



Revisar

Esfuerzos residuales en productos de fabricación aditiva de arco eléctrico y sus técnicas de medición: una revisión sistemática

Fakada Dabalo Gurmesa 1,* , Hirpa Gelgele Lemu 2,*



, Yosef Wakjira Adugna



y Mesfin Demise Harsibo 3



- ¹ Facultad de Ingeniería Mecánica, Instituto de Tecnología Jimma, Universidad de Jimma, Jimma PO Box 378,
² Departamento de Ingeniería Mecánica y Estructural y Ciencia de Materiales de Etiopía, Facultad de
 Ciencia y Tecnología, Universidad de Stavanger, N-4036 Stavanger, Noruega;
³ yosef.w.adugna@uis.no Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería y Tecnología,
 Universidad Wolkite, Wolkite PO Box 07, Etiopía; mesfine2021@gmail.com
 * Correspondencia: fd.gurmesa@stud.uis.no (FDG); hirpa.g.lemu@uis.no (HGL)

Resumen: Esta revisión de la literatura proporciona una exploración en profundidad de la investigación realizada sobre tensiones residuales (RS) en productos de fabricación aditiva por arco eléctrico (WAAM), enfocándose particularmente en cómo los parámetros del proceso influyen en el fenómeno. La motivación del estudio es el creciente enfoque en la tecnología WAAM y la observación de que RS juega un papel crucial en la determinación del comportamiento mecánico y la integridad estructural de los componentes WAAM. Por lo tanto, la revisión tiene como objetivo proporcionar una mejor comprensión de la relación entre los parámetros del proceso y RS para optimizar el proceso WAAM y garantizar la durabilidad de los productos finales. También resume los hallazgos clave, las técnicas de medición, los desafíos y las direcciones futuras en este campo en evolución. La revisión también analiza las técnicas de medición utilizadas para caracterizar RS en productos fabricados por WAAM en función de los parámetros del proceso. Se discutieron técnicas experimentales de medición y análisis numérico de RS para determinar los impactos de RS en las respuestas mecánicas en productos de WAAM. Para determinar la Impactos de RS en las respuestas mecánicas de los productos WAAM. Además, aborda la influencia de los ciclos térmicos, las velocidades de enfriamiento y las estrategias de deposición en la formación de RS. También se considera el papel de las propiedades de los materiales, como la conductividad térmica y los coeficientes de expansión, en el desarrollo de RS. Al ofrecer una descripción general completa de las tendencias y conocimientos de investigación actuales, esta revisión sirve como un recurso valioso para guiar investigaciones futuras, fomentando el avance de WAAM como una tecnología de fabricación sólida y eficiente. La revisión también subraya la importancia de los enfoques interdisciplinarios que combinen métodos experimentales y numéricos para abordar los complejos problemas de RS en WAAM, con el objetivo de mejorar el rendimiento y la confiabilidad de los componentes fabricados aditivamente.

Palabras clave: estrés residual; fabricación aditiva de arco de alambre; parámetros de proceso; medición de tensiones residuales ; Evaluación de fabricación aditiva de arco de alambre.



Cita: Gurmesa, FD; Lemu, HG;

Adugna, YW; Harsibo, MD Residual

Tensiones en el aditivo para arcos de alambre

Productos de fabricación y sus técnicas de

medición: una revisión sistemática.

Aplica. Mec. 2024, 5, 420–449. [https://doi.org/](https://doi.org/10.3390/applmech5030025)

10.3390/applmech5030025

Recibido: 27 de abril de 2024

Revisado: 15 de junio de 2024

Aceptado: 27 de junio de 2024

Publicado: 10 de julio de 2024



Copyright: © 2024 por los autores.

Licenciario MDPI, Basilea, Suiza.

Este artículo es un artículo de acceso abierto.
distribuido bajo los términos y

condiciones de los Creative Commons

Licencia de atribución (CC BY)

([https://creativecommons.org/licenses/by/](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)
4.0/).

1. Introducción

La fabricación aditiva por arco de alambre (WAAM) es un proceso de fabricación avanzado que se clasifica como fabricación aditiva (AM) o impresión 3D. Es el proceso imperativo de fabricación de metales para componentes grandes y complejos, utilizando alambres metálicos o aleaciones como materia prima. Además, debido a sus rápidas tasas de acumulación, las características metalúrgicas de las piezas fabricadas con WAAM, como la composición química y la formación de fases, son mejores que las de otras técnicas de AM [1–3]. Un aspecto importante que aún obstaculiza esta tecnología es la estandarización y certificación dentro de los ensayos no destructivos de las piezas, lo cual se comenta en la literatura [4]. En este contexto, no existen estándares par

y no hay técnicas de observación y seguimiento in situ para la formación instantánea de defectos (estrés residual) que puedan corregirse después de su formación, lo que genera desperdicio de materiales y tiempo para la reproducción. WAAM es una tecnología de impresión 3D innovadora y versátil con una amplia variedad de aplicaciones y varias ventajas en la fabricación.

Las primeras investigaciones sugieren que la adopción de tecnologías de fabricación aditiva en la construcción podría potencialmente reducir los gastos de mano de obra, disminuir el desperdicio de material y fabricar formas personalizadas intrincadas que normalmente desafían al fabricante que utiliza técnicas de construcción convencionales [5–7]. Sin embargo, el sector WAAM está interesado en técnicas a gran escala con altas tasas de deposición de AM para producir componentes, que van desde cientos de milímetros hasta metros de tamaño [8]. Capta una atención sustancial en la fabricación industrial debido a su fabricación rentable de piezas metálicas a gran escala con altas tasas de deposición [9]. Además, Williams et al. [10] sugieren que WAAM es un competidor viable para sustituir el enfoque de fabricación existente que implica palanquillas sólidas o piezas forjadas extensas, particularmente para componentes de complejidad baja a media.

En el contexto de los productos WAAM, la presencia de RS y deformaciones debidas a parámetros del proceso se convierte en un problema importante ya que tienen un impacto sustancial en la calidad, el costo y la precisión del proceso de impresión [11–13]. Además, WAAM, que es un subconjunto de AM, está despertando un gran interés por parte de todos los investigadores debido a sus diversos beneficios, incluida su capacidad para lograr altas tasas de deposición de metal y producir formas casi netas, superando los métodos de fabricación convencionales con sus tensiones residuales térmicas más altas. (RS) [3,14–16]. Es una técnica emergente de fabricación aditiva de metales que gradualmente está proporcionando una ventaja competitiva sobre los métodos tradicionales de forja y fundición [17].

Dependiendo de las fuentes de calor, el proceso WAAM se clasifica en tres: soldadura con gas inerte, soldadura por arco metálico y arco de plasma [18,19].

La necesidad y el propósito de este artículo de revisión es investigar las técnicas de medición de RS en los productos de WAAM. En particular, esta revisión es esencial para obtener una comprensión profunda de cómo se distribuye RS en los productos de WAAM y cómo se correlaciona con los parámetros de deposición. En este estudio, se discutieron los métodos para examinar y medir RS, el impacto de RS en las características materiales de los productos WAAM y los parámetros del proceso basados en análisis experimentales y numéricos, mientras que la mitigación de RS y el refinamiento de la estructura de grano de las piezas de capas creadas. Se discutió cómo mejorar en base a los métodos experimentales. En esta revisión, los efectos de los parámetros del proceso como el diámetro del alambre, la longitud de escaneo con el ancho, la altura (espesor) del cordón, el comportamiento de la corriente del arco [20], el voltaje, la velocidad de desplazamiento, la secuencia de soldadura (posición de soldadura) [21], los tipos de blindaje. Se consideran el gas y su caudal en RS. Además, se consideraron estudios sobre las consecuencias de la condición de la superficie de las cuentas entre capas y el tiempo entre pasadas en la forma del depósito y cómo aumenta aditivamente la altura.

Esta revisión también se centra principalmente en cómo medir las RS fabricadas con WAAM, basándose en datos pertinentes de la literatura existente. Las técnicas para medir RS a través de enfoques experimentales son principalmente la difracción de neutrones [22–24] y la difracción de rayos X (XRD) [25–27], que se realizan dentro de una profundidad de capa limitada de productos impresos, mientras que las técnicas X basadas en sincrotrón. El rayo puede penetrar varios milímetros en metales y aleaciones. Se han empleado otros métodos como el método de galga extensométrica de perforación de orificios, la medición de tensión ultrasónica (USM), el análisis de ruido de Barkhausen, la eliminación de capas (perforación de orificios profundos), el método de contorno y la técnica de perforación de orificios incremental, y algunos de ellos. Aún no se ha utilizado. Es importante destacar que esta revisión delinea explícitamente cuáles se han utilizado y cuáles no.

El formato del artículo es el siguiente: después de esta sección introductoria, la Sección 2 proporciona detalles sobre los materiales y métodos utilizados en la investigación. A esto le siguen las Secciones 3 y 4, que, respectivamente, presentan una descripción general de los productos de WAAM y analizan el impacto de RS que afecta los atributos mecánicos de los componentes de WAAM.

La Sección 5 se centra en explicar las estrategias de mitigación de RS y explora aplicaciones prácticas. La sección 6 sirve como sección de discusión, ofreciendo un análisis detallado y

interpretación de los hallazgos. Por último, la Sección 7 resume el artículo delineando las claves puntos y proporcionando ideas sobre futuras direcciones de investigación.

2. Materiales y métodos

Esta revisión se centra en la literatura científica publicada en los últimos diez años, que abarca fuentes publicadas principalmente entre 2015 y 2024. Esta investigación es basado en la estructura de evaluación de la declaración PRISMA presentada en la Figura 1. Para garantizar una cobertura integral de la investigación relacionada, la investigación se centra en los defectos principalmente en el RS de los productos WAAM basados en los muchos procesos y operaciones parámetros. Para lograr el objetivo de este artículo de revisión, la revisión se concentra en las últimas publicaciones (como se indica con base en los datos proporcionados en la Figura 2, con contenido temáticamente organizados en torno a temas específicos. La búsqueda se limitó a fuentes que tuvieran artículos publicados exclusivamente en inglés. Incluye artículos en las siguientes revistas científicas. Bases de datos: Scientific.net, Scopus, Elsevier, Science Direct, Web of Science, Compendia, Google Scholar, IEEE Xplore, ProQuest, Biblioteca digital ASM, SpringerLink, Mendeley y ResearchGate, erudito semántico, SCISPACE, PubMed, DOAJ, JSTOR, MDPI, BASE, SAGE, Taylor y Francis, y otros. Empleó la expresión inglesa para buscar términos como Medición AM, WAAM, RS, análisis de parámetros de proceso, evaluación de calidad en WAAM, Defectos de productos WAAM, caracterización de la microestructura en productos WAAM, WAAM control de calidad, investigación WAAM RS y datos descriptivos adicionales utilizados con frecuencia. términos para alinearse con precisión con los objetivos de la revisión. Para lograr este objetivo, estos

Aplica. Mec. 2024, 5, PARA REVISIÓN POR PARES Se utilizaron combinaciones estadísticas y análisis de datos de múltiples estudios para extraer conclusiones generales.

4

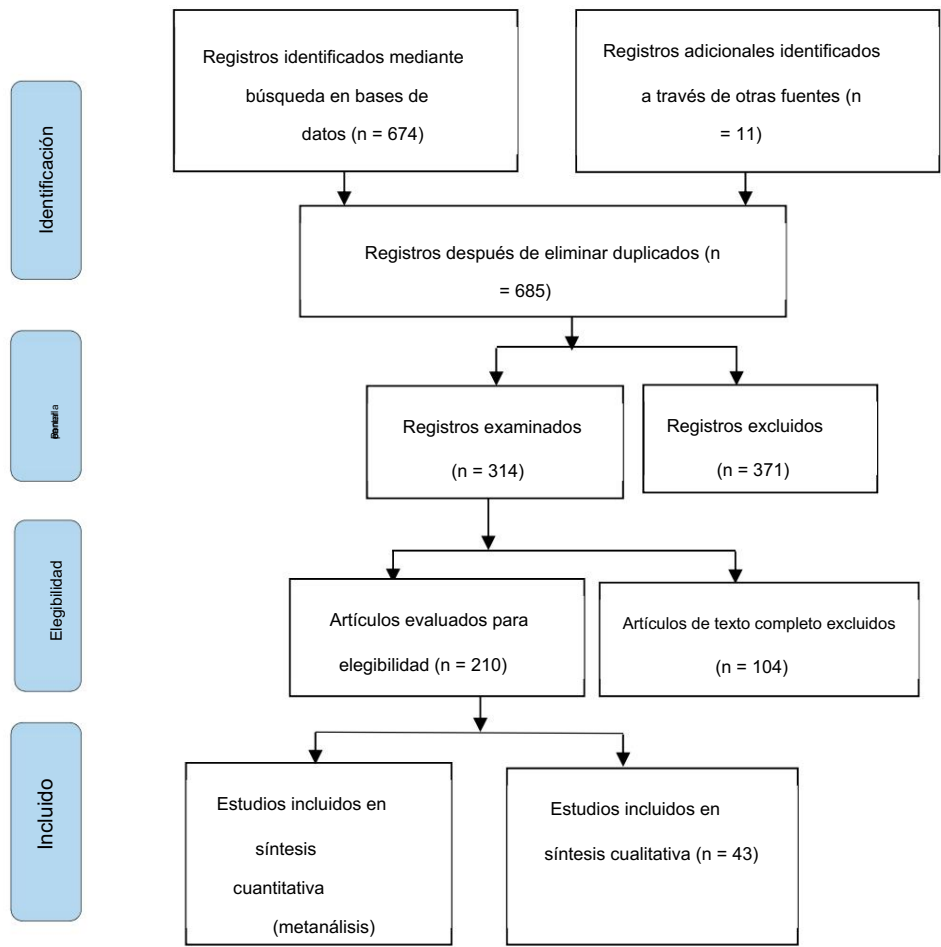


Figura 1. Diagrama de flujo que ilustra el proceso de selección y selección de estudios.

Figura 1. Diagrama de flujo que ilustra el proceso de selección y selección de estudios.



Figura 2. Datos estadísticos de los artículos publicados en la revista Additive Manufacturing (WAAM) de 2015 a 2024.

3. Descripción general de WAAM de procesos y productos

El número evaluado de campos de investigación de RS en WAAM se muestra en la Figura 2, que representa el recuento anual de publicaciones de investigación. Los gráficos de barras en la figura muestran que en esta tecnología, los componentes grandes y complejos están hechos de múltiples materiales, ha habido un aumento notable en el interés de la investigación en RS en piezas WAAM en los últimos años, con una rápida tasa de deposición, una hazaña que es un desafío logrado con la AM tradicional, como se refleja en el creciente número de publicaciones en este dominio. Un recuento elevado de citas suele ser el resultado [28,29]. En este caso, el alambre se suministra al soplete de soldadura y se funde mediante un electrodo eléctrico, indicando un gran interés en el tema entre la comunidad de investigadores. Para el tema elegido, el arco eléctrico [30]. Se utilizan pórticos de control numérico robóticos o computarizados para establecer la estrategia principal utilizada para seleccionar los artículos recuperados: 685; finalmente, el número total de artículos que pasaron la selección (incluidos en este artículo) es 209.

3. Descripción general de WAAM de procesos y productos

En esta tecnología, se fabrican componentes grandes y complejos a partir de múltiples materiales con una tasa de deposición rápida, una hazaña que es un desafío lograr con los métodos tradicionales de AM [28,29]. En este caso, el alambre se suministra al soplete de soldadura y se funde mediante un arco eléctrico [30]. Se utilizan pórticos de control numérico robóticos o computarizados para configurar el movimiento del proceso de impresión capa por capa hasta obtener la apariencia deseada de los componentes obtenidos [10]. El modelo digital 3D sirve como modelo para este proceso WAAM. La utilización de guía robótica en WAAM permite una potente combinación de automatización y flexibilidad de diseño, junto con procesos de producción eficientes. Sin embargo, la respuesta de las características del material de los productos fabricados con aditivos por arco de alambre (WAAMed) está influenciada tanto por robots automatizados como por el control numérico computarizado para construir las piezas y el aporte de calor asociado [31].

Básicamente, los pasos utilizados para el proceso de impresión en los productos WAAM abarcan muchas actividades en cada etapa, comenzando desde el modelo CAD. Estos pasos describen el flujo de trabajo general para producir componentes utilizando WAAM, garantizando una fabricación eficiente y confiable de piezas metálicas complejas. El proceso de WAAM se dividirá en seis etapas principales, desde la preparación del archivo CAD hasta la separación de componentes y el posprocesamiento [10]. Los pasos de planificación del procedimiento utilizados por WAAM para producir componentes se muestran en la Figura 3.

En esencia, el RS es inherente a los componentes WAAM debido a los diversos parámetros del proceso que pueden afectar negativamente las propiedades mecánicas, la vida útil a la fatiga y la integridad estructural de las piezas. Además, medir RS en estructuras WAAM es un desafío debido a su proceso que requiere mucho tiempo y porque carece de resolución suficiente [32]. La importancia de comprender RS en los productos WAAM es fundamental para mantener la integridad estructural para abordar fallas prematuras y garantizar el rendimiento mecánico de los productos [18,33]. Las características de los materiales depositados pueden variar a lo largo del proceso WAAM, afectando la evolución de RS [34], como resultado de la zona afectada por el calor (HAZ) en las proximidades del baño de soldadura [35]. La medición RS también ayuda a comprender, predecir y corregir imprecisiones dimensionales causadas por distorsiones, asegurando que los productos WAAM cumplan con las tolerancias deseadas [36,37]. Asimismo, un conocimiento preciso de RS es importante para mejorar la calidad del producto y garantizar que los componentes WAAM cumplan con su rendimiento. Al reducir el

Machine Translated by Google

y ampliar la vida útil de equipos y maquinaria costosos [40,41]. Además, es altamente capaz de construir estructuras metálicas grandes y/o complejas y rentables, principalmente como resultado de su tasa de deposición superior [3,7,30,42–47]. WAAM es muy adecuado para crear piezas metálicas de gran tamaño y tiene potencial para su uso en la industria de la construcción entre varios métodos de fabricación aditiva [20]. Las principales ventajas de estos métodos de fabricación incluyen su productividad, idoneidad para aplicaciones industriales y la capacidad de eliminar el riesgo de defectos, fallas, retrabajo y/o remanufactura, puede reducir los costos de producción y Aumentar el desperdicio de material en comparación con otras técnicas de AM [48,49]. minimizar el desperdicio de material [36,38,39].

Aplica. Mec. 2024, 5

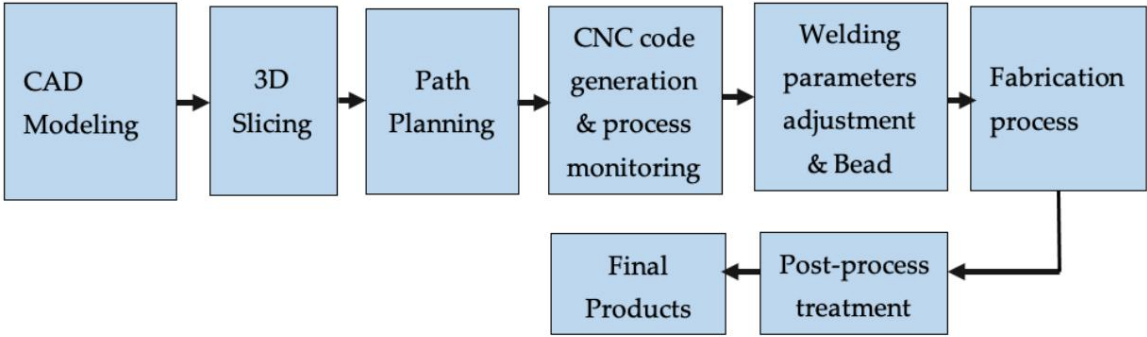


Figura 3. Pasos utilizados por WAAM para producir componentes.

WAAM se puede utilizar para reparar y restaurar componentes dañados o desgastados y extender la vida útil de equipos y maquinaria costosos [40,41]. Además, es capaz de construir estructuras metálicas grandes y/o complejas y rentables, principalmente y automatización que permiten un control preciso sobre los parámetros de deposición y la capacidad para gestionar geometrías intrincadas [50,51]. Estos sistemas incorporan sensores avanzados y piezas metálicas de gran tamaño y tienen potencial para su uso en la industria de la construcción entre varios Métodos AM [20]. Las principales ventajas de estos métodos de fabricación incluyen su productividad, idoneidad para aplicaciones industriales y capacidad para reducir el material residuos en comparación con otras técnicas de FA [48,49].

3.1. Un sistema robótico para WAAM

Los sistemas robóticos juegan un papel importante en los procesos WAAM, aportando versatilidad y automatización que permiten un control preciso sobre los parámetros de deposición y la capacidad para gestionar geometrías intrincadas [50,51]. Estos sistemas incorporan sensores avanzados y Tecnología de automatización para monitorear y ajustar los parámetros de impresión en tiempo real, asegurando calidad constante y la deposición precisa de materiales. El estudio publicado en [52] concentrado en dos parámetros WAAM, a saber (1) la velocidad de alimentación del alambre y (2) la velocidad de movimiento del robot e investigó sus efectos en las dimensiones metalúrgicas y dimensionales. estabilidad y características mecánicas de los materiales. El estudio implicó la producción de piezas de acero inoxidable 308L de paredes finas que utilizan el sistema WAAM, realizado en dos pasos. En primer lugar, se examinó el efecto de la corriente de soldadura, el voltaje y la velocidad de desplazamiento en la forma de los cordones de soldadura individuales, y estos factores se ajustaron para la construcción de paredes de acero 308L. En segundo lugar, se realizó un análisis exhaustivo de la influencia de la microestructura y características mecánicas de las paredes de acero WAAM 308L, dando como resultado propiedades mecánicas mejoradas adecuadas para aplicaciones industriales. robótico componentes para el proceso de impresión con la ruta de sangría (Figura 4a), la configuración para La experimentación (Figura 4b) y la ruta de la herramienta de deposición se ilustran en la Figura 4.

Los algoritmos genéticos (GA) se utilizan para mejorar el proceso de selección de parámetros en Deposición de forma casi neta para minimizar los huecos y el exceso de sustancias en el WAAM. proceso [53]. Se planifica un proceso de deposición ininterrumpido verificando la superposición condiciones dentro de las zonas de intercambio de robots para evitar colisiones [54,55]. Asimismo, una continua El proceso de deposición se está planificando cuidadosamente comprobando las áreas donde los robots podrían superponerse. o acercarse unos a otros en las zonas de intercambio de robots. Esta cuidadosa planificación se realiza para evitar cualquier colisión entre los robots, garantizando operaciones fluidas y seguras. el robot La guía se fijará en la velocidad de soldadura deseada, lo que afecta la acumulación de calor. y da como resultado variaciones del RS en los productos, así como el guiado robótico para monitorear el proceso en el WAAM descrito en la Figura 4. Emplear la planificación de rutas fue propuso [53,54] incorporar la superposición de cuentas y mejorar la estabilidad estructural interna mediante minimizar la altura; eventualmente, influye en el RS en los productos WAAM.

WASM (Welding Analysis and Simulation Method) es un software de simulación que permite analizar y predecir el comportamiento de los componentes de una estructura durante el proceso de soldadura. Este software se utiliza para simular el proceso de soldadura y predecir los efectos de las tensiones y deformaciones que se producen durante el proceso. El uso de WASM permite a los ingenieros diseñar componentes más seguros y eficientes, reduciendo los costos de fabricación y mejorando la calidad de los productos.

3.1. El proceso de soldadura en la fabricación de componentes de gran tamaño es un proceso complejo que implica la aplicación de altas temperaturas y la generación de grandes tensiones y deformaciones. El proceso de soldadura en la fabricación de componentes de gran tamaño es un proceso complejo que implica la aplicación de altas temperaturas y la generación de grandes tensiones y deformaciones. El proceso de soldadura en la fabricación de componentes de gran tamaño es un proceso complejo que implica la aplicación de altas temperaturas y la generación de grandes tensiones y deformaciones.

3.2. La tensión residual es un fenómeno que se produce durante el proceso de soldadura y puede tener efectos negativos en la vida útil de los componentes. La tensión residual es un fenómeno que se produce durante el proceso de soldadura y puede tener efectos negativos en la vida útil de los componentes. La tensión residual es un fenómeno que se produce durante el proceso de soldadura y puede tener efectos negativos en la vida útil de los componentes.

3.3. Métodos de medición de la tensión residual. La medición de la tensión residual es un proceso complejo que requiere el uso de técnicas avanzadas de medición. La medición de la tensión residual es un proceso complejo que requiere el uso de técnicas avanzadas de medición. La medición de la tensión residual es un proceso complejo que requiere el uso de técnicas avanzadas de medición.

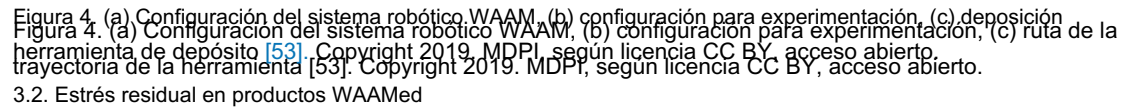


Figura 4. (a) Configuración del sistema robótico WAAM, (b) configuración para experimentación, (c) deposición de la herramienta de depósito [53]. Copyright 2019. MDPI, según licencia CC BY, acceso abierto.

3.2. Estrés residual en productos WAAMed

WAA Muestra diferentes niveles de AA se utilizan para mejorar el proceso de deposición de partículas (RS as).

B) Sección de como cambia la planificación [52]. Cuando uno o por un este de estructura RS en la carga o tensiones cíclicas, puede acelerar el inicio y la propagación de las grietas.

proceso [53]. Se planifica un proceso de deposición interrumpido verificando la superposición, que es la razón del fallo prematuro [56]. Este RS puede surgir de varios factores, condiciones dentro de las zonas de intercambio de robots para evitar colisiones [54,55]. Asimismo, un continuo como los ciclos de calentamiento y enfriamiento asociados con la expansión diferencial durante

El proceso de deposición se planifica cuidadosamente verificando las áreas donde los robots podrían realizar el proceso de soldadura, la contracción de materiales durante el tiempo de enfriamiento y otros procesos.

según los parámetros [57-62]. A las zonas de intercambio de robots, esta cuidadosa planificación se realiza mediante la elección de posición mejor la calidad, galaxia superficie de rodillos fluidas y seguridad de posición de la RS alta inducida. En el proceso WAA M, el componente usará tensión térmica por el calor la guía se fijara en la velocidad de soldadura deseada, lo que afecta la distorsión térmica acumulada por el calor y da como resultado variaciones del RS en los productos, así como el guiado robótico a Este ajuste se realiza controlando los valores de velocidades de alimentación de alambre y velocidad de desplazamiento

Seguir el proceso en el WAA M descrito en la Figura 4. Emplear la planificación de ruta fue (TS). Con un mayor aporte de calor, la RS más baja se observa en la superficie de la capa superior.

[53-54], incrementan superposición de cuentas y mejoran la estabilidad estructural interna mediante duraciones de enfriamiento prolongadas [68]. La RS de soldadura se midió utilizando cinco experimentos.

altruista y evolutivamente influye en el RS en los productos WAA M métodos

(iDHD), perforación incremental de orificios centrales (iCHD) y el método de contorno (CM) [67].

3.2. La tensión que los investigadores WAAM enfrentan en WAAM, han descubierto mejoras significativas.

dentro de la disposición de los granos y las propiedades del material de los componentes producidos en WAAM se refiere a las tensiones internas que permanecen encerradas dentro de una pieza (los nents [68]). La transformación de granos grandes y alargados en granos más pequeños, uniformemente conformado RS) dentro de componentes fabricados [55]. Cuando un componente dentro de este RS está sujeto a granos tanto en la capa interna como en la intermedia, se logra ajustar la cantidad de rigidez de la superficie de cada uno de los RS, lo que evita la propagación de las grietas de los microalloy y las características mecánicas de cada uno de ellos. Esta RS puede surgir de varios factores, como el procedimiento WAAM se estudia en [69-70].

En comparación con la medición de RS en otros métodos convencionales, la medición de RS en WAAM productos es más desafiante debido a la compleja historia térmica, la heterogeneidad microestructural, la complejidad geométrica y la necesidad de técnicas de medición especializadas. Abordar estos desafíos requiere una combinación de métodos experimentales avanzados, estándares de calibración precisos y herramientas robustas de modelado y simulación. Comprensión y superar estos desafíos es fundamental para garantizar la integridad estructural y el rendimiento de los componentes WAAM en aplicaciones prácticas. Generalmente hay dos medidas técnicas de RS para piezas fabricadas con WAAM, a saber, métodos experimentales y numéricos, los cuales se revisan y reportan en las siguientes subsecciones.

3.3.1. Métodos experimentales para la medición de RS en piezas WAAM

Varios artículos de revisión de diferentes tipos de literatura han investigado el examen de RS en productos WAAM utilizando diversas técnicas [71]. Inicialmente, estos estudios se centraron en las tensiones en las líneas centrales de la sección transversal de la teoría general de vigas, realizando un análisis teórico de la evolución de las tensiones a lo largo de estas líneas sin asumir una distribución de tensiones específica, que se considera RS. Posteriormente, la investigación se amplió para mejorar los modelos de pronóstico de alabeo basados en la teoría general del haz [72]. Otras técnicas incluyen la difracción de neutrones (ND) [22–24,73], la difracción de rayos X (XRD) [25–27,74], el método del contorno [13,75–77], los métodos de perforación de agujeros [31], el modelo de acoplamiento termomecánico [78], la correlación de imágenes digitales (DIC) [79], la perforación de pozos profundos (DHD) [80], el Operando sincrotrón y la difracción de rayos X sincrotrón (SXRD) [81,82]. La selección de los métodos depende de elementos como el material, el tamaño del componente, la geometría y el nivel de precisión requerido para la medición. Un modelado preciso del proceso es crucial para comprender y controlar la RS. Por ejemplo, el análisis XRD se utiliza para identificar el tamaño de grano observado en las tiras delgadas y la ferrita de bainita creada debido a los ciclos térmicos, mientras que las pruebas de penetración de tinte se utilizan para investigar defectos superficiales y comportamientos de corrosión de los componentes WAAM [65,66,68,83].

La elección del método de medición apropiado se rige por factores como la accesibilidad, la resolución, la precisión y la profundidad deseada de penetración de la tensión. La Tabla 1 enumera los métodos utilizados para la medición de RS en diferentes materiales junto con el resumen de los estudios experimentales. Como se puede observar en la tabla, los métodos más utilizados, según el resumen de la literatura, son XRD, ND, correlación de imágenes digitales (DIC), SXRD, eliminación de capas (perforación profunda), el método de contorno y el método de orificio incremental. -método de perforación.

Tabla 1. Resumen de métodos experimentales para la medición de tensiones residuales (RS).

Métodos	Materiales	Resultados	Árbitros.
	acero inoxidable 316L	La influencia de los parámetros del proceso sobre RS apenas se nota en la zona de fusión.	[22]
	aleación Fe3Al	Los granos columnares grandes dan como resultado anisotropía y RS es extensible en la dirección del edificio, y la tensión a la compresión aumenta progresivamente desde el principio hasta el final de la vía de deposición.	[23]
	AA6061	RS indica la aparición de esfuerzos de tracción de mayor magnitud en las piezas construidas, mientras que el sustrato presenta menores esfuerzos de compresión. No se observaron diferencias significativas en las propiedades mecánicas.	[59]
	aleación de aluminio 2319	RS a lo largo de la dirección de construcción en la pared depositada es una tensión de tracción que se extiende hasta el piso. Las paredes laminadas entre pasadas redujeron el RS a una mayor resistencia en la dirección longitudinal.	[24]
	Fe3Al	RS y las distorsiones resultantes del proceso WAAM son preocupaciones importantes ya que no solo influyen en la tolerancia de la pieza sino que también pueden causar fallas prematuras en el componente final durante el servicio.	[83]
	acero inoxidable 304L	La alteración de RS en el ejemplar tras introducir un nuevo depósito. La tensión longitudinal fue predominantemente de tracción, alcanzando su pico en el límite entre el material original y las capas donde se aplicaron las cargas térmicas.	[84]
	Inconel 625	Las mediciones mostraron que se formaba una menor RS en los materiales funcionalmente graduados (FGM) de interfaz directa en comparación con los FGM de gradiente suave.	[85]
Contorno y ND	Aleación Ti-6Al-4V, acero inoxidable	La tensión en la placa base varía RS. Los parámetros de la red no eran válidos en la placa base para mediciones ND. Se utilizó el corte de una salida libre de tensión para corregir las muestras de referencia.	[73,74,86]

Tabla 1. Cont.

Métodos	Materiales	Resultados	Árbitros.
XRD	Aleación C-276	La amplitud de la tracción RS se percibió en la dirección de viaje en comparación con la orientación de construcción. La deformación residual en la red revela la RS en el material. La mayor amplitud de RS compresivo se encontró en el eje de construcción.	[87]
	Aleación Al-5356	La altura de la viga puede afectar tanto el nivel como el patrón de RS longitudinal tanto en el sustrato como en la viga. Esta variación afecta principalmente a la RS transversal en el sustrato y tiene una influencia mínima en la propia viga.	[88]
	G 79 5 M21 Mn4Ni1,5CrMo (EN ISO 16834-A) [89]	La RS, la dureza y la microestructura están influenciadas por los parámetros de soldadura, la geometría y el diseño de los componentes. El aporte de calor provoca una disminución de la RS de tracción, lo que provoca una estructura de grano y una respuesta mecánica desfavorables.	[25]
	Acero inoxidable austenítico SS308L (SS)	Acumulación de RS compresivo atribuida a un elevado aporte de calor y velocidades de enfriamiento rápidas. Se produjo una mayor tensión cerca de la base de soldadura que en otras áreas.	[26]
	Aleación Al-6Cu-Mn	El avance de RS indica que el área más crucial de la muestra está cerca del sustrato, donde dominan tensiones de tracción significativas cerca del límite elástico del material.	[27]
	Grado 91 (modificado 9Cr–1Mo) -acero	RS varía las características del material y su estructura microscópica WAAMed ferrítico/martensítico (FM). El tratamiento térmico aplicado al acero fabricado originalmente no eliminó sus propiedades anisotrópicas.	[80]
CID	Inconel 625	Los procesos térmicos de postratamiento pueden mejorar la resistencia a la corrosión y aliviar la RS. Las mediciones indicaron que el enfoque de gradiente suave produjo fases secundarias como la fase δ (Ni3Nb) y carburos, que estaban ausentes en el método de interfaz directa.	[85,90]
	Acero dulce (AWS ER70S-6)	Se empleó DIC para supervisar la distorsión por flexión de los componentes WAAM mientras se liberaban de los perfiles en H sujetos, y las tensiones residuales se dedujeron de la distribución de tensiones observada durante el proceso de liberación.	[77,91]
	Perforación de agujeros profundos	Los RS están bajo compresión en la sección de acero dulce y bajo tensión en la sección de acero inoxidable austenítico (SS). Estas tensiones fluctúan a lo largo del espesor debido a las diferencias en las velocidades de enfriamiento en las superficies interior y exterior.	[78]
Perforación de agujeros	Ti-6Al-4V	El tamaño del grano disminuyó después de la terapia de impacto ultrasónico y la RS de las piezas fabricadas en WAAM después de la UIT mejoró.	[76,92]
Acoplamiento termomecánico y Contorno	Aceros inoxidables (SS) SUS308LSi	RS es extensible en las capas que bordean la superficie superior de la superficie, compresivo en las capas cercanas a la superficie del sustrato y extensible cerca de la parte inferior del sustrato.	[13]

Las técnicas de medición de RS enumeradas en la Tabla 1 generalmente se pueden clasificar en tres categorías: (1) no destructivas; (2) semidestructivo; y (3) destructivas se mencionan en la Tabla 1 con descripciones breves, mientras que algunas de las técnicas no se realizaron en investigaciones anteriores. Las técnicas no destructivas (END) como XRD y ND son métodos comunes de alta precisión y con frecuencia se prefieren para medir RS en componentes WAAM. La elección de los métodos depende de aspectos fundamentales como el material, el tamaño del componente, la geometría y el nivel de precisión requerido para la medición.

Está claro que a partir de las técnicas de medición RS, la ND ha sido utilizada más ampliamente por los investigadores debido a su naturaleza no destructiva, lo que ayuda a mantener la veracidad de las piezas, mientras que la difracción de rayos X es el segundo método utilizado. El gráfico circular que se muestra en la Figura 5 representa las jerarquías de técnicas utilizadas para medir RS en productos WAAM. La deformación elástica en RS se calcula a partir del cambio en el espaciamiento de la red [23]. En este caso, cualquier estrés,

Ya sea externo o residual dentro de un material, conduce a deformaciones y cambios en la red. espaciado. La tensión se determina midiendo la distancia de la red en diferentes ángulos de inclinación usando Ley de Bragg, que explica la difracción de rayos X en planos de la red cristalina. De varios END Para identificar RS, se seleccionó principalmente XRD debido a su capacidad de penetrar aproximadamente 10 µm y proporciona una resolución espacial que oscila entre 10 µm y 1 mm, lo que lo hace particularmente Adecuado para aplicaciones de placas delgadas [26].

Aplica. Mec. 2024, 5, PARA REVISIÓN POR PARES

10

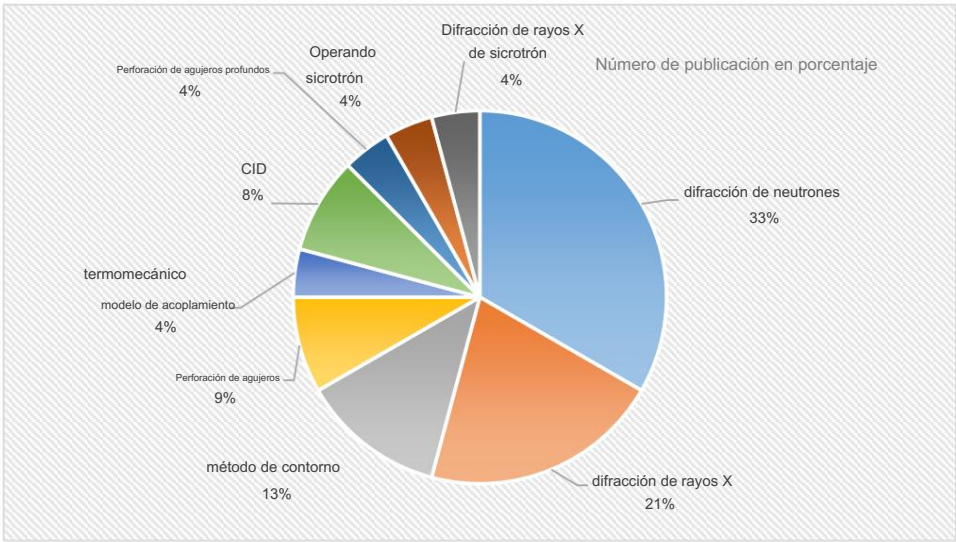


Figura 5. Distribución del campo de investigación en gráfico circular ordenado según la cantidad de RS.

3.3.2. Análisis numérico de RS en Productos WAAM

Detrás del análisis numérico de RS, existen modelos matemáticos a menudo basados en análisis de elementos finitos (FEA) u otros métodos computacionales, y los mismos procedimientos se realizan para determinar RS en el proceso WAAM para simular procesos térmicos y mecánicos que ocurren durante la AM. Estos modelos incorporan propiedades materiales, procesos procánicos que ocurren parámetros de proceso [68] y condiciones límite para simular la deposición, mientras que los parámetros de proceso térmico [68] y condiciones límite para simular la deposición, mientras que las técnicas de medición de calor mencionan la proporción más alta y/o Las técnicas de medición mencionan la proporción más alta y/o la proporción más baja transferencia de calor, así como los procesos de enfriamiento posteriores. Resolviendo ecuaciones que rigen la transferencia de calor, las simulaciones numéricas predicen la evolución de RS dentro de la pieza de manera similar, una transferencia de calor, las simulaciones numéricas predicen la evolución de RS dentro de la pieza de manera similar, una Los análisis numéricos de los componentes WAAM [93] en Tabla 2 proporciona descripciones generales de la deformación del análisis numérico en los componentes WAAM. La Tabla 2 proporciona descripciones generales del análisis numérico. técnicas, materias primas y sus resultados cuando se utilizan en el proceso WAAM.

Tabla 2. Descripción general del análisis numérico informado utilizando el método de elementos finitos (FEM), herramientas y materiales relacionados con las tecnologías WAAM.

Material FEM		Resumen de materiales		Árbitro.
Software FEM	Softwares	Se realizó una evaluación mecánica del acero WAAM B91 (ER90S-secuencialmente para evaluar la variación de la tensión residual en todo el acero B91).		Árbitro.
ANSYS 2019	ANSYS 2019	Acero B91 (ER90S-B91)	Se realizó una evaluación termomecánica del acero WAAM B91.	[11]
ANSYS 2019	Simufact	acero)	componente realizado secuencialmente para evaluar la variación en la tensión residual Los cambios en el campo de temperatura, la alteración, la acumulación de tensiones y la deformación	[11]
Aditivo Simufact 2023.2	Aditivo	Aceros	tiene una importancia significativa para aplicaciones que implican altas temperaturas. Los cambios dinámicos de temperatura, la alteración, la acumulación de tensiones, y la deformación tienen una importancia significativa para las aplicaciones	[40]
	2023.2	Aceros	El patrón de deposición y de velocidad de desplazamiento tienen un impacto en RS y alabeo en las piezas WAAM. Los resultados de las simulaciones termomecánicas de FE muestran que el patrón de deposición y de velocidad de desplazamiento de RS y alabeo.	[40]
ABAQUS 2019	Aleación de aluminio	Aleación de aluminio	El patrón de deposición y de velocidad de desplazamiento de RS y alabeo.	[94]
	ABACO 2019	Aleación de aluminio	El aumento de la velocidad de desplazamiento de deposición a temperatura ambiente y el gradiente térmico en [94] no es necesario RS y alabeo. Al aumentar la velocidad de desplazamiento se reduce la deformación térmica y la tensión residual.	[94]
Inconel 718		Se utilizó un modelo integral de transferencia de calor, tensión y deformación para calcular la distribución de temperatura y el gradiente en el proceso WAAM para varios [95]		
		parámetros del proceso, lo que da como resultado RS. Los datos de temperatura derivados se utilizaron en un modelo mecánico para pronosticar RS y distorsión.		

Tabla 2. Cont.

Software FEM	Material	Resumen Se	Árbitro.
ABAQUS 2010	Inconel 718	utilizó un modelo completo de transferencia de calor transitoria en 3D para calcular la distribución de temperatura y el gradiente en el proceso WAAM para varios parámetros del proceso, lo que da como resultado RS. Los datos de temperatura derivados se utilizaron en un modelo mecánico para pronosticar RS y distorsión.	[95]
	Acero carbono	Los resultados del modelado indican que a medida que aumenta el recuento de capas depositadas , la temperatura máxima aumenta, lo que da como resultado RS, mientras que la velocidad de enfriamiento promedio disminuye.	[96]
	Acero inoxidable austenítico (304) y acero bajo en carbono (A36)	Al alterar sistemáticamente una propiedad mecánica a la vez, aislamos la influencia de cada una en la formación de RS en soldaduras diferentes. Los resultados muestran que la tensión residual longitudinal en soldaduras iguales y diferentes puede disminuir dentro de la zona de soldadura en una cantidad equivalente a la tensión causada por la fuerza de tracción mecánica aplicada una vez que la fuerza tensora se libera después del enfriamiento.	[97]
	Acero API X65	Las condiciones térmicas y RS se pronostican precisamente para permitir la regulación de la forma, la microestructura y las características mecánicas de la zona de fusión en la junta de soldadura por arco sumergido.	[98]
ABAQUS 2019	Acero estructural Cable ER70S-6	Se examinaron la tensión residual y la deformación de dos construcciones extensas, revelando hallazgos numéricos altamente consistentes y una correspondencia favorable con los resultados experimentales.	[99]
	acero EH36	El efecto de la velocidad de escaneo sobre los perfiles térmicos y RS indica que velocidades de escaneo más altas dan como resultado temperaturas máximas reducidas y velocidades de enfriamiento elevadas, lo que conduce a un aumento en la porción de volumen de martensita dentro de la deposición.	[100]
	Aleación de aluminio	La RS y la deformación se calcularon utilizando el método de fuentes de calor en movimiento (MHS) y el método de función de temperatura segmentada (STF).	[101]
	Ti-6Al-4V, acero S355JR y AA2319	Los radios de perfil reducidos del rodillo eliminan eficazmente casi todos los RS de tracción cerca de las superficies.	[32]
MSC. marzo 2021	Y309L	Se genera RS elevada dentro de las capas de deposición y también en el centro del sustrato.	[102]
MSC. marzo 2014.2.0	Relleno para soldadura G3Si1	La simulación y validación de las variaciones de geometría y microestructura dentro de las pasadas de soldadura se realizaron con realidad RS y simulación utilizando la medición de la inercia de los termopares.	[103]
	S316L	Las variaciones en RS están influenciadas tanto por la distribución fluctuante de la temperatura durante la fase de congelación como por las fuerzas aplicadas a la estructura WAAM después del proceso de enfriamiento.	[104]
COMSOL-5.4 2018	Acero inoxidable 304	Se utilizaron imágenes a gran escala y grabaciones de alta velocidad para el muro construido para verificar la precisión de las mediciones del baño fundido y la forma de la deposición determinada, lo que decidió la RS en partes.	[105]

Drexler y cols. [106] abordaron el modelado numérico de RS y las distorsiones que ocurren en piezas WAAM con deposición de tejido. Las tensiones térmicas pronosticadas numéricamente en varias capas de soldadura se representaron para la evaluación experimental posterior realizada en [107]. De manera similar, la simulación de elementos finitos (FE), junto con el análisis térmico, generaron caminos apropiados al segmentar un escaneo de superficie 3D del área de reparación prevista [41]. Como se ilustra en el gráfico circular de la Figura 6 (ref. también Tabla 2), la mayor parte del análisis numérico de RS se investigó utilizando ABAQUS 2010 y 2019.

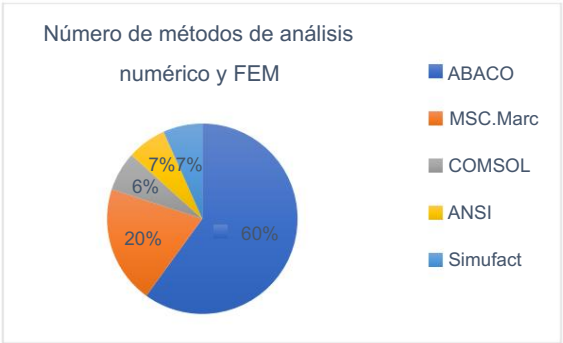


Figura 6. Cantidad de publicaciones sobre FEM utilizadas para RS en el proceso WAAM publicadas con alguna Figura 6. **Figura 6.** Cantidad de publicaciones sobre FEM utilizadas para RS en el proceso WAAM publicadas con alguna

3.4. Factores que influyen en RS en WAAM

Investigadores e ingenieros pueden caracterizar y comprender el comportamiento de RS en WAAM

empleando métodos experimentales y análisis de elementos finitos (FEA) para comprender el proceso WAAM mediante el empleo

rendimiento del producto. Muchos parámetros del proceso, calidad de las piezas y rendimiento del producto.

Muchos de los que pueden influir en RS en piezas WAAM se analizan en [181], mientras que un perfil que incluye un

Los parámetros que pueden influir en RS en piezas WAAM se analizan en [118], mientras que se estudió un perfil que evalúa

la altura general, el ancho y la suavidad de cada pared generada.

La pared fue estudiada y reportada en [108]. Los parámetros de deposición [109], el aporte de calor, la capa intermedia y la

duración de las pausas entre capas fueron factores importantes que influyeron en la formación.

La temperatura y la duración de las pausas entre capas fueron factores importantes que influyeron en la

distribución de los poros en las aleaciones de aluminio 5183 impresas en el proceso WAAM [110].

formación y distribución de poros en aleaciones de aluminio 5183 impresas en el WAAM pro-De manera similar, diferentes

velocidades de recorrido de soldadura a las que los defectos se vuelven perceptibles también implican

acceso [110]. De manera similar, existen diferentes velocidades de desplazamiento de soldadura a las que los defectos se vuelven perceptibles

tanto en la velocidad de alimentación del alambre como en la velocidad de desplazamiento en el proceso de soldadura [111].

También implican tanto la velocidad de alimentación del alambre como la velocidad de desplazamiento en el proceso de soldadura

[111]. Por el contrario, se encontró que el espesor (del lecho o de la placa base) tiene una influencia importante en la distribución de RS.

Se encontró que el espesor del sustrato (lecho o placa base) tiene una influencia importante en la altura del depósito de

distensión de RS. Debido al sustrato, la resistencia a la tracción RS es tan alta como el valor del material.

distribución a lo largo de la altura del depósito. Debido al sustrato, la RS de tracción tan alta como el valor del material.

El límite elástico del material se analizó en [112]. Las distribuciones RS en ambas direcciones longitudinal- transversal

indican que la tensión longitudinal se desliza significativamente desde la compresión.

Las direcciones final y transversal indican que la tensión longitudinal cambia significativamente durante la

deposición hasta la tensión en la placa base [113].

compresión durante la deposición a tensión en la placa base [113].

Además, un sustrato más grueso induce una mayor RS que un sustrato más delgado. un sustrato

Además, un sustrato más grueso induce una mayor RS que un sustrato más delgado. Un sustrato que se utiliza para

dejar caer una piscina fundida (proceso de impresión) puede estar hecho de 2×××

que se utiliza para el baño fundido (proceso de impresión) puede estar hecho de una placa de aleación

de aluminio-aluminio 2××× para materia prima de aleación de aluminio [114,115]. En la impresión 3D directa

placa de aleación numérica para materia prima de aleación de aluminio [114,115]. En el proceso de impresión

3D directa, la posición de la muestra impresa influye en la calidad de las piezas impresas [64].

La posición de la muestra impresa influye en la calidad de las piezas impresas [64]. Esto se debe a que la expansión de las

isotermas no llega al fondo de una placa gruesa, lo que resulta

porque la expansión de las isotermas no llega al fondo de una placa gruesa, lo que da como resultado una

mayor acumulación de calor [116,117]. La técnica que controla RS inherente y las distorsiones enfrenta

aumento de la acumulación de calor [116,117]. La técnica que controla el RS inherente y las distorsiones enfrenta

numerosos desafíos en los productos WAAM, lo que lleva a resultados impredecibles.

voltaje, corriente, velocidad de viaje y altura de capa [128]. Estos parámetros gobiernan varios aspectos del proceso de deposición, incluido el aporte de calor, la velocidad de enfriamiento y los gradientes térmicos. Comprender cómo las alteraciones en estos parámetros influyen en la RS es vital para lograr un rendimiento óptimo del producto WAAM [111]. La selección de los parámetros de geometría del cordón en el proceso WAAM es necesaria para optimizar el exceso de materiales y minimizar el vacío creado en las múltiples capas de deposiciones de cordón. Los parámetros del proceso y otros factores que influyen en la RS en los componentes WAAM se resumen y enumeran en la Tabla 3.

Tabla 3. Factores que influyen en la RS en la fabricación aditiva por arco eléctrico.

Parámetros del proceso y Otros factores	Breve descripción	Árbitros.
Propiedades de los materiales: soldabilidad de los materiales.	No todos los materiales son igualmente adecuados para WAAM. El proceso a menudo requiere materiales con buenas características de soldabilidad, como baja susceptibilidad al agrietamiento y buenas propiedades de fusión. Por ejemplo, la conductividad térmica de los materiales, el coeficiente de expansión térmica y las transformaciones de fase pueden afectar la RS inducida.	[13,34,129,130]
Poder de deposición: corriente y voltaje del arco	En el proceso WAAM, controlar la entrada de calor es fundamental para evitar el sobrecalentamiento, la distorsión y problemas metalúrgicos, como el crecimiento excesivo de grano o transformaciones de fase. Las variaciones en el aporte de calor alteran las consecuencias de la RS en la soldabilidad de los materiales.	[25,65,66,114,130,131]
Velocidad: velocidad de alimentación del alambre, velocidad de recorrido de soldadura y tasa de deposición	La deposición y el enfriamiento rápidos pueden provocar un aumento de RS, especialmente cerca de la zona de deposición. La rápida solidificación y la mayor tasa de deposición pueden causar gradientes térmicos y velocidades de enfriamiento diferenciales, lo que resulta en niveles más altos de RS de tracción. El aumento de la velocidad de desplazamiento de la soldadura reduce la cantidad de tiempo que el material pasa en la zona de alta temperatura y conduce a la reducción de la magnitud de RS.	[113,132–134]
Gas de protección: tipos de gas de protección y caudal de gas de protección	El gas protector desempeña un papel crucial en los procesos WAAM, ya que protege el baño de soldadura fundida de la contaminación atmosférica e influye en las características de transferencia de calor durante la deposición. El tipo de gas protector, los caudales de gas como argón y helio y los gases reactivos como CO2 y O2 pueden tener efectos significativos en la formación de RS en productos WAAM.	[3,37,135]
Distancia de la boquilla: Distancia entre la punta de la boquilla y el trabajo (Distancias del soplete de soldadura)	La distancia del soplete en los procesos WAAM puede tener una influencia significativa en la RS en los productos finales. Optimizar la distancia entre la punta de la boquilla y la distancia de trabajo en los procesos WAAM implica equilibrar la entrada de calor, las velocidades de enfriamiento, el control de la distorsión, la unión entre capas y la formación de defectos para minimizar la RS y garantizar la producción de piezas de alta calidad.	[23,24]
Posición de impresión: Electrodo a ángulo de capa (cable) (θ) y altura de capa	La posición de impresión afecta la disipación y acumulación de calor, lo que influye en la velocidad de enfriamiento y los gradientes térmicos dentro de la pieza. La posición de impresión afecta el flujo de metal fundido y la geometría de las perlas depositadas da como resultado una variación de RS.	[36,64,128,136,137]
Espesor de capa: Espesor del sustrato, espesor de deposición	Disminuir el espesor de la capa en la fabricación WAAM puede conducir a ciclos térmicos más cortos y a una reducción del aporte de calor por capa. Esto puede resultar en una RS general más baja debido a una menor distorsión térmica y un tamaño reducido de la ZAT.	[124,138]
Velocidad de enfriamiento: tiempo de deposición de la capa, tiempo de permanencia entre capas	Los rápidos ciclos de calentamiento y enfriamiento involucrados en WAAM pueden conducir al desarrollo de RS significativos y distorsión en las piezas fabricadas. Estos pueden afectar negativamente la integridad estructural y la precisión dimensional de los componentes, lo que dificulta lograr las propiedades de soldadura deseadas y, como resultado, cambiar el RS en las piezas impresas.	[57–60,102,136]
Precalentamiento del sustrato (Plato base)	El precalentamiento del sustrato en los procesos WAAM ofrece varios beneficios para gestionar RS en los productos finales. Al reducir los gradientes térmicos, mitigar la distorsión, mejorar la unión metalúrgica, mejorar la ductilidad y optimizar las velocidades de enfriamiento, el precalentamiento ayuda a crear piezas con niveles más bajos de RS y propiedades mecánicas mejoradas.	[96,137,138]
Geometría de la pieza: formas de las piezas impresas y volumen de las piezas	La geometría de las piezas impresas en los procesos WAAM influye significativamente en RS. Comprender cómo la complejidad de la forma, la orientación de las piezas, el volumen y los patrones de acumulación de material afectan los gradientes térmicos y las velocidades de enfriamiento es crucial para gestionar RS y garantizar la producción de piezas de alta calidad con las propiedades mecánicas y la precisión dimensional deseadas en WAAM.	[9,26]
Posterior a la soldadura de tratamiento térmico (PWHT)	PWHT juega un papel crucial en la gestión de RS en los productos WAAM. Al someter las piezas a ciclos controlados de calentamiento y enfriamiento, PWHT puede aliviar eficazmente la RS, mejorar las propiedades del material y mejorar la calidad general y la implementación de las piezas fabricadas.	[1,4,60,112,139]
Patrón de escaneo	El patrón de escaneo juega un papel crucial al influir en la acumulación de calor, las velocidades de enfriamiento durante la deposición de AM y, en consecuencia, la formación de RS.	[100]
Relleno de alambre: relleno de alambre diámetros y calidad del alambre	El diámetro del alambre de relleno y la calidad del alambre son dos factores clave que pueden influir significativamente en el RS en los productos WAAM.	No estudiado

15

donde v es la velocidad de desplazamiento. Vora et al. [147] investigaron que el voltaje tenía la mayor influencia en el ancho de la perla, seguido de la velocidad de desplazamiento y la proporción de la mezcla de gases.

características [143]. Con base en la hipótesis de la disipación de energía y las ecuaciones asociadas, varios procesos de fabricación aditiva que utilizan haces de energía se pueden comparar más a fondo cuando se someten a la misma entrada de energía. Esta comparación sirve como base para determinar los parámetros iniciales del proceso y el ajuste dinámico de los parámetros principales [146]. La cantidad de calor generado en el arco de soldadura por unidad de longitud de la soldadura se expresa en kilojulios por milímetro de longitud de la soldadura (kJ/mm), como se muestra en la Ecuación (1).

$$\text{Energía del arco (kJ/mm)} = \text{Voltios} \times \text{Amperios} = V \times I \quad (1)$$

donde V está en voltios e I está en amperios (A). La cantidad de calor generado en el arco de soldadura por unidad de longitud del proceso de soldadura se representa en la Ecuación (2), y de diferentes formas según la norma ASME IX QW-409.1 de la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Mecánicos [132].

$$\text{Entrada de calor (J/mm)} = \frac{\text{Voltios} \times \text{Amperios} \times 60}{\text{Velocidad de desplazamiento (mm/min)}} = \frac{V \times A}{v} \quad (2)$$

donde v es la velocidad de desplazamiento. Vora et al. [147] investigaron que el voltaje tenía la mayor influencia en el ancho de la perla, seguido de la velocidad de desplazamiento y la proporción de la mezcla de gases.

Se supone que la capa depositada durante el proceso de fabricación para la formación de perlas es semicircular. La tasa de deposición, R, que está influenciada por el diámetro del alambre, la velocidad de alimentación del alambre y la densidad del alambre, se expresa como la Ecuación (3).

$$R = \frac{\pi d^2 v_p}{4} = \rho v A_{ww} \quad (3)$$

donde d es el diámetro del alambre, v es la velocidad de alimentación del alambre (WFS) y ρ es la densidad del alambre y el área de la sección transversal del alambre de soldadura A_{ww} .

4. Impacto de RS en las propiedades mecánicas de los componentes WAAM Aunque

WAAM ha demostrado su capacidad para producir componentes de aluminio de tamaño mediano a grande para la industria automotriz y afines, aún no puede servir como un método de producción integral debido a desafíos prácticos. tales como propiedades mecánicas inigualables y RS significativo [148]. RS afecta significativamente a los materiales y características mecánicas del componente fabricado. Por ejemplo, puede afectar las propiedades mecánicas, como la resistencia, la dureza y la ductilidad de los productos, al hacerlos diferentes de las propiedades intrínsecas del material. Un alto suministro de calor en el proceso WAAM da como resultado una tensión de tracción reducida dentro del componente y puede conducir a propiedades mecánicas y microestructura indeseables [149,150].

Las características microestructurales tienen un impacto en las propiedades de los materiales de los productos fabricados por WAAM, incluidos los niveles de tensión residual. La microestructura de los productos WAAM desempeña un papel fundamental en el desarrollo y distribución de RS, lo que afecta a muchas propiedades mecánicas interrelacionadas. Debido a la existencia de RS en los productos WAAM causado por el aumento de la velocidad de soldadura o del parámetro de distribución del calor, las propiedades del material pueden variar significativamente [103,151]. La microestructura resultante y el nivel de RS en WAAM están directamente correlacionados con las propiedades mecánicas finales. La investigación sobre la porosidad interna en las perlas formadas y su capacidad para producir componentes a gran escala demuestra propiedades inadecuadas de tracción y fatiga [152]. Esta porosidad es el resultado de la RS al afectar el proceso de solidificación y la capacidad del gas para escapar durante la deposición [153,154].

De manera similar, RS puede influir en diversas propiedades mecánicas de las piezas fabricadas de varias maneras al cambiar la resistencia, tenacidad, microestructura, vida a fatiga, agrietamiento y delaminación de los productos WAAM [152,155].

Los RS formados durante el proceso de fabricación impactan notablemente el rendimiento mecánico y pueden provocar desprendimiento de las estructuras de soporte, deformaciones de forma no deseadas e iniciación prematura de grietas [76]. Los parámetros de entrada, la microestructura resultante, los tratamientos posteriores a la fabricación y la RS tienen impactos significativos en la mecánica fina

5,5. El miniario, puede influir en diversas propiedades mecánicas de las piezas de fabricación de varias maneras al cambiar la resistencia, la tenacidad, la microestructura, la vida a la fatiga, el agrietamiento y la delaminación de los productos WAAM [152,155].

Los RS formados durante el proceso de fabricación impactan notablemente el rendimiento mecánico y pueden provocar desprendimiento de las estructuras de soporte, deformaciones de forma no deseadas e iniciación prematura de grietas [76]. Los parámetros de entrada, la microestructura resultante, los tratamientos posteriores a la fabricación y la RS tienen impactos significativos en las características mecánicas finales de los productos WAAM. El RS puede ser influenciado por la precisión del posicionamiento del soplete de arco sino también por la estabilidad del proceso de deposición [158].

La Figura 8 muestra los efectos de las RS inherentes a las piezas WAAM donde se recalienta y refunde. Las uniones se forman como la tecnología durante el proceso de fabricación. Para lograr una buena estructura de granola en profundidad, la profundidad de penetración de la deformación plástica debe exceder la suma de la profundidad de refundición y la altura de la capa depositada. Para mejorar la microestructura, la profundidad mínima de deformación plástica debe exceder la profundidad combinada de refundición y la altura de la capa recién depositada [32].

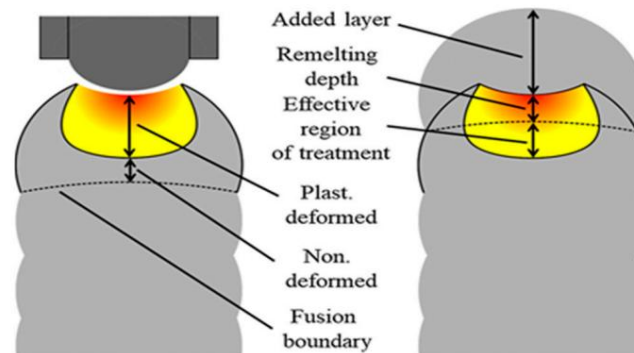


Figura 8. Diagrama que ilustra el fenómeno de refundición que ocurre durante el proceso de deposición. Diagrama que ilustra el fenómeno de refundición que ocurre durante el proceso de deposición [32]. Copyright 2019, según licencia CC BY, acceso abierto.

Los experimentos para la investigación RS de RS se realizaron en productos WAAM producidos a un nivel de preestimiento de los parámetros de utilización y control de soldadura y los parámetros de deposición de la formación de la pieza de deposición de un ciclo de deposición por unidad de longitud se explica en [49]. Aunque la tecnología WAAM es energéticamente eficiente El método de fabricación para la producción de metales, las acumulaciones de calor durante la deposición, los resultados de las propiedades metalúrgicas y mecánicas asociadas pueden cambiar los perfiles RS en todo el mundo. sección transversal de los componentes fabricados [11,13,159]. El impacto de la orientación de la construcción y programa de tratamiento térmico sobre la microestructura y propiedades mecánicas de paredes delgadas Los componentes se examinaron en [160]. Las distribuciones de RS dentro del componente a lo largo la ruta de deposición, tanto interna como externamente, son iguales a cero [161,162].

En general, comprender y controlar RS son esenciales para garantizar el funcionamiento mecánico, confiabilidad, precisión dimensional y rendimiento funcional de los productos WAAM en varias aplicaciones. Muchos esfuerzos de investigación se centraron en caracterizar RS, desarrollar predictivos modelos e implementación de técnicas de fabricación avanzadas, que son fundamentales para avanzar en el campo de WAAM y desbloquear todo su potencial en aplicaciones industriales [100].

Comprender la distribución del aporte de calor y sus implicaciones, incluidas las transitorias, distribución de temperatura, transformación de materiales, acumulación de tensiones y distorsión, Tiene una relevancia significativa para aplicaciones que involucran aceros de alta resistencia. La simulación numérica puede ofrecer información valiosa para evaluar estos factores [40]. El RS y la deformación, impactan significativamente el rendimiento de los componentes [97]. Como resultado de ciclos repetitivos, RS queda confinado dentro de los componentes, provocando una serie de defectos como grietas, deformaciones, deformaciones y disminución de la vida útil de los componentes [163].

5. Estrategias de mitigación para RS en WAAM y aplicaciones prácticas

La generación de RS y la distorsión en partes impide su amplia adopción debido a la Historias intrincadas de acumulación térmica características de los componentes WAAM [164]. Sin embargo, Las estrategias de mitigación para RS en varios procesos de fabricación en WAAM involucran varias técnicas para reducir o gestionar el RS que pueden afectar la confiabilidad y funcionalidad de componentes fabricados. Un proceso híbrido de WAAM y laminación a alta presión capaz de construir componentes a gran escala produce RS y distorsión poco perjudiciales [165,166]. En el De la misma manera, los métodos numéricos pueden ofrecer una comprensión adicional de cómo se puede rodar.

utilizado eficazmente para disminuir RS y generar las tensiones plásticas necesarias para mejorar propiedades microestructurales [32]. Combinando el proceso WAAM con otras fabricaciones Los procesos, incluido el mecanizado o las técnicas sustractivas, pueden ayudar a eliminar el exceso. material. Esta fabricación híbrida se utiliza en la industria de dispositivos médicos para producir piezas WAAM de baja tensión con geometrías complejas o agregar características complementarias para reducir RS [167].

Controlar RS es vital para garantizar la durabilidad y confiabilidad de estos componentes críticos [130]. Una recopilación de diferentes métodos para mitigar RS y distorsión en WAAM se ha creado para ofrecer un modelo para futuros avances [168]. Finito La simulación elemento-proceso ofrece un método eficaz para explorar estrategias para mitigar estos distorsiones y RS [169]. Algunos métodos proporcionaron técnicas para manejar RS, mejorar las propiedades mecánicas y eliminar defectos como la porosidad [10,170]. Algunas mitigaciones comunes Las estrategias y aplicaciones prácticas se enumeran y explican con aplicaciones prácticas en Tabla 4.

Tabla 4. Estrategias de mitigación para RS y aplicaciones prácticas.

Métodos	Materiales y Estrategias	Aplicaciones prácticas y resultados	Árbitros.
Pase intermedio rodando	Aleación Ti-6Al-4V	Mejora la unión y adhesión entre las sucesivas capas de material. También ayuda a redistribuir las tensiones aplicando fuerza de compresión, Lo que lleva a estructuras de grano refinadas y minimiza la distorsión da como resultado RS.	[24,75,76,171]
Tratamiento térmico (HT)	Acero grado 91, Ti-6Al-4V	El posprocesamiento HT implica ciclos controlados de calentamiento y enfriamiento para aliviar RS. HT se utiliza ampliamente en el sector aeroespacial para reducir RS en WAAM producirá álabes de turbina, mejorando la vida a fatiga y el rendimiento.	[82,139,172]
Granallado	aleación de aluminio 2319	El shot peening consiste en someter la superficie de un componente a un bombardeo. con partículas pequeñas y de alta velocidad para inducir tensiones de compresión que contrarrestar la tracción RS. Se emplea en el sector del automóvil para mejorar la Resistencia a la fatiga de los componentes de suspensión producidos por WAAM.	[173,174]
Rolling y láser granallado por choque	Acero bajo en carbono	Los métodos eliminan las dañinas RS de tracción en la parte superior de la pared WAAM, mejorando así la vida a fatiga y ralentizando las tasas de crecimiento de grietas. El La región inferior de la pared WAAM demuestra condiciones RS mejoradas, lo que conduce a un mejor rendimiento ante la fatiga, todo ello logrado sin superficie tratamiento rodante.	[175]
Laminación	AA2319, acero S335JR	El aumento de las cargas rodantes da como resultado una tensión plástica equivalente máxima elevada y una penetración más profunda de la deformación plástica equivalente da como resultado RS.	[32]
Parámetro mejoramiento	Aleación Al-Cu4.3-Mg1.5	Ajuste de los parámetros del proceso WAAM, como la velocidad de deposición y la capa espesor, puede optimizar las condiciones de construcción para disminuir RS. Sistemático La optimización de parámetros se aplica en la industria de la construcción para reducir RS. en estructuras metálicas impresas con WAAM a gran escala.	[36]
Selección de materiales	aleaciones de aluminio	Elegir materiales con propiedades personalizadas, como baja expansión térmica. coeficientes, puede minimizar la formación de RS durante WAAM. Especializado Los materiales se utilizan en el sector energético para crear WAAM de alto rendimiento. componentes con RS reducido.	[176,177]
Monitoreo en proceso y control	IN718 Superalación	Los sistemas de monitoreo y control en tiempo real ajustan los parámetros del proceso durante WAAM para minimizar la formación de RS. El seguimiento y control durante el proceso son utilizado en la fabricación aeroespacial para reducir las variaciones de RS en puntos críticos componentes del motor.	[178]
Laminación en caliente y formación en frío	Alambre de soldadura ER70S-6	La incorporación de refuerzos WAAM en las puntas de las alas de los laminados en caliente. Se ha demostrado que las secciones en I dan como resultado la creación de RS de tracción favorables, los cuales son beneficiosos para la estabilidad estructural, alcanzando valores máximos equivalente al límite elástico del material.	[179]
Granallado y UIT	Aleación de Ti y aleación de Al	Mediante el Tratamiento por Impacto Ultrasónico (UIT), el refinamiento del grano y la Se logra la aleatorización de la orientación, lo que contribuye a la mejora de RS y resistencia mecánica.	[180]
Laminación	Aleaciones de titanio	Ofrece ventajas sustanciales como la disminución de RS y la distorsión, además como refinar la estructura del grano.	[181]

En este estudio, exploramos cómo varios factores, como los parámetros del proceso, el sustrato El calentamiento y el enfriamiento influyen en la apariencia de las perlas formadas durante WAAM de Inconel 625 en

mientras que el monitoreo y control de procesos son los métodos de mitigación utilizados durante el proceso de impresión.

Se desarrolló un enfoque para analizar la forma del muro construido, centrándose en el acero EN 8. Además, el historial de deposición de la lámina fundida durante la deposición, en su simetría inherente para garantizar la utilización eficiente del material. Además, emplea el uso de un primer muro de refuerzo (m3) para seleccionar el tamaño de la lámina fundida como los factores afectan la técnica de termografía para monitorear la simetría del charco de fusión [18]. Esta velocidad de enfriamiento del volumen, que a su vez afecta la geometría del cordón [137-182]. Por lo morfológico La geometría de depósito V (m3) se deduce fácilmente del recorrido (y más concretamente del aspecto de las perlas, es fundamental respetar el volumen de material suministrado y el tamaño).

La geometría de depósito V (m3) se deduce fácilmente del recorrido (más concretamente del aspecto de las perlas, es fundamental respetar el volumen de material suministrado y el tamaño).
[longitud de recorrido de la trayectoria de soldadura lscan (m)], la velocidad del alambre vw (m s⁻¹), el diámetro de la pieza [183]. Los gráficos de la Figura 9 ilustran la distribución del trabajo publicado sobre el alambre dw (m) y la velocidad de soldadura vt (m s⁻¹) [26-142] como se expresa en la Ecuación (4).
entonces utilizados para validar el estrés residual y la indicación de la frecuencia de su adopción

en aplicaciones WAAM. Estos gráficos presentan diferentes métodos de mitigación de RS en el

Proceso WAAM versus el número utilizado de métodos publicados en artículos.

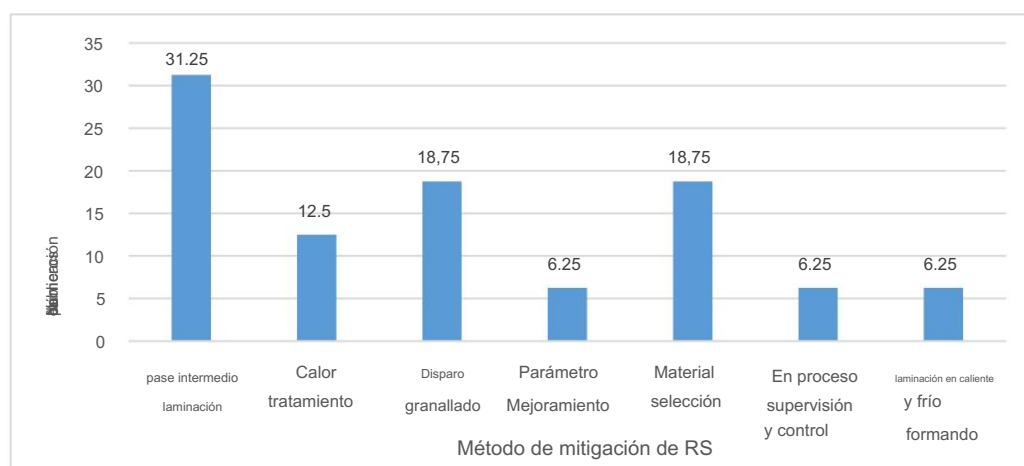


Figura 9. Método de minimización de RS versus multiplicación en porcentaje.

[illegible]

alturas persistentes de las capas de cuentas [188]. Un segmento geoméricamente defectuoso de una cuenta, o geométrico, (4)

Un defecto es un defecto que produce huecos dentro de la pieza impresa final debido a una fusión incompleta

entre dos segmentos de cuentas superpuestos de forma irregular [189]. Es preferible Para ver el ancho particular

perla del baño fundido durante el proceso WAAM, la forma de la perla se muestra en la Figura 10. Estos parámetros son importantes porque los cordones más anchos ofrecen material mejorado. La configuración geométrica del cordón de soldadura creado a través de WAAM difiere de la Figura 10. Los parámetros de soldadura convencionales [190, 191]. El perfil del cordón en la cobertura del sustrato, lo que produce un acabado superficial más suave, manteniendo al mismo tiempo una altura controlada del cordón. puede considerarse como una forma de perla parabólica simétrica, que se proporcione en la Figura 10 y se presente en la Ecuación (5).

Se requiere un perfil para establecer la relación entre los diferentes parámetros del proceso. Alguno

Los estudios consideran las formas de las cuentas formadas en el proceso WAAM como elipses [184,185]. El

El proceso WAAM construye piezas intrincadas mediante capas de cordones de soldadura. Es vital modelar ambos cordones de soldadura individuales y la superposición de múltiples cordones para garantizar una superficie superior sustituido en la ecuación de la parábola para encontrar las constantes a y c . Los puntos de inflexión, o calidad y precisión dimensional en las piezas fabricadas. Esto comienza desarrollando modelos.

para cordones de soldadura únicos utilizando diversas técnicas de ajuste de curvas [186,187].

El caudal volumétrico se expresa en la Ecuación (8),

= ×

437
(8)

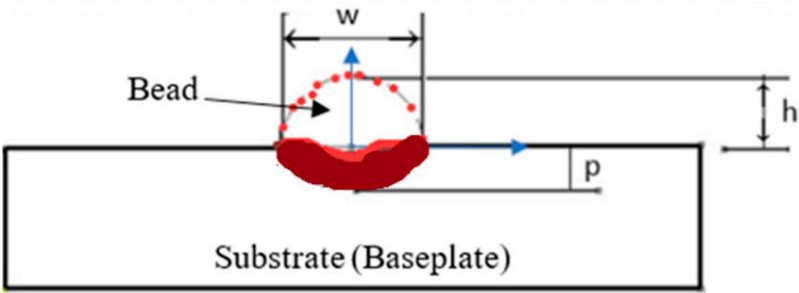


Figura 10. Formación de cuentas de perfil parabólico durante el proceso WAAM.

La configuración geométrica de diferentes peldaños superpuestos puede ser modelada por una algoritmo , determina las condiciones de proceso requeridas para que ambos materiales alcancen niveles consistentes. alturas de las capas de cuentas [188]. Un segmento geométricamente defectuoso de una cuenta, o defecto geométrico, Es un defecto que produce huecos dentro de la pieza impresa final debido a una fusión incompleta. (9) entre dos segmentos de cuentas superpuestos de forma irregular [189] es preferible escribir donde dw es el diámetro del alambre y es la velocidad del alambre. Igualar las ecuaciones (8) y la misma parábola en términos de los parámetros del proceso vw, velocidad de alimentación del alambre y vt- antorcha. (9), el ancho w del cordón se determina a partir de la ecuación (10). velocidad. La configuración geométrica del cordón de soldadura creado mediante WAAM difiere de el de los métodos de soldadura convencionales [190-191]. El perfil del cordón sobre el sustrato puede ser considerada como una forma de parábola simétrica, que se proporciona en la Figura 10 y se presenta en la Ecuación (5). A partir de la Ecuación (10), al reemplazar w en la Ecuación (6) se obtendrá la Ecuación (11).

y = a + cx²

(5)
(11)

Para resolver a y c en la ecuación (5), el espesor (alto) y el ancho de las cuentas son sustituido en la ecuación de la parábola para encontrar las constantes a y c. Los puntos de inflexión para los diferentes diámetros de alambre, las penas formadas varían en espesor y anchura. Como se indica en la Figura 10, para esta forma de ecuación la parábola es cóncava hacia abajo, porque el resultado de c < 0, como se muestra en la Figura 10, y el perfil del cordón expresado como incluyendo el ángulo de la antorcha, la velocidad de desplazamiento del alambre, la velocidad de alimentación del relleno y las condiciones de enfriamiento [192]. La ecuación parabólica se puede resolver como la ecuación (6). Para un espesor de capa particular (h), ancho del cordón (w) y velocidad del soplete (v), la ecuación (12) proporciona el caudal volumétrico (Q) requerido para el llenado completo. 4h

a = h; c = -w²

(12)

Establecer el parámetro óptimo en el proceso WAAM sería ventajoso para y = h - ^{2hx}₂ la deposición gradual de cordones de soldadura capa por capa en la AM de los componentes [193,194]. Koli et al. [128] estudiaron los productos WAAM hechos de alambre de SS308L con un diámetro de 1,2 mm. El área de una cuenta (área de la cuenta parabólica) en relación con su parámetro geométrico es eter utilizado para fabricar las muestras. Los parámetros, como la velocidad de soldadura y la corriente del arco, se obtienen de la ecuación (7).

Una = ^{2hw}₃

(7)

El caudal volumétrico se expresa en la Ecuación (8),

q = ²_{-hw × vt 3}

(8)

Para el alambre, cuando fluye el baño fundido, el caudal volumétrico lo proporciona Ecuación (9).

q = ^π₄ d²_w × vw

(9)

donde dw es el diámetro del alambre y vw es la velocidad del alambre. Igualando las ecuaciones (8) y (9), el ancho w del cordón se determina a partir de la ecuación (10).

w = ^{3πd²_wvw}_{8hvt}

(10)

A partir de la Ecuación (10), al reemplazar w en la Ecuación (6) se obtendrá la Ecuación (11).

$$y = h \left(1 - \frac{16hvt_x^2}{3\pi vwd^2} \right) \quad (11)$$

Para los diferentes diámetros de alambre, las perlas formadas varían en espesor y anchura. Sin embargo, la forma del cordón depositado está muy influenciada por muchos parámetros de soldadura, incluido el ángulo del soplete, la velocidad de desplazamiento del alambre, la velocidad de alimentación del relleno y las condiciones de enfriamiento [192]. Para un espesor de capa particular (h), ancho del cordón (w) y velocidad del soplete (vt), la ecuación (12) proporciona el caudal volumétrico (Q) requerido para el llenado completo.

$$Q = vtw \quad (12)$$

Establecer el parámetro óptimo en el proceso WAAM sería ventajoso para la deposición gradual de cordones de soldadura capa por capa en la AM de los componentes [193,194].

Koli et al. [128] estudiaron los productos WAAM hechos de alambre de SS308L con un diámetro de 1,2 mm utilizados para fabricar las muestras. Los parámetros, como la velocidad de soldadura, la corriente del arco y el caudal de gas de protección, fueron los más influyentes a la hora de afectar las múltiples respuestas de los productos WAAM.

Las aplicaciones prácticas de los componentes impresos mediante procesos WAAM son principalmente aplicables en las industrias automovilística [155], aeroespacial [195], naval y de defensa [196,197], que utilizan materiales como el aluminio por su alta calidad y resistencia con menor masa. En general, WAAM tiene una gran demanda en industrias como la automotriz, aeroespacial, plantas químicas, marítima, nuclear, construcción naval y energía, donde se utiliza para fabricar componentes como piezas de aviones, chasis de automóviles y hélices marinas [8,65, 88,148,151,198–204]. El proceso WAAM en estas industrias utiliza ampliamente series de aleaciones de aluminio como 2xxx (Al-Cu), 4xxx (Al-Si) y 5xxx (Al-Mg) [199,205,206].

Los componentes aeroespaciales producidos en el proceso WAAM, como palas de turbina, perfiles aerodinámicos y elementos estructurales, deben controlarse cuidadosamente en el RS para evitar fallas prematuras y mantener altos estándares de rendimiento [86,129,207,208]. WAAM también se utiliza para producir piezas de motores como culatas y pistones [129].

6. Discusión

Además de la medición de RS mencionada anteriormente, es posible que se produzcan ciertos defectos relacionados con la soldadura en los componentes WAAMed. Estas mediciones incluyen muchos factores que influyen en las magnitudes del RS WAAM, los cuales se describen en la Tabla 1 con varias referencias. Las inclusiones consisten principalmente en tres clasificaciones de métodos de medición de RS, que se analizan en la Sección 3.4. De estas tres, las técnicas de medición no destructivas son las más aplicables. Sin embargo, en muestras grandes, la tensión de ciertos componentes puede ser difícil de determinar o no puede identificarse con precisión debido a variaciones de RS diferentes en la profundidad de penetración de la luz del haz a través de los componentes [209]. Aún así, se requiere más investigación para examinar a fondo los RS presentes en los productos WAAM, como resultado de diferentes parámetros del proceso. Los procesos de tratamiento térmico posfabricación pueden tener un impacto significativo en la eliminación de defectos. Aunque muchos defectos podrían eliminarse en los productos WAAMed, la RS solo se minimizó en la mayor medida posible mediante el tratamiento térmico [137] y otros procesos mencionados en la Tabla 4.

La calidad de los componentes metálicos fabricados en WAAM depende seriamente de parámetros clave como la velocidad de desplazamiento, el aporte de calor, la velocidad de alimentación del alambre, la dirección de deposición, las propiedades del material, etc., y otros se mencionan en la Tabla 1. Si bien un alto aporte de calor es necesario lograr una tasa de deposición rápida en WAAM, también presenta desafíos como RS y distorsiones. Por lo tanto, la gestión del aporte de calor se vuelve crucial, especialmente cuando se fabrican componentes metálicos grandes utilizando WAAM, ya que afecta directamente tanto a la tasa de deposición como a la integridad estructural [1,47].

6.1. Desafíos y limitaciones

Como cualquier técnica de fabricación, WAAM presenta su propio conjunto de desafíos y limitaciones en la medición y control de RS. Se puede utilizar para fabricar geometrías complejas, lo que dificulta predecir y medir RS con precisión, especialmente en estructuras intrincadas. Los productos WAAM a menudo exhiben microestructuras y propiedades de materiales heterogéneas debido a la rápida solidificación y los ciclos térmicos experimentados durante la deposición. Las variaciones como la composición del material, la estructura del grano y las transformaciones de fase pueden influir en la magnitud y distribución de RS, complicando la medición y la interpretación. Medir RS en los productos de WAAM plantea varios desafíos debido a las características únicas del proceso de fabricación y las propiedades del material resultante. Por ejemplo, las técnicas de prueba no destructivas, como las pruebas ultrasónicas o la difracción de rayos X, son prometedoras para medir RS en productos WAAM; Adaptar estas técnicas a las características únicas de los materiales y geometrías de fabricación aditiva presenta desafíos técnicos. El desafío común durante la prueba es la capacidad de las dimensiones de profundidad de penetración de la luz del haz a través de los productos impresos. WAAM implica la deposición sucesiva de capas de material, lo que puede dar como resultado distribuciones RS anisotrópicas. Medir y caracterizar con precisión estos complejos patrones de tensión requiere técnicas avanzadas capaces de analizar las variaciones de tensión en diferentes direcciones y profundidades dentro del material [210].

Las propiedades y el comportamiento de diferentes materiales pueden variar significativamente de diferentes maneras y dificultan el establecimiento de un enfoque universal para la medición y el control de RS. La gestión de RS es un aspecto crítico en el WAAM para asegurar la calidad y rendimiento de los componentes fabricados. Existían estándares industriales limitados para medir y controlar RS en el WAAM. La ausencia de procedimientos estandarizados puede dificultar la adopción de esta tecnología en aplicaciones críticas. Muchas investigaciones no pueden proporcionar una magnitud específica de RS. Más bien, indican resultados numéricos y muestran el carácter a lo largo de las operaciones de fabricación de WAAM mediante modelado.

La cuantificación de este RS no está asignada para todos los parámetros de proceso y soldadura. Por ejemplo, no se asigna a partir de los parámetros de entrada como el diámetro del alambre, las direcciones de soldadura artística, la longitud, el ancho, el espesor y el volumen de los productos, sino que se comparan los componentes impresos. Asimismo, no se asigna a partir de parámetros relacionados con la soldadura, como velocidad de soldadura, gas de soldadura, caudal de gas, voltios, corrientes pico y gas de protección [1,4]. Las técnicas utilizadas en investigaciones anteriores para medir RS en los productos WAAM ya se enumeran en la Tabla 2.

En el otro caso, el gas de protección, los tipos de gas de protección y el caudal del gas de protección afectan la distribución y la cantidad de RS en los productos de WAAM. De manera similar, los tipos de gases protectores con su caudal, como el argón y el helio, y los gases reactivos como el dióxido de carbono y el oxígeno pueden tener impactos significativos en la formación de RS en los productos WAAM [3,138,149]. Sin embargo, los investigadores no identificaron la cantidad óptima de gas de protección ni los tipos de gas de protección con otros procesos y parámetros de entrada durante el proceso WAAM. Además, varias razones que hacen que RS esté en WAAM son el calentamiento y enfriamiento rápidos, la deposición multicapa, los parámetros del proceso, las transformaciones de fase del material y la geometría de las piezas.

La revisión de la literatura, en general, indica que la investigación y mejora continua en estas áreas son esenciales para avanzar en la comprensión y el control de RS dentro de las aplicaciones de productos WAAM.

6.2. Direcciones futuras

Los desafíos y limitaciones para controlar RS en productos de WAAM se analizan en la Sección 6.1. Con base en las mediciones, mitigaciones y limitaciones encontradas en investigaciones pasadas, que pueden mencionarse y recomendarse, más estudios en futuras investigaciones podrían centrarse en optimizar los parámetros del proceso WAAM. Al dilucidar la intrincada relación entre los parámetros del proceso en WAAM y RS, esta revisión contribuye y conduce a optimizar el proceso de parámetros, utilizando técnicas de medición de RS y la

garantía de fiabilidad del producto [69]. Asimismo, algunos de los métodos de medición de RS, que no se realizaron en los productos de WAAM en investigaciones anteriores, son:

- | | |
|------------------------------|------------------------------------|
| (1) Métodos no destructivos | ■ Ondas ultrasónicas |
| | ■ Barkhausen magnético |
| (2) Métodos semidestructivos | ■ Núcleo del anillo |
| | ■ Método de agujero profundo |
| | ■ Curvatura del puente |
| (3) Métodos destructivos | ■ Técnicas de seccionamiento |
| | ■ Cumplimiento de cortes o grietas |

De otra manera, el diámetro del alambre de relleno afecta directamente la tasa de deposición y el calor generado en WAAM. Los diámetros de alambre más grandes generalmente dan como resultado tasas de deposición más altas, pero también conducen a una mayor tasa de entrada térmica por unidad de longitud. Este aumento de la entrada de calor puede influir en los gradientes de enfriamiento y los gradientes de entrada de calor dentro del material depositado, afectando la propagación y extensión de RS. La influencia del diámetro del alambre sobre la deposición del baño fundido para formar perlas se describe en la Sección 6 utilizando fórmulas para presentar las relaciones entre la altura y el ancho a lo largo del proceso WAAM. Debido al impacto significativo del tamaño del cable, en investigaciones anteriores no se ha identificado el tamaño óptimo de los diámetros del cable en el RS en los productos de WAAM. Además, entre las categorías de medición de RS, no se estudian las técnicas apropiadas y las limitaciones con la geometría del

- Dado que las investigaciones anteriores no incluyen la dependencia material, las modificaciones metodológicas, el área de aplicación y los temas de investigación relacionados de WAAM en la literatura existente, existe una amplia oportunidad para que las próximas investigaciones exploren varias posibilidades, entre ellas:
1. La mayoría de los investigadores utilizan con frecuencia no -Métodos destructivos como XRd, ND y algunas otras técnicas semidestructivas y totalmente destructivas para medir RS en WAAM de componentes. De esta forma, futuros estudios podrán realizar aquellas técnicas enumeradas anteriormente.
 2. En el futuro, los investigadores deberían determinar la cantidad y variedad de gas de protección más adecuadas, además de otros parámetros de proceso y de entrada, a lo largo de los procesos WAAM.
 3. Como se explica en la Sección 5, la fórmula matemática proporciona una formación particular del perfil del cordón y la relación del diámetro del alambre con el ancho y el espesor (alto) de los cordones. Como resultado, el diámetro del alambre, el grosor y el ancho de las cuentas pueden variar. En consecuencia, la distribución del calor del proceso da como resultado una variación de RS en las piezas WAAM. Por lo tanto, las investigaciones futuras pueden centrarse en una variedad de diámetros de alambre para reducir RS en piezas WAAM con menos diámetro de alambre.
 4. La capacidad de soldadura de los materiales depende de sus propiedades físicas que influyen en la acumulación de RS en los productos de WAAM. En el futuro, futuras investigaciones deberían tener como objetivo investigar estas propiedades físicas de los materiales, que se enumeran en la Tabla 3, y otros efectos ajustables por robots en los componentes fabricados por RS a través de WAAM.

7. Conclusiones

En conclusión, esta revisión de la literatura ha profundizado en la extensa investigación que rodea la investigación y medición de RS en productos WAAM, con un énfasis específico en la influencia de los parámetros de fabricación. La importancia de RS para determinar las características del material y la integridad estructural de los componentes WAAM se ha subrayado a lo largo del trabajo de revisión. Además, el estudio ha proporcionado un resumen completo de hallazgos clave, métodos de medición, problemas y direcciones futuras en el campo dinámico WAAM.

La revisión destaca el papel fundamental de RS en la configuración de la constancia dimensional de los productos WAAM, enfatizando la necesidad de una medición y control precisos para una utilización efectiva. Al sintetizar diversos estudios, técnicas y metodologías de investigación, el trabajo de revisión ha ofrecido una valiosa comprensión del estado actual de la investigación en este dominio. Además, esta revisión sirve como guía para que futuros investigadores utilicen otras técnicas de medición de RS, aquellas que aún no se han realizado, y comparen técnicas anteriores utilizadas en la literatura. En particular, la revisión indicó que no

Se ha informado sobre el impacto de RS en piezas fabricadas con WAAM sobre la fatiga y la resistencia a la fluencia, que nos gustaría abordar en nuestros trabajos continuos en esta área. Para medir los productos RS WAAMed, se utilizan métodos experimentales, incluidas técnicas semidestructivas (solo perforación de orificios), destructivas (método de contorno) y no destructivas (como cristalografía de neutrones y difracción de rayos X, correlación de imágenes digitales y rayos X de sincrotrón). difracción) han sido reportados.

En general, esta revisión incluye el examen y la medición de técnicas de RS en productos WAAM en función de los parámetros de entrada y otras influencias de los productos RS. A través de una evaluación meticulosa y la coordinación de la literatura existente, esta revisión subraya la importancia de comprender los factores que influyen y mitigan los métodos de RS en productos de WAAM.

Contribuciones de los autores: Las funciones de los autores en este estudio se describen a continuación: FDG creó el título y contribuyó a la conceptualización, la metodología, la investigación y la preparación del borrador original. HGL contribuyó a la conceptualización y proporcionó recursos, supervisión, administración del proyecto, edición, revisión del manuscrito y obtención de financiación. YWA participó en la edición y revisión del manuscrito. MDH también ha participado en la organización y análisis de datos del manuscrito. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Este estudio recibió el respaldo de la iniciativa INDMET bajo la subvención número 62862, que fue financiada a través del programa NORHED II.

Declaración de disponibilidad de datos: Las contribuciones originales presentadas en el estudio se incluyen en el artículo; más consultas pueden dirigirse a los autores correspondientes.

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

1. Kumar, MB; Sathiya, P.; Senthil, SM Una revisión crítica de la fabricación aditiva por arco eléctrico de aleaciones a base de níquel: principios, parámetros del proceso, microestructura, propiedades mecánicas, efectos del tratamiento térmico y defectos. *J. Braz. Soc. Mec. Ciencia. Ing.* 2023, 45, 1–27.
2. Tangestani, R.; Farrahi, GH; Shishegar, M.; Aghchehkandi, BP; Ganguly, S.; Mehmanparast, A. Efectos del laminado vertical y por compresión sobre las distribuciones de tensión residual en componentes fabricados con alambre y arco. *J. Mater. Ing. Llevar a cabo.* 2020, 29, 2073–2084. [\[Referencia cruzada\]](#)
3. Derekar, KS Aspectos de la fabricación aditiva por arco eléctrico (WAAM) de la aleación de aluminio 5183. Ph.D. Tesis, Universidad de Coventry, Coventry, Reino Unido, 2020; págs. 1–227.
4. Rodrigues, TA; Duarte, V.; Miranda, RM; Santos, TG; Oliveira, JP Situación actual y perspectivas de la fabricación aditiva de alambres y arcos (WAAM). *Materiales* 2019, 12, 1121. [\[CrossRef\]](#)
5. Laghi, V.; Palermo, M.; Gasparini, G.; Veljkovic, M.; Trombetti, T. Evaluación de parámetros mecánicos de diseño y factores de seguridad parciales para acero inoxidable fabricado con aditivos de alambre y arco. *Ing. Estructura.* 2020, 225, 111314. [\[Referencia cruzada\]](#)
6. Cunningham, CR; Flynn, JM; Shokrani, A.; Dhokia, V.; Newman, ST Artículo de revisión invitado: Estrategias y procesos para altas Fabricación aditiva de arco de alambre de calidad. *Añadir. Fabricante.* 2018, 22, 672–686. [\[Referencia cruzada\]](#)
7. Klobčar, D.; Baloš, S.; Bašić, M.; Djurić, A.; Lindic, M.; Šćetec, A. WAAM y otras tecnologías de fabricación de aditivos metálicos no convencionales. *Adv. Tecnología. Madre.* 2020, 45, 1–9. [\[Referencia cruzada\]](#)
8. Mathews, R.; Karandikar, J.; Tyler, C.; Smith, S. Acumulación de tensión residual en la fabricación de aditivos de arco de alambre Ti-6Al-4V a gran escala. *turing. Procedimiento CIRP* 2024, 121, 180–185. [\[Referencia cruzada\]](#)
9. Wu, B.; Pan, Z.; van Duin, S.; Li, H. Comportamiento térmico en la fabricación aditiva por arco eléctrico: características, efectos y control. *En Transacciones sobre Fabricación Inteligente de Soldadura*; Springer: Singapur, 2019; págs. 3–18.
10. Williams, suroeste; Martina, F.; Addison, CA; Ding, J.; Pardal, G.; Colegrove, P. Fabricación aditiva Wire + Arc. *Madre. Ciencia. Tecnología.* 2016, 32, 641–647. [\[Referencia cruzada\]](#)
11. Jiménez, X.; Dong, W.; Pablo, S.; Klecka, MA; Para, Modelado de tensión residual de CA con transformación de fase para aditivo de arco de alambre Fabricación de Acero B91. *JOM* 2020, 72, 4178–4186. [\[Referencia cruzada\]](#)
12. Jin, W.; Zhang, C.; Jin, S.; Tian, Y.; Wellmann, D.; Liu, W. Fabricación aditiva por arco de alambre de aceros inoxidables: una revisión. *Aplica. Ciencia.* 2020, 10, 1563. [\[Referencia cruzada\]](#)
13. Huang, W.; Wang, Q.; Hombre.; Kitano, H. Características de distribución de tensiones residuales en componentes típicos de paredes y tuberías. *construido mediante fabricación aditiva por arco de alambre. J. Manuf. Proceso.* 2022, 82, 434–447. [\[Referencia cruzada\]](#)
14. Mohan Kumar, S.; Rajesh Kannan, A.; Pravin Kumar, N.; Pramod, R.; Siva Shanmugam, N.; Visnú, AS; Channabasavanna, SG Características microestructurales e integridad mecánica del material funcionalmente degradado SS321/Inconel 625 fabricado con aditivo de arco de alambre. *J. Mater. Ing. Llevar a cabo.* 2021, 30, 5692–5703. [\[Referencia cruzada\]](#)

15. Kumar, V.; Singh, A.; Bishwakarma, H.; Mandal, A. Simulación del proceso de fabricación aditiva de arco metálico (Waam) Utilizando el software de soldadura Simufact. *J. Manuf. Ing.* 2023, 18, 080–085. [\[Referencia cruzada\]](#)
16. Knezović, N.; Topić, A. Fabricación aditiva de alambre y arco (WAAM): un nuevo avance en la fabricación. En *Apuntes de conferencias sobre redes y sistemas*; Springer International Publishing: Nueva York, NY, EE. UU., 2019; Volumen 42, págs. 65–71.
17. Costello, SCA; Cunningham, CR; Xu, F.; Shokrani, A.; Dhokia, V.; Newman, ST Lo último en deposición de energía dirigida por arco de alambre (WA-DED) como proceso de fabricación aditiva para la fabricación de grandes componentes metálicos. En *t. J. Computación. Integral Fabricante*. 2023, 36, 469–510. [\[Referencia cruzada\]](#)
18. Barath Kumar, MD; Manikandan, M. Evaluación de procesos, parámetros, mitigación de tensiones residuales, tratamientos posteriores y simulaciones de análisis de elementos finitos de la técnica de fabricación aditiva por arco de alambre. *Metales y Materiales Internacional. Instituto Coreano Reunió. Madre*. 2022, 28, 54–111. [\[Referencia cruzada\]](#)
19. Paskual, A.; Álvarez, P.; Suárez, A. Estudio sobre procesos de soldadura por arco para fabricación aditiva con alta tasa de deposición. *procedimiento CIRP* 2018, 68, 358–362.
20. Shukla, P.; Dash, B.; Kiran, DV; Bukkapatnam, S. Comportamiento del arco en el proceso de fabricación aditiva de arco eléctrico. *Fabricación Procedia*. 2020, 48, 725–729. [\[Referencia cruzada\]](#)
21. Zhao, XF; Wimmer, A.; Zaeh, MF Investigación experimental y simulada de secuencias de soldadura en inducidos térmicamente. *distorsiones en la fabricación aditiva de arco de alambre. Prototipo rápido J.* 2023, 29, 53–63. [\[Referencia cruzada\]](#)
22. Cambón, C.; Bendaoud, I.; Rouquette, S.; Soulié, F. Un punto de referencia WAAM: desde los parámetros del proceso hasta los efectos térmicos en la soldadura forma de la piscina, microestructura y tensiones residuales. *Madre. Hoy Común*. 2022, 33, 104235. [\[Referencia cruzada\]](#)
23. Hönnige, J.; Seow, CE; Ganguly, S.; Xu, X.; Cabeza, S.; Coules, H.; Williams, S. Estudio de la tensión residual y la evolución microestructural en alambre laminado entre pasadas y depositado, más una aleación Inconel 718 fabricada aditivamente por arco después del tratamiento de envejecimiento. *Madre. Ciencia. Ing. A* 2020, 801, 140368. [\[Referencia cruzada\]](#)
24. Hönnige, JR; Colegrove, Pensilvania; Ganguly, S.; Eimer, E.; Kabra, S.; Williams, S. Control de tensión residual y distorsión en Alambre de Aluminio + Fabricación Aditiva por Arco con Laminación. *Addit Manuf.* 2018, 22, 775–783. [\[Referencia cruzada\]](#)
25. Schroeppfer, KWD; Wildenhain, RS; Kannengiesser, AHT; Hensel, AKJ Influencia del proceso WAAM y aspectos de diseño. *sobre tensiones residuales en aceros estructurales de alta resistencia. Mundo de soldadura* 2023, 67, 987–996.
26. Geng, R.; Du, J.; Wei, Z.; Xu, S.; Ma, N. Modelado y observación experimental de la geometría de deposición y la evolución de la microestructura de una aleación de aluminio fabricada mediante fabricación aditiva por arco eléctrico. *J. Manuf. Proceso*. 2021, 64, 369–378. [\[Referencia cruzada\]](#)
27. Klein, T.; Spoerk-Erdely, P.; Schneider-Broeskamp, C.; Oliveira, JP; Faria, GA Tensiones residuales en un alambre y una aleación de Al-6Cu-Mn (ER2319) depositada con energía dirigida por arco determinadas por difracción de rayos X de alta energía y dispersión de energía. *Reunió. Madre. Trans. A* 2024, 55, 736–744. [\[Referencia cruzada\]](#)
28. Ermakova, A.; Mehmanparast, A.; Ganguly, S.; Razavi, N.; Berto, F. Investigación de las propiedades mecánicas y de fractura del alambre. *y componentes de acero con bajo contenido de carbono fabricados aditivamente. Teor. Aplica. Fracta. Mec.* 2020, 109, 102685. [\[Referencia cruzada\]](#)
29. Derekar, KS Una revisión de la fabricación aditiva por arco con alambre y los avances en la fabricación aditiva por arco con alambre de aluminio. *Madre. Ciencia. Tecnología*. 2018, 34, 895–916. [\[Referencia cruzada\]](#)
30. Taşdemir, A.; Nohut, S. Una descripción general de la fabricación aditiva por arco eléctrico (WAAM) en la industria de la construcción naval. *Estructura de barcos costa afuera*. 2020, 16, 1–18. [\[Referencia cruzada\]](#)
31. Müller, J.; Grabowski, M.; Müller, C.; Hensel, J.; Unglaub, J.; Thiele, K.; Kloft, H.; Dilger, K. Diseño e identificación de parámetros de barras de acero fabricadas mediante aditivos con alambre y arco (WAAM) para uso en la construcción. *Metales* 2019, 9, 725. [\[CrossRef\]](#)
32. Abbaszadeh, M.; Hönnige, JR; Martina, F.; Neto, L.; Kashaev, N.; Colegrove, P.; Williams, S.; Klusemann, B. Investigación numérica del efecto del rodamiento sobre la tensión localizada y la inducción de deformación para estructuras fabricadas con aditivos de alambre + arco. *J. Mater. Ing. Llevar a cabo*. 2019, 28, 4931–4942. [\[Referencia cruzada\]](#)
33. Canción, SS; Chen, J.; Quan, G.; Si, J.; Zhao, Y. Análisis numérico y diseño de arcos de alambre rellenos de hormigón fabricados aditivamente. *Tubo de acero sometido a compresión axial. Ing. Estructura*. 2024, 301, 117294. [\[Referencia cruzada\]](#)
34. Wu, Q.; Mukherjee, T.; DEA.; DebRoy, T. Tensiones residuales en la fabricación aditiva por arco eléctrico: jerarquía de variables influyentes. *Añadir. Fabricante*. 2020, 35, 101355. [\[Referencia cruzada\]](#)
35. Ding, D.; Pan, Z.; Cuiuri, D.; Li, H. Fabricación aditiva de componentes metálicos con alimentación de alambre: tecnologías, desarrollos y intereses futuros. En *t. J. Adv. Fabricante. Tecnología*. 2015, 81, 465–481. [\[Referencia cruzada\]](#)
36. Jafari, D.; Vanecker, THJ; Gibson, I. Fabricación aditiva de alambre y arco: oportunidades y desafíos para controlar la calidad. *y precisión de las piezas fabricadas. Madre. Des.* 2021, 202, 109471. [\[Referencia cruzada\]](#)
37. Wu, B.; Pan, Z.; Chen, G.; Ding, D.; Yuan, L.; Cuiuri, D.; Li, H. Mitigación de la distorsión térmica en arcos de alambre fabricados aditivamente. *Pieza Ti6Al4V que utiliza refrigeración activa entre pasadas. Ciencia. Tecnología. Soldar. Unirse*. 2019, 24, 484–494. [\[Referencia cruzada\]](#)
38. Rozaimi, M.; Yusof, F. Desafíos de investigación, control de calidad y estrategia de seguimiento para la fabricación aditiva por arco eléctrico. *J. Mater. Res. Tecnología*. 2023, 24, 2769–2794.
39. Ahmad, B.; Zhang, X.; Guo, H.; Fitzpatrick, ME; Neto, LMSC; Williams, S. Influencia de las estrategias de deposición sobre residuos Tensión en Hilo + Aditivo de Arco Fabricado en Titanio Ti-6Al-4V. *Metales* 2022, 12, 253. [\[CrossRef\]](#)
40. Schönegger, S.; Moschinger, M.; Enzinger, N. Simulación de soldadura computacional de una fabricación aditiva por arco con alambre de plasma. *Proceso para acero de alta resistencia. EUR. J. Mater.* 2024, 4, 2297051. [\[Referencia cruzada\]](#)
41. Qvale, P.; Njaastad, EB; Bræin, T.; Ren, X. Un método de simulación rápido para la gestión térmica en la fabricación aditiva de arco eléctrico. *reparación de una estructura de paredes delgadas. En t. J. Adv. Fabricante. Tecnología*. 2024, 132, 1573–1583. [\[Referencia cruzada\]](#)

42. Wang, C.; Suder, W.; Ding, J.; Williams, S. El efecto del tamaño del alambre en la fabricación de aditivos de arco de plasma y alambre con alta tasa de deposición de Ti-6Al-4V. *Mermelada. Acad. Dermatol.* 2021, 288, 116842. [\[Referencia cruzada\]](#)
43. Gupta, Alaska; Bansal, H.; Madan, A. Estudio sobre el proceso de fabricación aditiva de arco de alambre CNC para una mayor tasa de deposición y resistencia mecánica. *Adv. Robot. Automático.* 2022, 10, 9695.
44. Ananda, PA Solicitud WAAM para empresa EPC. Conferencia Web MATEC. 2019, 269, 05002. [\[Referencia cruzada\]](#)
45. Li, Y.; Dong, Z.; Miao, J.; Liu, H.; Babkin, A.; Chang, Y. Mejora de la precisión del formado en la fabricación aditiva de arco de alambre (WAAM): Una reseña. *Prototipo rápido. J.* 2022, 29, 673–686. [\[Referencia cruzada\]](#)
46. Chaurasia, M.; Sinha, MK Investigaciones sobre los parámetros del proceso de fabricación aditiva por arco eléctrico (WAAM): una revisión; Apuntes de conferencias en ingeniería mecánica; Springer Nature: Singapur, 2021; págs. 845–853.
47. Gowthaman, PS; Jeyakumar, S.; Sarathchandra, D. Efecto del aporte de calor sobre la microestructura y las propiedades mecánicas del 316L Acero inoxidable fabricado mediante fabricación aditiva por arco de alambre. *J. Mater. Ing. Llevar a cabo.* 2024, 33, 5536–5546. [\[Referencia cruzada\]](#)
48. Tomar, B.; Shiva, S.; Nath, T. Una revisión sobre la fabricación aditiva por arco eléctrico: parámetros de procesamiento, defectos y mejora de la calidad. y avances recientes. *Madre. Hoy Común.* 2022, 31, 103739. [\[Referencia cruzada\]](#)
49. Voropaev, A.; Korsnik, R.; Tsiibulskiy, I. Características de la fusión y transferencia de alambre de relleno en la fabricación aditiva de arco de alambre de Piezas metálicas. *Materiales* 2021, 14, 5077. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
50. Chen, C.; Él, H.; Zhou, S.; Lian, G.; Huang, X.; Feng, M. Predicción del perfil de múltiples cuentas de componentes fabricados con aditivos de arco y alambre robótico de forma recursiva mediante análisis de forma de gota simétrica. *Física virtual. Prototipo.* 2023, 18, 1–24. [\[Referencia cruzada\]](#)
51. Ayed, A.; Valencia, A.; Bras, G.; Bernardo, H.; Michaud, P.; Balcaén, Y.; Alexis, J. Efectos de los parámetros del proceso WAAM sobre las propiedades metalúrgicas y mecánicas de los depósitos de Ti-6Al-4V. En *Avances en materiales, mecánica y fabricación: Actas de la Segunda Conferencia Internacional sobre Materiales, Mecánica y Fabricación Avanzados (A3M'2018)*, Hammamet (Túnez), 17 a 19 de diciembre de 2018; Apuntes de conferencias en ingeniería mecánica; Springer International Publishing: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2020; págs. 26–35.
52. Mai, DS; Doan, TK; Paris, H. Engineering Science and Technology, una revista internacional Fabricación aditiva de alambre y arco de componentes de acero inoxidable 308L: optimización de los parámetros de procesamiento y propiedades del material. *Ing. Ciencia. Tecnología.* En t. J. 2021, 24, 1015–1026.
53. Lin, Z.; Goulas, C.; Si, W.; Hermans, MJ Microestructura y propiedades mecánicas de depósitos de acero al carbono medio obtenidos mediante fabricación aditiva de alambre y arco utilizando alambre con núcleo metálico. *Metales* 2019, 9, 673. [\[CrossRef\]](#)
54. Canción, GH; Lee, CM; Kim, DH Investigación de la planificación de rutas para reducir los errores de altura de las piezas de intersección en la fabricación aditiva de arco de alambre. *Materiales* 2021, 14, 6477. [\[CrossRef\]](#)
55. Zhou, Z.; Shen, H.; Liu, B.; Du, W.; Jin, J.; Lin, J. Predicción de tensión térmica residual para trayectorias de herramientas continuas en aditivo de arco de alambre Fabricación: un método basado en datos de tres niveles. *Física virtual. Prototipo.* 2022, 17, 105–124. [\[Referencia cruzada\]](#)
56. Guo, C.; Li, G.; Li, S.; Hu, X.; Lu, H.; Li, X.; Xu, Z.; Chen, Y.; Li, Q.; Lu, J.; et al. Fabricación aditiva de superaleaciones a base de Ni: tensiones residuales, mecanismos de formación de grietas y estrategias para la inhibición de grietas. *Nanomadre. Ciencia.* 2023, 5, 53–77. [\[Referencia cruzada\]](#)
57. Scotti, FM; Teixeira, FR; da Silva, LJ; de Araújo, DB; Reis, RP; Scotti, A. Gestión térmica en WAAM a través del CMT Proceso avanzado y técnica de enfriamiento activo. *J. Manuf. Proceso.* 2020, 57, 23–35. [\[Referencia cruzada\]](#)
58. Ahsan, MRU; Tanvir, ANM; Ross, T.; Elsayy, A.; Oh, EM; Kim, DB Fabricación de una estructura bimetalica de fabricación aditiva (BAMS) de acero con bajo contenido de carbono y acero inoxidable austenítico 316L con fabricación aditiva de alambre + arco. *Prototipo rápido J.* 2020, 26, 519–530. [\[Referencia cruzada\]](#)
59. Wu, Q.; Mamá, Z.; Chen, G.; Liu, C.; Enojado.; Ma, S. Obtención de microestructura fina y voladizos sin soporte mediante fabricación aditiva por arco pulsado con bajo aporte de calor. *J. Manuf. Proceso.* 2017, 27, 198–206. [\[Referencia cruzada\]](#)
60. Doumenc, G.; Modisto, L.; Courant, B.; Paillard, P.; Benoit, A.; Gautrón, E.; Girault, B.; Pirling, T.; Cabeza, S.; Gloaguen, D. Investigación de la microestructura, dureza y tensiones residuales del alambre y arco fabricado con aditivos de aleación de aluminio 6061 para citar esta versión: HAL Id: Hal-03827007. *Materialia* 2022, 25, 101520. [\[CrossRef\]](#)
61. Tröger, J.-A.; Hartmann, S.; Treutler, K.; Potschka, A.; Wesling, V. Optimización de parámetros de proceso basada en simulación para la fabricación aditiva de arco eléctrico. *Prog. Añadir. Fabricante.* 2024. [\[Referencia cruzada\]](#)
62. Nagallapati, V.; Khare, VK; Sharma, A.; Simhambhatla, S. Gestión térmica activa y pasiva en aditivos para arco de alambre Fabricación. *Metales* 2023, 13, 682. [\[CrossRef\]](#)
63. Ahsan, M.; Seo, G.-J.; Ventilador, X.; Liaw, PK; Motaman, S.; Haase, C.; Kim, DB Efectos de los parámetros del proceso sobre la forma del cordón, la microestructura y las propiedades mecánicas en la fabricación aditiva de alambre + arco de una aleación de alta entropía Al0.1CoCrFeNi. *J. Manuf. Proceso.* 2021, 68, 1314–1327. [\[Referencia cruzada\]](#)
64. Él, T.; Yu, S.; Shi, Y.; Huang, A. Propiedades mecánicas y de conformación de la fabricación aditiva de arco de alambre para soportes de hélices marinas. *J. Manuf. Proceso.* 2020, 52, 96–105. [\[Referencia cruzada\]](#)
65. Su, C.; Chen, X.; Gao, C.; Wang, Y. Efecto del aporte de calor sobre la microestructura y las propiedades mecánicas de las aleaciones de Al-Mg fabricadas por WAAM. *Aplica. Navegar. Ciencia.* 2019, 486, 431–440. [\[Referencia cruzada\]](#)
66. Scharf-Wildenhain, R.; Haelsig, A.; Hensel, J.; Wandtke, K.; Schroepfer, D.; Kromm, A.; Kannengiesser, T. Influencia del control del calor en las propiedades y tensiones residuales de componentes de acero de alta resistencia soldados con aditivos. *Metales* 2022, 12, 951. [\[CrossRef\]](#)
67. Javadi, Y.; Smith, M.; Venkata, KA; Naveed, N.; Forsey, A.; Francisco, J.; Ainsworth, R.; Truman, C.; Smith, D.; Hosseinzadeh, F.; et al. Medición de tensión residual en round robin en una unión soldada por haz de electrones entre acero inoxidable austenítico 316L(N) y acero ferrítico P91. En t. J. Prensa. Buque. Pepita. 2017, 154, 41–57.

68. Saleh, B.; Fathi, R.; Tian, Y.; Radhika, N.; Jiang, J.; Ma, A. Fundamentos y avances de la fabricación aditiva por arco de alambre: materiales, parámetros de proceso, aplicaciones potenciales y tendencias futuras. En *Archivos de Ingeniería Civil y Mecánica*; Springer: Londres, Reino Unido, 2023; Volumen 23, págs. 1–71.
69. Rosli, NA; Alkahari, señor; bin Abdollah, MF; Maidín, S.; Ramli, FR; Herawan, SG Revisión sobre el efecto del aporte de calor para el arco de alambre proceso de fabricación aditiva. *J. Mater. Res. Tecnología*. 2021, 11, 2127–2145. [\[Referencia cruzada\]](#)
70. Li, JZ; Alkahari, señor; Rosli, NAB; Hasán, R.; Sudin, Minnesota; Ramli, FR Revisión de la fabricación aditiva por arco de alambre para impresión de metal en 3D Revisión de la fabricación aditiva de arco de alambre para impresión de metal en 3D. En t. *J. Autom. Tecnología*. 2019, 13, 346–353.
71. Woo, W.; Kim, D.-K.; Kingston, E.; Luzin, V.; Salvemini, F.; Hill, MR Efecto de las capas intermedias y las estrategias de escaneo sobre las distribuciones de tensiones residuales a través del espesor en estructuras de acero ferrítico-austenítico fabricadas aditivamente. *Madre. Ciencia. Ing. A* 2019, 744, 618–629.
72. Geng, H.; Li, J.; Gao, J.; Lin, X. Modelo teórico de tensión residual y alabeo para la fabricación aditiva de alambres y arcos Paneles rígidos. *Metales* 2020, 10, 666. [\[CrossRef\]](#)
73. Rouquette, S.; Cambón, C.; Bendaoud, I.; Soulié, F. Esfuerzos residuales en muestras de ss316l después de la deposición de alambre de relleno derretido. En *Actas de la ICRS 11: La 11.ª Conferencia Internacional sobre Tensiones Residuales*, Nancy, Francia, 27 a 30 de marzo de 2022.
74. Kumaran, M.; Senthikumar, V.; Pánico, CJ; Shishir, R. Investigación de la tensión residual en la fabricación aditiva de trabajos de reparación mediante un proceso de deposición de energía dirigida sobre un sustrato de acero laminado en caliente SS316L. *Madre. Hoy Proc.* 2021, 47, 4475–4478. [\[Referencia cruzada\]](#)
75. Mishurova, T.; Sydow, B.; Thiede, T.; Sizova, I.; Ulbricht, A.; Bambach, M.; Bruno, G. Estrés residual y microestructura de un Demostrador híbrido de fabricación aditiva de arco de alambre Ti-6Al-4V. *Metales* 2020, 10, 701. [\[CrossRef\]](#)
76. Martina, F.; Roy, MJ; Szost, BA; Terzi, S.; Colegrove, Pensilvania; Williams, suroeste; Cruz, PJ; Meyer, J.; Hofmann, M. Tensión residual de alambre depositado y laminado + fabricación aditiva de arco de componentes Ti – 6Al – 4V. *Madre. Ciencia. Tecnología*. 2016, 32, 1439–1448. [\[Referencia cruzada\]](#)
77. Liu, C.; Lin, C.; Wang, J.; Wang, J.; Yan, L.; Luo, Y.; Yang, M. Distribuciones de tensiones residuales en muestras gruesas excavadas en un maqueta de fabricación aditiva de arco y alambre circular grande. *J. Manuf. Proceso*. 2020, 56, 474–481.
78. Yang, Y.; Jin, X.; Liu, C.; Xiao, M.; Lu, J.; Fan, H.; Ma, S. Tensión residual, propiedades mecánicas y morfología del grano de la aleación Ti-6Al-4V producida mediante fabricación aditiva de arco y alambre asistida por tratamiento de impacto ultrasónico. *Metales* 2018, 8, 934. [\[Referencia cruzada\]](#)
79. Boruá, D.; Dewagtere, N.; Ahmad, B.; Nunes, R.; Tacq, J.; Zhang, X.; Guo, H.; Verlinde, W.; De Waele, W. Correlación de imágenes digitales para medir tensiones residuales de campo completo en componentes fabricados con aditivos de alambre y arco. *Materiales* 2023, 16, 1702. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
80. Rani, KU; Kumar, R.; Mahapatra, MM; Mulik, RS; Swierczy 'nska, A.; Fydrich, D.; Pandey, C. Propiedades austeníticas y de acero dulce fabricadas con aditivos para arcos de alambre y tensiones residuales. *Materiales* 2022, 15, 7094. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
81. Gao, L.; Chuang, AC; Kenesei, P.; Ren, Z.; Balderson, L.; Sun, T. Un estudio de operando sincrotrón sobre el efecto del estado de fusión del alambre en las microestructuras de solidificación de Inconel 718 en la deposición de energía dirigida por alambre-láser. En t. *J. Mach. Fabricación de herramientas*. 2024, 194, 104089. [\[Referencia cruzada\]](#)
82. Robin, IK; Brote, DJ; Sridharan, N.; Snead, LL; Zinkle, SJ Investigación basada en sincrotrón sobre la anisotropía y la microestructura de alambre de acero de grado 91 fabricado con aditivos de arco. *J. Mater. Res. Tecnología*. 2024, 29, 5010–5021. [\[Referencia cruzada\]](#)
83. Kumar, V.; Mandal, A.; Das, AK; Kumar, S. Estudio paramétrico y caracterización del acero fabricado con aditivos por arco de alambre. estructuras. En t. *J. Adv. Fabricante. Tecnología*. 2021, 115, 1723–1733. [\[Referencia cruzada\]](#)
84. Shen, C.; Reid, M.; Liss, K.-D.; Pan, Z.; Puede,.; Cuiuri, D.; van Duin, S.; Li, H. Determinaciones de tensión residual por difracción de neutrones en componentes de aluminuro de hierro a base de Fe3Al fabricados mediante fabricación aditiva por arco de alambre (WAAM). *Añadir. Fabricante*. 2019, 29, 100774. [\[Referencia cruzada\]](#)
85. Rouquette, S.; Cambón, C.; Bendaoud, I.; Cabeza, S.; Soulié, F. Efecto de la adición de capas sobre las tensiones residuales del aditivo para arcos de alambre Muestras fabricadas en acero inoxidable. *J. Manuf. Ciencia. Ing.* 2024, 146, 1–12. [\[Referencia cruzada\]](#)
86. Rodrigues, TA; Fariás, FWC; Zhang, K.; Shamsolhodaie, A.; Shen, J.; Zhou, N.; Schell, N.; Capek, J.; Polatidis, E.; Santos, TG; et al. Fabricación aditiva por alambre y arco de acero inoxidable 316L/material clasificado funcionalmente Inconel 625: desarrollo y caracterización. *J. Mater. Res. Tecnología*. 2022, 21, 237–251. [\[Referencia cruzada\]](#)
87. Théodore, J.; Modisto, L.; Girault, B.; Cabeza, S.; Pirling, T.; Frapier, R.; Bazin, G.; Courant, B. Relación entre microestructura y tensión y tensión residuales en aceros inoxidables aleados in situ mediante el proceso de fabricación aditiva por arco de doble alambre (D-WAAM) . *Materialia* 2023, 30, 101850. [\[CrossRef\]](#)
88. Kumar, MB; Manikandan, M. Evaluación de la microestructura, la tensión residual y las propiedades mecánicas en diferentes planos de superaleaciones a base de níquel fabricadas con aditivos de alambre + arco. *Reunión. Madre*. En t. 2022, 28, 3033–3056. [\[Referencia cruzada\]](#)
89. Consumibles para soldadura de aceros con límite elástico > 460 MPa. Disponible en línea: <https://www.welmet.cz/wp-content/uploads/2019/04/2-SM-pro-oceli-s-mez%C3%AD-kuzu-nad-460-MPa.pdf> (consultado el 26 de junio de 2024).
90. Sol, J.; Hensel, J.; Kohler, M.; Dilger, K. Tensión residual en componentes de aluminio fabricados con alambre y arco. *J. Manuf. Proceso*. 2021, 65, 97–111. [\[Referencia cruzada\]](#)
91. Rodrigues, TA; Fariás, FWC; Ávila, JA; Maawad, E.; Schell, N.; Santos, TG; Oliveira, JP Efecto de los tratamientos térmicos en Inconel 625 fabricado mediante fabricación aditiva de alambre y arco: un análisis de difracción de rayos X de sincrotrón in situ. *Ciencia. Tecnología. Soldar. Unirse*. 2023, 28, 534–539. [\[Referencia cruzada\]](#)

92. Wandtke, K.; Becker, A.; Schroepefer, D.; Kromm, A.; Kannengiesser, T.; Scharf-Wildenhain, R.; Haelsig, A.; Hensel, J. Evolución de la tensión residual durante el fresado de ranuras para soldadura de reparación y fabricación aditiva por arco de alambre de componentes de acero de alta resistencia. *Metales* 2024, 14, 82. [\[CrossRef\]](#)
93. Wu, Q.; Mukherjee, T.; Liu, C.; Lu, J.; DebRoy, T. Tensiones residuales y distorsión en la impresión estampada de titanio y níquel. *aleaciones. Añadir. Fabricante.* 2019, 29, 100808. [\[Referencia cruzada\]](#)
94. Han, Y. Un estudio de elementos finitos de la fabricación aditiva de arcos de alambre de aleación de aluminio. *Aplica. Ciencia.* 2024, 14, 810. [\[Referencia cruzada\]](#)
95. Khaled, H.; Abusalma, J. Estudio paramétrico de tensiones residuales en piezas fabricadas con aditivos de alambre y arco. Tesis de maestría, Universidad Old Dominion, Norfolk, VA, EE. UU., 2020.
96. Saadatmand, M.; Talemi, R. Estudio sobre el ciclo térmico de paredes de acero al carbono fabricadas con aditivos por arco de alambre (WAAM) utilizando simulación numérica. *Fraternidad. Ed Integrita Strutt.* 2020, 14, 98–104. [\[Referencia cruzada\]](#)
97. Eisazadeh, H.; Achután, A.; Goldak, J.; Aidun, D. Efecto de las propiedades del material y la carga de tensión mecánica sobre la tensión residual. *Formación en soldadura diferente GTA 304-A36. J. Mater. Proceso. Tecnología.* 2015, 222, 344–355. [\[Referencia cruzada\]](#)
98. Nezamost, MR; Isfahani, MRN; Hashemi, SH; Mirbozorgi, SA Investigación del campo de temperaturas y tensiones residuales de la soldadura por arco sumergido mediante el método de elementos finitos y experimentos. *En t. J. Adv. Fabricante. Tecnología.* 2016, 87, 615–624. [\[Referencia cruzada\]](#)
99. Huang, H.; Hombre; Chen, J.; Feng, Z.; Murakawa, H. Hacia la simulación a gran escala de tensiones residuales y distorsiones en cables y Fabricación aditiva por arco. *Añadir. Fabricante.* 2020, 34, 101248. [\[Referencia cruzada\]](#)
100. Han, YS Fabricación aditiva por arco de alambre: un estudio de los parámetros del proceso mediante simulaciones multifísicas. *Materiales* 2023, 16, 7267. [\[Referencia cruzada\]](#) [\[PubMed\]](#)
101. Jia, J.; Zhao, Y.; Dong, M.; Wu, A.; Li, Q. Simulación numérica de tensión residual y deformación para piezas WAAM de aleación de aluminio basada en el método de función de temperatura. *Trans. Soldadura china. Inst.* 2020, 29, 1–8.
102. Feng, G.; Wang, autopista; Deng, D.; Zhang, J. Simulación numérica de tensión residual y deformación en aditivo para arco de alambre Fabricación. *Cristales* 2022, 12, 803. [\[CrossRef\]](#)
103. Graf, M.; Pradjadhiana, KP; Hälsig, A.; Manurung, YHP; Awiszus, B. Simulación numérica de la fabricación aditiva por arco metálico (WAAM). En *Actas de la Conferencia AIP; Publicación AIP: Long Island, Nueva York, EE. UU., 2018; Volumen 960, pág. 140010.*
104. Ahmad, SN; Manurung, YH; Estera, MF; Minggu, Z.; Jaffar, A.; Pruller, S.; Leitner, M. Procedimiento de simulación FEM para el análisis de distorsión y tensión residual de la fabricación aditiva por arco eléctrico. En *Serie de conferencias IOP: Ciencia e ingeniería de materiales; Publicación IOP : Bristol, Reino Unido, 2020; Volumen 834, pág. 012083.*
105. Cadiou, S.; Courtois, M.; Carín, M.; Berckmans, W.; Le Masson, P. Transferencia de calor 3D, flujo de fluidos y modelo electromagnético para frío. Fabricación aditiva por arco con alambre de transferencia de metal (Cmt-Waam). *Añadir. Fabricante.* 2020, 36, 101541. [\[Referencia cruzada\]](#)
106. Drexler, H.; Haunreiter, F.; Raberger, L.; Reiter, L.; Hütter, A.; Enzinger, N. Modelado numérico de distorsiones y tensiones residuales durante la fabricación aditiva por arco de alambre de una aleación ER 5183 con deposición de tejido. *BHM Bergund Hüttenmännische Monatshefte* 2024, 169, 38–47. [\[Referencia cruzada\]](#)
107. Bonifaz, EA; Palomeque, JS Un modelo mecánico en el proceso de fabricación aditiva alambre + Arco. *Prog. Añadir. Fabricante.* 2020, 5, 163–169. [\[Referencia cruzada\]](#)
108. Reyes-Gordillo, E.; Gómez-Ortega, A.; Morales-Estrella, R.; Pérez-Barrera, J.; González-Carmona, J.; Escudero-García, R.; Alvarado-Orozco, J. Efecto de los parámetros de transferencia de metal en frío durante la fabricación aditiva por arco de alambre de paredes multicapa de Ti6Al4V . 2022. Disponible en línea: <https://www.researchsquare.com/article/rs-1946459/v1> (consultado el 26 de junio de 2024).
109. Silva, WF Evaluación de las propiedades de preformas de Inconel ® 625 fabricadas con tecnología WAAM. *Res. Cuadrados.* 2024. Disponible en línea: <https://www.researchsquare.com/article/rs-3591195/v1> (consultado el 26 de junio de 2024).
110. Derekar, KS; Addison, A.; Joshi, SS; Zhang, X.; Lorenzo, J.; Xu, L.; Melton, G.; Griffiths, D. Efecto de las técnicas de gas inerte de metal pulsado (MIG pulsado) y transferencia de metal en frío (CMT) sobre la disolución de hidrógeno en la fabricación aditiva por arco eléctrico (WAAM) de aluminio. *En t. J. Adv. Fabricante. Tecnología.* 2020, 107, 311–331. [\[Referencia cruzada\]](#)
111. Rosli, NA; Alkahari, señor; Ramli, FR; Sudin, Minnesota; Maidin, S. Influencia de los parámetros del proceso en aditivos para alambres y arcos Manufactura (WAAM). *Proceso. J. Mech. Ing.* 2020, 17, 69–78. [\[Referencia cruzada\]](#)
112. Derekar, KS; Ahmad, B.; Zhang, X.; Joshi, SS; Lorenzo, J.; Xu, L.; Melton, G.; Addison, A. Efectos de las variantes del proceso sobre las tensiones residuales en la fabricación aditiva por arco de alambre de aleación de aluminio 5183. *J. Manuf. Ciencia. Ing. Trans.* 2022, 144, 071005. [\[Referencia cruzada\]](#)
113. Yuan, Q.; Liu, C.; Wang, W.; Wang, M. Distribución de tensiones residuales en una muestra grande fabricada mediante fabricación aditiva por arco de alambre . *Ciencia. Tecnología. Soldar. Unirse.* 2023, 28, 137–144. [\[Referencia cruzada\]](#)
114. Fu, R.; Tang, S.; Lu, J.; Cui, Y.; Li, Z.; Zhang, H.; Xu, T.; Chen, Z.; Liu, C. Fabricación aditiva de arco de alambre caliente de aleación de aluminio. con porosidad reducida y alta tasa de deposición. *Madre. Des.* 2021, 199, 199109370. [\[Referencia cruzada\]](#)
115. Zhang, C.; Li, Y.; Gao, M.; Zeng, X. Fabricación aditiva por arco de alambre de aleación de Al-6Mg mediante transferencia de metal en frío de polaridad variable arco como fuente de energía. *Madre. Ciencia. Ing. A* 2018, 711, 415–423. [\[Referencia cruzada\]](#)
116. Corbin, DJ; Nassar, AR; Reutzel, EW; Kistler, NA; Beese, AM; Michaleris, P. Impacto de los parámetros de deposición de energía dirigida sobre la distorsión mecánica del Ti-6Al-4V depositado con láser. En *actas del 27.º Simposio internacional anual sobre fabricación de formas libres sólidas: una conferencia sobre fabricación aditiva SFF, Austin, TX, EE. UU., 8 al 10 de agosto de 2016; págs. 670–679.*
117. Xiong, J.; Lei, Y.; Li, R. Análisis de elementos finitos y validación experimental del comportamiento térmico de piezas de paredes delgadas en fabricación aditiva basada en GMAW con varias temperaturas de precalentamiento de sustrato. *Aplica. Termia. Ing.* 2017, 126, 43–52. [\[Referencia cruzada\]](#)

118. Zhao, J.; Quan, GZ; Zhang, YQ; Mamá, YY; Jiang, LH; Dai, WW; Jiang, Q. Influencia de la estrategia de la ruta de deposición sobre la tensión residual y la deformación en la fabricación aditiva de piezas de disco con arco de alambre tejido. *J. Mater. Res. Tecnología*. 2024, 30, 2242–2256. [\[Referencia cruzada\]](#)
119. Ouellet, T.; Croteau, M.; Bois-Brochu, A.; Lévesque, J. Fabricación aditiva por arco de alambre de aleaciones de aluminio. *Ing. Proc.* 2023, 43, 16. [\[Referencia cruzada\]](#)
120. Zhang, J.; Wang, X.; Paddea, S.; Zhang, X. Comportamiento de propagación de grietas por fatiga en alambre + aditivo de arco fabricado Ti-6Al-4V: Efectos de la microestructura y tensiones residuales. *Madre. Des.* 2016, 90, 551–561. [\[Referencia cruzada\]](#)
121. Gu, J.; Gao, M.; Yang, S.; Bai, J.; Zhai, Y.; Ding, J. Microestructura, defectos y propiedades mecánicas de la aleación Al[sbnd]Cu4.3-Mg1.5 fabricada aditivamente con alambre + arco. *Madre. Des.* 2020, 186, 108357. [\[Referencia cruzada\]](#)
122. Kindermann, RM; Roy, MJ; Moraña, R.; Francis, JA Efectos de la heterogeneidad microestructural y los defectos estructurales en el comportamiento mecánico de los componentes Inconel 718 fabricados aditivamente con alambre + arco. *Madre. Ciencia. Ing. A* 2022, 839, 142826. [\[Referencia cruzada\]](#)
123. Yildiz, AS; Koc, BI; Yilmaz, O. Determinación del comportamiento térmico del proceso de fabricación aditiva por arco eléctrico. *Fabricación Procedia*. 2020, 54, 233–237. [\[Referencia cruzada\]](#)
124. Pawlik, J.; Cie'slik, J.; Bembenek, M.; Góral, T.; Kapayeva, S.; Kapkenova, M. Sobre la influencia del coeficiente de entrada de calor/energía lineal en la dureza y la geometría del cordón de soldadura en recubrimientos GMAW para largueros ricos en cromo. *Materiales* 2022, 15, 6019. [\[Referencia cruzada\]](#)
125. Romanenko, D.; Prakash, VJ; Kuhn, T.; Moeller, C.; Hintze, W.; Emmelmann, C. Efecto de los parámetros del proceso DED sobre la distorsión y el estado de tensión residual de componentes Ti-6Al-4V fabricados aditivamente durante el mecanizado. *Procedimiento CIRP* 2022, 11, 271–276. [\[Referencia cruzada\]](#)
126. Mu, H.; Pöiden, J.; Li, Y.; Éi, F.; Xia, C.; Pan, Z. Control adaptativo basado en modelos capa por capa para la fabricación aditiva de arco eléctrico de estructuras de paredes delgadas. *J. Intel. Fabricante*. 2022, 33, 1165–1180. [\[Referencia cruzada\]](#)
127. Liu, B.; Lan, J.; Liu, H.; Chen, X.; Zhang, X.; Jiang, Z.; Han, J. Los efectos de los parámetros de procesamiento durante la fabricación aditiva por arco de alambre de acero inoxidable 308L en la formación de una estructura de paredes delgadas. *Materiales* 2024, 17, 1337. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
128. Ali, MH; Han, YS Un análisis de elementos finitos sobre el efecto del patrón de escaneo y la energía sobre la tensión residual y la deformación en Fabricación Aditiva por Arco de Acero EH36. *Materiales* 2023, 16, 4698. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
129. Chen, S.; Éi, T.; Wu, X.; Lei, G. Efecto sinérgico de los carburos y la tensión residual sobre el comportamiento mecánico de la superaleación Ni-17 Mo-7Cr fabricada mediante fabricación aditiva por arco eléctrico. *Mater Lett.* 2021, 287, 129291. [\[Referencia cruzada\]](#)
130. Winczek, J.; Gucwa, M.; Makles, K.; Mician, M.; Yadav, A. La cantidad de calor aportado a la soldadura por unidad de longitud y por unidad volumen. *Conferencia de la PIO. Ser. Madre. Ciencia. Ing.* 2021, 1199, 012067. [\[Referencia cruzada\]](#)
131. Koli, Y.; Arora, S.; Ahmad, S.; Priya Yuvaraj, N.; Khan, ZA Investigaciones y optimización de respuestas múltiples de los parámetros del proceso de transferencia de metal en frío de fabricación aditiva por arco de alambre para la fabricación de muestras de SS308L. *J. Mater. Ing. Llevar a cabo*. 2023, 32, 2463–2475. [\[Referencia cruzada\]](#)
132. Cambón, C.; Rouquette, S.; Bendaoud, I.; Bordreuil, C.; Wimpory, R.; Soulie, F. Simulación termomecánica de capas superpuestas realizadas con fabricación aditiva de alambre + arco y transferencia de metal en frío GMAW. *Mundo de soldadura* 2020, 64, 1427–1435. [\[Referencia cruzada\]](#)
133. Omiyale, BO; Olugbade, TO; Abioye, TE; Farayibi, PK Fabricación aditiva por arco de alambre de aleaciones de aluminio para el sector aeroespacial y aplicaciones automotrices: una revisión. *Madre. Ciencia. Tecnología*. 2022, 38, 391–408. [\[Referencia cruzada\]](#)
134. Wang, J.; Pan, Z.; Carpintero, K.; Han, J.; Wang, Z.; Li, H. Estudio comparativo sobre orientación cristalográfica, precipitación, transformación de fase y respuesta mecánica de una aleación de NiTi rica en Ni fabricada por WAAM a temperaturas elevadas de calentamiento del sustrato. *Madre. Ciencia. Ing. A* 2021, 800, 140307. [\[Referencia cruzada\]](#)
135. Ding, J.; Colegrove, P.; Martina, F.; Williams, S.; Wiktorowicz, R.; Palt, MR Desarrollo de un dispositivo de protección local de flujo laminar para fabricación aditiva de alambre + arco. *J. Mater. Proceso. Tecnología*. 2015, 226, 99–105. [\[Referencia cruzada\]](#)
136. Tonelli, L.; Laghi, V.; Palermo, M.; Trombetti, T.; Ceschini, L. Placas AA5083 (Al-Mg) producidas mediante fabricación aditiva de alambre y arco: efecto de la orientación de la muestra sobre la microestructura y las propiedades de tracción. *Prog. Añadir. Fabricante*. 2021, 6, 479–494. [\[Referencia cruzada\]](#)
137. Zhang, C.; Shen, C.; Hua, X.; Li, F.; Zhang, Y.; Zhu, Y. Influencia de la estrategia de planificación de la ruta de fabricación aditiva por arco de alambre en el estado de la tensión residual en una sola capa de acumulación. *En t. J. Adv. Fabricante. Tecnología*. 2020, 111, 797–806. [\[Referencia cruzada\]](#)
138. Denlinger, ER; Heigel, JC; Michaeleris, P.; Palmer, TA Efecto del tiempo de permanencia entre capas sobre la distorsión y la tensión residual en la fabricación aditiva de aleaciones de titanio y níquel. *J. Mater. Proceso. Tecnología*. 2015, 215, 123–131. [\[Referencia cruzada\]](#)
139. Gudur, S.; Nagallapati, V.; Pawar, S.; Muvvala, G.; Simhambhatla, S. Un estudio sobre el efecto del calentamiento y enfriamiento del sustrato en la geometría del cordón en la fabricación aditiva de arco de alambre y su correlación con la velocidad de enfriamiento. *Madre. Hoy Proc.* 2019, 41, 431–436. [\[Referencia cruzada\]](#)
140. Singh, S.; Jinoop, AN; Tarun Kumar, GTA; Palani, IA; Pablo, CP; Prashanth, KG Efecto del retraso entre capas sobre la microestructura y las propiedades mecánicas de las estructuras de paredes fabricadas con aditivos por arco de alambre. *Materiales* 2021, 14, 4187. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
141. Bermingham, MJ; Nicastro, L.; Kent, D.; Chen, Y.; Dargusch, MS Optimización de las propiedades mecánicas de componentes Ti-6Al-4V producidos mediante fabricación aditiva de alambre + arco con tratamientos térmicos posteriores al proceso. *J. Compd. de aleaciones*. 2018, 753, 247–255. [\[Referencia cruzada\]](#)
142. Kumar, A.; Maji, K. Selección de parámetros de proceso para la deposición de forma casi neta en la fabricación aditiva de arco de alambre por Algoritmo genético. *J. Mater. Ing. Llevar a cabo*. 2020, 29, 3334–3352. [\[Referencia cruzada\]](#)
143. Ali, Y.; Henckell, P.; Hildebrand, J.; Reimann, J.; Bergmann, JP; Barnikol-Oettler, S. Fabricación aditiva por arco de alambre de trabajo en caliente Acero para herramientas con proceso CMT. *J. Mater. Proceso. Tecnología*. 2019, 269, 109–116. [\[Referencia cruzada\]](#)

144. Laghi, V.; Palermo, M.; Tonelli, L.; Gasparini, G.; Ceschini, L.; Trombetti, T. Propiedades de tracción y características microestructurales del acero inoxidable austenítico 304L producido mediante fabricación aditiva con alambre y arco. En t. J. Adv. Fabricante. Tecnología. 2020, 106, 3693–3705. [\[Referencia cruzada\]](#)
145. Dinovitzer, M.; Chen, X.; Laliberte, J.; Huang, X.; Frei, H. Efecto de los parámetros del proceso de fabricación aditiva por alambre y arco (WAAM) sobre la geometría y la microestructura de las cuentas. Añadir. Fabricante. 2019, 26, 138–146. [\[Referencia cruzada\]](#)
146. Naveen Srinivas, M.; Vimal, KEK; Manikandan, N.; Sritharanandh, G. Optimización paramétrica y modelado de regresión múltiple para la fabricación de placas delgadas de aleación de aluminio mediante fabricación aditiva por arco de alambre. En t. J. Interactuar. Des. Fabricante. 2022. [\[Referencia cruzada\]](#)
147. Zavdoveev, A.; Pozniakov, V.; Baudin, T.; Kim, HS; Klochkov, I.; Motrunich, S.; Heaton, M.; Aquier, P.; Rogante, M.; Denisenko, A.; et al. Optimización de los parámetros de soldadura por arco pulsado para la fabricación aditiva de alambre por arco en aplicaciones de acero austenítico. En t. J. Adv. Fabricante. Tecnología. 2022, 119, 5175–5193. [\[Referencia cruzada\]](#)
148. Lu, X.; Li, MV; Yang, H. Comparación de la fabricación aditiva por arco de alambre y láser en polvo para la superaleación IN718: consideración unificada para seleccionar los parámetros del proceso en función de la densidad de energía volumétrica. En t. J. Adv. Fabricante. Tecnología. 2021, 114, 1517–1531. [\[Referencia cruzada\]](#)
149. Vora, J.; Pandey, R.; Dodiya, P.; Patel, V.; Khanna, S.; Vaghasia, V.; Chaudhari, R. Fabricación de estructuras de paredes múltiples mediante estudio paramétrico de geometrías de cuentas del proceso WAAM basado en GMAW de SS309L. Materiales 2023, 16, 5147. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
150. Athaib, Nuevo Hampshire; Haleem, AH; Al-Zubaidy, B. Una revisión de la fabricación aditiva por arco de alambre (WAAM) de compuestos de aluminio, proceso, clasificación, ventajas, desafíos y aplicaciones. J. Física. Conf. Ser. 2021, 1973, 012083. [\[Referencia cruzada\]](#)
151. Scharf-Wildenhain, R.; Haelsig, A.; Hensel, J.; Wandtke, K.; Schroeffer, D.; Kannengiesser, T. Control del calor y efectos relacionados con el diseño sobre las propiedades y tensiones de soldadura en componentes WAAM de aceros estructurales de alta resistencia. Mundo de soldadura 2023, 67, 55–65. [\[Referencia cruzada\]](#)
152. Zhang, J.; Zhang, X.; Wang, X.; Ding, J.; Traoré, Y.; Paddea, S.; Williams, S. Selección de ruta de grieta en la interfaz de forjado y Hilo + aditivo para arco fabricado Ti-6Al-4V. Madre. Des. 2016, 104, 365–375. [\[Referencia cruzada\]](#)
153. Yang, YH; Guan, ZP; Mamá, PK; Ren, MW; Jia, HL; Zhao, P.; Zha, M.; Wang, HY Fabricación aditiva por arco eléctrico de una nueva aleación de Mg ATZM31: evolución de la microestructura y propiedades mecánicas. J. Magnés. Aleaciones 2023, 10, 44. [\[CrossRef\]](#)
154. Koli, Y.; Yuvaraj, N.; Sivanandam, A.; Vipin. Control del fenómeno de humping y análisis de las propiedades mecánicas de muestras fabricadas con fabricación aditiva por arco de alambre de Al-Si mediante un proceso de transferencia de metal en frío. Proc. Inst. Mec. Ing. Parte C J. Mech. Ing. Ciencia. 2022, 236, 984–996. [\[Referencia cruzada\]](#)
155. Jing, Y.; Colmillo, X.; Xi, N.; Chang, T.; Duan, Y.; Huang, K. Mejora de las propiedades de resistencia a la tracción y fatiga de la aleación de aluminio 2319 fabricada aditivamente con arco de alambre mediante granallado por choque con láser de superficie. Madre. Ciencia. Ing. A 2023, 864, 144599. [\[Referencia cruzada\]](#)
156. Chi, J.; Cai, Z.; Wan, Z.; Zhang, H.; Chen, Z.; Pequeño, Li, Y.; Peng, P.; Guo, W. Efectos del tratamiento térmico combinado con granallado por choque láser en alambre y aleación de titanio Ti17 fabricada con aditivos de arco: microestructuras, tensión residual y propiedades mecánicas. Navegar. Abrigo. Tecnología. 2020, 396, 125908. [\[Referencia cruzada\]](#)
157. Sousa, BM; Coelho, FGF; Júnior, GMM; de Oliveira, HCP; da Silva, NN Análisis térmico y microestructural de intersecciones fabricadas mediante fabricación aditiva por arco eléctrico (WAAM). Mundo de soldadura 2024, 68, 1653–1669. [\[Referencia cruzada\]](#)
158. Ma, D.; Xu, C.; Sui, S.; Tian, J.; Guo, C.; Wu, X.; Zhang, Z.; Remennik, S.; Shechtman, D. Evolución de la microestructura y propiedades mecánicas de la aleación de Mg-Gd-Y-Zr fabricada aditivamente mediante arco de alambre mediante tratamientos térmicos posteriores. Física virtual. Prototipo. 2023, 18, 1–22. [\[Referencia cruzada\]](#)
159. Szost, BA; Terzi, S.; Martina, F.; Boisselier, D.; Prytuliak, A.; Pirling, T.; Hofmann, M.; Jarvis, DJ Un estudio comparativo de técnicas de fabricación aditiva: tensión residual y análisis microestructural de componentes impresos CLAD y WAAM de Ti-6Al-4V. Madre. Des. 2016, 89, 559–567. [\[Referencia cruzada\]](#)
160. Kumar, A.; Maji, K.; Shrivastava, A. Investigaciones sobre la geometría de deposición y las propiedades mecánicas del aditivo para arcos de alambre Fabricado en Inconel 625. Int. J. Precis. Ing. Fabricante. 2023, 24, 1483–1500. [\[Referencia cruzada\]](#)
161. Vázquez, L.; Rodríguez, MN; Rodríguez, I.; Alvarez, P. Influencia de los tratamientos térmicos post-deposición en la microestructura y Propiedades de tracción de piezas de ti-6al-4v fabricadas por cmt-waam. Metales 2021, 11, 1161. [\[CrossRef\]](#)
162. Geng, H.; Li, J.; Xiong, J.; Lin, X.; Zhang, F. Optimización de la alimentación de alambre para la fabricación aditiva basada en GTAW. J. Mater. Proceso. Tecnología. 2017, 243, 40–47. [\[Referencia cruzada\]](#)
163. Li, R.; Xiong, J.; Lei, Y. Investigación sobre la evolución de la tensión térmica inducida por la fabricación aditiva de alambre y arco para piezas circulares de paredes delgadas. J. Manuf. Proceso. 2019, 40, 59–67. [\[Referencia cruzada\]](#)
164. Gupta, NK; Ganesan, GB; Karade, S.; Mehta, Alaska; Karunakaran, KP Efecto de múltiples tecnologías para minimizar las tensiones residuales en la fabricación aditiva. En Actas de la ICRS 11: La 11.ª Conferencia Internacional sobre Tensiones Residuales, Nancy, Francia, 27 a 30 de marzo de 2022; pag. 040150.
165. Ali, MH; Han, YS Efecto de las transformaciones de fase en la estrategia de escaneo en la fabricación de waam. Materiales 2021, 14, 7871. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
166. Gorniakov, V.; Sol, Y.; Ding, J.; Williams, S. Modelado y optimización del proceso híbrido de fabricación aditiva por arco de alambre y laminación a alta presión. Madre. Des. 2022, 223, 111121. [\[Referencia cruzada\]](#)
167. Gorniyakov, V. Modelado eficiente y evaluación del laminado para mitigar la tensión residual y la distorsión en el aditivo de arco de alambre Fabricación. Doctor. Tesis, Universidad de Cranfield, Cranfield, Reino Unido, 2021. Volumen 7. p. 265.

168. Zhang, T.; Li, H.; Gong, H.; Ding, J.; Wu, Y.; Diao, C.; Zhang, X.; Williams, S. Fabricación de aditivos híbridos de arco de alambre y efecto del proceso de laminación sobre la microestructura y las propiedades de tracción de Inconel 718. *J. Mater. Proceso. Tecnología.* 2022, 299, 321–326. [\[Referencia cruzada\]](#)

169. Srivastava, S.; Garg, RK; Sharma, VS; Sachdeva, A. Medición y mitigación de la tensión residual en la fabricación aditiva por arco eléctrico: una revisión del enfoque de modelado continuo a escala macro. *Arco. Computadora. Métodos Ing.* 2021, 28, 3491–3515. [\[Referencia cruzada\]](#)

170. Montevecchi, F.; Venturini, G.; Scippa, A.; Campatelli, G. Modelado de elementos finitos del proceso de fabricación aditiva por arco eléctrico. *Procedia CIRP* 2016, 55, 109–114. [\[Referencia cruzada\]](#)

171. Bankong, BD; Abioye, TE; Olugbade, TO; Zuhailawati, H.; Gbadeyan, OO; Ogedengbe, TI Revisión de métodos de posprocesamiento para la fabricación aditiva de arco de alambre de alta calidad. *Madre. Ciencia. Tecnología.* 2023, 39, 129–146. [\[Referencia cruzada\]](#)

172. Hönnige, JR; Colegrove, Pensilvania; Ahmad, B.; Fitzpatrick, ME; Ganguly, S.; Lee, TL; Williams, SW Control de textura y tensión residual en intersecciones fabricadas aditivamente con alambre Ti-6Al-4V y arco mediante alivio de tensión y laminado. *Madre. Des.* 2018, 150, 193–205. [\[Referencia cruzada\]](#)

173. Li, K.; Klecka, MA; Chen, S.; Xiong, W. Fabricación aditiva por arco de alambre y optimización del tratamiento posterior al calor en la microestructura y propiedades mecánicas del acero Grado 91. *Añadir. Fabricante.* 2021, 37, 101734. [\[Referencia cruzada\]](#)

174. Nie, L.; Wu, Y.; Gong, H.; Chen, D.; Guo, X. Efecto del granallado sobre la redistribución del campo de tensión residual en la soldadura por fricción y agitación de una aleación de aluminio 2219. *Materiales* 2020, 13, 3169. [\[CrossRef\]](#)

175. Sol, R.; Pequeño,.; Zhu, Y.; Guo, W.; Peng, P.; Cong, B.; Sol, J.; Che, Z.; Li, B.; Guo, C.; et al. Control de microestructura, tensión residual y propiedades de tracción de una aleación de aluminio 2319 fabricada con aditivos de arco de alambre con granallado por choque láser. *J. Compd. de aleaciones.* 2018, 747, 255–265. [\[Referencia cruzada\]](#)

176. Ermakova, A.; Razavi, N.; Cabeza, S.; Gadalska, E.; Reid, M.; Paradowska, A.; Ganguly, S.; Berto, F.; Mehmanparast, A. El efecto del tratamiento de la superficie y la orientación sobre la tasa de crecimiento de las grietas por fatiga y la distribución de la tensión residual de componentes de acero con bajo contenido de carbono fabricados aditivamente con arco de alambre. *J. Mater. Res. Tecnología.* 2023, 24, 2988–3004. [\[Referencia cruzada\]](#)

177. Ding, Y.; Muñoz-Lerma, JA; Trask, M.; Chou, S.; Walker, A.; Brochu, M. Consideraciones de microestructura y propiedades mecánicas. en la fabricación aditiva de aleaciones de aluminio. *Señora Toro.* 2016, 41, 745–751. [\[Referencia cruzada\]](#)

178. Busachi, A.; Erkoyuncu, J.; Colegrove, P.; Martina, F.; Ding, J. Diseño de un sistema de fabricación basado en WAAM para aplicaciones de defensa. *Procedimiento CIRP* 2015, 37, 48–53. [\[Referencia cruzada\]](#)

179. Abusalma, H.; Eisazadeh, H.; Hejripour, F.; Bunn, J.; Aidun, D. Estudio paramétrico de la formación de tensiones residuales en alambre y arco. *Fabricación aditiva. J. Manuf. Proceso.* 2022, 75, 863–876. [\[Referencia cruzada\]](#)

180. Kyvelou, P.; Huang, C.; Li, J.; Gardner, L. Tensiones residuales en secciones en I de acero reforzadas mediante fabricación aditiva por arco de alambre. En *Estructuras; Elsevier: Ámsterdam, Países Bajos, 2024; Volumen 60.*

181. Wu, B.; Pan, Z.; Ding, D.; Cuiuri, D.; Li, H.; Xu, J.; Norrish, J. Una revisión de la fabricación aditiva de metales por arco eléctrico: propiedades, defectos y mejora de la calidad. *J. Manuf. Proceso.* 2018, 35, 127–139. [\[Referencia cruzada\]](#)

182. Colegrove, Pensilvania; Donoghue, J.; Martina, F.; Gu, J.; Prangnell, P.; Hönnige, J. Aplicación de métodos de deformación masiva para mejorar las propiedades microestructurales y de los materiales y controlar la tensión residual y la distorsión en componentes fabricados aditivamente. *scr. Madre.* 2017, 135, 111–118. [\[Referencia cruzada\]](#)

183. Karmuhilan, M.; Bien, AK Modelo de proceso inteligente para la predicción de la geometría de cuentas en WAAM. *Madre. Hoy Proc.* 2018, 5, 24005–24013. [\[Referencia cruzada\]](#)

184. Tang, S.; Wang, G.; Huang, C.; Li, R.; Zhou, S.; Zhang, H. Investigación, modelado y optimización de áreas anormales de cordones de soldadura en fabricación aditiva de alambre y arco. *Prototipo rápido J.* 2020, 26, 183–195. [\[Referencia cruzada\]](#)

185. Veiga, F.; Suárez, A.; Aldalur, E.; Bhujangrao, T. Efecto del modo de transferencia de metal sobre la simetría de la geometría de las cuentas en waam aluminio. *Simetría* 2021, 13, 1245. [\[CrossRef\]](#)

186. Ding, D.; Pan, Z.; Cuiuri, D.; Li, H. Un modelo superpuesto de múltiples cuentas para la fabricación aditiva de arco y alambre robótico (WAAM). *Computación robótica. Integral Fabricante.* 2015, 31, 101–110. [\[Referencia cruzada\]](#)

187. Geng, H.; Xiong, J.; Huang, D.; Lin, X.; Li, J. Un modelo de predicción del tamaño geométrico de la capa en la fabricación aditiva de alambre y arco utilizando la metodología de superficie de respuesta. En *t. J. Adv. Fabricante. Tecnología.* 2017, 93, 175–186. [\[Referencia cruzada\]](#)

188. Banaee, SA; Kapil, A.; Marefat, F.; Sharma, A. Modelo de superposición generalizada para la fabricación aditiva por arco de alambre de múltiples materiales (WAAM). *Física virtual. Prototipo.* 2023, 18, e2210541. [\[Referencia cruzada\]](#)

189. Surovi, NA; Soh, GS Identificación de defectos geométricos basada en características acústicas en la fabricación aditiva por arco eléctrico. *Física virtual. Prototipo.* 2023, 18, e2210553. [\[Referencia cruzada\]](#)

190. Zhao, YT; Li, WG; Liu, A. Optimización del modelo de calidad de geometría para la fabricación aditiva de alambre y arco basado en un algoritmo adaptativo de lobo gris multiobjetivo. *Computación blanda.* 2020, 24, 17401–17416. [\[Referencia cruzada\]](#)

191. Alomari, Y.; Birosz, MT; Andó, M. Optimización de la orientación de piezas para el proceso de fabricación aditiva por hilo y arco para convexo y formas no convexas. *Ciencia. Rep.* 2023, 13, 2203. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)

192. Wani, ZK; Abdullah, AB Control de la geometría del cordón en un perfil fabricado con aditivos de arco de alambre: una revisión. *Pertanika J. Ciencias. Tecnología.* 2024, 32, 917–942. [\[Referencia cruzada\]](#)

193. Vora, J.; Parikh, N.; Chaudhari, R.; Patel, VK; Paramar, H.; Pimenov, DY; Giasin, K. Optimización de la morfología de las cuentas para arco de alambre basado en GMAW de acero 2,25 Cr-1,0 Mo utilizando alambres con núcleo metálico. *Aplica. Ciencia.* 2022, 12, 5060. [\[Referencia cruzada\]](#)

194. Wang, C.; Bai, H.; Ren, C.; Colmillo, X.; Lu, B. Un modelo de predicción integral de la geometría del cordón en alambre y aditivo de arco. *fabricación. J. Física. Conf. Ser.* 2020, 1624, 022018. [\[Referencia cruzada\]](#)

195. Chintala, A.; Tejaswi Kumar, M.; Sathishkumar, M.; Arivazhagan, N.; Manikandan, M. Desarrollo de tecnología para producir Inconel 625 en aplicaciones aeroespaciales mediante el proceso de fabricación aditiva de arco eléctrico. *J. Mater. Ing. Llevar a cabo*. 2021, 30, 5333–5341. [\[Referencia cruzada\]](#)
196. Hamrani, A.; Bouarab, FZ; Agarwal, A.; Ju, K.; Akbarzadeh, H. Avances y aplicaciones de múltiples procesos de alambre en la fabricación aditiva: una revisión sistemática integral. *Física virtual. Prototipo*. 2023, 18, e2273303. [\[Referencia cruzada\]](#)
197. Queguineur, A.; Rückert, G.; Cortial, F.; Hascoët, JY Evaluación de la fabricación aditiva por arco de alambre para componentes de gran tamaño en aplicaciones navales. *Mundo de soldadura* 2018, 62, 259–266. [\[Referencia cruzada\]](#)
198. Li, J.; Cui, Q.; Pang, C.; Xu, P.; Luo, W.; Li, J. Chasis de vehículo integrado fabricado mediante fabricación aditiva de alambre y arco: generación de estructura, optimización de radianes de impresión y predicción del rendimiento. *Física virtual. Prototipo*. 2024, 19, e2301483. [\[Referencia cruzada\]](#)
199. Singh, SR; Khanna, P. Fabricación aditiva por arco metálico (WAAM): un nuevo proceso para dar forma a materiales de ingeniería. *Madre. Hoy Proc.* 2021, 44, 118–128. [\[Referencia cruzada\]](#)
200. Vishnukumar, M.; Pramod, R.; Rajesh Kannan, A. Fabricación aditiva de arco de alambre para reparar estructuras de aluminio en aplicaciones marinas. *Madre. Letón*. 2021, 299, 130112. [\[Referencia cruzada\]](#)
201. Shah, A.; Aliyev, R.; Zeidler, H.; Krinke, S. Una revisión de los desarrollos y desafíos recientes en el proceso de fabricación aditiva por arco eléctrico (WAAM). *J. Manuf. Madre. Proceso*. 2023, 7, 97. [\[Referencia cruzada\]](#)
202. Chaturvedi, M.; Scutelnicu, E.; Rusu, CC; Mistodie, LR; Mihailescu, D.; Subbiah, Fabricación aditiva de arco de alambre AV: revisión de hallazgos y desafíos recientes en aplicaciones industriales y caracterización de materiales. *Metales* 2021, 11, 939. [\[Referencia cruzada\]](#)
203. Boștilă, LN Consideraciones sobre las aleaciones de aluminio utilizadas en la industria aeronáutica/aeroespacial y el uso de aditivos para arco de alambre fabricando WAAM para sus aplicaciones industriales. *Prueba* 2020, 4, 9–24.
204. Liu, J.; Xu, Y.; Ge, Y.; Hou, Z.; Chen, S. Fabricación aditiva de componentes metálicos con alambre y arco: una revisión de investigaciones recientes desarrollos. *En t. J. Adv. Fabricante. Tecnología*. 2020, 111, 149–198. [\[Referencia cruzada\]](#)
205. Araña, M.; Ukar, E.; Rodríguez, I.; Aguilar, D.; Álvarez, P. Influencia de la estrategia de deposición y tratamiento térmico en las propiedades mecánicas y microestructura de componentes WAAM de aluminio 2319. *Madre. Des.* 2022, 221, 110974. [\[Referencia cruzada\]](#)
206. Thapliyal, S. Desafíos asociados con la fabricación aditiva por arco de alambre (WAAM) de aleaciones de aluminio. *Madre. Hoy Proc.* 2019, 221, 112006. [\[Referencia cruzada\]](#)
207. Zhao, Y.; Li, F.; Chen, S.; Lu, Z. Estrategia de planificación de procesos basada en bloques unitarios de WAAM para componentes complejos en forma de concha. *En t. J. Adv. Fabricante. Tecnología*. 2019, 104, 3915–3927. [\[Referencia cruzada\]](#)
208. Pantalón, H.; Arora, A.; Gopakumar, GS; Chadha, U.; Saeidi, A.; Patterson, AE Aplicaciones de la fabricación aditiva por arco eléctrico (WAAM) para la fabricación de componentes aeroespaciales. *En t. J. Adv. Fabricante. Tecnología*. 2023, 127, 4995–5011. [\[Referencia cruzada\]](#)
209. Bachus, NA; Strantz, M.; Clausen, B.; D'Elia, CR; colina, señor; Ko, JP; Pagano, DC; Brown, DW Nuevo mapeo de tensiones residuales triaxiales en masa en una muestra de puente fabricada con aditivos mediante el acoplamiento de difracción de rayos X de energía dispersiva y mediciones del método de contorno. *Añadir. Fabricante*. 2024, 83, 104070. [\[Referencia cruzada\]](#)
210. Gordon, JV; Haden, CV; Nied, HF; Vinci, RP; Harlow, DG Anisotropía del crecimiento de grietas por fatiga, textura y tensión residual en acero austenítico fabricado mediante fabricación aditiva con alambre y arco. *Madre. Ciencia. Ing. A* 2018, 115, 60–66. [\[Referencia cruzada\]](#)

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.