

Desarrollo de un accesorio óptico para ensayos de fatiga en plásticos impresos por FFF

María F. Serrano-Muñoz¹, Isa Pereyra², Luis E. Lugo-Uribe¹, Mariamne Dehonor-Gomez¹,
Georgina Montes de Oca-Ramírez¹ y Jan Mayen²
Posgrado CIATEQ A.C.¹, CONAHCYT-Centro de Tecnología Avanzada (CIATEQ)²
Lerma, Edo. Méx.¹; San Luis Potosí, S. L. P.²; México
mafer.serranom@gmail.com, isabel.pereyra@ciateq.mx

Abstract— In the present work, the assembly and automation of an optical microscope featuring Extended Depth of Field (EDF) technology for three-dimensional image reconstruction was developed. The main aim of this research is to study the fracture surfaces of plastic materials, which have been tested on a bending fatigue machine developed in accordance with Newton's Third Law. This approach enables the measurement of changes in stiffness throughout fatigue cycles and facilitates the comparison with fracture surfaces using EDF microscopy. Some of the preliminary results includes the reconstruction of the 3D surfaces produced after fatigue of Fused Filament Fabrication (FFF) plastic samples, serving as a validation for the newly developed optical microscope.

Keyword—Optical microscopy, Materials fatigue analysis, 3D reconstruction

Resumen— En este trabajo, se presenta el ensamble y automatización de un microscopio óptico con tecnología de campo profundo extendido (EDF) para la reconstrucción de imágenes en tres dimensiones, con el objetivo de realizar el estudio de superficies de fractura en materiales plásticos ensayadas en una máquina de fatiga en flexión desarrollada bajo el fundamento de la tercera ley de Newton, lo que permite medir el cambio de rigidez durante ciclos de fatiga y contrastar con superficies de fractura mediante microscopía EDF. Se presentan, reconstrucciones de las superficies de fractura después de ensayos de fatiga en materiales impresos por la tecnología de fabricación de filamento fundido (FFF) como validación del microscopio óptico desarrollado.

Palabras claves—*Microscopía óptica; Análisis de fatiga en materiales; Reconstrucción 3D*

I. INTRODUCCIÓN

En el mundo moderno, la ingeniería de materiales desempeña un papel crucial en el desarrollo y mantenimiento de infraestructuras en sectores tan variados como el civil, automotriz, aeronáutico, de electrodomésticos, médico y energético, entre muchos otros (Mayén et al., n.d.; Rahman et al., 2023). La existencia del mundo actual es inconcebible sin el amplio desarrollo de materiales altamente especializados. Por lo tanto, es indispensable asegurar la fiabilidad y durabilidad de estos materiales, un requisito que nos lleva al estudio vital de la fatiga de materiales (Abúndez-Pliego et al., 2022; Tan et al., 2020).

De acuerdo a (Sakai, 2023; Schijve, 2003; Schütz, 1996), la fatiga de materiales hace referencia al fenómeno donde los materiales experimentan un debilitamiento debido a cargas repetidas, lo que puede llevar a fallos inesperados y potencialmente catastróficos. Este campo de estudio, que comenzó enfocándose en metales debido a su uso extensivo en aplicaciones estructurales, ha ampliado su alcance para incluir plásticos y otros compuestos, esenciales en la industria contemporánea por su ligereza y resistencia de acuerdo con (Mayén et al., 2022).

En este contexto, la microscopía óptica ha adquirido un papel significativo. Permitiendo la observación detallada de microestructuras y la evolución de grietas, esta técnica aporta una comprensión detallada de los mecanismos de fatiga. La implementación de técnicas avanzadas de acuerdo con (Botcherby et al., 2008) como el "Campo de Profundidad Extendido" (Extended Depth of Field, EDF por sus siglas en

inglés) ha revolucionado este análisis, posibilitando la reconstrucción tridimensional de las imágenes y proporcionando una visión más integral de los efectos de la fatiga en los materiales.

Este artículo también resalta cómo la disponibilidad de software de libre acceso y herramientas económicas para el análisis de imágenes está democratizando el acceso a tecnologías avanzadas en la investigación de materiales como menciona (Powell, 2012). Estas herramientas no solo hacen la investigación más accesible económicamente, sino que también promueven una mayor colaboración y el intercambio de conocimientos en la comunidad científica. En este estudio, se exponen avances en el desarrollo de un microscopio óptico de bajo costo y se presentan los resultados de las reconstrucciones tridimensionales realizadas en la investigación de la fatiga de materiales, enfocándose específicamente en plásticos impresos mediante la tecnología de Fabricación de Filamento Fundido (Fused Filament Fabrication, FFF) de acuerdo con (Mayén et al., 2022).

II. METODOLOGÍA

Este proyecto de investigación abarca el diseño y la fabricación de un microscopio óptico económico, así como el análisis preliminar de materiales plásticos producidos mediante la tecnología de Fabricación de Filamento Fundido (FFF) de acuerdo con (Mayén et al., 2022). En las siguientes subsecciones, se detalla cada uno de estos componentes. La motivación para desarrollar un microscopio óptico propio y emplear software libre surge de la necesidad de hacer la investigación en fatiga de materiales más accesible, especialmente en contextos donde los recursos económicos son limitados. Este enfoque no solo beneficia el estudio actual, sino que también abre la puerta a estudiantes y profesores en otras instituciones para replicar y aplicar estas técnicas en sus propios proyectos de investigación.

La utilización de un microscopio óptico de bajo costo, complementado con el software libre ImageJ como en aplicaciones similares descritas por (Schroeder et al., 2021) y las herramientas de Campo de Profundidad Extendido (EDF) estudiadas por (Botcherby et al., 2008), permite no solo observar sino también reconstruir tridimensionalmente la morfología de grietas y fracturas, proporcionando una visión integral del comportamiento de los materiales bajo fatiga. Este enfoque práctico y económico demuestra que es posible realizar investigaciones de alta calidad en el campo de la fatiga de materiales sin grandes inversiones en equipos especializados. Al democratizar el acceso a estas tecnologías y métodos, se promueve una mayor inclusión y difusión del conocimiento científico, potenciando el desarrollo de habilidades y la innovación en comunidades académicas con recursos limitados.

Diseño mecánico y funcionalidad

Para el diseño mecánico del microscopio, se utilizaron perfiles de aluminio de 30 mm cuadrados, y el modelado se realizó con el software Fusion 360. La estructura principal y los soportes para montaje de muestras se fabricaron en su mayoría mediante impresión 3D, empleando polímero PLA. El ajuste en el eje Z se logra mediante un motor NEMA de baja velocidad, acoplado a un tornillo sin fin, proporcionando un control preciso del movimiento vertical. Este motor se controla mediante un pequeño controlador con display, adquirido junto con el motor, para una operación eficiente y detallada.

En el aspecto óptico, se incorporó un arreglo de lentes Barlow, con capacidades de ampliación de 20 a 900x. La integración de una cámara de 51 megapíxeles en el sistema permite la captura de imágenes de alta resolución, crucial para un análisis microestructural exhaustivo. La configuración específica del diseño mecánico, incluyendo la disposición del sistema de lentes y la cámara, se expone en la figura 1a y en la figura 1b se muestra ensamble con cubierta.

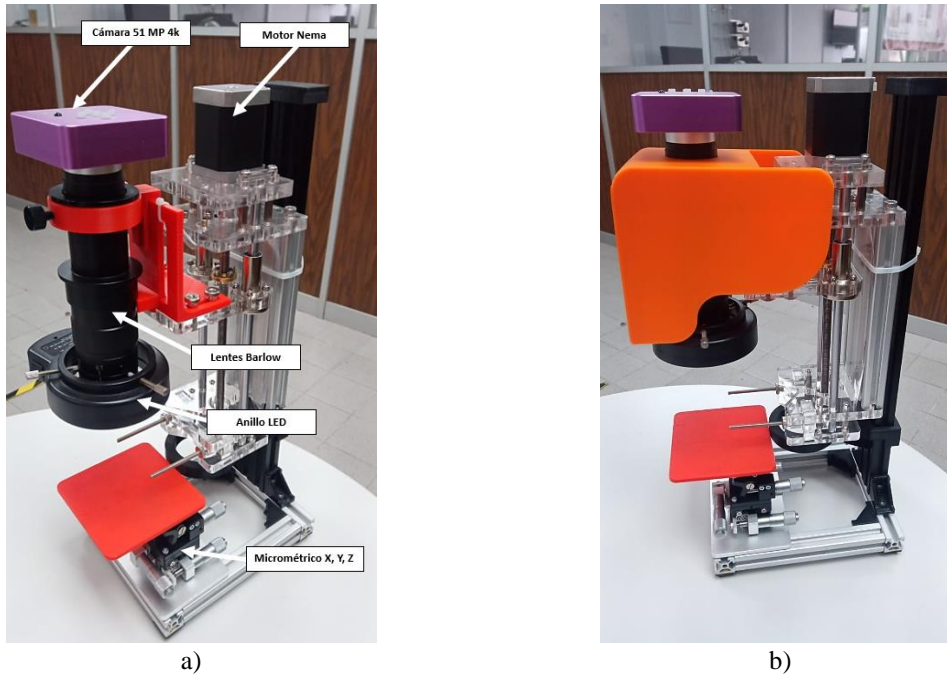


Fig. 1. Ensamble y componentes del microscopio óptico

Además, se añadió un sistema de iluminación optimizado para la captura de imágenes de calidad. El procesamiento de las imágenes se realiza a través del software ImageJ, utilizando herramientas EDF para la reconstrucción tridimensional y el análisis detallado de la morfología de grietas y fracturas en los materiales. Este enfoque, que combina tecnología de impresión 3D y software libre, demuestra la posibilidad de desarrollar equipos de investigación funcionales y económicos, sin sacrificar la calidad y precisión del análisis.

Uso de software libre

En este proyecto, se utilizó un enfoque combinado de software gratuito y libre para la captura y análisis detallado de imágenes. Para la captura, se empleó un software gratuito proporcionado con la cámara de 51 megapíxeles (ver figura 2). Aunque no es de código abierto, este software permite un control adecuado de los parámetros de la cámara y facilita la adquisición de imágenes de alta resolución.

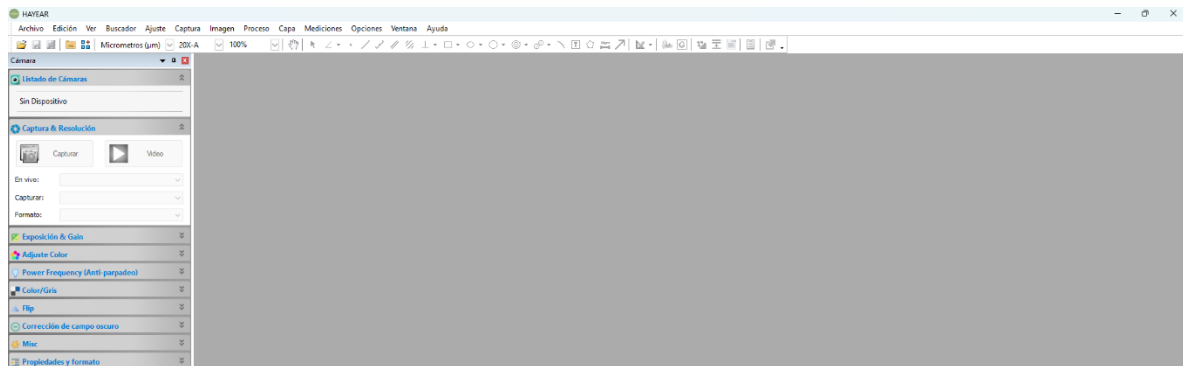


Fig. 2. Interfaz del software gratuito de la cámara de (Microscope Drivers-Shenzhen Hayear Electronics Co, Ltd., 2023).

Durante la captura de imágenes, se tomó una serie de fotografías por muestra a diferentes niveles de enfoque, desde un punto Z mínimo hasta un Z máximo. Este proceso permite capturar con detalle la topografía de la superficie de la muestra en varios planos de enfoque. Posteriormente, estas imágenes se procesaron utilizando el software libre ImageJ (Schroeder et al., 2021), aplicando la técnica de Campo de Profundidad Extendido (EDF). Esta técnica permite combinar las imágenes tomadas en diferentes enfoques para generar una única imagen bidimensional completamente enfocada (ver figura 3). Además, se utiliza para crear una reconstrucción tridimensional de la muestra, proporcionando una visualización detallada de la morfología de grietas y fracturas. Finalmente, el uso de estas técnicas subraya la efectividad de combinar software gratuito y libre en la investigación científica.

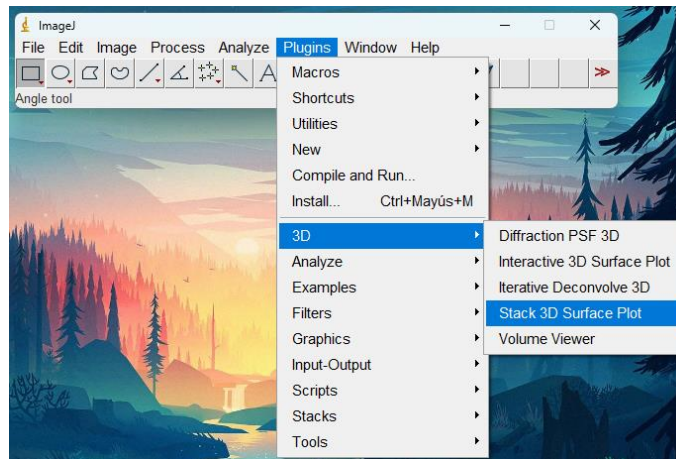


Fig. 3. Interfaz de ImageJ para la combinación de las imágenes de (ImageJ, 2023).

III. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados preliminares usando el microscopio desarrollado para el estudio de las superficies de fractura en los materiales poliméricos impresos por FFF.

Utilizando el microscopio óptico diseñado específicamente para este estudio, se efectuaron observaciones meticulosas de las superficies de las muestras de PLA sometidas a ensayos de fatiga. La técnica empleada para la captura de imágenes abarcó una serie de enfoques, desde un punto Z mínimo hasta un Z máximo, lo cual fue esencial para realizar un análisis profundo tanto de las características superficiales como de la progresión de las grietas en el material.

El procesamiento de estas imágenes mediante la técnica de Campo de Profundidad Extendido (EDF) en ImageJ generó imágenes bidimensionales con un enfoque integral, descubriendo detalles precisos de las grietas y otras alteraciones en las muestras de PLA. Además, la reconstrucción tridimensional de las zonas sometidas a fatiga brindó una visión más detallada y completa de los patrones de fractura y la magnitud del daño en el material.

A continuación, en la figura 4, se presentan las reconstrucciones tridimensionales de las probetas evaluadas, acompañadas de una breve descripción de las condiciones experimentales de cada una. Sin embargo, se evita profundizar en detalles específicos, ya que el propósito principal de este artículo es demostrar la factibilidad y eficacia del microscopio desarrollado para la caracterización de materiales mediante EDF.

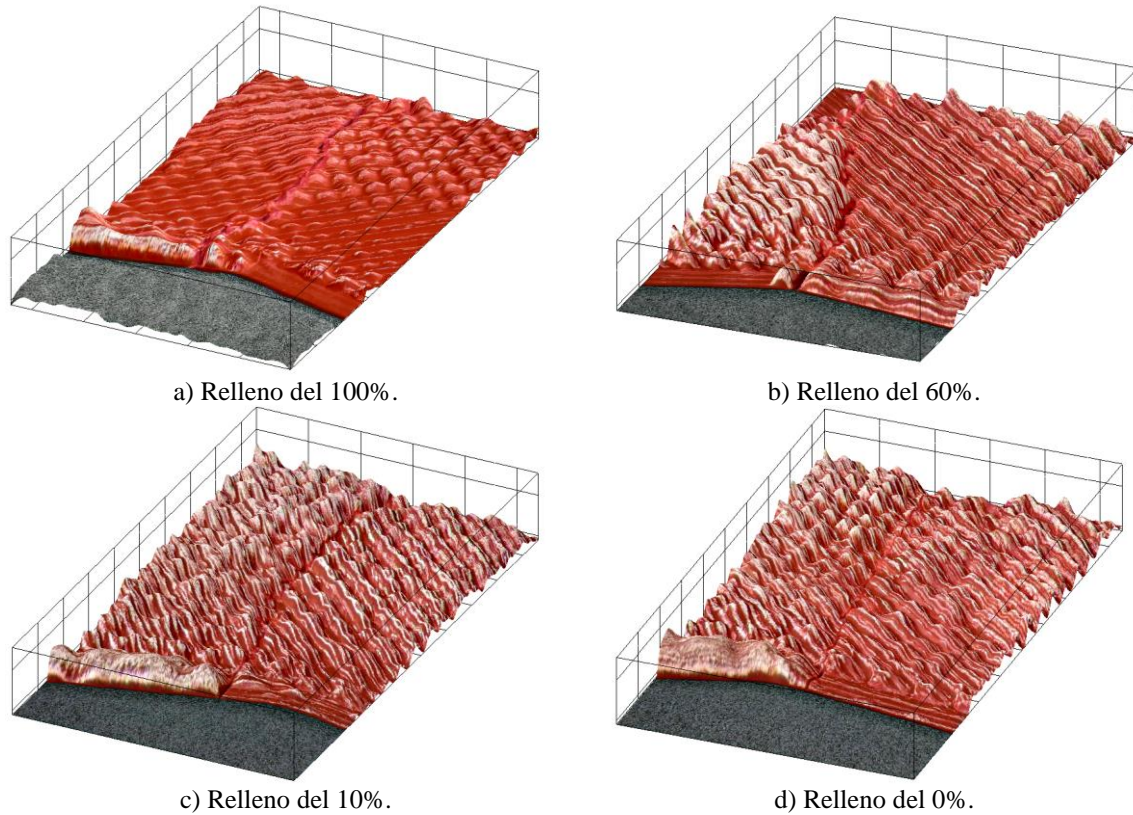


Fig. 4. Reconstrucciones 3D por el método EDF.

En las figuras tridimensionales, se puede observar que todavía falta trabajo por hacer en el procesamiento de las imágenes y en la calidad de la iluminación, esto debido a que los reflejos de la iluminación claramente introducen un error en la reconstrucción de topografías en 3D.

Finalmente, a continuación, se muestra mediante el software Lychee slicer de (*Home - Mango 3D*, 2023) la interpretación de lo que quieren decir los porcentajes de relleno para cada una de las probetas estudiadas y que tienen influencia en la durabilidad del material y su comportamiento a la fatiga, únicamente se omite el 0%, ya que esto indica que la probeta es completamente hueca (ver figura 5).

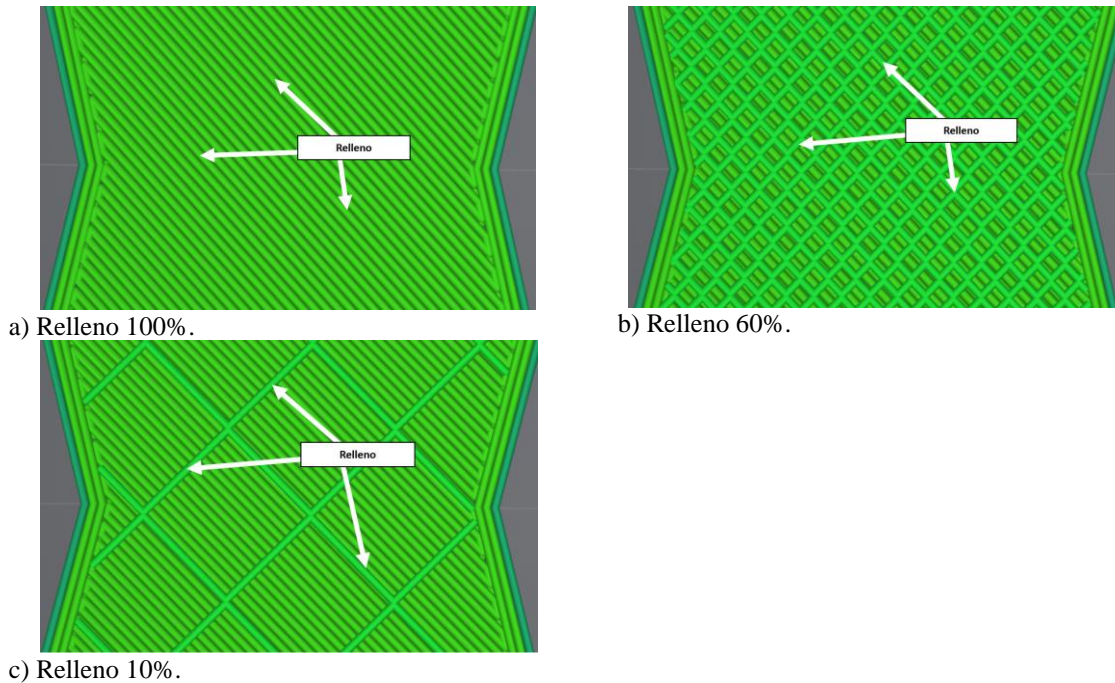


Fig. 5. Visualización de los diferentes porcentajes de relleno.

IV. CONCLUSIONES

A partir de los datos recolectados en este estudio, se pueden destacar conclusiones importantes, enfocándose en dos áreas principales: el diseño y fabricación del microscopio óptico económico y los resultados obtenidos del uso de software gratuito y de acceso libre para la caracterización de materiales.

Diseño y fabricación

La implementación de componentes mecánicos y electrónicos de bajo costo en la construcción del microscopio ha demostrado ser eficaz para el monitoreo detallado de las muestras de PLA bajo condiciones de fatiga.

Este equipo, accesible y económico, representa una oportunidad valiosa para investigadores y estudiantes en todo el mundo, promoviendo la creación de equipos propios para investigación y educación, y ampliando el entendimiento del fenómeno de fatiga en plásticos.

Uso de software gratuito y de acceso libre

El empleo de software gratuito para la captura de imágenes y de ImageJ, un software de acceso libre para su análisis ha probado ser una estrategia efectiva en la caracterización de fatiga de materiales.

La técnica de Campo de Profundidad Extendido (EDF) aplicada en ImageJ ha permitido realizar reconstrucciones tridimensionales detalladas y obtener imágenes bidimensionales completamente enfocadas, revelando aspectos críticos en la evolución de las grietas y la degradación del material.

Este enfoque ha demostrado que el uso de herramientas accesibles y abiertas puede ofrecer resultados comparables a los obtenidos con software comercial, democratizando así la investigación en fatiga de materiales.

Recomendaciones para trabajos futuros

Futuras investigaciones podrían enfocarse en cómo diferentes configuraciones de impresión 3D y variaciones en los materiales influyen en la respuesta a la fatiga, aprovechando la configuración actual del microscopio y las técnicas de análisis de imágenes.

REFERENCIAS

- Abúndez-Pliego, A., Oliveros-Riego, O. F., Huegel, J. C., Alcudia-Zacarías, E., Arellano-Cabrera, J. A., & Mayén, J. (2022). A model for the estimation of CFRP damage accumulation based on the laminate design variables. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. <https://doi.org/10.1080/15376494.2022.2079032>
- Botcherby, E. J., Booth, M. J., Juškaitis, R., & Wilson, T. (2008). Real-time extended depth of field microscopy. *Optics Express*. <https://doi.org/10.1364/oe.16.021843>
- Home - Mango 3D. (n.d.). Retrieved December 21, 2023, from <https://mango3d.io/>
- ImageJ. (n.d.). Retrieved December 25, 2023, from <https://imagej.net/ij/>
- Mayén, J., Del Carmen Gallegos-Melgar, A., Pereyra, I., Poblano-Salas, C. A., Hernández-Hernández, M., Betancourt-Cantera, J. A., Mercado-Lemus, V. H., & Del Angel Monroy, M. (2022). Descriptive and inferential study of hardness, fatigue life, and crack propagation on PLA 3D-printed parts. *Materials Today Communications*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103948>
- Mayén, J., Melgar, A. D. C. G., Pereyra, I., Hernández, M., & Hernández, C. A. (n.d.). Efecto del diseño de tramado en la dureza de materiales impresos mediante impresión 3D. *TECNOLOGÍA AS DISRUPTIVAS Y SU IMPACTO EN LA VIDA SOCIAL Y*.
- Microscope Drivers-Shenzhen Hayear Electronics Co, Ltd. (n.d.). Retrieved December 25, 2023, from <https://www.hayear.com/?list/14>
- Powell, A. (2012). Democratizing production through open source knowledge: from open software to open hardware. *Http://Dx.Doi.Org/10.1177/0163443712449497*, 34(6), 691–708. <https://doi.org/10.1177/0163443712449497>
- Rahman, M. Z., Rahman, M., Mahbub, T., Ashiquzzaman, M., Sagadevan, S., & Hoque, M. E. (2023). Advanced biopolymers for automobile and aviation engineering applications. *Journal of Polymer Research*, 30(3), 106.
- Sakai, T. (2023). Historical review and future prospect for researches on very high cycle fatigue of metallic materials. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 46(4), 1217–1255.
- Schijve, J. (2003). Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art. *International Journal of Fatigue*, 25(8), 679–702.
- Schroeder, A. B., Dobson, E. T. A., Rueden, C. T., Tomancak, P., Jug, F., & Eliceiri, K. W. (2021). The ImageJ ecosystem: Open-source software for image visualization, processing, and analysis. *Protein Science*, 30(1), 234–249. <https://doi.org/10.1002/PRO.3993>
- Schütz, W. (1996). A history of fatigue. *Engineering Fracture Mechanics*, 54(2), 263–300.
- Tan, L. J., Zhu, W., & Zhou, K. (2020). Recent progress on polymer materials for additive manufacturing. *Advanced Functional Materials*, 30(43), 2003062.