

EFFECTO DEL PWHT EN LA ACTUALIDAD: UNA REVISIÓN

CURRENT EFFECTS OF PWHT: A REVIEW

RESUMEN

El tratamiento térmico post-soldadura (PWHT) es fundamental para garantizar la integridad de uniones metálicas mediante el alivio de esfuerzos residuales y la estabilización microestructural. Esta revisión sintetiza investigaciones del periodo 2020–2025, analizando los mecanismos de relajación elasto-plástica y el rol de la plasticidad inducida por transformación (TRIP) como amortiguador de tensiones internas. Se examina la respuesta de materiales avanzados, incluyendo aceros de alta resistencia y aceros inoxidables, destacando la necesidad de optimizar las rampas térmicas para evitar la degradación de propiedades mecánicas. Asimismo, se exploran tecnologías avanzadas como la simulación computacional y los tratamientos térmicos localizados, proporcionando una perspectiva crítica sobre la evolución del PWHT hacia procesos más eficientes.

Palabras clave: *tratamiento térmico; soldadura; propiedades.*

ABSTRACT

Post-weld heat treatment (PWHT) is essential for ensuring the integrity of metallic joints through residual stress relief and microstructural stabilization. This review synthesizes research from the 2020–2025 period, analyzing elasto-plastic relaxation mechanisms and the role of transformation-induced plasticity (TRIP) as an internal stress buffer. The response of advanced materials is examined, including high-strength steels and stainless steels, highlighting the necessity of optimizing thermal ramps to prevent the degradation of mechanical properties. Furthermore, advanced technologies such as computational simulation and localized heat treatments are explored, providing a critical perspective on the evolution of PWHT toward more efficient processes.

Keywords: *heat treatment; welding; properties.*

ZAPATA GARZA, Irving Gael¹

CRUZ HERNÁNDEZ, Ventura Lilia²

SALAS TORRES, Luis Horacio²

FALCÓN FRANCO, Lázaro Abdiel¹

1. Facultad de Metalurgia,
Universidad Autónoma de
Coahuila. Monclova, Coahuila,
México.

2. Facultad de Contaduría y
Administración, Universidad
Autónoma de Coahuila.
Monclova, Coahuila, México.

Correspondencia
cruz.lilia@uadec.edu.mx
<https://orcid.org/0009-0003-3753-7944>
Fecha de recepción
1 de diciembre de 2025.
Fecha de aceptación
14 de junio de 2026.

1. INTRODUCCIÓN

La soldadura por arco eléctrico (figura 1) es un proceso de unión de metales, que emplea el calor generado por el arco eléctrico para fundir el metal base, y en muchos casos, un metal de aporte (Falodun et al., 2025). Estos procesos de soldadura a menudo se encuentran protegidos por gases como el argón, evitando así contaminarse con gases atmosféricos como el nitrógeno (Chakravarthula et al., 2024).

Imaginemos el tanque de gas LP que se usa para cocinar o calentar el agua en el boiler. Si no hay un manómetro, no se tiene certeza de que el gas se encuentre dentro del tanque, ya que no se puede ver ni se puede abrir el tanque para ver si está ahí. Sin embargo, uno confía en que hay gas porque la estufa enciende y el agua se calienta, como sugiere la figura 2. No se ve el gas, pero se sabe que existe por los efectos que produce. De esa forma sucede con los electrones, que son tan pequeños y se mueven a tanta velocidad que no se pueden observar directamente. Sin embargo, su comportamiento es lo que define todo lo que se conoce: desde cómo se genera la electricidad hasta cómo reaccionan las moléculas en los seres vivos.

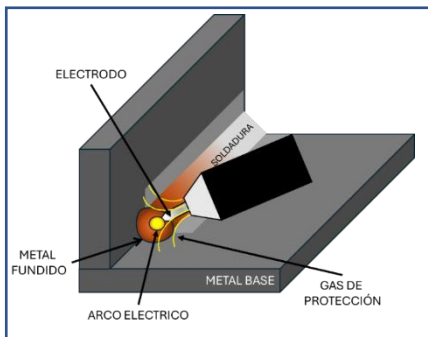


Figura 1. Representación de un método de soldadura por arco metálico con gas (GMAW por sus siglas en inglés). Adaptado de Falodun et al (2025); Zhang et al. (2024).

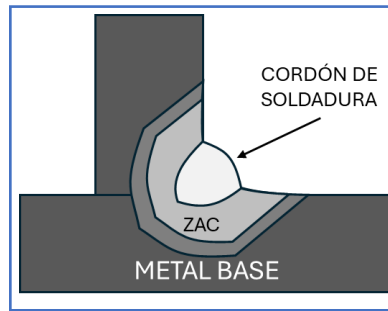
Sin embargo, los procesos de soldadura, aunque esenciales para unir componentes metálicos, introducen ciclos térmicos complejos que dan lugar a microestructuras en desequilibrio, esfuerzos residuales y una posible degradación de las propiedades mecánicas (Tomerlin et al., 2023). La zona afectada por el calor (ZAC) en la figura 2 y el metal de soldadura suelen presentar fases endurecidas, especialmente en los aceros, lo que puede comprometer la tenacidad de fractura y la resistencia mecánica tanto a cargas estáticas como

cíclicas (fatiga). Además, el calentamiento y enfriamiento no uniformes inherentes a la soldadura generan esfuerzos residuales de tracción que pueden acercarse a los niveles de límite elástico, lo que puede provocar fallas prematuras bajo cargas de servicio.



Figura 2. Junta soldada con representación de la ZAC y del metal base.

Adaptado de Chakravarthula et al. (2024).



El tratamiento térmico post-soldadura (PWHT, por sus siglas en inglés) ha evolucionado como la principal herramienta metalúrgica para hacer frente a estos retos, mediante la aplicación de ciclos térmicos controlados posteriores a la finalización de la soldadura. El PWHT puede templar las fases duras, aliviar los esfuerzos residuales, restaurar la ductilidad, la tenacidad y, en algunos casos, precipitar de nuevo las fases de endurecimiento en aleaciones endurecibles por envejecimiento (Alipooramirabad et al., 2022). La eficacia del PWHT depende de numerosos factores, entre los que se incluyen la composición química del material, el proceso de soldadura, la geometría de los componentes, el método de calentamiento, el ciclo de temperatura-tiempo y la velocidad de enfriamiento.

Los recientes avances en la tecnología de soldadura, los materiales avanzados de alta resistencia como el acero S960QL (para el cual el PWHT convencional ya no se presenta como la opción más óptima o segura) y los requisitos de eficiencia energética han impulsado una importante investigación para optimizar los procesos de PWHT.

Esta revisión bibliográfica recopila información de efectos en la microestructura y propiedades mecánicas, alivio de tensiones y control de la distorsión, parámetros específicos para la realización de un correcto PWHT en aceros, tecnologías de tratamiento térmico localizado y herramientas computacionales avanzadas aplicadas al PWHT.

2. METODOLOGÍA

Se realizó una búsqueda de artículos relacionados con el PWHT, incluyendo textos que abordaran mecanismos fundamentales, técnicas y tecnologías avanzadas. Los recursos utilizados para la búsqueda y recolección de artículos

fueron ResearchGate y Elsevier, empleando las siguientes palabras clave para la selección de artículos.

- PWHT Residual stress simulation
- Localized PWHT
- TRIP in welding
- Properties
- CREEP
- Numerical modeling

La selección de artículos priorizó su contemporaneidad. Sin embargo, no se descartaron publicaciones antiguas, para brindar una perspectiva de cómo el *PWHT* se ha ido optimizando a lo largo de la última década.

3. DESARROLLO Y DISCUSIÓN

3.1 EFECTOS EN LA MICROESTRUCTURA Y PROPIEDADES MECÁNICAS

3.1.1 Evolución microestructural

Aceros de alta resistencia. Las investigaciones sobre el acero de alta resistencia S690QL1 demuestran que el PWHT reduce progresivamente el contenido de martensita en favor de las estructuras templadas. El aumento de la temperatura del PWHT de 550 °C a 650 °C da lugar a una reducción sistemática de la dureza en el metal base, el metal de soldadura y la ZAC (Ferro et al., 2020). R. Sisodia et al. (2024) obtuvieron una mejora en pruebas de tenacidad al impacto para el acero S960QL confirmando que el PWHT promueve la recuperación y el revenido de la martensita. La evolución microestructural sigue la cinética clásica del templado, con precipitación de carburos y descomposición de la martensita.

Aceros de doble fase. Los estudios sobre los aceros DP780 y DP1400 muestran que el PWHT de revenido y el PWHT asistido por láser, respectivamente, transforman la fase martensítica acicular dura en martensita revenida (refinada y uniforme), que es menos frágil, lo que reduce la diferencia de dureza entre las fases ferrita y martensita (Chakravarthula et al., 2024; R. P.



S. Sisodia & Gáspár, 2021). Esta homogeneización microestructural mejora la conformabilidad, pero podría reducir la resistencia a la tracción.

Aceros inoxidables. El PWHT de las soldaduras del acero inoxidable 304 afecta a la precipitación de carburos y a la naturaleza de los límites de grano. Un PWHT adecuado puede disolver los carburos detrimentales y mantener la resistencia a la corrosión (Kellai et al., 2022).

3.1.2 Comportamiento mecánico ocasionado por el PWHT

Resistencia y dureza. El PWHT suele reducir el límite elástico y la resistencia a la tracción máxima en aceros de alta resistencia debido al templado de la martensita. El acero S690QL1 mostró una reducción de la resistencia del 15–25 % al aumentar la temperatura del PWHT, aunque esto vino acompañado de una mejora en la ductilidad (Ferro et al., 2020). La compensación entre resistencia y tenacidad requiere una optimización cuidadosa basada en los requisitos de servicio.

Resistencia y ductilidad. El PWHT generalmente mejora la resistencia y la ductilidad, al funcionar como un proceso de revenido, el PWHT transforma las microestructuras duras y frágiles formadas durante el enfriamiento de la soldadura (como la martensita o la bainita superior) en fases más blandas y dúctiles (Chakravarthula et al., 2024; Xiong et al., 2024). Sin embargo, la respuesta depende de la temperatura y puede ser perjudicial si se produce un templado excesivo. Las pruebas de impacto Charpy de varios grados de acero muestran rangos de temperatura óptimos para el PWHT en los que se maximiza la resistencia y se mantiene una resistencia adecuada (Falodun et al., 2025; Goo, 2021).

Resistencia a la fatiga. El efecto del PWHT sobre el comportamiento frente a la fatiga es complejo y depende de múltiples factores, entre ellos el estado de los esfuerzos residuales, la homogeneidad microestructural y el estado de la superficie. Sin embargo, algunos estudios informan de resultados de fatiga mixtos, especialmente en componentes a escala real, donde los efectos geométricos pueden afectar las mejoras del material (Kromm et al., 2020a).

El PWHT induce cambios microestructurales significativos (tamaño de grano, precipitados y cambios de fase) que además de influir directamente en las propiedades mecánicas, también afectan a los esfuerzos residuales. Estando estrechamente ligadas el cambio de una con la otra, estos efectos específicos

dependen de la PWHT, del material base, del proceso de soldadura y de los parámetros del PWHT.

3.2 ALIVIO DE ESFUERZOS RESIDUALES Y CONTROL DE LA DISTORSIÓN

Durante el soldeo, el material queda en un estado de restricción interna debido a que la contracción térmica está impedida por las zonas más frías o por la propia rigidez de la junta, acumulando esfuerzos que a menudo alcanzan el límite elástico del material a temperatura ambiente (Falodun et al., 2025).

- Cuando la unión soldada tiene baja restricción (libertad de deformación), la contracción natural del metal al enfriarse se traduce principalmente en deformaciones visibles (distorsión angular o longitudinal) (Seong et al., 2023).
- Cuando la unión soldada tiene alta restricción (debido a su geometría, rigidez o sujeciones), el material circundante impide la contracción libre. Esta restricción obliga a que las fuerzas térmicas se manifiesten como altas cantidades de esfuerzos residuales internos que son invisibles, pero pueden alcanzar el límite elástico del material (Seong et al., 2023).

Al depender de la disminución y el incremento de la restricción de la deformación, se genera una relación inversamente proporcional entre la contracción y los esfuerzos residuales (relación visible en la Figura 3). Los esfuerzos residuales derivados de la soldadura también afectan significativamente a la vida útil, la susceptibilidad a la corrosión bajo tensión y la estabilidad dimensional (Falodun et al., 2025).

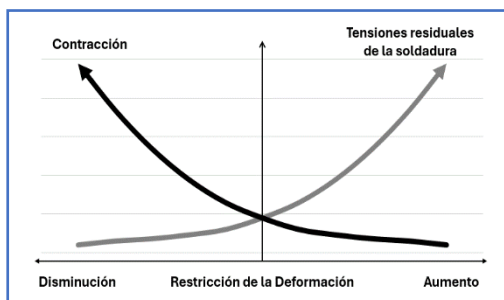


Figura 3. Relación de factores respecto a la disminución y el aumento de la restricción de la deformación durante la soldadura, adaptado de Syahroni e Hidayat (2012).

El PWHT alivia los esfuerzos residuales a través de varios mecanismos:



- Relajación de la tensión térmica a temperaturas elevadas, donde se reduce la resistencia al límite elástico.
- Deformación por fluencia que permite la redistribución de la tensión con el tiempo.
- Transformaciones de fase que pueden acomodar la deformación a través de cambios de volumen (Falodun et al., 2025; Yang, 2021).

3.2.1 Mecanismo de relajación: transición elasto-plástica y CREEP.

En el momento en que el límite elástico termo-dependiente es menor que el esfuerzo residual de tracción, el material ya no puede sostener esa carga elásticamente. La restricción se rompe mediante una deformación plástica local instantánea. Los esfuerzos que superan este nuevo umbral se relajan conforme el material fluye plásticamente, redistribuyendo las cargas internas uniformemente (Syahroni & Hidayat, 2012).

Una vez que el esfuerzo decrece hasta igualar el límite elástico a alta temperatura, el alivio continúa a través de la fluencia lenta o CREEP. Bajo las condiciones de mantenimiento del PWHT, los átomos tienen suficiente movilidad para reordenarse mediante el ascenso y deslizamiento de dislocaciones. El modelo de Norton-Bailey, citado por Yu et al. (2022), describe matemáticamente cómo esta deformación por fluencia convierte la energía elástica remanente en deformación plástica permanente a lo largo del tiempo, eliminando así la restricción interna de forma progresiva.

En aceros de alta resistencia, el PWHT no solo reduce el límite elástico para permitir la relajación, sino que también suaviza las estructuras martensíticas frágiles creadas por el arco eléctrico, transformándolas en martensita revenida (R. P. S. Sisodia & Gáspár, 2021). Esto asegura que, una vez enfriada la pieza y recuperado el límite elástico original, la restricción interna haya desaparecido sin riesgo de que aparezcan grietas por relevo de esfuerzos, siempre que se controlen fenómenos tales como la precipitación de carburos en aceros aleados (Kromm et al., 2020b).

3.2.2 Interacción entre transformación de fase y esfuerzos (efecto TRIP)

La TRIP se define como la deformación plástica anómala que ocurre cuando una transformación de fase (como la de austenita a martensita o bainita) se produce en presencia de un esfuerzo mecánico, incluso si ese esfuerzo es inferior al límite elástico del material. En la soldadura, los esfuerzos residuales



actúan como esa carga externa, provocando que el material "fluya" plásticamente durante la transformación, lo que ayuda a acomodar las deformaciones térmicas y reduce los picos de tensión local (Yang, 2021).

Cuando la austenita se transforma en fases como la martensita, ocurre una expansión volumétrica. Esta expansión genera deformaciones de compresión que pueden contrarrestar las tensiones de tracción provocadas por la contracción térmica durante el enfriamiento (Liu et al., 2021; Yang, 2021). La TRIP permite que esta expansión se traduzca en una redistribución más efectiva de los esfuerzos, evitando concentraciones críticas que podrían derivar en agrietamiento.

Se señala que la TRIP actúa como un amortiguador metalúrgico:

- Relajación de tensiones de tracción. Al permitir una deformación plástica a niveles de carga bajos durante el cambio de fase, se reduce la magnitud de los esfuerzos residuales de tracción en la zona de fusión y la zona afectada por el calor (ZAC).
- Alteración del perfil tensional: puede incluso invertir el estado de tensión en la superficie del cordón, pasando de tracción (peligrosa para la fatiga) a compresión, dependiendo de la temperatura de inicio de la transformación martensítica y la cinemática del proceso (Yang, 2021).

3.3 CONSIDERACIONES ESPECÍFICAS

Los aceros al carbono tradicionales responden bien al PWHT convencional, con un recocido de 600–650 °C que proporciona una reducción eficaz de los esfuerzos residuales sin una pérdida significativa de resistencia. La respuesta al templeado es predecible en función del contenido de carbono y los elementos de aleación. Los aceros de alta resistencia y baja aleación requieren una selección más cuidadosa de los parámetros del PWHT, debido a sus microestructuras complejas y mecanismos de endurecimiento. El templeado excesivo puede eliminar el endurecimiento por precipitación, mientras que un tratamiento insuficiente puede no proporcionar un alivio adecuado de la tensión.

Las investigaciones sobre el acero S960QL demuestran que las uniones soldadas por haz de electrones requieren temperaturas de PWHT de 580–620 °C para lograr un equilibrio óptimo entre el alivio de esfuerzos y la retención



de resistencia (R. Sisodia et al., 2024). Las temperaturas más altas provocan un ablandamiento excesivo del metal base.

Los aceros inoxidables austeníticos presentan retos únicos para el PWHT debido a su baja conductividad térmica y su alto coeficiente de expansión térmica. El PWHT debe evitar el rango de temperatura de sensibilización (450–850 °C) donde precipitan carburos de cromo, por lo que el material debe someterse a un enfriamiento rápido inmediatamente después del PWHT para evitar una nueva exposición a este intervalo de temperaturas. En el acero inoxidable 304 se demostró que el PWHT a 1050 °C, seguido de un enfriamiento rápido, disolvía eficazmente los carburos de cromo, incrementaba la resistencia a la corrosión y mejoraba las propiedades mecánicas (Kellai et al., 2022).

Los aceros para servicio a alta temperatura, como el 13CrMoV, son susceptibles de sufrir grietas por alivio de esfuerzos durante el PWHT. Las investigaciones indican que estas grietas son el resultado de la combinación de esfuerzos residuales de soldadura, fragilización del material y esfuerzos térmicos durante el calentamiento (Kromm et al., 2020a, 2020b).

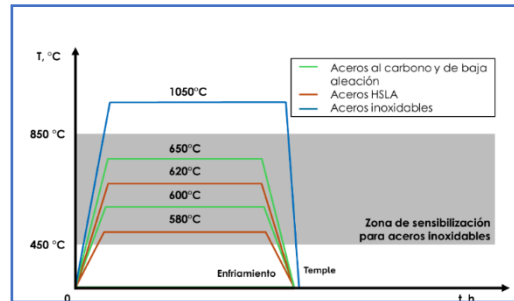
Las estrategias de prevención incluyen:

- Velocidades de calentamiento controladas para minimizar los gradientes térmicos.
- Alivio de esfuerzos antes del PWHT mediante métodos mecánicos, como el granallado, la laminación, el ultrasonido, la carga mecánica, el esmerilado y el chorro de arena, entre otros.
- Ciclos de PWHT modificados con mantenimientos de temperatura intermedios (Falodun et al., 2025; Goo, 2021; Yang, 2021; Zhang et al., 2024).

La figura 4 muestra los intervalos de temperatura del PWHT para distintos aceros. Las rampas no incluyen los tiempos de tratamiento debido a las diferencias entre materiales, como el espesor y la composición. Por ello, se requiere un diseño que optimice las propiedades en cada situación.

Figura 4. Temperaturas y tiempos de PWHT para aceros.

Adaptado de Rodríguez Soca et al. (2012)



3.4 MÉTODOS Y EQUIPOS DE TRATAMIENTO TÉRMICO LOCALIZADO

El calentamiento tradicional en horno sigue siendo el método de PWHT más común, ya que proporciona una distribución uniforme de la temperatura, pero requiere una cantidad significativa de energía y tiempo. Investigaciones recientes, como las de Falodun et al. (2025), Li et al. (2019), R. Sisodia et al. (2024) y Zhang et al. (2024), han explorado métodos de calentamiento alternativos:

- Tratamiento térmico localizado con haz de electrones post-soldadura (EBL-PWHT por sus siglas en inglés). Generalmente realizado al vacío, el calentamiento con haz de electrones enfocado (figura 5) permite el tratamiento específico de zonas de soldadura concretas, al tiempo que minimiza el calentamiento global, lo que reduce el consumo de energía (entre un 70 % y un 80 %) y permite obtener menos del 20 % de la distorsión registrada con el PWHT convencional (Alipooramirabad et al., 2022; R. P. S. Sisodia et al., 2024). Chen et al. (2002) obtuvieron, mediante el EBL-PWHT, la transformación de martensita acicular gruesa en martensita de listones en la zona fundida y en bainita inferior en la ZAC. En el ensayo de desplazamiento de la punta de grieta, se obtuvo un valor de 0.468 mm en la zona de soldadura, frente a los 0.074 mm obtenidos sin el tratamiento, lo que indica una mejora de la tenacidad a la fractura.

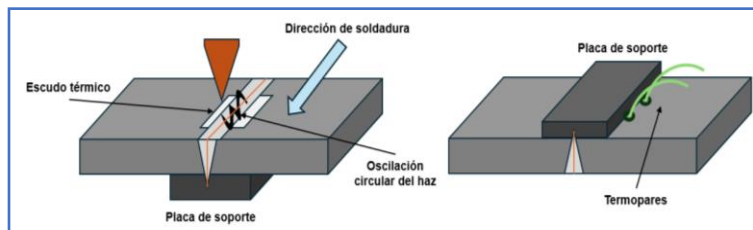


Figura 5. Esquema del proceso de EBL-PWHT.

Adaptado de R. P. S. Sisodia et al. (2024).

- La figura 6 muestra un PWHT con sistema láser de alta potencia (LBW-PWHT, por sus siglas en inglés). El PWHT con sistema láser de alta potencia utiliza un haz de luz coherente (fotones) y puede realizarse sin vacío (en atmósfera controlada), lo que permite un calentamiento rápido y localizado con un excelente control del proceso (Falodun et al., 2025; Xiong et al., 2024). Los recientes avances en los sistemas de modelado y escaneo del haz permiten patrones de calentamiento complejos adaptados a geometrías de unión específicas (Zhang et al., 2024). R. P. S. Sisodia y Gáspár (2021) obtuvieron martensita revenida al aplicar el LBW-PWHT para reducir los picos de dureza en las subzonas de grano fino y grueso para aceros duales.

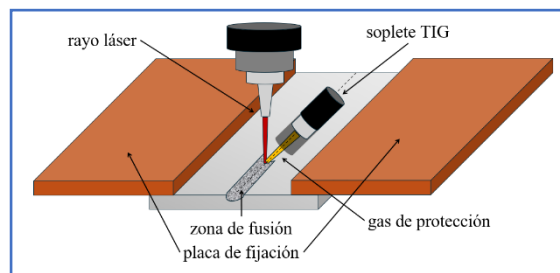


Figura 6. Esquema del proceso de LBW-PWHT.
Adaptado de Xiong et al. (2024).

- Tratamiento térmico post-soldadura por inducción (PWHT, por sus siglas en inglés): la inducción electromagnética (figura 7) proporciona un calentamiento rápido y controlado adecuado para geometrías específicas y puede automatizarse para entornos de producción (Gutiérrez Corani & Quispe Coca, 2024). Boudreault et al. (2014) encontraron que, para el acero CA6NM, la microdureza (HV), la tenacidad al impacto, la microestructura y las propiedades se mantuvieron equivalentes tanto con el PWHT tradicional como con el PWIHT.

Para uniones de placas de acero inoxidable revestidas (Q235/304) Cao et al. (2025) obtuvieron que tras 90 min de PWIHT la difusión de cromo en la matriz austenítica es drástica, lo que elimina el déficit y la segregación de cromo en las interfases y aumenta la resistencia a la corrosión localizada $\delta - F/A$. En contraste, Li et al. (2019) evaluaron el impacto tanto del precalentamiento como del PWHT en el acero S690QL y obtuvieron una mejor respuesta con el precalentamiento inductivo, evitando la exposición al segundo pico de

temperatura del post-calentamiento, que causa crecimiento heterogéneo del grano y aparición de porosidades. La tabla 1 compara los diferentes métodos expuestos en este trabajo.

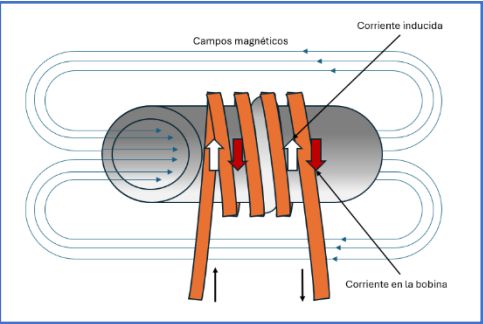


Figura 7. Esquema del PWHT.
Adaptado de
Gutiérrez Corani y Quispe Coca (2024).

Tabla 2. Comparación de los diferentes métodos de PWHT.
Adaptado de R. P. S. Sisodia y Gáspár (2021), Chen et al. (2002), Cao et al. (2025) y Falodun et al. (2025)

Método	Eficiencia energética	Reducción de distorsión	Entorno requerido	Aplicación principal
Horno	Baja (alta inercia)	Variable (global)	Atmosférico, vacío	Componentes pequeños, medianos
EBL-PWHT	Muy alta (70–80 % ahorro)	Reducción superior al 80 %	Vacío (limitante)	Soldaduras críticas de alta precisión
LBW-PWHT	Alta	Alta (localizada)	Atmosférico controlado	Geometrías complejas, aceros duales
PWHT	Media alta	Localizada	Atmosférico (portátil)	Reparación en campo, tuberías y turbina

3.5 MODELADO Y SIMULACIÓN DE PROCESOS

La implementación de herramientas computacionales, como en la mayoría de los sectores, ha supuesto una evolución significativa en la capacidad de predecir la integridad estructural. La simulación no solo reduce los costos experimentales, sino que también permite al usuario comprender mejor los fenómenos a escalas de tiempo y temperatura que serían difíciles de medir físicamente.

3.5.1 Modelos térmico-mecánicos acoplados

La simulación moderna de soldadura toma como base el análisis termomecánico, en el que el historial de temperaturas generado por la fuente

de calor móvil dicta la respuesta elastoplástica del material. Syahroni e Hidayat (2012) demuestran que el uso de un análisis desacoplado secuencial permite predecir con un alto grado de precisión cómo la entrada de calor influye en la distorsión de juntas complejas. Sin embargo, la simulación se extiende más allá del arco eléctrico hacia el tratamiento térmico. Yu et al. (2022) introducen la importancia de acoplar modelos de fluencia lenta (CREEP), como el de Norton-Bailey, para simular la relajación de tensiones durante el mantenimiento térmico. La tabla 2 expone los valores más relevantes acerca de la implementación del CREEP frente a la simulación sin CREEP.

Estos modelos permiten observar cómo la energía elástica acumulada se transforma en deformación plástica permanente, lo que contribuye al alivio de los esfuerzos residuales de la unión.

Tabla 3. Comparación de los modelos estudiados por Yu et al. (2022)

Parámetro	Sin CREEP	Con CREEP
Modelo	Elastoplástico	Viscoplástico
Dependencia del tiempo	No	Sí
Relajación de esfuerzos	Baja	Alta
Esfuerzo residual final	Alto	Bajo
Precisión respecto del experimento	Baja	Alta
Mecanismo dominante	Plasticidad	Fluencia (CREEP)

3.5.2 Modelado de la transformación de fase

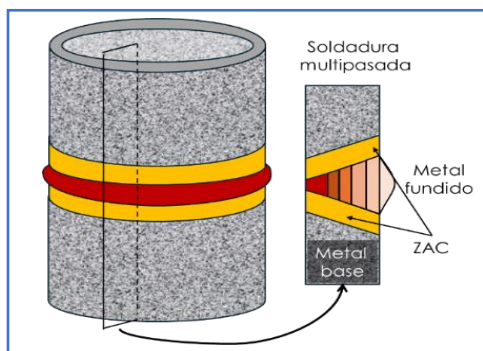
Un avance crítico para los modelos de simulación fue la inclusión de la cinética de reacción (Yang, 2021). Modelos sofisticados, como el de Johnson-Mehl-Avrami, incorporan la cinética de la transformación y permiten predecir la evolución microestructural durante el PWHT.

Yang (2021) subraya que el TRIP debe integrarse en el código de cálculo, ya que el cambio de volumen durante la transición de austenita a martensita o bainita altera drásticamente el estado tensional local. Además, programas



informáticos especializados, como SYSWELD (figura 9), permiten a los investigadores predecir la fracción de fases en tiempo real durante el enfriamiento (Liu et al., 2021). Esta capacidad es fundamental para optimizar los ciclos de PWHT y asegurar que el tiempo y la temperatura sean suficientes para transformar estructuras frágiles en microestructuras más dúctiles y tenaces, sin necesidad de ensayos destructivos de prueba y error.

Figura 9. Representación de soldadura multipasada realizada por SYSWELD para la obtención del objeto de estudio. Adaptado de Liu et al. (2021).



3.5.3 Predicción de esfuerzos residuales

Uno de los principales objetivos de los modelos y simuladores de PWHT es predecir los esfuerzos residuales de tracción. Seong et al. (2023) validan que los modelos de esfuerzo inherente son herramientas lo suficientemente eficaces para simplificar cálculos en placas gruesas, proporcionando una distribución de tensiones a través del espesor que coincide con mediciones realizadas con difracción de neutrones. Sin embargo, la predicción no es estática, sino que depende de las variables del proceso. Syahroni e Hidayat (2012) ilustran cómo la simulación de diferentes secuencias de soldeo (figura 10) revela que el orden en que se depositan los cordones puede redistribuir los esfuerzos residuales de manera favorable o desfavorable.

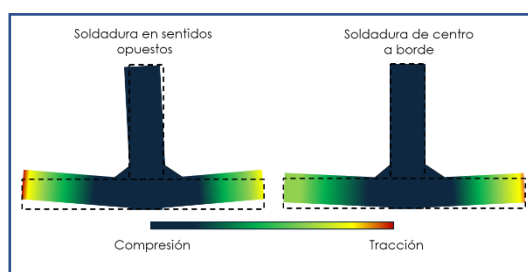


Figura 10. Comparación de dos secuencias de soldeo diferentes y su impacto en la magnitud y clasificación de esfuerzos residuales. Adaptado de Syahroni e Hidayat (2012).

CONCLUSIONES

REVISIÓN

Esta revisión bibliográfica revela avances significativos en la comprensión y la aplicación de las tecnologías del PWHT, entre los que destacan:

- Las transformaciones de fase durante el PWHT siguen una cinética previsible que puede modelarse utilizando teorías establecidas, lo que permite optimizar el proceso mediante simulación.
- Se confirma que el alivio de esfuerzos residuales no es un fenómeno únicamente térmico, sino que también depende de la conversión de deformación elástica en plástica mediante la reducción del límite elástico y el CREEP. Asimismo, la integración del TRIP actúa como un amortiguador metalúrgico crítico que permite redistribuir picos de tensión local mediante la expansión volumétrica durante los cambios de fase.
- La eficacia del PWHT es altamente sensible a la composición química; mientras que en aceros de alta resistencia (S690QL1 y S960QL) se requiere un equilibrio entre el revenido de la martensita y la retención de dureza, en aceros inoxidables austeníticos el éxito radica en el control estricto de las rampas de enfriamiento para evitar el rango de sensibilización.
- Las tecnologías emergentes EBL-PWHT, LBW-PWHT y el PWIHT representan un cambio de paradigma en eficiencia energética, logrando ahorros de hasta el 80 % y reducciones de distorsión superiores al 80 % en comparación con el PWHT convencional. Estos métodos permiten un control preciso, fundamental para la integridad de geometrías complejas y aceros de doble fase.
- La simulación computacional, apoyada por modelos como el de Norton-Bailey y herramientas como SYSWELD, se ha consolidado como una estrategia predictiva indispensable. La capacidad de predecir la fracción de fases y el estado tensional en tiempo real permite la transición hacia una manufactura proactiva, lo que elimina la dependencia de ensayos destructivos de prueba y error.

El campo de investigación del PWHT evoluciona aceleradamente, impulsado por las demandas de una mayor eficiencia energética, un mejor rendimiento y la ampliación de las aplicaciones de los materiales. El éxito de los desarrollos futuros requerirá la integración continua de la investigación fundamental, la modelización avanzada y la validación industrial para traducir los descubrimientos de laboratorio en soluciones prácticas de fabricación.

AGRADECIMIENTOS

Irving Gael Zapata Garza le agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca con número CVU 2081712 para la realización de los estudios de posgrado.

REFERENCIAS

- Alipooramirabad, H., Paradowska, A., Reid, M., & Ghomashchi, R. (2022). Effects of PWHT on the residual stress and microstructure of Bisalloy 80 steel welds. *Metals*, 12(10), 1569. <https://doi.org/10.3390/met12101569>
- Boudreault, E., Hazel, B., Coté, J., & Godin, S. (2014). In situ post-weld heat treatment on martensitic stainless steel turbine runners using a robotic induction heating process to control temperature distribution. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 22(1), 012016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/22/1/012016>
- Cao, J., Wang, Y., Xu, G., Liu, X., Zeng, X., & Wei, K. (2025). Effect of post-weld induction heat treatment on single-pass high-power laser-arc hybrid welded thick stainless steel clad plate: Microstructure, mechanical properties and corrosion resistance. *Journal of Materials Research and Technology*, 38, 2623–2635. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.08.068>
- Chakravarthula, G. K., Quamar, M. J., Nagumothu, K. B., Venkata Guttula, S. K., Bandi, B., & Talari, M. K. (2024). Investigations of microstructure and mechanical properties of post-weld heat-treated DP780 steel TIG welds. *Fusion Science and Technology*, 80(2), 215–229. <https://doi.org/10.1080/15361055.2023.2219830>
- Chen, F. R., Huo, L. X., Zhang, Y. F., Zhang, L., Liu, F. J., & Chen, G. F. T. (2002). Effects of electron beam local post-weld heat-treatment on the microstructure and properties of 30CrMnSiNi2A steel welded joints. *Journal of Materials Processing Technology*, 129(1–3), 412–417. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00704-5](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00704-5)
- Falodun, O., Oke, S., & Bodunrin, M. (2025). A comprehensive review of residual stresses in carbon steel welding: Formation mechanisms, mitigation strategies, and advanced post-weld heat treatment techniques. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 136(10), 4107–4140. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15088-8>
- Ferro, P., Berto, F., Bonollo, F., Romanin, L., & Salemi, G. (2020). Post welding heat treatment improving mechanical properties on Ti-6Al-4V. *Procedia Structural Integrity*, 26, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.06.003>



- Goo, B.-C. (2021). Effect of post-weld heat treatment on the fatigue behavior of medium-strength carbon steel weldments. *Metals*, 11(11), 1700. <https://doi.org/10.3390/met11111700>
- Gutiérrez Corani, H., & Quispe Coca, R. A. (2024). Tecnología de calentamiento por inducción: Eficiencia y seguridad en procesos industriales y domésticos. *Horizonte Académico*, 4(2), 11–22. <https://doi.org/10.70208/3007.8245.v4.n4.15>
- Kellai, A., Kahla, S., Dehimi, S., Kaba, L., & Boutaghou, Z. (2022). Effect of post weld heat treatment on the microstructure and mechanical properties of a gas-tungsten-arc-welded 304 stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 121(11–12), 8171–8186. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09896-5>
- Kromm, A., Lausch, T., Schroeffer, D., Rhode, M., & Kannengiesser, T. (2020a). Influence of welding stresses on relief cracking during heat treatment of a creep-resistant 13CrMoV steel: Part I—effect of heat control on welding stresses and stress relief cracking. *Welding in the World*, 64(5), 807–817 <https://doi.org/10.1007/s40194-020-00875-6>
- Kromm, A., Lausch, T., Schroeffer, D., Rhode, M., & Kannengiesser, T. (2020b). Influence of welding stresses on relief cracking during heat treatment of a creep-resistant 13CrMoV steel Part II: Mechanisms of stress relief cracking during post weld heat treatment. *Welding in the World*, 64(5), 819–829. <https://doi.org/10.1007/s40194-020-00881-8>
- Li, L., Mi, G., & Wang, C. (2019). A comparison between induction pre-heating and induction post-heating of laser-induction hybrid welding on S690QL steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 43, 276–291. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.05.003>
- Liu, Z., Hu, X., Yang, Z., Yang, B., Chen, J., Luo, Y., & Song, M. (2021). Optimization study of post-weld heat treatment for 12Cr1MoV pipe welded joint. *Metals*, 11(1), 127. <https://doi.org/10.3390/met11010127>
- Rodríguez Soca, I., Díaz Hernández, Y., Fiol Zulueta, A., & Caballero Stevens, N. (2012, noviembre). *Método para el cálculo de hornos metódicos de pozo para el revenido de aceros* [Ponencia]. Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, La Habana, Cuba. https://www.researchgate.net/publication/308417027_Metodo_para_el_calculo_de_hornos_metodicos_de_pozo_para_el_revenido_de_aceros_Metodo_para_el_calculo_de_hornos_metodicos_de_pozo_para_el_revenido_de_aceros
- Seong, D., An, G., Park, J., & Woo, W. (2023). Welding residual stress distributions in the thickness direction under constraints using neutron diffraction and contour methods. *Metals*, 13(1), 25. <https://doi.org/10.3390/met13010025>

- Sisodia, R. P. S., & Gáspár, M. (2021). Investigation of metallurgical and mechanical properties of laser beam welded and post-weld heat treated DP1400 steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(3), 1703–1710. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05469-x>
- Sisodia, R., Sliwinski, P., Koncz-Horváth, D., & Węglowski, M. St. (2024). In situ localised post-weld heat treatment with electron beam welding of S690QL steel. *Journal of Advanced Joining Processes*, 9, 100182. <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2023.100182>
- Sisodia, R. P. S., Sliwinski, P., Koncz-Horváth, D., & Węglowski, M. St. (2024). Influence of post-weld heat treatment on S960QL high-strength structural steel electron-beam-welded joint. *Metals*, 14(12), 1393. <https://doi.org/10.3390/met14121393>
- Syahroni, N., & Hidayat, M. I. P. (2012). 3D finite element simulation of T-joint fillet weld: Effect of various welding sequences on the residual stresses and distortions. En M. Andriychuk (Ed.), *Numerical simulation—From theory to industry*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/50015>
- Tomerlin, D., Marić, D., Kozak, D., & Samardžić, I. (2023). Post-weld heat treatment of S690QL1 steel welded joints: Influence on microstructure, mechanical properties and residual stress. *Metals*, 13(5), 999. <https://doi.org/10.3390/met13050999>
- Xiong, J., Wang, R., Zhao, D., Liu, H., & Zhou, J. (2024). Effects of post-weld heat treatment on the microstructure and mechanical properties of automatic laser-arc hybrid welded AZ31B magnesium alloys. *Metals*, 14(7), 806. <https://doi.org/10.3390/met14070806>
- Yang, Y. P. (2021). Recent advances in the prediction of weld residual stress and distortion—Part 1. *Welding Journal*, 100, 151-s–170-s. <https://doi.org/10.29391/2021.100.013>
- Yu, B., Wang, P., Song, X., & Huo, S. (2022). The residual stress relief of post weld heat treatment in SMA490BW welded joints: Simulation and experiment. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 200, 104852. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2022.104852>
- Zhang, H., Li, R., Liu, J., Wang, K., Weijian, Q., Shi, L., Lei, L., He, W., & Wu, S. (2024). State-of-art review on the process-structure-properties-performance linkage in wire arc additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, 19(1), e2390495. <https://doi.org/10.1080/17452759.2024.2390495>