




Design and validation through finite elements of a crusher for the plastic industry

José L. Serna-Landivar, Br¹, Daniela M. Anticona-Valderrama, Ph.D¹, Pedro A. Flores, Msc¹

¹Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U18101283@utp.edu.pe, C18620@utp.edu.pe, C21111@utp.edu.pe

Abstract– The increase in the volume of plastic consumption is a current problem and its reuse becomes necessary to take care of the environment. That is the reason why in the present work a pre-experimental investigation (numerical validation) of a crusher for PET waste was carried out through finite element analysis using the ANSYS software. A static analysis was carried out to find deformations, stresses and a safety factor, as well as a modal analysis to find the natural frequencies and modes of vibration. Also, a complete transient structural analysis was carried out to estimate the deformations, stresses and safety factors in a scenario as similar to reality as possible. The results found indicate that the first three modes of vibration, with natural frequencies of 1687 Hz, 1766.5 Hz and 1767.4 Hz, are the most critical and prone to be activated during operation. In addition, the stresses and deformations caused by dynamic loads were on average 16.02% higher than in the static regime, constituting an important variation that must be considered in the design of the crusher. Considering the results obtained, it is concluded that the design of the crusher is suitable for its subsequent manufacture, experimentation and commissioning.

Keywords-- crusher, static analysis, modal analysis, transient analysis, plastic waste.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Diseño y validación mediante elementos finitos de una trituradora para la industria plástico

José L. Serna-Landivar, Br¹, Daniela M. Anticona-Valderrama, Ph.D¹, Pedro A. Flores, Msc¹
¹Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U18101283@utp.edu.pe, C18620@utp.edu.pe, C21111@utp.edu.pe

Abstract— *El aumento del volumen de consumo de plásticos es una problemática actual y se vuelve necesaria su reutilización para el cuidado del medio ambiente. Es por ello que en el presente trabajo se realizó una investigación preexperimental (validación numérica) de una trituradora para residuos PET mediante el análisis por elementos finitos utilizando el software ANSYS. Se llevó a cabo un análisis estático para encontrar deformaciones, esfuerzos y factor de seguridad, así como un análisis modal para encontrar las frecuencias naturales y modos de vibración. También, se realizó un análisis transitorio completo para estimar las deformaciones, esfuerzos y factores de seguridad en un escenario lo más parecido a la realidad posible. Los resultados encontrados indican que los tres primeros modos de vibración, con frecuencias naturales de 1687 Hz, 1766.5 Hz y 1767.4 Hz son los más críticos y propensos a ser activados durante el funcionamiento. Además, los esfuerzos y deformaciones causados por cargas dinámicos fueron en promedio 16.02% mayores que en régimen estático, constituyendo una variación importante que debe ser tomada en cuenta en el diseño de la trituradora. Tomando en cuenta los resultados obtenidos, se concluye que el diseño de la trituradora es idóneo para su posterior fabricación, experimentación y puesta en operación.*

Keywords—trituradora, análisis estático, análisis modal, análisis transitorio, residuos plásticos.

I. INTRODUCCIÓN

En industrialización, los desechos sólidos se generan en volúmenes cada vez mayores y se eliminan en vertederos con bajo porcentaje de reutilización o reciclaje [1]. El costo de los vertederos aumenta por su gran consumo de espacio y su ineficiencia, lo que contribuye a la amenaza global del plástico. La mayor cantidad de los residuos sólidos desechados son plásticos, y sus usos son amplios, diversos y se extienden a las industrias de la salud, el embalaje, la fabricación y la automoción. En el caso del año 2020 se generaron más de 300 millones de toneladas métricas de residuos plásticos [2].

En el reciclaje de plástico se han encontrado más usos para este tipo de material, ya sea solo o en combinación con otros materiales en composiciones porcentuales variables para realizar distintos materiales de construcción. Estos incluyen ladrillos, bloques, tejas, paneles de puertas, asfalto, aislamiento y compuestos cementosos. Estas aplicaciones mejoran la sostenibilidad ambiental al reducir la extracción de minerales y el transporte de materiales de construcción tradicionales que contribuyen a la contaminación del aire [3]–[8].

Dentro de los plásticos se encuentra el PET (tereftalato de polietileno, por sus siglas en inglés), el cual una vez triturado y reciclado, ha demostrado tener una gran variedad de aplicaciones. Es por ello que se han hecho estudios anteriores, como el caso presentado en el artículo [9], en donde se analizaron las propiedades mecánicas de la arena limosa al que se le adicionó un porcentaje de PET reciclado, y se realizaron ensayos de granulometría, gravedad específica, límite de Atterberg y corte directo para analizar el comportamiento de la mezcla anterior, lo que resultó en un aumento del corte cuando se añadió 3% de PET.

En aplicaciones en pavimentos tenemos la investigación [10], en donde se determinaron el cambio porcentual en las propiedades físico-mecánicas y económicas del concreto, adoquines y mezcla asfáltica en caliente con la adición de PET reciclado a la superficie del pavimento, al agregar PET al pavimento se obtienen mayores resultados económicos y mejores propiedades físico-mecánicas. En Otra investigación [11], se señala que el efecto de agregar 2% de PET a la arcilla en caminos no pavimentados aumentaba el BCR (California Bearing Ratio) en un 3,58%.

En [12] estudiaron las propiedades mecánicas y los porcentajes óptimos de fibras PET reciclado en hormigón ordinario, los resultados obtenidos de cada ensayo indicaron que a medida que aumenta el porcentaje de fibra de tereftalato de polietileno (PET) reciclado utilizado, el valor obtenido en el ensayo de tracción al desdoblamiento aumenta. En otro artículo [13], se investigaron los índices de características geométricas, físicas y mecánicas de los bloques concreto. Los resultados permitieron concluir que el contenido que mejores resultados mostró fue el 15%, de PET debido a que su resistencia a la compresión mostró valor superior a los demás.

Con referencia al diseño de trituradoras de plástico existe muy poca literatura el artículo de investigación [14], se realizó el diseño de una trituradora de plástico y caucho, sin embargo, el alcance de su validación de diseño solo consistió en el análisis estático de la misma, encontrando las deformaciones del eje, los esfuerzos y factor de seguridad, más no contempla análisis dinámicos. Los análisis dinámicos son esenciales para complementar la validación de diseño, por lo que existe un vacío en la investigación presentada.

El objetivo de este artículo es validar numéricamente mediante análisis por elementos finitos el diseño de una trituradora para polímeros como PET, verificando los resultados del análisis estático (deformaciones totales, esfuerzos máximos y factor de seguridad), su respuesta del análisis modal y análisis transitorio; para garantizar el correcto funcionamiento y vida útil de la máquina.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño del modelo 3D de la trituradora

La trituradora objeto del estudio está conformada por una tolva, motor eléctrico, herramienta de triturado, sistema de transmisión, estructura base (ver Fig.1). Esta máquina puede triturar residuos plásticos para ayudar en el reciclaje y fácil transporte de estos productos.

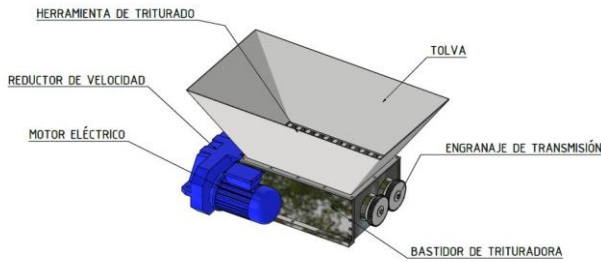


Fig. 1. Máquina trituradora simplificada.

El funcionamiento de la trituradora es mediante un motor eléctrico 4 polos de 1755 rpm transmite el movimiento rotacional hacia un reductor de velocidad a 50 rpm, luego transmitir el movimiento los ejes hexagonales que a su vez portan las herramientas de triturado y trituración del material a reciclar.

La herramienta de trituración tiene diferentes configuraciones, sin embargo, el diseño que se tomó es de 8 filos de corte, cada uno con un ángulo de 45°, el filo de corte es un inserto reemplazable para facilitar el mantenimiento y prolongar la vida útil del soporte del inserto (ver Fig. 2), el modelado se realizó en el software INVENTOR. El material base empleado en el eje y en la porta inserto es ASTM A36, por lo que es un material económico y empleado frecuentemente en la industria, y para el inserto reemplazable es un acero AISI D2, las propiedades mecánicas se pueden observar en la tabla 1.

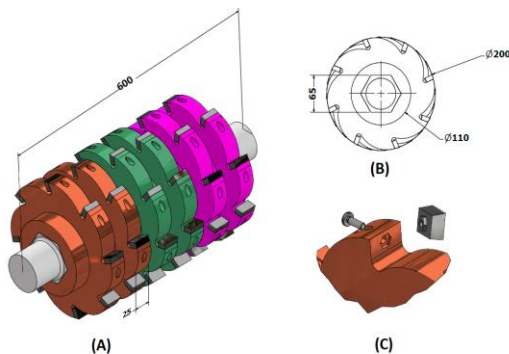


Fig. 2. Dimensiones de la herramienta trituradora.

TABLA I
PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA HERRAMIENTA DE TRITURADO DE LA TRITURADORA [15].

Acero	Resistencia a la fluencia (Mpa)	Resistencia última a la tracción (Mpa)	Módulo de elasticidad (Gpa)	Módulo de corte (Gpa)	Ratio de Poisson	Densidad (kg/m3)
A36	250	400-500	200	79.3	0.26	7800

El material de interés para la trituración son los envases plásticos de botellas que están hechos de un material plástico llamado PET por sus siglas (Tereftalato de polietileno), sus propiedades mecánicas de este material se visualizan en la tabla 2.

TABLA II
PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MATERIAL PET (TEREFTALATO DE POLIETILENO) [16] [17].

Nomenclatura del material	Módulo de elasticidad (Mpa)	Módulo de corte (Gpa)	Ratio de Poisson	Densidad (kg/m3)
PET	3700	1.285	0.44	1330

Modelo FEM de la trituradora

El modelo de la herramienta trituradora se exportó de INVENTOR y luego se importó al software ANSYS, en esta última herramienta computacional utiliza el método de los elementos finitos para resolver los problemas estáticos y dinámicos de nuestro objeto de estudio, de esta manera se resuelve de manera rápida y confiable.

Se utilizó el material A36 para la herramienta trituradora que se muestra en la tabla I, la cual también muestra sus propiedades mecánicas de la herramienta de trituración. Después se realiza el mallado del objeto de estudio cual fue refinado múltiples veces luego de evaluar los resultados de las simulaciones para garantizar la convergencia de estos últimos. En consecuencia, se obtuvieron 95239 nodos y 52329 elementos (Fig.3).

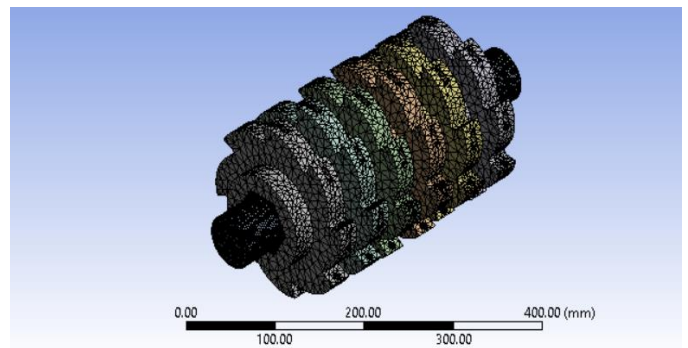


Fig. 3. Mallado de la herramienta trituradora.

Se consideran tres tipologías de condiciones de borde, cambiando solamente la posición de la fuerza, con un valor de 10920 N, según la rotación de la herramienta trituradora, además se considera soporte cilíndrico y desplazamiento en los puntos de apoyos del eje (ver Fig. 4). A continuación, se detalla el calculo de la fuerza que actúa sobre la herramienta [14]:

$$F= (s) (t) \tag{1}$$

Donde F es la fuerza requerida para el cizallamiento del PET, la variable “s” es el área de la placa de corte y “t” es la resistencia del corte del PET.

$$F=350 \text{ mm}^2 * 15,6 \text{ MPa} = 5460 \text{ N}$$

El factor de diseño la fuerza ejercida multiplicado por una constante de valor 2, por lo tanto, la fuerza resultante es:

$$F= (5460 \text{ N}) (2) \Rightarrow F= 10920 \text{ N}$$

Torque generado por la herramienta de trituración:

$$M = (F) (r) \tag{2}$$

Donde M es el momento requerido para el correcto funcionamiento de la trituradora el PET, la variable “F” Fuerza que actúa sobre la herramienta de trituración y “r” es el radio de la herramienta de trituración.

$$M= (10920\text{N}) (0.1\text{m}) \Rightarrow M= 1092 \text{ N*m}$$

Así mismo, en el análisis estático simulado en el software ANSYS, emplea la teoría de fallas dúctiles denominada teoría de la energía de deformación máxima. De esta manera obtendremos las deformaciones máximas, los esfuerzos máximos y los factores de seguridad.

Por otro lado, en este tipo de máquinas se debe realizar análisis dinámicos, uno de ellos es el análisis modal, en este tipo de análisis se busca capturar todos los modos de vibración y frecuencias más importantes en el sistema, es por ello por lo que se consideran 6 modos de vibración [18], además en este tipo de análisis se desprecia la matriz de amortiguamiento, el vector velocidad y también no se consideran fuerzas externas[19]–[21].

Finalmente, en el análisis transitorio, también es un análisis dinámico, en este análisis calculamos la respuesta de las estructuras a las fuerzas concentradas en los nodos, las cargas de presión en los elementos y cargas que varían en el tiempo, como respuesta obtendremos las deformaciones totales, los esfuerzos, siendo estos valores importantes para tener en consideración. Además, el análisis transitorio utiliza la ecuación diferencial linealizada nos proporciona el comportamiento dinámica completa Eq.3 [22], [23].

$$[M]\ddot{u} + [C]\dot{u} + [K]u = F(t) \tag{3}$$

En este análisis transitorio se emplea las mismas condiciones de borde que en el análisis estático, además se considera un factor de amortiguamiento de 0.3.

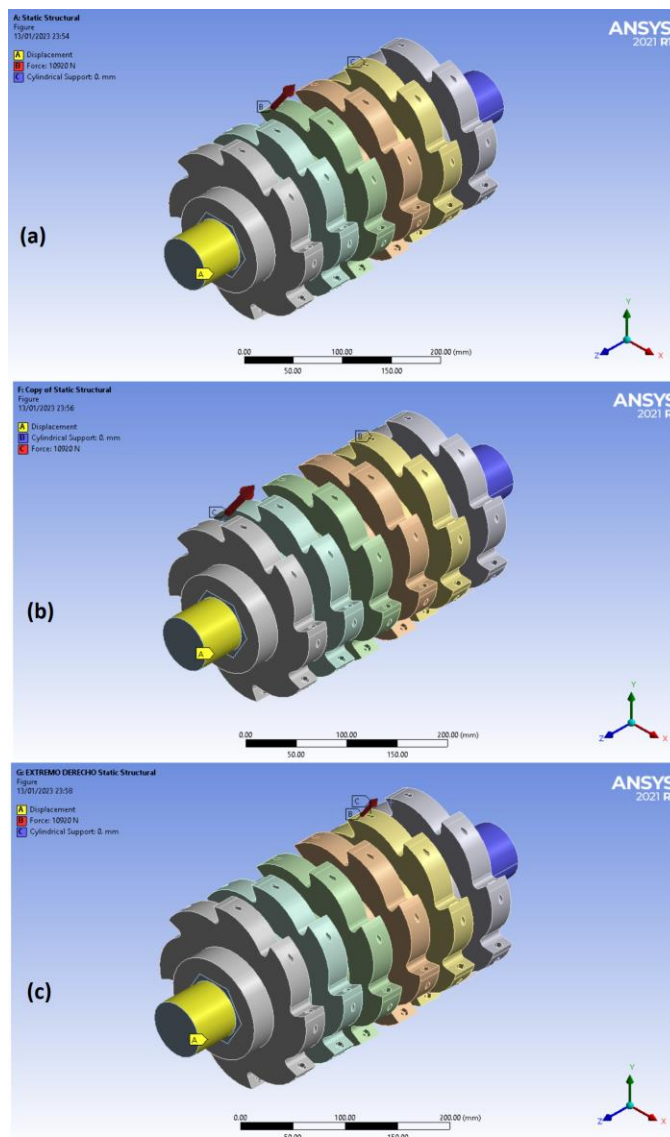


Fig. 4. Condiciones de borde de la herramienta trituradora. (a) caso 1. Fuerza aplicada en la parte central. (b) caso 2. Fuerza aplicada en la parte izquierda. (c) caso3, Fuerza aplicada en el lado derecho.

III. RESULTADOS

Análisis estático

Los resultados obtenidos en el análisis estático tenemos las deformaciones totales (ver Fig.5), en el caso (a) se obtuvo un valor máximo de 0.0207mm, caso (b) 0.0166mm, caso (c) 0.0176 mm. Se observa que el mayor valor es en el caso (a), la

fuerza se aplica en el centro de la herramienta de trituración esto genera el máximo momento flector en esa ubicación.

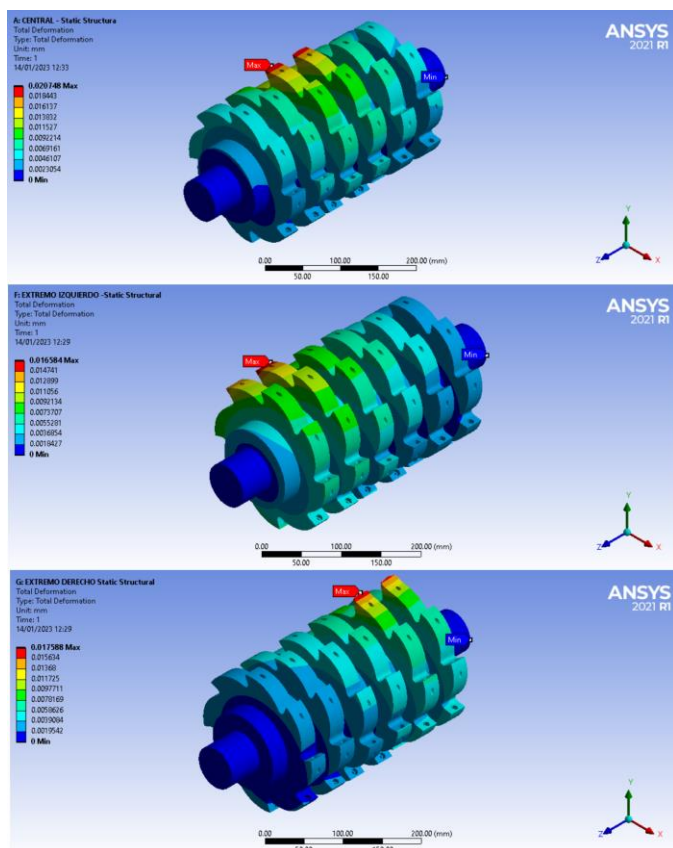


Fig. 5. Deformación total de la herramienta trituradora.

Según la Fig.6, se observa que en cada caso evaluado los valores son diferentes según la localización de la fuerza. En el caso 1 y caso 3, tienen un valor máximo de 54.06 MPa y 55.93 MP, respectivamente. Están ubicados en la parte superior de la herramienta de triturado. Sin embargo, en el caso 2, se observa que el esfuerzo máximo está ubicado en el redondeo del eje, con un valor de 45.07 MPa.

En consecuencia, partiendo de los resultados del análisis de esfuerzos y el esfuerzo de fluencia, el cociente es el factor de seguridad, por lo que resulta para el caso 1 el valor de 4.6244, caso 2 el valor de 5.5468, caso 3 el valor de 4.4695. Estos valores son los mínimos debido a que debemos de evaluar el evento más crítico. Por lo tanto, para el criterio del factor de seguridad debe de cumplir la relación entre la tensión máxima y el límite elástico cumple la condición de seguridad $k \geq 1.7$ [14].

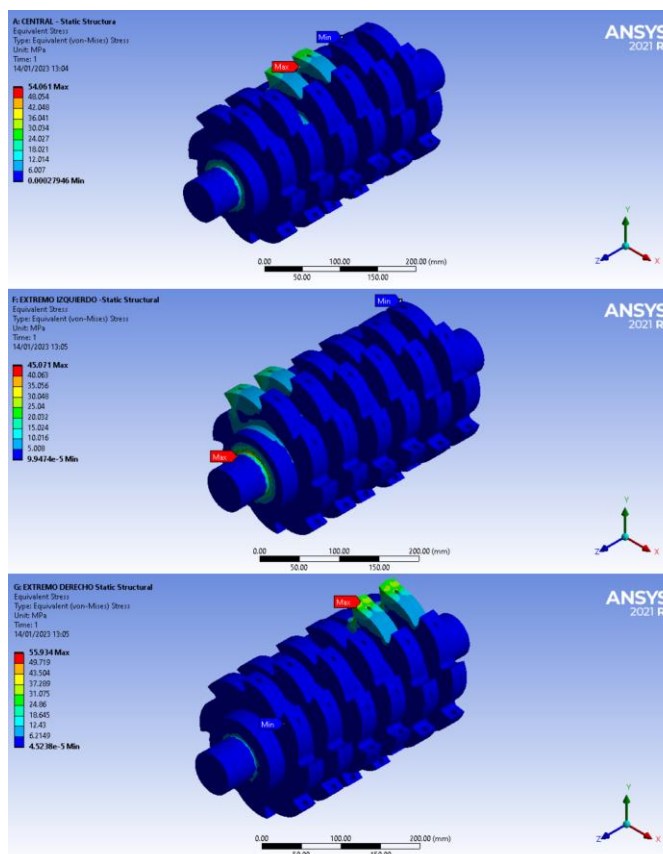


Fig. 6. Esfuerzos máximos de la herramienta trituradora.

Análisis modal

Los resultados del análisis modal utilizando ANSYS que se muestran en la Tabla 3 llevan a la conclusión de que a medida que aumenta el orden del modo de vibración, también lo hace la frecuencia. Analizando la tabla 3 de la relación de masa efectiva a masa total, observamos en la dirección “X” el mayor valor de sus repuestas dinámicas es el modo de vibración número 2, con una frecuencia natural 1766.5 Hz, con una participación de masa de 0.6916, su comportamiento es flexión lateral. La dirección “Y” el mayor valor de sus repuestas dinámicas es el modo de vibración número 3, con una frecuencia natural 1767.4 Hz, su participación de masa es de 0.6914, su comportamiento es flexión lateral. La rotación “Z” que los mayores valores de las respuestas dinámicas es el modo de vibración número 1 y 2, con una frecuencia natural 1687 Hz y 1766.5 Hz, su comportamiento es torsional y flexión lateral, respectivamente. Esos valores mencionados son los que podrían activar la resonancia de la trituradora.

TABLA III
ANÁLISIS MODAL: RELACION DE MASA EFECTIVA A MASA TOTAL DE LA HERRAMIENTA TRITURADORA.

MODO	Frecuencia (Hz)	Dirección "X"	Dirección "Y"	Dirección "Z"	ROTACIÓN "X"	ROTACIÓN "Y"	ROTACIÓN "Z"
1	1687	1.53E-06	5.23E-05	2.90E-08	6.29E-07	2.92E-10	0.29446
2	1766.5	0.69157	1.13E-02	5.63E-07	9.72E-07	1.79E-04	0.40201
3	1767.4	1.14E-02	0.69139	3.16E-08	1.38E-04	2.99E-06	8.59E-02
4	3496.2	2.55E-09	1.05E-08	4.45E-06	4.17E-06	1.46E-06	1.61E-04
5	4145	1.05E-06	8.44E-08	0.87595	0.30539	0.13511	3.54E-07
6	4185.4	6.70E-05	1.02E-05	1.07E-03	2.29E-02	0.29745	5.02E-05

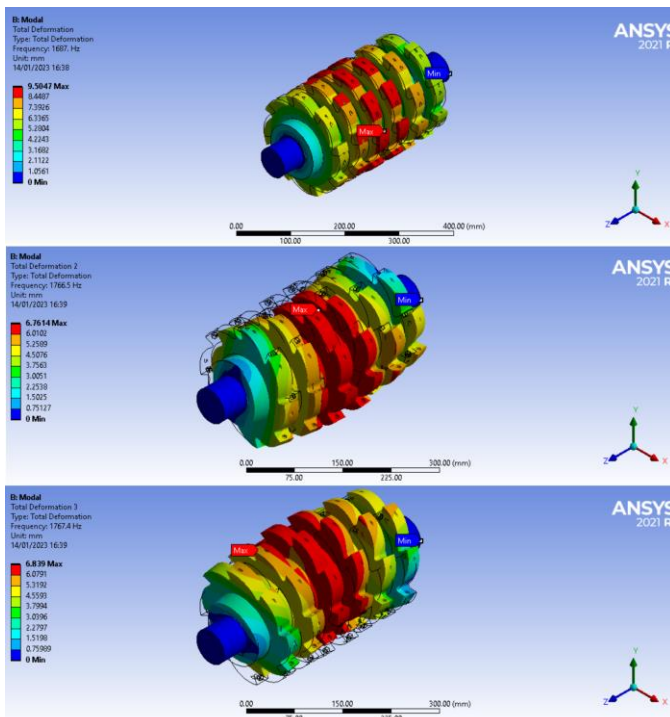


Fig. 7. Modos de vibración relevantes de la herramienta trituradora.

En la fig. 7, se observan los tres modos de vibración importantes y sus respectivas deformaciones, estas de deformaciones se concentran en el centro de la herramienta trituradora y en el extremo del eje fijo el valor de las deformaciones son cero.

Análisis transitorio

En la Fig.8, observa el análisis transitorio full de la herramienta trituradora, en la Fig.8 (a), es el resultado de la deformación total con un valor de 0.025 mm, este valor es mayor en comparación con el análisis estático de la Fig.5, esto es debido a que es un análisis dinámico no lineal, considerando las mismas condiciones de borde, la fuerza que fue sometida la herramienta trituradora es la misma de la

planteada inicialmente, pero con la adicional que sí varía en el tiempo, desde 0.1 segundo, hasta la etapa final del impacto 1 segundo (impacto entre la herramienta de triturado y el elemento a triturar PET). Esto nos da la ventaja de apreciar comportamientos que en el análisis estático no podemos obtener con exactitud.

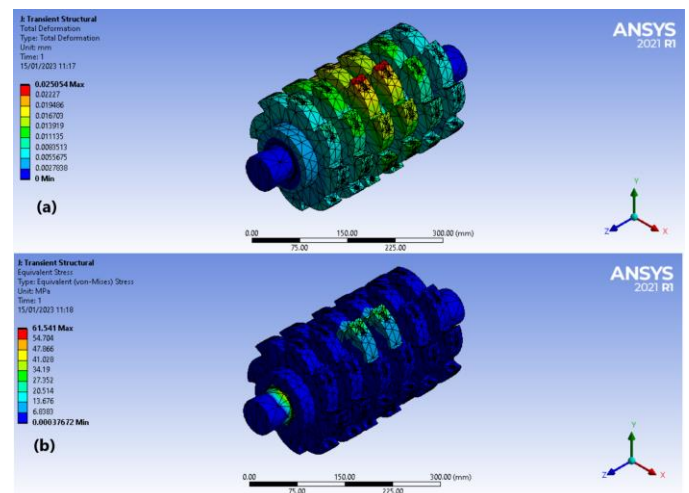


Fig. 8. Análisis transitorio full de la herramienta trituradora. (a) Deformación total, (b) Esfuerzo máximo.

En la Fig.8 (b), observamos los esfuerzos máximos obtenidos del análisis transitorio full, tiene un valor de 61.541 MPa, este valor es superior a los obtenido en el análisis estático de la Fig.6, plasmándolo en porcentaje promedio de 20.12%, este valor se debe de tener en consideración en la etapa de diseño de la máquina trituradora.

Por lo tanto, el factor de seguridad en el análisis transitorio es inferior con respecto al obtenido en el análisis estático, con valores del 4.062 y 4.4695, respectivamente. De igual manera este diseño cumple con la condición de $k \geq 1.7$, de la referencia [14].

IV. CONCLUSIONES

Se realizaron análisis estáticos, modales y transitorio en este estudio. La deformación máxima, determinada por análisis estático, es de 0.0207 mm, mientras que el esfuerzo máximo es de 55.93 MP. Al realizar un análisis modal, a medida que aumenta el número de orden, la frecuencia y la deformación máxima aumentan proporcionalmente. La vibración del primero, segundo y tercer orden contiene la forma más próxima de vibración del tipo cizalla torsional. Según las estadísticas del factor de participación el modo de vibración 3 en la dirección "Y" tiene el mayor valor de 0.69157. El esfuerzo equivalente máximo y las deformaciones ocurren precisamente en el punto de análisis de vibraciones estáticas, modales y transitorias. Además, se demuestra que el mayor esfuerzo se produjo en el análisis transitorio en comparación con el análisis estático, siendo este valor promedio aproximadamente del 16%.

El análisis por elementos finitos es una herramienta computacional que permite solucionar problemas de ingeniería complejos y en especial en la etapa de diseño de máquinas, por lo que en esta etapa es económico las modificaciones y/o correcciones en comparación cuando está construido y operando el equipo.

Se recomienda complementar el diseño de la trituradora PET con un análisis DEM (método de elementos discretos) para calcular tensiones y desplazamientos de las partículas pequeñas del PET triturado.

REFERENCES

- [1] P. O. Awoyera and A. Adesina, "Plastic wastes to construction products: Status, limitations and future perspective," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 12, p. e00330, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00330>.
- [2] J. M. Nyika, E. K. Onyari, M. O. Dinka, and S. B. Mishra, "A review on methods of assessing pollution levels from landfills in South Africa," *Int. J. Environ. Waste Manag.*, vol. 28, no. 4, pp. 436 – 455, 2021, doi: [10.1504/IJEW.2021.118859](https://doi.org/10.1504/IJEW.2021.118859).
- [3] R. Sharma, P. Jain, and S. Dey Sadhu, "Study of Morphological and Mechanical Properties of PBT/PTT Blends and Their Nanocomposites and Their Correlation," *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 44, no. 2, pp. 1137–1150, 2019, doi: [10.1007/s13369-018-3424-7](https://doi.org/10.1007/s13369-018-3424-7).
- [4] F. A. Spósito *et al.*, "Incorporation of PET wastes in rendering mortars based on Portland cement/hydrated lime," *J. Build. Eng.*, vol. 32, 2020, doi: [10.1016/j.jobe.2020.101506](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101506).
- [5] A. A. Mohammed and A. A. F. Rahim, "Experimental behavior and analysis of high strength concrete beams reinforced with PET waste fiber," *Constr. Build. Mater.*, vol. 244, 2020, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2020.118350](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118350).
- [6] I. H. Alfahdawi, S. A. Osman, R. Hamid, and A. I. AL-Hadithi, "Influence of PET wastes on the environment and high strength concrete properties exposed to high temperatures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 225, pp. 358 – 370, 2019, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2019.07.214](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.214).
- [7] S. Perera, A. Arulrajah, Y. C. Wong, S. Horpibulsuk, and F. Maghool, "Utilizing recycled PET blends with demolition wastes as construction materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 221, pp. 200 – 209, 2019, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2019.06.047](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.047).
- [8] J. Nyika and M. Dinka, "Recycling plastic waste materials for building and construction Materials: A minireview," *Mater. Today Proc.*, vol. 62, pp. 3257–3262, 2022, doi: [10.1016/j.matpr.2022.04.226](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.226).
- [9] S. Paredes, J. Ramirez, and G. Durán, "Experimental study of the mechanical properties of a silty sand with recycled PET," 2020, doi: [10.18687/LACCEI2020.1.1.379](https://doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.379).
- [10] D. E. P. Cuba, N. J. P. Cuba, and M. R. U. Toro, "Technical – economic comparison between a conventional pavement and a pavement with incorporation of recycled pet in the race layer; [Comparación técnico – económica entre un pavimento convencional y un pavimento con incorporación de PET reciclado en la c,]" in *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, 2022, vol. 2022-July, doi: [10.18687/LACCEI2022.1.1.56](https://doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.56).
- [11] R. Del Pilar Bustamante Sánchez and L. M. Merma Gallardo, "Stabilization of Clay Soils applying PET at 2%, 4% and 6% on Unpaved Roads," in *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, 2022, vol. 2022-July, doi: [10.18687/LACCEI2022.1.1.45](https://doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.45).
- [12] S. Shahidan, N. A. Ranle, S. S. M. Zuki, F. S. Khalid, A. R. M. Ridzuan, and F. M. Nazri, "Concrete incorporated with optimum percentages of recycled polyethylene terephthalate (PET) bottle fiber," *Int. J. Integr. Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–8, 2018, doi: [10.30880/ijie.2018.10.01.001](https://doi.org/10.30880/ijie.2018.10.01.001).
- [13] J. M. L. Barreto, H. N. da Costa, L. F. Cândido, and A. E. B. Cabral Correio, "Analysis of physical and mechanical properties of pressed concrete blocks without structural purposes with additions of recycled PET," *Rev. Mater.*, vol. 24, no. 2, 2019, doi: [10.1590/s1517-707620190002.0672](https://doi.org/10.1590/s1517-707620190002.0672).
- [14] M. Ján, K. Tomáš, K. Jozef, and Č. Iveta, "Design of the Crusher for Plastic and Rubber Waste Produced in Automotive Industry," *FME Trans.*, vol. 49, no. 3, pp. 734 – 739, 2021, doi: [10.5937/fme2103734M](https://doi.org/10.5937/fme2103734M).
- [15] O. Araque, N. Arzola, and O. Varón, "Computational modeling of fatigue crack propagation in butt welded joints subjected to axial load," *PLoS One*, vol. 14, no. 6, 2019, doi: [10.1371/journal.pone.0218973](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218973).
- [16] Y.-J. Jeon, J.-H. Yun, and M.-S. Kang, "Analysis of Elastic Properties of Al/PET Isotropic Composite Materials Using Finite Element Method," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 22, 2022, doi: [10.3390/ma15228007](https://doi.org/10.3390/ma15228007).
- [17] G. Martínez-Barrera, M. Martínez-López, J. J. del Coz-Díaz, F. López-Gayarre, and V. Varela-Guerrero, "Waste polymers and gamma radiation on the mechanical improvement of polymer mortars: Experimental and calculated results," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 11, p. e00273, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00273>.
- [18] E. Marliana and I. Ismail, "Dynamics characteristics analysis on shaft sprocket assembly of rake conveyor," *Trends Sci.*, vol. 18, no. 19, 2021, doi: [10.48048/tis.2021.11](https://doi.org/10.48048/tis.2021.11).
- [19] M.-L. Hao and G.-J. Cheng, "Modal analysis based on finite

element jaw crusher rotor,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 599–601, pp. 547 – 550, 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.599-601.547.

- [20] Y. Wang, G. Tan, B. Yang, and C. Wang, “The Finite Element Analysis and Optimization on a Special Vehicle,” *SAE Tech. Pap.*, vol. 2015-April, no. April, 2015, doi: 10.4271/2015-01-0473.
- [21] W. Tanaś, J. Szczepaniak, J. Kromulski, M. Szymanek, J. Tanaś, and M. Sprawka, “Modal analysis and acoustic noise characterization of a grain crusher,” *Ann. Agric. Environ. Med.*, vol. 25, no. 3, pp. 433 – 436, 2018, doi: 10.26444/aaem/87154.
- [22] D. A. Najera-Flores and R. J. Kuether, “A Study of Whole Joint Model Calibration Using Quasi-Static Modal Analysis,” *J. Vib. Acoust. Trans. ASME*, vol. 142, no. 5, 2020, doi: 10.1115/1.4047247.
- [23] Y. Cao, R. Zhong, D. Shao, Q. Wang, and X. Guan, “Dynamic Analysis of Rectangular Plate Stiffened by Any Number of Beams with Different Lengths and Orientations,” *Shock Vib.*, vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/2364515.