

Innovative design of a plastic shredder for sustainable cities

José L. Serna-Landivar, Br¹, Madelaine Violeta Risco Sernaque, Msc², Ana Beatriz Rivas Moreano, Dr², Marleni Mendoza Damas, Msc³, Maria Ysabel Garcia-Alvarez, Dr³, Katy Sotteccani Aucchahuque, Msc³, Daniela M. Anticono-Valderrama, Ph.D⁴

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

²Universidad Autónoma del Perú, Perú, arivasmor@autonoma.edu.pe, mriscese@autonoma.edu.pe.

³Universidad César Vallejo, Perú, mendozada15@ucvvirtual.edu.pe, mgarcialv@ucvvirtual.edu.pe, ksotteccania@ucvvirtual.edu.pe

⁴Universidad Privada del Norte, Perú, daniela.anticono@upn.pe.

Abstract— Plastic waste is a current problem for which it generates environmental pollution, which is why an innovative design of a plastic crusher for sustainable cities was presented, since it is important to develop circular economies and reuse plastic waste. The 3D model of an axis was produced with SolidWorks. Static and high-cycling fatigue analyzes were performed in this study in ANSYS Workbench software to validate the proposed design. During the grinding operation, the grinding tool is subjected to cyclical loads that vary over time, through finite element analysis. The results of the ANSYS finite element analysis (FEA) of the crushing tool had a maximum stress of 46.3 MPa in the static analysis. and a safety factor of 5.4, however, in the high cycle fatigue analysis a lower safety factor was obtained than in comparison with the static analysis, with a value of 1.86, taking into account that the fatigue resistance limit is lower than the yield strength in the static regime, since the Marin factors were considered in the fatigue regime. It is concluded that the grinding tool is validated pre-experimentally, so this guarantees that the machine will work correctly and safely.

Keywords— crusher, sustainable city, plastic waste, fatigue life analysis finite element method, static analysis.

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

Diseño innovador de una trituradora de plástico para ciudades sostenibles

José L. Serna-Landivar, Br¹, Madelaine Violeta Risco Sernaque, Msc², Ana Beatriz Rivas Moreano, Dr², Marleni Mendoza Damas, Msc³, Maria Ysabel Garcia-Alvarez, Dr³, Katy Sotteccani Aucchuaque, Msc³, Daniela M.

Anticona-Valderrama, Ph.D⁴

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

²Universidad Autónoma del Perú, Perú, arivasmor@autonoma.edu.pe, mriscose@autonoma.edu.pe.

³Universidad César Vallejo, Perú, mendozada15@ucvvirtual.edu.pe, mgarcialv@ucvvirtual.edu.pe, ksotteccania@ucvvirtual.edu.pe

⁴Universidad Privada del Norte, Perú, daniela.anticona@upn.pe.

Abstract— Los residuos plásticos son los principales causantes de la contaminación ambiental, es por ello por lo que se presentó un diseño innovador de trituradora de plásticos para ciudades sostenibles, ya que es importante desarrollar economías circulares y reutilizar los residuos plásticos, dando un segundo uso al plástico reciclado en aplicaciones de ingeniería. El modelo 3D de un eje se realizó con el software de diseño SolidWorks. Se llevó a cabo análisis estático y de fatiga de alto ciclaje en este estudio en el software ANSYS Workbench, para validar el diseño propuesto. Durante la operación de triturado la herramienta de triturado está sometido a cargas cíclicas que varían en el tiempo, mediante el análisis por elementos finitos. Los resultados del análisis de elementos finitos (FEA) ANSYS de la herramienta de triturado tuvo en el análisis estático un esfuerzo máximo de 46.3 MPa. y un factor de seguridad de 5.4, sin embargo, en el análisis de fatiga de alto ciclaje se obtuvo un menor factor de seguridad que en comparación del análisis estático, con un valor de 1.86, dado que el límite de resistencia a la fatiga es inferior a la resistencia de fluencia en el régimen estático, ya que se consideraron los factores de Marin en el régimen de fatiga. Se concluye que la herramienta de triturado queda validado pre-experimentalmente, por lo que esto garantiza que la máquina funcionará de manera correcta y segura.

Keywords— Trituradora, ciudad sostenible, residuos plásticos, análisis por elementos finitos de fatiga, análisis estático.

I. INTRODUCCIÓN

Los desechos plásticos han sido un problema ambiental importante y, por lo tanto, un desafío global durante décadas. A medida que aumenta el uso de plástico, los desechos plásticos continúan acumulándose sin métodos efectivos de eliminación/gestión [1][2][3]. Desde la década del 50, se produjeron aproximadamente 8300 millones de toneladas métricas (TM), de las cuales solo 600 toneladas métricas se reciclaron y 800 TM se incineraron, y gran parte del plástico producido se descompuso cronológicamente, lo que podría demorar hasta 1000 años [4].

Las ciudades sustentables o sostenible tienen principios esenciales como la utilización de energía eléctrica, el desplazamiento de los vehículos, los espacios verdes y la diversidad de la flora, la participación de los ciudadanos, la construcción de viviendas eco-amigables, la administración de recursos de forma sustentable y la utilización de tecnología

avanzada y soluciones inteligentes para mejorar la administración de la ciudad y aumentar la calidad de vida de los habitantes [1], [5].

Es importante mencionar que la reutilización y el reciclaje son esenciales en las ciudades sustentables, es por esto por lo que en la composición de plástico reciclado se han hallado más usos de este material, ya sea en singular o en combinación con distintos materiales con una proporción variable para realizar distintos tipos de construcción. Estos contienen ladrillos, ladrillos, placas de puertas, aislante y compuestos de cemento. Estas aplicaciones aumentan la sustentabilidad del medio ambiente al disminuir la recolección de minerales y la transmisión de materiales para la edificación tradicional que tienen la posibilidad de causar contaminación en el medio ambiente [6]–[11].

La fiabilidad de la estructura de una máquina se puede definir como la capacidad de la estructura para conservar su capacidad mecánica a lo largo de su ciclo de vida. De esta manera, la relación entre duración y fiabilidad es muy estrecha. La falla del sistema se genera en gran medida por filas estáticas y de fatiga. De modo que, la máquina se puede estudiar en concordancia a tipos de peso poco frecuentes, que son estáticos y de fatiga, para concebir estructuras garantizadas y sustentables. Varias lenguas, investigaciones acerca de pruebas experimentales o de matemática relacionadas a diseños basados en máquinas.

La gran parte de árboles (ejes) están fallando a causa de las presiones de fatiga que ejercen sobre ellas, esto provoca que se generen crecimiento de líneas de fatiga, las cuales luego se expandan y causan la rotura del eje en dos partes [12], [13].

Referente al diseño de trituradoras de plástico hay muy poca literatura documentada en la base de datos Scopus, tenemos el texto de investigación [14], el cual describe el diseño de una trituradora de plástico y caucho, no obstante, la magnitud de su validación de diseño fue únicamente el análisis estático de la misma, hallando las deformaciones en el eje, las presiones y el factor de seguridad, sin embargo, no contempla el estudio de la fatiga. El estudio por fatiga es importante para complementar la validación de un diseño, de modo que existe una carencia en los datos exhibidos.

El objetivo de este artículo es validar numéricamente mediante análisis por elementos finitos el diseño innovador de una trituradora de plásticos para ciudades sustentables, verificando los resultados del análisis estático y de fatiga, para garantizar el correcto funcionamiento y vida útil de la máquina. Además, que permitirá a las ciudades sostenibles reciclar los desechos plásticos para sus aplicaciones industriales y reducir la contaminación del medio ambiente.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño del modelo 3D de la trituradora

Objeto de investigación La trituradora consta de tolva, motor, herramientas de trituración, sistema de transmisión y estructura base (ver Figura 1). Esta máquina tritura desechos plásticos para ayudar en el reciclaje y facilitar el transporte de estos productos.

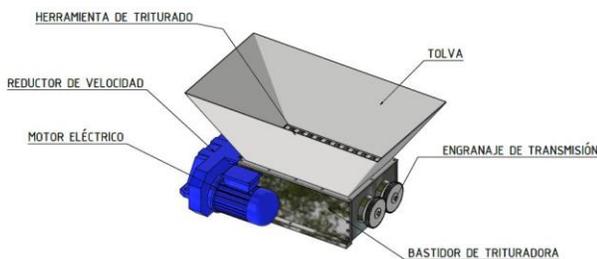


Fig. 1. Máquina trituradora de plástico propuesta.

El funcionamiento de la trituradora es por un motor eléctrico de 4 polos de 1755 rpm que transmite el movimiento giratorio a un reductor de 50 rpm que luego transmite el movimiento al eje hexagonal que a su vez transporta las herramientas para la trituración y el material triturado para su recuperación.

Las cuchillas abrasivas vienen en diferentes configuraciones, pero el diseño utilizado es de 8 filos de corte, cada uno con un ángulo de 45°, y los filos de corte son insertos reemplazables para facilitar el mantenimiento y prolongar la vida útil de la herramienta (ver Figura 2), el modelado se realizó en el software INVENTOR. El material base utilizado para el árbol de acero (eje) es ASTM A36, por lo tanto, es un material económico, de uso frecuente en la industria, mientras que el inserto reemplazable es acero AISI D2, propiedades mecánicas ver tabla I.

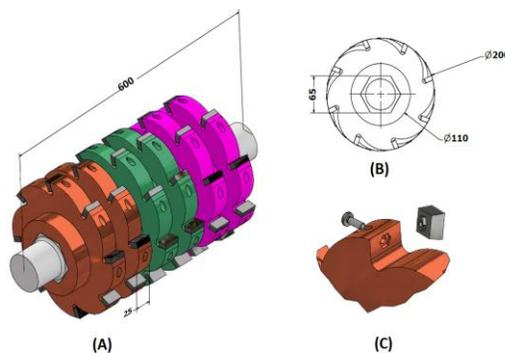


Fig. 2. Dimensiones de la herramienta de triturado.

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 utilizado para la trituración es un envase botella de plástico, el cual está elaborado con un material plástico abreviado como PET (tereftalato de polietileno), cuyas propiedades mecánicas se muestran en la Tabla II.

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 tridimensional 3D de la trituradora se importó a ANSYS Workbench y se malló la herramienta de triturado, la generación se malla se realizó con iteraciones de esfuerzos vs número de nodos, refinando en las zonas de concentración de esfuerzos como en los radios de curvatura del cambio de sección en el árbol de acero (eje), la malla generada se muestra en la Fig. 3. El resultado estadístico es que el número de nodos es 144759 y el número de elementos es 80609. La calidad media de los elementos es 0,88, considerando que la calidad mínima de la malla debe de ser de 0.7; eso prueba que la calidad de los elementos es buena.

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 triturado.

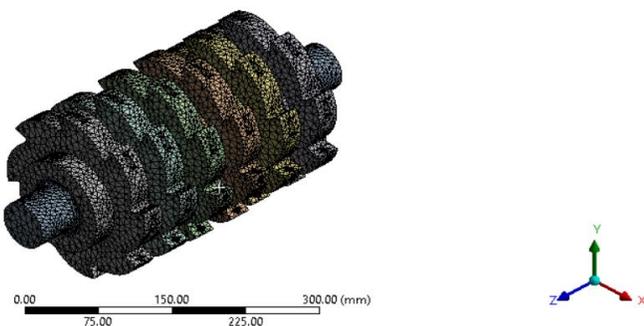


Fig. 3. Mallado de la herramienta de triturado.

Se considera las condiciones de borde, una fuerza en el la parte central un valor de 8190 N, según la rotación de la herramienta trituradora, además se considera soporte cilíndrico en los puntos de apoyos del eje (ver Fig. 4). A continuación, se detalla el cálculo de la fuerza que actúa sobre la herramienta [14]:

$$F = (s) * (t) \quad (1)$$

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 1.5, por lo tanto, la fuerza resultante es:

$$F = (5460 \text{ N}) * (1.5) \Rightarrow F = 8190 \text{ N}$$

Torque generado por la herramienta de trituración:

$$M = (F) * (r) \quad (2)$$

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.

$$M = (8190 \text{ N}) * (0.10 \text{ m}) \Rightarrow M = 819 \text{ N*m}$$



Fig. 4. Condiciones de borde de la herramienta de triturado.

En el análisis estático simulado por el software ANSYS, utiliza la teoría de falla dúctil llamada teoría de energía de deformación máxima. De esta manera podemos obtener la máxima deformación, la máxima tensión y el factor de seguridad. Además, el software desarrolla una matriz de rigidez para cada elemento y, finalmente, se desarrolla una relación entre el desplazamiento y las fuerzas aplicadas utilizando la matriz de rigidez global desarrollada para formar las matrices de rigidez elemental [18][19]. La relación se muestra a continuación.

$$[F] = [K] [U] \quad (3)$$

Donde:

[F]: *Matriz fuerza*

[K]: *Matriz rigidez*

[U]: *Vector desplazamiento*

En cuanto al análisis de fatiga se consideró el método del esfuerzo-vida para evaluar la herramienta de triturado, la cual se basa solo en los niveles de esfuerzo, el objeto está sometido a fuerzas repetidas y de magnitud variable. Este método de esfuerzo-vida, tiene mucha acogida por las aplicaciones en el área de diseño y representa de manera adecuada las aplicaciones de alto ciclaje.

La curva S-N es una curva de fatiga del material que indica la relación entre los esfuerzos y el número de ciclos. El estrés después ciclos, la tensión máxima no puede hacer que el material falle por fatiga, lo que se denomina tensión límite de fatiga. Normalmente la gráfica de la curva se puede dividir en dos partes: una es la región de vida finita y la otra es la región de vida infinita. La región de vida infinita significa que cuando el nivel de esfuerzos de los componentes es inferior o igual al límite de fatiga, en cambio la región de vida finita expresa que los esfuerzos son superiores al límite del esfuerzo de fatiga del material [20][21][22].

En la ecuación 4, tenemos la resistencia a la fatiga o el límite de resistencia de los aceros se pueden aproximar a partir de los datos de resistencia a la tracción.

$$S'_e = 0.50 S_{ut} \quad (4)$$

Esta propiedad del límite de resistencia a la fatiga se cumple cuando el material base tiene una resistencia última a la tracción $S_{ut} \leq 200 \text{ kpsi (1400MPa)}$ [23].

El límite de fatiga real de una pieza puede diferir significativamente del límite de fatiga obtenido del diagrama S-N. Esto es porque cada diagrama S-N se obtiene ensayando experimentalmente en un laboratorio una muestra específica con una geometría determinada, con un acabado superficial determinado, muchas veces muy diferente al de la pieza en condiciones de carga, temperatura, etc. Según Marín [24], establece que el nuevo límite a fatiga S'_e será calculado a partir del teórico anterior obtenido de los ensayos S'_e , pero afectado de los distintos coeficientes correctores que recojan la influencia de los distintos factores de acuerdo a las

condiciones reales de trabajo. Por lo tanto, la ecuación de Marín se expresa:

$$S_e = K_a K_b K_c K_d K_e K_f S'_e \quad (5)$$

Donde:

- K_a : Factor de modificación por la condición superficial.
- K_b : Factor de modificación por el tamaño.
- K_c : Factor de modificación por la carga.
- K_d : Factor de modificación por la temperatura.
- K_e : Factor de confiabilidad.
- K_f : Factor de modificación por efectos varios.
- S'_e : Límite de resistencia a la fatiga de ensayos de probeta en laboratorio.
- S'_e : Límite de resistencia a la fatiga en viga rotativa (árbol de acero)

En el árbol de acero de la herramienta de triturado, se consideran los factores establecidos de la ecuación de Marín, ya que es importante realizar la corrección del límite de resistencia a la fatiga para realizar el análisis por elementos finitos en ANSYS Workbench.

III. RESULTADOS

Análisis estático

Los resultados obtenidos en el análisis estático tenemos los esfuerzos máximos, como se observa en la figura 5, en (A) se tiene un esfuerzo máximo de 46.285 MPa, la cual la concentración de esfuerzos se ubica en el filete de cambio de sección en el eje de la herramienta de triturado (ver Fig. 5 (B)), esta concentración de esfuerzos es crítica, ya que posiblemente en esa zona podría fallar prematuramente el eje, cuando esté en operación por causas de fisuras; en consecuencia se obtiene un factor de seguridad estático de 5.4. Por lo tanto para el análisis estático de la herramienta de triturado 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].

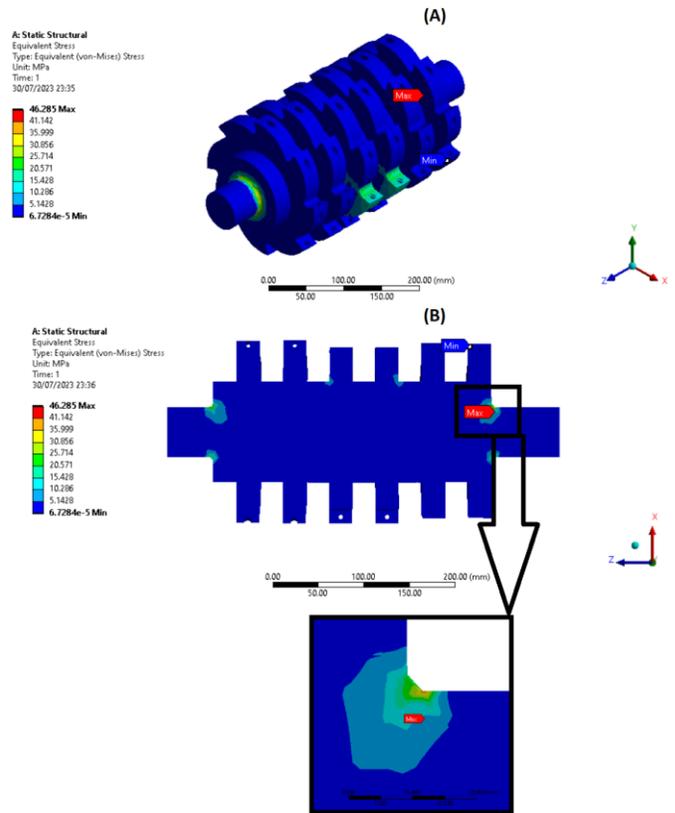


Fig. 5. Análisis estático: Esfuerzos máximos de la herramienta de triturado.

Análisis fatiga de alto ciclaje

En el análisis de fatiga de alto ciclaje se consideró el método de esfuerzo-vida, ya que es apropiado para este tipo de elementos de máquina, en la figura 6 se observa la vida de la herramienta de triturado, se tiene el valor de 10^6 en todo el objeto de estudio, por lo que ningún esfuerzo está por encima del límite a la fatiga, lo que podemos asegurar que el elemento no fallará por fatiga.

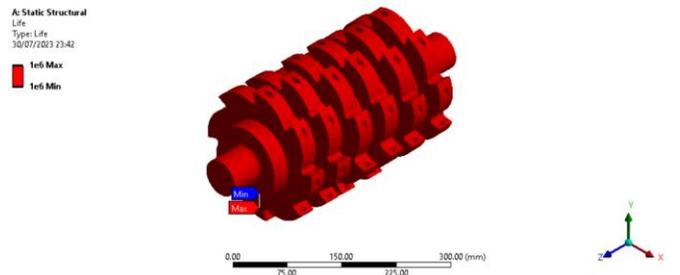


Fig. 6. Análisis de fatiga: vida de la herramienta de triturado.

En cuanto el factor de seguridad en el análisis de fatiga de alto ciclaje tenemos un valor de 1.86, teniendo en cuenta que el límite de resistencia a la fatiga es inferior a la resistencia de

fluencia en el régimen estático, ya que se consideraron los factores de Marín en el régimen de fatiga. Sin embargo, tanto en el análisis estático como en el análisis de fatiga se tienen concentraciones de esfuerzos en el filete del cambio de sección, como lo afirman los artículos [20][25] que los radios de filete tienen influencias importantes en la resistencia a la fatiga de un componente mecánico, como el de la herramienta de triturado.

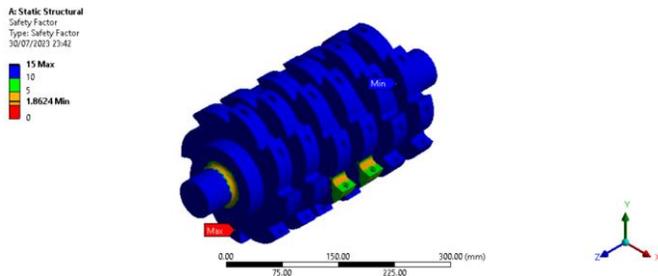


Fig. 7. Análisis de fatiga: factor de seguridad de la herramienta trituradora.

En la figura 8, se observa la sensibilidad a la fatiga de la herramienta de triturado, evaluando un incremento hasta el 200 % de la carga establecida, para ese valor del incremento se tiene un número de ciclos 6.63×10^5 , la cual es inferior a lo mínimo que se recomienda de 10^6 . Sin embargo, para el incremento de 180 %, como aceptación máxima para que el componente no falle, como un límite de tolerancia de aceptación para un mínimo de ciclos de 10^6 .

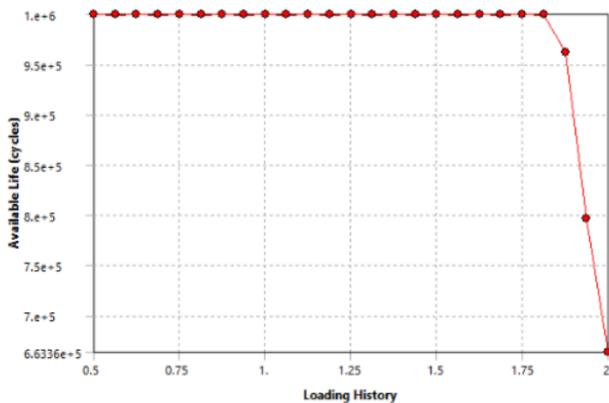


Fig. 8. Análisis de fatiga: Sensibilidad a la fatiga de la herramienta de triturado.

IV. CONCLUSIONES

Se realizó un diseño innovador de trituradora de plásticos para ciudades sostenibles, puesto que es importante desarrollar economías circulares y reutilizar los residuos plásticos, dado que estos contaminan el medio ambiente y deteriora los ecosistemas, esta máquina permite triturar y reciclar los residuos plásticos para darle otras aplicaciones en la industria. Además, se llevó a cabo análisis estático y de fatiga de alto

ciclaje en este estudio en el software ANSYS Workbench, para validar el diseño propuesto. Durante la operación de triturado la herramienta de triturado está sometido a cargas cíclicas que varían en el tiempo, mediante el análisis por elementos finitos se identificó que la parte más crítica del eje diseñado son las hendiduras, muescas, en la que durante el funcionamiento existen cargas cíclicas, la amplitud de la tensión local alcanza un valor crítico. Para cumplir con los requisitos de seguridad, es necesario ajustar una geometría en estas muescas y aumentar el tamaño y el diámetro de las partes más solicitadas, lo que puede resultar en un aumento del peso del componente estructural, o en su defecto se recomienda cambiar de material por un acero que tenga mayor resistencia a la tracción y a la fatiga, de esta manera se tiene mayores factores de seguridad tanto en el régimen estático y de fatiga.

El estudio por elementos finitos es una técnica computacional que apoya la resolución de dificultades de la ingeniería y en particular en el momento en que se diseñó una máquina, en este caso, es económico hacer las modificaciones y/u otras correcciones en comparación a la etapa en que se construyó y se operó el dispositivo.

REFERENCES

- [1] M. M. Ismail and I. Dincer, "Development of an Integrated Waste to Energy Multigeneration System Based on Plastic Wastes for Sustainable Cities," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 85, p. 104079, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104079>.
- [2] 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>.
- [3] 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).
- [4] R. Geyer, J. R. Jambeck, and K. L. Law, "Production, use, and fate of all plastics ever made," *Sci. Adv.*, vol. 3, no. 7, p. e1700782, 2017, doi: [10.1126/sciadv.1700782](https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782).
- [5] I. Quaye, O. Amponsah, G. A. Azunre, S. A. Takyi, and I. Braimah, "A review of experimental informal urbanism initiatives and their implications for sub-Saharan Africa's sustainable cities' agenda," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 83, p. 103938, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103938>.
- [6] 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).
- [7] 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.job.2020.101506](https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101506).
- [8] 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.constrbuildmat.2020.118859](https://doi.org/10.1016/j.constrbuildmat.2020.118859).

10.1016/j.conbuildmat.2020.118350.

- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] S. O. Afolabi, B. I. Oladapo, C. O. Ijagbemi, A. O. M. Adeoye, and J. F. Kayode, "Design and finite element analysis of a fatigue life prediction for safe and economical machine shaft," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 8, no. 1, pp. 105–111, 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2017.10.007.
- [13] L. Li, T. Yu, B. Shang, B. Song, and Y. Chen, "Analysis of Contact Stress and Fatigue Crack Growth of Transmission Shaft," *J. Fail. Anal. Prev.*, vol. 23, no. 1, pp. 465–483, 2023, doi: 10.1007/s11668-023-01592-0.
- [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.
- [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.
- [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.
- [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] D. P. Singh, J. Joshi, N. Gariya, R. P. Verma, and C. Kishore, "Advance Fatigue Analysis of an Auto Rickshaw Rear Axle Shaft," in *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2021, pp. 337–344, doi: 10.1007/978-981-33-4684-0_34.
- [19] B. W. Lenggana *et al.*, "Effects of mechanical vibration on designed steel-based plate geometries: Behavioral estimation subjected to applied material classes using finite-element method," *Curved Layer. Struct.*, vol. 8, no. 1, pp. 225–240, 2021, doi: 10.1515/cls-2021-0021.
- [20] M. Wu, J. Mu, L. Zhuang, Y. Kong, and X. Zhou, "Fatigue analysis of injector body based on ANSYS workbench," in *Vibroengineering Procedia*, 2020, vol. 30, pp. 193–198, doi: 10.21595/vp.2019.21183.
- [21] A. Vasu, J. Mei, J. Chung, and Y. Mehta, "Using Weibull distribution function to determine the design bounds for carburized 4320 steel shafts subjected to bending dominated fatigue loading," *Int. J. Fatigue*, vol. 168, 2023, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2022.107447.
- [22] O. Bokůvka, M. Jambor, S. Hrček, J. Šteinger, F. Nový, and L. Trško, "Design of shaft respecting the fatigue limit for ultra-high number of cycles," *Period. Polytech. Transp. Eng.*, vol. 47, no. 1, pp. 6–12, 2019, doi: 10.3311/PPTr.11562.
- [23] K. J. Nisbett and R. G. Budynas, *Shigley's Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill Education, 2014.
- [24] J. Marin, *Mechanical Behavior of Engineering Materials*. Prentice-Hall, 1962.
- [25] L. Suchý and A. Hasse, "Fatigue of Multiaxially Loaded Shaft-Hub Connection Under Different Load Parameters," in *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2021, pp. 473–487, doi: 10.1007/978-981-15-9893-7_34.