

DISEÑO Y PANDEO LINEAL DE TANQUES INDUSTRIALES DE GRANDES DIMENSIONES

DESIGN AND LINEAR BUCKLING ANALYSIS OF LARGE INDUSTRIAL TANKS

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

^a*Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Facultad Cs.Ex., Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Riobamba y Berutti, 2000 Rosario, Argentina,*
fideleff@fceia.unr.edu.ar

Palabras clave: Tanques industriales, Análisis lineal, Cargas de pandeo.

Resumen. El diseño de tanques industriales para combustibles de grandes dimensiones se realiza bajo normas API 650 y generalmente incluye cubiertas en forma de domo soportado con columnas interiores. Se investiga en este trabajo el comportamiento de un tanque de 50m de diámetro y 17,5m de altura de la pared cilíndrica, con una cubierta en forma de domo pero sin columnas interiores. Se realiza un modelo numérico por el método elementos finitos. Se analiza la respuesta estática con análisis de primer orden para varias combinaciones de carga verificando el desempeño de chapa y vigas. Se realiza análisis de las cargas de pandeo lineal para dos combinaciones de acciones. La interpretación de los resultados numéricos de algunos valores de cargas de pandeo sugiere modificaciones al diseño, especialmente en la zona de conexión entre la cubierta y la pared cilíndrica.

Keywords: Industrial tanks, Linear analysis, Buckling loads.

Abstract. The design of large industrial fuel tanks is carried out under API 650 standards and generally includes dome-shaped roof supported by interior columns. In this paper it is investigated the behavior of a tank with a diameter of 50m and a cylindrical wall height of 17,5m, with a dome-shaped roof but without interior columns. A numerical model is made by the finite element method. The static response is obtained with first order analysis for various load combinations, verifying the performance of plates and beams. Linear buckling loads are obtained for two combinations of actions. The interpretation of the numerical results of some values of buckling loads suggests modifications to the design, especially in the area of connection between the roof and the cylindrical wall.

1 INTRODUCCIÓN

Los tanques industriales para la contención de fluidos de grandes dimensiones son empleados principalmente en la industria del petróleo y en la industria petroquímica. El marco normativo más utilizado en los tanques de este tipo con presiones de funcionamiento cercanas a la atmosférica es la norma API 650 (American Petroleum Institute, 2020). 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. 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. En contraposición un proceso constructivo con creciente utilización consiste en montar el aro superior de la envolvente junto con todos los elementos de la cubierta a nivel de la platea, e ir elevando este conjunto mediante gatos hidráulicos y colocando los aros inferiores debajo de este. Este procedimiento constructivo lo realizan empresas de Latinoamérica (Mexicana de Recipientes a Presion SA de CV, 2015) y argentinas (Cantoni S.A., 2022). Esta metodología constructiva implica incorporar tramos de las columnas interiores al ir elevando el conjunto, hecho que complejiza la construcción. Un ejemplo del diseño de un tanque con columnas interiores puede verse en Refinería Bahía Blanca S.A.U. En el presente trabajo se investiga la posibilidad de soportar la cubierta del tanque mencionado únicamente en la envolvente exterior prescindiendo de las columnas interiores.

Si bien se han desarrollado trabajos que tratan la inestabilidad de la envolvente de los tanques para la industria petrolera (Rossana C. Jaca, 2006), el presente trabajo se enfoca en la cubierta tipo domo con refuerzo de vigas meridianas y anillos.

2 DISEÑO DEL TANQUE

2.1 Datos Geométricos y de Diseño

Se parte del diseño del tanque de Refinería Bahía Blanca S.A.U que cuenta con columnas interiores y sobre el que se platea eliminar dichas columnas. El tanque analizado tiene los siguientes datos geométricos y de diseño:

Diámetro de la envolvente $D = 50\text{m}$; altura de la envolvente cilíndrica $H = 17,5\text{m}$; radio del domo esférico $R = 60\text{m}$; norma API 650; operación atmosférica; peso específico del fluido almacenado $p_e = 8,8 \text{ N/m}^3$; espesor de la chapa del domo $e_{\text{cubierta}} = 5\text{mm}$; espesor de la chapa de la envolvente cilíndrica 7 tramos de 2,5m de alto cada uno de espesor variable 8mm / 8mm / 12,7mm/ 15,9 mm / 19mm / 22,2mm / 25,4mm; calidad del acero A-36/F-24; vigas meridianas IPE300; vigas anulares IPE200

El esquema estructural de la cubierta domo se representa en la Figura 1.

2.2 Acciones

Se considera estados dados por la norma API:

Carga permanente (D_L) por peso propio de la estructura con $\gamma_{\text{acero}} = 76,98\text{kN/m}^3$; presión de fluido con agua (H_i) hasta la altura 16,52m con $p_{\text{ew}} = 9,81 \text{ kN/m}^3$; presión del fluido almacenado (F) hasta la altura 16,52m con $p_e = 8,8 \text{ kN/m}^3$; sobrecarga de cubierta (L_r) 1kN/m^2 ; presión de diseño exterior (P_e) $0,1\text{kN/m}^2$; presión de diseño interior (P_i)

0,098kN/m²; viento (W) reglamento CIRSOC 102-2005 ubicación Bahía Blanca V=55m/s exposición C categoría III; nieve (S) CIRSOC 104-2005 con valor de 0,248 kN/m² en planta; presión de prueba (P_t) 0,1225 kN/m²

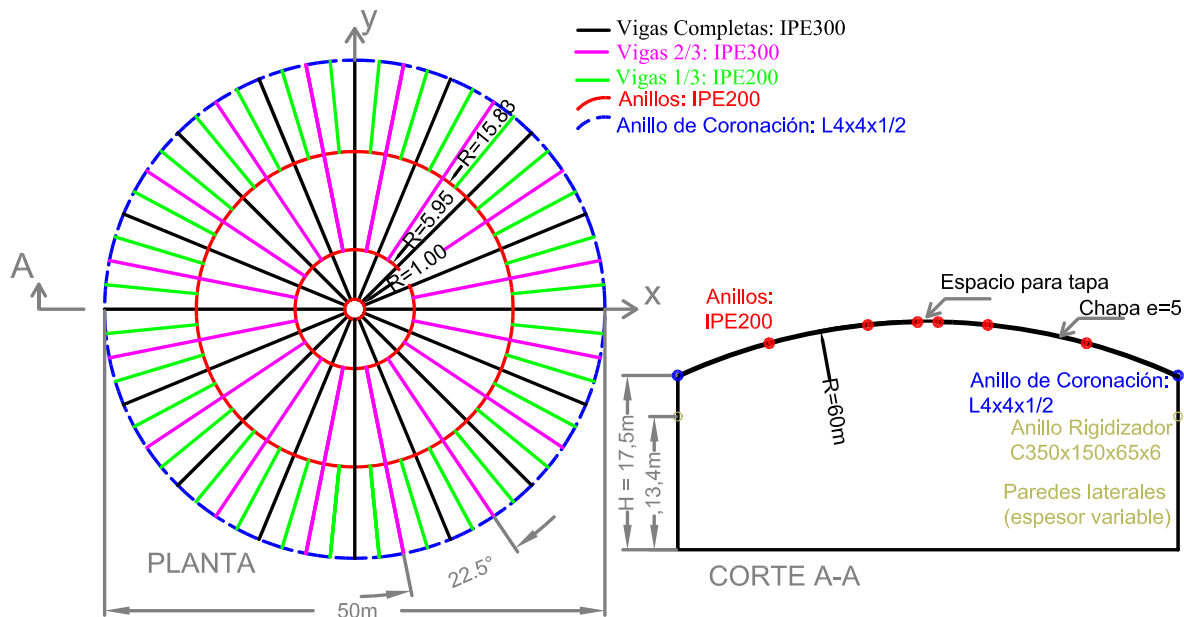


Figura 1: Geometría del tanque analizado

Tomando como base las acciones básicas expresadas anteriormente se efectúan las combinaciones expresadas en la norma API

- 1) $D_L + F + P_i$, 2) $D_L + H_i + P_t$, 3) $D_L + W + 0,4P_i$, 4) $D_L + W + 0,4P_e$, 5) $D_L + L_r + 0,4 P_e$,
- 6) $D_L + P_e + 0,4 L_r$, 7) $D_L + P_e + 0,4 S$, 8) $D_L + S + 0,4 P_e$

3 MODELO NUMÉRICO

Para la modelización se adopto elementos finitos de cascara que se adapta 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 COMSOL (COMSOL Multiphysic). La cantidad de elementos utilizados es 148980 con una cantidad de grados de libertad 1968276. Un detalle de la malla adoptada se esquematiza en la Figura 2.

4 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

4.1 Análisis de primer orden

Se verifica el diseño estructural propuesto de acuerdo a los estándares de la norma API para las ocho combinaciones nominales explicitadas en la Sección 2.2. Se evalúan los esfuerzos internos a los que están sometidos los elementos estructurales de tipo viga (meridianos y anillos). 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 3 para las vigas meridionales, con un total de 26 secciones.

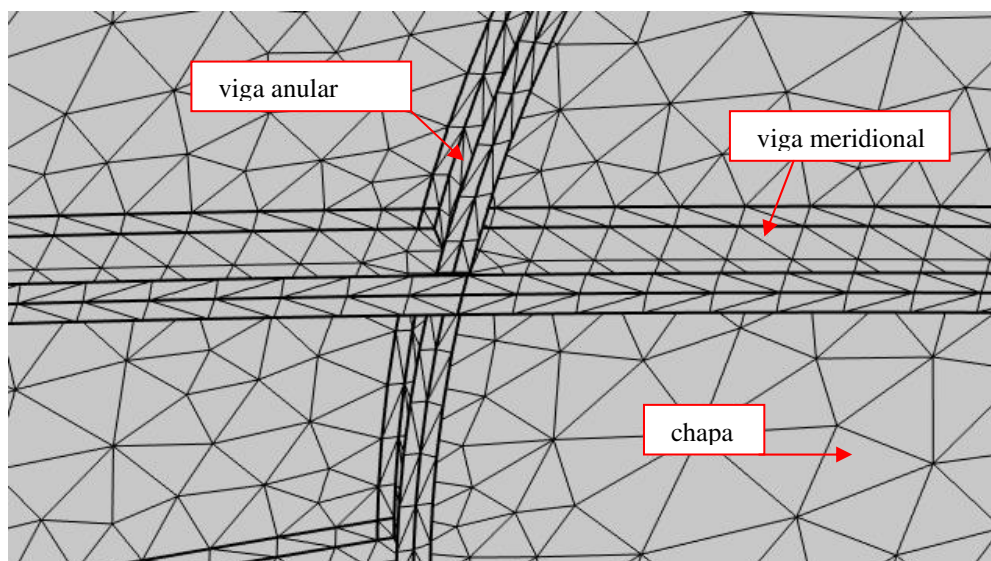


Figura 2 – Detalle de la malla utilizada en la unión entre la chapa las vigas meridionales y el anillo

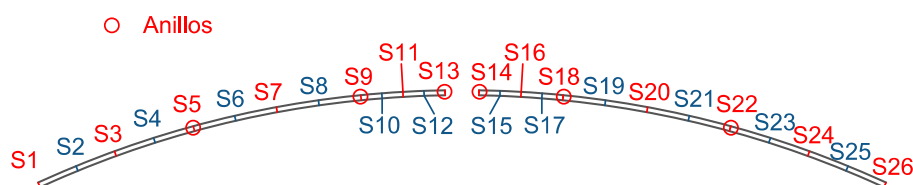


Figura 3 – Secciones en las vigas meridianas para las verificaciones estructurales

De esta manera se obtienen los esfuerzos normales y momentos flectores para cada sección de los elementos de viga, y para cada estado de carga. Se observa que los estados que resultan determinantes son $D+W+0.4P_i$ y $D+L_r+0.4P_e$. Luego se realizan las verificaciones de resistencia de acuerdo a la reglamentación AISC 360-16- disposición ASD (American Institute of Steel Construction, 2016). En las Figuras 4 a 7 se representan los esfuerzos normales internos en la chapa para los estados determinantes.

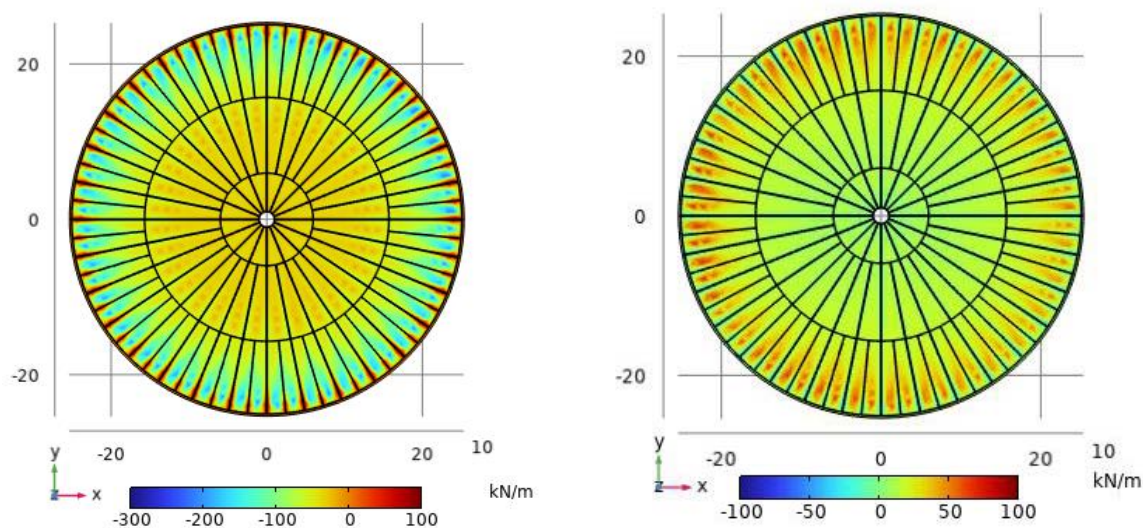


Figura 4 – Esfuerzos normales meridionales sobre la chapa de la cubierta, izquierda estado $D+L_r+0.4P_e$, derecha $D+W+0.4P_i$

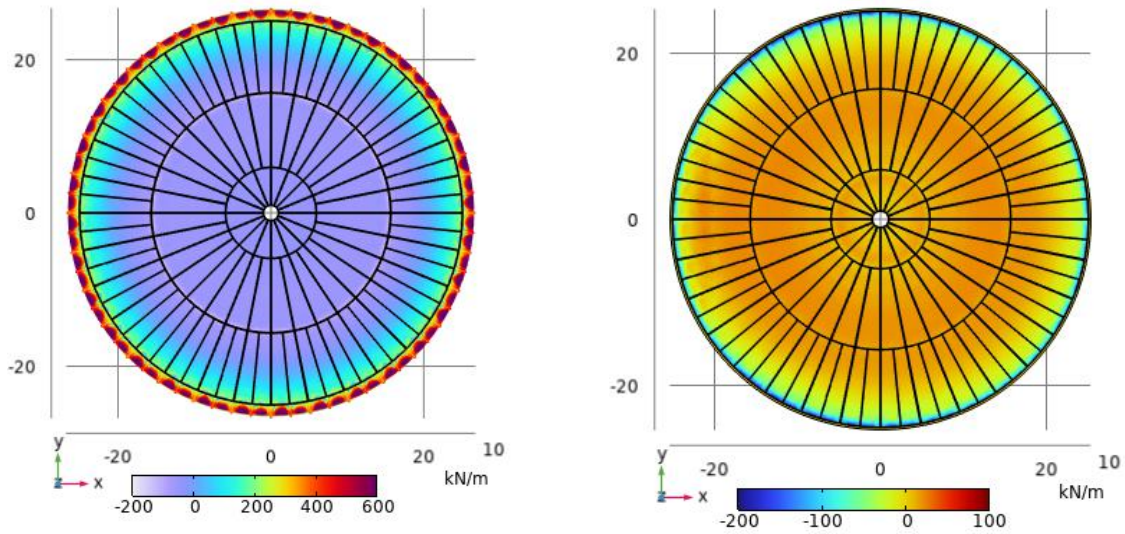


Figura 5 – Esfuerzos normales circunferenciales sobre la chapa de la cubierta, izquierda estado $D+L_r+0.4P_e$, derecha $D+W+0.4P_i$

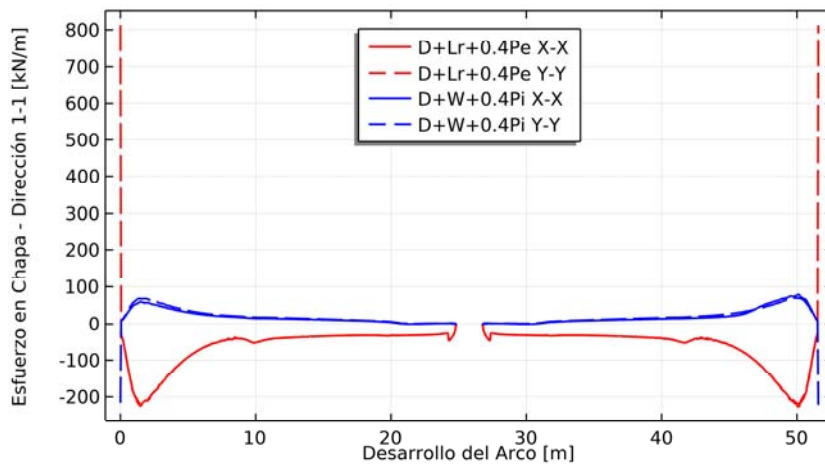


Figura 6 – Esfuerzos normales meridionales en la chapa para los estados determinantes en una sección según el eje X y según el eje Y

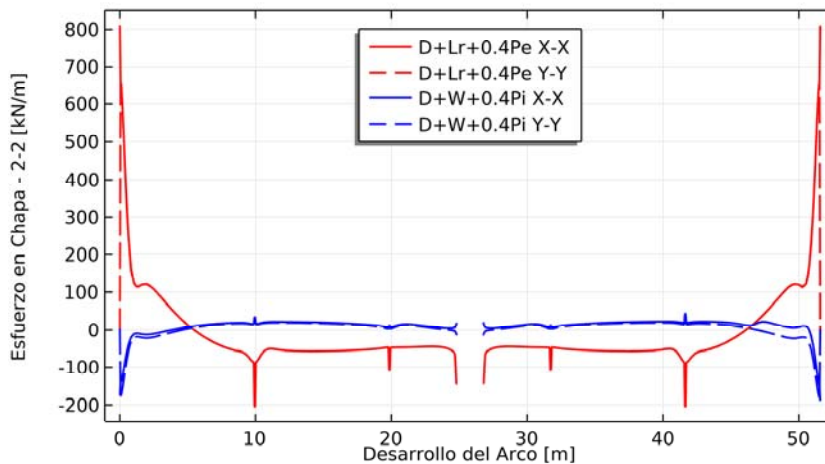


Figura 7 – Esfuerzos normales circunferenciales en la chapa para los estados determinantes en una sección según el eje X y según el eje Y

En las Figuras 8 y 9 se presentan los esfuerzos normales y flectores en las vigas meridianas en función de las secciones de la Figura 3.

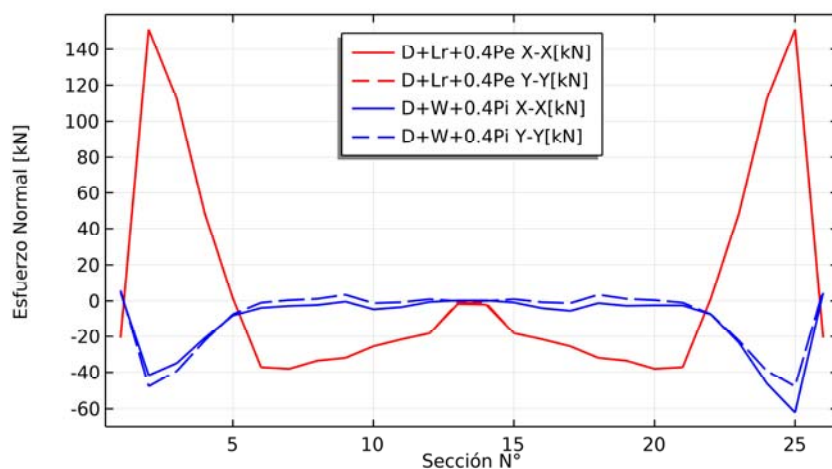


Figura 8 – Esfuerzo normales en las vigas meridianas según eje X e Y para los estados determinantes

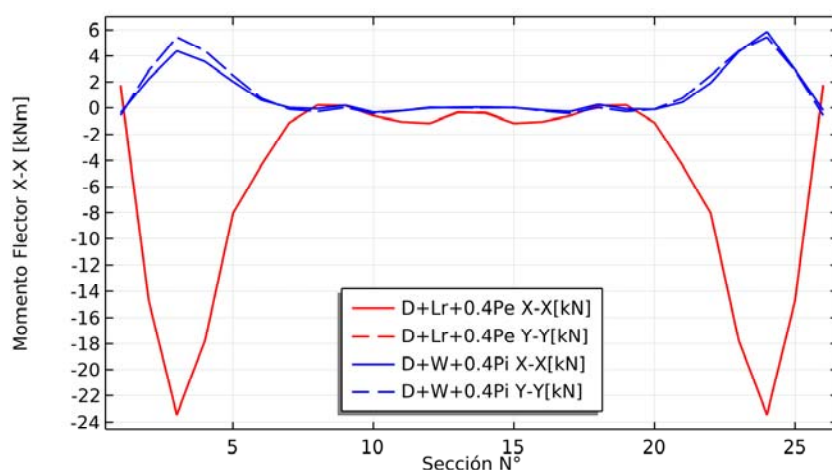


Figura 9 – Esfuerzo de momento flector en las vigas meridianas según eje X e Y para los estados determinantes

4.2 Análisis de pandeo lineal

Este tipo de análisis permite estimar a que 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 $D_L + W + 0,4 P_i$

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

$$\mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{f} \quad (1)$$

Donde \mathbf{f} es la carga estática aplicada que genera la inestabilidad, \mathbf{K} la matriz de rigidez del sistema y \mathbf{u} el vector de desplazamientos correspondientes con dicha carga. La matriz de rigidez se puede descomponer en una parte lineal y no lineal resultando (1)

$$(\mathbf{K}_L + \mathbf{K}_{NL})\mathbf{u} = \mathbf{f} \quad (2)$$

En una aproximación lineal, la matriz \mathbf{K}_{NL} es proporcional a las tensiones en la estructura y por lo tanto a las cargas exteriores. Como se ha resuelto previamente el paso lineal de primer orden

$$\mathbf{K}_L \mathbf{u}_0 = \mathbf{f}_0 \quad (3)$$

Siendo \mathbf{u}_0 y \mathbf{f}_0 los desplazamientos y las fuerzas exteriores del paso inicial lineal para los dos estados de carga ya mencionados; podemos escribir:

$$(\mathbf{K}_L + \lambda \mathbf{K}_{NL}(\mathbf{u}_0)) \mathbf{u} = \lambda \mathbf{f}_0 \quad (4)$$

El factor λ es el multiplicador de la carga que hace que el sistema se vuelva inestable. La estructura es inestable cuando el sistema de ecuaciones resulta singular, situación que puede obtenerse resolviendo para los λ el problema de autovalores:

$$(\mathbf{K}_L + \lambda \mathbf{K}_{NL}(\mathbf{u}_0)) \mathbf{u} = \mathbf{0} \quad (5)$$

Si el factor 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 (5) indican la forma y lugar donde se produce la inestabilidad asociado al λ correspondiente.

Los resultados obtenidos de los autovalores λ y los autovectores o modos de pandeo se resumen en la siguiente Tabla 1

Estado de carga	Autovalor λ	Modo de pandeo
$D_L + L_r + 0,4 P_e$	0.547 a 1.1595	modo 1
	1.16 a 1.5392	modo 2
$D_L + W + 0,4 P_i$	1.448 a 6.315	modo 3

Tabla 1 – Modos de pandeo y multiplicador de la carga λ

El modo 1 se presenta en la chapa, en la zona entre la envolvente y el primer anillo en correspondencia con el máximo esfuerzo meridional del estado $D_L + L_r + 0,4 P_e$ y en distintas posiciones simétricas respecto del eje del tanque con pequeños saltos entre sus λ , como se ve en Figura 10.

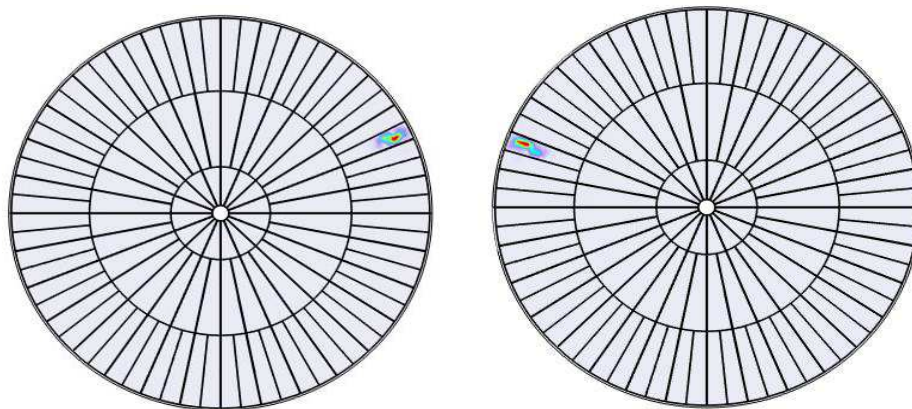


Figura 10 – Pandeo chapa estado $D_L + L_r + 0,4 P_e$, izquierda $\lambda=0,55$, derecha $\lambda=0,61$. Modo 1 de pandeo en la zona entre la envolvente y el primer anillo

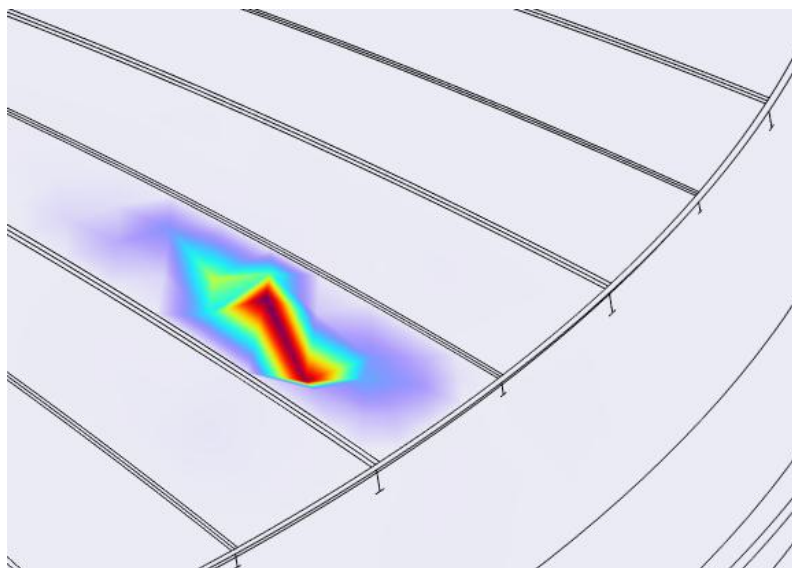


Figura 11 – Detalle pandeo chapa estado $D_L + L_r + 0,4 P_e$ $\lambda=0,55$

En la Figura 11 se presenta un detalle del modo de pandeo $\lambda=0,55$.

Para autovalores mayores se manifiesta el modo de pandeo 2 entre el primer y segundo anillo tal como se presenta en la Figura 12. En este modo, a diferencia del modo 1, se involucra desplazamiento transversal del ala inferior de las vigas meridianas como pandeo lateral torsional de ellas.

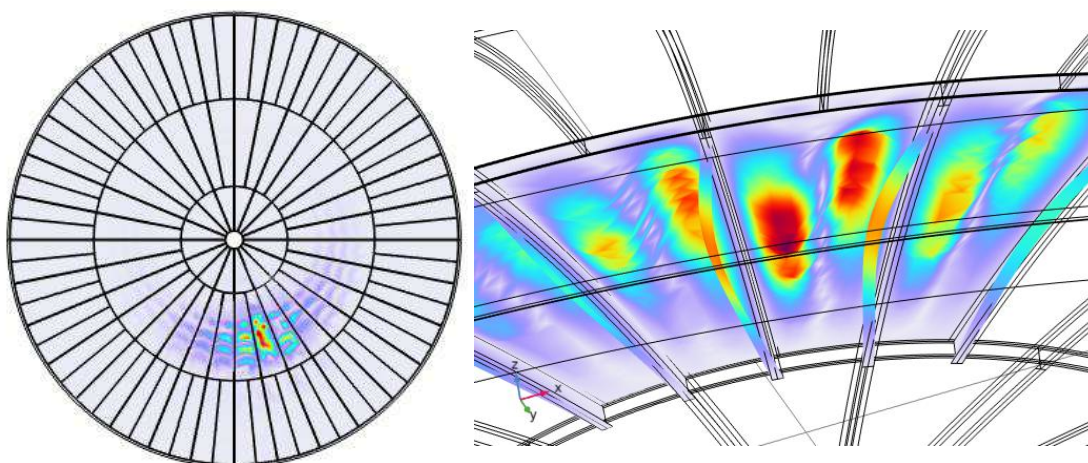


Figura 12 – Pandeo chapa estado para $D_L + L_r + 0,4 P_e$ modo 2, $\lambda=1,16$, izquierda vista general, derecha detalle de pandeo lateral torsional de las vigas meridianas.

Para el estado $D_L + W + 0,4 P_i$ en la Figura 13 se muestra el modo de pandeo 3. Este modo se localiza en la zona muy cercana de unión entre la envolvente y el domo en forma simétrica respecto del eje del tanque y con pequeños saltos en sus autovalores.

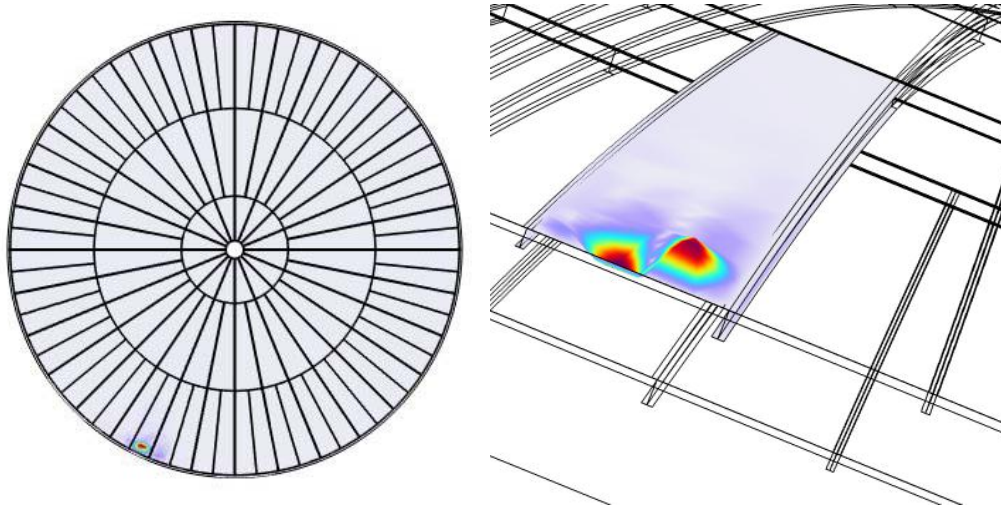


Figura 13 – Pandeo chapa estado $D_L + W + 0,4P_i$, $\lambda=1,45$ izquierda vista general, derecha detalle

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las Figuras 4 a 9 puede notarse que los gradientes espaciales de los esfuerzos internos del análisis de primer orden se incrementan notablemente en la unión entre el domo y la envolvente cilíndrica. Esta situación puede atribuirse a que 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 $D_L + W + 0,4P_i$ 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 hacia abajo sin que esta lo pueda impedir. Situación contraria ocurre con el estado $D_L + W + 0,4P_i$. Una evaluación aproximada de las tensiones membranales circunferenciales en el estado $D_L + L_r + 0,4 P_e$ y en la zona de unión del domo con la envolvente resulta:

$$\sigma_c = 800kN / m / 5mm = 16kN / cm^2 \quad (6)$$

Esta tensión resulta de intensidad significativa.

En lo que tiene que ver con el pandeo lineal, en la Tabla 1 puede verse que el estado $D_L + L_r + 0,4 P_e$ resulta más riesgoso para la inestabilidad de la chapa que $D_L + W + 0,4P_i$, alcanzando el primer autovalor λ un valor de 0.545 sensiblemente inferior a 1. Esto indica inestabilidad a valores inferiores a los de las cargas nominales.

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 $D_L + L_r + 0,4 P_e$

como para $D_L + W + 0,4P_i$, 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. 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 $D_L + L_r + 0,4 P_e$ se presentan abollamiento de la chapa que son acompañados con pandeo lateral torsional de la viga meridiana.

6 CONCLUSIONES

El diseño de cubierta domo adoptado en este trabajo concentra esfuerzos relevantes en la unión del domo con la envolvente debidos a la escasa rigidez horizontal y al giro que le provee la pared cilíndrica. Se pierde considerablemente el efecto membranaral como conjunto del domo y esto induce abollamiento en la chapa en esa zona. Una posible mejora a este diseño consistiría en aumentar la rigidez axial del pequeño anillo que en el diseño analizado se ubica en esa zona (anillo de coronación en Figura 1) o aumentar el espesor de la chapa del domo en una zona cercana a la unión del domo con la envolvente.

REFERENCIAS

- ANSI/AISC 360-16. Specification for Structural Steel Buildings. *American Institute of Steel Construction (2016)*.
- API 650-20 Welded Tanks for Oil Storage *American Petroleum Institute. (2020)*
- Cantoni S.A. (2022). *cantonisa.com*. Recuperado el 8 de Septiembre de 2023, de <https://cantonisa.com/>
- COMSOL, COMSOL Multiphysics® Modeling Software, *Comsol (2016)*.
- Mexicana de Recipientes a Presion SA de CV. Recuperado el 8 de Septiembre de 2023, de <https://www.youtube.com/watch?v=4gdCWbtRfF8>
- Rossana C. Jaca, Eduardo M. Sosa y Luis A. Godoy. Estrategias de Implementación de Límites Inferiores. *AMCA 2006* (págs. 585-604).