



Simulación del estado tensional de la placa de respaldo de bomba KARL KROYER MP 2C120

Simulation of the stress state of the backing plate in a diaphragm pump

Juan Gabriel Noa-Aguila^{1,*}, Ramón Quiza-Sardiñas^{II}, Sergio Montelíer-Hernández^I

I. Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez, Facultad de Ingeniería. Cienfuegos, Cuba.

II. Universidad de Matanzas, Centro de Estudio de Fabricación Avanzada y Sostenible, CEFAS. Matanzas, Cuba.

*Autor de correspondencia: jnoa@ucf.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 23 de mayo de 2023

Aceptado: 15 de julio de 2023

Resumen

La determinación analítica del estado tensional de la placa de respaldo de una bomba de diafragma, tanto por sus características geométricas como por las solicitaciones a que está sometida, implica un elevado grado de complejidad que la hace impracticable. En este trabajo se usó el método de elementos finitos para realizar una simulación de este problema que permitió obtener una solución aproximada, pero suficientemente precisa para su uso con fines prácticos. En la simulación, se tuvo en cuenta la curvatura de la placa, la distribución de los agujeros con las consiguientes concentraciones de tensiones y el efecto, en términos de fuerza, tanto del fluido como del diafragma. Como resultado,

se obtuvo la distribución de tensiones en todo el dominio geométrico de la pieza. En todos los casos, los resultados obtenidos estuvieron conforme a lo esperado, desde el punto de vista cualitativo, de los fundamentos de la teoría de la elasticidad. Los resultados se validaron, mediante la comparación de la región de mayor tensión obtenida por la simulación y aquella donde ocurrió la rotura en piezas reales, observándose una excelente coincidencia, además, se podrán utilizar también en la optimización del diseño de estas placas.

Palabras claves: bomba de diafragma; placa curva con agujeros; análisis por elementos finitos; estado tensional.

Abstract

Analytical determination of stress distribution in a backing plate of a diaphragm pump, has a high complexity level, due not only to its geometric characteristics but also to the acting loads. In this work, the finite element method was used to carry out a simulation at this problem, allowing to obtain a solution that, although approximate, is accurate enough for being used for practical applications. In the simulation, the plate curvature, holes space distribution with the corresponding stress concentrations, and the force effect in the fluid and the diaphragm. The outcome was the stress distribution in the whole geometric domain of the part. In all

the cases, the obtained results qualitatively matched to those expected from basis of the theory of elasticity. The obtained outcomes were validated by comparing the higher stress region achieved through the simulation and that where the part breakage actually took place. An excellent matching of both regions was observed. The used approach can be also being use in the future, for optimizing the design of these backing plate.

Key words: diaphragm pump; holed curved plate; finite element analysis; stress state.

Cómo citar este artículo, norma Vancouver:

Noa Aguila JG, Quiza Sardiñas R, Montelíer Hernández S. Simulación del estado tensional de la placa de respaldo de la bomba KARL KROYER MP 2C120. Ingeniería Mecánica. 2023;26(3):e683.

1. Introducción

La placa de respaldo de las bombas de diafragma es un elemento crítico, ya que su fallo implica, frecuentemente, la rotura del diafragma y la contaminación del líquido bombeado. Por lo tanto, la determinación del estado tensional estas placas es clave para lograr diseños y rediseños efectivos y fiables, especialmente, cuando las bombas se emplean en la industria alimentaria donde cualquier contaminación conlleva no sólo a desechar el material afectado, sino también a realizar operaciones de limpieza complejas, lentas y costosas [1].

A pesar de lo anterior, realizar la determinación del estado tensional de dichos elementos, es un problema que está lejos de ser sencillo. En primer lugar, la geometría de la placa contempla tanto la curvatura de la misma

como la presencia de un conjunto de agujeros. Esto hace que exista una combinación de tensiones no uniaxiales y concentradores de tensiones, provocando distribuciones de tensiones complejas, para las cuales las soluciones analíticas [2-4] tiene sólo un carácter aproximado y de orientación.

Un enfoque para resolver este problema es mediante el uso de técnicas numéricas, tales como el método de elementos finitos [5-7] o el método libre de mallas (*meshfree*) [8, 9], los cuales permiten obtener soluciones aproximadas, pero suficientemente buenas para ser utilizadas con fines prácticos. No obstante, las soluciones deben ser modeladas según la geometría específica de cada problema y sus respectivas cargas y condiciones de apoyo.

A lo anterior, hay que sumarle la complejidad de las cargas que actúan sobre la placa de respaldo de la bomba de diafragma, causadas tanto por la presión del fluido y su paso a través de los agujeros, como por la presión del propio diafragma, en ciclos alternativos. Para resolver problemas similares, se han utilizado diversos enfoques de dinámica de fluidos computacional [10, 11], pero sin relacionarlo directamente con el estado tensional de la placa. También se han encontrado estudios de estados tensionales del contacto entre elementos elásticos y rígidos [12, 13]. No obstante, se hace notar la ausencia de estudios que combinen ambos escenarios y su efecto alternativo.

A partir de todos los elementos antemencionados, se concluyó que la modelación del estado tensional de una placa de respaldo, curva y con agujeros, de una bomba de diafragma, es un problema complejo que aún no está resuelto en la literatura científica. Por lo tanto, se desarrolló la simulación, basado en el método de elementos finitos, del estado tensional de la placa de respaldo de una bomba de diafragma, teniendo en cuenta su geometría y las condiciones de carga y apoyo.

2. Métodos y Materiales

La bomba de diafragma de alta presión KARL KROYER MP 2C120, figura 1, de la firma Alfa Laval y DDS Kroyer de origen sueco y Dinamarca respectivamente, se utiliza para bombear leche de almidón acidificada y luego precalentada a través del convertidor en un flujo de chorro de pulso constante de $7,2 \text{ m}^3/\text{h}$, con la presión requerida de 3 Mpa para la obtención de almidón de maíz en la planta de glucosa. La bomba empieza a presentar problemas en la placa perforada que le sirve como apoyo al diafragma, el cual se quiebra con la fractura de la misma. Al quebrarse el diafragma se mezcla el aceite que contienen los pistones con el producto, perdiendo así toda la materia prima y el aceite de la bomba. Al no existir un modelo matemático simple que permita determinar las tensiones reales existentes en las diferentes partes de la placa perforada es necesario emplear técnicas computacionales para modelar a partir de métodos numéricos.



Fig. 1. Instalación de la bomba, placa y diagrama de montaje. Fuente: autores

El diafragma, figura 1c) se fabricó con politetrafluoroetileno (PTFE), uno de los compuestos químicamente más inertes disponibles. Se puede utilizar con una amplia gama de líquidos. También conocido como Teflon®, es excelente para fluidos altamente agresivos, como hidrocarburos aromáticos o clorados, ácidos, cáusticos, cetonas y acetatos. Sus propiedades ofrecen una excelente resistencia a la flexión y a la abrasión moderada. Cumple con las normas FDA 21 CFR 177 y USP Clase VI para aplicaciones de alimentos, bebidas y productos farmacéuticos.

La placa perforada se discretizó como un cuerpo sólido deformable, compuesto por elementos de tipo capa delgada. El tipo de elemento utilizado fue un elemento con cuatro nodos y 12 grados de libertad en cada nodo.

La presión inicial que se ejerció por la bomba provocará una deformación sobre el diafragma hasta el punto de contacto con la placa de respaldo. En este instante la deformación queda restringida al conjunto diafragma-placa. Para obtener los valores de deformación y tensiones se procede a simular empleando el software ANSYS 18.0. Se considera que el elemento elástico dejará de deformarse libremente al entrar en contacto con la placa de respaldo.

Para la modelación de la placa de respaldo se tomaron dos consideraciones de operación fundamentales.

1. En el instante en que el diafragma se pega a la placa de respaldo.
2. Cuando el líquido (leche de almidón) esté siendo evacuado de la cavidad de la bomba.

Se modeló la placa en el instante en que el diafragma ejerció presión sobre ella, o sea cuando todo el líquido de la cavidad fue evacuado provocando la máxima presión sobre ella, la placa perforada se discretizó como un

cuerpo sólido deformable, inicialmente compuesto por elementos de tipo capa delgada. El tipo de elemento asociado es un elemento con cuatro nodos que tienen 12 grados de libertad en cada nodo, solo se puede utilizar en análisis de tipo explícito como el actual. Para esta condición se realizó la modelación empleando el software ANSYS 18.0. Se consideró una placa curvada (casquete esférico) con agujeros múltiples empotrada en sus periferias

Para la modelación de la placa en el instante en que el líquido (leche de almidón) esté siendo evacuado de la cavidad de la bomba, se consideró que ejerce una presión sobre la placa perforada hasta el instante que entra en contacto con la misma. Fue necesario construir un perfil de la placa perforada con agujeros verticales y el cuerpo de las válvulas. El fluido que actuó sobre la placa perforada es leche de almidón con una densidad de 1160 kg/m^3 a una presión de 30 atm (3 MPa). La placa se fijó con la caja de las válvulas, se aplicó una condición de frontera para el análisis de fluido con las presiones de trabajo en la entrada, a la salida un caudal de $7,2 \text{ m}^3/\text{h}$ desde la boquilla de descarga de 80 mm de diámetro.

Una vez obtenidos los resultados, se realizó el análisis estático para exportar la presión generada en la placa desde el análisis de fluidos para conocer la deformación, tensiones (Von-Mises). Para el modelado de fluidos, se exportó y se creó un volumen de control a partir de la región límite para el análisis. Para el ensamblaje se decidió tomar un elemento tetraédrico con un ajuste curvo, debido a que este elemento permite altos niveles de arreglo cuando se modelan sólidos de geometrías irregulares por su propia configuración y se logró un mejor ajuste a la geometría con curvatura.

Los controles de mallas aplicados al modelo fueron situados en los lugares donde existieron fuertes transiciones, con el objetivo de lograr resultados más exactos, sin tener que elevar excesivamente el costo computacional. Para el caso de la placa se aplicó la restricción de empotramiento en todo el escalón superior donde todos los grados de libertad fueron eliminados tanto para los giros como para los desplazamientos lineales, respondiendo a las condiciones reales de operación

3. Resultados

Como resultado de la modelación se obtuvo el estado tensional en el diafragma, figura 2 a), 2 b). A partir de los resultados obtenidos se construyeron las gráficas de deformación y tensiones a lo largo de la línea del diámetro figura 2c).

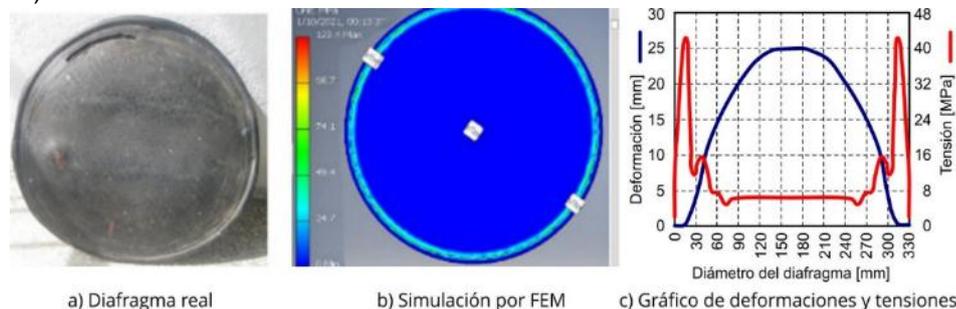


Fig. 2. Diafragma empleado en la Bomba Master KARL KROYER MP 2C120, Distribución de tensiones en el diafragma modeladas en ANSYS. Fuente: autores

El siguiente resultado, consistió en la obtención del estado tensional en el interior y exterior de la placa de respaldo, figura 3.

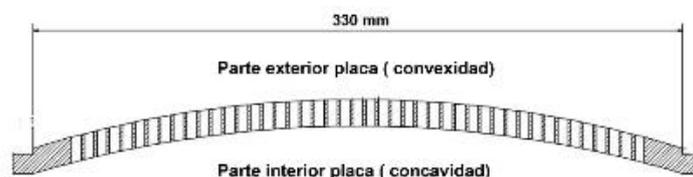
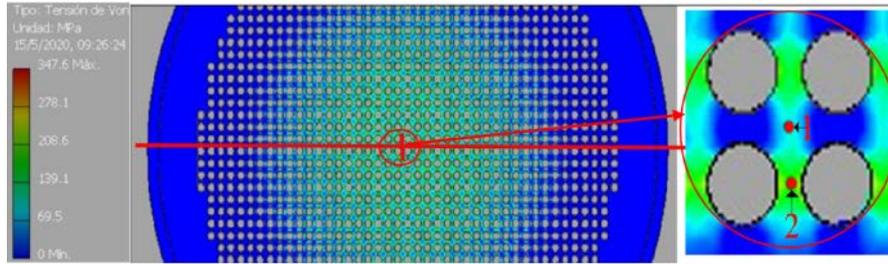


Fig. 3. Vista en corte de la sección media de la placa circular curvada con múltiples agujeros. Fuente: autores

Para la confección de los valores, se tomaron mediciones en el interior (concavidad) y en el exterior (convexidad) de la placa, obtenidas de dos puntos fundamentales, figura 4, en el centro de la cruceta formada por los agujeros (punto 1) y en el borde del agujero (punto 2).

En la figura 4 se muestran las distribuciones de tensiones obtenidas de la modelación de la placa. Para realizar mediciones de tensiones en el interior (concavidad) y en el exterior (convexidad) de la placa se trazó una línea a lo largo del diámetro. A partir de las herramientas del software se recogieron valores de tensión que se generan en dos zonas fundamentales alrededor de los agujeros, la distribución de agujeros es cuadrada. Un primer punto de medición se encuentra situado en la intersección de las diagonales que se forman de unir los centros de los cuatro agujeros y un segundo punto de medición en el punto medio entre dos agujeros consecutivos en la horizontal. Esta operación se realizó en los agujeros que se encuentran en la línea de diámetro de la placa.



A partir de las mediciones realizadas se construyen las gráficas del comportamiento de las tensiones, en los puntos 1 y 2 a lo largo del diámetro de la placa, tanto para el interior como para el exterior, como se muestra en la figura 5.

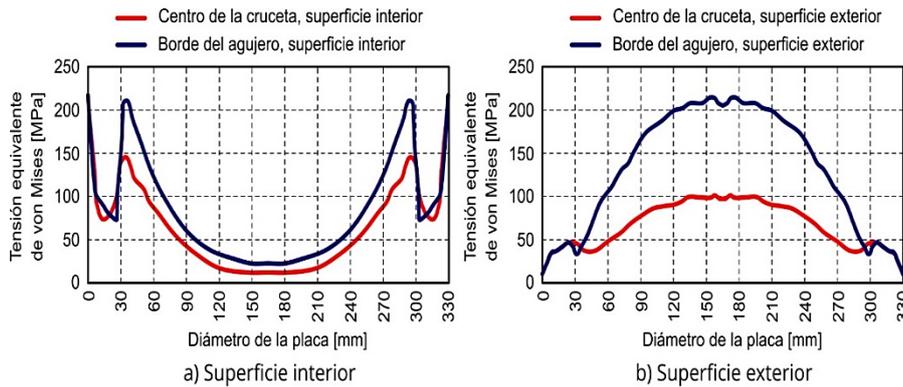


Fig. 5. Valores de tensiones obtenidas en el interior de la placa, concavidad, exterior de la placa, convexidad. Fuente: autores

Los resultados para el perfil analizado: la velocidad de fluido, la presión de fluido y el esfuerzo cortante se pueden observar desde las paredes del perfil permitiendo evaluar la presión sobre la superficie de la placa perforada como se muestra en la figura 6.

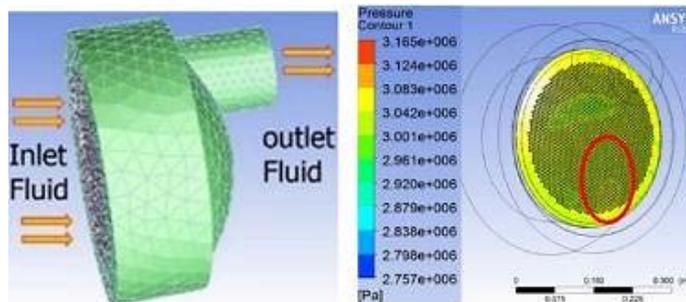


Fig. 6. Mallado del modelo y condiciones fronteras, valores de presión ejercida por el fluido en la placa perforada. Fuente: autores

De la simulación se obtiene que la distribución de presión sobre la placa no es uniforme en toda el área, concentrándose en la zona de la superficie que corresponde a la descarga de la bomba producto de la turbulencia que se genera al tener desplazada la descarga del centro de la bomba. Durante la operación de descarga la válvula de succión se mantiene cerrada impidiendo así el pase de flujo, generando presiones diferentes en las distintas zonas de la placa.

Para el caso de la placa se aplica la restricción de empotramiento en todo el escalón superior donde todos los grados de libertad son eliminados tanto para los giros como para los desplazamientos lineales. De la modelación se obtiene el perfil de velocidades de flujo al pasar por la placa como se puede apreciar en la figura 7, respondiendo a las condiciones reales de operación. Los resultados de las tensiones de Von Mises van desde $\sigma_{eq} = 0.079$ Mpa hasta $\sigma_{eq} = 4,20$ Mpa, en el campo de tensiones descrito en el perfil.

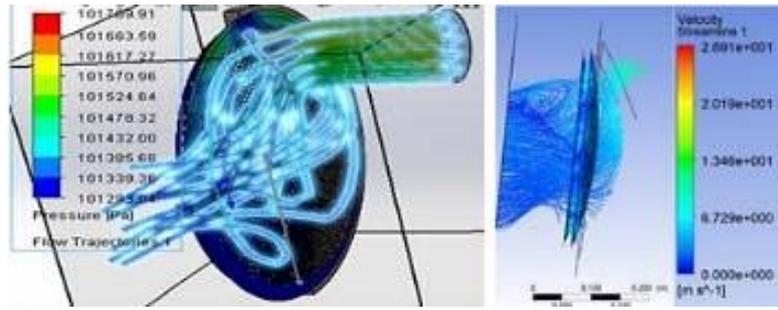


Fig. 7. Simulación de operaciones de descarga, perfil de velocidades del flujo. Fuente: Elaboración propia

De la simulación de la placa para el instante de trasiego del flujo y comparando las zonas con agujeros de succión y descarga de la bomba en la placa real, en la zona crítica, se puede apreciar una coincidencia entre ambas. Para realizar el análisis se divide la placa en 9 cuadrículas de trabajo, figura 8a). Las cuadrículas 2 y 8 coinciden con las zonas de succión y descarga respectivamente. A medida que se analiza la placa desde el borde hasta su centro se observa que existe una zona próxima al contorno donde se distribuyen las tensiones uniformemente, no siendo así a medida que se aproxima al centro de la placa.

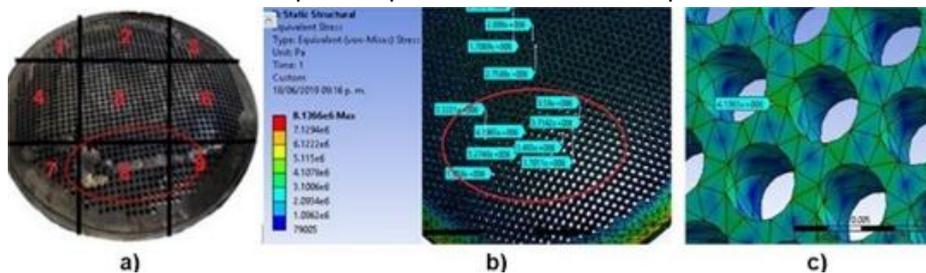


Fig. 8. a) Placa de respaldo real, b) Perfil de tensiones en la placa simulada, c) Secciones de la placa, Zona de rotura. autores

Se puede apreciar de forma explícita como se distribuyen las tensiones en los orificios de la placa en la descarga. Para la simulación en condiciones reales de trabajo, la tensión más elevada se encuentra en la unión entre agujeros, donde existen fuertes concentradores de tensiones que llegan a ser del orden de 4,19 MPa, en la tabla 1 se muestran las tensiones máximas generadas en las diferentes cuadrículas de análisis.

Tabla 1. Tensiones máximas en cada una de las zonas analizadas. Fuente: autores

Cuadrículas	1	2	3	4	5	6	7	8	9
σ_{eq} (MPa)	3,18	2,89	3,27	1,35	3,58	3,32	4,19	3,48	3,70

Presenta una zona extensa de transición que da lugar a unas tensiones medias que varían de $\sigma_{eq} = 8,60$ MPa en el borde de la placa hasta 0,76 MPa en la zona central. Por otra parte, si se recorre verticalmente la geometría del modelo en la sección coincidente con la descarga de la bomba, se obtienen tensiones que van desde un valor medio $\sigma_{eq} = 1,35$ MPa hasta descender a la mínima con un valor de 4,19 MPa.

Analizando la placa en la condición en que el diafragma hace contacto ejerciendo una presión, se puede observar como varía la distribución de tensiones tanto para la parte interior (cóncava) como exterior (convexa) mostrada en la figura 9.

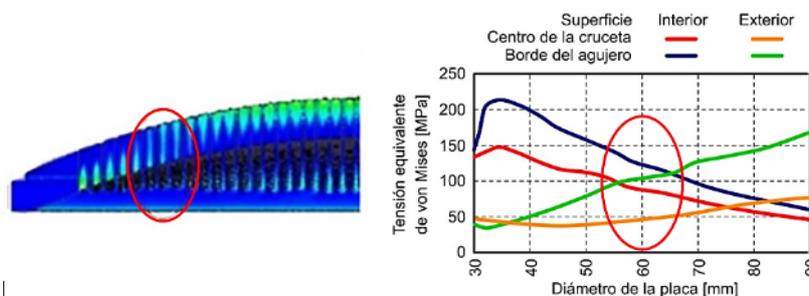


Fig. 9. Sección en corte de la placa de respaldo, Distribución de tensiones en el interior y exterior de la placa. Fuente: elaboración propia

Partiendo de los valores obtenidos en la simulación, empleando el método de los elementos finitos, se construyen curvas que representan la distribución de tensiones en la parte externa e interna. La distribución de tensiones para este caso conforma anillos circulares, notándose que entre 50 y 70 mm del borde de la placa existe una notable diferencia entre las tensiones interiores y exteriores de la placa, zona coincidente con el análisis realizado para el paso del flujo. Sumándose este efecto al producido en la zona 8 antes analizada.

4. Discusión

El modelo utilizado con empotramiento en todo el contorno para la simulación, tiene en cuenta las deformaciones que se originan en los elementos, cumpliendo con todas las recomendaciones dadas en la literatura para este método.

El flujo de almidón a través de la placa genera tensiones no uniformes en toda su superficie. La tensión máxima 4,19 MPa, obtenida en la simulación se produce en la zona de descarga. En la zona de rotura, a 60 mm del borde, se produce un cambio en la dirección de la distribución de tensiones en el interior de la placa y en el exterior, coincidiendo también con las tensiones máximas provocadas por la succión y descarga del material.

Finalmente, los esfuerzos máximos sobre la placa de respaldo durante el contacto con el diafragma a la máxima presión alcanzan valores de 218,5 MPa en el interior y 222,4 MPa en el exterior de la placa. Las tensiones obtenidas a lo largo de la línea de diámetro siguen una distribución no lineal simétricas con respecto al centro de la placa, las que se muestran como anillos concéntricos.

Conclusiones

Los resultados de la simulación permitieron determinar el estado tensional en el diafragma y en la placa de respaldo. En ambos elementos, el comportamiento de las tensiones se correspondió con los esperados, de acuerdo a las características de los elementos y las sollicitaciones a las que fueron sometidos. Como validación del análisis se tomó la coincidencia de la zona de la placa de respaldo donde se obtuvieron los mayores valores de tensión equivalente y aquella donde ocurrió la rotura, en la placa de respaldo real.

Referencias

1. Prygaev AK, Dubinov YS, Belotserkovskaya YS, Dubinova OB, Nakonechnaya KV, Luk'yanova OA. Development of an Energy Efficient Diaphragm Pump with a Nickel Titanium Diaphragm. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2019;55(1):158-61. DOI 10.1007/s10556-019-00596-8.
2. Doan TN, Van Thom D, Thanh NT, Van Chuong P, Tho NC, Ta NT, et al. Analysis of stress concentration phenomenon of cylinder laminated shells using higher-order shear deformation Quasi-3D theory. *Composite Structures*. 2020;232:111526. DOI 10.1016/j.compstruct.2019.111526.
3. Hudramovich VS, Hart EL, Marchenko OA. Reinforcing Inclusion Effect on the Stress Concentration within the Spherical Shell Having an Elliptical Opening Under Uniform Internal Pressure. *Strength of Materials*. 2020;52(6):832-42. DOI 10.1007/s11223-021-00237-7.
4. Punera D, Kant T. A critical review of stress and vibration analyses of functionally graded shell structures. *Composite Structures*. 2019;210:787-809. DOI 10.1016/j.compstruct.2018.11.084.
5. Abdollahzadeh MA, Kefal A, Yildiz M. A Comparative and Review Study on Shape and Stress Sensing of Flat/Curved Shell Geometries Using C0-Continuous Family of iFEM Elements. *Sensors*. 2020;20(14). DOI 10.3390/s20143808.
6. Duan L, Zhao J. An extended first-order generalized beam theory for perforated thin-walled members. *Thin-Walled Structures*. 2021;161:107492. DOI 10.1016/j.tws.2021.107492.
7. Hoang T, Adany S. Constrained finite element method with displacement mapping. *Thin-Walled Structures*. 2022;181:110120. DOI 10.1016/j.tws.2022.110120.
8. Staszak N, Gajewski T, Garbowski T. Shell-to-Beam Numerical Homogenization of 3D Thin-Walled Perforated Beams. *Materials*. 2022;15(5). DOI 10.3390/ma15051827.
9. Wu J, Wang D. An accuracy analysis of Galerkin meshfree methods accounting for numerical integration. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2021;375:113631. DOI 10.1016/j.cma.2020.113631.
10. Bahiraei M, Naseri M, Monavari A. A CFD study on thermohydraulic characteristics of a nanofluid in a shell-and-tube heat exchanger fitted with new unilateral ladder type helical baffles. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2021;124:105248. DOI 10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105248.
11. Menéndez Blanco A, Jesús Manuel FO, Andrés MF. Numerical methodology for the CFD simulation of diaphragm volumetric pumps. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2019;150:322-36. DOI 10.1016/j.ijmecsci.2018.10.039.
12. Adams GG. The contact stress distribution in the receding contact of an elastic layer with a rigid base. *International Journal of Solids and Structures*. 2022;238:111384. DOI 10.1016/j.ijsolstr.2021.111384.
13. Chen J, Zhang W, Wang C, Liu D, Zhu L. An accurate solution of a hemisphere contact against a rigid flat under varying elastic moduli and yield strengths and comparison with previous model. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2022;36(9):4615-24. DOI 10.1007/s12206-022-0823-1.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

Juan Gabriel Noa Águila. <http://orcid.org/0000-0002-9968-120X>

Participó en el diseño de la investigación, análisis de los resultados, realizó la simulación, recolección de información, procesamiento de la información y en la revisión crítica de su contenido, así como en la redacción y aprobación del informe final.

Ramón Quizá Sardiñas. <http://orcid.org/0000-0003-1293-6044>

Trabajó en el diseño de la investigación, análisis de los resultados, procesamiento de la información y en la revisión crítica de su contenido así como en la redacción y aprobación del informe final.

Sergio Montelier Hernández. <http://orcid.org/0000-0002-3589-5866>

Participó en el diseño de la investigación, análisis de los resultados, procesamiento de la información y en la revisión crítica de su contenido así como en la redacción y aprobación del informe final.