

# Modelado numérico del proceso de izado de un cabezal hemisférico de un regenerador

## Numerical modelling of the lifting process of a hemispherical head of a regenerator

Carlos Graciano <sup>1</sup>, Euro Casanova <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Ingeniería Civil, Medellín, Colombia.

Correo electrónico: [cagracionog@unal.edu.co](mailto:cagracionog@unal.edu.co). Orcid: 0000-0003-0659-7963

<sup>2</sup> Universidad del Bío-Bío, Departamento Ingeniería Civil y Ambiental, Chile.

Correo electrónico: [ecasanova@ubiobio.cl](mailto:ecasanova@ubiobio.cl). Orcid: 0000-0002-1701-0550

Recibido: 15 mayo, 2022. Aceptado: 21 julio, 2022. Versión final: 24 agosto, 2022.

### Resumen

Durante ciertas tareas de mantenimiento o de aumento de capacidad de equipos de refinerías en funcionamiento (*e. g.* reactores, regeneradores, etc.), con frecuencia, se hace necesario la remoción y posterior izado del cabezal hemisférico superior del equipo. En la fase de izado, el cabezal debe mantenerse de forma tal que la soldadura entre este y el cuerpo del recipiente sea factible de realizar. Esta soldadura se puede realizar si las deformaciones en la periferia de la base del cabezal son pequeñas, en caso contrario, se deben realizar procesos de ajuste adicionales que pueden retrasar la puesta en operación del equipo e inducir pérdidas económicas. En la planificación del izado, la determinación de la posición y el número de orejas a ser utilizadas es importante, esto afectará la distribución de las cargas y, en consecuencia, las deformaciones que experimentará la periferia del cabezal. En este trabajo se presenta el análisis por elementos finitos de un cabezal hemisférico de un regenerador durante el proceso de izado. El cabezal está sometido a la acción de cargas de gravedad y a cargas externas producidas por elementos estructural conectados al cabezal. En el proceso de izado, el cabezal también está sometido a las fuerzas de tensión generadas por los cables de izado. A partir del modelo numérico, se llevó a cabo un estudio paramétrico para determinar la disposición óptima de las orejas de izamiento tomando en cuenta las deformaciones en la periferia de la base del cabezal, a fin de garantizar el proceso de soldadura con el cuerpo del recipiente. Adicionalmente, se analizó el uso de un anillo rigidizador y su influencia en la deformación del cabezal.

**Palabras clave:** mecánica de sólidos; resistencia de materiales; modelado por elementos finitos; análisis lineal; operaciones de izamiento; recipientes a presión; refinerías de petróleo; modelado computacional; análisis de esfuerzos; control de deformaciones.

### Abstract

During certain maintenance or capacity-building tasks of operating refinery equipment (*e.g.* reactors, regenerators, etc.), it is often necessary to remove and subsequently hoist the upper hemispherical head of the equipment. In the lifting phase, the head must be maintained in such a way that the welding between it and the body of the vessel is feasible to perform. This welding can be performed if the deformations in the periphery of the head base are small, otherwise additional adjustment processes must be carried out that can delay the commissioning of the equipment inducing economic losses. In the planning of the hoisting, the determination of the position and the number of ears to be used is important, this will affect the distribution of the loads and consequently the deformations that the periphery of the head will experience. This paper presents a finite element analysis of a hemispheric head of a regenerator during the lifting process. The head is subjected to the action of gravity loads and external loads produced by structural

ISSN impreso: 1657 - 4583. ISSN en línea: 2145 – 8456.

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia [CC BY-ND 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/)



Como citar: C. Graciano, E. Casanova, “Modelado numérico del proceso de izado de un cabezal hemisférico de un regenerador,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 21, no. 3, pp. 101-110, 2022, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n3-2022009>.

elements connected to the head. In the lifting process, the head is also subjected to the tension forces generated by the lifting cables. From the numerical model, a parametric study was carried out to determine the optimal arrangement of the hoisting clips taking into account the deformations in the periphery of the head base, in order to guarantee the welding process with the body of the vessel. Additionally, the use of a stiffening ring and its influence on the deformation of the head were analyzed.

**Keywords:** Solid mechanics; strength of materials; finite element modeling; linear analysis; hoisting/lifting operations; pressure vessels; oil refineries; computer modeling; stress analysis; deformation control.

## 1. Introducción

En muchos proyectos industriales, particularmente en refinerías de petróleo, se hace necesario el movimiento de componentes, módulos estructurales y recipientes, que en general son objetos de grandes dimensiones en términos de diámetros, longitudes y pesos. La culminación exitosa de estos proyectos requiere de planificación y selección precisa de sistemas de elevación seguros y eficientes. Sin una planificación adecuada de las operaciones de elevación seguras y eficientes, pueden ocurrir sobrecostos y retrasos en el cronograma, y las ganancias de la instalación de la refinería de petróleo pueden disminuir drásticamente [1], [2], [3], [4], [5].

En muchas situaciones, la ubicación de los cables de izamiento utilizados en las grúas de carga depende de cada caso en particular, y las recomendaciones de diseño son inexistentes. Por lo tanto, se requiere de análisis específicos para las condiciones de carga que también permitan un control de las deformaciones en equipos que van a ser conectados o soldados en campo. En la actualidad, una herramienta muy útil es la utilización del modelado numérico a través del método de los elementos finitos. Este se ha convertido en una herramienta poderosa para el estudio lineal y no lineal de elementos mecánicos y estructuras metálicas [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12].

En la [figura 1](#), se muestra el proceso de izado de un cabezal de un regenerador en una refinería de petróleo. Usualmente, en este proceso de izado se utilizan cuatro cables verticales dispuestos de forma simétrica que se conectan posteriormente al cable principal de la grúa. El cabezal es ensamblado completamente (barandas, boquillas, material refractario y ciclones) antes de ser transportado, lo que aumenta considerablemente las cargas de gravedad. Estas cargas inducen deformaciones en la periferia del cabezal, las cuales, en caso de ser excesivas, pueden ocasionar pérdida de la circunferencialidad. Esto puede afectar y retrasar los procesos de soldadura con el resto del cuerpo del equipo al cual se va a conectar.

En muchos casos, la distribución de carga sobre los cables no es simétrica, y las deformaciones en la periferia del domo pueden variar con la posición de las orejas de izado. Otra manera de atenuar las deformaciones en la periferia del cabezal es con la utilización de un anillo rigidizador. Vale la pena resaltar que las deformaciones, y en consecuencia los desplazamientos, se deben mantener en valores muy bajos que permitan la realización de la soldadura.



Figura 1. Operación de izamiento de cabezal de un regenerador usado en una refinería de petróleo.

Fuente: [13].

Este trabajo presenta el modelo por elementos finitos del cabezal hemisférico de un regenerador perteneciente a una refinería de petróleo, para su utilización en la predicción de los esfuerzos y deformaciones que se producirán en su periferia durante la maniobra de izado. Posteriormente, se discuten las hipótesis de cálculo utilizadas y también se presenta un análisis paramétrico que permite determinar la zona ideal para la ubicación de las orejas de izado en el cabezal. Además, se estudia el efecto de un anillo rigidizador, colocado sobre la periferia del cabezal, sobre los desplazamientos del mismo.

## 2. Modelo numérico

### 2.1. Hipótesis generales de cálculo

A continuación, se presentan y discuten algunas consideraciones generales utilizadas para la elaboración y análisis de los modelos por elementos finitos del cabezal de un regenerador. En la **figura 2** se muestran las dimensiones generales del cabezal, en el cual se encuentran soldadas 20 boquillas externas; en la parte interna se encuentra otra estructura denominada *plenum* con 10 boquillas.

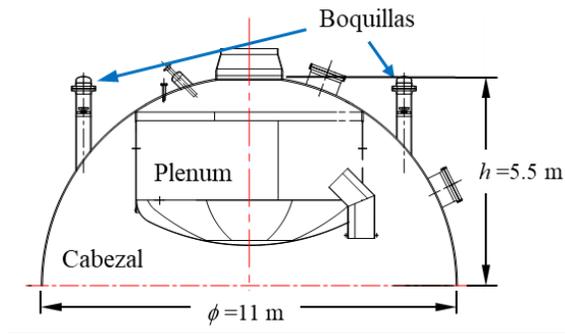


Figura 2. Cabezal del regenerador.

En este estudio, se lleva a cabo un análisis estático y lineal, es decir, se supone que las aceleraciones durante la maniobra de izado son muy pequeñas, por lo tanto, los efectos inerciales son despreciables. Además, se considera que todos los efectos no-lineales (plasticidad, inestabilidad, etc.) son locales y pueden ser despreciados en el análisis.

Puesto que las operaciones de retiro, izamiento y colocación del cabezal del equipo se realizan a temperatura ambiente, ningún efecto térmico es considerado en los análisis. La rigidez del aislamiento o del material que frecuentemente recubre el interior del cabezal se considera despreciable cuando se compara con la rigidez del acero, por lo cual este material solo es considerado como una carga de gravedad. Esta carga adicional es incluida en el modelo mediante un aumento de la densidad del acero.

### 2.2. Modelo del cabezal del regenerador

El modelo numérico del cabezal se construyó usando elementos tipo *Shell181* en el *software* ANSYS [14]. Este es un modelo simplificado del cabezal, los planos originales detallan la forma de las láminas de acero, la ubicación del material refractario, así como la ubicación de barandas y plataformas de mantenimiento en acero.

En este trabajo se presentan los valores resultantes del cálculo de estas cargas y su posición en el cabezal.

El material del cabezal es un acero al carbono SA-516 Gr 70. Las propiedades mecánicas de dicho material son: módulo de elasticidad  $E = 202$  GPa, relación de Poisson  $\nu = 0,3$ , esfuerzo máximo permisible,  $S_a = 137$  MPa [15]. Para las cargas, debido al peso, se consideraron las siguientes propiedades: densidad del acero  $\rho_a = 7877$  kg/m<sup>3</sup>; densidad del refractario  $\rho_r = 1605-2755$  kg/m<sup>3</sup>. Como se mencionó en la sección anterior, el refractario no aporta rigidez al cabezal, por esa razón el cabezal se simuló con una densidad equivalente  $\rho_{eq} = 9482-10632$  kg/m<sup>3</sup>. El cabezal está fabricado con láminas de acero con un espesor promedio de 25,4 mm.

La **figura 3** muestra la malla utilizada en el modelo numérico del cabezal. Luego de realizar un estudio de convergencia, en el modelo del cabezal, incluyendo el *plenum*, se utilizaron 9743 elementos (8387 nodos). Para simplificar el modelo, los ciclones y plataformas conectados fueron simulados mediante cargas concentradas aplicadas en los puntos correspondientes a estos.

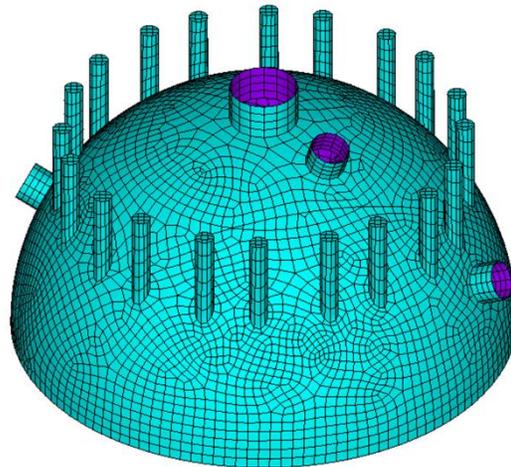


Figura 3. Isometría del cabezal (sin cargas).

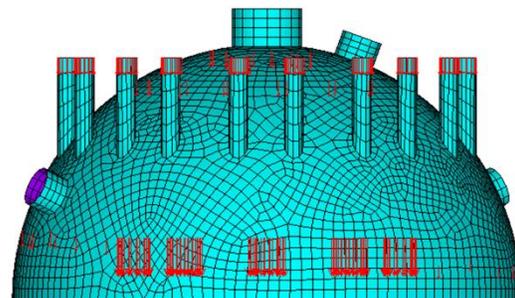


Figura 4. Vista frontal del cabezal (con cargas).

Las figuras 4 y 5 muestran una vista del cabezal y del *plenum* con las cargas correspondientes a los ciclones y plataformas conectadas. Tanto las boquillas externas como las boquillas del *plenum* se sometieron a cargas concentradas que simulan el peso de ciclones suspendidos de ellas. El peso de los ciclones suspendidos de las boquillas externas e internas es 68,2 kN y 58,4 kN, respectivamente. En el cabezal se encuentran también soldadas varias plataformas, las cuales fueron consideradas mediante la aplicación de cargas puntuales en los puntos donde se ubican los clips sobre el cabezal (tabla 1). Los clips son los elementos de conexión entre las plataformas y el cabezal. El peso total del cabezal incluyendo el material refractario, ciclones en boquillas externas y *plenum*, y plataformas es de 3460 kN.

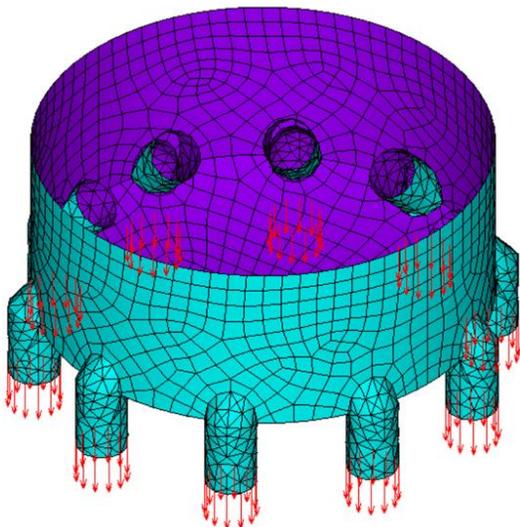


Figura 5. Vista isométrica del *plenum* (con cargas).

Tabla 1. Pesos de las plataformas del cabezal

Plataforma	Peso [kN]
I	51
II	15
III	6

Para el izado del cabezal se utilizan cuatro orejas separadas 90° entre sí. Los cables de izado salen de las orejas verticalmente. Las orejas de izado son representadas por condiciones de desplazamiento nulo, aplicadas a un solo nodo, razón por la cual los esfuerzos que se obtienen en estos puntos sobreestiman los correspondientes a la situación real. Sin embargo, tomando en cuenta el principio de Saint Venant [16], esto no representa un error significativo en la estimación de la deformación en la periferia del cabezal.

### 3. Estudio paramétrico

Debido a que la selección de la ubicación de las orejas de izado en el cabezal es una tarea compleja que implica, por una parte, evitar las interferencias con plataformas, bocas de visita, boquillas, instrumentación, etc., y, por otra parte, garantizar que las deformaciones que se produzcan en la periferia del cabezal sean lo más pequeñas posibles, se realizó un estudio paramétrico para la ubicación de las orejas que verifique los criterios antes expuestos.

Se utilizaron cuatro orejas de izado, separadas 90° entre sí, luego se procedió a definir dos parámetros para la ubicación de estas. El primer parámetro es la altura  $H$ , medida desde la periferia de la base del cabezal, a la cual serán colocadas las orejas; el segundo parámetro es la posición angular  $\theta$  de las orejas, con respecto al norte de la planta. Estos dos parámetros se definen en forma gráfica en las figuras 6 y 7, respectivamente. Para el parámetro  $H$ , se identificaron cinco posibles zonas del cabezal donde pueden ser ubicadas las orejas (figura 6). En la tabla 2 se definen estas zonas en función del parámetro  $H$  y los valores seleccionados en este estudio.

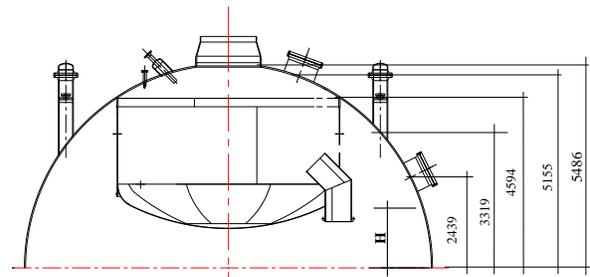


Figura 6. Definición del parámetro  $H$  en [mm].

Tabla 2. Definición del parámetro  $H$

Zona	Rango de $H$ [mm]	$H$ seleccionado [mm]
1	0 - 2439	1219
2	2439 - 3319	2879
3	3319 - 4594	3956, 4275, 4415
4	4594 - 5155	4594, 4734, 4874
5	5155 - 5486	5320

Para el parámetro  $\theta$  se definieron tres diferentes valores para la ubicación de las orejas. Estos valores se muestran en la tabla 3. Habiendo definido los parámetros  $H$  y  $\theta$  de esta forma, y tomando en cuenta que el cabezal se debe analizar con y sin la presencia de un anillo rigidizador colocado en su periferia, se realizaron los 54 análisis necesarios para obtener los resultados que se resumen a continuación.

Tabla 3. Definición del parámetro  $\Theta$

Valor de $\Theta$	Posición de las orejas respecto al norte de planta
0°	0°, 90°, 180°, 270°
30°	30°, 120°, 210°, 300°
60°	60°, 150°, 240°, 330°

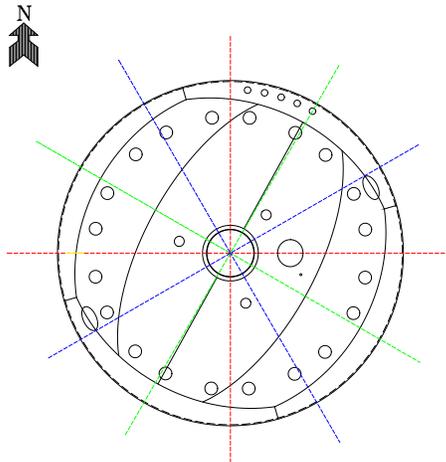


Figura 7. Definición del parámetro  $\Theta$ .

Tabla 4. Deflexión máxima [mm] de la periferia del domo (sin anillo)

H [mm]	$\Theta$		
	0°	30°	60°
1219	139,3	137,5	138,2
2879	57,4	58,2	57,4
3956	22,1	20,8	21,8
4275	14,7	11,6	12,4
4415	7,8	10,0	9,6
4594	2,2	1,6	2,4
4734	6,0	5,9	5,5
4874	6,7	6,5	7,3
5320	8,9	8,4	13,2

Para  $H = 1219$  mm se obtienen deflexiones excesivas de 138,3 mm en promedio para todos los valores del parámetro  $\Theta$ . A medida que aumenta el  $H$ , los valores de la deflexión máxima disminuyen significativamente hasta alcanzar un valor mínimo de 2,1 mm en promedio para  $H = 4594$  mm. Esta tendencia se observa para todos los valores del parámetro  $\Theta$ . De hecho, se observa también que el parámetro  $\Theta$  tiene muy poca influencia sobre el valor de la máxima deflexión que ocurre en la periferia del cabezal.

#### 4. Análisis de resultados

##### 4.1. Resultados sin anillo rigidizador

Los resultados obtenidos mediante el estudio paramétrico del cabezal sin anillo rigidizador se resumen en la figura 8 y en la tabla 4, en la cual se presentan las deflexiones máximas de la periferia del cabezal.

La figura 9a muestra los desplazamientos de los nodos situados en la periferia del cabezal (vista en planta) para la posición ( $H = 4594$  mm,  $\Theta = 0^\circ$ ) que produce las deflexiones mínimas de esta zona. Es importante notar que, en este caso, los desplazamientos de los puntos de la periferia del cabezal tienen una distribución en lóbulos que se corresponde con las posiciones en las cuales están colocadas las orejas de izado.

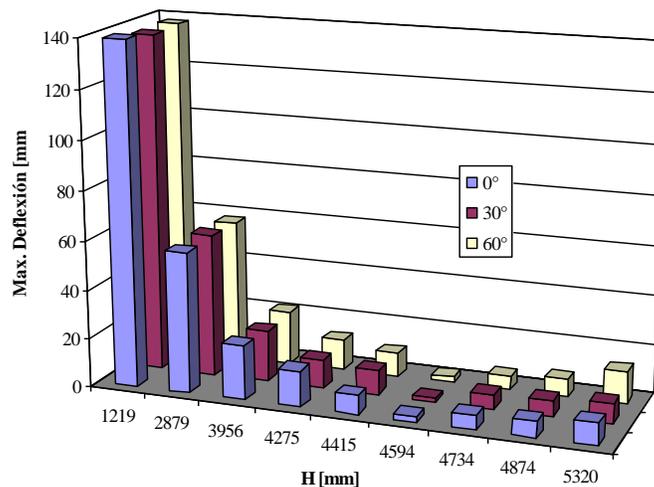


Figura 8. Comparación de la deflexión máxima en la periferia del cabezal para varios valores de  $H$  y  $\Theta$  (sin anillo rigidizador).

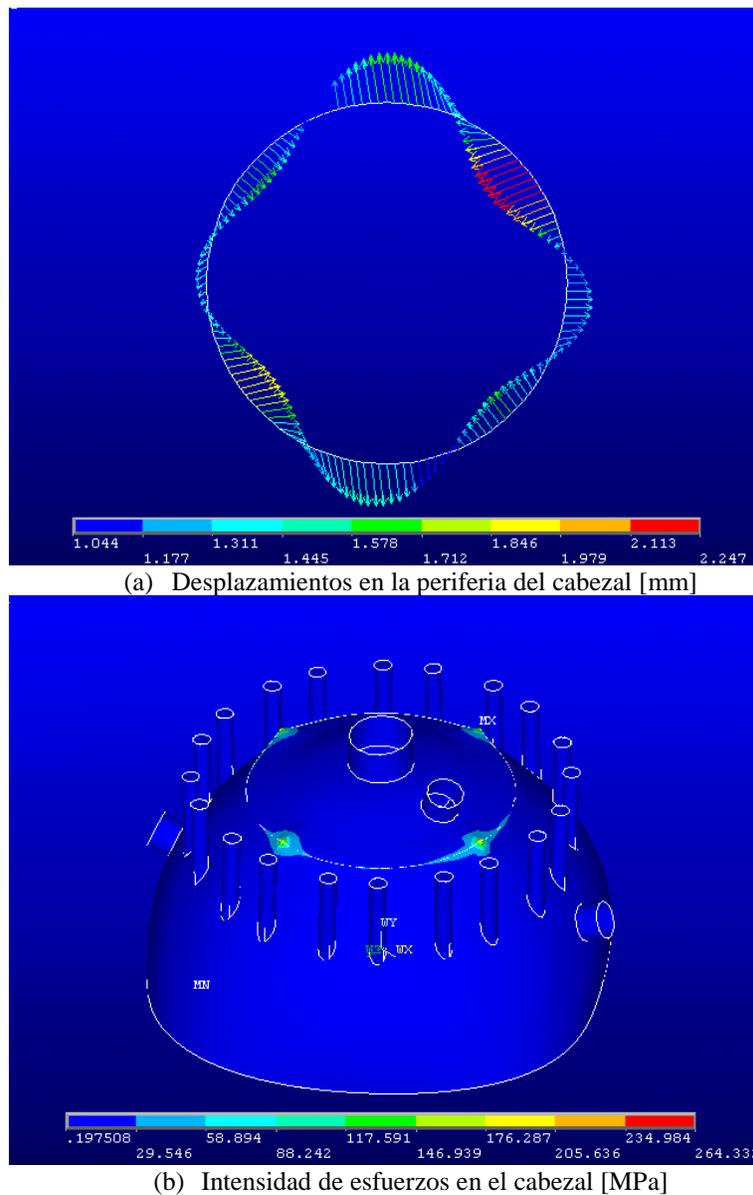


Figura 9. Distribución de esfuerzos de Von Mises en la periferia del cabezal (sin anillo rigidizador) para  $H = 4594$ ,  $\theta$

La [figura 9b](#) muestra la distribución de esfuerzos de Von Mises para esta posición de las orejas de izado. En este caso se observa que los niveles de esfuerzos están cercanos a un 22 % del esfuerzo admisible para todo el cabezal (alrededor de 30 MPa), a excepción de las zonas donde están colocadas las orejas de izado.

#### 4.2. Resultados con anillo rigidizador

Un modelo del cabezal incluyendo el anillo rigidizador fue realizado y se muestra en la [figura 10](#). La [figura 11](#)

y la [tabla 5](#) presentan los valores de la máxima deflexión de la periferia del cabezal.

En este caso, al igual que para el caso sin anillo rigidizador, se observa la existencia de una posición en la cual la deflexión de la periferia del cabezal es mínima ( $H = 4594$  mm). Por cierto, esta posición resulta ser la misma que para el caso del cabezal sin anillo rigidizador, y la amplitud de los desplazamientos es del mismo orden de magnitud.

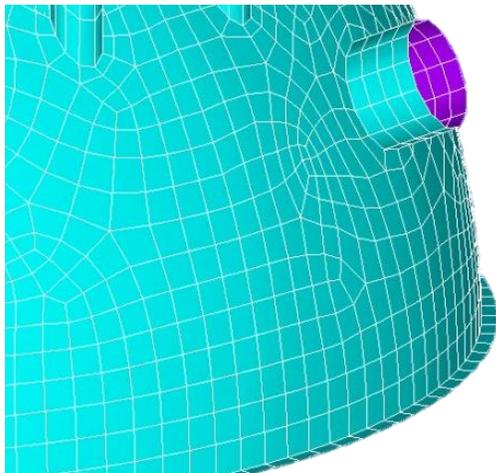


Figura 10. Detalle del cabezal con anillo rigidizador.

Tabla 5. Deflexión máxima [mm] en la periferia del domo (con anillo)

$H$ [mm]	$\theta$		
	0°	30°	60°
1219	56,9	58,0	55,8
2879	24,1	24,9	24,7
3956	11,3	10,8	11,3
4275	9,3	7,5	7,5
4415	5,5	6,8	6,5
4594	1,7	1,4	2,0
4734	5,7	5,8	5,3
4874	6,3	6,4	6,8
5320	8,9	8,4	13,4

En comparación con el caso no rigidizado, la presencia del anillo rigidizador reduce las deflexiones máximas considerablemente. Para  $H = 1219$  mm se obtienen deflexiones de 56,90 mm en promedio para todos los valores del parámetro  $\theta$ . Esto representa una reducción del 60 % comparado con los 138,3 mm obtenidos para el caso sin anillo en la Sección 4.1. De nuevo, a medida que aumenta el  $H$ , los valores de la deflexión máxima disminuyen significativamente hasta alcanzar un valor mínimo de 1,7 mm en promedio para  $H = 4594$  mm.

La figura 12a muestra los desplazamientos de los nodos situados en la periferia del cabezal para  $H = 4594$  mm y  $\theta = 0^\circ$ , mientras que la figura 12b muestra la distribución de esfuerzos de Von Mises para todo el cabezal. En estas últimas figuras se observa que los esfuerzos de la periferia cabezal son bastante bajos (alrededor de 30 MPa).

### 5. Conclusión

Como resultado del estudio paramétrico realizado para el cabezal se puede concluir que:

- El parámetro  $\theta$  no tiene mayor influencia sobre la magnitud de la deformación de la periferia del cabezal, por lo cual es razonable pensar que se puede escoger cualquier configuración angular para la ubicación de las orejas de izado, siempre que entre ellas formen  $90^\circ$ . Esto, a pesar de que la estructura no es simétrica, debido a la presencia de plataformas y bocas de visitas.

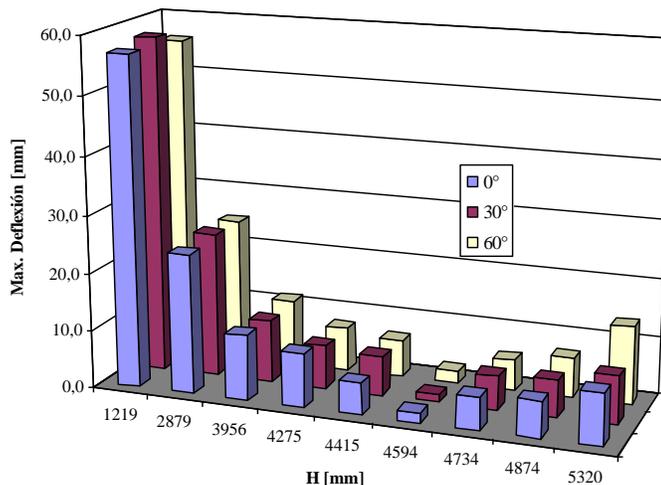
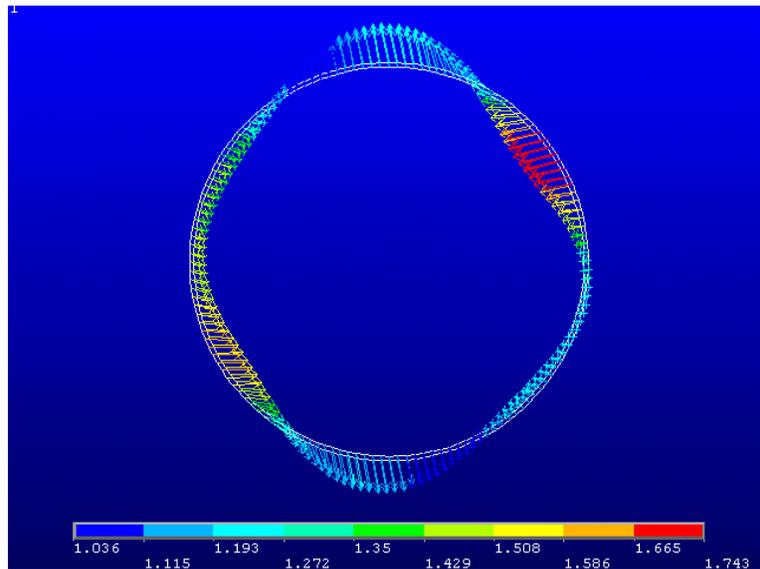
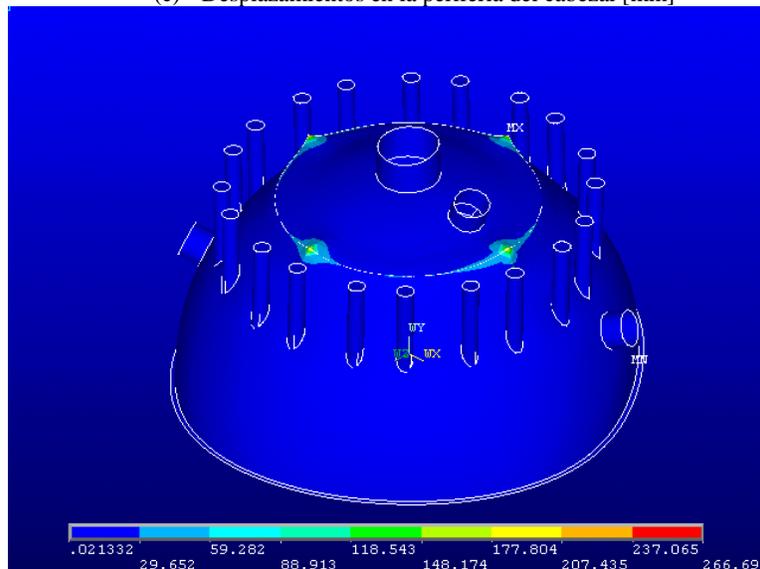


Figura 11. Comparación de la deflexión máxima en la periferia del cabezal para varios valores de  $H$  y  $\theta$  (con anillo rigidizador).



(c) Desplazamientos en la periferia del cabezal [mm]



(d) Intensidad de esfuerzos en el cabezal [MPa]

Figura 12. Distribución de esfuerzos de Von Mises en la periferia del cabezal (con anillo rigidizador) para  $H=4594$  mm,  $\theta=0^\circ$ .

- El parámetro  $H$  es el que presenta la mayor influencia sobre la magnitud de la deformación de la periferia del cabezal; se puede observar que existe una región, situada alrededor de la zona donde se realiza la soldadura del *plenum*, en la cual la deformada de la periferia alcanza un mínimo. Esta región resulta ser entonces ideal para la ubicación de las orejas de izado.

- En este caso, la utilización del método de los elementos finitos permitió la determinación de la posición óptima de las orejas de izado que conduce a bajos

desplazamientos en la periferia del cabezal del regenerador.

- Los desplazamientos mínimos obtenidos para el cabezal con y sin anillo rigidizador demuestran la factibilidad de la realización del proceso de soldadura entre el cabezal y el resto del regenerador. Cuando estos desplazamientos son excesivos, al punto que impiden soldar de nuevo el cabezal, se deben llevar a cabo otras tareas que podrían retrasar la puesta a punto de la planta petroquímica, aumentar considerablemente los costos

del trabajo e inducir pérdidas económicas por el tiempo de parada del regenerador.

## Referencias

- [1] W. H. Hung, S. C. Kang, “Configurable model for real-time crane erection visualization”, *Advanced Engineering Software*, vol. 65, pp. 1-11, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.04.013>
- [2] S. Han, S. Hasan, A. Bouferguene, M. Al-Husseini, J. Kosa, “An integrated decision support model for selecting the most feasible crane at heavy construction sites”, *Automation in Construction*, vol. 87, pp. 188-200, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.009>
- [3] H. Taghaddos, U. Hermann, A. Abbasi, “Automated crane planning and optimization for modular construction”, *Automation in Construction*, vol. 95, pp. 219-232, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.009>
- [4] W. Jiang, Y. Zhou, L. Ding, C. Zhou, X. Ning, “UAV-based 3D reconstruction for hoist site mapping and layout planning in petrochemical construction”, *Automation in Construction*, vol. 113, 103137, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103137>
- [5] Z. Zhang, W. Pan, “Lift planning and optimization in construction: a thirty-year review”, *Automation in Construction*, vol. 118, 103271, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103271>
- [6] C. A. Graciano, D.G. Zapata-Medina, “Effect of longitudinal stiffening on bridge girder webs at incremental launching stage”, *Ingeniería e Investigación*, vol. 35, no. 1, pp. 24-30, 2015, doi: <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v35n1.42220>
- [7] A. Ayestarán, C. Graciano, O. González-Estrada, “Resistencia de vigas esbeltas de acero inoxidable bajo cargas concentradas mediante elementos finitos”, *Revista UIS Ingenierías*, vol. 16, no. 2, pp. 61-70, 2017, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v16n2-2017006>
- [8] A. Noguera-Garban, C. Graciano, D.G. Zapata-Medina, “Elastic behavior of stiffened curved plates subjected to transverse loading”, *Dyna*, vol. 85, no. 205, pp. 83-89, 2018, doi: <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n205.62108>
- [9] L. Espinoza, O. A. González-Estrada, C. Graciano, “Análisis de un interno tipo brida de un recipiente horizontal a presión utilizando elementos finitos”, *Revista UIS Ingenierías*, vol. 18, no. 3, pp. 151-156, 2019, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v18n3-2019015>
- [10] E. Araque, C. Graciano, D.G. Zapata-Medina, O.A. González-Estrada, “Compressive strength of partially stiffened cylinders at elevated temperatures,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 19, no. 1, pp. 131-142, 2020, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n1-2020013>
- [11] O. González, G. Martínez, C. Graciano, “Evaluación paramétrica de las principales variables geométricas en el diseño de un tren de aterrizaje para un avión no tripulado utilizando el método de los elementos finitos,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 19, no. 2, pp. 149-160, 2020, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n2-2020017>
- [12] E. Garrido, E. Casanova. “Stress and strain fields in the hemispherical head of an FCC regenerator during the lifting maneuver in cyclone replacement,” In *Proceedings of the ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference*, vol. 3: Design and Analysis. Paris, France. July 14–18, 2013, V003T03A088, ASME. <https://doi.org/10.1115/PVP2013-97038>
- [13] <https://www.cheshire-live.co.uk/news/giant-cranes-huge-lift-oil-6224655>
- [14] ANSYS, “ANSYS Release 19R2 Elements Reference”, 2019.
- [15] American Society of Mechanical Engineers. Boiler and Pressure Vessel Committee, BPVC Section VIII-Rules for Construction of Pressure Vessels Division 1. ASME, 2017.
- [16] R. Goncalves, Introducción al Análisis de Esfuerzos, 3rd ed. Caracas: Editorial Equinoccio, 2011.