

Análisis estructural y térmico en soldadura de superaleaciones base-Ni.

Etzael Jaime Moreno^{1,2}
Adriana Del Carmen Gallegos Melgar³

¹ CIATEQ. Circ. De la Industria Pte. Lote 11, Manz. 3. No. 11, Parque Industrial exhacienda Doña Rosa Lerma. Lerma, Estado de México.

² PEASA Autopartes SA de CV. Poniente 134 #854, Del. Azcapotzalco Colonia Industrial Vallejo, CDMX.

³ CONACYT-COMIMSA. Centro de Tecnología Avanzada CIATEQ, AC, Posgrado. Eje 12, No. 225, Industrial San Luis, San Luis Potosí.

Resumen

En este trabajo se presenta la simulación por elemento finito y la experimentación del proceso de soldadura GTAW en superaleaciones base níquel con fines de prototipos aeronáuticos. En la primera parte, se realizó la simulación con soporte del software SIMUFACT Welding™. La primera simulación se realizó para una junta a tope en Inconel 625 para un proceso GTAW autógena para un aporte térmico de 1320 J/cm con pulsaciones de 10 Hz evitando la fragilización en caliente en el cordón. La segunda simulación se realizó para una junta en T de Inconel 625 para el proceso GTAW con un material de aporte ER-NiCrMo-3 con un aporte térmico de 1568 J/cm. Se caracterizaron las propiedades estructurales y mecánicas y se observó que se satisficieron los criterios de aceptación de las especificaciones AWS D17.1 y del cliente aeronáutico para ensayos destructivos y no destructivos.

PALABRAS CLAVE. Diseño y elemento finito, procesos de soldadura, superaleaciones base níquel

Abstract

In this research work was studied finite element simulation and experimentation of the GTAW welding process in nickel-based superalloys for aeronautical purposes. In the first part, the simulation was carried out with the support of the SIMUFACT Welding™ software. The first part was simulated and performed in butt-joint in Inconel 625 for an autogenous GTAW process for 1320 J / cm and pulsations of 10 Hz, avoiding solidification cracking. The second simulation was performed for an Inconel 625 T-joint for the GTAW process with a filler material ER-NiCrMo-3 with 1568 J / cm. The structural and mechanical properties were characterized, and they reported the criteria of the AWS D17.1 (American Welding Society [AWS], 2017) and the specifications of the aeronautical customer for destructive and nondestructive tests were satisfied.

KEYWORDS. Design and finite element, welding processes, nickel base superalloys

Artículo arbitrado

Recibido:	Aceptado:
15 de marzo de 2021	13 de abril de 2021

I. Introducción.

Las estructuras soldadas complejas, tal como perfiles aerodinámicos, fuselajes, etc., con frecuencia, están expuestas a cargas estáticas, dinámicas y térmicas exigentes durante el periodo de servicio. En la actualidad, aun sabiendo las exigencias mecánicas y térmicas a las que están expuestas estas estructuras, las fallas ocurridas en soldadura son comunes. Es necesario realizar métodos bien definidos que puedan servir de base para el diseño y evaluación estructural y térmica de los componentes soldados y de las estructuras sometidas a estas cargas fluctuantes (AWS, 2018). Las fallas más comunes en soldadura son fragilización en frío, fragilización en la Zona Afectada por el Calor y en caliente, así como por envejecimiento y, sobre todo, por fatiga térmica (H. Phillips, 2015).

Existen varios métodos de soldadura. Los que se utilizan más a menudo en la industria aeronáutica y aeroespacial, son la soldadura por arco de tungsteno con gas (GTAW), la soldadura por resistencia por punteo (RSW), la soldadura por haz de electrones (EBW) y la soldadura por haz láser (LBW).

La soldadura por arco de tungsteno y gas (gas tungsten arc welding) GTAW, es un proceso que funde y se une a los metales al calentarlos con un arco establecido entre un electrodo de tungsteno no consumible y los metales. Los efectos físicos generados durante el arco eléctrico del electrodo de Tungsteno y la pieza de trabajo, tal como, emisión termiónica de los electrones, calor óhmico, arco plasma, efecto *bouyancy* (*fuerza hidrostática*), tensión superficial generado por convección, conducción y absorción electrónica (Kou, 2020) influyen directamente en la calidad de las estructuras soldadas.

La simulación por medio de elemento finito es utilizada ampliamente para modelar fenómenos físicos. SIMUFACT Welding™ es un software basado en elementos finitos para simulaciones de soldadura. Los cálculos de elementos finitos son adecuados para modelar el comportamiento elastoplástico del material y, por lo tanto, también para simular estructuras de soldadura. Es importante saber que Simufact Welding ofrece

numerosas funciones y referencias de entrada que permiten al ingeniero en soldadura planear y optimizar las aplicaciones de soldadura, lo cual incluye la habilidad de controlar intervalos de diversos robots para modificar la secuencia de soldadura, velocidad, aporte térmico, paros y sistemas de sujeción.

La última tecnología de resolución y un concepto general fácil de usar permiten calcular las secuencias de soldadura de manera eficiente y predecir las distorsiones del componente de manera realista (Messler, 2019).

En este trabajo, se utilizó el software SIMUFACT Welding™ para simular el proceso de soldadura GTAW en juntas a tope y en T en superaleaciones base níquel, mediante experimentación de los prototipos, se verificó la simulación a través de la siguiente metodología.

II. Método

Para llevar a cabo este trabajo, se siguieron los pasos de operación típicos de la simulación de soldadura, los cuales son:

- 1) Creación del modelado y mallado. Las dimensiones de las geometrías de la junta a Tope y en T fueron modeladas usando Siemens NX 11, las cuales se muestran en la Tabla 1. Una vez que se completaron los procesos de modelado de geometría, todas las geometrías se importaron al software MSC Apex para el proceso de mallado (hexaedros de segundo orden, cuenta con tres elementos en el espesor de los componentes) y también se definieron las propiedades de los materiales (Tabla 2). Estas geometrías son exportadas en formato (.bdf).
- 2) Preprocesamiento en Simufact Welding. Envuelve diferentes pasos, el primero fue la puesta a punto de la simulación, se indica el número de componentes, número de robots, número sujeción. Se selecciona el tipo de material (Tabla 3), la selección de nodos en la malla y trayectorias que recorrerá el robot de soldadura, para seleccionar los parámetros del proceso de soldadura (intensidad de corriente, diferencia de potencial, velocidad de avance, etc., mostrados en la Tabla 3). Se activa y

desactiva el tiempo de los Clamps a utilizar, además de la rigidez de éstos.

- 3) Calibración de la fuente de calor. Para obtener la distribución adecuada de la fuente de calor en el patrón de soldadura, primero se debe calibrar la fuente de calor en Simufact Welding. Para esta simulación de soldadura, la fuente de calor utilizada fue Goldak doble elipsoide, un modelo de fuente de calor común para los procesos de soldadura por arco. La fuente de calor en Simufact Welding es fácil de visualizar y modificar hasta que se obtiene un tamaño adecuado de fuente de calor para la simulación de soldadura.
- 4) Simulación de soldadura. La simulación de soldadura comenzó con la simulación del análisis térmico sin solución mecánica. Lo anterior era importante para garantizar que la térmica se distribuyera bien a lo largo de la trayectoria de la soldadura. Posteriormente, se realizó el análisis mecánico a la junta a tope y en T.
- 5) Post Procesamiento. Una vez completada la simulación, todos los resultados mecánicos tales como: distorsión total, esfuerzo efectivo, esfuerzo total, podrán ser visualizados y comparados en las figuras y gráficos de la sección de resultados (Natesh y Manikandan, 2020).

Tabla 1. Cantidad y Dimensiones de las placas para realización de la simulación de soldadura

Tipo de Probeta	Dimensiones (mm)	Cantidad
Soldadura de Ranura	99 x 90	5
Soldadura de Filete	200 x 90	2

Tabla 1. Cantidad y dimensiones de las placas para realización de la simulación de soldadura. Fuente: elaboración propia.

El material base fue Inconel 625 y el material de aporte fue ER-NiCrMo-3, se muestra su composición química en la tabla 2.

Tabla 2. Composición química Inconel 625 y ER-NiCrMo-3 con base en AWS A5.14

Ni	Cr	Fe	Mo	Nb+Ta	C	Mn	Si	P	S	Al	Co	Ti
60.5	22.14	4.37	8.25	3.37	0.04	0.34	0.20	0.008	0.002	0.21	0.14	0.21
64.37	22.26	0.19	9.18	3.53	0.02	0.01	0.07	0.003	0.001	0.06	0.01	0.22

Tabla 2. Composición química Inconel 625 y ER-NiCrMo-3 con base en AWS A5.14. Fuente: elaboración propia

En la Tabla 3, se muestran los parámetros de soldadura para el análisis por elemento finito y para la parte experimental.

Tabla 3. Parámetros eléctricos y mecánicos de Soldadura Para la Simulación en Simufact Welding

Parámetro de Soldadura.	Soldadura de Ranura	Soldadura de Filete
Diferencia de Potencial	12 V	14 V
Intensidad de Corriente	110A	70 A
Tipo de Corriente	DCEN	DCEN
Angulo de Antorcha	90°	45°
CTWD (Distancia de la Punta de Contacto al Trabajo)	4 mm	5 mm
Tiempo Pre y Post flujo de Gas	0.2 y 0.5 s.	0.2 y 0.5 s.
Flujo de Gas	15 CFH	15 CFH
Diámetro y Clasificación del Electrodo	2.4 mm y EW Tres fieras.	2.4 mm y EW Tres fieras.
Velocidad de Avance	10 mm/s	15 mm/s
Mezcla de gas	Ar- Alta pureza	Ar- Alta pureza
Posición de Soldadura	1G (Plana)	2F (Horizontal)
Fuente de Poder	OTC DA 300P	Fronius TransTig 500
Componentes del Modelado	2	2
Soporte	1	1
Clamps	4	2
Robots	1	1
Puesta a punto Clamp		
▪ Tiempo de Activación	0 s	0 s
▪ Tiempo de Desactivación	100 s	250 s
▪ Rigidez	1 N/mm	1 N/mm
Fuente de Calor	Goldak Doble Elipsoide	Goldak Doble Elipsoide

Tabla 3. Parámetros eléctricos y mecánicos de Soldadura Para la Simulación en Simufact Welding. Fuente: elaboración propia.

Para la verificación de la simulación de soldadura, se realizó la experimentación, mediante la aplicación de la soldadura con los parámetros que se muestran en la Tabla 3. De esa forma, se validó con los siguientes ensayos destructivos y no destructivos: (1) Inspección visual (VT); (2) Escaneo por fotometría óptica por medio de un equipo Atos by GOM; (3) Líquidos penetrantes fluorescentes (PT); (4) Radiografía por rayos X (RT); (5) Análisis microestructural y (6) Micro dureza Vickers.

III. Resultados

Los resultados de la simulación para la probeta en junta en T y a tope para el análisis térmico y mecánico se muestra en la Figura 1. Ahí, es posible observar la parte superior del gradiente térmico durante la soldadura a 38.61 segundos con base en los parámetros de soldadura, el cual corresponde al término de la aplicación de calor transmitido por

conducción/convección a través del componente. La temperatura máxima corresponde con la temperatura de fusión del Inconel 625 en el centro del cordón y, como se transmite hacia el material base y en la parte inferior de la Figura 1, se observa la distorsión total generada por el gradiente y distribución de temperatura a lo largo de la trayectoria, cuyo valor fue de 0.99 mm a 38.61 segundos en la esquina superior del término de la trayectoria del cordón de soldadura.

Figura 1. Análisis térmico y mecánico del proceso GTAW donde se muestra la temperatura máxima

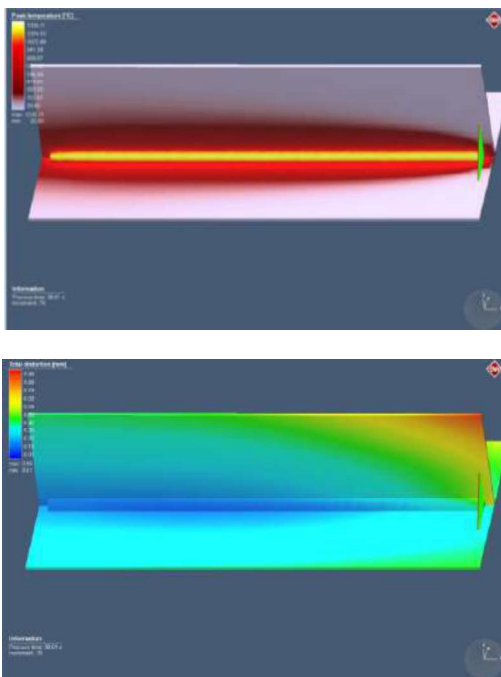


Figura 1. Análisis térmico y mecánico del proceso GTAW, donde se muestra la temperatura máxima en la zona centro y zona afectada térmicamente y la distorsión total a lo largo de la junta. Fuente: elaboración propia

En la parte superior de la Figura 2, se obtuvo la distribución de temperatura. Además, se observó que la morfología del charco no cambia con respecto al tiempo hasta el término del cordón de soldadura (~9 segundos). A lo largo de la junta a tope, en color amarillo, se representa la fusión del Inconel 625, SIMUFACT Welding™, la cual considera las propiedades térmicas constantes, que no existan pérdidas de calor en la superficie y pérdidas por convección en el charco de soldadura.

En la parte inferior de la Figura 2, se obtuvo que la deformación o desplazamiento total máximo es de 0.44 mm, lo cual se generó en los extremos debido a la conducción de calor de la fuente de calor después de 120 segundos de iniciar el arco eléctrico, durante la generación del cráter se obtuvo una distorsión de 0.30 mm.

Figura 2. Análisis térmico y mecánico del proceso GTAW donde se muestran las variaciones de la temperatura en junta a Tope y la deformación angular

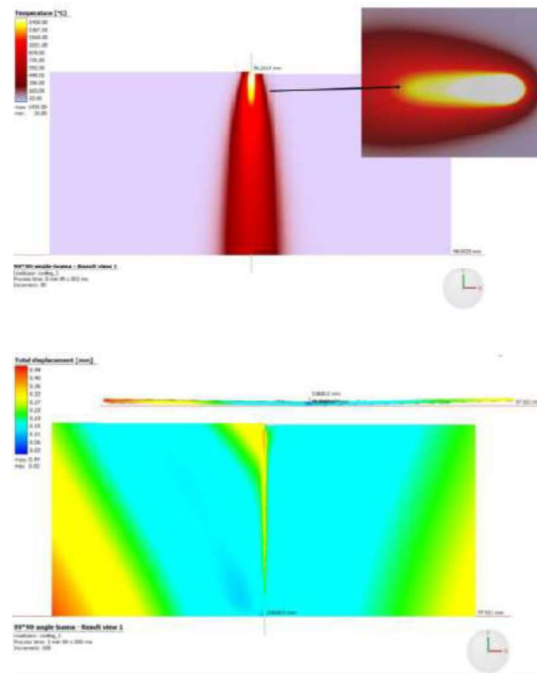


Figura 2. Análisis térmico y mecánico del proceso GTAW, donde se muestran las variaciones de la temperatura en junta a Tope y la deformación angular generada durante la simulación. Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 4 se observan los resultados de los ensayos destructivos y no destructivos, mostrando el estado, para la junta en T y a tope, respectivamente. La inspección visual, así como líquidos penetrantes fluorescentes no presentó alguna discontinuidad o defecto en la superficie que afectará el rendimiento del componente.


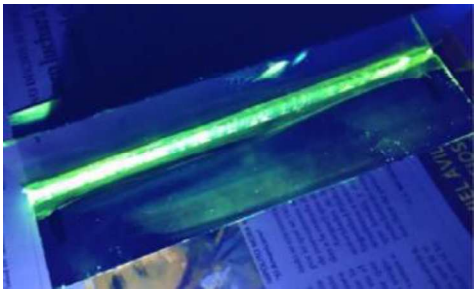
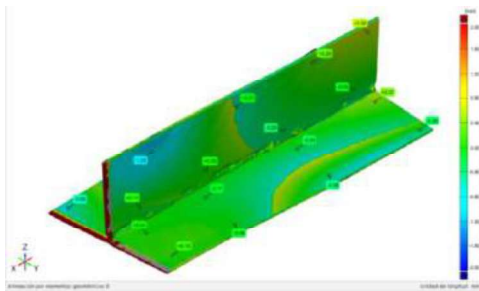
El comparativo de la simulación y la parte experimental arrojó una medición de -1.06 mm de la malla experimental, debido a las variaciones de la presión del sistema de sujeción, en el extremo superior derecho de la imagen, se observa una

medición de +0.58 mm comparando con la simulación.

En la macrografía se observó una soldadura ligeramente convexa; no presenta fracturas longitudinales al cordón de soldadura, presenta un tamaño de soldadura de 4.21 mm, no presenta porosidad, inclusiones no metálicas o socavado en el pie de soldadura, la fusión es de 0.51 y 0.34 mm respectivamente, se obtuvo una microestructura de una matriz gamma prima γ' con carburos de Niobio (NbC)

La magnitud de la dureza en el metal base fue de 330 a 390 HV, en la Zona Afectada por el Calor se incrementaron los valores de 390 a 435 HV.

Tabla 4. Resultados de Ensayos para la junta en T, Inspección visual y Líquidos Fluorescentes

Método	Resultado
Inspección Visual	
Líquidos Penetrantes Fluorescentes	
Comparación Simulación vs Experimentación	

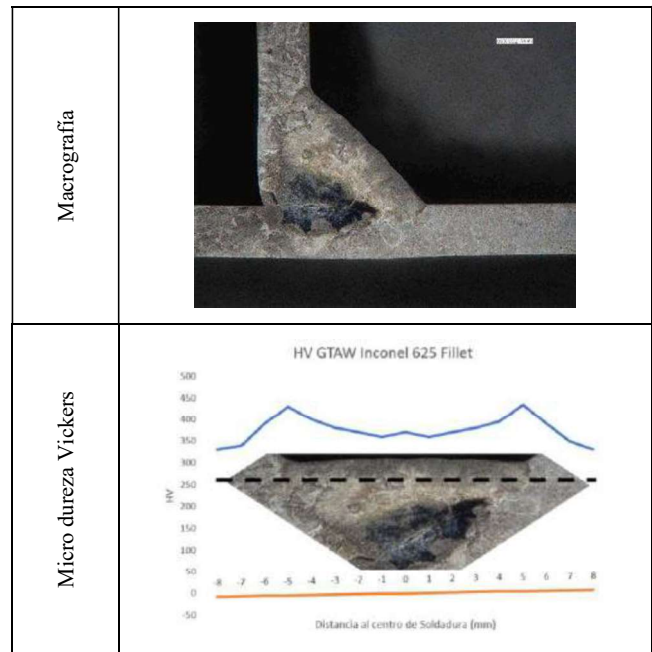


Tabla 4. Resultados de ensayos para la junta en T, la inspección visual y los líquidos fluorescentes satisfacen los criterios de aceptación, en la macrografía satisface el tamaño de soldadura mínimo, además de las variaciones de la dureza en la zona de fusión. Fuente: elaboración propia.

Se obtuvieron los siguientes resultados para la junta a tope: la inspección visual y los líquidos penetrantes fluorescentes no presentaron indicaciones relevantes debido a discontinuidades o defectos en la superficie de las placas.

El comparativo de la simulación muestra un valor de -0.90 mm (zona azul), cuya variación en la deformación está relacionada con las condiciones de frontera (temperatura ambiente del sistema y temperatura del dispositivo de sujeción). La distorsión angular generada durante la experimentación corresponde con la generada por SIMUFACT Welding™.

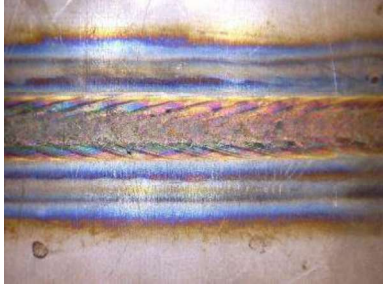
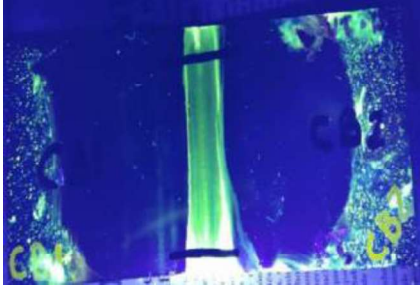
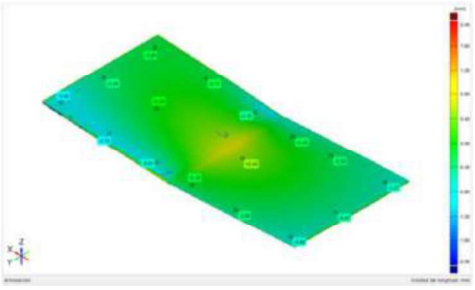
En la radiografía, se observa una falta de fusión en los extremos del cordón efectivo, debido a que ocurren dos estados térmicos durante el proceso de soldadura, el estado cuasi-estacionario y el transitorio (Niemi, Fricke, y Maddox, 2017), en el centro del cordón efectivo no presenta fractura o discontinuidades volumétricas.

En la macrografía, la resistencia de la soldadura está relacionada con la penetración a través de toda la junta (Simufact Welding (V2020), 2020), la cual debe ser igual o mayor al material base, no presenta porosidades, desalineamiento, fracturas

longitudinales o transversales a la soldadura, el reforzamiento de soldadura es casi nulo (radio de transición en el pie de soldadura).

En la micro dureza Vickers, se observó que la máxima dureza obtenida fue de 425 HV en la zona afectada por el calor, debido a la consecuencia de generar una mayor cantidad de carburos de NbC en la matriz gamma prima γ' . En el metal base, se presentaron los valores de dureza de 320 HV.

Tabla 5. Resultados de Ensayos para la junta a Tope

Método	Resultado
Inspección Visual	
Líquidos Penetrantes Fluorescentes	
Comparación Simulación vs Experimentación	

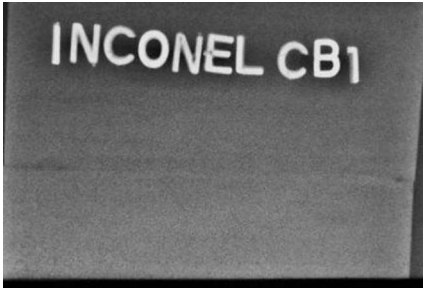

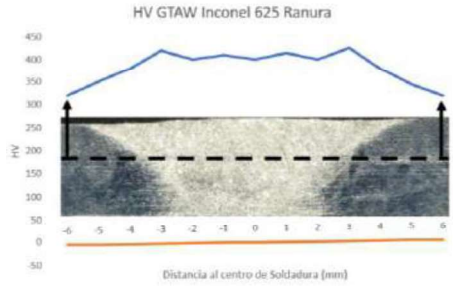
Radiografía	
Macrografía	
Micro dureza Vickers	

Tabla 5. Resultados de Ensayos para la junta a Tope, la inspección visual muestra la decoloración en la ZAC, la radiografía y la Macrografía no se observan discontinuidades de soldadura. Fuente: elaboración propia.

IV. Discusión y conclusiones

El resultado de la simulación de SIMUFACT Welding™ para la deformación total angular máxima de la soldadura en la junta a tope referente a Inconel 625, fue de 0.44 mm de deformación en el caso de un aporte térmico de 1320 J/cm, mediante el uso del proceso GTAW con pulsaciones de 10 Hz, a fin de evitar la fragilización en caliente en el cordón y en la zona afectada por el calor (ZAC). Al comparar entre el resultado del proceso de simulación y el resultado del proceso de experimentación para la soldadura GTAW, en junta en T, la deformación total máxima de la experimentación no correspondió con la deformación obtenida en el proceso de simulación. Lo anterior se debe a la diferencia de la magnitud en la presión del sistema de sujeción

del componente, que fue a 1568 J/cm; lo cual valida la importancia de la ubicación y presión de un sistema de sujeción para disminuir la deformación obtenida después de la soldadura.

Al evaluar las imágenes obtenidas metalográficamente de las juntas a tope y en T, obtenidas en el proceso GTAW para Inconel 625, además de una matriz gamma prima γ' con carburos de Niobio (NbC), no se encontraron fracturas inter o transgranulares, porosidad, socavado, fusión y penetración incompleta. De esa forma, se obtuvieron las propiedades metalúrgicas que satisfacen la resistencia a esfuerzos cíclicos, termofluencia y corrosión, para los cuales fueron diseñados. La cantidad y distribución están relacionados con la magnitud de aporte térmico utilizado para cada junta.

La distribución de la micro dureza, a lo largo de una soldadura medida en una superficie de sección transversal, proporciona información importante sobre el historial de calentamiento y enfriamiento de la soldadura y sobre la inferencia del proceso y el rendimiento, las variaciones son resultado de los cambios microestructurales, tamaño de grano y precipitación de fases. Las mediciones entre las diferentes zonas fueron de menos de 150 puntos en micro dureza HV, lo cual cumple con la especificación de cliente aeronáutico.

Los líquidos penetrantes fluorescentes y la radiografía por rayos x no detectaron discontinuidades o defectos relevantes en los componentes a lo largo de los diferentes procesos de soldadura, tales pruebas son insuficientes para determinar la integridad del componente, las fases, modos de solidificación y cantidad de carburos o precipitados encontrados en la microestructura y que afectan el rendimiento en servicio.

Referencias

- American Welding Society (AWS) D17 Committee on Welding in the Aircraft and Aerospace Industries. (2017). *Specification for Fusion Welding for Aerospace Applications, Supersedes AWS D17.1/D17.1M:2010*. American Welding Society.
- American Welding Society, Sinnes, K., & Welding Handbook Committee. (2018). *AWS WHB-10. 1, Welding*

Handbook, WELDING and CUTTING SCIENCE and TECHNOLOGY. American Welding Society.

- H. Phillips, D. (2015). *Welding Engineering: An Introduction*. Wiley. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12666-020-01964-2>
- Kou, S. (2020). *Welding Metallurgy, 3rd Edition*. Wiley.Com. <https://www.wiley.com/en-us/Welding+Metallurgy%2C+3rd+Edition-p-9781119524816>
- Messler, R. W. (2019). *A Practical Guide to Welding Solutions: Overcoming Technical and Material-Specific Issues*. Wiley-VCH.
- Natesh, M., and Manikandan, M. (2020). Influence of Filler Wires to Suppress the Microsegregation and to Improve Mechanical Properties of Conventional Arc-Welded Nickel-Based Superalloy Incoloy 20. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 73(5), pp. 1333-1362. DOI:
- Niemi, E., Fricke, W., & Maddox, S. J. (2017). *Structural Hot-Spot Stress Approach to Fatigue Analysis of Welded Components: Designer's Guide*. Springer.
- Simufact Welding (V2020) [Software] (2020). Recuperado de: <https://www.simufact.com/what-s-new-in-SW-v2021.html> American
- Welding Society (AWS) D17 Committee on Welding in the Aircraft and Aerospace Industries. (2017). *Specification for Fusion Welding for Aerospace Applications, Supersedes AWS D17.1/D17.1M:2010*. American Welding Society.