

Revisión general de la resistencia a la corrosión de piezas soldadas de acero inoxidable dúplex.

General review of the corrosion resistance of duplex stainless steel welded parts.

Natalia Estefanía Castro-López, Lázaro Abdiel Falcón-Franco, Sergio García-Villarreal.

*Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Metalurgia. Carretera 57 Km. 5 CP.
25720 Monclova, Coahuila. México.*

Castron@uadec.edu.mx, 866 165 33 71.

Resumen

El presente trabajo se enfoca en la resistencia a la corrosión de piezas soldadas de acero inoxidable dúplex, en el cual proporciona información valiosa sobre los desafíos y estrategias para mantener la resistencia a la corrosión de este tipo de acero. Se describen técnicas valiosas para evaluar la corrosión en aceros inoxidables, como la polarización potencio dinámica y la espectroscopia de impedancia electroquímica. La resistencia a la corrosión de piezas soldadas de acero inoxidable dúplex es un área compleja y crítica en la ingeniería de materiales. Aunque los desafíos inherentes a la soldadura pueden afectar la resistencia a la corrosión de este material, las estrategias y técnicas mencionadas en este artículo ofrecen vías efectivas para mitigar estos desafíos y garantizar la integridad del material en diversas aplicaciones. Este trabajo, también destaca la importancia de la interpretación de los resultados de las pruebas electroquímicas en aceros inoxidables para proporcionar información valiosa sobre su comportamiento frente a la corrosión. En general, es un recurso útil para aquellos interesados en la resistencia a la corrosión de piezas soldadas de acero inoxidable dúplex.

Palabras clave: Acero inoxidable dúplex, pruebas electroquímicas, resistencia a la corrosión, soldadura.

Abstract

This paper focuses on the corrosion resistance of duplex stainless-steel weldments, providing valuable information on the challenges and strategies to maintain the corrosion resistance of this type of steel. Valuable techniques for assessing corrosion in stainless steels, such as potentio dynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy, are described. Corrosion resistance of welded duplex stainless steel parts is a complex and critical area in materials engineering. Although inherent welding challenges can affect the corrosion resistance of this material, the strategies and techniques mentioned in this article

offer effective ways to mitigate these challenges and ensure the integrity of the material in various applications. This paper also highlights the importance of interpreting electrochemical test results on stainless steels to provide valuable information on their corrosion behavior. Overall, it is a useful resource for those interested in the corrosion resistance of duplex stainless-steel weldments.

Keywords: Duplex stainless steel, electrochemical tests, corrosion resistance, welding.

1. Introducción

La corrosión es uno de los principales factores que afectan la durabilidad y el rendimiento de los materiales en entornos industriales y marinos (Jones, 1996). Los aceros inoxidable dúplex, han ganado popularidad debido a su combinación única de resistencia a la corrosión y alta resistencia mecánica. Sin embargo, cuando se trata de piezas soldadas fabricadas con acero inoxidable dúplex, surgen desafíos adicionales, derivados de su mayor cantidad de elementos aleantes, que pueden influir en su resistencia a la corrosión (Mendoza y col., 2010). En este artículo, exploramos los desafíos específicos que enfrentan las piezas soldadas de acero inoxidable dúplex en términos de resistencia a la corrosión, así como las estrategias y técnicas utilizadas para mitigar estos desafíos y garantizar la integridad del material.

2. Propiedades del Acero Inoxidable Dúplex.

Los aceros inoxidable dúplex son una aleación que combina características de los aceros austeníticos y ferríticos. Esta combinación le otorga una alta resistencia mecánica, así como una notable resistencia a la corrosión en ambientes agresivos, como los marinos y químicos. La adición de elementos como el cromo, níquel, molibdeno y nitrógeno contribuye a la formación de una capa pasiva que protege el material de la corrosión (Potgieter y col., 2008).

En la tabla 1 se muestra la composición química de algunos aceros inoxidables dúplex.

Tabla 1. Composición química de aceros inoxidables dúplex.

Número UNS		C	MN	S	P	Si	Cr	Ni	Mo	N	Fe	Rango PREN
S31803 OR		0.03	2.00	0.02	0.03	1.00	21.0-23.0	4.5-6.5	2.5-3.5	0.08-0.20	Balance	30.5-
S32205		0.009	1.50	0.0005	0.018	0.38	22.89	8.66	3.03	0.15	Balance	37.8
ER 2209												---
PREN (Número equivalente de resistencia a la corrosión) = %Cr + 3.3 (%Mo) + 16 (%N).												

El acero inoxidable dúplex ofrece una variedad de ventajas que lo convierten en una opción popular para diversas aplicaciones gracias a que posee muchas propiedades, tales como:

2.1 Resistencia a la corrosión

Los AID proporcionan una excelente resistencia a varios tipos de corrosión, incluidas picaduras, grietas y corrosión bajo tensión. Esto los hace adecuados para su uso en entornos agresivos y corrosivos, como plantas de procesamiento químico (Avila y col., 1986).

2.2 Alta resistencia

Ofrecen una mayor resistencia en comparación con los aceros inoxidables austeníticos estándar. Esto permite el uso de secciones más delgadas, lo que puede generar ahorros de costos y reducción de peso en aplicaciones como componentes estructurales y recipientes a presión (Rivera y col., 2002).

2.3 Buena ductilidad y dureza

El AID mantienen buena ductilidad y tenacidad, incluso a bajas temperaturas. Esto los hace adecuados para aplicaciones donde la resistencia al impacto es importante,

como en ambientes criogénicos o en estructuras sometidas a cargas dinámicas (Ibarra y col., 2010).

2.4 Buena soldabilidad

El AID se puede soldar fácilmente mediante procesos de soldadura comunes, lo que facilita la fabricación. Esto lo convierte en una opción práctica para aplicaciones que requieren formas u operaciones de soldadura complejas (Múñez y col., 2010).

2.5 Alta resistencia a la fatiga y al agrietamiento por corrosión bajo tensión

Debido a su microestructura equilibrada, el AID exhibe una alta resistencia a la fatiga y al agrietamiento por corrosión bajo tensión. Esta propiedad es crucial en aplicaciones donde los componentes están sujetos a cargas cíclicas o en entornos donde la corrosión bajo tensión es una preocupación (Zhao y col., 2015).

2.6 Rentabilidad

En muchas aplicaciones, el AID puede ofrecer ventajas económicas sobre otras aleaciones resistentes a la corrosión. Su combinación de alta resistencia y resistencia a la corrosión puede reducir los costos de material y mantenimiento a largo plazo (Sim y col., 2019).

2.7 Versatilidad

El AID es versátil y se puede utilizar en una amplia gama de industrias y aplicaciones. Se emplea comúnmente en procesamiento químico, petróleo y gas, ambientes marinos, fábricas de pulpa y papel, minería y muchos otros (Tahchieva, 2021).

2.8 Buen calor y conductividad térmica

El AID presenta una buena conductividad térmica, lo que lo hace adecuado para aplicaciones que implican transferencia de calor. Esto puede ser importante en procesos como los intercambiadores de calor (Pratikno y col., 2022).

2.9 Resistencia a la Abrasión y la Erosión

Debido a su alta dureza y resistencia, el AID puede soportar fuerzas abrasivas y erosivas. Esto resulta ventajoso en aplicaciones como equipos de minería y bombas que manejan lodos abrasivos (Vinoth y col., 2017).

2.10 Larga vida útil

Gracias a su excelente resistencia a la corrosión y alta resistencia mecánica, los componentes fabricados con AID tienden a tener una vida útil más larga en comparación con materiales con menor resistencia a la corrosión (Castro y col., 2012).

2.11 Impacto ambiental reducido

La durabilidad y la resistencia a la corrosión del AID pueden generar un menor impacto ambiental durante el ciclo de vida de un producto, ya que puede requerir reemplazo y mantenimiento menos frecuentes (Pal, 2011).

3. Desafíos específicos en piezas soldadas de acero inoxidable dúplex.

La soldadura, al ser un aporte térmico, genera cambios en la microestructura y composición química del material, lo que puede afectar su resistencia a la corrosión (Gómez y col., 1998). Algunos desafíos específicos incluyen:

3.1 Sensibilización y Corrosión Intergranular: Durante la soldadura, la temperatura elevada puede causar la precipitación de fases intermetálicas en los límites de grano, lo que disminuye la resistencia a la corrosión de estas áreas. Esto puede resultar en corrosión intergranular y pérdida de propiedades mecánicas (Del Abra y col., 2018).

3.2 Zonas Afectadas por el Calor: Las zonas cercanas a la zona de fusión pueden experimentar cambios en su microestructura como se muestra en la figura 1, lo que las hace más susceptibles a la corrosión. La pérdida de cromo en estas zonas reduce la formación de la capa pasiva y aumenta el riesgo de corrosión (Múñez y col., 2010).

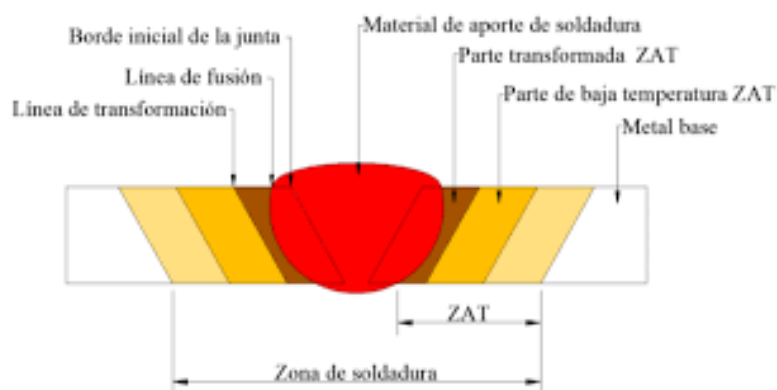


Figura 1. Zona afectada por el calor.

3.3 Inhomogeneidades en la Composición: La soldadura puede causar segregación de elementos, lo que lleva a inhomogeneidades en la composición del material. Esto puede resultar en áreas con menor resistencia a la corrosión (Utrilla, 2003).

4. Estrategias para mantener la resistencia a la corrosión en piezas soldadas.

Para superar estos desafíos y garantizar una óptima resistencia a la corrosión en piezas soldadas de acero inoxidable dúplex, se requieren estrategias y técnicas cuidadosamente diseñadas, la soldadura de esta aleación puede afectar su resistencia a la corrosión, por lo que es importante tomar medidas para mitigar este riesgo (Davis, 1994).

Las estrategias para mantener una buena resistencia a la corrosión en piezas soldadas con acero inoxidable dúplex se pueden dividir en dos categorías:

- Control de la composición química
- Control de la microestructura

4.1 Control de la composición química

El contenido de cromo, níquel y molibdeno en la soldadura es un factor clave para su resistencia a la corrosión. Los aceros inoxidables dúplex tienen un contenido de cromo de al menos 22%, níquel de al menos 5% y molibdeno de al menos 3%. Es importante asegurarse de que la soldadura tenga una composición química dentro de estos límites para garantizar su resistencia a la corrosión (Kannan y col., 2006).

4.2 Control de la microestructura

El acero inoxidable dúplex tiene una microestructura de austenita y ferrita. En la figura 2, se observa la formación de fases en función de la temperatura con respecto al tiempo. La austenita es la fase más resistente a la corrosión, mientras que la ferrita es la fase más susceptible a la corrosión (Singhbedi, 2015).

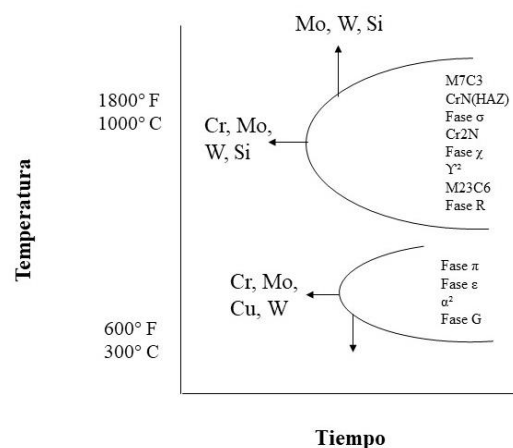


Figura 2. Esquema de la formación de precipitados en aceros inoxidables dúplex

Para mejorar la resistencia a la corrosión de la soldadura, es importante controlar la proporción de austenita y ferrita en la microestructura. Esto se puede lograr mediante el ajuste de los parámetros de soldadura, como la temperatura de soldadura y el tiempo de calentamiento (Fontana, 1987). En la figura 3, se puede observar la estructura de metal base, la zona afectada térmicamente y metal de soldadura.



Figura 3. Microestructura de unión soldada de acero inoxidable dúplex.

Además del control de la composición química y la microestructura, hay otras estrategias que pueden ayudar a mantener una buena resistencia a la corrosión en piezas soldadas con acero inoxidable dúplex (Pal, 2011). Estas estrategias incluyen:

- Eliminación de la contaminación
- Tratamiento térmico
- Recubrimientos protectores

4.2.1 Eliminación de la contaminación

La contaminación de la soldadura, como las inclusiones de escoria y de óxido, puede reducir su resistencia a la corrosión. Es importante tomar medidas para eliminar la contaminación de la soldadura, como el uso de técnicas de soldadura adecuadas y el control de la calidad de la soldadura (Pratikno y col., 2022).

4.2.2 Tratamiento térmico

El tratamiento térmico puede mejorar la resistencia a la corrosión de la soldadura. El tratamiento térmico más común para los aceros inoxidables dúplex es el recocido, para el alivio de tensiones. Este tratamiento térmico elimina las tensiones residuales en la soldadura, lo que puede ayudar a prevenir la corrosión por corrosión por tensión (Sim y col., 2019).

4.2.3 Recubrimientos protectores

Los recubrimientos protectores pueden ayudar a proteger la soldadura de la corrosión. Los recubrimientos más comunes para el acero inoxidable dúplex son los recubrimientos de pintura, los recubrimientos de polvo y los recubrimientos de metal. La aplicación de pasivación y recubrimientos protectores puede mejorar la formación y mantenimiento de la capa pasiva, reduciendo así el riesgo de corrosión (Zhu y col., 2017). Al seguir estas estrategias, se puede ayudar a mantener una buena resistencia a la corrosión en piezas soldadas con acero inoxidable dúplex (Kannan y col., 2006). Esto ayudará a garantizar que estas piezas tengan una vida útil prolongada y que sean adecuadas para su aplicación prevista.

Elegir consumibles de soldadura compatibles con el material base es crucial para mantener la integridad de la capa pasiva y minimizar la formación de fases intermetálicas. La elección de técnicas de soldadura, como TIG o MIG, puede influir en la distribución de calor y la microestructura resultante (Mendoza y col., 2010).

5. Casos de Estudio y Aplicaciones Prácticas

Se realizó una revisión de literatura haciendo uso del software Litmaps (figura 4), dado que las aleaciones de acero inoxidable dúplex son cada vez más utilizadas en la industria. En el mapa, cada nodo representa a un autor, y las conexiones entre ellos indican colaboraciones y la coautoría en trabajos científicos recientes sobre aceros inoxidables dúplex.

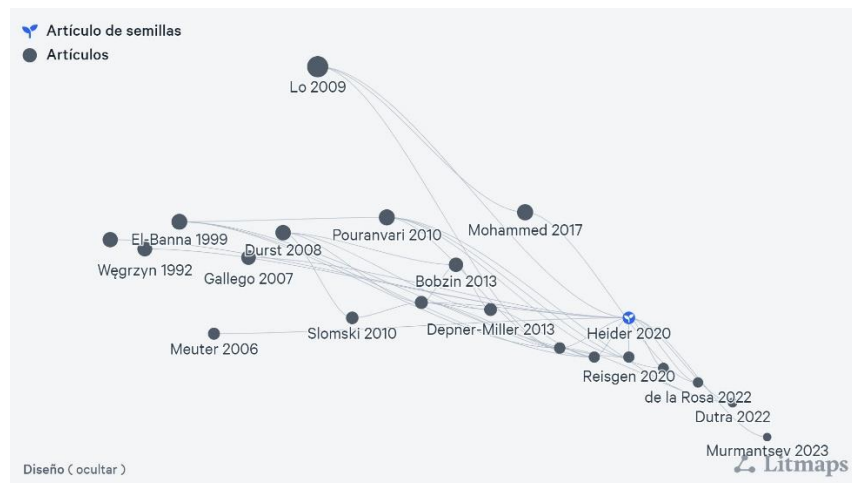


Figura 4. Mapa de literatura de estudios recientes relacionados con la resistencia a la corrosión de piezas soldadas de acero inoxidable dúplex.

Estas aleaciones (AID), requieren una alta exigencia en cuanto a propiedades y resistencia a la corrosión (Sánchez y col., 2021). Numerosos casos de estudio ilustran la aplicación exitosa de estas estrategias en diversas industrias. Desde aplicaciones marinas hasta plantas petroquímicas, las piezas soldadas de acero inoxidable dúplex han demostrado su capacidad para resistir la corrosión en entornos desafiantes (Ver figura 5) (Gómez y col., 1998).



Figura 5. Tanque de almacenamiento de aguas residuales elaborado de acero inoxidable dúplex

Diferentes autores han trabajado con los aceros inoxidable dúplex de diferente manera para conocer sus características, ventajas y desventajas. Se sabe que los aceros inoxidable dúplex (AID) muestran una disminución de la fase delta a medida que aumenta la fase sigma y esto afecta negativamente su resistencia a la corrosión y al desgaste (Del Abra y col., 2018). Un estudio realizado en el 2012 por Sherif y colaboradores demostró que al añadir rutenio a la aleación de acero inoxidable dúplex 2209 mejora la resistencia a la corrosión en soluciones de cloruros, ácidas y neutras (Sherif, 2012), mientras que el contenido de níquel en las aleaciones de acero inoxidable dúplex influye significativamente en su comportamiento frente a la corrosión, mostrando diferencias en la resistencia a la corrosión uniforme y las picaduras (Potgieter y col., 2008). Por otro lado, los cambios en la microestructura de las soldaduras de aceros inoxidable dúplex, se deben a la formación de precipitados que afectan su resistencia a la corrosión por picaduras, con una disminución en la resistencia a partir de 500 °C, por lo que no se recomienda dar un tratamiento térmico o aplicar soldadura a temperaturas mayores (Kang y col., 2019). En la tabla 2, se observa una comparación entre autores y las condiciones que emplearon para el estudio de aceros inoxidable dúplex mediante distintas pruebas.

Tabla 2. Comparativa de trabajos realizados en aceros inoxidables dúplex.

Autor (es)	Material trabajado	Pruebas realizadas y/o condiciones	Resultados obtenidos
<i>Del Abra y col., 2018</i>	Acero inoxidable dúplex 2205.	Pruebas electroquímicas, pruebas de desgaste estudios metalográficos.	Los resultados indican que la precipitación de la fase sigma tiene un efecto negativo en la resistencia a la corrosión y al desgaste del acero inoxidable dúplex 2205
<i>Sherif, 2012</i>	Acero inoxidable dúplex 2209.	Pruebas electroquímicas en soluciones de cloruro ácido y neutro. Se realizaron pruebas gravimétricas, experimentos de corriente-tiempo cronamperométricos y espectroscopía de impedancia electroquímica.	La presencia de rutenio aumenta la pasivación de la superficie de la aleación DSS contra la corrosión. Además, se encontró que la adición de rutenio mejora la resistencia a la corrosión de la aleación DSS 2209 en soluciones de cloruro ácido y neutro.
<i>Méndez y col., 2011</i>	Electrodos de trabajo LDX 2101, 2205 y SAF 2304	Técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica, además de observaciones ópticas. Pruebas electroquímicas para corrosión por picaduras.	Las aleaciones presentaron un ataque tipo picadura. La susceptibilidad al ataque intergranular fue diferente según la aleación y la zona sometida a estudio. Se concluye que el acero inoxidable dúplex 2205 es el menos susceptible a la corrosión localizada.
<i>Potgieter y col., 2008</i>	Acero inoxidable dúplex 2205, 2207, 2209 y 2213.	Pruebas electroquímicas en soluciones de ácido sulfúrico y cloruro de sodio utilizando polarización potenciodinámica y técnicas cronoamperométricas, difracción de rayos X.	Los contenidos de níquel tuvieron una influencia apreciable en el comportamiento de corrosión. La aleación 2209 (22% Cr – 9% Ni) mostró la más alta resistencia a la corrosión uniforme, mientras que la aleación 2213 (22% Cr – 13% Ni) mostró la mejor resistencia a la corrosión por picaduras.
<i>Kang y col., 2019</i>	Acero inoxidable duplex	Estudios metalográficos, Pruebas electroquímicas para	Los resultados mostraron que los cambios en la microestructura de 2209, se debieron a la formación de precipitados durante el proceso de envejecimiento, afectando su resistencia a

2209 envejecido.	corrosión por picaduras, polarización potenciodinámica.	la corrosión por picaduras. Las pruebas de polarización potenciodinámica confirmaron que el potencial de picadura que representa la resistencia a la corrosión disminuyó gradualmente desde 500 °C, alcanzó el nivel más bajo a 850 °C y aumentó nuevamente a 900 °C
---------------------	--	--

Los casos de estudio de piezas soldadas con acero inoxidable dúplex muestran que esta aleación puede proporcionar una excelente resistencia a la corrosión en una variedad de condiciones. En un estudio realizado por la Universidad de Cambridge (Zhao y col., 2015), se evaluaron las propiedades de corrosión de piezas soldadas con acero inoxidable dúplex 2209 en condiciones de corrosión por cloruros. Los resultados mostraron que las piezas soldadas tenían una resistencia a la corrosión comparable a la de las piezas de acero inoxidable dúplex 2209 sin soldar. En otro estudio, realizado por la Universidad de Sheffield (Huttunen y col., 2023), se evaluó la resistencia a la corrosión de piezas soldadas con acero inoxidable dúplex en condiciones de corrosión por ácido sulfúrico. Los resultados mostraron que las piezas soldadas tenían una resistencia a la corrosión comparable a la de las piezas de acero inoxidable dúplex sin soldar.

Dentro de sus aplicaciones más relevantes se encuentran la industria química, en donde las piezas soldadas con acero inoxidable dúplex se utilizan en tanques, tuberías y otros equipos que están expuestos a productos químicos corrosivos (Durán, 2017). En la industria alimentaria, las piezas soldadas con acero inoxidable dúplex se utilizan en equipos de procesamiento de alimentos que están expuestos a ácidos y álcalis (Charles, 2012). Estos casos de estudio demuestran que el acero inoxidable dúplex es una aleación adecuada para aplicaciones que requieren una alta resistencia a la corrosión. Sin embargo, es importante seguir las estrategias

adecuadas para mantener la resistencia a la corrosión de las piezas soldadas con esta aleación (Sherif, 2012).

6. Evaluación y Pruebas de Resistencia a la Corrosión

Para determinar la resistencia a la corrosión de uniones soldadas es indispensable realizar pruebas; as pruebas estándar, como los ensayos de niebla salina y la medición del potencial de corrosión, son esenciales para evaluar dicha resistencia. El monitoreo continuo a lo largo del tiempo es crucial para garantizar la integridad del material (Wang y col., 2020). Un estudio realizado por B. Gideon y colaboradores demostraron que, aunque estos aceros presentan muchas características superiores, existen limitaciones asociadas con la soldadura, especialmente en el control de la estructura y propiedades de la soldadura, y en la comprensión de cómo la metalurgia de la soldadura puede influir en la susceptibilidad a la corrosión intergranular. Se realizaron diferentes pruebas bajo distintas condiciones y se obtuvo que de los resultados obtenidos se puede demostrar que la región de relleno fue más susceptible a la corrosión intergranular para todas las condiciones de soldadura (Gideon y col., 2008).

Es fundamental comprender los desafíos que estos aceros presentan y las estrategias posibles para mantener la integridad de las piezas soldadas de acero inoxidable dúplex. De acuerdo con la acidez de la atmosfera en que se encuentra un acero, es la reacción que ocurre para su oxidación (Ver tabla 3.) Al conocer estas reacciones en diferentes condiciones corrosivas nos permite saber cómo reaccionará el acero.

Tabla 3. Proceso de oxidación del acero en función de la acidez del medio.

Acidez del medio	Proceso Redox	Agente oxidante
pH <4 (ácido)	Ox: $2Fe \rightarrow 2Fe^{2+} + 4e^{-}$ Re: $2H^{+} + 2e^{-} \rightarrow H_2 \uparrow$ Res: $Fe + 2H^{+} \rightarrow Fe^{2+} + H_2 \uparrow$	H^{+}

4 < pH < 6	Ox: $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$ Re: $O_2 + 4H^{+} + 4e^{-} \rightarrow 2H_2O$ Res: $2Fe + O_2 + 4H^{+} \rightarrow 2Fe^{2+} + 2H_2O$	O_2
pH > 6 (alcalina)	Ox: $2Fe \rightarrow 2Fe^{2+} + 4e^{-}$ Re: $O_2 + 2H_2O + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-}$ Res: $2Fe + O_2 + 2H_2O \rightarrow 2Fe^{2+} + 4OH^{-}$	O_2

A medida que la tecnología avanza, la colaboración entre la industria y la investigación seguirá siendo crucial para desarrollar nuevas técnicas y garantizar la longevidad de estos materiales en aplicaciones críticas (Arivarasu y col., 2020).

6.1 Pruebas electroquímicas

La resistencia a la corrosión se mide por medio de la realización de pruebas electroquímicas. Las pruebas electroquímicas son una herramienta esencial en una amplia gama de aplicaciones científicas y tecnológicas, desde la investigación química hasta el diagnóstico médico y la monitorización de la calidad del agua. Estas pruebas se basan en la medición de corrientes eléctricas generadas por reacciones químicas en una interfaz electrodo-solución (Méndez y Ruiz., 2011).

Las pruebas electroquímicas se basan en los principios fundamentales de la electroquímica, que involucran la transferencia de electrones entre especies químicas en una interfaz electrodo-solución. Esto permite la cuantificación de diversas propiedades químicas, como la concentración de analitos, la velocidad de reacción y la estabilidad de las especies químicas (Potgieter y col., 2008).

Aplicaciones en la investigación científica: En la investigación química y biológica, las pruebas electroquímicas son herramientas poderosas para estudiar la cinética de reacción, la termodinámica y la afinidad entre moléculas (Cui y col., 2018). Además, se utilizan para caracterizar materiales conductores y semiconductores, lo que es crucial en el desarrollo de nuevos dispositivos electrónicos y sensores.

Aplicaciones industriales: En la industria, las pruebas electroquímicas se emplean para el control de procesos, la corrosión de materiales y la mejora de la eficiencia energética. También se utilizan en la fabricación de baterías y celdas de combustible, lo que es fundamental para el desarrollo de tecnologías de energía renovable (IMO, 2012).

Las pruebas electroquímicas ofrecen ventajas significativas, como alta sensibilidad, selectividad, rapidez y facilidad de automatización. Además, requieren volúmenes de muestra relativamente pequeños y son menos costosas que otras técnicas analíticas, como la cromatografía o la espectroscopía de masas (Rivera y col., 2002). A pesar de sus numerosas ventajas, las pruebas electroquímicas también tienen desafíos, como la necesidad de calibración precisa, la interferencia de otras especies químicas y la degradación de los electrodos con el tiempo. Estos desafíos requieren un diseño experimental cuidadoso y el desarrollo de estrategias adecuadas de procesamiento de datos (Vinoth y col., 2017). La medición de la corrosión en aceros inoxidables mediante pruebas electroquímicas es una técnica valiosa que proporciona información detallada sobre la resistencia a la corrosión de estos materiales.

Preparación de la muestra: Para realizar pruebas electroquímicas en aceros inoxidables, es necesario preparar una muestra representativa del material que se desea evaluar. Esto generalmente implica la preparación de una superficie de acero inoxidable limpia y uniforme (Muñoz, 2011). Se utilizan al menos dos electrodos en las pruebas electroquímicas para medir la corrosión en aceros inoxidables: el electrodo de trabajo (normalmente el propio material de acero inoxidable) y dos electrodos de referencia (por ejemplo, el electrodo saturado de calomelanos o el electrodo de plata/cloruro de plata) (Méndez y Ruiz, 2011).

Se sumerge la muestra y los electrodos en un electrolito que simule las condiciones de corrosión que se desean estudiar. (Gideon y col., 2008) El tipo y la composición

del electrolito dependerán de la aplicación específica y del ambiente corrosivo que se esté evaluando.

Técnicas electroquímicas: Hay varias técnicas electroquímicas que se pueden utilizar para medir la corrosión en aceros inoxidables, pero dos de las más comunes son la polarización potenciodinámica y la espectroscopia de impedancia electroquímica (Sim y col., 2019) (EIS, por sus siglas en inglés).

6.1.1 Polarización Potenciodinámica: En esta técnica, se varía el potencial del electrodo de trabajo a una velocidad constante mientras se registra la corriente que fluye a través del electrodo. Esto permite determinar la velocidad de corrosión y la resistencia a la corrosión del acero inoxidable en función del potencial aplicado (Ricaurte y Aguirre, 2007). En la polarización potenciodinámica, se aplica un potencial al electrodo de trabajo (en este caso, el acero inoxidable) y se mide la corriente resultante. Durante esta prueba, se producen las siguientes reacciones químicas:

Reacción de oxidación: En una solución corrosiva, los iones metálicos del acero inoxidable pueden oxidarse para formar iones metálicos en solución (Fontana, 1987). Por ejemplo, en el caso del acero inoxidable, se pueden formar iones de hierro (**Fe²⁺** o **Fe³⁺**) si el acero se somete a un ambiente corrosivo.

Reacción de reducción: Al mismo tiempo, en el electrodo de trabajo, pueden ocurrir reacciones de reducción. Por ejemplo, en la formación de una película pasiva, los iones metálicos (por ejemplo, **Fe²⁺** o **Fe³⁺**) en la solución pueden reducirse a su forma metálica en la superficie del acero (Sánchez y col., 2021).

Resultados: La polarización potenciodinámica proporciona información sobre el potencial de corrosión, el potencial de pasivación y la tasa de corrosión (Fontana y Greene, 1987). Al variar el potencial y medir la corriente resultante, se obtiene una curva de polarización que muestra cómo cambia la corriente con respecto al potencial aplicado. Esta curva permite identificar el potencial de pasivación, que es

el punto en el que el acero inoxidable forma una película pasiva protectora, y el potencial de corrosión, donde la corrosión activa se vuelve dominante (Castañeda y col., 2010).

6.1.2 Espectroscopía de Impedancia Electroquímica: La EIS, abreviado así por sus siglas en inglés (Electrochemical Impedance Spectroscopy), implica la aplicación de una pequeña señal de corriente alterna a la muestra y la medición de la respuesta en frecuencia. (Naik y col., 2019). A partir de estos datos, se puede determinar la impedancia de la superficie del acero inoxidable y, por lo tanto, obtener información sobre su resistencia a la corrosión y la formación de películas pasivas (Del Abra y col., 2018).

Reacciones químicas: En la EIS, se aplica una pequeña señal de corriente alterna al electrodo de trabajo y se mide la respuesta en frecuencia de la célula electroquímica (Singhbedi y col., 2015). Las reacciones químicas que tienen lugar en la EIS son más complejas y pueden incluir:

Reacciones de intercambio iónico: Estas reacciones implican el intercambio de iones entre la superficie del acero inoxidable y la solución. Por ejemplo, la formación de una película pasiva generalmente implica el intercambio de iones de oxígeno, hidrógeno y otros iones presentes en la solución con la superficie del acero inoxidable (Ibañez y col., 2011).

Resultados: La EIS proporciona información detallada sobre la impedancia de la interfaz electrodo-solución. Los datos se representan típicamente en un diagrama de Nyquist, que muestra la impedancia en función de la frecuencia. Los parámetros extraídos de estos gráficos, como la resistencia de la película pasiva y la capacitancia, ofrecen información valiosa sobre la resistencia a la corrosión del acero inoxidable y la formación de películas pasivas (Kang y col., 2019).

Tanto la polarización potenciodinámica como la espectroscopia de impedancia electroquímica son técnicas valiosas para evaluar la corrosión en aceros

inoxidables. Las reacciones químicas involucradas varían según la técnica, pero ambas proporcionan información esencial sobre la resistencia a la corrosión del material y la formación de películas pasivas protectoras en su superficie (Durán, 2017). Los datos electroquímicos recopilados se analizan utilizando software especializado para ajustar modelos matemáticos a los resultados experimentales (Gideon y col., 2008). Esto permite obtener parámetros cuantitativos, como la tasa de corrosión, la resistencia a la corrosión y la resistencia de la película pasiva.

6.2 Interpretación de resultados: Los resultados de las pruebas electroquímicas en aceros inoxidables proporcionan información valiosa sobre su comportamiento frente a la corrosión, incluida la identificación de los mecanismos de corrosión, la eficacia de las películas pasivas y la predicción de la vida útil del material en un entorno corrosivo particular (Sherif, 2012).

Las pruebas electroquímicas, como la polarización potenciodinámica y la espectroscopia de impedancia electroquímica, son herramientas esenciales para medir la corrosión en aceros inoxidables (Huttunen y col., 2023). Estas pruebas proporcionan una comprensión detallada de la resistencia a la corrosión del material y son ampliamente utilizadas en la industria para garantizar la durabilidad y la fiabilidad de los componentes de acero inoxidable en diversos entornos corrosivos (Wang y col., 2018). En la figura 5 se muestra un gráfico de la resistencia a la corrosión de diferentes aceros inoxidables, teniendo una mayor resistencia a la corrosión por picadura los aceros inoxidables dúplex con respecto a los aceros inoxidables austeníticos.

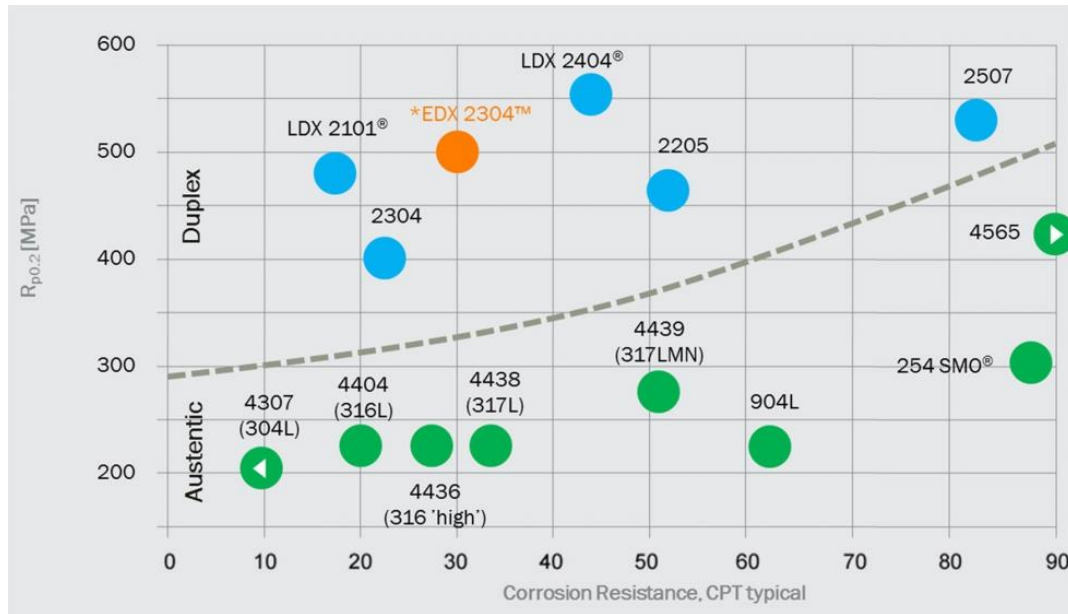


Figura 5. Propiedades mecánicas y resistencia a la picadura de diferentes aleaciones de acero inoxidable.

Conclusiones

El acero inoxidable dúplex posee una gran variedad de propiedades específicas que lo hacen muy atractivo para la industria, lo que recientemente ha obligado a investigadores del mundo a estudiarlo más a detalle. En general, la combinación única de las propiedades del acero inoxidable dúplex lo convierte en una valiosa opción de material para una amplia gama de aplicaciones exigentes en diversas industrias.

La resistencia a la corrosión de piezas soldadas de acero inoxidable dúplex, es un área compleja y crítica en la ingeniería de materiales. Aunque los desafíos inherentes a la soldadura pueden afectar la resistencia a la corrosión de este material, las estrategias y técnicas mencionadas en este artículo ofrecen vías efectivas para mitigar estos desafíos y garantizar la integridad del material en diversas aplicaciones. A medida que la industria y la investigación continúan colaborando, se espera que se desarrollen nuevas soluciones y avances en la

resistencia a la corrosión de piezas soldadas de acero inoxidable dúplex, asegurando su relevancia y utilidad en el futuro.

Los casos de estudio de piezas soldadas con acero inoxidable dúplex, muestran que esta aleación puede proporcionar una excelente resistencia a la corrosión en una variedad de condiciones. Las estrategias para mantener una buena resistencia a la corrosión en piezas soldadas con acero inoxidable dúplex, se pueden dividir en dos categorías: control de la composición química y control de la microestructura. Al seguir estas estrategias, se puede ayudar a garantizar que estas piezas tengan una vida útil prolongada y que sean adecuadas para su aplicación prevista.

Las pruebas electroquímicas son una técnica valiosa para medir la corrosión en aceros inoxidables, ya que proporcionan información detallada sobre la resistencia a la corrosión de estos materiales. Aunque tienen desafíos, como la necesidad de calibración precisa y la interferencia de otras especies químicas, las pruebas electroquímicas ofrecen ventajas significativas, como alta sensibilidad, selectividad, rapidez y facilidad de automatización. Además, son menos costosas que otras técnicas analíticas, como la cromatografía o la espectroscopía de masas. En general, las pruebas electroquímicas son una herramienta valiosa para evaluar la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables y proporcionan información valiosa para garantizar la integridad del material y prolongar su vida útil.

Agradecimientos

Agradezco a la institución CONAHCYT principalmente, por el financiamiento de la maestría para seguir contribuyendo a la ciencia, así como a los doctores colaboradores de éste artículo por su importante apoyo y enseñanzas.

Referencias.

1. Arivarasu, M., Kumar, N. S. 2020. Study on Corrosion Behavior of Duplex Stainless Steel Weldment in Acid and Chloride Enviroments. *Metals today*:

proceedings: 2040–45.

2. Avila, J., Genescá, J., 1986. *Más Allá de La Herrumbre* (Primera edición). México. Ed. Ajusco 227; 14200 México, D.F
3. Castañeda, A., Corvo, F., and Gonzalez, J., 2010. Estudio comparativo de la corrosión del acero de refuerzo en el hormigón armado a partir de técnicas electroquímicas y convencionales. (Spanish). *Reinforced steel corrosion comparative study in the reinforcing concrete through conventional and electrochemical techniques. (English)* 41: 1–9.
4. Charles, J. A. 2012. Duplex Stainless Steel: A Review. *Materials and manufacturing processes* 27 (11): 1129–46.
5. Cui, Liying y col., 2018. The Corrosion Behavior of AZ91D Magnesium Alloy in Simulated Haze Aqueous Solution. *Materials* 11(6): 1–18.
6. Davis, J.R. 1994. Stainless Steel Cladding and Weld Overlays. *ASM Specialty Handbook* 06398G: 107–19.
7. Del Abra, J., García, M., Cruz, V., García, J., Martínez, V., Falcón, L., y Curiel, F. (2018). Study of the effect of Sigma phase precipitation on the sliding wear and corrosion behaviour of duplex stainless steel AISI 2205. *Wear*: 400-401, 43-51. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.12.019>
8. Durán, J., M., 2017. Análisis electroquímico del proceso de corrosión del compuesto TiC / Ni en agua de mar sintética. Maestría en ingeniería de corrosión.
9. Fontana, M., and Greene. 1987. Mars Fontana-Corrosion Engineering(Www.Iranidata.Com).Pdf. : nationalll.
10. Gideon, B., L. Ward, and G. Biddle. 2008. Duplex Stainless Steel Welds and Their Susceptibility to Intergranular Corrosion. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering* 07(03): 247–63.
11. Gómez, J. M. y col., 1998. Soldadura TIG de Los Aceros Inoxidables Dúplex Del Tipo 22-05 (Uranus 45N y Avesta). Estudio de La Microestructura y de

- Las Propiedades Mecánicas. *Revista de Metalurgia* 34(Extra): 271–75.
12. Huttunen-Saarivirta, E. y col., 2023. Pitting Corrosion on Highly Alloyed Stainless Steels in Dilute Sulphuric Acid Containing Sodium Chloride. *Electrochimica Acta* 457(November 2022).
 13. Ibáñez, J., Barranco, V., Varela, FJ, Bethencourt, M. y Botana, FJ. 2011. Estudio comparativo del comportamiento a la corrosión de Aceros Inoxidable en Fluidos Corporales simulados mediante técnicas electroquímicas. *Electrochimica Acta*, 56(14): 4959-4969.
 14. Ibarra, M., Núñez, M., y Huerta, J., 2010. Manual Aceros Inoxidable. *Indura* Marzo: 21–24. <https://www.indura.com.ec/web/ec>.
 15. IMO. 2012. *Directrices Prácticas Para La Fabricación de Los aceros inoxidable dúplex*. Primera Edición. Publicado por la International Molybdenum Association.
 16. Jones, D. A., 1996. *Principles and Prevention of Corrosion*. Segunda Edición. Prentice Hall, Upper Saddle River.
 17. Kang, D., Nohoon K., y Haewoo L., 2019. Effect of Aging on the Corrosion Resistance of 2209 Duplex Stainless Steel Weldments. *Metals and Materials International* 25(3): 740–50. <https://doi.org/10.1007/s12540-018-0206-4>.
 18. Kannan, T., y N. Murugan. 2006. Effect of Flux Cored Arc Welding Process Parameters on Duplex Stainless Steel Clad Quality. *Journal of Materials Processing Technology* 176(1–3): 230–39.
 19. Méndez, C., M, y R. Ruiz, E., 2011. Evaluación de Aceros Inoxidable Duplex Para La Construcción de Un Digestor. *Revista de Ciencia y Tecnología* (16): 44–48.
http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-75872011000200006&lng=es&nrm=iso&tlng=es%0Ahttp://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1851-75872011000200006&lng=es&nrm=iso&tlng=es.

20. Mendoza, B., I., Zepeda C., Hernandez A., and Piedras, E., 2010. Dissimilar Welding of Superduplex Stainless Steel/HSLA Steel for Offshore Applications Joined by GTAW. *Engineering* 02(07): 520–28.
21. Múñez, C. J., M. V. Utrilla, A. Ureña, y E. Otero. 2010. Influence of the Filler Material on Pitting Corrosion in Welded Duplex Stainless Steel 2205. *Welding International* 24(2): 105–10.
22. Muñoz, M. J., 2011. Pourbaix Para Los Sistemas Metal- Agua. *Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales*: 11.
23. Naik, G. K., Raikar, P.R, Kumbhar, V.S., 2019. Comportamiento a La Corrosión Del Acero Al Carbono En Una Solución de Cloruro de Sodio Mediante Espectroscopia de Impedancia Electroquímica.(Mate. Hoy: Proc. 19): 1670–1676.
24. Pal, Kamal, y Surjya K., 2011. Effect of Pulse Parameters on Weld Quality in Pulsed Gas Metal Arc Welding: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance* 20(6): 918–31.
25. Potgieter, J. H. y col., 2008. Influence of Nickel Additions on the Corrosion Behaviour of Low Nitrogen 22% Cr Series Duplex Stainless Steels. *Corrosion Science* 50(9): 2572–79.
26. Pratikno, H., Hafizh A, y Wimala L., 2022. Comparative Analysis of GTAW, GMAW, and FCAW Welding Results on A36 Steel Against Tensile Test and Macrostructure. *International Journal of Offshore and Coastal Engineering* 6(1): 19.
27. Ricaurte, O., Aguirre, H., Parra, L. 2007. Soldabilidad En Aceros Inoxidables Y Aceros Disimiles. *Scientia et Technica Año XIII, No 34, Mayo de 2007. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701 (No 34): 273–78.*
28. Rivera, L., S., Zamudio y col., 2002. Control de La Corrosión de Acero Al Carbón En Ambientes de Ácido Sulfhídrico Por 1-(2-Hidroxietil)-2-Alquil-Imidazolinás y Sus Correspondientes Precursores Amídicos. *Journal of the Mexican Chemical Society* 46(4): 335–40.

<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47546408>.

29. Sánchez, H., De la Cruz, M., Nápoles, M., y Castillo, F., 2021. Evaluación Del Uso de Inhibidores de Corrosión En El Decapado Ácido de Una Planta Galvánica. *Tayacaja* 4(1): 62–72.
30. Sherif, El., Sayed, M., 2012. Corrosion of Duplex Stainless Steel Alloy 2209 in Acidic and Neutral Chloride Solutions and Its Passivation by Ruthenium as an Alloying Element. *International Journal of Electrochemical Science* 7(3): 2374–88.
31. Sim, B., y col., 2019. The Influence of Post Weld Heat Treatment Precipitation on Duplex Stainless Steels Weld Overlay towards Pitting Corrosion. *Materials*. 12(20).
32. Singhbedi, H., Hitesh A., y Manoj B., 2015. Microstructure , Mechanical Properties & Corrosion Behavior of Duplex 2209 in Electro-Slag Strip Cladding over Low Carbon Steel Substrate : A Review Paper. 5(3): 72–73.
33. Biserova Tahchieva, A., 2021. Estudio del comportamiento del acero inoxidable dúplex y superdúplex después de deformación plástica severa.
34. Utrilla E., María V., 2003. *Estudio de La Resistencia a La Corrosión En Distintos Medios Agresivos de Los Aceros Inoxidables AISI 304L y 316L Preparados Por Vía Pulvimetalúrgica*.
35. Vinoth Jebaraj, A., L. Ajaykumar, C. R. Deepak, y K. V.V. Aditya., 2017. Weldability, Machinability and Surfacing of Commercial Duplex Stainless Steel AISI2205 for Marine Applications – A Recent Review. *Journal of Advanced Research* 8(3): 183–99.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jare.2017.01.002>.
36. Wang, H., y Dong, C., 2018. Effect of Post-Weld Heat Treatment on the Corrosion Behavior of 2205 Duplex Stainless Steel. *Corrosion Science*: 136,309-319.
37. Wang, X., Liu, Y., Liu, J., Chen, W., 2020. Comportamiento y Mecanismo de Corrosión Del Acero Inoxidable 304 En Una Solución Diluida de Ácido

- Sulfúrico Que Contiene H_3PO_4 . (J.Mater. Res. Tecnología 9): 7437–7448.
38. Zhao, Y., y col., 2015. Erosion-Corrosion Behavior and Corrosion Resistance of AISI 316 Stainless Steel in Flow Jet Impingement. *Wear* 328–329: 464–74. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2015.03.017>.
39. Zhu, C., 2017. Study on Arc Characteristics and Their Influences on Weld Bead Geometry in Narrow Gap GMAW of 5083 Al-Alloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 90(9–12): 2513–25.