

OPTIMIZACIÓN DE LA CUBIERTA ESFÉRICA AUTOPORTANTE DE UN TANQUE INDUSTRIAL DE GRANDES DIMENSIONES

STRUCTURAL OPTIMIZATION OF THE SELF-SUPPORTING DOME ROOF OF A LARGE OIL TANK

Facundo T. Leguizamón Pfeffer^a, Horacio N. Fideleff^a, Oscar Möller^a.

^a *Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina.*

Palabras clave: Optimización estructural, Cubierta tipo domo autoportante, Tanque industrial de acero, Norma API 650, Estructuras de grandes luces.

Resumen. Una estructuración frecuente para la cubierta de tanques industriales de almacenaje de combustible es la de un domo autoportante que, compuesta por un entramado de perfiles y chapa de acero, logra resistir una variedad de acciones externas junto a su peso propio sustentándose únicamente en su perímetro. Existe una amplia variedad de diseños estructurales para este tipo de cubierta, lo que la convierte en una tipología ampliamente discutida en trabajos de optimización estructural. Este trabajo se centra en la optimización de la cubierta autoportante tipo domo de un tanque industrial de 50 metros de diámetros y 17.5 metros de altura. Los parámetros a optimizar son el espesor de la chapa, la rigidez del anillo de borde de la cubierta y el radio del casquete esférico, utilizando un modelo numérico paramétrico con elementos de cáscara MITC lagrangeanos cuadráticos en el software COMSOL Multiphysics. Se analiza la respuesta estática de la estructura bajo dos combinaciones de cargas críticas conforme a la norma API-650, incluyendo sobrecargas, presiones internas y la acción del viento. La evaluación del desempeño se basa en los factores críticos de carga de pandeo lineal, con el objetivo principal de minimizar el peso total de la estructura. El estudio concluye identificando una configuración óptima que equilibra la eficiencia en el peso con márgenes de seguridad, brindando interesantes conclusiones para el diseño de cubiertas de grandes luces y sin apoyos intermedios.

Keywords: Structural optimization, Self-supporting dome roof, Oil storage welded tanks, API 650 standard, Long-span structures.

Abstract. Self-supporting dome roofs are a widely adopted solution for the roof structure of welded oil storage tanks. These structures, consisting of an arrangement of steel girders and plates, are capable of resisting various external actions, in addition to their own weight, relying solely on perimeter support. The diverse range of structural configurations available for this type of roof structure has made it a frequent subject of structural optimization research. This paper focuses on optimizing the 50-meter-diameter, 17.5-meter-high, self-supporting dome roof of an industrial oil tank. The optimization parameters include the plate thickness, the stiffness of the roof-to-shell junction ring, and the dome radius. A numerical model with quadratic Lagrangian MITC shell elements in COMSOL Multiphysics is used. The static response of the structure is analyzed under two critical load combinations, including live loads, gas pressures, and wind action in accordance with API-650 standard. Performance is assessed based on critical linear buckling load factors, while attempting to minimize the structure's total weight. The study concludes by identifying an optimal configuration that balances weight efficiency with safety margins, providing valuable insights into the design of large-span, self-supporting dome roofs.

1 INTRODUCCIÓN

El marco normativo más utilizado para el diseño de tanques de almacenaje de combustible con presiones de funcionamiento cercanas a la atmosférica es la norma API 650 (American Petroleum Institute, 2021). 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, rigidizada con un entramado de perfiles metálicos.

En el procedimiento constructivo convencional, cada aro de la envolvente se va montando sobre el anterior sucesivamente hasta completar la altura total de la envolvente (Masktech Engineers, 2016), que en conjunto con las columnas de acero interiores servirán como los apoyos para los rigidizadores de vigas por sobre los cuales se suelda la chapa de cierre de la cubierta.

Una tendencia emergente que ha cobrado mayor relevancia en los últimos años es la de constituir primera instancia solo un aro sobre la platea de fundación de aproximadamente 2,5m de altura sobre el que se monta luego la cubierta. Luego el conjunto es elevado mediante un sistema de gatos agregando sucesivamente aros desde la parte inferior hasta alcanzar la altura que la envolvente tiene en el proyectado. Este método constructivo (conocido como “Jacking-up method system”) exige que la cubierta sea autoportante, es decir, que prescindiera de columnas interiores como apoyos intermedios. A contraposición de la técnica tradicional, presenta las siguientes ventajas:

- 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 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. Existe una amplia variedad de diseños estructurales para este tipo de cubierta, lo que lo convierte en una tipología ampliamente discutida en trabajos de optimización estructural (Zdravkov and Dincheva, 2011) (N. N. Hsaine, 2020).

Se busca en este trabajo optimizar la estructura de la cubierta autoportante de un tanque de 50 metros de diámetro situado en la ciudad de Bahía Blanca, Argentina, constituida por una chapa reforzada con vigas radiales y anillos circunferenciales de perfiles IPE, siendo así soportada únicamente por la pared cilíndrica a 17.5 metros de altura. Se realiza un modelo numérico parametrizado de toda la estructura utilizando elementos de cáscara tipo MITC lagrangeanos cuadráticos en el software COMSOL Multiphysics (COMSOL, 2023). 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.

2 MODELO BASE

Resultados de trabajos anteriores permitieron arribar a un diseño preliminar del tanque mediante un análisis lineal elástico estático de primer orden (Fideleff et al., 2023). La configuración estructural resultante se encuentra en la Figura 1 y será tomada como punto de partida para las siguientes etapas de la optimización.

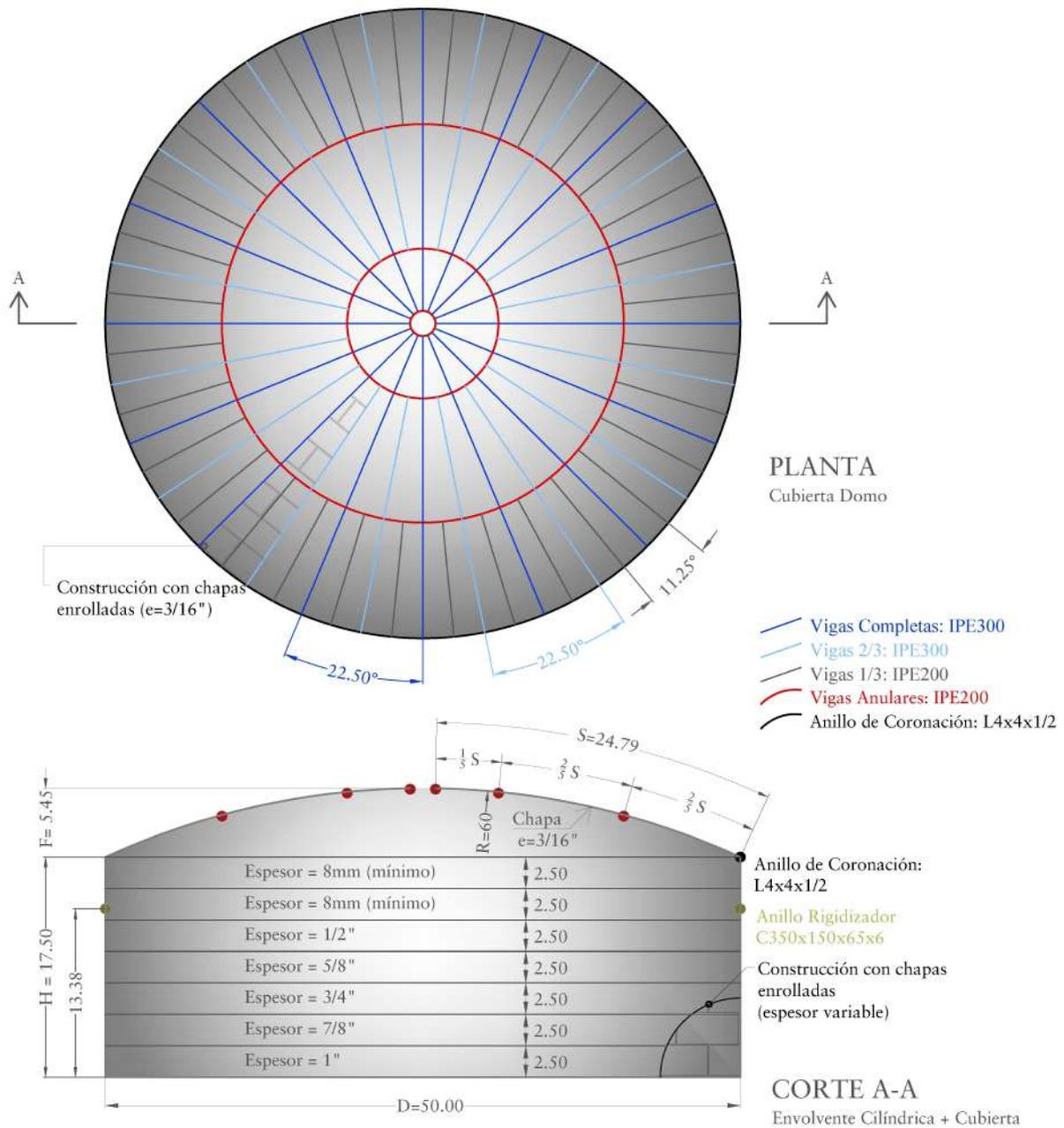


Figura 1: Configuración del tanque inicial proveniente de análisis estático lineal.

3 ACCIONES SOBRE LA ESTRUCTURA

3.1 Estados nominales

Se considera los estados dados por la norma API (American Petroleum Institute, 2021) en su apartado 5.2.1 *Loads*:

- D_L : Carga permanente de peso propio.
- H_t : Presión de fluido con agua.
- P_e : Presión de diseño exterior (P_e) 0,25 kN/m².
- P_i : Presión de diseño interior (P_i) 0,25 kN/m².
- F : Presión del fluido almacenado hasta la altura 16,52m con $p_e = 8,8$ kN/m³.
- L_r : Sobrecarga de cubierta (L_r) 1 kN/m².
- W : Viento según adaptación de reglamento ASCE 7-22 (American Society of Civil Engineers, 2022) con las velocidades básicas de diseño del CIRSOC 102-2005 (INTI, 2005). La norma norteamericana define dos distribuciones diferentes para la presión del viento en una cubierta tipo domo. Se consideran por lo tanto los estados W_1 y W_2 .
- S : Nieve según CIRSOC 104-2005 con valor de 0,248 kN/m² en planta.
- P_t : Presión de prueba 0,123 kN/m².

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.

3.2 Combinaciones de carga

Tomando como base los estados nominales expresadas anteriormente se efectúan las combinaciones expresadas en la norma API, presentes en la **Tabla 1**:

Índice	Descripción API-650
1	a) Fluid and Internal Pressure ($D + F + P_i$)
2	b) Hydrostatic Test ($D + H_t + P_t$)
3	c.1) Wind and Internal Pressure ($D + 0.4P_i + W_1$)
4	A\uparrow = c.2) Wind and Internal Pressure ($D + 0.4P_i + W_1$)
5	d.1) Wind and External Pressure ($D + 0.4P_e + W_2$)
6	d.2) Wind and External Pressure ($D + 0.4P_e + W_2$)
7	e.1) Gravity Loads $D + 0.4L_r + P_e$
8	e.2) Gravity Loads $D + 0.4S + P_e$
9	e.3) Gravity Loads $D + S + 0.4P_e$
10	D\downarrow = e.4) Gravity Loads $D + L_r + 0.4P_e$

Tabla 1: Combinaciones de carga de acuerdo con la norma API.

3.3 Estados críticos

El análisis estático lineal de primer orden realizado en un trabajo anterior (Fideleff et al., 2023) permitió seleccionar dos estados que resultan determinantes para la estructura en base a los valores pico de tensiones: el estado 4 (c.2) donde predomina la carga ascendente es denominado “A \uparrow ” y el estado 10(e.4) donde predomina las cargas descendentes gravitatorias es denominado “D \downarrow ”. De esta manera se elige trabajar únicamente con los estados A \uparrow y D \downarrow para disminuir la cantidad de ejecuciones computacionales necesarias. Esto es especialmente importante para los múltiples análisis de pandeo a realizar, en donde los tiempos de ejecución tienden a crecer.

4 MODELO NUMÉRICO

4.1 Parametrización del modelo

El modelo a utilizar se encuentra ‘parametrizado’ definiendo el radio de domo R , espesor de cubierta e , que podrán reajustarse para que el modelo se adapte a nuevas geometrías. 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 cáscara.

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.

4.2 Tipología de elementos finitos

Para la modelización *se adoptaron elementos finitos de cáscara* 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 cáscara tipo MITC lagrangeanos cuadráticos.

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 anteriores respaldan su uso (Altair Engineering, 2021; Sreenath et al., 2011). En el presente trabajo se observa además que la convergencia numérica se ve facilitada dentro de COMSOL por poseer los elementos una física única, caracterizada por las mismas ecuaciones diferenciales a resolver numéricamente en los elementos de la malla.

4.3 Mallado

La malla consiste en **75440** elementos finitos de cáscara, lo que se corresponde con un total de **1009716** grados de libertad a resolver. En la Figura 2 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.

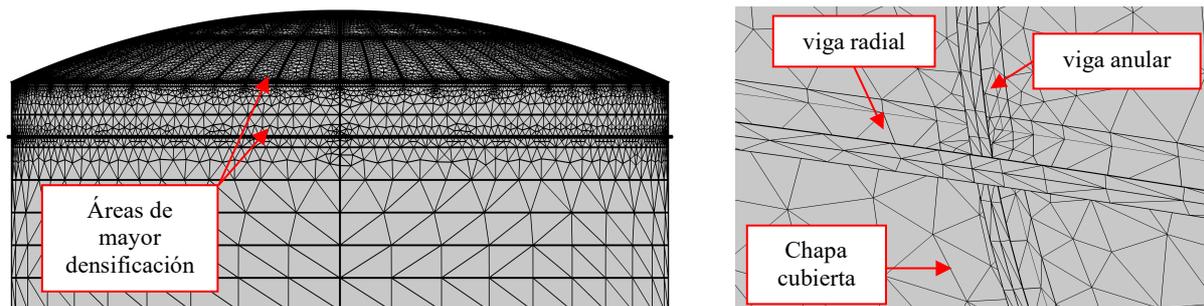


Figura 2: Discretización de diferentes elementos de viga y de la chapa.

5 ANÁLISIS ESTÁTICO SOBRE MODELO BASE

Contando con la estructura modelada con las acciones de los estados determinantes, se realiza un análisis estático elástico lineal de primer orden en dos direcciones principales de la estructura X-X e Y-Y, se representan en las Figuras 3 y 4 los valores las tensiones en la chapa para los estados A↑ y D↓. Se observa que ningún valor supera el límite de fluencia (240Mpa).

En el análisis estático se obtienen asimismo los esfuerzos a los que se encuentran sometidos los perfiles rigidizadores y se verifica que las secciones propuestas en la Tabla 1 cumplan con las prescripciones de la norma AISC 7-22.

6 OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL

A pesar de lograr alcanzar niveles satisfactorios de resistencia para un análisis estático, los resultados de un análisis de pandeo lineal realizados sugieren que la chapa de cubierta abollaría a niveles de carga inferiores a los nominales, como se podrá observar en la Tabla 2 en la próxima sección. Se busca mejorar el desempeño estructural proponiendo diferentes mejoras en la estructura del a cubierta, logrando mayores valores de carga crítica de pandeo lineal.

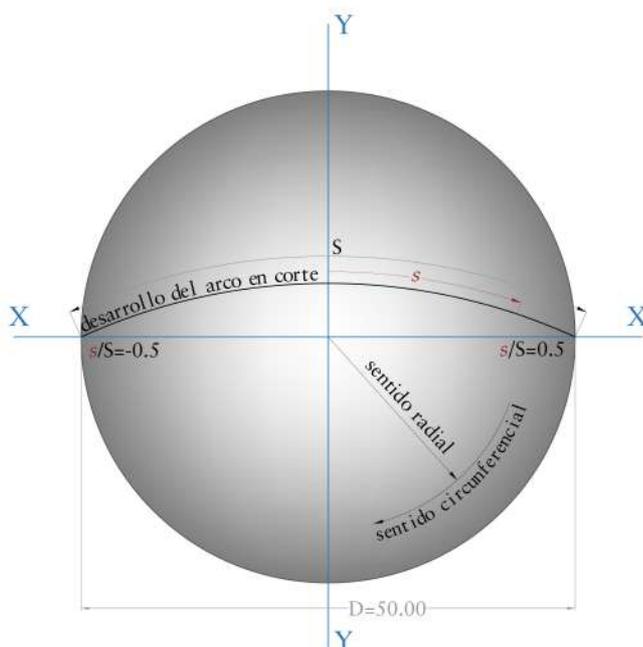


Figura 3: Direcciones de análisis para la Figura 4. Parámetros s y S .

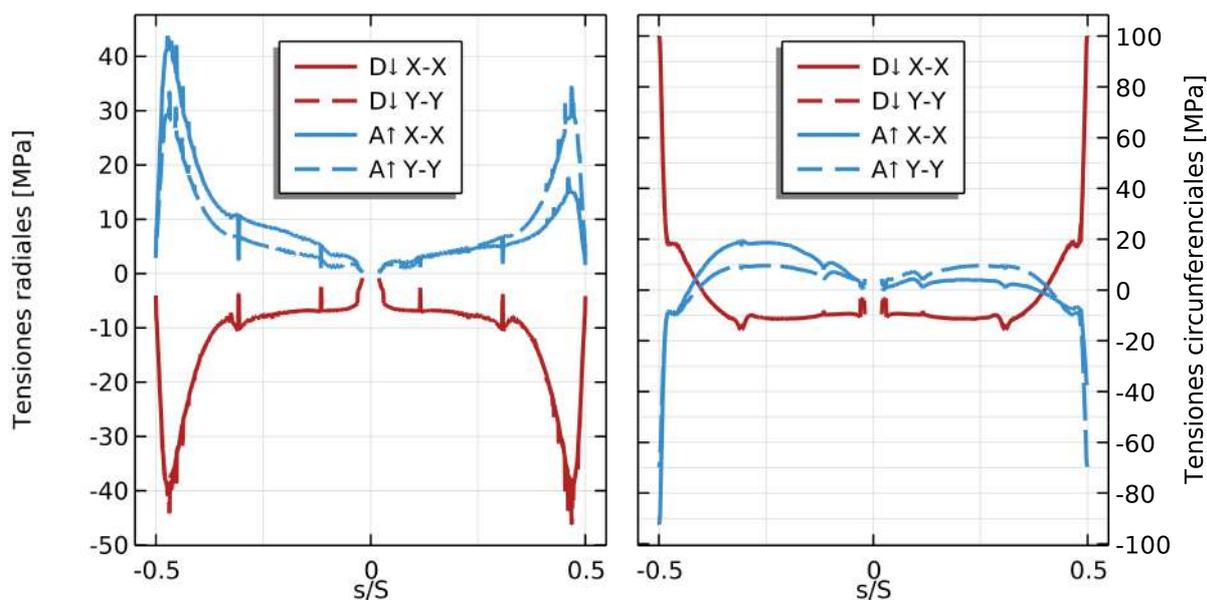


Figura 4: Tensiones radiales y circunferenciales para la chapa en las direcciones X-X e Y-Y. Las tensiones de tracción poseen valor positivo y las de compresión negativo.

6.1 Planteo de Mejoras

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 membranal producido por el apoyo de la envolvente.
- 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 membranal con una condición de borde más adecuada (Rubinstein, 2006).
- Aumento de la **rigidez del anillo de borde** en el encuentro envolvente-cubierta, de manera de generar un anillo de tracción para el estado $D\downarrow$ y de compresión para el estado $A\uparrow$.

(a) Espesor de la chapa

Dos alternativas distintas de la original se plantean en la Figura 5. La primera consiste en **aumentar el espesor de la primera región 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".

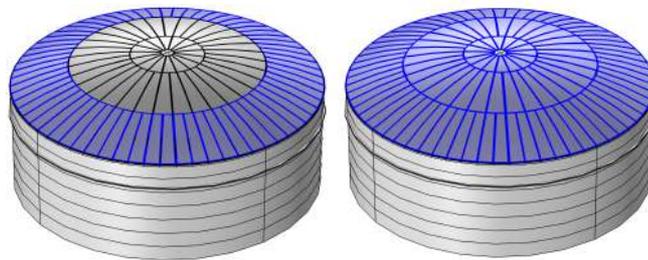


Figura 5: Propuesta de cambio de espesor: (Izquierda) Primera región a 1/4". (Derecha) toda la cubierta 1/4".

(b) Radio de curvatura

Al igual que para el espesor de la chapa, se plantean dos alterativas 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 . 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 6:

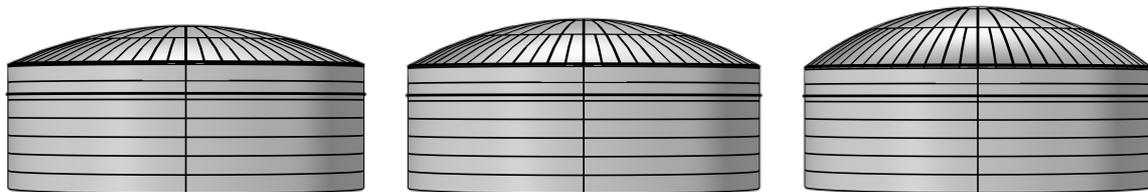


Figura 6: Variación de radios de curvatura de la cubierta. De izquierda a derecha: 60m, 50m y 40m.

(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 membranal (Rubinstein, 2006). Para esto, se propone utilizar un perfil "U" conformado por 3 chapas soldadas de 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 5. De esta manera, se definen las siguientes alternativas:

- Como primera alternativa corresponde la situación original, sin el rigidizador tipo U y únicamente con el perfil L4"x1/2" reglamentario, con una sección de área de 24.45 cm².

- Como segunda alternativa, se utilizan alas de 10 cm de largo para el perfil U. Adicionando el área de la sección transversal del perfil L y el del U se tiene un área total de 91.45 cm².
- Como propuesta final, se utilizan alas de 20 cm de largo para el perfil U adicional, resultando en un área total de 117 cm².

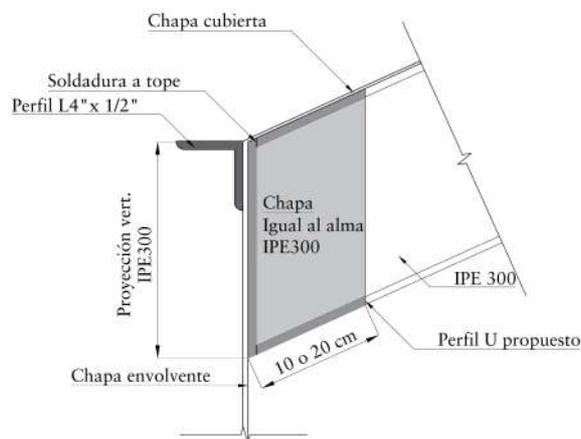


Figura 7: Detalle de anillo U rigidizador de borde – Propuesta 3.

6.2 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 menor factor de carga crítica de pandeo 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.

Para cada set de parámetros, se configura un nuevo modelo en COMSOL con el cual se obtiene el factor de carga crítica de pandeo λ para los estados A \uparrow y D \downarrow . Por último, se computa el peso de los elementos de la cubierta. Los resultados se encuentran indicados en la Tabla 2.

7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del análisis de pandeo lineal realizado se encuentran en la Tabla 2. Para el caso de los factores de carga crítica del estado descendente D \downarrow , se destaca que:

- Mayoritariamente resultan determinantes en el abollamiento de la chapa, produciéndose valores menores del multiplicador de carga crítica que los correspondientes de A \uparrow .
- 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, con valores de λ cercanos a la unidad.
- Si se acompaña el aumento del espesor con una disminución del radio de la cubierta, el abollamiento se vuelve a producir en el primer tercio de la cubierta. Esto no genera un aumento del peso significativo, solo del 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 disminución del factor de carga crítica debido al aumento del peso propio.

Para el estado de carga ascendente $A \uparrow$, se observa:

- Que los valores de λ 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 4, en donde se podía observar cómo la zona de mayores tensiones de compresión se encuentra en un área muy acotada. La mayor área del anillo U permite reducir los picos de tensiones localizados.

Espesor de la chapa cubierta	Radio de curvatura de la cubierta R	Área Anillo(s) Rigidizador(es) A	Factor de carga crítica λ		Peso de la cubierta [t]	Aumento % de peso
			Estado D↓	Estado A↑		
			$D + L_r + 0.4P_e$	$D + W_2 + 0.4P_i$		
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%

Tabla 2: 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.

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 de este ha permitido mejorar el comportamiento de la cubierta y se espera que presente mayores ventajas cuando se consideren los fenómenos no lineales geométricos en el análisis de pandeo.

8 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.

Trabajos de investigación futuros que contemplen grandes desplazamientos permitirán evaluar la importancia de la no linealidad geométrica sobre los valores de carga crítica.

9 REFERENCIAS

- Altair Engineering. *Modeling with Beam, Shell, and Solid FE*, 2021.
- American Petroleum Institute. *API-650*, 2021.
- American Society of Civil Engineers. *ASCE 7-22*, 2022.
- COMSOL, Inc. *COMSOL Multiphysics®*, 2023.
- Fideleff, H., Pfeffer, F.T.L., Möller, O., Belluchini, C., *Mecánica Computacional*, 39, 141–150, 2023.
- Instituto Nacional de Tecnología Industrial. *CIRSOC 102-2005: Reglamento Argentino de acción del viento sobre las construcciones*, 2005.
- Masktech Engineers. *Erection procedure for field erected tank using jacking method*, 2016.
- N. N. Hsaine. *Structural Optimization of Self-Supported Dome Roof Frames under Gust Wind Loads*, 2020.
- Rubinstein, M. *Análisis Estructural II. Universidad Nacional de Rosario (UNR)*, 2006.
- Zdravkov, L.A., Dincheva, T.D. *Design of self-supporting dome roofs*, 2011.