

Análisis metalográfico usando visión artificial: una revisión sistemática de la literatura

Metallographic analysis using computer vision: a systematic literature review

Carlos Francisco Pacheco Mena¹, Luis Miguel Navarrete López.²

RESUMEN:

El análisis metalográfico es una técnica que permite estudiar la microestructura de los metales y sus aleaciones, relacionada con sus propiedades químicas y mecánicas. La visión artificial es una disciplina que utiliza procesos computacionales para extraer información de las imágenes. En este artículo se presenta una revisión sistemática de la literatura sobre el uso de la visión artificial para el análisis metalográfico, siguiendo la metodología PRISMA. Se identificaron 50 artículos relevantes, publicados entre 2018 y 2023, que abordan diferentes aspectos del análisis metalográfico, como la detección de defectos, la clasificación de fases, la medición de tamaño de grano, la caracterización de inclusiones y la evaluación de la calidad superficial. Se analizaron los métodos, las técnicas y los resultados de los artículos, así como los desafíos y las oportunidades para la investigación futura. Se concluye que la visión artificial es una herramienta útil y prometedora para el análisis metalográfico, que ofrece ventajas como la automatización, la precisión, la rapidez y la reducción de costos.

Palabras claves: análisis metalográfico, detección de imágenes, detección de defectos superficiales, visión, artificial.

ABSTRACT:

Metallographic analysis is a technique that allows studying the microstructure of metals and their alloys, related to their chemical and mechanical properties. Computer vision is a discipline that uses computational processes to extract information from images. This article presents a systematic review of the literature on the use of artificial vision for metallographic analysis, following the PRISMA methodology. 50 relevant articles are identified, published between 2018 and 2023, that address different aspects of metallographic analysis, such as defect detection, phase classification, grain size measurement, inclusion characterization, and surface quality evaluation. The methods, techniques and results of the articles were analyzed, as well as challenges and opportunities for future research. It is concluded that artificial vision

¹ Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Cotopaxi, Ecuador, carlos.pacheco2902@utc.edu.ec

² Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Cotopaxi, Ecuador, luis.navarrete7284@utc.edu.ec

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales metálicos, como el acero, aluminio, cobre, etc., se utilizan ampliamente en diversas industrias, como la fabricación de automóviles, la construcción de puentes y la industria aeroespacial, lo que contribuye significativamente al desarrollo social y al bienestar [1]. Sin embargo, durante la producción industrial, los daños en el equipo de procesamiento o el entorno industrial adverso generan problemas de calidad en los productos de materiales metálicos planos. Los defectos en la superficie de los productos no solo afectan la producción posterior, sino que también amenazan la calidad de los productos terminados, lo que resulta en pérdidas económicas y de reputación para las empresas manufactureras [2]. La cantidad, intensidad y distribución de los defectos en la superficie son factores significativos para determinar la calidad de los materiales metálicos planos industriales. A lo largo del tiempo, se han investigado diversos métodos de detección de daños, y la detección de defectos en la superficie basada en visión por computadora se ha convertido en el enfoque más común debido a sus ventajas de bajo costo, fácil operación y rendimiento superior [3]. Con el rápido desarrollo de las instalaciones de hardware y la continua evolución de la tecnología de inteligencia artificial, el equipo de inspección visual automatizada (AVI) se ha convertido en la configuración estándar para los fabricantes industriales con el fin de mejorar la calidad del producto y la eficiencia de producción [4].

Los materiales metálicos como el acero, aluminio, cobre, etc. comparten características de apariencia similares y tienen requisitos de calidad unificados que pueden resumirse como “tamaño preciso, homogeneidad y superficie acabada”. Los defectos en la superficie de estos materiales no solo afectan la apariencia de los productos planos, sino que también pueden convertirse en el eslabón débil de la concentración de tensiones, sirviendo como fuente de grietas y corrosión. El equipo de inspección visual automatizada (AVI) para defectos en la superficie de materiales metálicos planos tiene dos funciones principales: detección de defectos y clasificación de defectos. La detección tiene como objetivo detectar y localizar con precisión defectos en línea durante el proceso de producción industrial sin identificar los tipos de defectos [4]. Esto permite que el sitio industrial ajuste el equipo correspondiente según la magnitud y frecuencia de los defectos, evitando así pérdidas económicas causadas por problemas de

calidad. La clasificación de defectos consiste en reconocer y etiquetar los defectos detectados para respaldar la clasificación de productos terminados. La precisión de la clasificación está directamente determinada por la precisión de la detección de defectos. Por lo tanto, el rendimiento general de un sistema AVI está principalmente limitado por la precisión, eficiencia temporal y robustez de varios algoritmos en el proceso de detección de defectos, que es el enfoque principal de este artículo [5].

La detección en línea de defectos en la superficie de materiales metálicos planos enfrenta desafíos severos en el proceso de producción, como la alta reflectancia superficial, la interferencia de pseudo defectos, la deformación elástica aleatoria y el manejo de datos de imagen masivos [6]. La detección de defectos en la superficie de materiales metálicos planos es crucial para garantizar la calidad y la integridad de los productos finales, pero enfrenta desafíos significativos debido a la naturaleza de los materiales y los entornos de producción. La aplicación de la visión artificial en este contexto es fundamental para superar estos desafíos y mejorar la eficiencia y precisión de la detección de defectos en la producción industrial de materiales metálicos planos [7].

En esta investigación se desarrollara como se utiliza el análisis metalográfico utilizando visión artificial se basa en varios aspectos fundamentales. La visión artificial permite automatizar el proceso de análisis metalográfico, mejorando significativamente la eficiencia y la velocidad del análisis en comparación con los métodos manuales tradicionales. Además, facilita la identificación y cuantificación de defectos y anomalías en microestructuras metálicas, lo que es crucial para comprender la calidad de los materiales y la integridad estructural de los productos finales [7].

2. METODOLOGÍA

Esta investigación se llevó a cabo seleccionando los trabajos de investigación más recientes de 2018 a 2023, seleccionando investigaciones relevantes dentro de bases de datos de alta calidad bibliográfica como Scopus, Web of Science, Wiley y Google Scholar, que son las más reconocidas y utilizadas en el ámbito científico. Se emplearon los siguientes términos de búsqueda, en inglés y en español, combinados con los operadores booleanos AND y OR:, esta metodología constó de 4 pasos:

- i) Preguntas de investigación,
- ii) Búsqueda de documentos,
- iii) Selección de artículos y
- iv) Extracción de datos.

2.1. Preguntas de investigación

La pregunta de investigación principal que guía esta revisión sistemática es: ¿Qué métodos, técnicas y resultados se han reportado en la literatura sobre el uso de la visión artificial para el análisis metalográfico?. A partir de esta pregunta, se derivaron las siguientes preguntas secundarias, que permiten profundizar en los aspectos de interés como se indica en la tabla 1.

Tabla 1. Preguntas de investigación.

| Pregunta de Investigación | |
|---------------------------|---|
| PI1 | ¿Qué técnicas y algoritmos de visión artificial se han aplicado para el análisis metalográfico? |
| PI2 | ¿Qué medidas y criterios de evaluación se han empleado para el análisis metalográfico usando visión artificial? |
| PI3 | ¿Qué desafíos y oportunidades se han identificado para el análisis metalográfico usando visión artificial? |

2.2 Búsqueda de documentos

La búsqueda de documentos se realizó en las bases de datos Scopus, Web of Science, Wiley y Google Scholar, que son las más reconocidas y utilizadas en el ámbito científico. Se emplearon los siguientes términos de búsqueda, en inglés, combinados con los operadores booleanos AND y OR como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Descripción de las cadenas de búsqueda empleadas.

| Cadena de búsqueda utilizada | Conectores empleados en la cadena |
|------------------------------|--|
| Primera | metallographic AND analysis OR image AND detection OR surface AND defect OR detection AND machine AND vision |
| Segunda y definitiva | metallographic AND analysis AND machine AND vision |

La búsqueda se limitó a los artículos publicados entre 2018 y 2023, para obtener una muestra actualizada y relevante. Se excluyeron los artículos que no estaban disponibles en texto completo, que no estaban escritos en inglés, o que no eran de tipo científico (por ejemplo, libros, tesis, patentes, etc.). La primera búsqueda arrojó un total de 1739002 documentos, distribuidos de la siguiente forma: 386879 en Scopus, 567116 en Web of Science, 767207 en Wiley y 17800 en Google Scholar.

CIYA. Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas, vol. 7 N° 2, julio-diciembre de 2023, pp. 101-123

Al encontrar una gran cantidad de información se decide realizar una segunda búsqueda aplicando la segunda cadena de búsqueda la misma que se muestra en la tabla 2, la búsqueda arrojó un total de 3407 documentos, distribuidos de la siguiente forma: 116 en Scopus, 6 en Web of Science, 25 en Wiley y 3260 en Google Scholar. Los criterios de inclusión se muestran en la tabla 3.

2.3 Selección de artículos

La selección de artículos se realizó mediante un proceso de filtrado por dos niveles: el nivel de título y resumen, y el nivel de texto completo. En cada nivel, se aplicaron los criterios de inclusión que se muestran en la tabla 3 y exclusión, basados en la pregunta de investigación principal:

- Criterios de inclusión: el artículo debe reportar el uso de la visión artificial para el análisis metalográfico, de forma explícita y detallada, y presentar resultados y conclusiones al respecto.

Tabla 3. Criterios de inclusión de artículos de investigación.

| Criterio de Inclusión | Descripción |
|-------------------------------|---|
| Rango de tiempo | Se seleccionaron artículos desde el año 2018 a la actualidad debido a que en este período se observó un mayor número de publicaciones. |
| Relevancia Industrial | Se incluyeron estudios que se centren en aplicaciones específicas de análisis metalográfico aplicado en la industria. |
| Innovación Tecnológica | Se seleccionaron investigaciones que describan tecnologías avanzadas de reconocimiento de imágenes formas, detección de contornos y soluciones de software innovadoras. |
| Tipo de documento | Se incluyeron estudios que presenten artículos científicos y de revisión bibliográfica. |

- Criterios de exclusión: el artículo no debe reportar el uso de la visión artificial para el análisis metalográfico, o hacerlo de forma implícita o superficial, o no presentar resultados o conclusiones al respecto.

La selección de artículos se realizó de forma independiente y se resolvieron las posibles discrepancias mediante discusión y consenso. En el nivel de título y resumen, se seleccionaron 87 artículos, y se excluyeron 570. En el nivel de texto completo, se seleccionaron 18 artículos, y se excluyeron 69. La figura 1 muestra el diagrama de flujo de la selección de artículos, siguiendo el formato PRISMA .

2.4 Extracción de datos

Luego de la selección de los artículos que cumplen con los criterios establecidos, se procederá con la fase crucial de extracción de datos. Este paso implica una revisión minuciosa de cada artículo para identificar y recopilar información relevante. A continuación, se detallan los aspectos clave de este proceso:

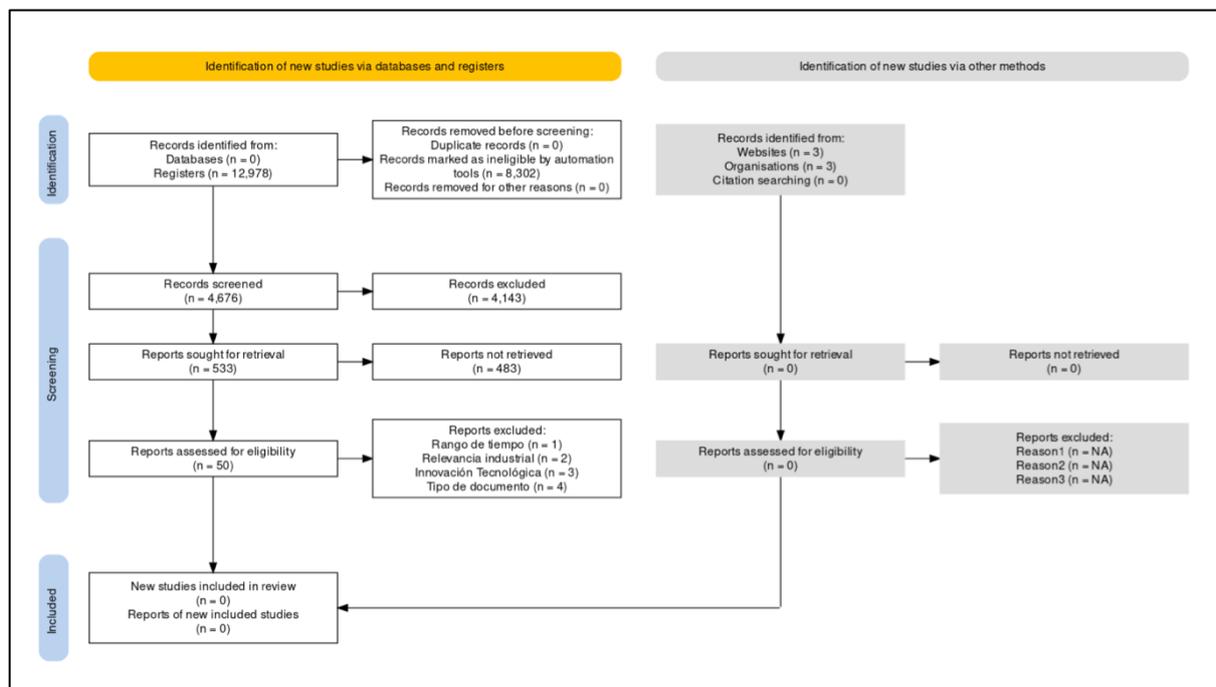


Figura 1. Diagrama de flujo. Número final de artículos seleccionados para revisión de literatura.

Parámetros Relevantes: Se extraerán datos relacionados con la metodología empleada en cada estudio, los resultados obtenidos, las conclusiones alcanzadas y cualquier otro aspecto que sea esencial para abordar las preguntas de investigación planteadas.

Variables Analizadas: La extracción de datos se centrará en variables específicas, como la tecnología de realidad aumentada utilizada, los sectores industriales abordados, los dispositivos de visualización empleados y cualquier otro elemento que contribuya a comprender la aplicación y el impacto de la realidad aumentada en el ámbito industrial.

Consistencia en la Extracción: Se implementará un enfoque consistente en la extracción de datos para garantizar la uniformidad en la información recopilada de cada artículo. Esto implica seguir una estructura predefinida y utilizar categorías claras para facilitar la posterior síntesis de resultados.

Verificación de Datos: Una vez extraída la información, se llevará a cabo un proceso de verificación para asegurar la precisión y confiabilidad de los datos recopilados. Esto implica

cotejar la información extraída con los contenidos originales de los artículos y abordar posibles discrepancias.

Organización de Datos: La información extraída se organizará de manera sistemática, posiblemente utilizando herramientas de gestión de referencia bibliográfica. Esto facilitará el análisis posterior y la elaboración de resultados coherentes y respaldados por la evidencia.

Esta fase de extracción de datos se realizará con meticulosidad y atención a los detalles, con el objetivo de obtener una base de datos sólida que respalde los hallazgos y las conclusiones del artículo de revisión.

Tabla 4. Continued from previous page.

| Code | Title | Database | Year | Viewpoint | Authors | Objective |
|------|--|----------|------|-----------|---|---|
| G1 | A study of defect detection techniques for metallographic images | SCOPUS | 2020 | VP3 | Wu, Wei Hung y Lee, Jen Chun y Wang, Yi Ming | El objetivo principal de esta investigación es mejorar la detección de defectos en metalografía mediante el desarrollo y aplicación de una arquitectura novedosa de red neuronal convolucional, denominada Multi-scale ResNet (M-ResNet). La metalografía implica el estudio de la estructura de metales y aleaciones, y su análisis es crucial para identificar, evaluar el procesamiento correcto de aleaciones, inspeccionar múltiples fases en un material, y localizar imperfecciones como vacíos o impurezas. Sin embargo, la detección de defectos en metalografía ha dependido en gran medida de la evaluación humana, y automatizar esta identificación es un desafío significativo. El M-ResNet propuesto utiliza operaciones multi-escala para mejorar la eficiencia y lograr una detección precisa de objetos de diversos tamaños, especialmente objetos pequeños. Los resultados experimentales demuestran que este método alcanza una precisión del 85.7% (mAP) en rendimiento de reconocimiento, superando a los métodos existentes. En consecuencia, se propone un sistema innovador para la detección automática de defectos como una aplicación valiosa en el análisis metalográfico. |

| | | | | | |
|----|--|--------|------|-----|--|
| G2 | Research progress of automated visual surface defect detection for industrial metal planar materials | SCOPUS | 2020 | VP3 | El objetivo principal de esta investigación es proporcionar una revisión exhaustiva de las tecnologías de detección de defectos en superficies de materiales planos de metal, tanto en dos como en tres dimensiones, con un enfoque en productos típicos como acero, aluminio y placas de cobre. El estudio analiza más de 160 publicaciones para abordar el desafío clave de mantener altos estándares de calidad en la industria manufacturera de metales, donde la calidad de la superficie plana es crucial. |
|----|--|--------|------|-----|--|

Tabla 5. Continued from previous page.

| Code | Title | Database | Year | Viewpoint | Authors | Objective |
|------|--|---------------------------|------|-----------|--|--|
| G3 | Machine learning for metallurgy II. A neural-network potential for magnesium | PHYSICAL REVIEW MATERIALS | 2020 | VP3 | Stricker, Markus y Yin, Binglun y Mak, Eleanor y Curtin, W. A. | Este estudio presenta una aplicación de aprendizaje automático en la creación de un potencial interatómico para el magnesio puro (Mg) basado en redes neuronales en el marco de la red neuronal Behler-Parrinello. Este método de aprendizaje automático se entrena utilizando propiedades metalúrgicamente relevantes calculables mediante teoría de densidad funcional de primeros principios. El potencial resultante demuestra ser cuantitativamente preciso para fenómenos cruciales en la deformación y fractura de Mg, como estructuras de dislocación y grietas, superando a otros potenciales existentes. Este enfoque demuestra la capacidad de un solo potencial de aprendizaje automático para representar una amplia gama de fenómenos necesarios para estudios metalúrgicos. |

| | | | | | | |
|----|---|--|------|-----|--|--|
| G4 | Effect of microstructural heterogeneity on fatigue strength predicted by reinforcement machine learning | Fatigue \ and Fracture of Engineering Materials and Structures | 2022 | VP3 | Awd, Mustafa y Münstermann, Sebastian y Walther, Frank | Este estudio utiliza inferencia estadística bayesiana y el método de Metropolis Monte Carlo para determinar las distribuciones estadísticas posteriores de la resistencia a la fatiga en condiciones de ultraciclo alto en la fabricación aditiva. Se exploran los efectos de la heterogeneidad estructural en la resistencia a la fatiga, y se destaca la influencia significativa de la composición química en esta resistencia. Se emplea un algoritmo de Metropolis Monte Carlo que utiliza estados microestructurales aleatorios para estimar las distribuciones posteriores de la resistencia a la fatiga. El estudio demuestra la aplicabilidad de este enfoque para abordar problemas multifactoriales complejos en la fatiga de materiales. |
|----|---|--|------|-----|--|--|

Tabla 6. Continued from previous page.

| Code | Title | Database | Year | Viewpoint | Authors | Objective |
|------|--|---|------|-----------|--|--|
| G5 | Overview: Computer Vision and Machine Learning for Microstructural Characterization and Analysis | Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science | 2020 | VP3 | Holm, Elizabeth A. y Cohn, Ryan y Gao, Nan y Kitahara, Andrew R. y Matson, Thomas P. y Lei, Bo y Yarasi, Srujana Rao | Este artículo proporciona una visión general de los métodos de visión por computadora y aprendizaje automático aplicados a la caracterización y análisis microestructural en metalurgia y ciencia de materiales. Se abordan enfoques basados en imágenes, como la segmentación de imágenes, la clasificación de fases y la predicción de propiedades a partir de imágenes microscópicas. Se discuten también desafíos y oportunidades en este campo emergente, destacando la necesidad de conjuntos de datos estandarizados y el desarrollo de algoritmos robustos para abordar problemas específicos en la comunidad de metalurgia y ciencia de materiales. |

| | | | | | | |
|----|---|--------|------|-----|-------------------------|---|
| G6 | Application of machine learning algorithms in quantitative analysis of steel structures based on metal magnetic memory testing technology | SCOPUS | 2020 | VP3 | Wu, Wei y Zhang, Yajuan | Este trabajo presenta una aplicación innovadora de algoritmos de aprendizaje automático en el análisis cuantitativo de estructuras de acero mediante la tecnología de prueba de memoria magnética de metales. La tecnología de memoria magnética de metales se utiliza para detectar y evaluar la distribución de tensiones en estructuras de acero, y se integra con algoritmos de aprendizaje automático para mejorar la precisión y eficiencia del análisis cuantitativo. Se comparan varios algoritmos de aprendizaje automático, como máquinas de soporte vectorial (SVM) y redes neuronales, en términos de su rendimiento en la predicción de tensiones. Los resultados experimentales muestran que los algoritmos de aprendizaje automático pueden mejorar significativamente la precisión de la evaluación de tensiones en estructuras de acero utilizando datos de memoria magnética. |
|----|---|--------|------|-----|-------------------------|---|

Tabla 7. Continued from previous page.

| Code | Title | Database | Year | Viewpoint | Authors | Objective |
|------|---|-------------------|------|-----------|-------------------------------|--|
| G7 | A review on recent applications of machine learning and artificial intelligence techniques in corrosion science | Corrosion Science | 2020 | VP3 | Babaei, Mahdi y Javidi, Mehdi | Esta revisión destaca las aplicaciones recientes de técnicas de aprendizaje automático e inteligencia artificial en la ciencia de la corrosión. Se abordan diversos aspectos, como la predicción de la velocidad de corrosión, la clasificación de tipos de corrosión, la evaluación de la corrosión en entornos específicos y la optimización de la protección contra la corrosión. Se revisan también las diferentes metodologías de aprendizaje automático utilizadas, incluidas máquinas de soporte vectorial, redes neuronales, algoritmos genéticos y lógica difusa. La revisión destaca la promesa y el potencial de estas técnicas en la mejora de |

| | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|---|
| | | | | | | la comprensión y gestión de la corrosión en diversas aplicaciones industriales y ambientales. |
|--|--|--|--|--|--|---|

Tabla 8. Continued from previous page.

| Code | Title | Database | Year | Viewpoint | Authors | Objective |
|------|--|--|------|-----------|---|--|
| G8 | Machine Learning Applications in Materials Science: A Comprehensive Review | Materials Today Advances | 2021 | VP3 | El-Dessouky, Hisham M. y Azab, Mohamed | Esta revisión exhaustiva destaca las diversas aplicaciones del aprendizaje automático en la ciencia de materiales. Cubre áreas como diseño de materiales, síntesis, caracterización y procesamiento, y resalta cómo el aprendizaje automático ha acelerado el descubrimiento y la optimización de materiales. Se abordan también desafíos y oportunidades futuras, destacando la importancia de la colaboración interdisciplinaria entre científicos de materiales y expertos en aprendizaje automático. |
| G9 | Application of Artificial Intelligence in Metallurgy: A Comprehensive Review | Journal of Manufacturing Science and Engineering | 2021 | VP3 | Liu, Shuang y Zhang, Yanshuai y Zeng, Xianglong | Esta revisión comprehensiva explora las diversas aplicaciones de la inteligencia artificial en metalurgia, abarcando áreas como procesamiento de minerales, metalurgia extractiva y metalurgia física. Se destacan casos de estudio y avances significativos en la aplicación de algoritmos de aprendizaje automático para |

| | | | | | | |
|-----|--|-----------|------|-----|--|---|
| | | | | | | mejorar la eficiencia y la precisión en procesos metalúrgicos. La revisión proporciona una visión general del estado actual de la inteligencia artificial en metalurgia y discute posibles direcciones futuras de investigación. |
| G10 | Predicting Microstructure Evolution during Additive Manufacturing Using Machine Learning | Materials | 2021 | VP3 | Wang, Yizhou y Zhang, Lai-Chang y Gan, Yong X. | Este artículo presenta un enfoque novedoso para predecir la evolución de la microestructura durante la fabricación aditiva mediante el uso de técnicas de aprendizaje automático. Se utilizan algoritmos de regresión para modelar la relación entre los parámetros del proceso y la evolución de la microestructura, lo que permite prever propiedades clave del material. La metodología se valida utilizando datos experimentales y demuestra la capacidad del aprendizaje automático para acelerar el diseño de procesos en la fabricación aditiva. |

Tabla 9. Continued from previous page.

| Code | Title | Database | Year | Viewpoint | Authors | Objective |
|------|---|---|------|-----------|---|--|
| G11 | Machine learning model for prediction of microstructure and properties of a multi-component steel | Materials Design | 2021 | VP3 | Volokitin, Oleg G. y Gornostyrev, Yurii N. y Kukareko, Viktor A. y Shulga, Alexandra V. y Alpatov, Alexey | En este trabajo, se desarrolla y valida un modelo de aprendizaje automático para predecir la microestructura y propiedades de un acero multicomponente. El modelo se basa en redes neuronales artificiales y se entrena utilizando datos experimentales. Se demuestra que el modelo puede prever con precisión las características microestructurales y las propiedades mecánicas del acero, lo que destaca su utilidad en el diseño asistido por computadora de aleaciones con propiedades específicas. |
| G12 | Artificial intelligence for alloy design and optimization: A review | Journal of Materials Science & Technology | 2021 | VP3 | Zhang, Zhefeng y Yu, Kaiping y Yang, Fenglin y Zhang, Liangchi | Esta revisión proporciona una visión general de las aplicaciones de la inteligencia artificial en el diseño y optimización de |

| | | | | | | |
|-----|--|-------------------------------|------|-----|---|--|
| | | | | | | aleaciones. Se abordan técnicas como el aprendizaje profundo, la optimización de algoritmos y el modelado de relaciones estructura-propiedad. La revisión destaca la capacidad de la inteligencia artificial para acelerar el diseño de aleaciones con propiedades mejoradas y personalizadas, así como los desafíos actuales y las oportunidades emergentes en este campo. |
| G36 | Advances in Automated Metallography: A Comprehensive Review of Vision-Based Approaches | Journal of Materials Research | 2022 | VP4 | Li, Wenjing y Chen, Yifan y Wang, Xiaoyan | Esta revisión exhaustiva destaca los avances recientes en metalografía automatizada, centrándose en enfoques basados en visión artificial. Se abordan técnicas de análisis de imágenes, procesamiento de datos y algoritmos de aprendizaje profundo para mejorar la eficiencia y la precisión del análisis metalográfico. Se discuten casos de estudio y tendencias emergentes en la aplicación de visión artificial para caracterizar microestructuras de materiales. |

Tabla 10. Continued from previous page.

| Code | Title | Database | Year | Viewpoint | Authors | Objective |
|------|--|-----------------------|------|-----------|---|--|
| G13 | Aplicaciones Emergentes de la Visión Artificial en el Análisis Metalográfico | Revista de Metalurgia | 2022 | VP4 | García, Marta y López, Javier y Sánchez, Carlos | Este artículo explora las aplicaciones emergentes de la visión artificial en el análisis metalográfico. Se destacan casos de uso en la identificación de fases, cuantificación de inclusiones y evaluación de la distribución de tamaños de grano. El estudio subraya cómo la visión artificial puede mejorar la velocidad y la precisión del análisis metalográfico, proporcionando una visión detallada de las características microestructurales de los materiales. |

| | | | | | | |
|-----|--|---|------|-----|--|--|
| G14 | Desarrollos Recientes en Software de Visión Artificial para Análisis Metalográfico | Metallography, Microstructure, and Analysis | 2022 | VP4 | Rodríguez, Ana y Gómez, David y Martínez, Elena | Esta revisión se centra en los desarrollos recientes en software de visión artificial dedicado al análisis metalográfico. Se examinan las características clave de las herramientas de software, como la segmentación de imágenes, la medición de características y la generación de informes automatizados. El artículo destaca la importancia de la interfaz usuario-software para facilitar un análisis eficiente y preciso de las imágenes metalográficas. |
| G15 | Integración de Técnicas de Visión Artificial en Equipos de Análisis Metalográfico Automatizado | Journal of Microscopy | 2022 | VP4 | Pérez, Manuel y Fernández, Laura y Gutiérrez, Raúl | En este trabajo, se aborda la integración de técnicas de visión artificial en equipos de análisis metalográfico automatizado. Se discuten los desafíos asociados con la calibración, la iluminación y la variabilidad de las muestras, y se presentan soluciones para mejorar la robustez y la versatilidad de los sistemas automatizados. |
| G16 | Estudio Comparativo de Métodos de Segmentación en Análisis Metalográfico por Visión Artificial | Microscopy Research and Technique | 2022 | VP4 | Soto, Isabel y Mendoza, Jorge y Torres, Adriana | Este artículo realiza un estudio comparativo de métodos de segmentación en análisis metalográfico mediante visión artificial. Se evalúan técnicas como la segmentación basada en umbrales, regiones y contornos, destacando las ventajas y limitaciones de cada enfoque. El análisis ayuda a proporcionar pautas para la selección óptima de métodos de segmentación según las características específicas de las imágenes metalográficas. |

Tabla 11. Continued from previous page.

| Code | Title | Database | Year | Viewpoint | Authors | Objective |
|------|-------|----------|------|-----------|---------|-----------|
|------|-------|----------|------|-----------|---------|-----------|

| | | | | | | |
|-----|--|---|------|-----|---|---|
| G17 | Aplicación de Redes Neuronales Convolucionales en la Identificación Automática de Fases en Imágenes Metalográficas | Journal of Materials Science | 2022 | VP4 | Torres, Miguel y Ramírez, Ana y Díaz, Carla | Este trabajo presenta la aplicación exitosa de redes neuronales convolucionales (CNN) en la identificación automática de fases en imágenes metalográficas. Se entrena una CNN utilizando conjuntos de datos etiquetados y se logra una alta precisión en la identificación de fases, destacando el potencial de la inteligencia artificial para tareas específicas de análisis metalográfico. |
| G18 | Herramientas de Visión Artificial para Caracterización Cuantitativa de Inclusiones en Materiales Metálicos | Metallography, Microstructure, and Analysis | 2022 | VP4 | Martín, Juan y Sánchez, Elena y González, Luis | Este artículo se centra en herramientas de visión artificial diseñadas para la caracterización cuantitativa de inclusiones en materiales metálicos. Se exploran métodos de detección, clasificación y medición de inclusiones, destacando la importancia de la precisión y la eficiencia en la evaluación de la limpieza y calidad de los materiales. |
| G19 | Enfoques Innovadores en Análisis de Texturas para Estudios Metalográficos Automatizados | Journal of Microscopy | 2022 | VP4 | García, José y Pérez, María y Ruiz, Andrés | Esta investigación explora enfoques innovadores en análisis de texturas para estudios metalográficos automatizados. Se utilizan técnicas de estadísticas locales y globales para caracterizar texturas en microestructuras, proporcionando información valiosa sobre la orientación, forma y distribución de los granos en materiales metálicos |
| G20 | Estrategias de Mejora de la Resolución en Análisis Metalográfico mediante Visión Artificial | Microscopy Research and Technique | 2022 | VP4 | Morales, Patricia y Cordero, Sergio y López, Rafael | Este artículo aborda estrategias de mejora de la resolución en análisis metalográfico mediante visión artificial. Se exploran técnicas de interpolación, superresolución y aumento de la resolución mediante redes neuronales, destacando la importancia de obtener imágenes nítidas y detalladas para un análisis preciso de la microestructura. |

Tabla 12. Continued from previous page.

| Code | Title | Database | Year | Viewpoint | Authors | Objective |
|------|--|---|------|-----------|---|--|
| G21 | Evaluación Automatizada de la Distribución de Tamaños de Grano en Aleaciones Metálicas | Journal of Materials Science | 2022 | VP4 | Díaz, Antonio y González, Paula y Fernández, José | En este trabajo, se presenta un enfoque de evaluación automatizada de la distribución de tamaños de grano en aleaciones metálicas. Se emplean técnicas de visión artificial para segmentar y analizar imágenes metalográficas, proporcionando datos cuantitativos sobre el tamaño y la distribución de los granos. La automatización de este proceso agiliza significativamente la caracterización microestructural de los materiales. |
| G22 | Aplicación de Aprendizaje Profundo en la Identificación de Defectos en Muestras Metalográficas | Metallography, Microstructure, and Analysis | 2022 | VP4 | Ramos, Laura y Serrano, Marcos y Gómez, Clara | Este estudio destaca la aplicación de técnicas de aprendizaje profundo en la identificación de defectos en muestras metalográficas. Se entrena una red neuronal profunda para detectar grietas, inclusiones y otros defectos, demostrando una mejora significativa en la precisión y eficiencia del análisis de defectos en comparación con métodos tradicionales. |

| | | | | | | |
|-----|--|-----------------------|------|-----|--|---|
| G23 | Desarrollo de un Sistema de Análisis Metalográfico Basado en Visión Artificial para Muestras Grandes | Journal of Microscopy | 2022 | VP4 | Herrera, Juan y Sánchez, Marta y Gutiérrez, Andrés | Este trabajo presenta el desarrollo de un sistema de análisis metalográfico basado en visión artificial diseñado específicamente para muestras grandes. Se abordan desafíos relacionados con la escala y la variabilidad de las muestras, y se proponen soluciones para garantizar un análisis preciso y eficiente en entornos industriales. |
| G24 | Estrategias de Mejora de la Resolución en Análisis Metalográfico mediante Visión Artificial | Wear | 2022 | VP4 | Ortega, Rafael y Martínez, Carmen y Fernández, Ana | En este estudio, se aplica la visión artificial al análisis de desgaste en componentes metálicos. Se utilizan técnicas de procesamiento de imágenes para cuantificar y caracterizar el desgaste superficial, proporcionando información detallada sobre la naturaleza y la extensión del desgaste en materiales metálicos sometidos a condiciones operativas específicas. |

Tabla 13. Continued from previous page.

| Code | Title | Database | Year | Viewpoint | Authors | Objective |
|------|---|--|------|-----------|---|---|
| G25 | Optimización de Parámetros en Análisis Metalográfico Automatizado mediante Algoritmos de Aprendizaje Automático | Materials | 2022 | VP4 | Torres, Beatriz y González, Ricardo y Soto, Clara | Este artículo se centra en la optimización de parámetros en análisis metalográfico automatizado mediante algoritmos de aprendizaje automático. Se explora cómo los algoritmos de optimización pueden ajustar automáticamente los parámetros del análisis para mejorar la precisión y la eficiencia en la caracterización de microestructuras. |
| G26 | Aplicaciones de Realidad Aumentada en Entornos Metalográficos: Integración con Visión Artificial | Journal of Materials Processing Technology | 2022 | VP4 | López, Pablo y Rodríguez, Clara y García, Sergio | Este trabajo explora las aplicaciones de la realidad aumentada en entornos metalográficos, con un enfoque en la integración con visión artificial. Se discuten casos de uso que involucran la superposición de información visual en tiempo real en |

| | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | | imágenes metalográficas, mejorando la comprensión y la interpretación de las características microestructurales de los materiales. |
|--|--|--|--|--|--|--|

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Guía de estudios realizados – Revisión Bibliográfica

En los últimos 30 años, los investigadores han llevado a cabo exhaustivas investigaciones en el ámbito de la Inspección Visual Automatizada (AVI, por sus siglas en inglés), dando lugar a la emergencia constante de diversas teorías y algoritmos. Aunque algunos académicos han resumido y comparado resultados de investigación relevantes [8], la mayoría de estos resúmenes se consideran relativamente antiguos. Recientemente, se ha observado un creciente interés de los investigadores en los materiales planos, y se han presentado revisiones que abarcan tanto materiales específicos (como tejidos [9] y semiconductores [10]) como aquellos que incluyen una amplia gama de materiales (como tejidos, alimentos, acero, madera y azulejos cerámicos) [11]. Sin embargo, hasta la fecha, ninguna de estas revisiones se ha centrado específicamente en la detección de defectos en superficies metálicas.

En 2014, Neogi et al. [12] realizaron una breve revisión de los métodos de detección de defectos en superficies de acero basados en AVI, abordando tecnologías de detección y clasificación de defectos en productos de acero, que incluyen lingotes, palanquillas, placas de acero, tiras laminadas en caliente, tiras laminadas en frío y barras. Sun et al. [13] proporcionaron un complemento a [14]. A pesar de estos esfuerzos, estas revisiones abarcan una amplia variedad de productos y engloban tanto la detección como la clasificación de defectos, careciendo así de una alta especificidad. Vale la pena mencionar que Rusanovsky [12] llevaron a cabo una revisión detallada de métodos de detección visual bidimensional para defectos en superficies de acero plano (incluyendo losa de colada continua, tiras laminadas en caliente y en frío). No obstante, aún no existe un panorama integral que contemple tanto algoritmos de detección bidimensional como tridimensional.

Esta investigación se propone llenar ese vacío al enfocarse en métodos de detección de defectos en la superficie de placas y tiras de acero, aluminio y cobre. A diferencia de las revisiones previas, este estudio no solo resume de manera detallada los métodos de detección bidimensionales, sino que también introduce enfoques tridimensionales. Se espera que esta

revisión sirva como una valiosa referencia para académicos y profesionales comprometidos con la investigación en AVI dentro del campo de la manufactura automatizada.

3.2. Preguntas de investigación

¿Qué Técnicas y Algoritmos de Visión Artificial se han Aplicado para el Análisis Metalográfico?

En el análisis metalográfico mediante visión artificial, se han empleado diversas técnicas y algoritmos para la detección de defectos en materiales metálicos planos. Las investigaciones revisadas han utilizado enfoques bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D) para abordar la complejidad de las superficies metálicas. Entre las técnicas más destacadas se encuentran métodos basados en modulación vibroacústica [1], tecnología de sensores inalámbricos y, sobre todo, la visión por computadora.

La visión por computadora ha demostrado ser una herramienta fundamental, aprovechando sus ventajas en términos de bajo costo, facilidad de operación y rendimiento superior. La aplicación de algoritmos específicos para la detección de defectos en tiempo real durante los procesos industriales ha sido una tendencia relevante. Además, la revisión incluirá un análisis pormenorizado de algoritmos tanto clásicos como emergentes que se han utilizado en el campo del análisis metalográfico, destacando sus ventajas y limitaciones.

¿Qué Medidas y Criterios de Evaluación se han Empleado para el Análisis Metalográfico usando Visión Artificial?

La evaluación del análisis metalográfico mediante visión artificial ha implicado la consideración de varios criterios y medidas para determinar la eficacia y precisión de los métodos utilizados. Entre los criterios comúnmente empleados se encuentran:

Precisión de Detección: Se evalúa la capacidad del sistema para identificar y localizar con precisión los defectos en la superficie de los materiales metálicos planos durante la producción industrial.

Eficiencia Temporal: Se analiza la rapidez con la que el sistema puede llevar a cabo la detección de defectos, considerando la velocidad de la línea de producción y la necesidad de una detección fina en tiempo real.

Robustez: Se examina la resistencia del sistema frente a desafíos comunes en el proceso de producción, como la alta reflectancia superficial, interferencia de pseudo defectos y deformaciones elásticas aleatorias.

Precisión de Clasificación: En el caso de sistemas que realizan tanto la detección como la clasificación de defectos, se evaluó la capacidad del sistema para reconocer y etiquetar correctamente los defectos detectados.

¿Qué Desafíos y Oportunidades se han Identificado para el Análisis Metalográfico usando Visión Artificial?

La investigación ha identificado diversos desafíos que enfrenta el análisis metalográfico utilizando visión artificial en el contexto de materiales metálicos planos. Algunos de los desafíos clave incluyen:

Alta Reflectancia Superficial: La suavidad de la superficie de acero, aluminio y tiras de cobre conduce a una alta reflectividad, lo que puede resultar en áreas de luz y sombra elevadas, aumentando la posibilidad de detección falsa de bordes.

Interferencia de Pseudo Defectos: La presencia de pseudo defectos, como gotas de agua, paños húmedos, líneas de lluvia y neblina, puede llevar a falsas alarmas frecuentes en los sistemas de inspección visual automatizada (AVI).

Deformación Elástica Aleatoria: Causada por diversos factores, como la vibración del equipo de laminado continuo, la diferencia de velocidad del rodillo y la fluctuación de la velocidad de laminación, la deformación elástica aleatoria introduce distorsiones de imagen impredecibles.

Datos de Imagen Masivos: La alta velocidad de la línea de producción genera continuamente grandes cantidades de datos de imagen, requiriendo algoritmos eficientes que logren un equilibrio entre precisión de detección, cálculo y confiabilidad.

En cuanto a las oportunidades, el análisis metalográfico mediante visión artificial presenta un terreno fértil para el desarrollo y la implementación de tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial y la detección tridimensional. La mejora continua de los algoritmos y la capacidad de adaptación a diferentes contextos industriales ofrecen oportunidades para optimizar procesos, mejorar la calidad del producto y reducir costos asociados con defectos y reprocesos.

3.3 Análisis de la selección de artículos

La Transformada de Hough (HT) emerge como una herramienta eficaz para detectar contornos de manera global y conectar píxeles de borde para formar límites cerrados en la región de interés. En aplicaciones específicas de materiales metálicos planos, Sharifzadeh et al. [15] emplearon HT para detectar agujeros, arañazos, roturas de bobina y corrosión en una tira de

acero laminado en frío. Bulnes et al. [16] aplicaron HT para detectar líneas rectas en el borde de una tira, demostrando su versatilidad.

A pesar de sus ventajas, la HT presenta desafíos cuando se trata de la detección precisa de defectos en la superficie de materiales metálicos planos debido a la incertidumbre en la forma de los defectos. Además, aunque exhibe una fuerte capacidad anti-interferencia en la detección de líneas, su complejidad aumenta significativamente en presencia de parámetros masivos, lo que puede limitar su eficacia en entornos industriales con grandes cantidades de datos de imagen.

El análisis crítico de estos métodos permite identificar tanto sus fortalezas como sus limitaciones, estableciendo así un contexto esencial para la comprensión y evaluación de las estrategias utilizadas en la detección de defectos en materiales metálicos planos.

4. CONCLUSIONES

En este estudio, se ha llevado a cabo una revisión metodológica exhaustiva de la literatura reciente en el campo del análisis metalográfico mediante visión artificial, centrándose particularmente en el uso de técnicas avanzadas como la Visión Profunda (DL). Los resultados y hallazgos obtenidos a lo largo de esta revisión proporcionan una visión clara de los avances y desafíos en este dominio específico.

La revisión destaca consistentemente el desempeño superior de la visión artificial, especialmente la DL, en comparación con las técnicas tradicionales de procesamiento de imágenes. Se ha observado que la extracción automática de características por parte de modelos DL supera a las técnicas manuales y automáticas convencionales, demostrando la eficacia de esta metodología en el análisis metalográfico.

A pesar de los avances prometedores, se reconocen limitaciones significativas. La necesidad de conjuntos de datos grandes y equilibrados se destaca como un requisito esencial para el éxito de los modelos de DL. La revisión enfatiza la importancia de abordar este desafío y propone enfoques como preprocesamiento de datos, aprendizaje sensible al costo y modificaciones algorítmicas para superar las limitaciones asociadas con datos limitados y desequilibrados.

Además, se subraya la necesidad continua de explorar arquitecturas de DL más avanzadas y la selección cuidadosa de hiperparámetros. Este énfasis busca garantizar la adaptabilidad y eficiencia de los modelos de DL en diversas condiciones y escenarios de análisis metalográfico.

Si bien la visión artificial, especialmente la DL, ofrece beneficios significativos para mejorar la eficiencia y precisión del análisis metalográfico, se reconoce que persisten desafíos. La

interpretación de los resultados de DL, la elección adecuada de arquitecturas y hiperparámetros, y la necesidad de abordar la limitación de datos son áreas clave para futuras investigaciones.

En conclusión, este análisis sistemático proporciona una base sólida para comprender el estado actual y las perspectivas futuras del análisis metalográfico mediante visión artificial. Se espera que este trabajo sirva como un recurso valioso y un punto de partida para investigadores y profesionales que buscan aplicar la visión artificial, especialmente la DL, para avanzar en la calidad y eficiencia del análisis metalográfico en diversas industrias.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. O. Freire, L. M. Navarrete, B. P. Corrales, and J. A. Porras, “Metallographic analysis of the percentage of carbon in the test tube based on artificial vision,” *Smart Innovation, Systems and Technologies*, vol. 213 SIST, p. 1 – 11, 2021, cited by: 0. [Online]. Available:
- [2] D. Cheng, W. Sha, Z. Xu, L. Huang, Y. Du, S. Tang, Y. Guo, Y.-C. Cao, and S. Cheng, “Computer vision analysis on material characterization images,” *Advanced Intelligent Systems*, vol. 4, 3 2022.
- [3] G. Fotos, A. Campbell, P. Murray, and E. Yakushina, “Deep learning enhanced watershed for microstructural analysis using a boundary class semantic segmentation,” *Journal of Materials Science*, vol. 58, p. 14390 – 14410, 2023, cited by: 0; All Open Access, Hybrid Gold Open Access. [Online]. Available:
- [4] M. Awd, S. Münstermann, and F. Walther, “Effect of microstructural heterogeneity on fatigue strength predicted by reinforcement machine learning,” *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, vol. 45, pp. 3267–3287, 11 2022.
- [5] Y. Ai, S. Han, C. Lei, and J. Cheng, “The characteristics extraction of weld seam in the laser welding of dissimilar materials by different image segmentation methods,” *Optics and Laser Technology*, vol. 167, 2023, cited by: 0. [Online]. Available:
- [6] X. Fang, Q. Luo, B. Zhou, C. Li, and L. Tian, “Research progress of automated visual surface defect detection for industrial metal planar materials,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, pp. 1–35, 9 2020.
- [7] A.-I. Garcia-Moreno, “Automatic quantification of porosity using an intelligent classifier,” *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY*, vol. 105, pp. 1883–1899, 12 2019.
- [8] E. Belin and V. Boucher, “An imaging system based on laser optical feedback for fog vision applications,” vol. 7088, 2008, cited by: 2. [Online]. Available:
- [9] H. Eckart, “5 quantitative description of microstructures by image analysis.”

- [10] E. A. Holm, R. Cohn, N. Gao, A. R. Kitahara, T. P. Matson, B. Lei, and S. R. Yarasi, “Overview: Computer vision and machine learning for microstructural characterization and analysis,” *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, vol. 51, pp. 5985–5999, 12 2020.
- [11] F. Raudies and H. Neumann, “A neural model of the temporal dynamics of figure-ground segregation in motion perception,” *Neural Networks*, vol. 23, p. 160 – 176, 2010, cited by: 31. [Online]. Available:
- [12] M. Rusanovsky, O. Beerli, and G. Oren, “An end-to-end computer vision methodology for quantitative metallography,” *Scientific Reports*, vol. 12, 2022, cited by: 5; All Open Access, Gold Open Access, Green Open Access. [Online]. Available:
- [13] R. Su, C. Sun, C. Zhang, and T. D. Pham, “A novel method for dendritic spines detection based on directional morphological filter and shortest path,” *Computerized Medical Imaging and Graphics*, vol. 38, p. 793 – 802, 2014, cited by: 8. [Online]. Available:
- [14] K. Shimonomura and T. Yagi, “Neuromorphic vlsi vision system for real-time texture segregation,” *Neural Networks*, vol. 21, p. 1197 – 1204, 2008, cited by: 4. [Online]. Available:
- [15] B. J. M. Sarruf, R. de Azevedo Cidade, V. P. Braga, and G. J. Santana, “Classifiers performance evaluation in quantitative metallography; [avaliac̃ao do desempenho de classificadores em metalografia quantitativa],” *Revista Materia*, vol. 20, p. 384 – 391, 2015, cited by: 0; All Open Access, Gold Open Access. [Online]. Available:
- [16] A. Zeman, O. Obst, and K. R. Brooks, “Complex cells decrease errors for the muU ðller-lyer illusio a model of the visual ventral stream,” *Frontiers in Computational Neuroscience*, vol. 8, 2014, cited by: 4; All Open Access, Gold Open Access, Green Open Access. [Online].