\Omega = 1.67$ ([Sección 4.3](#)).

Chapa

Para la chapa de la cubierta, se verifica únicamente que la tensión en cualquier punto de la misma no exceda a la tensión de fluencia.

6.2. Consideraciones

En la presenta sección se abordarán las distintas consideraciones o hipótesis de cálculo que fueron adoptadas para el correspondiente análisis estructural.

(a) Nomenclatura

Debido a la gran cantidad de perfiles que se encuentran en la estructura de la cubierta, se ha adoptado un único criterio para su nomenclatura que se encuentra representado en la **Figura 6.2**. La nomenclatura se enuncia de la siguiente manera:

$$V\{A: 1/3 ; B: 2/3 ; C: completa\} \{\text{ángulo en sentido antihorario más próximo en sentido } x+\}$$

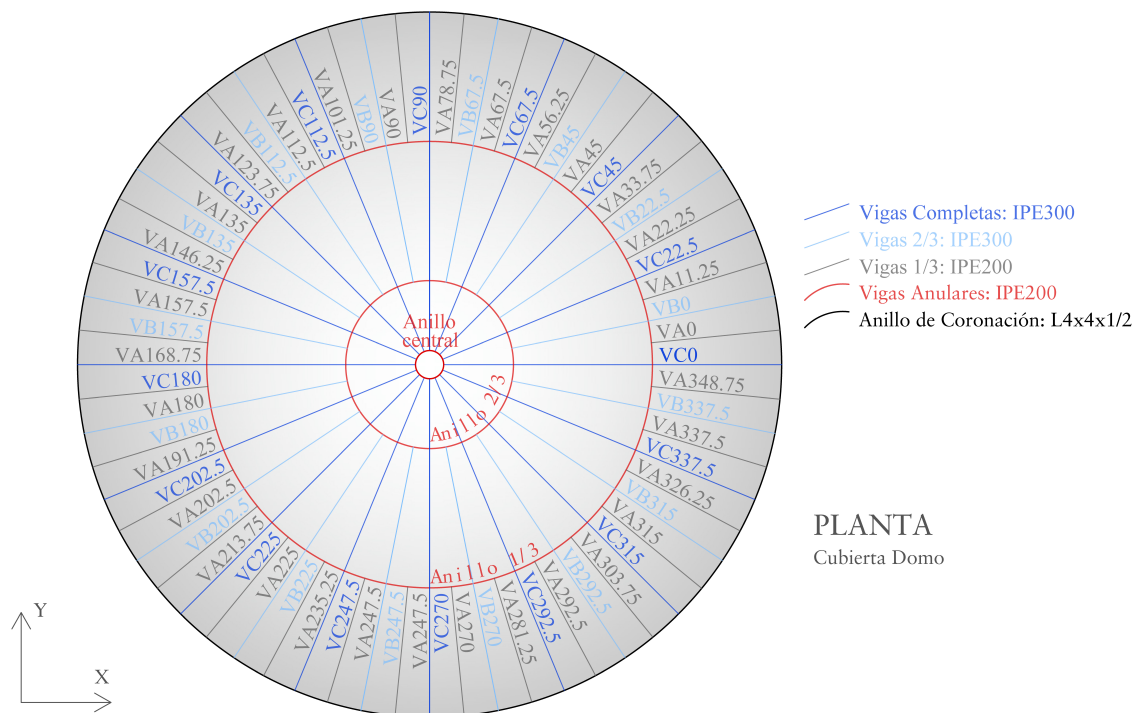


Figura 6.2: Nomenclatura de las vigas y anillos.

(b) Interacción monolítica de chapa de cubierta-vigas

Dentro del modelo, la conexión de ambos elementos se da de manera monolítica, lo que se materializa mediante soldadura. Esto implica que el ala superior de los perfiles se ve completamente arriostrada y que parte de la carga exterior viajará por la chapa. Un ejemplo se presenta en la **Figura 5.3**, en donde se denota la interacción de las vigas completas que llegan al anillo central con la chapa de cubierta.

Hipótesis de cálculo para las vigas

Los parámetros de diseño considerados, para cada perfil, son los presentados en la **Tabla 6.1**:

Tabla 6.1: Parámetros de cálculo para Vigas completas (VC en **Figura 6.2**) y Vigas 2/3 (VB en **Figura 6.2**).

Parámetro	Descripción	Valor	Criterio
L_x [m] (*)	Luz de pandeo flexional - mayor inercia	1005.31	Long. mayor entre anillos.
L_y [m]	Luz de pandeo flexional - menor inercia.	0.00	Arriostrada por chapa.
L_b sup [m]	Pandeo torsional: luz no arriostrada Ala sup. Comp.	0.00	Arriostrada por chapa.
L_b inf [m]	Pandeo torsional: luz no arriostrada Ala inf. Comp.	974.94	Long. entre borde y anillo 1/3.
C_b inf.	Factor por diagramas de momento flector no uniformes.	1.17	Según diagrama de momentos.
M_{nx} inf [kNm]	Momento nominal de la barra - Ala inf. Comp.	50.11	$(L_r < L_b) \rightarrow$ Elástico.
M_{nx} sup [kNm]	Momento nominal de la barra - Ala sup. Comp.	150.72	$(L_b < L_p) \rightarrow$ Plástico.
P_n [kN]	Esfuerzo de compresión nominal de la barra.	929.05	$F_{cr} = 17.27 \text{ kN/cm}^2$.
V_n [kN]	Esfuerzo nominal de corte en la barra.	254	$h/t_w < 2.24\sqrt{E/F_y}$ (G2.1).

(*) Determinar la luz de pandeo flexional de las vigas completas y 2/3 presenta un desafío, pues en primera instancia no se tiene certeza sobre si las vigas anulares cumplen funciones de arriostramiento para los perfiles. Para analizar el caso se recurre al modelo de barras que se cuenta como antecedente [16], y se lleva al entramado de perfiles hasta el primer modo de pandeo, se observa en las **Figuras 6.3. y 6.4.** que la distancia entre puntos de inflexión corresponde aproximadamente con la distancia entre anillos para los estados de carga observados:

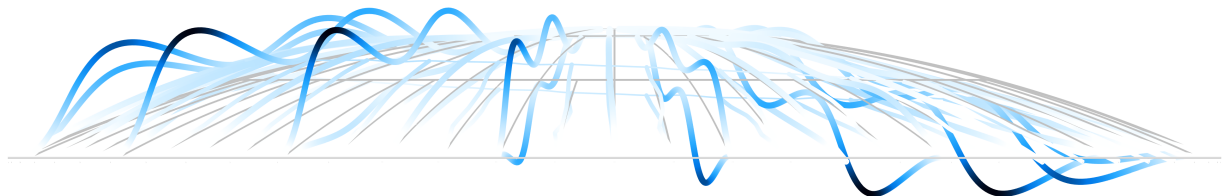


Figura 6.3: Vista frontal de primer modo de pandeo flexional en mayor inercia de los perfiles radiales.
[Modelo simplificado con elementos de barra]

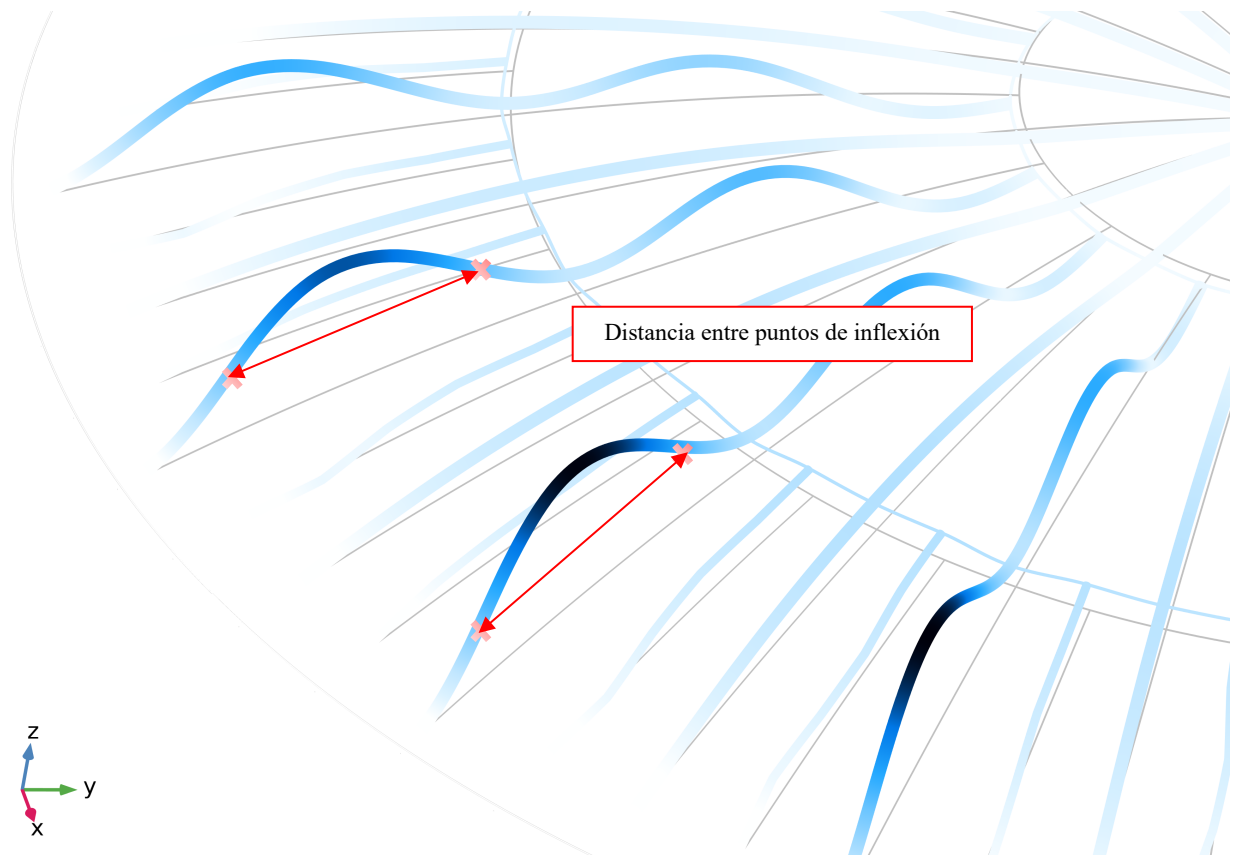


Figura 6.4: Luz de pandeo flexional de las vigas completas y 2/3.
[Modelo simplificado con elementos de barra]

Para los perfiles 1/3 (VA en **Figura 6.2**), se tienen las propiedades indicadas en la **Tabla 6.2**:

Tabla 6.2: Parámetros de cálculo para Vigas 1/3.

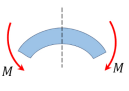
Parámetro	Descripción	Valor	Criterio
L_x [m]	Luz de pandeo flexional - mayor inercia.	974.94	Longitud de viga.
L_y [m]	Luz de pandeo flexional - menor inercia.	0.00	Arriestrada por chapa.
L_b sup [m]	Pandeo torsional: luz no arriestrada Ala sup. Comp.	0.00	Arriestrada por chapa.
L_b inf [m]	Pandeo torsional: luz no arriestrada Ala inf. Comp.	974.94	Long. entre borde y anillo 1/3.
C_b inf.	Factor por diagramas de momento flector no uniformes.	1	Diagrama de momentos.
M_{nx} inf [kNm]	Momento nominal de la barra - Ala inf. Comp.	13.10	$(L_r < L_b) \rightarrow$ Elástico.
M_{nx} sup [kNm]	Momento nominal de la barra - Ala sup. Comp.	52.80	$(L_b < L_p) \rightarrow$ Plástico.
P_n [kN]	Esfuerzo de compresión nominal de la barra.	336.05	$F_{cr} = 11.79 \text{ kN/cm}^2$.
V_n [kN]	Esfuerzo nominal de corte en la barra.	128	$h/t_w < 2.24\sqrt{E/F_y}$ (G2.1).

6.3. Verificaciones de los perfiles

Con las consideraciones realizadas en el capítulo anterior y siguiendo el procedimiento detallado en la norma AISC [10], se realizan las verificaciones estructurales en base a la expresión de interacción (6.1). Mientras el procedimiento se encuentra en el [Anexo B](#), en la **Tabla 6.3** se encuentran los resultados.

(a) Perfiles radiales

Tabla 6.3: Verificaciones de los perfiles radiales con la fórmula de interacción H1.1 de AISC [10].

Esfuerzo Crítico	VIGA - SECCIÓN Ubicación esfuerzos	Combinación de carga crítica	Esfuerzos concomitantes	Valor	Valor en Interacción
Mayor momento tracción fibras superiores 	VC225-S3	c.2) Wind and Internal Pressure ($D + 0.4P_i + W_2$)	M_{rx} [kNm] 18.0 M_{ry} [kNm] 0.0 P_r [kN] 101.7 V_r [kN] 0.0	0.69	
	VB135-S3	c.2) Wind and Internal Pressure ($D + 0.4P_i + W_2$)	M_{rx} [kNm] 18.7 M_{ry} [kNm] 0.0 P_r [kN] -80.4 V_r [kN] 0.0	0.69	
	VA135-S5	c.2) Wind and Internal Pressure ($D + 0.4P_i + W_2$)	M_{rx} [kNm] 5.9 M_{ry} [kNm] 0.0 P_r [kN] 16.5 V_r [kN] 0.0	0.80	
	VC90-S3	e.4) Gravity Loads ($D+L_r+0.4P_e$)	M_{rx} [kNm] 18.9 M_{ry} [kNm] 0.0 P_r [kN] -80.1 V_r [kN] 0.0	0.24	
	VB135-S3	e.4) Gravity Loads ($D+L_r+0.4P_e$)	M_{rx} [kNm] 18.7 M_{ry} [kNm] 0.0 P_r [kN] -80.4 V_r [kN] 0.0	0.24	
	VA90-S3	e.4) Gravity Loads ($D + L_r + 0.4P_e$)	M_{rx} [kNm] 2.1 M_{ry} [kNm] 0.0 P_r [kN] 65.6 V_r [kN] 0.8	0.20	
Mayor compresión 	VC202.5-S2	c.2) Wind and Internal Pressure ($D + 0.4P_i + W_2$)	M_{rx} [kNm] 10.2 M_{ry} [kNm] 0.0 P_r [kN] 129.8 V_r [kN] 7.7	0.54	
	VB135-S2	c.2) Wind and Internal Pressure ($D + 0.4P_i + W_2$)	M_{rx} [kNm] 10.3 M_{ry} [kNm] 0.0 P_r [kN] 129.7 V_r [kN] 8.9	0.55	
	VA180-S2	c.2) Wind and Internal Pressure ($D + 0.4P_i + W_2$)	M_{rx} [kNm] 2.1 M_{ry} [kNm] 0.0 P_r [kN] 65.6 V_r [kN] 0.8	0.57	

(b) Perfiles angulares

Los anillos anulares se encuentran principalmente sometidos a esfuerzo axial de pequeño valor (40 kN) y fuertemente arriostrados (por lo que pueden desarrollar su capacidad plástica), por lo que se prescinde de su verificación. Metodologías Europeas para el cálculo estático de tanques con cubiertas autoportantes no exigen, por estos motivos, su cálculo riguroso [21], pero recomiendan dimensiones mínimas que fueron tomadas en consideración.

(c) Estados críticos

De la **Tabla 6.3** se destacan dos estados de carga que resultan críticos:

- El Estado c.2) $D + W + 0.4P_i$ de **Succión** en la cubierta.
- El Estado e.4) $D + L_r + 0.4P_e$ de **Presión** en la misma.

A modo de simplificación, *se trabajará únicamente con estos dos estados* para realizar futuros análisis en la cubierta y de pandeo lineal. Se destaca que el estado de presión presenta simetría rotacional, mientras que el estado de succión no.

6.4. Verificaciones en la chapa de cubierta

La modelación en conjunto de los perfiles con la chapa permite considerar y comprender la interacción estructural que estos elementos presentan.

(a) Teoría membranar de cáscaras

En la teoría de placas y al representar a la estructura mediante su plano medio, corresponde describir los esfuerzos internos como esfuerzos por unidad de espesor. En particular y coincidiendo con la nomenclatura provista por COMSOL, los esfuerzos se representan mediante dos direcciones principales: 1-1 descripta por arcos radiales y 2-2 circunferencial con arcos concéntricos con la envolvente. Estos esfuerzos se representan en la **Figura 6.7**.

La **teoría membranar**, cuyo nombre proviene de lo que le sucede a un parche o membrana bajo la acción de cargas, explica como los elementos curvos espaciales (cáscaras) pueden equilibrar cualquier estado de cargas externo mediante solamente esfuerzos normales y tangenciales, sin esfuerzos flexionales [22]. De coexistir ambos, el mecanismo resistivo predilecto de una cáscara será aquel en el que los **esfuerzos membranar** (normales, tangenciales) predominen por sobre las flexiones, pues esta configuración es la que significa un menor trabajo de deformación almacenado.

La teoría pierde validez rápidamente cuando no se respetan las **condiciones de borde** adecuadas, para lo cual la vinculación de la cáscara debe poder brindar una reacción tangencial adecuada, según la **Figura 6.5**:

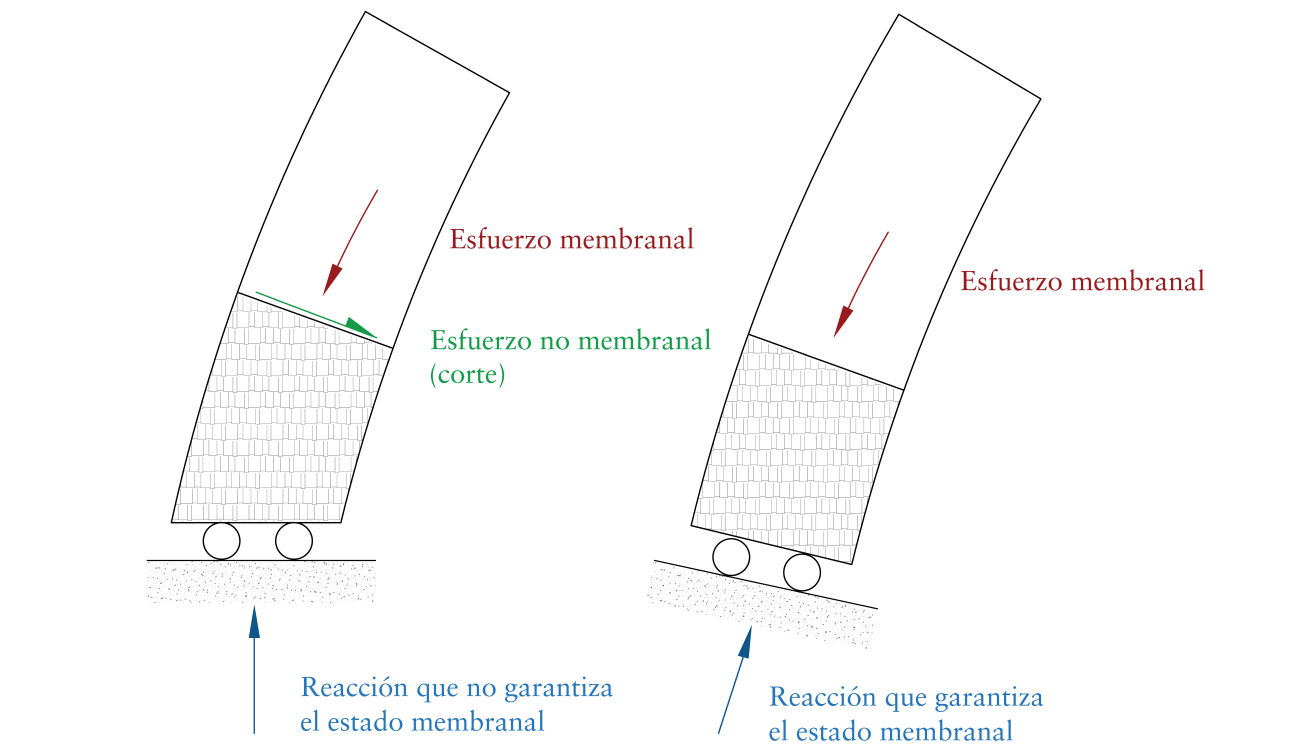


Figura 6.5: Condiciones de borde (a) inadecuadas y (b) adecuadas para preservar el estado membranar.
[Adaptación del apunte de la Dra. Maria Delia Crespo [22]]

La aplicación de esta teoría en el caso de estudio permite:

- Prever que la chapa de la cubierta equilibre las acciones externas desarrollando principalmente esfuerzos normales.
- Pautar las condiciones que se deben considerar para favorecer las condiciones de borde para que la cubierta se acerque al comportamiento dictado por la teoría membranar.

(b) Tensiones en la cubierta

Habiendo ya introducido el interés por los esfuerzos membranales y recordando que se tienen dos estados que resultaron críticos en base al análisis realizado en la [Sección 6.3](#), aquel de presión ($D_L + L_r + 0,4 P_e$) y succión ($D+W_2+0.4P_i$). Se analizan las tensiones en dos planos de la chapa de cubierta, uno coincidente con el eje X y otro con el eje Y, como se indica en la **Figura 6.6**. Se evalúan las tensiones a lo largo de la longitud de arco s (ver Figura 6.5), siendo S el desarrollo total, la coordenada s/S delimita un punto sobre el plano de corte.

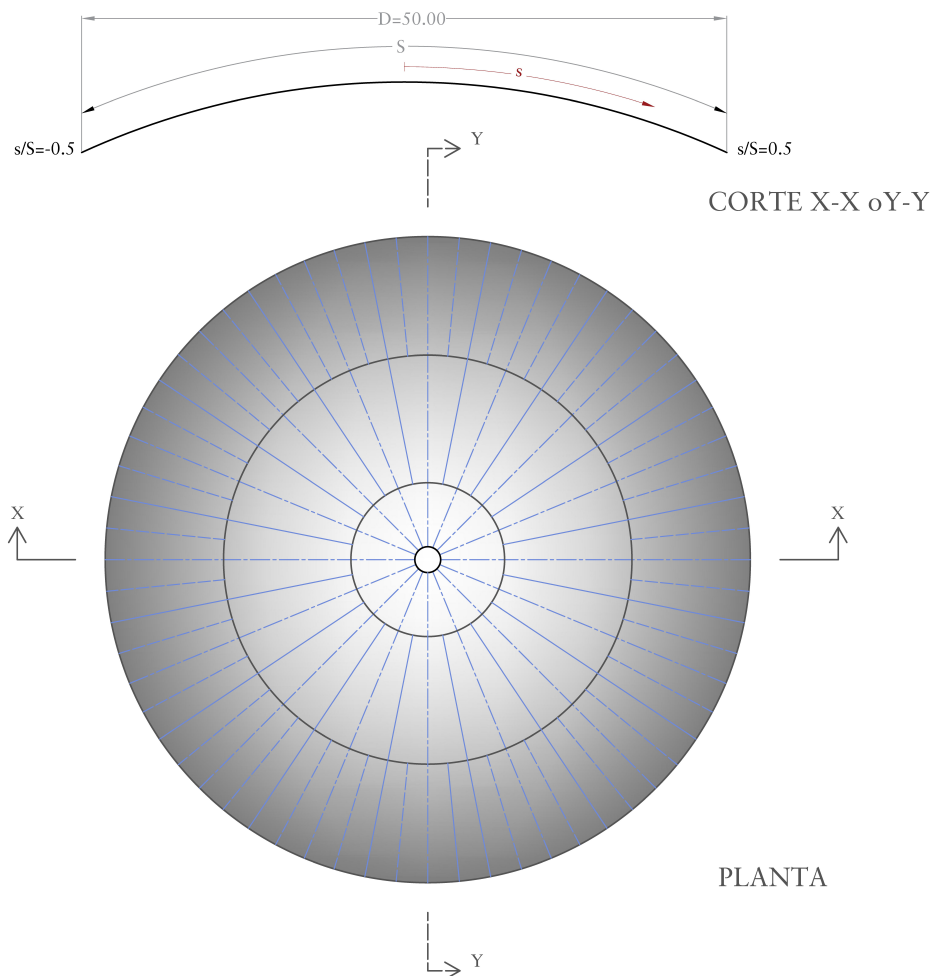


Figura 6.6: Planos de corte X-X e Y-Y para analizar tensiones en cubierta.

Las tensiones se dividen en dos grupos: las radiales (denotadas 1-1) y las circunferenciales (denotadas 2-2), esto se ilustra en la **Figura 6.7** para una porción de chapa de cubierta. Los resultados se encuentran en las **Figuras 6.8 y 6.9**. Se representa a las tensiones producidas para el **Estado de Presión en color rojo**, y para el **Estado de Succión en color azul**. Se adopta como convenio que las **tensiones de tracción sean positivas**.

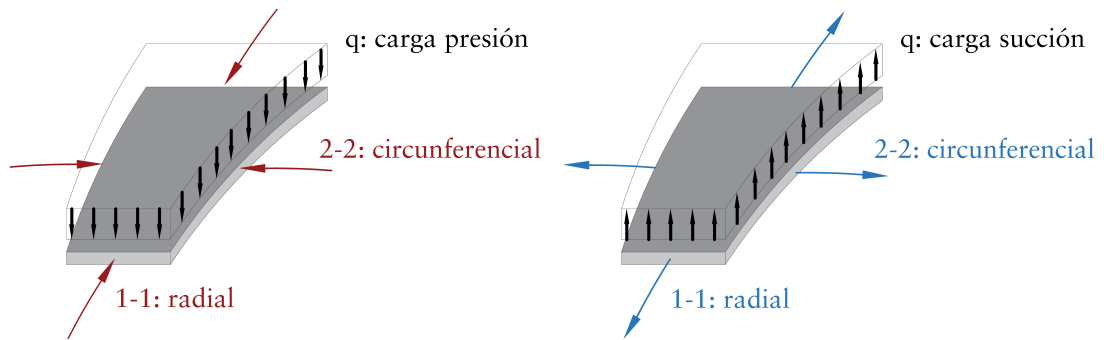


Figura 6.7: Esfuerzos membranales para caso de presión (izquierda) y succión (derecha).

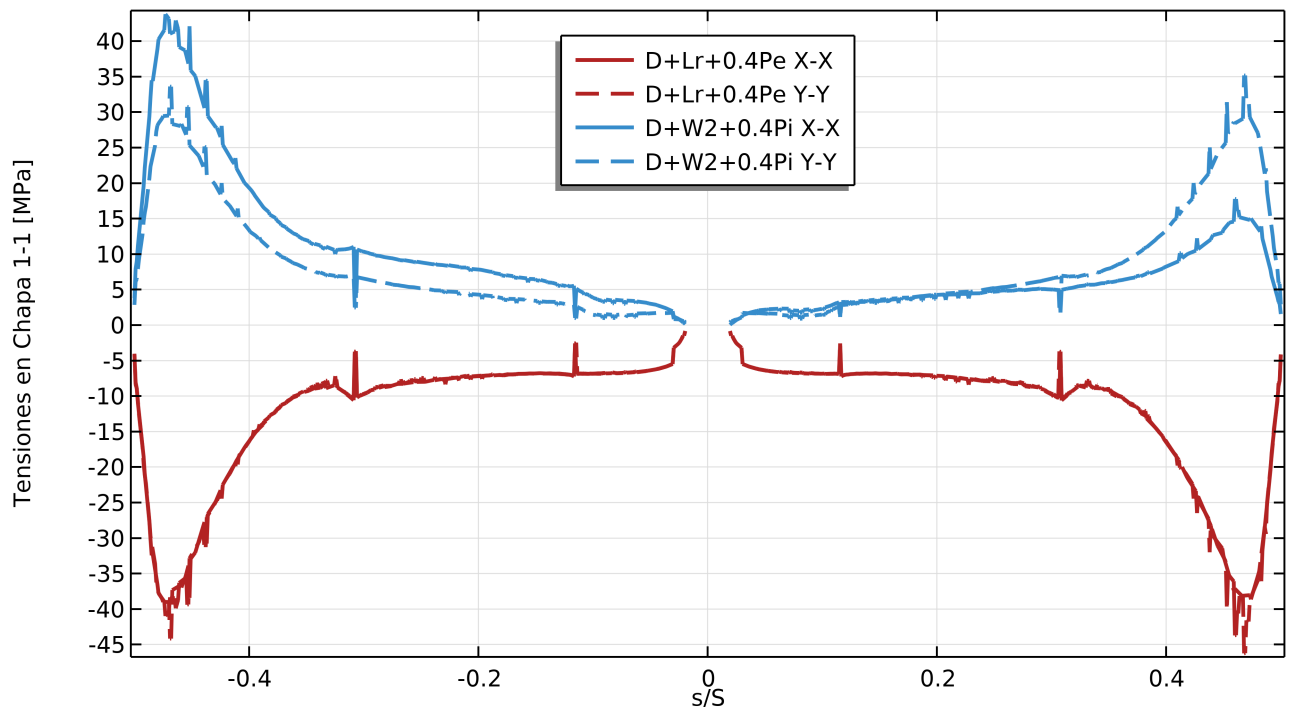


Figura 6.8: Tensiones 1-1 en el desarrollo del arco de cubierta. (Signos +T -C)

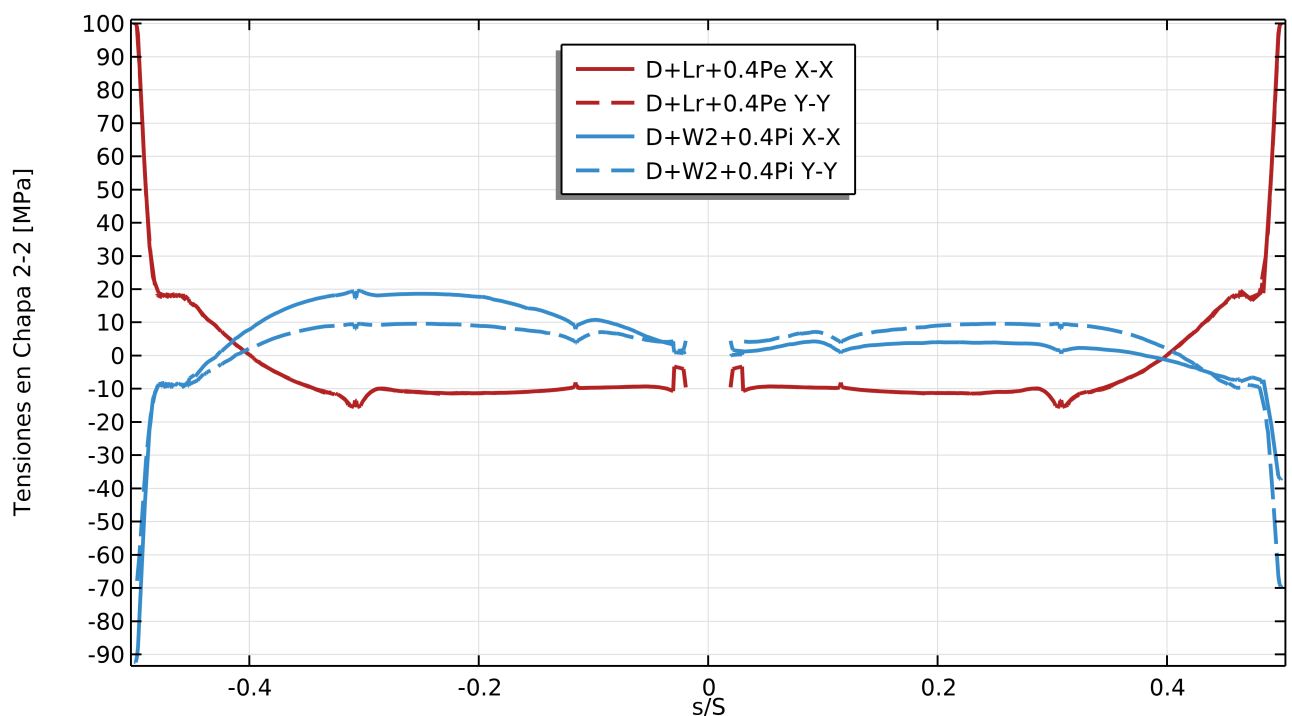


Figura 6.9: Tensiones 2-2 en el desarrollo del arco de cubierta. (Signos +T -C)

De las figuras anteriores, se realizan las siguientes observaciones:

- En ningún punto de la cubierta las tensiones superan el valor de la tensión de fluencia (240 MPa).
- Se experimenta un marcado cambio en el valor de las tensiones en la zona cercana de los bordes (*).
- En particular, mientras las tensiones 1-1 radiales muestran un marcado aumento sin cambiar su signo, las tensiones 2-2 circunferenciales experimentan un cambio de signo y alcanzan valores superiores en una zona aún más acotada (**).

(*) Esto se asocia a las perturbaciones de borde del estado membranar detalladas en la [Sección 6.4.\(a\)](#). La envolvente cilíndrica tiene escasa rigidez horizontal y al giro lo que obliga al domo a resolver el equilibrio de sus cargas exterior mayormente con cargas verticales. Las cargas verticales forman un ángulo grande con la tangente al domo en la unión generando esfuerzos de corte que distorsionan los esfuerzos membranales en el domo. En las zonas cercanas a la cúspide del domo este efecto se disipa, y el esfuerzo meridiano del estado $D_L + L_r + 0,4 P_e$, se estabiliza en valores relativamente menores de compresión mientras que el estado $D_L + W + 0,4 P_i$ lo hace hacia valores de tracción.

(**) Los esfuerzos circunferenciales en la unión del domo con la chapa, para el estado $D_L + L_r + 0,4 P_e$, asumen valores elevados de tracción producto de la tendencia a incrementar el diámetro de la envolvente dado por las cargas descendentes sin que esta lo pueda impedir. Situación contraria ocurre con el estado $D_L + W + 0,4 P_i$. Visualmente, esto puede observarse representando las tensiones membranales circunferenciales en un mapa de calor, como se observa en la **Figura 6.10**:

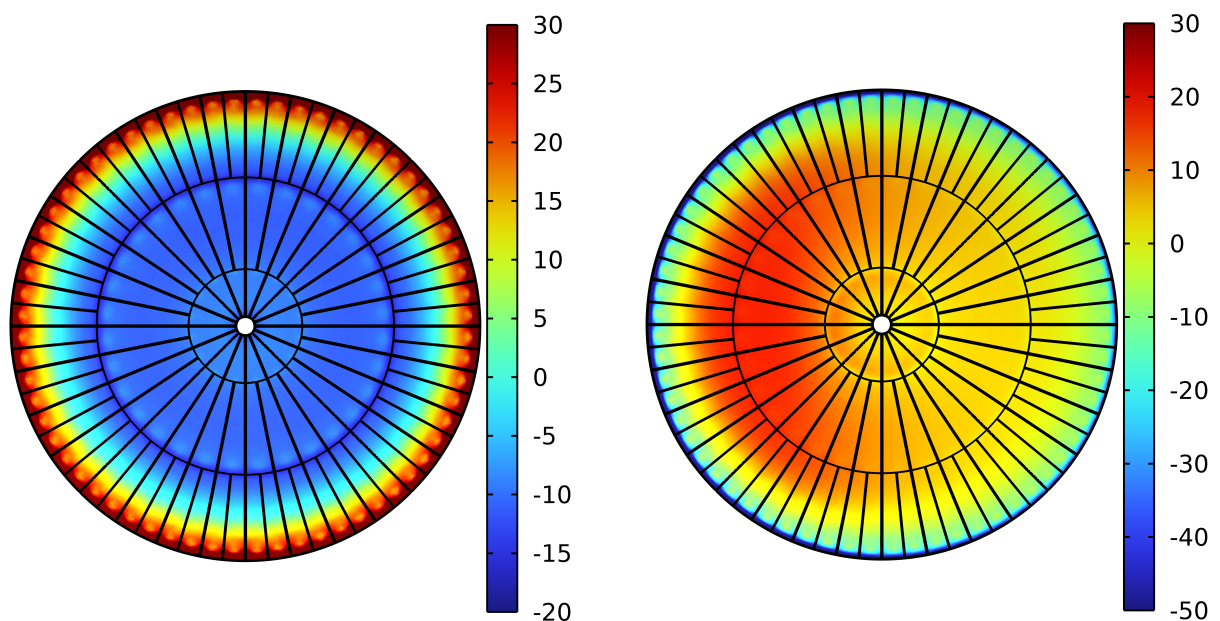


Figura 6.10: Mapa de calor de tensiones 2-2 para estado presión (izquierda) y succión (derecha). Valores de las tensiones en MPa, los valores positivos indican tensiones de tracción.

6.5. Control de desplazamientos

Del mapa de calor representado en la **Figura 6.11**, correspondiente a un campo de desplazamientos, se observa que **el mayor valor de desplazamiento obtenido es de 3.3 centímetros** en el sentido vertical, producido por la combinación e.4) $D_L + L_r + 0,4 P_e$. El mismo se manifiesta aproximadamente a la mitad de la luz de los perfiles VC ‘completos’.

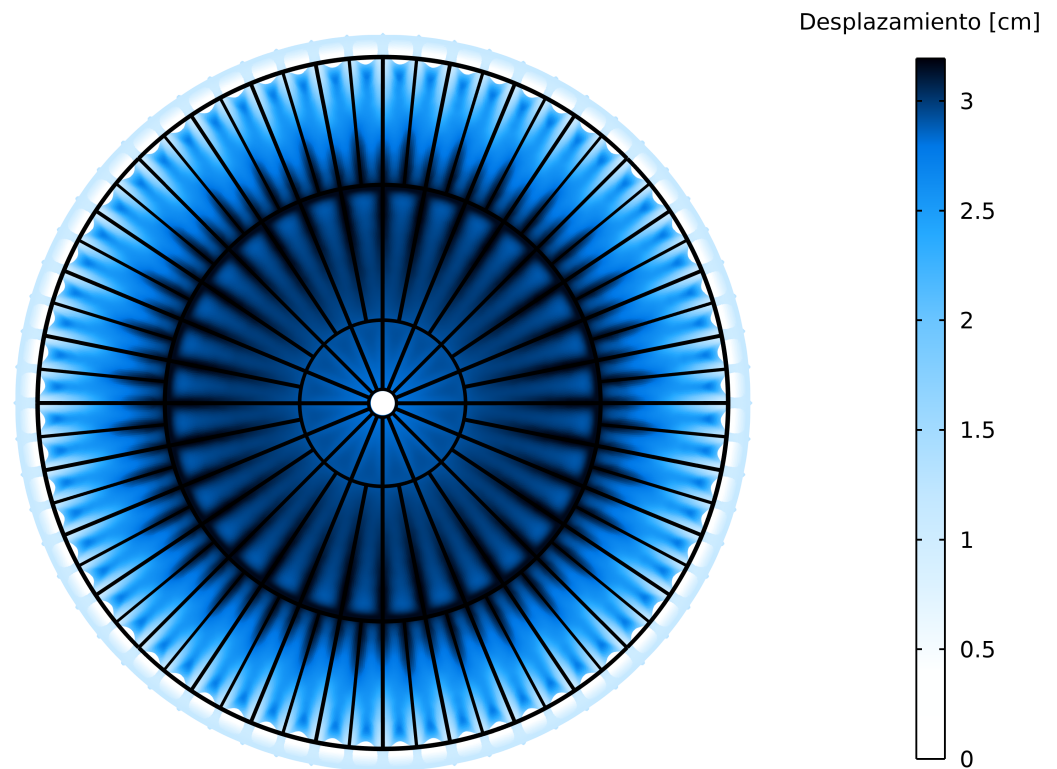


Figura 6.11: Campo de desplazamientos en la cubierta. Valores en centímetros.

Este desplazamiento resulta alejado de los límites que suelen imponerse (del orden de $D/200=25\text{cm}$) para los desplazamientos máximos de cubiertas, y considerando las grandes dimensiones de la misma, se infiere que la rigidez aportada por el sistema de vigas fue satisfactoria para la puesta en servicio del tanque.

7. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE PANDEO LINEAL DE CHAPA

7.1. Planteo Teórico

Este tipo de análisis permite estimar a qué nivel de carga la estructura se vuelve inestable. En un paso inicial se realiza el análisis lineal de primer orden para cada uno de los dos estados de cargas considerados más riesgosos para la cubierta; $D_L + L_r + 0,4 P_e$ y $D_L + W_2 + 0,4 P_i$.

Por otro lado, el pandeo lineal parte del sistema de ecuaciones básico que resuelve el método de los elementos finitos:

$$K u = f \quad (7.1)$$

Donde f es la carga estática aplicada, K la matriz de rigidez del sistema y u el vector de desplazamientos correspondientes con f . La matriz de rigidez se puede descomponer en una parte lineal K_L y no lineal K_{NL} resultando:

$$(K_L + K_{NL}) u = f \quad (7.2)$$

En una aproximación lineal como la tratada se asume que la matriz K_{NL} mantiene proporcionalidad con las tensiones en la estructura y, por lo tanto, con las cargas exteriores. Resolviendo el paso lineal de primer orden para alguno de los dos estados de cargas nominales mencionado f_0 se obtiene el vector de desplazamientos u_0 :

$$K_L u_0 = f_0 \quad (7.3)$$

Se reescribe la ecuación (7.2) para un nivel de carga mayor λ mayor a la carga nominal λf_0 .

$$(K_L + \lambda K_{NL}(u_0))u = \lambda f_0 \quad (7.4)$$

La estructura se vuelve inestable cuando el sistema de ecuaciones resulta singular, situación que puede obtenerse resolviendo el problema de autovalores:

$$(K_L + \lambda K_{NL}(u_0))u = 0 \quad (7.5)$$

De esta manera ahora λ es el multiplicador de la carga que hace que el sistema se vuelva inestable. Si λ resulta mayor a 1 significa que la combinación de cargas salida del análisis lineal de primer orden que se utilizó para la linealización no genera inestabilidad en caso contrario si lo provoca. Por otro lado, los autovectores obtenidos de (7.5) indican la forma y lugar donde se produce la inestabilidad asociada al λ correspondiente.

7.2. Análisis de pandeo lineal

Del análisis de pandeo lineal conducido en el programa COMSOL, se obtienen los autovalores presentados en la **Tabla 7.1**:

Tabla 7.1: Autovalores para los estados críticos.

Autovalores λ	
Presión $D + L_r + 0.4P_e$	Succión $D + W_2 + 0.4P_i$
0.53	0.63

(a) Modo de pandeo de presión: $D_L + L_r + 0,4 P_e$

Para el estado de presión $D_L + L_r + 0,4 P_e$, el primer modo de pandeo se presenta para un autovalor igual a $\lambda = 0.53$. Se ubica en el primer tercio de la chapa, en la zona entre la envolvente y el primer anillo. El modo se da en distintas posiciones simétricas respecto del eje del tanque con pequeños saltos entre sus valores, se gráfica la forma del modo en una única posición en las **Figuras 7.1 y 7.2**.

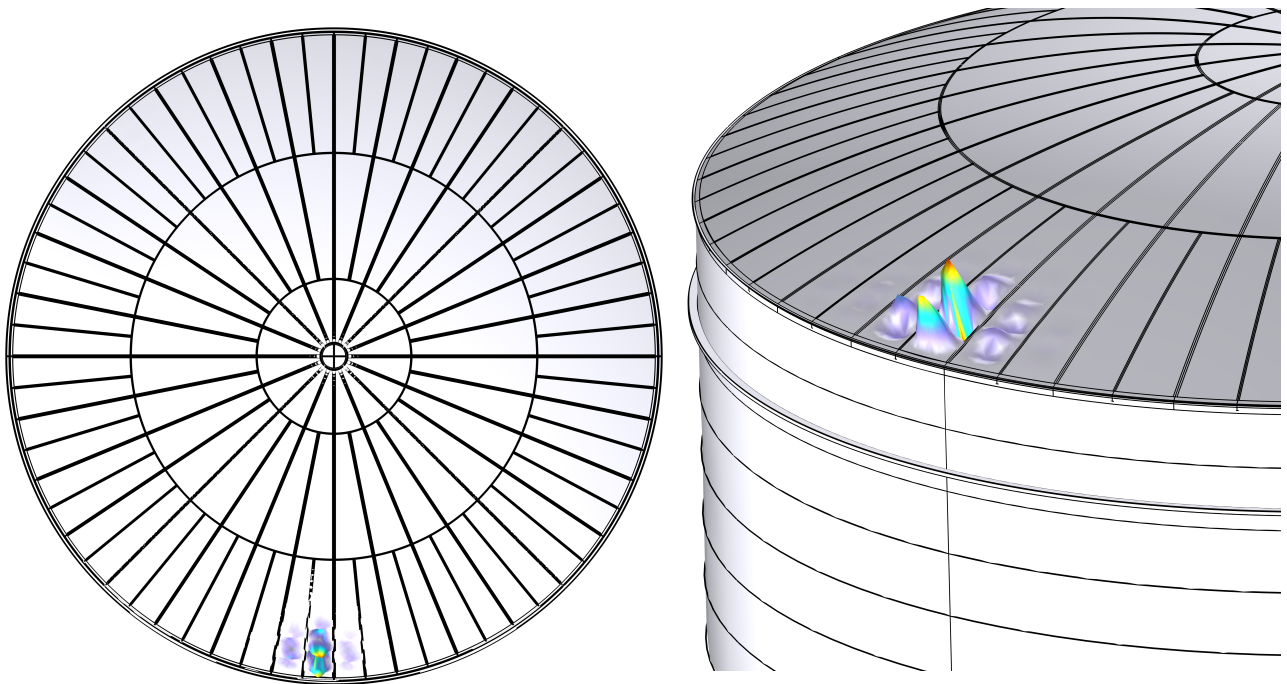


Figura 7.1: Forma típica del modo de pandeo por carga presión. Planta (izquierda) y axonometría (derecha).

La forma de la ondulación producida por el abollamiento de la chapa se encuentra representada en la **Figura 7.2**, al realizar un corte con un plano por la cubierta.

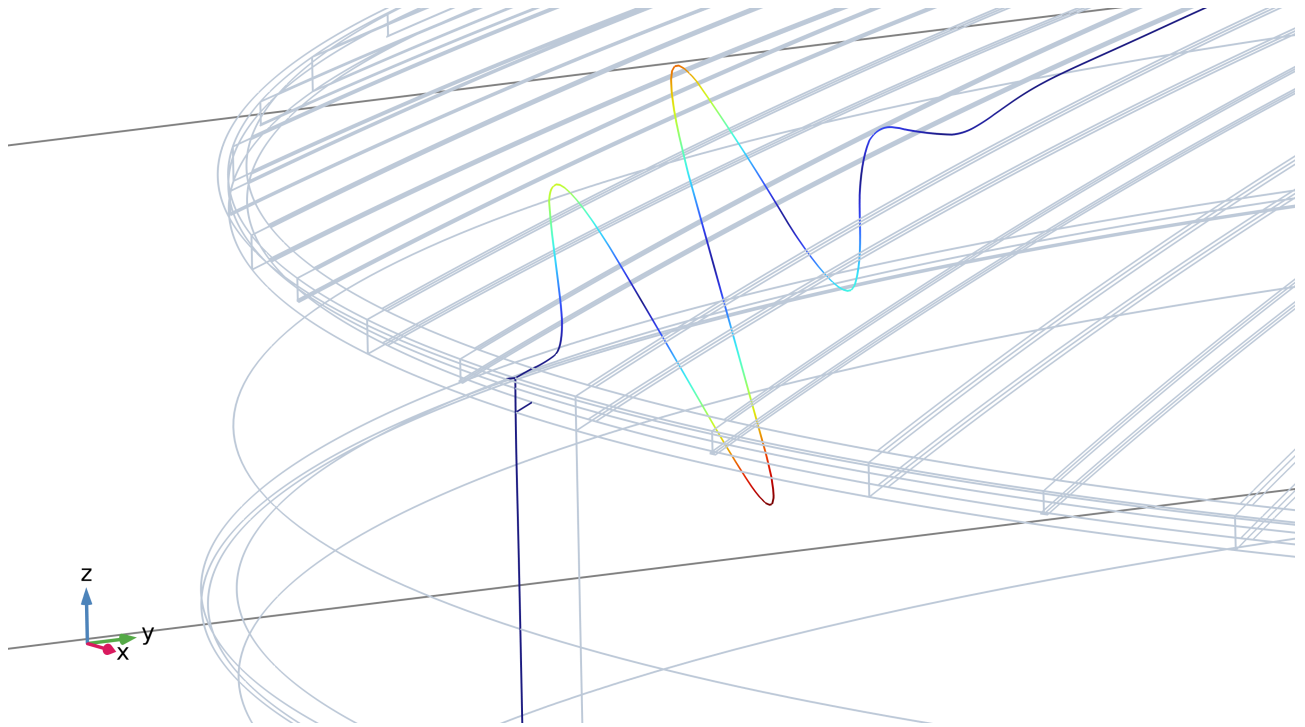


Figura 7.2: Ondulación producida por el abollamiento. Modo típico de pandeo por carga de presión.

Se observa que la dirección y forma del modo se corresponde con los picos de tensiones observados en la **Figura 6.6**, pero se manifiesta para un 53% de dicho valor ($\lambda = 0.53$).

(b) Modo de pandeo de succión: $D_L + W + 0.4P_i$

Para el estado de succión $D_L + W + 0.4P_i$, el primer modo de pandeo se presenta para un autovalor igual a $\lambda = 0.63$. Este modo se localiza en la zona muy cercana de unión entre la envoltura y a diferencia del caso anterior, se localiza siempre en la cara a barlovento del tanque, perdiendo la simetría. Además, la forma del modo representada en las **Figuras 7.3 y 7.4** indican como la ondulación se produce en el sentido circunferencial

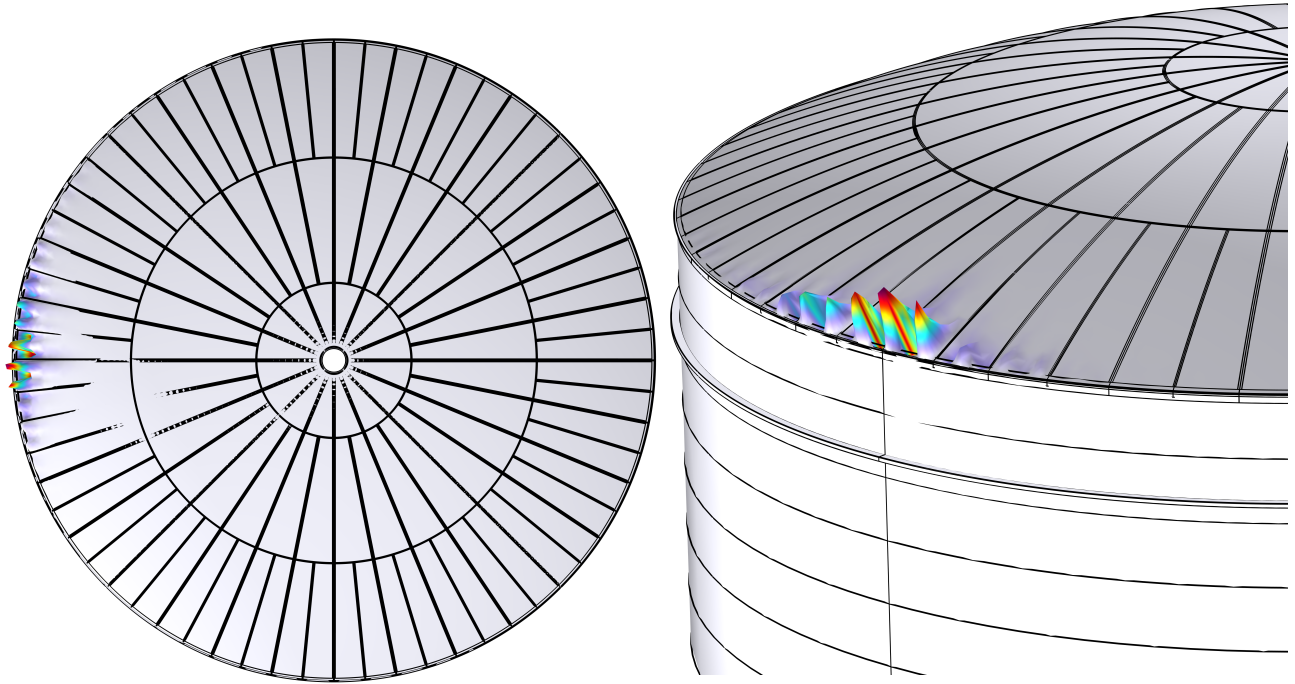


Figura 7.3: Forma típica del modo de pandeo por carga de succión. Planta (izquierda) y axonometría (derecha).

Se observa que la dirección y forma del modo se corresponde con los picos de tensiones de compresión observados en la **Figura 6.7**, pero se manifiesta para un 63% de dicho valor ($\lambda = 0.63$). Asimismo, se observa

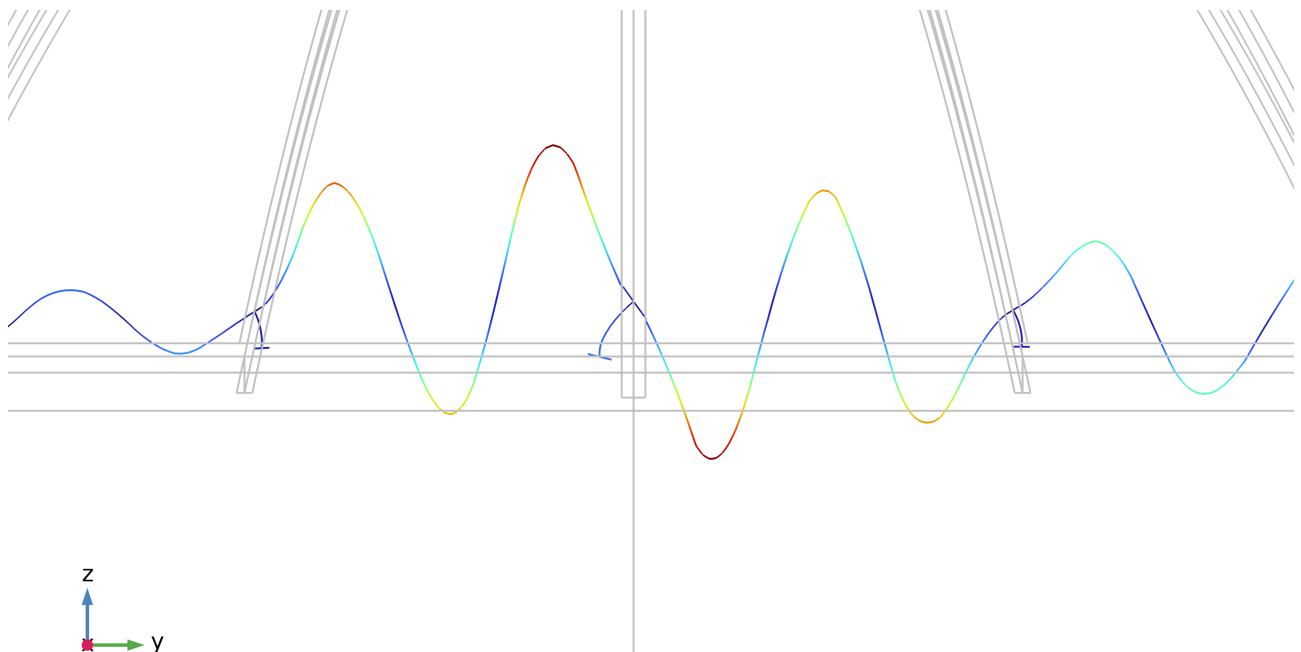


Figura 7.4: Ondulación producida por el abollamiento. Modo típico de pandeo por carga presión.

en la **Figura 7.4** que el abollamiento circunferencial de la chapa obliga a los perfiles a acompañar el movimiento, produciéndose un giro sobre el eje de estos:

En lo que respecta al pandeo lineal, en la **Tabla 7.1.** puede verse que el estado $D + L_r + 0.4P_e$ resulta más riesgoso para la inestabilidad de la chapa que $D + W_2 + 0.4P_i$, alcanzando el primer autovalor λ un valor de 0.53 sensiblemente inferior a 1. ***Esto indica inestabilidad a valores inferiores a los de las combinaciones de cargas.***

En general los valores numéricos de los autovalores λ se suceden entre ellos, en ambos estados de carga, con pequeñas diferencias y en grupos de autovectores de similar forma, pero en distinto lugares en forma simétrica respecto del eje del tanque. Esta situación se podría explicar pensando que si bien el tanque es simétrico y los estados de cargas o son simétricos o difieren poco de la simetría, la malla presenta leves variaciones que evitan que los modos de pandeo idénticos se manifiesten en forma simultánea.

Los modos de pandeo con autovalores menores, tanto para el estado $D + L_r + 0.4P_e$ como para $D + W_2 + 0.4P_i$, se suceden en la zona cercana a la unión entre domo y envolvente, principalmente debido a que allí se localizan las mayores tensiones de compresión en la chapa radiales y circunferenciales, respectivamente. En general la viga meridiana, para estos modos, no sufre inestabilidad y solo la chapa presenta abollamiento. En los modos con autovalores superiores del estado $D + L_r + 0.4P_e$ se presentan abollamiento de la chapa que son acompañados con pandeo lateral torsional de la viga meridiana.

8. OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL

En base a los resultados obtenidos en el capítulo anterior, se plantearán mejoras en la estructura que permitan alcanzar autovalores superiores. Se toma como objetivo, en principio, que el menor autovalor sea mayor a 1.5 ya que se estima que los fenómenos no lineales a tratarse en futuros trabajos producirían una degradación de la resistencia del mismo orden.

8.1. Planteo de Mejoras

De acuerdo con el análisis realizado en el **Capítulo 7**, se plantean las siguientes mejoras a la estructura:

- Aumento del **espesor de la chapa** para lograr resistir los grandes esfuerzos derivados de la perturbación del estado membranar.
- Disminución del **radio de curvatura** del domo para que el encuentro con la envolvente cilíndrica sea sobre un plano con mayor verticalidad y así, favorecer el estado membranar con una condición de borde más adecuada (ver 6.4.a).
- Aumento de la **rigidez del anillo de borde** en el encuentro envolvente cubierta, de manera de generar un anillo de compresión para los casos de presión y de tracción para los casos de succión.

(a) Espesor de la chapa

Se plantean dos alternativas distintas de la original, la primera consiste en aumentar el **espesor del primer tercio de cubierta** al próximo valor comercial (de 3/16" a 1/4"). La segunda, consiste en modificar el **espesor de toda la cubierta** a 1/4".

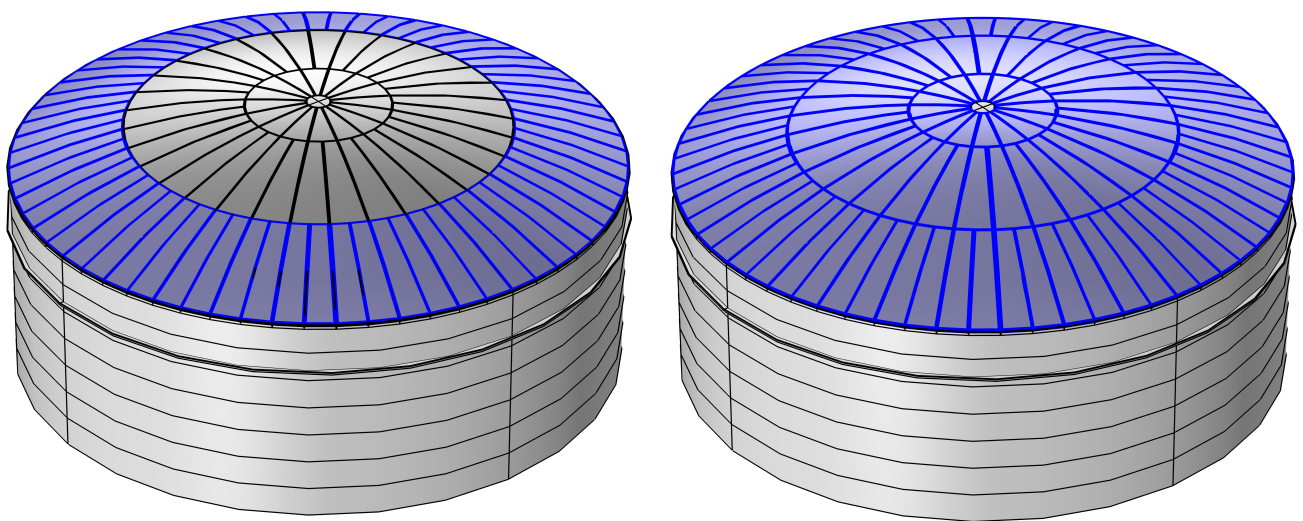


Figura 8.1: Propuesta de cambio de espesor de:
Primer tercio de cubierta a 1/4" (izquierda).
Toda la cubierta a 1/4" (derecha).

(b) Radio de curvatura

Al igual que para el espesor de la chapa, se plantean dos alternativas adicionales a la original. La normativa API-650 acota los valores posibles del radio R de la cubierta en base a la relación entre el radio de la cubierta y el diámetro de la envolvente R/D como fue indicado en la **Sección 3.1. (c)**.

$$\left(\frac{R}{D}\right)_{\min} = 0.8 \rightarrow R_{\min} = 40m; \left(\frac{R}{D}\right)_{\max} = 1.2 \rightarrow R_{\max} = 60m$$

De esta manera se propone analizar el caso intermedio, $R = 50m$, y el caso extremo $R = 40m$, las tres alternativas se encuentran ilustradas en la **Figura 8.2.**:

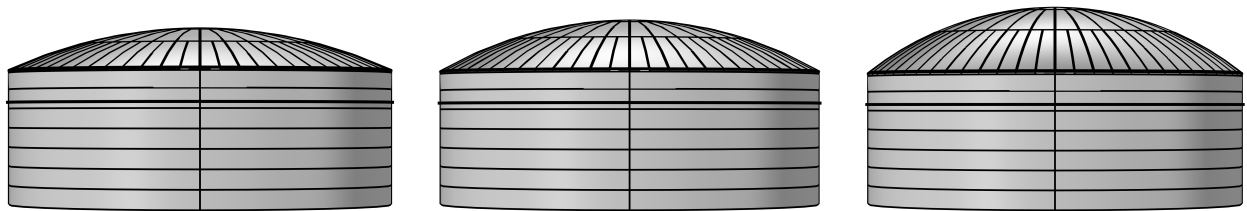


Figura 8.2: Variación de radios de curvatura de la cubierta. De izquierda a derecha: 60m, 50m y 40m.

(c) Rigidez de anillo de borde

Se busca conceder a la cubierta un apoyo que resulte más apropiado desde el punto de vista de la teoría membranar. Para esto, se propone utilizar un perfil “U” conformado por 3 chapas soldadas de $\frac{1}{2}$ ” de espesor, en donde el alma tendrá la misma altura que el alma de los perfiles radiales IPE300 que llegan al encuentro. En estos encuentros se adiciona también una chapa continuando con el alma del perfil interrumpido, a modo de evitar concentraciones localizadas de esfuerzos. Un esquema de la solución se encuentra en la **Figura 8.3**. De esta manera, se definen las siguientes alternativas:

- Como primera alternativa corresponde la situación original, el tanque sin la presencia del rigidizador tipo U y contando únicamente con el perfil L4”x1/2” reglamentario a estos fines, con área de 24.45 cm².
- Para la segunda alternativa de las adicionales, se utilizan alas de 100mm de largo con el esquema propuesto, sumando el área de la sección transversal del perfil L y U se tiene un área total de 91.45 cm².
- Como propuesta final, se utilizan alas de 200mm de largo para el perfil U adicional, resultando un área de 117 cm².

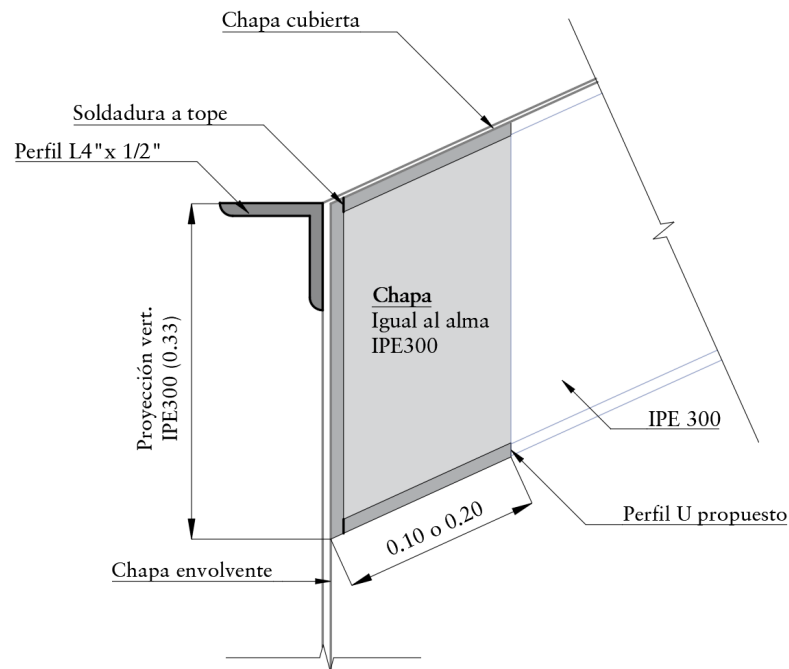


Figura 8.3: Detalle de anillo U rigidizador de borde – Propuesta 3.

A continuación, en las **Tablas 8.1, 8.2 y 8.3**, se presenta un resumen de las diferentes propuestas:

Tabla 8.1: Propuesta de variación de espesores.

Parámetro	Descripción	Propuesta 1 (Original) e3/16	Propuesta 2 e1/4 primer tercio	Propuesta 3 e1/4
e	Espesor de la chapa. Medida comercial en pulgadas	3/16 (mínimo reglamentario)	1/4" en primer tercio de chapa, luego 3/16	1/4" (en toda la cubierta)

Tabla 8.2: Propuesta de variación de radios.

Parámetro	Descripción	Propuesta R60 (Original)	Propuesta R50	Propuesta R40
R	Radio del domo [m].	60	50	40
R/D	Relación radio - diámetro de la envolvente.	1.2	1	0.8
F	Flecha del domo [m]	5.46	6.70	8.78
A_{cub}	Área que ocupa el desarrollo del domo [m ²]	2057.03	2104.47	2205.40
A_{cub}/A_{cub}^{R60}	Comparativa porcentual de área	0%	2%	7%

Tabla 8.3: Propuesta de anillo rigidizador.

Parámetro	Descripción	Propuesta 1 Sin anillo U	Propuesta 1 AR2	Propuesta 3 AR3
Anillo Perfil U	Perfil U de chapas soldadas que se coloca a la altura del encuentro de la envolvente y la cubierta, del lado interior. Colocado como mejora de diseño.	No presenta.	Ala 100mm x ½" Alma 330mm x ½"	Ala 200mm x ½" Alma 330mm x ½"
A_U	Área anillo U [cm²]	23.00	67.00	93.00
Anillo Perfil L	Perfil ángulo laminado que se coloca a la altura del encuentro de la envolvente y la cubierta, del lado exterior. Exigido por norma API.	L 4" x 1/2"	L 4" x 1/2"	L 4" x 1/2"
A_L	Área anillo L [cm²]	24.45	24.45	24.45
A_{total}	Área total de anillos - AU + AL [cm²]	24.45	91.45	117.45

8.2. Función objetivo

El objetivo es encontrar la combinación de los parámetros detallados que permita arribar a un diseño superador de la cubierta del tanque. Se toma importancia en dos indicadores y se plantea como función objetivo:

- Que el valor del menor autovalor λ entre el caso de presión y succión resulte mayor a 1.5.
- A igualdad del anterior indicador, resultará mejor alternativa aquella que represente un consumo de acero menor y simplicidad constructiva.

Para cada set de parámetros, se configura un nuevo modelo en COMSOL con el cual se obtiene el valor de λ para carga de presión y succión. Por último, se computa el peso de los elementos de la cubierta. Los resultados se encuentran indicados en la Sección [RESULTADOS Y DISCUSIÓN](#), luego del Capítulo 9.

9. EVALUACIÓN DE LA DIMENSIÓN AMBIENTAL

La dimensión ambiental en el desarrollo de proyectos industriales abarca prácticas que buscan minimizar los impactos negativos en el medio ambiente, fomentando al mismo tiempo la sostenibilidad. Este concepto es central para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la Organización de las Naciones Unidas en el año 2015 [23], los que se encuentran ilustrados en la **Figura 9.1**.



Figura 9.1: Objetivos del desarrollo sostenible (izquierda) y matrices involucradas (derecha).

Se busca en este capítulo la evaluación del impacto que la novedosa técnica constructiva pueda tener, a comparación de la metodología tradicional, en las tres dimensiones, y sobre las metas dentro de los ODS.

9.1. Menores tiempos de ejecución

(a) Metas involucradas

Una de las bondades que presenta el método constructivo es que permite reducir los tiempos de ejecución de la obra [3][4], mediante el uso de gatos hidráulicos para la construcción del tanque. Esta característica contribuye particularmente con las metas **7.b** y **8.2**:



Meta 7.b:

*“De aquí a 2030, ampliar la infraestructura y **mejorar la tecnología** para prestar **servicios energéticos modernos** ...”[23]*



Meta 8.2:

*“Lograr **niveles más elevados de productividad económica** mediante la **diversificación, la modernización tecnológica y la innovación**, entre otras cosas centrándose en los sectores con **gran valor añadido**¹ y un uso intensivo de la mano de obra.”[23]*

¹ Se ha visto en la Sección 1. INTRODUCCIÓN, como la industria petroquímica se encuentra altamente valorizada en la República Argentina, de acuerdo al Ministerio de Relaciones Exteriores [1].

(b) Matrices

Matriz económica: Dependiendo del análisis que se realice para cada caso particular, habrá que ponderar si el ahorro de tiempos de ejecución significa un ahorro en el ítem de costos global, pues se entiende que el equipo de gatos hidráulicos podría significar una mayor inversión. A su vez, al tener menor trabajo en obra se reduce la incertidumbre y por lo tanto costos no previstos en el cómputo. Por estas razones se concluye que el balance podría resultar favorable o no dependiendo el caso particular que se analice.

Matriz medioambiental: Si se recuerda que la construcción de tanques de combustible suele realizarse en zonas geográficas remotas, reducir los tiempos de ejecución, y en particular días de ejecución de la obra sugiere que los gastos colaterales de transporte, mantenimiento del obrador o unidades habitacionales se verán disminuidos y por lo tanto lo hará el impacto ambiental que estas actividades conllevan en igual medida.

Matriz social: Indicar si la matriz social se ve favorecida o perjudicada no es tarea sencilla y es motivo de discusión siempre que se tiene un avance de la tecnología. La implementación de una tecnología más sofisticada como lo es el uso de gatos hidráulicos en esta industria generaría sin lugar a duda una disminución en la demanda del personal de construcción, lo que parecería indicar un impacto negativo. Sin embargo, esta tecnología obligaría, por otro lado, a que el mismo personal deba capacitarse y formarse para poder aplicar esta metodología. La educación en si misma resulta una fuerza positiva en la matriz social. Además, hay quienes sostienen que el ahorro de tiempos que los avances tecnológicos generan es siempre positivo y debe ser usados para disminuir la extensión de las jornadas de trabajo y no la cantidad de las mismas. Con correctos programas y políticas de capacitación, la balanza podría inclinarse a un lugar favorable. Este punto será expandido en la Sección 9.2 a continuación:

9.2. Necesidad de capacitación de personal

(a) Metas involucradas

Como se ha mencionado, la implementación de la nueva tecnología requerirá que el personal de la construcción involucrado se capacite en la nueva práctica, lo que contribuirá con las siguientes metas:



Meta 4.3:

“De aquí a 2030, asegurar el acceso igualitario de todos los hombres y las mujeres a una formación técnica, profesional y superior de calidad, incluida la enseñanza universitaria.”[23].



Meta 17.8:

“Poner en pleno funcionamiento, a más tardar en 2017, el banco de tecnología y el mecanismo de apoyo a la creación de capacidad en materia de ciencia, tecnología e innovación para los países menos adelantados...” [23]

(b) Matrices

Matriz económica: Un programa de capacitación sugiere una inversión en todos los casos. Los objetivos y estudios sobre el desarrollo sostenible indican que las mismas se justifican en los resultados que se esperan en el largo plazo para la sociedad y el ambiente.

Matriz medioambiental: Los programas de capacitación involucran transversalmente a los empleados y su capacidad de construir en tiempos competitivos y con desperdicios mínimos de material, teniendo un impacto positivo en esta matriz.

Matriz social: Todo avance en materia de educación en particular sugiere un avance a nivel de sociedad en general.

9.3. Eliminación de columnas: ausencia de trabajos en altura

(a) Metas involucradas

El elemento más complejo de la estructura del tanque es la cubierta debido a la cantidad de elementos que presenta. El método constructivo novedoso permite que las tareas que conllevan la construcción de la misma se realicen a nivel de platea, promoviendo un ambiente de trabajo sin alturas y más seguro. Especialmente se debe hacer hincapié en las tareas de soldadura por ser las que revisten de una mayor complejidad. En particular, se espera que esta característica del método contribuya con las metas **8.8** y **4.3**:



Meta 8.8:

*“Proteger los derechos laborales y **promover un entorno de trabajo seguro y sin riesgos** para todos los trabajadores, incluidos los trabajadores migrantes, en particular las mujeres migrantes y las personas con empleos precarios.”*[23]

(b) Matrices

Matriz económica: Por un lado, la eliminación de columnas interiores se traduce en la necesidad encarecer la estructura de cubierta para brindar a la misma de mayor rigidez. De los resultados obtenidos en RESULTADOS Y DISCUSIÓN, se observa que para la alternativa seleccionada la cubierta vio aumentada su demanda de kilos de acero en un 30%, que frente al total del tanque incluyendo a la envolvente significa un aumento de casi 10%. Por otro lado, prescindir de trabajos en altura permite generar un ahorro en los elementos de higiene y seguridad necesarios para la ejecución de las tareas, a la vez de aumentar el rendimiento de los trabajadores.

Matriz medioambiental: Al ser la demanda de acero mayor, se debe considerar este diferencial como arrastre a toda la influencia ambiental que tiene el proceso del acero F-24, desde que la extracción de la materia prima hasta la puesta en obra y durante su vida útil. Esto debe presentarse en el balance frente a las bondades enunciadas en 9.1.(b). en la misma matriz.

Matriz social: Como se ha mencionado, disminuir los riesgos de los trabajadores de la construcción al evitar trabajos en altura presenta un marcado impacto positivo frente a la alternativa convencional.

Con lo observado no se busca dar una única respuesta a qué alternativa presenta una mayor valoración desde el punto de vista ambiental, pues eso será tarea de los proyectistas de cada proyecto particular. Lo que se busca es realizar un análisis de los factores intervinientes que permitirán plantear la matriz completa y elaborar conclusiones al respecto.

Incluso y a modo de reflexión, se destaca que los combustibles fósiles involucrados en la industria no colaboran particularmente con el objetivo **12: Producción y Consumo Responsable**, pues la fuente de energía no puede ser categorizada como sostenible. De esta manera, se entiende que el presente trabajo no busca promover el uso desmedido o proliferación de la industria petroquímica, sino aportar pautas y mejoras en el diseño de los tanques de manera que la construcción de los mismos sea más eficiente; y aún más importante, aportar conocimiento al área de la mecánica de sólidos en estructuras de grandes luces.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del análisis de pandeo lineal realizado en el [Capítulo 8](#) se encuentran en la **Tabla 9**.

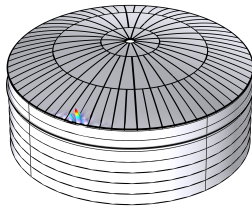
Tabla 9: Autovalores λ (multiplicadores de carga) que producen el primer modo de pandeo en el tanque. Obtenido por análisis de pandeo lineal para las distintas propuestas de la estructura definidas en la Sección 8.1.

Espesor de la chapa de cubierta	Radio de curvatura de la cubierta R	Área Anillo(s) Rigidizador(es) A	Autovalores λ		Peso de la cubierta [t]	Aumento % de peso
			Presión D + Lr +0.4Pe	Succión D + W2 +0.4Pi		
e = 3/16"	R = 60m	A = 24 cm ²	0.53	0.63	115.65	0%
		A = 91 cm ² (100 x 0.5")	0.73	1.59	123.95	7%
		A = 117 cm ² (200x0.5")	0.79	2.1	127.08	10%
	R = 50m	A = 24 cm ²	0.67	1.01	118.01	2%
		A = 91 cm ² (100 x 0.5")	0.98	2.04	126.31	9%
		A = 117 cm ² (200x0.5")	1.02	3.22	129.44	12%
	R = 40m	A = 24 cm ²	1.02	1.78	123.02	6%
		A = 91 cm ² (100 x 0.5")	1.45	3.17	131.32	14%
		A = 117 cm ² (200x0.5")	1.63	3.24	134.46	16%
e = 1/4" Primer tercio	R = 60m	A = 24 cm ²	1.05	0.95	131.96	14%
		A = 91 cm ² (100 x 0.5")	1.06	2.11	140.26	21%
		A = 117 cm ² (200x0.5")	1.11	2.76	143.39	24%
	R = 50m	A = 24 cm ²	1.33	1.55	134.66	16%
		A = 91 cm ² (100 x 0.5")	1.62	3.14	142.96	24%
		A = 117 cm ² (200x0.5")	1.62	3.22	146.09	26%
	R = 40m	A = 24 cm ²	1.94	2.71	140.37	21%
		A = 91 cm ² (100 x 0.5")	2.54	3.15	148.67	29%
		A = 117 cm ² (200x0.5")	2.83	3.18	151.80	31%
e = 1/4" Todo	R = 60m	A = 24 cm ²	1.04	1.07	141.28	22%
		A = 91 cm ² (100 x 0.5")	1.33	2.32	149.58	29%
		A = 117 cm ² (200x0.5")	1.48	3.07	152.71	32%
	R = 50m	A = 24 cm ²	1.31	1.68	144.24	25%
		A = 91 cm ² (100 x 0.5")	1.69	3.18	152.54	32%
		A = 117 cm ² (200x0.5")	1.83	3.18	155.67	35%
	R = 40m	A = 24 cm ²	1.88	2.71	150.51	30%
		A = 91 cm ² (100 x 0.5")	2.54	3.14	158.81	37%
		A = 117 cm ² (200x0.5")	2.78	3.18	161.94	40%

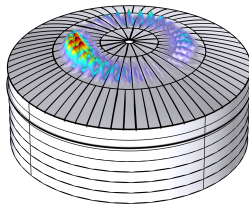
El sombreado de las celdas indica el lugar en donde se produce el abollamiento correspondiente al autovalor, donde:

	Producidos en primer tercio de cubierta.
	Producidos en segundo tercio de cubierta.
	Producidos en envolvente cilíndrica.

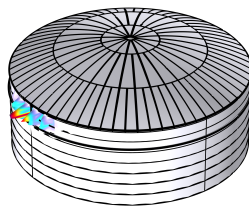
Los tres sombreados anteriores se corresponden con los modos de falla esquematizados a continuación:



(A) Típico caso de autovalor producido en el **primer** tercio.



(B) Típico caso de autovalor producido en **segundo** tercio.



(C) Típico caso de autovalor producido en la **envolvente**.

Se observa en primer lugar como la variación de cada parámetro logra una mejora del comportamiento.

En términos generales, se observa que los autovalores que el estado de carga de presión ($D + L_r + 0.4P_e$) son los que resultan determinantes en el abollamiento de la chapa.

Para el caso los autovalores de presión, se observa que:

- Dejando el resto de las variables fijas, el solo aumento del espesor del primer tercio de la chapa de cubierta traslada el abollamiento al segundo tercio de la chapa, pasando de un modo de falla (A) a un modo (B). Esto se manifiesta con autovalores cercanos a la unidad.
- Lo anterior se revierte al acompañar el aumento del espesor con una disminución del radio de la cubierta, retornando a un modo de falla (A). Dicho aumento de curvatura no parece implicar aumentos de peso significativos (orden del 5% con respecto al peso inicial de cubierta).
- El aumento de todo el espesor de la chapa implica un gran consumo de material, y su beneficio pierde rápidamente relevancia cuando el radio o el anillo son ajustados.

Para el caso los autovalores de succión, se observa:

- Que los autovalores aumentan rápidamente con las mejoras, especialmente frente a la incorporación del anillo rigidizador U.
- Lo anterior puede explicarse si se remite al diagrama de tensiones circunferenciales presente en la **Figura 6.7**, en donde se puede observar que la zona de marcadas tensiones de compresión se encuentra en un área muy acotada. El anillo U provee a dicha zona con un mayor espesor, mitigándose el efecto localizado.

De todas las alternativas planteadas, se escoge aquella que presenta la siguiente configuración geométrica:

- Espesor de chapa de 1/4" para el primer tercio de la cubierta.
- Radio de curvatura igual a 40 metros.
- Anillo rigidizador de 100mm de largo por 1/2" de espesor (aproximadamente 91 cm² de área).

La elección se justifica por el hecho de que la misma logra superar el objetivo de un autovalor de presión mayor 1.5 (con un valor de 2.54) con un peso que resulta competitivo. Dejando el resto de las variables fijas, la alternativa con un radio de 50 metros presenta un autovalor considerablemente menor (1.62) con una diferencia de peso despreciable (6%). No se considera apropiado construir la cubierta sin el anillo U planteado, pues la inclusión del mismo ha permitido mejorar el comportamiento de la cubierta y se espera que presente mayores ventajas si se consideran los fenómenos no lineales. La configuración estructural resultante del proceso de optimización realizado se encuentra en la **Figura 10**.

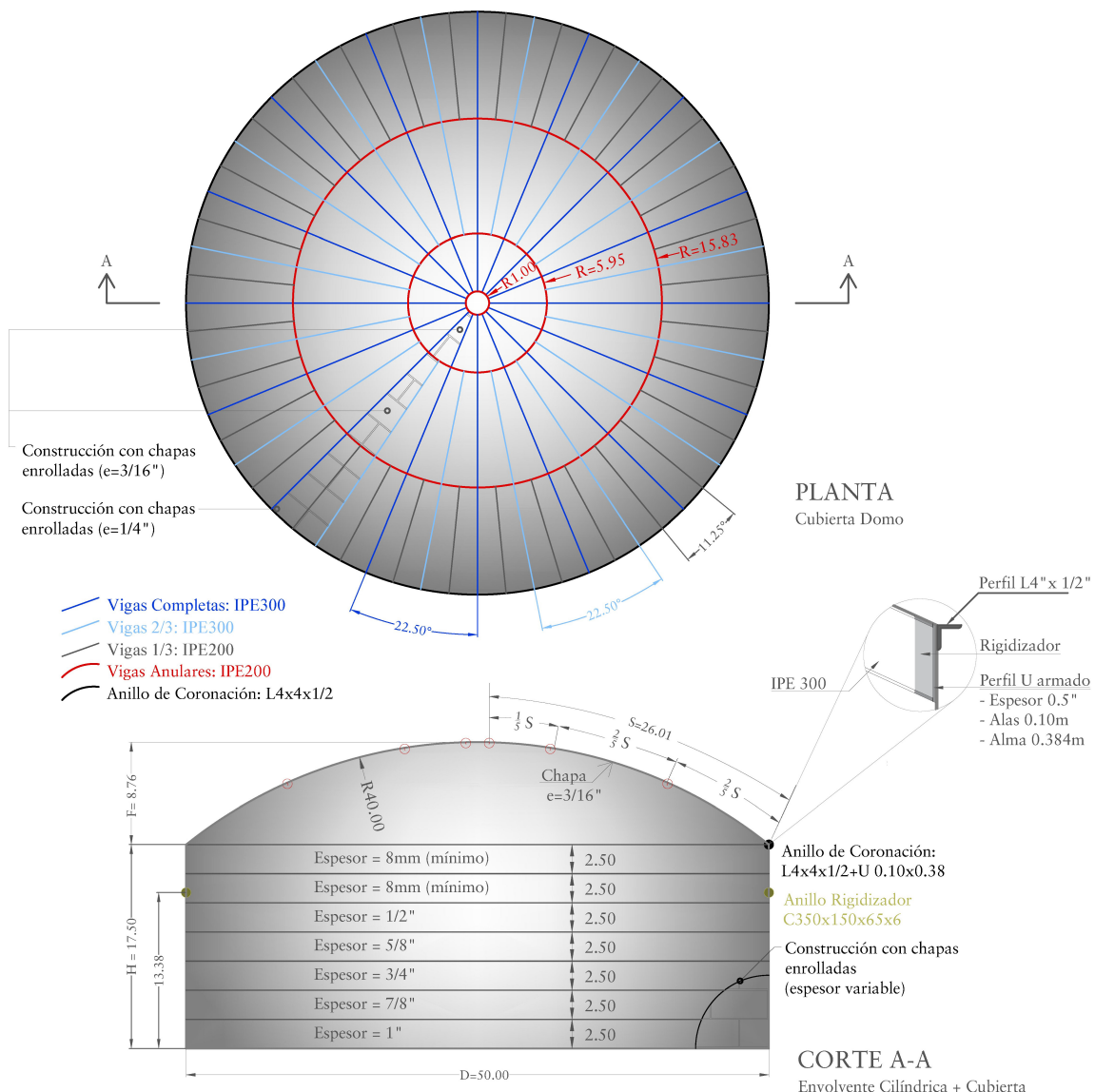


Figura 10: Configuración del tanque resultado del proceso de optimización estructural.

CONCLUSIONES

A partir de un análisis de pandeo lineal, los resultados obtenidos indican que el elemento estructural crítico es la chapa de cubierta, en donde se produce abollamiento. En el valor de los multiplicadores de carga (autovalores) se observa que el aumento del radio de curvatura de la cubierta y de la rigidez del anillo de borde han probado ser alternativas que presentan un marcado aumento en la resistencia, sin aumentar considerablemente el peso de la estructura. Una apropiada concepción estructural presenta una mayor y decisiva influencia en un diseño económico, frente a un mero aumento del espesor de la chapa.

Además, en base a los grandes desplazamientos observados en el tanque, se espera que el efecto de la no linealidad geométrica sea significativo, por lo que los autovalores de pandeo podrían decrecer significativamente. Trabajos de investigación futuros que contemplen dichos fenómenos no lineales sobre el tanque permitirán obtener interesantes conclusiones y cuantificar la influencia de los mismos.

AGRADECIMIENTOS

Posterior a realizar la defensa de tesis de este mismo trabajo, cuya grabación se puede encontrar siguiendo este enlace: https://youtu.be/130j_FnXPz8, se dispone de este espacio para reconocer a todas aquellas personas que formaron parte de mi formación, tanto personal como profesional, en estos cinco años de tránsito en la Universidad Nacional de Rosario. Se agradece a esta última: pública, gratuita y de calidad, en general y a los siguientes actores en particular:

Cátedra de Proyecto IV – Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (UNR).

Por el acompañamiento brindado en todas las etapas a todos los alumnos del primer cuatrimestre de 2024 y al autor de este informe por ayudar a dar este cierre del proceso de aprendizaje que tanto esfuerzo nos ha llevado, en un contexto de educación pública.

Profesor y Tutor Ing. Andrés Hazán

Por cada intercambio realizado durante el cuatrimestre, siempre contribuyendo al conocimiento y a un mejor entendimiento en el mundo de las estructuras metálicas con su experiencia en el campo.

Profesores y tutores Ing. Raúl Navarro y Dra. Margarita Portapila

Por su apoyo en todo momento a la investigación científica y notable predisposición a mi capacitación y mejora en este ámbito.



A mis compañeros de carrera

Por cada mate, risa y anécdota compartida durante el cursado de la carrera de Ingeniería Civil.



Mi mamá, Cintia Pfeffer y mi hermana, Camila Pfeffer

Por apoyar al único matemático de la familia a completar su cursado, con el cariño incondicional de siempre.



Tutor Ing. Horacio Fideleff

Por ser coautor de este trabajo, por ser mi tutor y compartir (aunque sea un porcentaje) de los conocimientos sobre los elementos finitos y la mecánica del continuo, para que deje de ser una mera herramienta.

Tutor Dr. Ing. Oscar Möller

Por ser coautor de este trabajo, por ser mi primer tutor e introducirme en el mundo de la investigación, con todo lo que ello conlleva hoy en día en mi vida, por cada mañana en el IMAE, por cada chiste y consejo compartido.



REFERENCIAS

- [1] Agencia Argentina de Inversiones y Política Internacional y C. I. y C. A. Ministerio de Relaciones Exteriores, «Informe Sectorial para Inversores Internacionales», 2023.
- [2] American Petroleum Institute, «API 650-2021», 2021.
- [3] CAZ (THAILAND) COMPANY, «METHOD STATEMENT FOR FIELD ERECTION STORAGE TANKS».
- [4] MASKOTECH ENGINEERS, «ERECTION PROCEDURE FOR FIELD ERECTED TANK USING JACKING METHOD», 2016. [En línea]. Disponible en: www.maskotech.com
- [5] Epegu Natty, «Storage Tank Erection Methods», 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.linkedin.com/pulse/storage-tank-erection-methods-epegu-natty/>
- [6] «Mayper S.A. | Fábrica de Tanques». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mayper.com.ar/>
- [7] «Cantoni S.A.», Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.cantonisa.com/>
- [8] Boletín Oficial de la República Argentina, *Refinería Bahía Blanca S.A.U.* 2019. Accedido: 8 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.boletinoficial.gob.ar/pdf/linkQR/TVZmMVIRRjZnTXQreFpJZ1U0d1UwZz09>
- [9] «Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE)». Accedido: 18 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://imae.fceia.unr.edu.ar/>
- [10] American Institute of Steel Construction, «ANSI/AISC 360-22: Specification for Structural Steel Buildings», 2022.
- [11] Inc. COMSOL, «COMSOL Multiphysics®». Accedido: 16 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.comsol.com/>
- [12] American Society of Civil Engineers (ASCE) y Structural Engineering Institute (SEI), *ASCE 7-22: Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2021. doi: 10.1061/9780784415788.
- [13] Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) y Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad de Obras Civiles (CIRSOC), «CIRSOC 102-2005: REGLAMENTO ARGENTINO DE ACCIÓN DEL VIENTO SOBRE LAS CONSTRUCCIONES», 2005.
- [14] Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) y Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad de Obras Civiles (CIRSOC), «CIRSOC 104-2005 REGLAMENTO ARGENTINO DE ACCIÓN DE LA NIEVE Y DEL HIELO SOBRE LAS CONSTRUCCIONES», 2005.
- [15] ACINDAR, «Tablas y Equivalencias Productos y servicios para la construcción civil».
- [16] H. Fideleff, F. T. Leguizamón Pfeffer, O. Möller, y C. Belluchini, «DISEÑO Y PANDEO LINEAL DE TANQUES INDUSTRIALES DE GRANDES DIMENSIONES (DESIGN AND LINEAR BUCKLING ANALYSIS OF LARGE INDUSTRIAL TANKS)», *Mecánica Computacional* -

- Proceedings of the XXXIX Argentinian Congress on Computational Mechanics and I Argentine-Uruguayan Congress on Computational Mechanics*, vol. XL, pp. 141-150, nov. 2023.
- [17] Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) y Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad de Obras Civiles (CIRSOC), «REGLAMENTO ARGENTINO PARA CONSTRUCCIONES SISMORRESISTENTES PARTE I CONSTRUCCIONES EN GENERAL», 2018.
- [18] D. Bushnell, «Buckling of Shells-Pitfall for Designers», Palo Alto, California, sep. 1981.
- [19] Altair Engineering, «Modeling with Beam, Shell, and Solid FE», 2021.
- [20] S. Sreenath, U. Saravanan, y V. Kalyanaraman, «Beam and shell element model for advanced analysis of steel structural members», dic. 2011. doi: 10.1016/j.jcsr.2011.05.003.
- [21] L. Zdravkov, L. A. Zdravkov, T. D. Dincheva, y O. Holding, «DESIGN OF SELF – SUPPORTING DOME ROOFS», 2011. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/260005629>
- [22] María Delia Crespo, «Análisis Estructural II», en *Análisis Estructural II*, Rosario: Universidad Nacional de Rosario (UNR), Apunte de Cáscaras.
- [23] Organización de las Naciones Unidas, «¿EN QUÉ CONSISTE EL DESARROLLO SOSTENIBLE?», 2023.
- [24] COMSOL Multiphysics, «MultiphysicsCiclopedia: “What Is Multiphysics?”» Accedido: 19 de julio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.comsol.com/multiphysics>

ANEXO A

COEFICIENTES DE PRESIÓN DE VIENTO PARA LA ACCIÓN EN LA ENVOLVENTE

1. Planteo del problema

Tomando como punto de partida las prescripciones de la norma ASCE 7-22 [12] para el cálculo de las acciones del viento, se presenta un desafío al definir dicha acción sobre la envolvente cilíndrica: el reglamento define, para componentes principales una evaluación de la fuerza de viento **únicamente nivel de resultante**, y no punto a punto en la envolvente cilíndrica, es decir, que no se cuenta con una función de presiones en las caras del tanque, de acuerdo a la *Sección 29.4* de la norma ASCE 7-22 [12]:

$$dF(z) = q_z(z) K_d G C_f D \text{ [kN/m]} \quad (A.1)$$

Dónde:

- $dF(z)$: acción resultante del viento para una cierta altura z , en una franja de espesor infinitesimal. La acción se da en la dirección paralela al viento considerado, para nuestro caso el eje x .
- $q_z(z)$: presión del viento a una cierta altura z . [kN/m²].
- K_d : factor de direccionalidad, definido según la Tabla 26.6-1 de la norma ASCE.
- C_f : factor de fuerza, definido en la sección del presente Anexo.
- D : diámetro de la envolvente (50 m).

Como se mencionó, lo anterior representa la acción global que se tiene sobre el tanque, pero no se brinda información sobre la distribución de dicha fuerza “en planta”. Por ejemplo, si para una cierta altura dF tuviese el valor de 1kN, dicha fuerza podría estar simplemente aplicada puntualmente en algún punto de la envolvente, o estar repartida solo en una cara, etc. Es necesario adoptar una distribución de presiones cuya resultante (i.e. integración) de como resultado el valor que se obtendría por la ecuación (A.1), para cada nivel representado por el valor de z .

Se busca entonces encontrar una función de presiones $W_{env}(x, y, z)$ que dependa de las coordenadas de cada punto en el perímetro del tanque. Como particularidad, se tiene que ASCE 7-22 da una distribución en que cumple con esto, pero **únicamente válida para el cálculo de componentes y revestimientos** (y no del sistema principal resistente al viento). Se tiene que la presión sobre las paredes lleva la forma:

$$p_{r(x,y,z)} = q_{z(z)} * K_d * \{G C_p\}_{(x,y)} \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (A.2)$$

El valor de $G C_p$ es función del ángulo α en planta, por ende, **depende de las coordenadas x, y** . La expresión reglamentaria es:

$$\{G C_p\}_{(x,y)} = \{G C_p\}_{(\alpha)} = k_{b(\alpha)} * C_{(\alpha)} \quad (A.3)$$

Que, a su vez, depende dos funciones de ángulo α , C y k_b , que serán abordadas más adelante en el presente Anexo. Más allá de la complejidad matemática, en esta instancia resulta necesario entender que el cálculo de componentes y revestimientos se realiza con un enfoque local (en por ejemplo un tornillo) y las cargas de viento consideradas para una estructura a nivel global resultarían en una sobrestimación de la resistencia, pues los valores de presiones utilizados para estos objetos son mayores (como será demostrado más adelante).

Así es cómo **se propone realizar una adaptación** de este inciso realizado para componentes y revestimientos al caso del sistema principal, de manera que se cumpla simultáneamente:

- La resultante del diagrama para cada sea la misma que la arrojada por la ecuación (A.1).
- La distribución de presiones cumpla con la distribución en planta de la ecuación (A.2).

Cómo ventaja de lo anterior se tiene:

- Considerar una distribución en planta fundamentada teóricamente, a contraposición del tratado a nivel del resultante que propone el reglamento.
- No realizar sobrestimaciones en el valor de la carga al utilizar expresiones dadas para componentes y revestimientos.

En la próxima sección, se abordará en detalle el desarrollo de lo mencionado anteriormente.

2. Desarrollo matemático

Retomando la ecuación (A.1) y haciendo uso del reglamento ASCE 7-22 [12] se tiene que:

- $C_f = 0.50$ de acuerdo a *Figure 29.4-1. Other structures (all heights): force coefficients, C_f , for chimneys, tanks, and similar structures.* [12] (Round-moderately smooth).
- $G = 0.85$ de acuerdo a *Cap. 26.11.1 Gust-Effect Factor* [12].
- $K_d = 0.95$ de acuerdo a *Table 26.6-1. Wind Directionality Factor, K_d* [12] (nonaxisymmetric structural systems).

De manera que, reemplazando:

$$dF_{(z)} = 0.404 * q_z(z) * D \quad (A.4)$$

Lo cual representa a la resultante por unidad de longitud esperada para cada nivel z en las paredes del tanque. Por otro lado, las expresiones particulares de las funciones $C_{(\alpha)}$ y $k_{b(\alpha)}$ que a su vez definen a la función $\{G C_p\}_{(\alpha)}$ vienen dadas en el *Cap. 30.10.2 External Walls of Isolated Circular Bins, Silos, and Tanks* [12], donde:

$$C(\alpha) = -0.5 + 0.4 \cos \alpha + 0.8 \cos 2\alpha + 0.3 \cos(3\alpha) - 0.1 \cos(4\alpha) - 0.05 \cos(5\alpha)$$

$$k_b = \begin{cases} 1; & C(\alpha) \geq -0.15, \\ 1 - 0.55(C(\alpha) + 0.15) \log_{10} \left(\frac{H}{D} \right) & C(\alpha) < -0.15 \end{cases} \quad (A.5)$$

Para una mayor claridad, se presentan las funciones de estos parámetros para entender su variación en planta:

Se observa como el reglamento define zonas de presiones en la cara de barlovento y succiones en la cara a sotavento. Interesa evaluar la resultante de dichas presiones en la dirección del viento denominada R_{CR} , se tiene:

$$R_{CR} = \int_0^{2\pi} dR_x = \int_0^{2\pi} \underbrace{K_d q_z(z) \{G C_p\}_{(\alpha)}}_{dR_x: \text{componente horizontal que se integra.}} \underbrace{\frac{1}{\cos(\alpha)}}_{\text{composición eje X}} \underbrace{\frac{D}{2} d\alpha}_{\text{ds: arco}}$$

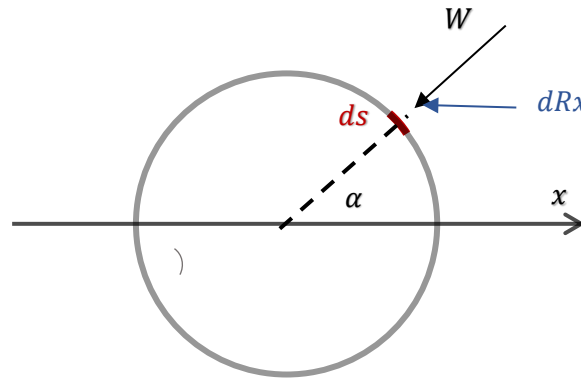


Figura A.1: Acción diferencial de la acción del viento sobre la envoltura. Vista en planta de envoltura cilíndrica del tanque.

Simplificando la expresión anterior:

$$R_{CR} = \underbrace{\left[\frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \{G C_p\}_{(\alpha)} \cos(\alpha) d\alpha \right]}_I q_z(z) D \quad (A.6)$$

Si se compara la expresión (A.4) y (A.6), resulta sencillo notar que el valor de la integral I de (A.6) que viene dadas para **componentes y revestimientos** es el equivalente a la constante 0.404 que multiplica a $q_z(z)D$ en la expresión (A.4) dado para el **sistema principal resistente al viento**. Por lo tanto, se define un factor de reducción R , que permite adaptar las prescripciones y la distribución de presiones dadas en (A.6) para el caso de la ecuación (A.4), con esto se logra igualar la resultante de las fuerzas.

$$R = \frac{0.404}{I} \quad (A.7)$$

Para evaluar la integral I , se divide al dominio de integración en dos partes, una con coeficiente k_b constante y otra variable de acuerdo a (A.5). Con la ayuda de una calculadora no lineal que utiliza el método de Newton para la resolución iterativa, se obtiene que el valor para el cual $C_\alpha = -0.15$ es aproximadamente 0.731, valor para el cual se partirá la integración:

$$I = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} (G C_p)_\alpha * \cos(\alpha) * d\alpha = \frac{1}{2} \left[\overbrace{\int_0^{0.731} C_{(\alpha)} * \cos(\alpha) * d\alpha}^A + \overbrace{\int_{0.731}^{2\pi} C_{(\alpha)} * k_{b(\alpha)} * \cos(\alpha) * d\alpha}^B \right]$$

De donde resulta que $A = 0.364$ y $B = 0.892$, por lo que:

$$I = \frac{1}{2} [A + B] = 0.628$$

Retomando la expresión (A.7), se tiene que el valor del factor de reducción R resultará:

$$R = \frac{0.404}{I} = \frac{0.404}{0.628} = 0.643$$

Que el valor de R sea menor a la unidad permite confirmar la hipótesis planteada al principio del presente Anexo, pues la distribución de presiones que el reglamento provee para componentes y revestimientos arroja una resultante que es aproximadamente un 55% mayor que la que exige para el sistema principal de viento, de acuerdo al análisis aquí expuesto.

Finalmente, el valor de presión a utilizar en cualquier punto de la envolvente de coordenadas (x, y, z) , viene dada por la función $W_{env}(x, y, z)$, que se obtiene de multiplicar a la expresión (A.2) por el factor R obtenido:

$$W_{env}(x, y, z) = R \cdot p_{r(x,y,z)} = R \cdot q_{z(z)} * K_d * \{G C_p\}_{(x,y)} \left[\frac{kN}{m^2} \right] \quad (A.8)$$

ANEXO B

DETALLE DE LAS VERIFICACIONES DE LOS PERFILES SEGÚN NORMA AISC 360-22

En el presente anexo se detallarán secuencialmente las verificaciones estructurales realizadas sobre los perfiles que componen la estructura de la cubierta. Los mismos fueron clasificados en tres categorías de acuerdo a su longitud (VC para Viga Completa, V2/3 Para vigas que ocupan “dos tercios” de la chapa, y V1/3 para vigas que ocupan “un tercio de la misma), y luego numerados de acuerdo a su posición en planta. Cada perfil es dividido en secciones como se indica en la **Figura 6.1**. De esta manera, se evalúan los esfuerzos en las mismas, se determinan los estados críticos para:

- El estado que produce **mayor esfuerzo de flexión** con tracción en las fibras **superiores**.
- El estado que produce **mayor esfuerzo de flexión** con tracción en las fibras **inferiores**.
- El estado que produce mayor esfuerzo de compresión.

Los pasos para la verificación estructural de cada perfil se dividen en:

- Determinar la carga de compresión (o tracción nominal).
- Determinar la carga de flexión nominal.
- Verificar por fórmula de interacción.
- Verificar resistencia a esfuerzo de corte.

1. Perfiles completos VC

1.1. Mayor flexión con tracción en fibras superiores.

ESTADO CON MAYOR FLEXIÓN EN X-X TRACCIÓN FIBRAS SUPERIORES		
VIGA-SECCIÓN	VC225-S3	
ESTADO DE CARGA API-650	c.2) Wind and Internal Pressure (D+0.4Pi+W2)	
Mux [kNm]	17.97	<u>CASO SOLICITACIÓN</u> FLEXIÓN OBLICUA COMPUESTA
Muy [kNm]	0.00	
Pu [kN]	101.68	
Vu [kN]	0.00	
Conidición	Verifica ANSI/AISC 360-22 con interacción 69.05%	

COMPRESIÓN		
Pandeo Local		
Verificación ala		
λ_p Flexión Caso 10 - B.4.1b	10.97	Compacta
$bf/2tf$	7.01	
Qs	1	
Verificación alma		
$P_u/(1/\Omega*b*P_y)$	0.132	Compacta
λ_p Flexocompresión Apéndice A.2.b	71.07	
hw/tw	34.93	
Qa	1	
Q	1	Compacta
Pandeo Global		
Dirección X (mayor inercia)		
L'x [cm]	1005	Verifica ($\lambda_x<200$ para cada mitad perfil)
kx	1	
Lx [cm]	1005.3	
λ_x	80.425	
Dirección Y (menor inercia)		
L'y [cm]	0	Verifica ($\lambda_y<200$)
ky	1	
Ly [cm]	0	
λ_y	0.0	
Verificación		
λ_{det}	80.42	Verifica $P_u<P_d$
λ_c	0.89	
Fcr [kN/cm²]	17.27	
1/Ω	0.60	
Pd [kN]	556.32	

FLEXIÓN MAYOR INERCIA (X)	
Plastificacion	
Mp [kNm]	150.7
1,5 My [kNm]	200.5
Mn p [kNm]	150.72
Pandeo Lateral Torsional	
Lb [cm]	975
Ubicación de la Carga	Carga en el Alma
Vinculación	Otro (ingresar abajo Cb)
Cb	1.17
Lp [cm]	172.00
Lr [cm]	536.00
Mr [kNm]	95.25
CASO	(Lr<Lb) -> Elástico
Mn [kNm] (Lr<Lb)	50.11
Pandeo Local	
Verificación ala	
λ_p Flexión Caso 1 - B.5.1	10.97
λ_r Flexión Tabla A-F.1.1	23.96
bf/2tf	7.01
Fcr [kN/cm ²] - Tabla A-F.1.1	280.88
Mn	150.72
Verificación alma	
$P_u/(1/\Omega * b * P_y)$	0.132
λ_p Flexión Caso 13 - B.5.1	70.121
λ_r Flexión Caso 13 - B.5.1	148.493
hw/tw	34.930
Mn	150.720
Estado Determinane:	Pandeo Lateral Torsional
Mn	50.11
1/ Ω	0.60
Mdx [kNm]	30.01
Verifica (Mux<Mdy) Estado Límite: Pandeo Lateral Torsional	
FLEXIÓN MENOR INERCIA (Y)	
Plastificacion	
Mp [kNm]	29.0
1,5 My [kNm]	29.0
Mn p [kNm]	28.98
Pandeo Local	
Verificación ala	
Mr [kNm]	19.32
λ_p Flexión Caso 1 - B.5.1	10.97
λ_r Flexión Tabla A-F.1.1	23.96
bf/2tf	7.01
Fcr [kN/cm ²] - Tabla A-F.1.1	280.88
Mn [kNm]	28.98
Estado Determinane:	Plastificacion
Mn [kNm]	28.98
1/ Ω	0.60
Md [kNm]	17.39
Verifica (Muy<Mdy) Estado Límite: Plastificacion	

ESFUERZOS COMBINADOS		
Pu/Pd - Tu/Td	0.18	Verifica Estados Combinados
Condición	$Pu/Pd < 0.2$	
Expresión	$Pu/(2 Pd) + (Mux/Mdx + Muy/Mdy)$	
Valor	0.69	

CORTE		
Corte en alma		
$Aw = d * tw$ [cm ²]	17.608	Verifica Corte
h/tw	34.93	
Condición (G2.1)	$h/tw < 2.24 \sqrt{E/Fy}$ (G2.1)	
Vn [kN]	254	
$1/\Omega$	0.67	
$Vd = \Phi Vn$	169	

1.2. Mayor flexión con tracción en fibras inferiores.

ESTADO CON MAYOR FLEXIÓN EN X-X TRACCIÓN FIBRAS INFERIORES		
VIGA-SECCIÓN	VC90-S3	
ESTADO DE CARGA API-650	e.4) Gravity Loads (D+Lr+0.4Pe)	
Mux [kNm]	18.86	<u>CASO SOLICITACIÓN</u> FLEXIÓN OBLICUA COMPUESTA
Muy [kNm]	0.00	
Pu [kN]	-80.14	
Vu [kN]	0.00	
Conidición	Verifica ANSI/AISC 360-22 con interacción 24.48%	

COMPRESIÓN		
Pandeo Local		
Verificación ala		
λp Flexión Caso 10 - B.4.1b	10.97	Compacta
bf/2tf	7.01	
Qs	1	
Verificación alma		
Pu/(1/Ω*b*Py)	-0.069	Compacta
λp Flexocompresión Apéndice A.2.b	129.16	
hw/tw	34.93	
Qa	1	
Q	1	Compacta
Pandeo Global		
Dirección X (mayor inercia)		
L [cm]	1005	Verifica (λx<200 para cada perfil)
kx	1	
Lx [cm]	1005.3	
λx	80.425	
Dirección Y (menor inercia)		
L [cm]	0	Verifica (λy<200)
ky	1	
Ly [cm]	0	
λy	0.0	
Verificación		
λdet	80.42	Verifica Pu<Pd
λc	0.89	
Fcr [kN/cm²]	17.27	
1/Ω	0.60	
Pd [kN]	556.32	

FLEXIÓN MAYOR INERCIA (X)		
Plastificacion		Verifica (Mux<Mdy) Estado Límite: Plastificacion
Mp [kNm]	150.7	
1,5 My [kNm]	200.5	
Mn p [kNm]	150.72	
Pandeo Lateral Torsional		
Lb [cm]	0	
Ubicación de la Carga	Carga en el Alma	
Vinculación	Otro (ingresar abajo Cb)	
Cb	1.17	
Lp [cm]	172.00	
Lr [cm]	536.00	
Mr [kNm]	95.25	
CASO	(Lb<Lp) -> Plástico	
Mn [kNm] (Lb<Lp)	150.72	
Pandeo Local		
Verificación ala		
λp Flexión Caso 1 - B.5.1	10.97	
λr Flexión Tabla A-F.1.1	23.96	
bf/2tf	7.01	
Fcr [kN/cm²] - Tabla A-F.1.1	280.88	
Mn	150.72	
Verificación alma		
Pu/(1/Ω*b*Py)	-0.069	
λp Flexión Caso 13 - B.5.1	129.161	
λr Flexión Caso 13 - B.5.1	172.956	
hw/tw	34.930	
Mn [kNm]	150.720	
Estado Determinane:	Plastificacion	
Mn	150.72	
1/Ω	0.60	
Md x [kNm]	90.25	
FLEXIÓN MENOR INERCIA (Y)		
Plastificacion		Verifica (Muy<Mdy) Estado Límite: Plastificacion
Mp [kNm]	29.0	
1,5 My [kNm]	29.0	
Mn p [kNm]	28.98	
Pandeo Local		
Verificación ala		
Mr [kNm]	19.32	
λp Flexión Caso 1 - B.5.1	10.97	
λr Flexión Tabla A-F.1.1	23.96	
bf/2tf	7.01	
Fcr [kN/cm²] - Tabla A-F.1.1	280.88	
Mn	28.98	
Estado Determinane:	Plastificacion	
Mn	28.98	
1/Ω	0.90	
Md [kNm]	26.08	

ESFUERZOS COMBINADOS		
Pu/Pd - Tu/Td	0.07	Verifica Estados Combinados
Condición	$Pu/Pd < 0.2$	
Expresión	$Pu/(2 Pd) + (Mux/Mdx + Muy/Mdy)$	
Valor	0.25	

CORTE		
Corte en alma		
$A_w = d \cdot t_w$ [cm ²]	17.608	Verifica Corte
h/t_w	34.93	
Condición (G2.1)	$h/t_w < 2.24 \sqrt{E/F_y}$ (G2.1)	
V_n [kN]	254	
$1/\Omega$	0.67	
$V_d = \Phi V_n$	169	

1.3. Mayor compresión

ESTADO CON MAYOR COMPRESIÓN		
VIGA-SECCIÓN	VC202.5-S2	
ESTADO DE CARGA API-650	c.2) Wind and Internal Pressure (D+0.4Pi+W2)	
Mux [kNm]	10.25	<u>CASO SOLICITACIÓN</u> FLEXIÓN OBLICUA COMPUESTA
Muy [kNm]	0.03	
Pu [kN]	129.81	
Vu [kN]	7.74	
Conidición	Verifica ANSI/AISC 360-22 con interacción 53.76%	

COMPRESIÓN		
Pandeo Local		
Verificación ala		
λp Flexión Caso 10 - B.4.1b	10.97	Compacta
bf/2tf	7.01	
Qs	1	
Verificación alma		
Pu/(1/Ω*b*Py)	0.111	Compacta
λp Flexocompresión Apéndice A.2.b	75.29	
hw/tw	34.93	
Qa	1	Compacta
Q	1	
Pandeo Global		
Dirección X (mayor inercia)		
L [cm]	1005	Verifica (λx<200 para cada perfil)
kx	1	
Lx [cm]	1005.3	
λx	80.425	
Dirección Y (menor inercia)		
L [cm]	0	Verifica (λy<200)
ky	1	
Ly [cm]	0	
λy	0.0	
Verificación		
λdet	80.42	Verifica Pu<Pd
λc	0.89	
Fcr [kN/cm²]	17.27	
1/Ω	0.60	
Pd [kN]	557.43	

FLEXIÓN MAYOR INERCIA (X)		
Plastificacion		Verifica (Mux<Mdy) Estado Límite: Pandeo Lateral Torsional
Mp [kNm]	150.7	
1,5 My [kNm]	200.5	
Mn p [kNm]	150.72	
Pandeo Lateral Torsional		
Lb [cm]	975	
Ubicación de la Carga	Carga en el Alma	
Vinculación	Otro (ingresar abajo Cb)	
Cb	1.17	
Lp [cm]	172.00	
Lr [cm]	536.00	
Mr [kNm]	95.25	
CASO	(Lr<Lb) -> Elástico	
Mn [kNm] (Lr<Lb)	50.16	
Pandeo Local		
Verificación ala		
λp Flexión Caso 1 - B.5.1	10.97	
λr Flexión Tabla A-F.1.1	23.96	
bf/2tf	7.01	
Fcr [kN/cm²] - Tabla A-F.1.1	280.88	
Mn [kNm]	150.72	
Verificación alma		
Pu/(1/Ω*b*Py)	0.111	
λp Flexión Caso 13 - B.5.1	75.286	
λr Flexión Caso 13 - B.5.1	150.979	
hw/tw	34.930	
Mn [kNm]	150.720	
Estado Determinane:	Pandeo Lateral Torsional	
Mn	50.16	
1/Ω	0.60	
Md x [kNm]	30.03	
FLEXIÓN MENOR INERCIA (Y)		
Plastificacion		Verifica (Muy<Mdy) Estado Límite: Plastificacion
Mp [kNm]	29.0	
1,5 My [kNm]	29.0	
Mn p [kNm]	28.98	
Pandeo Local		
Verificación ala		
Mr [kNm]	19.32	
λp Flexión Caso 1 - B.5.1	10.97	
λr Flexión Tabla A-F.1.1	23.96	
bf/2tf	7.01	
Fcr [kN/cm²] - Tabla A-F.1.1	280.8821333	
Mn [kNm]	28.98	
Estado Determinane:	Plastificacion	
Mn [kNm]	28.98	
1/Ω	0.60	
Md [kNm]	17.39	

ESFUERZOS COMBINADOS		
Pu/Pd - Tu/Td	0.23	Verifica Estados Combinados
Condición	$P_u/P_d \geq 0.2$	
Expresión	$P_u/P_d + 8/9 * (M_{ux}/M_{dx} + M_{uy}/M_{dy})$	
Valor	0.54	

CORTE		
Corte en alma		
$A_w = d * t_w$ [cm ²]	17.608	Verifica Corte
h/t_w	34.93	
Condición (G2.1)	$h/t_w < 2.24 \sqrt{E/F_y}$ (G2.1)	
V_n [kN]	254	
$1/\Omega$	0.67	
$V_d = \Phi V_n$	169	

2. Perfiles “dos tercios” V2/3

2.1. Mayor flexión con tracción en fibras superiores.

ESTADO CON MAYOR FLEXIÓN EN X-X TRACCIÓN FIBRAS SUPERIORES		
VIGA-SECCIÓN	VB135-S3	
ESTADO DE CARGA API-650	c.2) Wind and Internal Pressure (D+0.4Pi+W2)	
Mrx [kNm]	17.95	<u>CASO SOLICITACIÓN</u> FLEXIÓN OBLICUA COMPUESTA
Mry [kNm]	0.00	
Pr [kN]	102.74	
Vr [kN]	0.00	
Conidición	Verifica ANSI/AISC 360-22 con interacción 69.03%	

COMPRESIÓN		
Pandeo Local		
Verificación ala		
λp Flexión Caso 10 - B.4.1b	10.97	Compacta
bf/2tf	7.01	
Qs	1	
Verificación alma		
Pu/(1/Ω*b*Py)	0.133	Compacta
λp Flexocompresión Apéndice A.2.b	71.04	
hw/tw	34.93	
Qa	1	
Q	1	Compacta
Pandeo Global		
Dirección X (mayor inercia)		
L'x [cm]	1005	Verifica (λx<200 para cada mitad perfil)
kx	1	
Lx [cm]	1005.3	
λx	80.425	
Dirección Y (menor inercia)		
L'y [cm]	0	Verifica (λy<200)
ky	1	
Ly [cm]	0	
λy	0.0	
Verificación		
λdet	80.42	Verifica Pu<Pd
λc	0.89	
Fcr [kN/cm²]	17.27	
1/Ω	0.60	
Pd [kN]	556.32	

FLEXIÓN MAYOR INERCIA (X)	
Plastificación	
Mp [kNm]	150.7
1,5 My [kNm]	200.5
Mn p [kNm]	150.72
Pandeo Lateral Torsional	
Lb [cm]	975
Ubicación de la Carga	Carga en el Alma
Vinculación	Otro (ingresar abajo Cb)
Cb	1.17
Lp [cm]	172.00
Lr [cm]	536.00
Mr [kNm]	95.25
CASO	(Lr<Lb) -> Elástico
Mn [kNm] (Lr<Lb)	50.11
Pandeo Local	
Verificación ala	
λ_p Flexión Caso 1 - B.5.1	10.97
λ_r Flexión Tabla A-F.1.1	23.96
bf/2tf	7.01
Fcr [kN/cm ²] - Tabla A-F.1.1	280.88
Mn	150.72
Verificación alma	
$P_u/(1/\Omega \cdot b \cdot P_y)$	0.133
λ_p Flexión Caso 13 - B.5.1	70.012
λ_r Flexión Caso 13 - B.5.1	148.397
hw/tw	34.930
Mn	150.720
Estado Determinane:	Pandeo Lateral Torsional
Mn	50.11
1/ Ω	0.60
Md x [kNm]	30.01

Verifica
(Mux<Mdy)
Estado Límite:
Pandeo Lateral Torsional

FLEXIÓN MENOR INERCIA (Y)	
Plastificación	
Mp [kNm]	29.0
1,5 My [kNm]	29.0
Mn p [kNm]	28.98
Pandeo Local	
Verificación ala	
Mr [kNm]	19.32
λ_p Flexión Caso 1 - B.5.1	10.97
λ_r Flexión Tabla A-F.1.1	23.96
bf/2tf	7.01
Fcr [kN/cm ²] - Tabla A-F.1.1	280.88
Mn	28.98
Estado Determinane:	Plastificación
Mn	28.98
1/ Ω	0.60
Md [kNm]	17.39

Verifica
(Muy<Mdy)
Estado Límite:
Plastificación

ESFUERZOS COMBINADOS		
Pu/Pd - Tu/Td	0.18	Verifica Estados Combinados
Condición	Pu/Pd<0,2	
Expresión	$P_u/(2 P_d) + (M_{ux}/M_{dx} + M_{uy}/M_{dy})$	
Valor	0.69	

CORTE		
Corte en alma		
$A_w = d * t_w$ [cm ²]	17.608	Verifica Corte
h/tw	34.93	
Condición (G2.1)	$h/tw < 2,4 \sqrt{E/F_y}$ (G2.1)	
Vn [kN]	254	
1/Ω	0.67	
Vd = Φ Vn	169	

2.2. Mayor flexión con tracción en fibras inferiores.

ESTADO CON MAYOR FLEXIÓN EN X-X TRACCIÓN FIBRAS INFERIORES		
VIGA-SECCIÓN	VB135-S3	
ESTADO DE CARGA API-650	e.4) Gravity Loads (D+Lr+0.4Pe)	
Mux [kNm]	18.73	<u>CASO SOLICITACIÓN</u> FLEXIÓN OBLICUA COMPUESTA
Muy [kNm]	0.00	
Pu [kN]	-80.42	
Vu [kN]	0.00	
Conidición	Verifica ANSI/AISC 360-22 con interacción 24.36%	

COMPRESIÓN		
Pandeo Local		
Verificación ala		
λp Flexión Caso 10 - B.4.1b	10.97	Compacta
bf/2tf	7.01	
Qs	1	
Verificación alma		
Pu/(1/Ω*b*Py)	-0.069	Compacta
λp Flexocompresión Apéndice A.2.b	129.20	
hw/tw	34.93	
Qa	1	
Q	1	Compacta
Pandeo Global		
Dirección X (mayor inercia)		
L [cm]	1005	Verifica (λx<200 para cada perfil)
kx	1	
Lx [cm]	1005.3	
λx	80.425	
Dirección Y (menor inercia)		
L [cm]	0	Verifica (λy<200)
ky	1	
Ly [cm]	0	
λy	0.0	
Verificación		
λdet	80.42	Verifica Pu<Pd
λc	0.89	
Fcr [kN/cm²]	17.27	
1/Ω	0.60	
Pd [kN]	556.32	

FLEXIÓN MAYOR INERCIA (X)	
Plastificacion	
Mp [kNm]	150.7
1,5 My [kNm]	200.5
Mn p [kNm]	150.72
Pandeo Lateral Torsional	
Lb [cm]	0
Ubicación de la Carga	Carga en el Alma
Vinculación	Otro (ingresar abajo Cb)
Cb	1.17
Lp [cm]	172.00
Lr [cm]	536.00
Mr [kNm]	95.25
CASO	(Lb<Lp) -> Plástico
Mn [kNm] (Lb<Lp)	150.72
Pandeo Local	
Verificación ala	
λ_p Flexión Caso 1 - B.5.1	10.97
λ_r Flexión Tabla A-F.1.1	23.96
bf/2tf	7.01
Fcr [kN/cm ²] - Tabla A-F.1.1	280.88
Mn	150.72
Verificación alma	
$P_u/(1/\Omega \cdot b \cdot P_y)$	-0.069
λ_p Flexión Caso 13 - B.5.1	129.198
λ_r Flexión Caso 13 - B.5.1	172.971
hw/tw	34.930
Mn	150.720
Estado Determinane:	Plastificacion
Mn	150.72
1/ Ω	0.60
Md x [kNm]	90.25

Verifica
(Mux<Mdy)
Estado Límite:
Plastificacion

FLEXIÓN MENOR INERCIA (Y)	
Plastificacion	
Mp [kNm]	29.0
1,5 My [kNm]	29.0
Mn p [kNm]	28.98
Pandeo Local	
Verificación ala	
Mr [kNm]	19.32
λ_p Flexión Caso 1 - B.5.1	10.97
λ_r Flexión Tabla A-F.1.1	23.96
bf/2tf	7.01
Fcr [kN/cm ²] - Tabla A-F.1.1	280.88
Mn	28.98
Estado Determinane:	Plastificacion
Mn	28.98
1/ Ω	0.90
Md [kNm]	26.08

Verifica
(Muy<Mdy)
Estado Límite:
Plastificacion

ESFUERZOS COMBINADOS		
Pu/Pd - Tu/Td	0.07	Verifica Estados Combinados
Condición	$Pu/Pd < 0,2$	
Expresión	$Pu/(2 Pd) + (Mux/Mdx + Muy/Mdy)$	
Valor	0.24	

<u>CORTE</u>		
Corte en alma		
$Aw = d \cdot tw$ [cm ²]	17.608	Verifica Corte
h/tw	34.93	
Condición (G2.1)	$h/tw < 2,24 \sqrt{E/Fy}$ (G2.1)	
Vn [kN]	254	
$1/\Omega$	0.67	
$Vd = \Phi Vn$	169	

2.3. Mayor compresión.

ESTADO CON MAYOR COMPRESIÓN		
VIGA-SECCIÓN	VB135-S2	
ESTADO DE CARGA API-650	c.2) Wind and Internal Pressure ($D+0.4P_i+W_2$)	
Mux [kNm]	10.29	<u>CASO SOLICITACIÓN</u> FLEXIÓN OBLICUA COMPUESTA
Muy [kNm]	0.01	
Pu [kN]	129.70	
Vu [kN]	8.93	
Conidición	Verifica ANSI/AISC 360-22 con interacción 54.87%	

COMPRESIÓN		
Pandeo Local		
Verificación ala		
λp Flexión Caso 10 - B.4.1b	10.97	Compacta
bf/2tf	7.01	
Qs	1	
Verificación alma		
Pu/(1/Ω*b*Py)	0.112	Compacta
λp Flexocompresión Apéndice A.2.b	75.23	
hw/tw	34.93	
Qa	1	
Q	1	Compacta
Pandeo Global		
Dirección X (mayor inercia)		
L [cm]	1005	Verifica (λx<200 para cada perfil)
kx	1	
Lx [cm]	1005.3	
λx	80.425	
Dirección Y (menor inercia)		
L [cm]	0	Verifica (λy<200)
ky	1	
Ly [cm]	0	
λy	0.0	
Verificación		
λdet	80.42	Verifica Pu<Pd
λc	0.89	
Fcr [kN/cm²]	17.27	
1/Ω	0.60	
Pd [kN]	557.43	

FLEXIÓN MAYOR INERCIA (X)	
Plastificacion	
Mp [kNm]	150.7
1,5 My [kNm]	200.5
Mn p [kNm]	150.72
Pandeo Lateral Torsional	
Lb [cm]	1005
Ubicación de la Carga	Carga en el Alma
Vinculación	Otro (ingresar abajo Cb)
Cb	1.17
Lp [cm]	172.00
Lr [cm]	536.00
Mr [kNm]	95.25
CASO	(Lr<Lb) -> Elástico
Mn [kNm] (Lr<Lb)	48.38
Pandeo Local	
Verificación ala	
λ_p Flexión Caso 1 - B.5.1	10.97
λ_r Flexión Tabla A-F.1.1	23.96
bf/2tf	7.01
Fcr [kN/cm ²] - Tabla A-F.1.1	280.88
Mn	150.72
Verificación alma	
$P_u/(1/\Omega \cdot b \cdot P_y)$	0.112
λ_p Flexión Caso 13 - B.5.1	75.227
λ_r Flexión Caso 13 - B.5.1	150.955
hw/tw	34.930
Mn	150.720
Estado Determinane:	Pandeo Lateral Torsional
Mn	48.38
1/ Ω	0.60
Md x [kNm]	28.97

Verifica
(Mux<Mdy)
Estado Límite:
Pandeo Lateral Torsional

FLEXIÓN MENOR INERCIA (Y)	
Plastificacion	
Mp [kNm]	29.0
1,5 My [kNm]	29.0
Mn p [kNm]	28.98
Pandeo Local	
Verificación ala	
Mr [kNm]	19.32
λ_p Flexión Caso 1 - B.5.1	10.97
λ_r Flexión Tabla A-F.1.1	23.96
bf/2tf	7.01
Fcr [kN/cm ²] - Tabla A-F.1.1	280.8821333
Mn	28.98
Estado Determinane:	Plastificacion
Mn	28.98
1/ Ω	0.60
Md [kNm]	17.39

Verifica
(Muy<Mdy)
Estado Límite:
Plastificacion

ESFUERZOS COMBINADOS		
Pu/Pd - Tu/Td	0.23	Verifica Estados Combinados
Condición	$Pu/Pd \geq 0.2$	
Expresión	$Pu/Pd + 8/9 * (Mux/Mdx + Muy/Mdy)$	
Valor	0.55	

CORTE		
Corte en alma		
$A_w = d * t_w$ [cm ²]	17.608	Verifica Corte
h/t_w	34.93	
Condición (G2.1)	$h/t_w < 2.24 \sqrt{E/F_y}$ (G2.1)	
V_n [kN]	254	
$1/\Omega$	0.67	
$V_d = \Phi V_n$	169	

3. Perfiles “un tercio” V1/3

3.1. Mayor flexión con tracción en fibras superiores.

ESTADO CON MAYOR FLEXIÓN EN X-X TRACCIÓN FIBRAS SUPERIORES			
VIGA-SECCIÓN	VB4-S3		
ESTADO DE CARGA API-650	c.2) Wind and Internal Pressure (D+0.4Pi+W2)		
Mrx [kNm] Mry [kNm] Pr [kN] Vr [kN]	17.95 0.00 102.74 0.00	CASO SOLICITACIÓN FLEXIÓN OBLICUA COMPUESTA	
Conidición	Verifica ANSI/AISC 360-22 con interacción 69.03%		
COMPRESIÓN			
Pandeo Local			
Verificación ala			
λp Flexión Caso 10 - B.4.1b bf/2tf Qs	10.97 7.01 1	Compacta	
Verificación alma			
Pu/(1/Ω*b*Py) λp Flexocompresión Apéndice A.2.b hw/tw Qa	0.133 71.04 34.93 1		Compacta
Q	1		
Pandeo Global			
Dirección X (mayor inercia)			
L'x [cm] kx Lx [cm] λx	1005 1 1005.3 80.425	Verifica (λx<200 para cada mitad perfil)	
Dirección Y (menor inercia)			
L'y [cm] ky Ly [cm] λy	0 1 0 0.0	Verifica (λy<200)	
Verificación			
λdet λc Fcr [kN/cm²] 1/Ω Pd [kN]	80.42 0.89 17.27 0.60 556.32	Verifica Pu<Pd	

FLEXIÓN MAYOR INERCIA (X)	
Plastificacion	
Mp [kNm]	52.8
1,5 My [kNm]	69.8
Mn p [kNm]	52.80
Pandeo Lateral Torsional	
Lb [cm]	975
Ubicación de la Carga	Carga en el Alma
Vinculación	Otro (ingresar abajo Cb)
Cb	1.17
Lp [cm]	115.00
Lr [cm]	391.00
Mr [kNm]	33.17
CASO	(Lr<Lb) -> Elástico
Mn [kNm] (Lr<Lb)	13.10
Pandeo Local	
Verificación ala	
λ_p Flexión Caso 1 - B.5.1	10.97
λ_r Flexión Tabla A-F.1.1	23.96
bf/2tf	5.88
Fcr [kN/cm ²] - Tabla A-F.1.1	398.82
Mn	52.80
Verificación alma	
$P_u/(1/\Omega * b * P_y)$	0.040
λ_p Flexión Caso 13 - B.5.1	96.532
λ_r Flexión Caso 13 - B.5.1	159.646
hw/tw	28.393
Mn	52.800
Estado Determinane:	Pandeo Lateral Torsional
Mn	13.10
1/ Ω	0.60
Md x [kNm]	7.84

Verifica
(Mux<Mdy)
Estado Límite:
Pandeo Lateral Torsional

FLEXIÓN MENOR INERCIA (Y)	
Plastificacion	
Mp [kNm]	10.2
1,5 My [kNm]	10.2
Mn p [kNm]	10.22
Pandeo Local	
Verificación ala	
Mr [kNm]	6.816
λ_p Flexión Caso 1 - B.5.1	10.97
λ_r Flexión Tabla A-F.1.1	23.96
bf/2tf	5.88
Fcr [kN/cm ²] - Tabla A-F.1.1	398.82
Mn	10.22
Estado Determinane:	Plastificacion
Mn	10.22
1/ Ω	0.60
Md [kNm]	6.13

Verifica
(Muy<Mdy)
Estado Límite:
Plastificacion

ESFUERZOS COMBINADOS		
Pu/Pd - Tu/Td	0.08	Verifica Estados Combinados
Condición	$Pu/Pd < 0,2$	
Expresión	$Pu/(2 Pd) + (Mux/Mdx + Muy/Mdy)$	
Valor	0.80	

CORTE		
Corte en alma		
$Aw = d*tw$ [cm ²]	8.904	Verifica Corte
h/tw	28.39	
Condición (G2.1)	$h/tw < 2,24\sqrt{E/Fy}$ (G2.1)	
Vn [kN]	128	
$1/\Omega$	0.67	
$Vd = \Phi Vn$	85	

3.2. Mayor flexión con tracción en fibras inferiores.

ESTADO CON MAYOR FLEXIÓN EN X-X TRACCIÓN FIBRAS INFERIORES		
VIGA-SECCIÓN	VA3-S3	
ESTADO DE CARGA API-650	e.4) Gravity Loads (D+Lr+0.4Pe)	
Mux [kNm]	6.30	<u>CASO SOLICITACIÓN</u> FLEXIÓN OBLICUA COMPUESTA
Muy [kNm]	0.00	
Pu [kN]	-5.62	
Vu [kN]	0.00	
Conidición	Verifica ANSI/AISC 360-22 con interacción 20.4%	

TRACCIÓN		
Dirección X (mayor inercia)		
L [cm]	974.94	Verifica (λ_x <300 para cada mitad de perfil)
kx	1	
Lx [cm]	974.9	
λ_x	118.175	
Dirección Y (menor inercia)		
L [cm]	0.00	Verifica (λ_y <300)
ky	1	
Ly [cm]	0	
λ_y	0.0	
Verificación		
U (B.3) $\approx$ 0,9	0.75	Verifica (Pu<Pd)
Ae[cm²] = A * 0,9	21	
Pd1 - Elástico [kN]	615.6	
Pd2 - Rotura [kN]	593	
Pd [kN]	593.2	

FLEXIÓN MAYOR INERCIA (X)	
Plastificacion	
Mp [kNm]	52.8
1,5 My [kNm]	69.8
Mn p [kNm]	52.80
Pandeo Lateral Torsional	
Lb [cm]	0
Ubicación de la Carga	Carga en el Alma
Vinculación	Otro (ingresar abajo Cb)
Cb	1.17
Lp [cm]	115.00
Lr [cm]	391.00
Mr [kNm]	33.17
CASO	(Lb<Lp) -> Plástico
Mn [kNm] (Lb<Lp)	52.80
Pandeo Local	
Verificación ala	
λ_p Flexión Caso 1 - B.5.1	10.97
λ_r Flexión Tabla A-F.1.1	23.96
bf/2tf	5.88
Fcr [kN/cm ²] - Tabla A-F.1.1	398.82
Mn	52.80
Verificación alma	
$P_u/(1/\Omega \cdot b \cdot P_y)$	-0.009
λ_p Flexión Caso 13 - B.5.1	111.268
λ_r Flexión Caso 13 - B.5.1	165.657
hw/tw	28.393
Mn	52.800
Estado Determinane:	Plastificacion
Mn	52.80
1/ Ω	0.60
Md x [kNm]	31.62

Verifica
(Mux<Mdy)
Estado Límite:
Plastificacion

FLEXIÓN MENOR INERCIA (Y)	
Plastificacion	
Mp [kNm]	10.2
1,5 My [kNm]	10.2
Mn p [kNm]	10.22
Pandeo Local	
Verificación ala	
Mr [kNm]	6.816
λ_p Flexión Caso 1 - B.5.1	10.97
λ_r Flexión Tabla A-F.1.1	23.96
bf/2tf	5.88
Fcr [kN/cm ²] - Tabla A-F.1.1	398.82
Mn	10.22
Estado Determinane:	Plastificacion
Mn	10.22
1/ Ω	0.90
Md [kNm]	9.20

Verifica
(Muy<Mdy)
Estado Límite:
Plastificacion

ESFUERZOS COMBINADOS		
Pu/Pd - Tu/Td	0.01	Verifica Estados Combinados
Condición	$Pu/Pd < 0,2$	
Expresión	$Pu/(2 Pd) + (Mux/Mdx + Muy/Mdy)$	
Valor	0.20	

CORTE		
Corte en alma		
$Aw = d*tw$ [cm ²]	8.904	Verifica Corte
h/tw	28.39	
Condición (G2.1)	$h/tw < 2,24\sqrt{E/Fy}$ (G2.1)	
Vn [kN]	128	
$1/\Omega$	0.67	
$Vd = \Phi Vn$	85	

3.3. Mayor compresión

ESTADO CON MAYOR COMPRESIÓN		
VIGA-SECCIÓN	VA5-S2	
ESTADO DE CARGA API-650	c.2) Wind and Internal Pressure (D+0.4Pi+W2)	
Mux [kNm]	2.14	<u>CASO SOLICITACIÓN</u> FLEXIÓN OBLICUA COMPUESTA
Muy [kNm]	0.01	
Pu [kN]	65.57	
Vu [kN]	0.80	
Conidición	Verifica ANSI/AISC 360-22 con interacción 56.87%	

COMPRESIÓN		
Pandeo Local		
Verificación ala		
λp Flexión Caso 10 - B.4.1b	10.97	Compacta
bf/2tf	5.88	
Qs	1	
Verificación alma		
Pu/(1/Ω*b*Py)	0.107	Compacta
λp Flexocompresión Apéndice A.2.b	76.75	
hw/tw	28.39	
Qa	1	
Q	1	Compacta
Pandeo Global		
Dirección X (mayor inercia)		
L [cm]	975	Verifica (λx<200 para cada perfil)
kx	1	
Lx [cm]	974.9	
λx	118.175	
Dirección Y (menor inercia)		
L [cm]	0	Verifica (λy<200)
ky	1	
Ly [cm]	0	
λy	0.0	
Verificación		
λdet	118.17	Verifica Pu<Pd
λc	1.30	
Fcr [kN/cm²]	11.79	
1/Ω	0.60	
Pd [kN]	201.63	

FLEXIÓN MAYOR INERCIA (X)	
Plastificación	
Mp [kNm]	52.8
1,5 My [kNm]	69.8
Mn p [kNm]	52.80
Pandeo Lateral Torsional	
Lb [cm]	975
Ubicación de la Carga	Carga en el Alma
Vinculación	Otro (ingresar abajo Cb)
Cb	1.17
Lp [cm]	115.00
Lr [cm]	391.00
Mr [kNm]	33.17
CASO	(Lr<Lb) -> Elástico
Mn [kNm] (Lr<Lb)	13.10
Pandeo Local	
Verificación ala	
λ_p Flexión Caso 1 - B.5.1	10.97
λ_r Flexión Tabla A-F.1.1	23.96
bf/2tf	5.88
Fcr [kN/cm ²] - Tabla A-F.1.1	398.82
Mn	52.80
Verificación alma	
$P_u/(1/\Omega \cdot b \cdot P_y)$	0.107
λ_p Flexión Caso 13 - B.5.1	76.750
λ_r Flexión Caso 13 - B.5.1	151.576
hw/tw	28.393
Mn	52.800
Estado Determinane:	Pandeo Lateral Torsional
Mn	13.10
1/ Ω	0.60
Md x [kNm]	7.85

Verifica
(Mux<Mdy)
Estado Límite:
Pandeo Lateral Torsional

FLEXIÓN MENOR INERCIA (Y)	
Plastificación	
Mp [kNm]	10.2
1,5 My [kNm]	10.2
Mn p [kNm]	10.22
Pandeo Local	
Verificación ala	
Mr [kNm]	6.816
λ_p Flexión Caso 1 - B.5.1	10.97
λ_r Flexión Tabla A-F.1.1	23.96
bf/2tf	5.88
Fcr [kN/cm ²] - Tabla A-F.1.1	398.82
Mn	10.22
Estado Determinane:	Plastificación
Mn	10.22
1/ Ω	0.60
Md [kNm]	6.13

Verifica
(Muy<Mdy)
Estado Límite:
Plastificación

ESFUERZOS COMBINADOS		
Pu/Pd - Tu/Td	0.33	Verifica Estados Combinados
Condición	$Pu/Pd \geq 0.2$	
Expresión	$Pu/Pd + 8/9 * (Mux/Mdx + Muy/Mdy)$	
Valor	0.57	

CORTE		
Corte en alma		
$Aw = d * tw$ [cm ²]	8.904	Verifica Corte
h/tw	28.39	
Condición (G2.1)	$h/tw < 2.24 \sqrt{E/F_y}$ (G2.1)	
V_n [kN]	128	
$1/\Omega$	0.67	
$V_d = \Phi V_n$	85	



Facundo Pfeffer
DNI 42129457