

Tensiones en un brazo de barrido de un horno de reducción por elementos finitos

Stress in a sweeping arm of a finite element reduction furnace

Daniela García Torres dgarcia@ismm.edu.cu ⁽¹⁾

Lisander Romero Breffe lromerob@ismm.edu.cu ⁽¹⁾

Keyla Fuentes Cuello kfuentescoello@gmail.com ⁽¹⁾

⁽¹⁾Universidad de Moa, Moa, Cuba

Resumen: Se determinaron las tensiones que se originan en un brazo de barrido de acero refractario HK 40 empleado en un horno de reducción a través del Método de los Elementos Finitos. Para la determinación de las tensiones se empleó el *software* SOLIDWORKS 2020, a través del cual se realizó la modelización geométrica y parametrizada, el mallado del brazo de barrido y la definición de los casos de carga y de sus parámetros, así como las condiciones de frontera del modelo. Se determinó que, la tensión de Von Mises es de $1,313 \times 10^7 \text{ N/m}^2$; según los resultados obtenidos el máxima desplazamiento ocurre a un valor máximo de $8,318 \times 10^{-1} \text{ mm}$.

Palabras clave: deformación mecánica, método numérico, metal refractario

Abstract: Finite Element Method determined the stresses arising from a HK 40 refractory steel sweep arm used in a reduction furnace. For the determination of the stresses, SOLIDWORKS 2020 software was used, through which geometric and parameterized modeling, the mesh of the sweep arm and the definition of load cases and their parameters were carried out, as well as the boundary conditions of the model. The Von Mises stress was found to be $1.313 \times 10^7 \text{ N/m}^2$; the maximum displacement obtained is $8.318 \times 10^{-1} \text{ mm}$.

Keywords: mechanical deformation, numerical method, refractory metal

Introducción

Las simulaciones matemáticas de procesos han provocado una evolución en la industria, sobre todo en las diferentes ramas de la ingeniería, ya que por este método se han desarrollado procesos industriales con la ventaja de reducir costos (Mañay *et al.*, 2022;

Izurieta, Buenaño & Rivera, 2024). Para llevar a cabo la simulación es importante desarrollar un proceso de modelación y tomar en cuenta las variables de entrada, de salida y el entorno en el cual se desarrollará el proceso (Chariguaman *et al.*, 2022; Elías-González *et al.*, 2024). Esta puede realizarse por diferentes métodos según la complejidad del problema a resolver y de la solución que se requiera.

El análisis por elemento finito es un modelo aproximado, el cual contiene las variables básicas que permiten modificar el prototipo ahorrando tiempo y costos (Márquez *et al.*, 2022; Pérez, 2024; De la Colina, 2024). En la actualidad los avances informáticos permiten crear variedad de programas que desarrolla los cálculos con elementos finitos. Se debe tener conocimiento sobre los principios del elemento finito y los materiales a trabajar para obtener un análisis real (González, González & López, 2020; Pozo-Safla, Aquino-Arroba & Ordoñez-Viñan, 2021).

El método de la simulación ha sido generalizado y constituye una potente herramienta de cálculo numérico capaz de resolver problemas formulables de la matemática, la física y la mecánica; permitiendo simular y realizar análisis en componentes y estructuras complejas, difícilmente calculables por los métodos analíticos tradicionales. Se puede obtener la resolución numérica de las ecuaciones matemáticas que describen el fenómeno estudiado con el uso de un ordenador. Por lo tanto, se puede asumir que, es tan exacta como tantas sean las ecuaciones de partida y la capacidad de los ordenadores para resolverlas, lo cual fija límites a su utilización (Sánchez, 2011).

Huang y Usmani (2012), describen un método de los elementos finitos, componiendo una compilación de tres procesos: la formula variacional de Rayleigh Ritz, el recubrimiento del entorno de integración con intervalos compactos e interconectados por los nodos y la aplicación del algoritmo de residuos ponderados. En el caso específico del análisis tenso-deformacional de elementos sometidos a la acción de cargas dinámicas, el método permite la determinación de los componentes y la determinación del estado deformacional en ciertos puntos característicos. Este tipo de análisis permite acotar la deformación del objeto de estudio y localizar zonas altamente solicitadas o zonas de baja sollicitación.

En las décadas del 70 y el 80 la modelación de piezas se realizó mediante modelos simplificados en dos dimensiones, debido a las limitaciones computacionales de aquellos momentos. La modelación en 2D tiene como ventaja que produce modelos sencillos y

reduce grandemente el tiempo de cálculo, conduciendo en ocasiones a resultados aceptables. Hibbitt y Marcal (1973) fueron pioneros en la aplicación de un modelo 2D para la determinación de tensiones residuales. En la actualidad, a pesar de los avances computacionales muchos autores continúan trabajando la modelación en 2D con modelos planos o axisimétricos y asumiendo determinadas suposiciones y simplificaciones (Lu y Hassan, 2001).

Considera Zhu y Chao (2002) que la respuesta termodeformacional de todos los conjuntos mecánicos es tridimensional y que solo estos modelos son capaces de reproducir completamente este fenómeno en los análisis estáticos reales. Esta modelación ha sido empleada por diferentes autores (Lu y Hassan, 2001; Vinas *et al.*, 2005). Lu y Hassan (2001) simularon un análisis estático en cuatro pasadas mediante un modelo 3D, refieren que, en los puntos de inicio y fin de la se observan concentraciones de tensiones residuales de tracción y compresión que no puede ser recogida por los modelos bidimensionales.

Los hornos de reducción de mineral laterítico tienen en el mecanismo de barrido brazos manufacturados a través del proceso de fundición (Correa-Suárez, Rodríguez-González & Pompa-Larrazabal, 2020). Para la fabricación de los brazos de barridos de los hornos de reducción en la industria del níquel, se emplea acero refractario HK-40 (Fernández Columbié *et al.*, 2023). Según Fernández Columbié, Suárez Torres & Rodríguez González (2024) cuando el acero refractario está sujeto a esfuerzos de tensión, se generan en él pequeñas cavidades en la microestructura durante el proceso de operación a altas temperaturas.

El objetivo de este trabajo es determinar las tensiones que se originan en un brazo de barrido de acero refractario HK 40 empleado en un horno de reducción a través del Método de Elementos Finitos.

Materiales y métodos

Modelado de las tensiones por elementos finitos

Al obtener el fichero de análisis estructural (figura 1), el mismo se ejecutará mediante un análisis de equilibrio estático en los que se leen las tensiones nodales de cada paso de tiempo, generadas por la corrida y se aplican como cargas nodales en la corrida estructural. De esta manera cada análisis estructural estático parte del estado final de

deformaciones y tensiones del análisis previamente concluido. Esto es posible debido a que fue establecido que las deformaciones plásticas son deformaciones irreversibles independientes del tiempo (si se desprecia la deformación viscoplástica a alta temperatura), de forma que entonces en dicho análisis no es necesario efectuar una integración en el tiempo.

Este análisis se realizó fundamentalmente en modo de programación.

1. Se declaró como tipo de análisis el estático.
2. Se empleó el método iterativo de solución de ecuaciones diferenciales no lineales Full Newton Raphson, que constituye el método no lineal estándar del SOLIDWORKS para problemas de plasticidad.

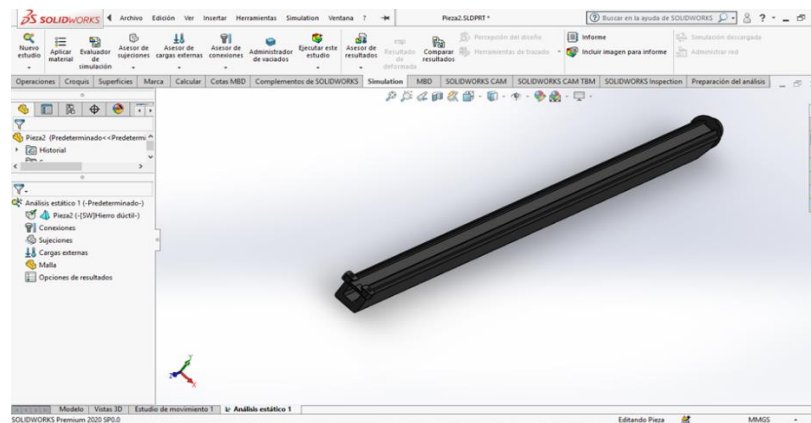


Figura 1. Simulación del modelo.

El mallado es un paso crucial en el análisis de diseño, a razón de que es uno de los factores primordiales de los que dependen los resultados finales que se obtendrán. Inicialmente el software estima un tamaño de elemento global para el modelo, teniendo en cuenta su volumen, área de superficie y detalles geométricos. El tamaño de malla generada (número de nodos y elementos) dependió de la geometría y las cotas del modelo, el tamaño del elemento, la tolerancia y el control de la malla y las especificaciones de contacto. La figura 2 se corresponde con el mallado.

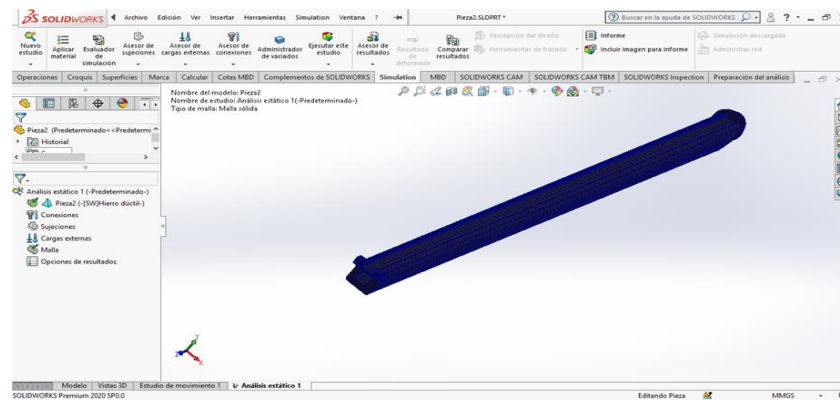


Figura 2. Mallado del modelo.

El software permite realizar un mallado más fino en las zonas de interés, es decir en aquellas donde las tensiones son mayores, lo que permitirá una mayor definición y detalle. El uso de una malla de estas características no afecta a la precisión del resultado, pero produce un ahorro de tiempo y memoria en la ejecución de la simulación.

Las condiciones de fronteras (figura 3) para evitar movimientos de sólido rígido y poder estimar el estado de deformaciones y tensiones producidas por las cargas externas aplicadas sobre el sistema, se hizo necesario restringir el movimiento de parte de su dominio ($u = 0$ para el dominio S_u). En este caso las fuerzas aplicadas fueron tratadas como cargas distribuidas sobre áreas pequeñas, pero finitas. Estas condiciones se definieron en el dominio S_T .

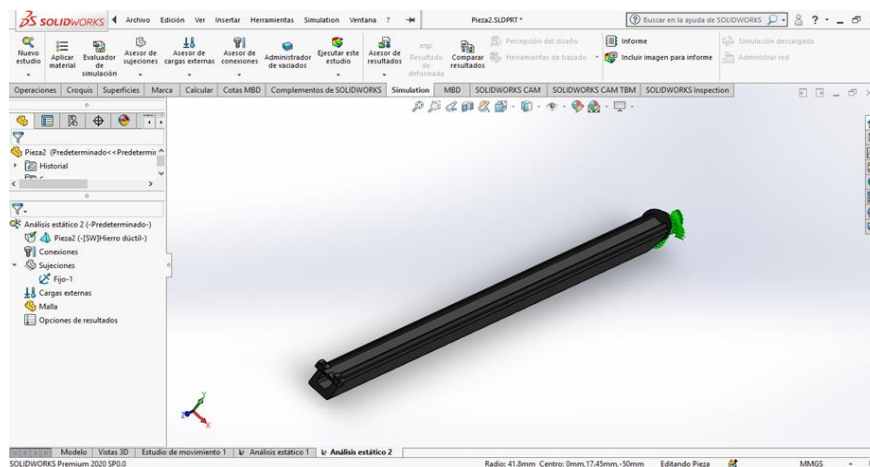


Figura 3. Condiciones de frontera.

En estas condiciones de frontera se consideró que, el momento torsor umbral está definido como aquel valor frontero entre el régimen elástico y el plástico del modelo. Se

determinó la forma en que estarán conectados entre sí los elementos contiguos (a través de un nudo rígido o permitiendo algún tipo de deformación relativa), definiéndose, sus respectivas condiciones de apoyo (empotramiento, articulación o simple apoyo).

Para un modelo con acciones impuestas se establecieron aquellas que afectan a la estructura para una condición dada de funcionamiento (figura 4), representadas por conjuntos de cargas o de deformaciones impuestas, tanto internas como externas, que se producen sobre el brazo de barrido en estados de esfuerzos y de deformaciones.

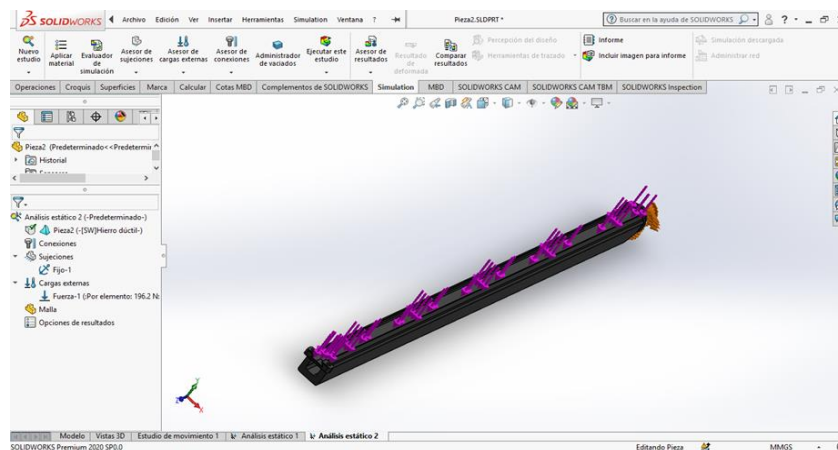


Figura 4. Asignación de cargas al modelo.

Para la asignación de las cargas, se consideró como un cuerpo tridimensional sometido a cargas y presiones, donde cualquier punto en este cuerpo está definido por las coordenadas x , y , z . La superficie o frontera está restringida a una región, donde el desplazamiento está especificado. Se introduce una fuerza, la cual será bloqueada en las sucesivas etapas de carga, de manera que los efectos producidos inicialmente por dicha fuerza son preservados como desplazamientos después del bloqueo de la misma.

Se consideró este procedimiento, teniendo en cuenta que, de esta manera, se pueden reproducir las fuerzas de colapso y los distintos modos de fallo. También se pueden obtener las tensiones, deformaciones y desplazamientos en los puntos que se deseen para poder crear curvas fuerza-desplazamiento o tensión-deformación como las que se obtienen en un ensayo real.

Resultados y discusión

Análisis por el Método de los Elementos Finitos

Una forma de caracterizar las propiedades plásticas del acero es a través del modelo mecánico de Johnson-Cook, que reproduce el comportamiento de los materiales sujetos a grandes deformaciones, altas temperaturas y altas velocidades de deformación. La formulación de este modelo define la tensión equivalente de Von Mises, como tres términos desacoplados donde el primero de ellos define la dependencia del endurecimiento por deformación, el segundo la sensibilidad de la deformación y el tercero la sensibilidad de la temperatura. En la figura 5 se muestra el análisis de las tensiones a las cuales está sometido el brazo de barrido.

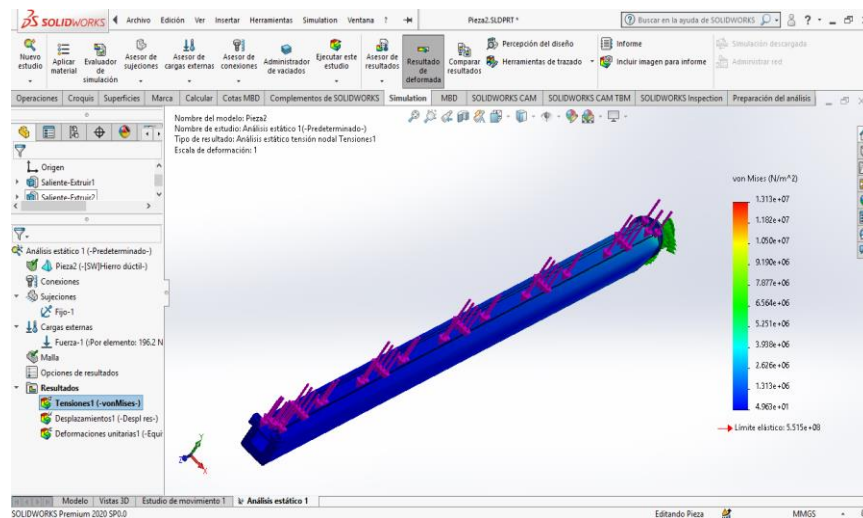


Figura 5. Tensión máxima equivalente de Von Mises.

En esta situación el brazo actúa en condiciones rígidas y se puede observar que, la distribución de la tensión de Von Mises, las zonas más críticas parecen ser en principio, se determina que la tensión máxima en el brazo de barrido es de $1,313 \times 10^7 \text{ N/m}^2$.

El uso de factores de concentración de esfuerzo elástico proporciona una indicación de la carga promedio que se requiere sobre una parte para que ocurra la deformación plástica, o la fluencia; estos factores también son útiles para analizar las cargas sobre una parte que podrían causar fractura por fatiga. Se determinó los desplazamientos a los cuales está expuesto el brazo de barrido del horno de reducción. En la figura 6 se muestra este comportamiento.

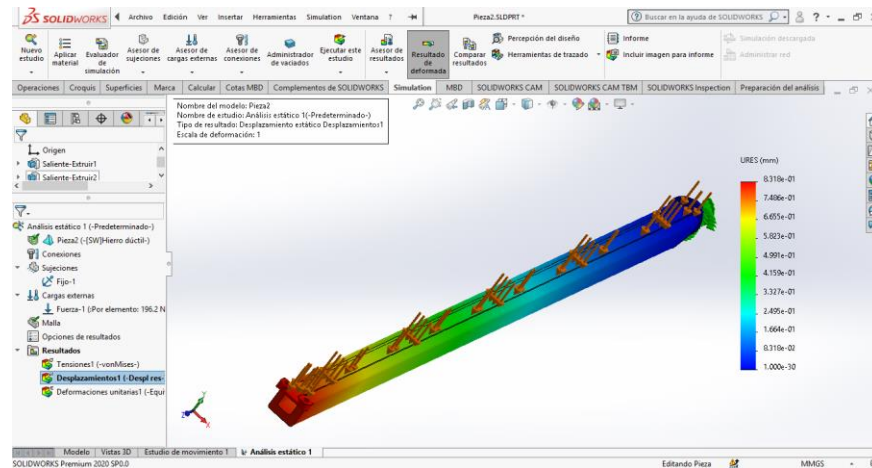


Figura 6. Comportamiento de los desplazamientos.

Los desplazamientos tienen un comportamiento simétrico a lo largo del vertical. El máximo desplazamiento ocurre a un valor máximo de $8,318 \text{ E-1 mm}$; lo cual es indicativo. En el extremo del brazo de barrido, es en esta zona donde existe mayor concentración de esfuerzo (rojo), por ende, con estas condiciones tiende a fallar. Mientras un extremo del brazo está expuesto a proceso deformacional, en el otro, empotrado en la base del horno, estará sujeto a condiciones de compresión (azul).

Independientemente de los parámetros analizados para determinar el efecto de la deformación total en el brazo de barrido (módulo de elasticidad y de Poisson), en el funcionamiento del horno existen parámetros que influyen también en este estado deformacional, uno de ellos es el efecto de la temperatura. Si existe un incremento con respecto a la original, la deformación asociada se puede considerar. Para materiales isotrópicos, el incremento de esta condición da como resultado una deformación uniforme, la cual depende del coeficiente de expansión lineal del elemento. Este se asume como constante dentro del rango de variación de la misma. La deformación producto de este cambio de temperatura no provocará ningún esfuerzo, cuando el cuerpo tiene libertad de deformarse, expuesto por Srivastava *et al.* (2015).

Conclusiones

Se determinaron las tensiones que se originan en un brazo de barrido fabricado de acero refractario HK 40 empleado en un horno de reducción mediante el método de los elementos finitos.

Se determinó que las tensiones en el brazo de barrido pueden ser influenciadas por diversos factores como la geometría del brazo, la carga aplicada y las propiedades del material utilizado.

La tensión máxima equivalente de Von Mises a la cual está expuesto el brazo de barrido del horno de reducción es de $1,313 \times 10^7 \text{ N/m}^2$, lo que indica que el componente está sometido a cargas significativas y puede estar en riesgo de falla por fractura.

Referencias bibliográficas

Correa-Suárez, R.E., Rodríguez-González, I. & Pompa-Larrazabal, M. (2020). Diseño de herramienta para mecanizado de brazos de hornos de soleras múltiples. *Ciencias Holguín*, 26(2), 71-81. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181563169006>

Chariguaman, L. S. C., Arroba, S. M. A., Pérez, L. P. T. & Robles, C. E. M. (2022). Estudio de metodologías para la modelación matemática y simulación de engranes rectos para validar su diseño. *Polo del Conocimiento*, 7(7), 2380-2402. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9042954>

De la Colina Martínez, J. (2024). Métodos analíticos y numéricos para el análisis de placas delgadas. *Ideas en Ciencias de la Ingeniería*, 2(3), 89-104. <https://ideasencienciasingenieria.uaemex.mx/article/view/24425>

Elías-González, J. E., Salazar-Álvarez, É. G., Orozco, D. Y., Guerrero, E. C., Vera, D. Z., Robles, C. E. M. & Ujukam, T. J. E. (2024). Modelación y simulación computacional de una trituradora de biomasa forestal en Ecuador. *TecnoLógicas*, 27(61). <https://revistas.itm.edu.co/index.php/tecnologicas/article/view/3244>

Fernández Columbié, T., Suárez Torres, L., Rodríguez González, I., Guzmán Romero, E.E., Caraballo Núñez, M.A. (2023). Efecto de la temperatura de termofluencia en el acero austenítico refractario HK-40. *Ingeniería Mecánica*, 26(1). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_isoref&pid=S1815-59442023000100060&Ing=es&tIng=en

Fernández Columbié, T., Suárez Torres, L., Rodríguez González, I. (2024). Determinación de los componentes metalúrgicos de la aleación HK 40

empleada en dientes de barrido luego del proceso de fundición. *Ingeniería Mecánica*, 27(1), 354-42. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59442024000100035&script=sci_arttext

González Woge, O., González Morán, C. O. & López Chau, A. (2020). Introducción al método del elemento finito: Solidworks y Matlab. *Ideas en Ciencias de la Ingeniería*, 1(1), 27-47. <https://ideasencienciasingenieria.uaemex.mx/article/view/14589>

Hibbitt, H. & Marcal, P. (1973). A numerical thermo-mechanical model of the welding and subsequent loading of a fabricated structure. *Computadoras y estructuras*, 3(5), 1145-1174. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(73\)90043-6](https://doi.org/10.1016/0045-7949(73)90043-6)

Huang, H. & Usmani, A. (2012). *Finite element analysis for heat transfer*. Springer Science & Business Media.

Izurieta, C., Buenaño, S. & Rivera, M. (2024). El diseño industrial y la simulación como herramienta para mejorar los procesos. *Polo del Conocimiento*, 9(3), 695-706. <https://www.polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/6674>

Lu, X. & Hassan, T. (2001). Tensiones residuales en uniones soldadas a tope y a encaje. *Transactions*, 16, 1-8. <https://repository.lib.ncsu.edu/server/api/core/bitstreams/034c9c28-0775-4171-ae54-3309d7f9fea8>

Mañay, E. D., Chiliquinga, M. D., Ugsha, H. E. Y. & Castillo, P. S. (2022). Diseño por simulación de un control Fuzzy y MPC para un proceso de nivel. *Ciencia Latina*, 6(1), 1951-1970. <https://www.ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/1621>

Márquez, J. A. S., Ramírez, T. A. S., González, A. G., Jiménez, L. S. M., Guía, K. N. N., Rodríguez, M. R., & Ramírez, F. M. S. (2022). Simulación del Esfuerzo Mecánico en una pieza Modelada en 3D por el Método de Elementos Finitos. *Jóvenes en la ciencia*, 16, 1-10. <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3567>

- Pérez, J. I. (2024). Verificación de los estados límite últimos por métodos numéricos en el marco de la segunda generación del Eurocódigo7. *Revista Digital del Cedex*, (204), 61-76. <https://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/2506>
- Pozo-Safla, E. R., Aquino-Arroba, S. M. & Ordoñez-Viñan, M. A. (2021). Análisis estadístico para validar la simulación por elemento finito en el diseño a deformación de una viga en voladizo. *Polo del Conocimiento*, 6(6), 586-611. <https://www.polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/2771>
- Sánchez, D. (2011). *Análisis de tensiones en piezas mecánicas de geometría cilíndrica utilizando el método de los elementos finitos*. (Trabajo de Diploma, Universidad de Salamanca, España). <https://gredos.usal.es/handle/10366/120402>
- Srivastava, A., Ponson, L., Osovski, S., Bouchaud, E., Tvrgaard, V., Ravi Chandar, K. & Needleman, A. (2015). The effect of loading rate on ductile fracture toughness and fracture surface roughness. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 76(7), 20-46. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2014.11.007>
- Vinas, G., Dauda, T. & Moyes, N. (2005). Finite element analysis of residual stresses in a setter box excavation repair weld for Chapel cross Power Station. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 82(11), 270-278. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2004.08.005>
- Zagal, K. C., Bustamante, D. B. V. & Cuasapaz, D. P. G. (2023). Comportamiento estructural de cubiertas tipo tenso membranas empleando el método de elementos finitos. *Green World Journal*, 6(6), 1-21. <https://pure.ups.edu.ec/es/publications/structural-behavior-of-tensile-membrane-roofs-using-the-finite-el>
- Zhu, X. & Chao, Y. (2002). Effects of temperature dependent material properties on welding simulation. *Computers and Structures*, 80(11), 967-976. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(02\)00040-8](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(02)00040-8)