

METALURGIA DE LAS UNIONES DISÍMILES ENTRE ACEROS INOXIDABLES

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

METALLURGY OF DISSIMILAR JOINTS BETWEEN STAINLESS STEELS

SÁENZ GALINDO, Rocío

GARCÍA RENTERÍA, Marco

CRUZ HERNÁNDEZ, Ventura Lilia

RESUMEN

La unión soldada de aceros inoxidable disímiles (austeníticos, ferríticos y martensíticos) es una práctica esencial en industrias avanzadas (aeroespacial, energética y química) que demandan componentes con propiedades personalizadas. El principal reto metalúrgico en estas uniones es la formación de estructuras frágiles, como fases indeseables (σ y χ) y carburos, la distribución desequilibrada de elementos y el desarrollo de tensiones internas. La literatura revisada detalla que la integridad de la soldadura se compromete por las diferencias en el coeficiente de dilatación, la conducción de calor, y la composición química de los materiales. La clave para el éxito reside en una gestión estricta de las variables operativas y la elección del metal de aporte. A partir del análisis de estudios se evalúan técnicas de soldadura idóneas, destacan los procesos de baja entrada de calor como TIG (GTAW soldadura por arco de tungsteno con gas), FSW (fricción-agitación) y láser, que ayudan a mitigar los problemas de microestructura. Además, se ha documentado ampliamente que el diagrama de Schaeffler es una herramienta predictiva fundamental para estimar las fases (austenita, ferrita, martensita) que resultarán de la mezcla de metales. La evidencia indica que, al controlar la dilución y emplear aleaciones de relleno sobrealeadas (como ER309 o ERNiCr-3), se busca prevenir la aparición de estructuras quebradizas, garantizando la resistencia mecánica y la vida útil de la junta.

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

Palabras clave: unión; austenítico; dúplex; oxidación; dilución.

ABSTRACT

The welded joining of dissimilar stainless steels (austenitic, ferritic, and martensitic) is an essential practice in advanced industries (aerospace, energy,

Correspondencia:

rsaenz@uadec.edu.mx

<https://orcid.org/0009-0007-0189-0470>

Fecha de recepción

13 de noviembre de 2025.

Fecha de aceptación

13 de mayo de 2026.

and chemical) that demand components with customized properties. The main metallurgical challenge in these joints is the formation of brittle structures, such as undesirable phases (sigma and chi) and carbides, the unbalanced distribution of elements, and the development of internal stresses. The reviewed literature details that weld integrity is compromised by differences in thermal expansion coefficient, heat conduction, and chemical composition of the materials. The key to success lies in strict management of operational variables and the choice of filler metal. Based on the analysis of studies, suitable welding techniques are evaluated, highlighting low heat input processes such as TIG (GTAW, gas tungsten arc welding), FSW (friction stir welding), and laser, which help mitigate microstructural problems. Furthermore, it has been widely documented that the Schaeffler Diagram is a fundamental predictive tool for estimating the phases (austenite, ferrite, martensite) that will result from the mixture of metals. In essence, the collected evidence indicates that by controlling dilution and using over-alloyed filler alloys (such as ER309 or ERNiCr-3), the aim is to prevent the appearance of brittle structures, ensuring the mechanical strength and service life of the joint.

Keywords: joint; austenitic; duplex; oxidation; dilution.

INTRODUCCIÓN

La unión de aceros inoxidables es un componente fundamental en la manufactura de componentes para industrias como la aeroespacial, petroquímica y de generación energética, donde se exigen propiedades mecánicas y alta resistencia a la corrosión incluso en condiciones de temperatura extrema (Lippold y Kotecki, 2005). El incremento en la complejidad de los diseños de ingeniería ha impulsado la integración de diversas variedades de acero inoxidable dentro de un mismo conjunto, con el objetivo de optimizar el funcionamiento y la eficiencia económica. Esto ha incrementado la práctica de conectar aleaciones disímiles, como la unión entre aceros ferríticos y martensíticos que combina lo mejor de ambos materiales, dando como resultado rendimiento superior en condiciones extremas de temperatura y entornos corrosivos. El beneficio principal reside en la posibilidad de fusionar atributos complementarios en un solo elemento. Un ejemplo de esto es la combinación entre la excelente tenacidad y

resistencia a la oxidación de un acero austenítico junto con la elevada dureza y resistencia al desgaste de un acero martensítico. El principal desafío en la unión de estos materiales surge de sus diferencias fundamentales en composición química, microestructura y comportamiento térmico, factores que generan dificultades significativas durante los procesos de soldadura (Kumar y Singh, 2021). Estas diferencias promueven la formación de compuestos intermetálicos de alta rigidez y fragilidad, los cuales actúan como concentradores de tensiones. Precisamente en estas zonas se originan las grietas que, al difundirse, reducen la capacidad de carga de la junta soldada. En consecuencia, la junta soldada muestra mayor susceptibilidad al fallo por fatiga y una clara tendencia a la fractura (Singh y col., 2023).

Como resultado de las transformaciones microestructurales inducidas por el ciclo térmico de la soldadura (crecimiento de grano en la Zona Afectada por el Calor (ZAC) y la precipitación de carburos y nitruros de cromo en los límites de grano), se produce una degradación notable de las propiedades mecánicas de la unión (Kumar y col., 2022). Estos fenómenos resultan en un incremento significativo de la fragilidad y una mayor susceptibilidad al agrietamiento por fatiga, debido a la combinación de una microestructura endurecida, tensiones residuales y una menor capacidad de deformación. Adicionalmente, la microestructura resultante muestra una mayor predisposición a mecanismos de deterioro específicos.

El comportamiento de estos aceros durante su unión es esencial para garantizar que los productos terminados sean confiables y posean una extensa vida útil (Kumar y col., 2022; Singh y col., 2023). Esta necesidad se deriva de las propiedades intrínsecas de cada familia de acero, las cuales están determinadas por su composición microestructural. Por ejemplo, un acero martensítico posee una dureza extrema, pero está expuesto a las fracturas frágiles, mientras que uno ferrítico es más dúctil y menos resistente (Kumar y col., 2022). En contraste, el acero austenítico proporciona una combinación muy apreciada: gran fortaleza, capacidad para deformarse sin romperse y una excelente resiliencia (Singh y col., 2023). La soldadura disímil debe, por tanto, reconciliar estas diferencias fundamentales para evitar la formación de fases frágiles y concentraciones de tensión que comprometan la integridad de la junta. El objetivo de la presente revisión bibliográfica es analizar los principales desafíos metalúrgicos, las técnicas de soldadura más adecuadas, la selección del metal de aporte y el uso del Diagrama de Schaeffler como herramienta predictiva para la unión de aceros inoxidables disímiles.

(austeníticos, ferríticos y martensíticos), a fin de garantizar la integridad mecánica y la resistencia a la corrosión de las juntas soldadas.

METODOLOGÍA

La presente revisión bibliográfica se desarrolló mediante una búsqueda de literatura científica en bases de datos especializadas. Se consideraron artículos publicados, enfocados en la soldadura de aceros inoxidables disímiles (austeníticos, ferríticos y martensíticos), considerando principalmente los mecanismos de formación de fases, los métodos de unión y los cambios microestructurales.

Se seleccionaron estudios originales y revisiones arbitradas que analizan la influencia del metal de aporte (ER308, ER316, ER309, aleaciones base níquel), los parámetros de soldadura (aporte térmico, velocidad de enfriamiento) y las técnicas de unión (GTAW, GMAW, FSW, láser) sobre la microestructura resultante y las propiedades finales de la unión. Asimismo, se incluyeron investigaciones relacionadas con el uso del diagrama de Schaeffler como herramienta predictiva de fases.

La información recopilada fue analizada de manera crítica y comparativa, permitiendo identificar tendencias actuales, avances relevantes, limitaciones asociadas a la formación de fases frágiles (σ , χ) y carburos, así como cambios microestructurales que afectan la integridad mecánica y la resistencia a la corrosión de las uniones soldadas entre aceros inoxidables disímiles.

DESARROLLO Y DISCUSIÓN

ACEROS INOXIDABLES (AI)

Los AI son aleaciones que se distinguen por su excelente resistencia a la corrosión y la oxidación, lo que los convierte en materiales clave en múltiples aplicaciones industriales. Según la clasificación establecida en el *Welding*

Handbook de la American Welding Society (2011) y el AWS D1.6/D1.6M:2017 *Structural Welding Code: Stainless Steel*, estos aceros se dividen en cinco grupos principales, como se muestra en la Tabla 1 aceros martensíticos, ferríticos, austeníticos, dúplex, y endurecidos por precipitación. Cada uno de caracteriza por una composición química específica y una estructura metalográfica particular.

Tabla 1. Clasificación de aceros inoxidables. Elaborado en base a *American Welding Society* (2011).

Tipo	Elementos predominantes	Características principales
Martensíticos	Hierro, cromo (12–18%), bajo níquel, carbono elevado	Alta dureza y resistencia mecánica
Ferríticos	Cromo elevado (12–30%), bajo carbono	Buena resistencia a la oxidación y estabilidad térmica; menor ductilidad
Austeníticos	Cromo (16–26%), níquel (8–35%), posibles Mo y N	Excelente resistencia a la corrosión; alta ductilidad y facilidad para soldar
Dúplex	Cromo (20–30%), níquel (5–10%), molibdeno	Mezcla de ferrita y austenita; gran resistencia mecánica
Endurecibles por precipitación	Níquel, cobre, aluminio, titanio	Alta resistencia mecánica y buena resistencia a la corrosión

TÉCNICAS DE SOLDADURA PARA UNIONES DISÍMILES DE ACERO INOXIDALBE

La selección adecuada del método de soldadura resulta determinante para obtener uniones estructuralmente resistentes y con una capacidad superior anticorrosiva en aceros inoxidables (Cary y Helzer, 2005). En procesos que demandan un alto nivel de precisión y control del calor, sobre todo en tareas de gran complejidad, la técnica de soldadura TIG (GTAW) se considera la más adecuada. Este procedimiento produce un arco eléctrico muy estable y ofrece una excelente protección del baño de fusión frente a la contaminación del aire, lo que permite conseguir uniones con una superficie de gran calidad y una penetración homogénea. Aprovechando estas ventajas, se utiliza principalmente en materiales de espesores delgados y medios (Cary y Helzer, 2005). En trabajos que requieren unir piezas de gran espesor o realizar



soldaduras de largo recorrido, donde la eficiencia productiva es esencial, el proceso TIG (GTAW) se presenta como una alternativa rentable y técnicamente favorable. No obstante, tal como menciona la *American Welding Society* (2011), para garantizar la integridad de la junta, es indispensable una calibración metódica de los parámetros de soldadura, con el fin de suprimir la formación de defectos en particular la porosidad.

En la Tabla 2 se presentan los diferentes procesos de soldadura para aceros inoxidables, elaborada con base en la *American Welding Society* (2011) y el estándar AWS D1.6.

Tabla 2. Procesos de soldadura para aceros inoxidables. Elaborada con base en *American Welding Society* (2011) y AWS D1.6.

Soldadura por arco	Aplicación
GTAW (gas tungsten arc welding)	Uniones de alta calidad en tuberías, equipos químicos, alimenticios y nucleares.
GMAW (gas metal arc welding)	Estructuras marinas, fabricación de tanques y automotriz
FCAW (flux cored arc welding)	Construcción naval, plataformas y estructuras pesadas
SMAW (Shielded Metal Arc Welding) Electrodo Revestido	Mantenimiento y reparaciones y sitios de difícil acceso
SAW (Submerged Arc Welding)	Uniones longitudinales en tuberías de gran diámetro y placas gruesas

METAL DE APORTE

Los metales de aporte utilizados en soldadura son consumibles; estos se pueden presentar como alambres, varillas o electrodos que se funden durante el proceso para unir de manera firme dos metales base. En el caso de uniones entre materiales disímiles, la selección del metal de aporte es crucial, ya que permite equilibrar las diferencias en composición química, comportamiento térmico y estructura cristalina entre los componentes a unir (Kumar y Singh, 2021; Sireesha y col., 2021). Es común optar por metales de aporte con alto contenido de cromo, lo cual ayuda a equilibrar los efectos de la disolución con el metal base y a conservar una microestructura adecuada. Por ejemplo, en la soldadura del acero inoxidable tipo 304, se emplea habitualmente el electrodo ER308. Sin embargo, cuando se trata de uniones disímiles o existe riesgo de corrosión intergranular, se recomiendan opciones como el ER 316, que ofrece bajo contenido de carbono, o el ER 309, conocido por su elevada proporción de cromo y níquel (Lippold y Kotecki, 2005). Los metales de aporte



desempeñan una función principal en la prevención de la precipitación de fases intermetálicas de naturaleza frágil y en la mitigación de zonas localizadas con empobrecimiento de cromo, las cuales presentan alta susceptibilidad a procesos corrosivos (Kumar y Singh, 2021; Sireesha y col., 2021). En contextos que demandan elevada tenacidad o en la unión de materiales metálicos disímiles, las aleaciones base níquel, como el ERNiCr-3, emergen como la alternativa adecuada. Su principal ventaja es su capacidad para tolerar altos niveles de dilución con los metales base, sin inducir la formación de fases frágiles en la zona de unión (Cary y Helzer, 2005).

DIAGRAMA DE SCHAEFFLER

El diagrama ilustrado en la Figura 1 fue concebido en los años cuarenta como una herramienta gráfica destinada a estimar la microestructura resultante en zonas de unión de aceros inoxidable y aceros disímiles. Su utilidad radica en la capacidad de anticipar la proporción de fases como ferrita y austenita en función de la composición química de los metales base. A pesar de su antigüedad, estudios recientes han confirmado su vigencia y precisión en contextos de manufactura avanzada (Rimpl y col., 2025). Para aplicar el diagrama en el análisis de uniones soldadas es necesario calcular previamente los valores equivalentes de cromo y níquel, tanto del metal base como del metal de aporte. Estas cuantificaciones permiten estimar la proporción de fases metalográficas que se desarrollarán tras la solidificación. Los cálculos se realizan mediante fórmulas prácticas que integran los principales elementos de aleación presentes en la composición química (Lozano y col., 2007).

El cromo equivalente considera elementos formadores de ferrita (Cr, Mo, Si, Nb)

Cromo equivalente = $\%Cr + \%Mo + 1.5 \times \%Si + 0.5 \times \%Nb$

El níquel equivalente incluye elementos formadores de austenita (Ni, C, Mn)



Níquel equivalente = $\% \text{Ni} + 30 \times \% \text{C} + 0.5 \times \% \text{Mn}$

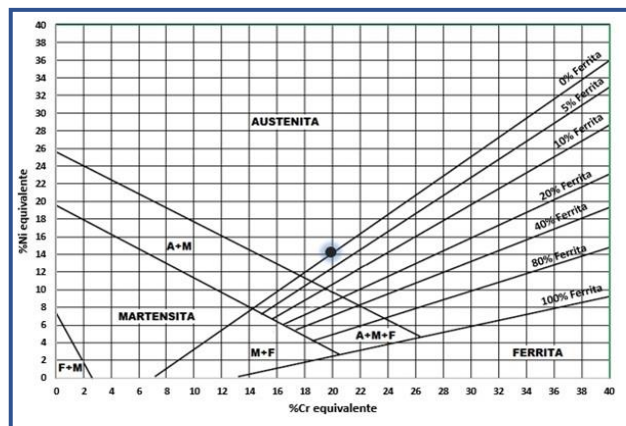


Figura 1. Diagrama de Schaeffler para la predicción de fases. (tomado de Zhang y col., 2020).

La microestructura resultante de una soldadura se determina al posicionar los valores equivalentes de cromo y níquel (Creq y Nieq) en el diagrama correspondiente, el cual clasifica las distintas fases metalúrgicas como austenita, ferrita y martensita en zonas definidas, junto con sus posibles mezclas, según lo señalado por Rimpl y col. (2025).

REGIONES MICROESTRUCTURALES EN UNA SOLDADURA DISIMILAR

La microestructura resultante de una soldadura disimilar no es homogénea, sino que se compone de diversas zonas microestructurales bien definidas, cada una de las cuales presenta características particulares.

Metal Base (MB) son los componentes iniciales que se busca unir. Sus cualidades, como la resistencia y la tenacidad, actúan como un punto de referencia para medir cómo el proceso de soldadura.

Zona Afectada por el Calor (ZAC) es la región del metal base que no se funde, pero cuyas microestructuras y propiedades mecánicas se alteran debido al ciclo térmico de la soldadura. En uniones disímiles, la ZAC en cada lado de la unión es diferente (Mvola y Kah, 2017).

Zona de Fusión (ZF) es donde el metal de aporte y una porción de los metales base se funden y solidifican. En soldaduras disimilares, esta zona no es homogénea y puede subdividirse en:



Zona de No Mezcla (ZNM) o Línea de Unión: es una delgada línea que marca el límite entre el metal base que no se fundió y la zona de fusión. Es una región de solidificación epitaxial donde el metal fundido se solidifica usando el sustrato sólido como plantilla. En uniones disímiles, esta línea puede ser el sitio preferente para la formación de fases Intermetálicas frágiles y segregación de elementos, actuando como un concentrador de tensiones y un camino preferente para la fractura (Haghdadi y col., 2021).

Zona de Mezcla (ZM): es el volumen central de la ZF donde los metales base fundidos y el metal de aporte se mezclan en distintas proporciones. La composición química en esta zona no es uniforme, lo que conduce a variaciones microestructurales locales. Dependiendo de la solubilidad mutua de los elementos, aquí pueden formarse fases intermetálicas, compuestos no deseados y estructuras de grano columnares o equiaxiales. La naturaleza de la ZM está dictada por la química de los materiales y la dinámica fluida del baño de fusión (Kou, 2003).

En la Figura 2 se ilustran esquemáticamente estas zonas (Metal Base, Zona Afectada por el Calor y Zona de Fusión) en una soldadura de aceros disímiles, mostrando la Zona de Mezcla y la Línea de Unión.

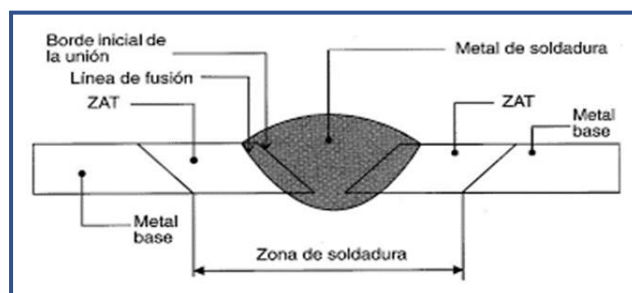


Figura 2. Zonas de la soldadura (Técnica Central, 2014).

Diversas investigaciones han establecido que la microestructura resultante de la soldadura de aceros inoxidables de distinta naturaleza está determinada principalmente por tres factores críticos: la composición química de los metales base, la naturaleza del material de aporte y las condiciones térmicas del proceso de soldadura. En este contexto, la dilución (definida como la interacción y mezcla entre los metales base y el material de relleno) ejerce un control directo sobre la composición química final del cordón, lo cual influye decisivamente en la estabilidad de las fases formadas y en la resistencia a la corrosión del conjunto soldado (Ramírez y Brandi, 2014). La unión de aceros austeníticos con ferríticos presenta desafíos microestructurales significativos, como la formación de regiones con fusión incompleta en la interfaz (Padhy y

col., 2015). Cuando se incorporan aceros martensíticos, las altas velocidades de enfriamiento típicas de estos procesos favorecen la formación de martensita sin revenir en la zona afectada por el calor (ZAC), incrementando notablemente la dureza, pero comprometiendo la tenacidad de la unión (Kou, 2003). En este escenario, el diagrama de Schaeffler y otros similares han demostrado ser herramientas eficaces para predecir con razonable precisión las fases resultantes. Técnicas de soldadura con menor aporte térmico, como GTAW pulsado y la soldadura por fricción-agitación (FSW), han mostrado mayor eficacia para controlar el tamaño de grano y reducir la extensión de la ZAC, mejorando así las propiedades mecánicas y la integridad de la unión (Mishra y Ma, 2023). La utilización de uniones disímiles responde a necesidades industriales concretas como la creación de zonas de transición con propiedades graduales, el reemplazo de componentes en equipos existentes, la reparación de piezas con materiales de mayor rendimiento, y la mejora localizada de propiedades en estructuras sometidas a condiciones de servicio diferenciadas. Estas aplicaciones justifican los esfuerzos por comprender y dominar los fenómenos microestructurales involucrados, con el fin de garantizar la integridad y durabilidad de las uniones en servicio

CONCLUSIONES

TENDENCIAS A FUTURO

La unión de aceros inoxidables disímiles es primordial en aplicaciones de ingeniería avanzada. Garantizar su integridad exige un control meticuloso de los fenómenos metalúrgicos derivados de la combinación de microestructuras y composiciones químicas distintas.

El principal factor que limita el rendimiento de la junta es la formación de fases frágiles, como carburos y las fases sigma y chi, tanto en la unión de soldadura y en la Zona Afectada por el Calor (ZAC). Estas fases no solo comprometen la tenacidad, sino que reducen significativamente la resistencia a la corrosión.

El proceso de soldadura seleccionada influye decisivamente en la microestructura final. Procesos con bajo aporte térmico y alta precisión, como



GTAW (TIG), FSW y los métodos por haz de energía (Láser, Haz de Electrones), han demostrado una superior capacidad para limitar el crecimiento de la ZAC y refinar la microestructura, en comparación con métodos convencionales de alta productividad.

La elección del metal de aporte se erige como una estrategia clave para el éxito. El uso de consumibles sobrealeados (por ejemplo, ER309 o aleaciones base níquel como ERNiCr-3) permite compensar la dilución, inhibir la precipitación de fases indeseables y preservar la composición química necesaria para una resistencia a la corrosión óptima

El diagrama de Schaeffler mantiene su vigencia como una herramienta predictiva esencial en la metalurgia de la soldadura. Su utilidad para estimar las fases de equilibrio y orientar la selección del material de relleno sigue siendo ampliamente reconocida, aunque su aplicabilidad está sujeta a límites específicos en la composición de los aceros.

Como tendencia futura, se vislumbra el desarrollo de metales de aporte más especializados y la optimización de procesos híbridos y automatizados, que permitan un control aún más preciso de la microestructura y las propiedades mecánicas en uniones cada vez más complejas y críticas.

REFERENCIAS

- American Welding Society. (2011). *Welding handbook, Volume 4: Materials and Applications, Part 1* (9th ed.). Miami: American Welding Society. 760p.
- American Welding Society. (2017). *AWS D1.6/D1.6M:2017 - Structural Welding Code: Stainless Steel*. [Lugar no proporcionado]: American Welding Society. 346 p.
- Cary, H. B. & Helzer, S. C. (2005). *Modern welding technology*. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall. 715 p.
- Haghdadi, N., Laleh, M., Abbaszadeh, M. & Chen, Y. (2021). An overview of the interfacial phenomena in dissimilar metal welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 68: 1-22.
- Kou, S. (2003). *Welding metallurgy* (2nd ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. 477 p.



- Kumar, A., Sharma, V. & Patel, R. (2022). Dissimilar joining of different grades of ferritic stainless steel: A review. *Materials Today: Proceedings*, 60(Part 3): 1450-1457.
- Kumar, R. & Singh, K. (2021). Selection of filler metals for dissimilar welding between stainless steel and carbon steel: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 64: 292–308.
- Lippold, J. C. & Kotecki, D. J. (2005). *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. xvi, 357 p.
- Lozano, J., Moreda, P., Llorente, C. L. & Bilmes, P. D. (2007). Soldabilidad en aceros inoxidables y aceros disímiles. *Scientia et Technica*, XIII(34): 273-278.
- Mishra, R. S. & Ma, Z. Y. (2023). Friction stir welding of dissimilar materials: From aerospace applications to microstructural control. *Progress in Materials Science*, 138: 101085.
- Mvola, B. & Kah, P. (2017). Dissimilar ferrous metal welding using advanced gas metal arc welding processes. *Reviews on Advanced Materials Science*, 51(2): 127-154.
- Padhy, G. K., Wu, Y. & Ningshen, S. (2015). Corrosion behavior of dissimilar weldments between austenitic stainless steel and low alloy steel. *Journal of Materials Science & Technology*, 31(9): 933–945.
- Ramirez, A. J. & Brandi, S. D. (2014). A review on the welding metallurgy of dissimilar stainless steels. *Science and Technology of Welding and Joining*, 19(2): 95–111.
- Rimpl, R., Hoefer, K., Haelsig, A., Hensel, J. & Kieback, B. (2025). Application of the Schaeffler diagram to functionally graded structures of 42CrMo4 and Alloy 625 produced by DED-Arc. *Journal of Materials Engineering and Performance*. pp. 1–11
- Singh, A., Kumar, R. & Yamazaki, M. (2023). Dissimilar welding of austenitic and martensitic stainless steel joints for nuclear applications: A review. *Journal of Nuclear Materials*, 585: 154–165.
- Sireesha, M., Shankar, V., Albert, S. K. & Sundaresan, S. (2021). A comparative evaluation of welding consumables for dissimilar weld joints between nuclear grade austenitic stainless steel and modified 9Cr–1Mo steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 288: 116876.
- Técnica Central. (2014, 16 de junio). “Soldabilidad”. Procesos Metalúrgicos Técnica Central. [En línea]. Disponible en: [<http://procesosmetalurgicostecnicocentral.blogspot.com/-2014/06/soldabilidad.html>]
- Zhang, Y., Zhang, S., Huang, Y., Dong, C. & Li, X. (2020). Corrosion behavior of dissimilar welded joints between 316L stainless steel and Inconel 625 in supercritical water environment. *Journal of Materials Science & Technology*, 52: 100–110.