

TRABAJO DE GRADO
Opción Investigación o Proyecto de Grado

Comportamiento electroquímico del acero inoxidable 17-4 PH -LPBF fabricado por
manufactura aditiva a láser.

Corporación Universitaria Remington.
Ingenierías.
Ingeniería civil.

Alumna: Manuela Tamayo Arias.
Tutor: José Wilmar Calderón Hernández.
Co-tutor del trabajo de grado: Javier Plata Gualdron
Proyecto de grado.
2026.

Dedicatoria

Hoy, con gratitud, amor e ilusión, quiero dedicar este trabajo de grados a las personas que estuvieron presentes a lo largo de este proceso tan significativo, enriquecedor e importante en mi vida.

A mi madre, el motor de mi vida, la que luchó día a día a mi lado para que este sueño se hiciera realidad. Gracias por tu apoyo y amor incondicional, por ser mi inspiración constante y la razón por la que siempre encontraba una motivación para continuar adelante. Gracias por creer en mí, porque aun cuando dudaba, tú veías algo grande en tu hija. Me has dado todo lo que soy como persona, gracias por haber inculcado en mí valores, carácter y coraje para conseguir y lograr todos mis objetivos. Lo hiciste todo posible, mamá, y aun en la distancia, tu apoyo económico, emocional y tu compañía nunca me faltaron. Fuiste la luz que Dios utilizó para conducirme hasta el lugar donde me encuentro hoy. Gracias, mi amor eterno.

A mis hermanos, por su apoyo sincero y por acompañarme con un amor real durante este camino, pero en especial a mi hermano Breyner. Niño, quiero que siempre me veas como ejemplo: todo lo podemos lograr si luchamos y estamos dispuestos a pagar el precio por nuestros sueños.

A mi novio, por haber estado desde el momento 0, por su compañía y por ser incondicional en este proceso.

Finalmente, a toda mi familia Arias, a quienes siempre estaré agradecida por cada aporte y gesto de apoyo que hicieron parte de este camino y contribuyeron a la realización de este logro.

Los amo por siempre,

Manuela Arias

Agradecimientos

Primeramente, agradezco a Dios, quien supo guiarme siempre por el buen camino, por regalarme la vida y la salud necesarias para hacer este sueño realidad. Su bondad y su guía me dieron la fuerza para no rendirme, incluso cuando las situaciones se tornaron inciertas y difíciles.

A mi madre y a mi hermana, Sindy, quienes estuvieron siempre presentes en cada etapa de este proceso tan maravilloso, brindándome su apoyo, amor y confianza incondicional.

A mi tutor, José Wilmar Calderón, por creer en mí desde el principio y por depositar su confianza, orientación y acompañamiento para hacer posible la culminación de este trabajo.

Al compañero Erick Omar Tunqui Labra de la universidad de sao pablo por brindarme el apoyo con los ensayos mecánicos del material.

A la Corporación Universitaria Remington, por permitirme el acceso a sus laboratorios y facilitar los recursos necesarios para la realización de los diferentes ensayos, contribuyendo así al logro de los objetivos planteados.

Tabla de Contenidos

Resumen	8
Palabras clave	9
Introducción, Marco teórico o de referencia	10
Técnicas Detalladas de MA en Metales: LPBF y L-DED	13
Generalidades de los Aceros y Aceros Inoxidables	14
Características del Acero Inoxidable 17-4 PH (AISI 630)	15
Microestructura del acero 17-4 PH por Manufactura Aditiva	16
Tratamientos Térmicos y Post-procesamiento del acero inoxidable 17-4PH.....	17
Corrosión Electroquímica en el acero 17-4PH LPBF.....	17
Objetivos	23
Objetivo General.....	23
Objetivos específicos	23
Metodología	24
Fabricación de las muestras de acero inoxidable 17-4PH LPBF	24
Tratamientos térmicos.....	26
caracterización microestructural	27
Ensayos de dureza.....	29
Ensayos electroquímicos.....	30
Resultados y Discusión	31
Resultados Caracterización microestructural.....	31
Resultados de dureza.....	35
Resultados electroquímicos	36
Discusion	38
Relación de los resultados entre dureza y corrosión.....	38
Conclusiones	42
Referencias	43

Lista de tablas

Tabla 1 + <i>Composición Química del acero 17-4PH</i>	16
Tabla 2 + Composición de los materiales del reactivo FRY.....	26
Tabla 3 + Resultados de dureza del acero 17-4PH LPBF	33

Lista de figuras

<i>figura 1. ilustrativo de las técnicas por ma. fuente: sitio web: trumpf maquinaria s.a....</i>	14
Figura 2.Muestras recibidas. Fuente: autora	25
Figura 3.Maquina Utilizada para la Fabricación. Fuente: Instituto SENAI-Reporte de fabricación de piezas	26
Figura 4.Resultado de Piezas fabricadas. Fuente: Instituto SENAI-Reporte de fabricación de piezas.....	26
Figura 5.Equipo dilatómetro. a) arreglo interno con instalación del pin entre dos varas de silicio. b) especto externo del equipo. Fuente: JWC.....	27
Figura 6.Suspensión de muestra de acero inoxidable 17-4 PH LPBF en reactivo FRY. Fuente: autora.....	29
Figura 7.Microscopio Nikon Labopho.Fuente:autora.....	29
Figura 8.Montaje de la Celda electroquímica para ensayos. Fuente: autora	30
Figura 9.Tal como recibido (TCR)	31
Figura 10.Homogeneizado(H)	32
Ilustración 11.Homogeneizado+Solubilizado(HS)	32
Figura 12.Homogeneizado+Solubilizado+Envejecido_1hora (HSE1h).....	33
Figura 13.Homogeneizado+Solubilizado+Envejecido_4hora (HSE4h).....	34
Figura 14.Resultados ensayos polarización potenciodinámica.....	36
Figura 15.Resultados de impedancia electroquímica.....	37
Figura 16.Realación entre dureza y potencial de corrosión	39

Resumen

El acero inoxidable endurecible por precipitación 17-4 PH es un material de amplio uso en aplicaciones industriales de alta exigencia debido a su adecuada combinación de resistencia mecánica y resistencia a la corrosión. En los últimos años, la manufactura aditiva por fusión de lecho de polvo con láser (LPBF) ha surgido como una técnica prometedora para la fabricación de componentes con geometrías complejas; sin embargo, los rápidos ciclos térmicos de este proceso generan microestructuras heterogéneas que pueden afectar el desempeño electroquímico del material. En este contexto, surge la necesidad de evaluar el efecto de los tratamientos térmicos de posprocesamiento sobre el comportamiento del acero 17-4 PH fabricado por LPBF.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el comportamiento electroquímico del acero inoxidable 17-4 PH fabricado mediante LPBF bajo diferentes condiciones de tratamiento térmico, con el fin de identificar la condición que ofrezca el mejor compromiso entre resistencia mecánica y resistencia a la corrosión. Para ello, se fabricaron muestras de acero 17-4 PH mediante LPBF y se sometieron a tratamientos térmicos de homogeneización, solubilización y envejecimiento a 480 °C por tiempos de 1 y 4 horas.

La caracterización del material se realizó mediante análisis microestructural por microscopía óptica, ensayos de microdureza y ensayos electroquímicos en solución de NaCl al 3,5 %, utilizando técnicas de polarización potencio dinámica y espectroscopía de impedancia electroquímica. Los resultados mostraron que los tratamientos de envejecimiento incrementan significativamente la dureza del material debido a la

precipitación de fases ricas en cobre, mientras que el comportamiento frente a la corrosión se ve influenciado por la evolución microestructural inducida por cada tratamiento.

Finalmente, se determinó que la condición HSE1h presenta el mejor equilibrio entre propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión, cumpliendo con los objetivos establecidos y posicionándose como la alternativa más viable para aplicaciones industriales del acero 17-4 PH fabricado por LPBF.

Palabras clave

Acero inoxidable, microestructura, Corrosión, manufactura aditiva, tratamientos térmicos.

Introducción, Marco teórico o de referencia

Manufactura Aditiva (MA) y Caracterización del Acero Inoxidable 17-4 PH

La manufactura aditiva (MA), enmarcada dentro del paradigma de la Industria 4.0, se ha consolidado en los últimos años como una tecnología innovadora con un alto potencial de transformación en los procesos de fabricación industrial. Su principio fundamental consiste en la construcción de componentes tridimensionales mediante la deposición sucesiva de material capa por capa, lo que supone un cambio significativo frente a los métodos de manufactura tradicionales (Bahnini, Rivette, Rechia, Siadat, & Elmesbahi, 2018). Este enfoque constructivo no solo amplía las posibilidades de diseño, sino que también permite una integración más estrecha entre las etapas de concepción, modelado y producción.

El proceso de manufactura aditiva se basa estrictamente en un modelo digital desarrollado mediante software de Diseño Asistido por Ordenador (CAD). A partir de este modelo, la geometría se discretiza en múltiples planos bidimensionales que contienen la información necesaria para controlar con alta precisión los parámetros operativos de la máquina, tales como la trayectoria del haz láser, la velocidad de procesamiento y el aporte energético durante la fabricación (Coelho, y otros, 2025). Esta dependencia del entorno digital otorga a la MA una elevada reproducibilidad y flexibilidad, permitiendo modificaciones rápidas del diseño sin requerir cambios significativos en la infraestructura productiva.

La importancia estratégica de la manufactura aditiva radica, principalmente, en su capacidad para fabricar piezas con geometrías complejas y altamente funcionales, incluyendo redes internas optimizadas, estructuras reticulares y canales de refrigeración conformados. Este tipo de configuraciones geométricas resulta difícil o directamente inalcanzable mediante métodos sustractivos convencionales, lo que posiciona a la MA como una alternativa especialmente atractiva para aplicaciones de alta ingeniería (Coelho, y otros, 2025). Asimismo, esta tecnología contribuye a un uso más eficiente del material, reduciendo desperdicios y etapas intermedias de fabricación.

Adicionalmente, la MA favorece nuevos esquemas de producción basados en el trabajo remoto y la fabricación deslocalizada, donde los componentes pueden producirse directamente a partir de archivos digitales en ubicaciones cercanas al punto de uso. Esta característica permite optimizar de manera significativa las cadenas de suministro, reducir tiempos logísticos y mejorar la capacidad de respuesta ante demandas específicas, aspectos que resultan especialmente relevantes en los actuales entornos industriales altamente dinámicos (Fernández, 2022).

Manufactura Aditiva en metales y Acero 17-4 PH

En el procesamiento de metales, la manufactura aditiva se ha convertido en una herramienta fundamental para la obtención de componentes funcionales con propiedades mecánicas que pueden igualar e incluso superar las de sus contrapartes fabricadas por métodos convencionales, como la forja (Sabooni, y otros, 2021). Esta capacidad ha impulsado su rápida adopción en sectores industriales de alta exigencia, tales como el

aeroespacial, el médico y el químico, donde se requieren materiales con alto desempeño, geometrías específicas y una elevada confiabilidad en servicio.

El creciente interés industrial por la MA metálica se debe, en gran medida, a su potencial para la personalización de componentes sin incrementar significativamente los costos de producción, así como a la reducción sustancial del desperdicio de materia prima asociada a los procesos sustractivos tradicionales (Fernández, 2022). Adicionalmente, esta tecnología permite un control local de la microestructura a través de la gestión precisa de los parámetros del proceso, lo que posibilita la fabricación de piezas con arquitecturas internas complejas y propiedades adaptadas a requisitos funcionales específicos (Coelho, y otros, 2025).

Dentro de este marco, el acero inoxidable endurecible por precipitación 17-4 PH se posiciona como un material estratégico debido a su combinación de alta resistencia mecánica y adecuada resistencia a la corrosión. No obstante, cuando este acero es procesado mediante manufactura aditiva, su comportamiento frente a la corrosión electroquímica se convierte en un aspecto crítico que requiere un análisis detallado. La microestructura singular generada por los rápidos ciclos térmicos asociados al uso del láser, caracterizados por altas velocidades de fusión y solidificación, influye de manera directa en la estabilidad de la capa pasiva y, en consecuencia, en la durabilidad del material en medios agresivos (Coelho, y otros, 2025).

Técnicas Detalladas de MA en Metales: LPBF y L-DED

Los procesos de manufactura aditiva (MA) se clasifican, de manera general, en función del estado físico inicial de la materia prima utilizada durante la fabricación. En el caso del procesamiento de metales mediante tecnologías basadas en láser, destacan principalmente dos técnicas que se han consolidado por su madurez tecnológica y aplicación industrial: la Fusión de Lecho de Polvo por Láser (Laser Powder Bed Fusion, LPBF o SLM) y la Deposición de Energía Dirigida por Láser (Laser Directed Energy Deposition, L-DED).

La técnica LPBF se fundamenta en la fusión selectiva de un lecho de polvo metálico mediante un haz láser de alta potencia, operando bajo una atmósfera inerte que evita la oxidación del material durante el proceso. Esta tecnología ha adquirido una relevancia significativa debido a su elevada precisión dimensional, excelente resolución geométrica y a la capacidad de producir piezas con altas densidades relativas y detalles internos complejos, características especialmente valoradas en aplicaciones de alta exigencia técnica ((Fernández, 2022), (Coelho, y otros, 2025).

Por otro lado, la técnica L-DED se basa en la inyección continua de material, en forma de polvo o alambre, directamente en el punto focal del haz láser, donde se produce la fusión simultánea del material añadido y del sustrato. Aunque presenta una resolución dimensional inferior en comparación con la técnica LPBF, el proceso L-DED se caracteriza por mayores tasas de deposición, lo que lo convierte en una alternativa eficiente para la fabricación de componentes de gran tamaño, así como para la reparación localizada y el recubrimiento de piezas con geometrías complejas (Coelho, y otros, 2025).

La representación del procesado láser de metales permite evidenciar cómo tanto la deposición directa como la fusión localizada ofrecen no solo la posibilidad de fabricar nuevos componentes, sino también de restaurar o modificar piezas existentes. Estas capacidades consolidan a la manufactura aditiva metálica como un pilar fundamental de la fabricación avanzada, al integrar precisión, flexibilidad y eficiencia en un mismo entorno tecnológico.

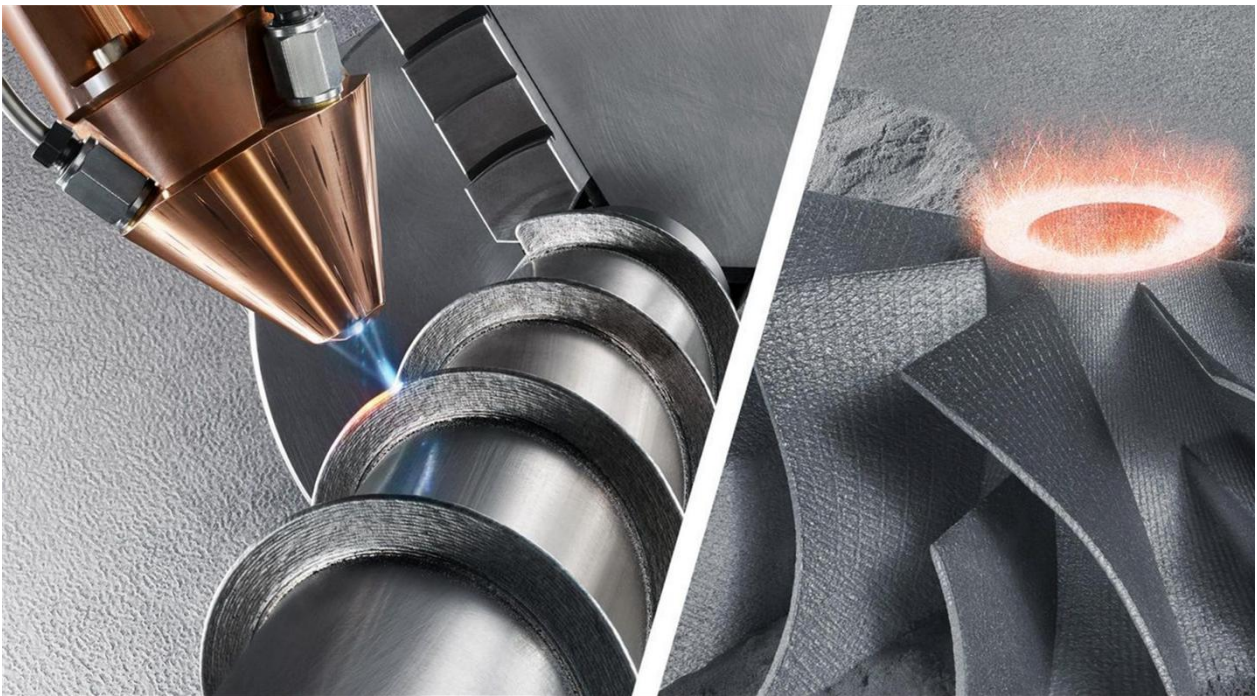


Figura 1. Ilustrativo de las Técnicas por MA. Fuente: Sitio web: TRUMPF MAQUINARIA S.A

Generalidades de los Aceros y Aceros Inoxidables

El acero es una de las aleaciones más importantes en la ingeniería global debido a su versatilidad; los aceros inoxidables se distinguen por su excepcional resistencia a la corrosión, propiedad que adquieren principalmente gracias a la formación de una capa

pasiva superficial rica en cromo. (Kochmański & Nowacki, 2006); (J.C., Granda-Gutiérrez, Naeem, & Acevedo-Davila, 2018).

Estos materiales se clasifican según su microestructura en ferríticos, austeníticos, martensíticos y endurecibles por precipitación. Específicamente los aceros endurecidos por precipitación son de especial interés porque además de su alta resistencia contra corrosión, también poseen resistencia mecánica considerable. Una de las aleaciones ampliamente utilizada es la denominada 17-4PH (PH: Precipitation Hardening).

Características del Acero Inoxidable 17-4 PH (AISI 630)

El acero 17-4 PH es una aleación martensítica endurecible por precipitación que combina alta resistencia mecánica y dureza con una excelente resistencia a la corrosión (Kochmański & Nowacki, 2006); (C, Lass, & Campbell, 2016).

Su composición incluye entre un 15% y 17.5% de cromo, lo que le otorga buena resistencia a la oxidación y corrosión por cloruros, junto con un balance de níquel y cobre (Pasebania, Ghayoora, Badweb, Irrinkic, & Atrec, 2018).

A continuación, se presenta una tabla de la composición química del acero inoxidable 17-4 PH.

Tabla 1. Composición Química del acero 17-4PH

<i>Material</i>	<i>Cantidad (%)</i>
C	0.04
Mn	0.25
P	0.2
S	0.01
Si	0.6
Cr	16
Ni	4
Cu	3.2
Nb	0.25

A pesar de su amplio uso industrial, su comportamiento cuando es procesado por MA ha sido poco estudiado por la literatura en comparación con otros grados como el 316L, especialmente en lo que respecta a sus reglas de diseño.

Microestructura del acero 17-4 PH por Manufactura Aditiva

La microestructura del 17-4 PH obtenida por MA difiere significativamente de la condición forjada convencional, en estado "as-printed", el material suele presentar una estructura dendrítica o celular fina (C, Lass, & Campbell, 2016); (Coelho, y otros, 2025).

Debido a las altísimas velocidades de enfriamiento y a la atmósfera de fabricación (el nitrógeno actúa como estabilizador), es común encontrar una mezcla de fases que incluye martensita y hasta un 50% de austenita retenida, también se observa la presencia de carburos de niobio finos alineados preferencialmente en los bordes de las dendritas (C, Lass, & Campbell, 2016).

Tratamientos Térmicos y Post-procesamiento del acero inoxidable 17-4PH

Debido a las tensiones residuales y la microestructura, los tratamientos térmicos son esenciales para homogeneizar el material:

- **Relajación de tensiones:** Aplicado a 650 °C para aliviar tensiones internas antes de separar la pieza de la placa base (Fernández, 2022); (C, Lass, & Campbell, 2016).
- **Puesta en solución:** Se realiza a temperaturas elevadas (aprox. 1050 °C - 1100 °C) para disolver fases y preparar la matriz para el endurecimiento (Pasebania, Ghayoor, Badweb, Irrinkic, & Atrec, 2018).
- **Envejecimiento:** Realizado entre 480 °C y 620 °C, provoca la precipitación de nanopartículas ricas en cobre que incrementan drásticamente la dureza y resistencia (Sabooni, y otros, 2021); (Pasebania, Ghayoor, Badweb, Irrinkic, & Atrec, 2018); (Fernández, 2022).
- **Prensado Isostático en Caliente:** Emplea presión y temperatura para cerrar la porosidad interna y mejorar la resistencia a la fatiga (Fernández, 2022).

Corrosión Electroquímica en el acero 17-4PH LPBF

La resistencia a la corrosión del acero 17-4 PH procesado por LPBF es una propiedad crítica que depende intrínsecamente de la estabilidad de su capa pasiva y de la homogeneidad de su microestructura.

A diferencia del material forjado, las piezas aditivas presentan una respuesta electroquímica compleja debido a la presencia de fases fuera de equilibrio, defectos térmicos y segregación elemental (C, Lass, & Campbell, 2016); (Coelho, y otros, 2025).

En medios salinos, el acero 17-4 PH fabricado por LPBF desarrolla una capa pasiva de naturaleza dúplex, esta se compone de una capa interna rica en óxidos de cromo que actúa como barrera protectora, y una capa externa de oxi-hidróxidos de hierro y cromo (Coelho, y otros, 2025).

Estudios de Potencial de Circuito Abierto (OCP) indican que, durante las primeras horas de inmersión, el potencial tiende a desplazarse hacia valores más nobles, lo que sugiere un refuerzo continuo de esta película protectora, no obstante, la estabilidad de esta capa es menor en microestructuras martensíticas comparadas con las ferríticas, debido a la mayor densidad de dislocaciones y energía almacenada en la red martensítica, lo que facilita la disolución anódica en sitios defectuosos (Coelho, y otros, 2025).

El principal mecanismo de falla electroquímica en el acero 17-4 PH LPBF es la corrosión por picaduras (pitting), la nucleación de estas picaduras ocurre preferencialmente en sitios de alta energía, como los bordes de la piscina de fusión, que son zonas reconocidas por la segregación elemental y las tensiones térmicas residuales (Coelho, y otros, 2025).

Un hallazgo crítico en la literatura reciente es la incapacidad de Re-pasivación del material tras el inicio de una picadura estable, este fenómeno se atribuye a la deposición de partículas de cobre metálico en el fondo de la picadura, las cuales dificultan la oxidación del cromo necesaria para reconstruir la capa pasiva, permitiendo que la picadura progrese de forma irreversible (Coelho, y otros, 2025).

La resistencia a la corrosión presenta una relación inversa con la dureza tras los tratamientos térmicos, se ha determinado que la condición homogenizada presenta el mejor desempeño electroquímico, con potenciales de corrosión más favorables y mayores

resistencias a la polarización, debido a una matriz más estable y una mínima precipitación de fases que actúen como cátodos locales, Por el contrario, los tratamientos de envejecimiento, aunque maximizan la resistencia mecánica mediante la precipitación de nanopartículas de cobre, incrementan la susceptibilidad a la corrosión localizada al generar micro-galvanismos en la matriz martensítica.

Las picaduras actúan como concentradores de esfuerzos que facilitan la nucleación de grietas, las cuales se propagan de forma dinámica debido a la interacción sinérgica entre el medio agresivo y la carga mecánica (Terrazas, 2000).

En microestructuras con alta austenita retenida (hasta 50%), típica del estado "as-printed" en atmósfera de nitrógeno, la ductilidad mejora, pero la estabilidad de las piezas bajo carga requiere tratamientos térmicos de relajación de tensiones para mitigar las deformaciones inducidas por el proceso láser (Terrazas, 2000); (C, Lass, & Campbell, 2016).

El uso de tratamientos superficiales como la oxi-nitruración por plasma puede incrementar hasta 10 veces el tiempo a la falla en pruebas de agrietamiento por esfuerzos en presencia de sulfuros, al formar una capa protectora de óxido de cromo sobre una zona de martensita expandida (J.C., Granda-Gutiérrez, Naeem, & Acevedo-Davila, 2018).

La investigación científica reciente se ha centrado en entender cómo las nuevas técnicas de fabricación y los tratamientos post-construcción de las piezas, alteran la durabilidad del acero 17-4 PH. En el siguiente estudio, (Garcia-Cabezón, Castro-Sastre, Fernández-Abia, Rodríguez-Mendez, & Martín-Pedrosa, 2022) determinaron que el acero procesado por fusión selectiva por láser LPBF tiene un desempeño considerablemente mejor que el acero

forjado convencional, lo cual se atribuye a una microestructura más fina con una cantidad importante de austenita y a la reducción de inclusiones no metálicas, como los sulfuros de manganeso, que son sitios críticos de inicio de picaduras.

Un factor determinante en la resistencia a la corrosión localizada es el uso de gases de atomización, en su estudio (Qingyu, Yanfei, Liangliang, Nan, & Xiaowei, 2026) demostraron que el uso de nitrógeno en lugar de argón durante la producción de polvos para manufactura aditiva puede estabilizar la austenita retenida en niveles de hasta el 81%, lo que altera significativamente la respuesta química del material. También, señalaron que el nitrógeno absorbido ayuda a formar una película pasiva de óxido rica en Cromo y Níquel más estable, concluyendo que, tras un tratamiento de homogeneización térmica, el acero 17-4 PH puede ser incluso más resistente en ambientes de servicio que el acero convencional.

Finalmente, dado que las piezas de acero por manufactura aditiva presentan rugosidad elevada que compromete la resistencia, se han validado diversos tratamientos superficiales. (Ahuir-Torres, Liu, Chadwick, & Tecelli Öpöz, 2025), reportaron que el acabado mediante masa centrífuga reduce la rugosidad en un 78%, permitiendo una recuperación espontánea de la capa oxidada protectora en etapas tempranas de inmersión en agua salada.

Complementariamente, (Chang, y otros) utilizaron electro pulido con ácido sulfúrico para volver el potencial de corrosión más noble y reducir la densidad de corriente

En cuanto a la protección química, (Michla, Nagarajan, Oluwarotimi Ismai, & Ramprabhu, 2025) investigaron la nitruración en baño de sales a diferentes temperaturas, concluyendo que el tratamiento a 580 °C ofrece la protección óptima contra ataques en

medios de cloruro y sulfato gracias a una distribución más homogénea de cromo y nitrógeno en la superficie.

Planteamiento del problema.

A pesar de las grandes ventajas de la manufactura aditiva, la implementación del acero inoxidable 17-4 PH mediante la técnica LPBF representa un desafío crítico en cuanto a la falta de conocimiento en el rendimiento funcional de las características en comparación con el material forjado tradicional.

Mientras que el acero 17-4 PH convencional posee una estructura plenamente martensítica, el proceso LPBF induce velocidades de enfriamiento extremadamente altas que generan microestructuras heterogéneas con una fracción de austenita retenida de hasta el 50% o matrices ferríticas fuera de equilibrio (C, Lass, & Campbell, 2016); (Sabooni, y otros, 2021).

Esta heterogeneidad química y estructural influye de manera determinante en la corrosión electroquímica, ya que la porosidad remanente y la segregación de elementos actúan como sitios preferenciales para la nucleación de picaduras, se ha observado que, una vez iniciado el ataque localizado, las muestras aditivas presentan dificultades severas para la Re pasivación debido a la deposición de cobre en el fondo de las picaduras, lo que compromete la integridad estructural en medios agresivos (Coelho, y otros, 2025).

Aunque se reconoce la necesidad de aplicar tratamientos térmicos para homogeneizar el material, la literatura científica actual presenta un vacío significativo respecto a la respuesta electroquímica específica de los componentes fabricados con

potencias de láser, ya que la mayoría de las investigaciones se han limitado a optimizar propiedades mecánicas. En consecuencia, persiste la incertidumbre sobre cómo los ciclos térmicos de posprocesamiento alteran la estabilidad de la capa pasiva en estas microestructuras únicas, planteando la siguiente interrogante: ¿Cuál es el efecto real de los tratamientos térmicos de posprocesamiento en la evolución microestructural y en la susceptibilidad a la corrosión del acero 17-4 PH fabricado por LPBF?

La ejecución de este proyecto se justifica por la necesidad de establecer condiciones óptimas de procesamiento que garanticen la durabilidad y eficiencia de los componentes de acero 17-4 PH en aplicaciones de alta exigencia, como los sectores aeroespaciales, médico y petroquímico.

El estudio pretende resolver esta problemática mediante la evaluación detallada de la microestructura tras tres tratamientos térmicos: homogenización a 1175°C por 2.5h, solubilización a 1040°C por 30min y envejecimiento a 480°C con tiempo de permanencia de 1h y 4h, además de realizar ensayos electroquímicos y de dureza en función de los tratamientos térmicos, identificando cómo el refinamiento de la matriz y la distribución controlada de precipitados logran mitigar los sitios activos de corrosión localizada. Al determinar la condición térmica que proporcione el mejor compromiso entre el desempeño mecánico y la estabilidad electroquímica, esta investigación aporta conocimiento técnico de alto valor para la industria, facilitando la transición de simples prototipos a componentes funcionales finales con propiedades predecibles y reproducibles bajo estándares de calidad rigurosos.

Objetivos

Objetivo General

Evaluar el comportamiento electroquímico del acero inoxidable 17-4PH fabricado por Manufactura Aditiva a Láser (LPBF) en diferentes tratamientos térmicos.

Objetivos específicos

Caracterizar la microestructura del acero inoxidable mediante técnicas metalográficas.

Determinar la resistencia contra corrosión de los materiales estudiados.

Determinar la condición que reúna las mejores características entre resistencia mecánica y contra corrosión de las muestras analizadas.

Metodología

Esta investigación se enmarca en un enfoque experimental y descriptivo, centrado en la caracterización de muestras de acero inoxidable 17-4 PH previamente fabricadas mediante manufactura aditiva por fusión de lecho de polvo con láser (Laser Powder Bed Fusión – LPBF) y sometidas a tratamientos térmicos específicos.

El diseño corresponde a un análisis de laboratorio comparativo, en el que se evalúa el comportamiento microestructural y electroquímico de las muestras con el fin de identificar cómo se relacionan las características internas del material con su resistencia a la corrosión.

Fabricación de las muestras de acero inoxidable 17-4PH LPBF

Las muestras utilizadas corresponden a probetas cilíndricas de 4 mm de diámetro y 10 mm de alto de acero 17-4 PH en estado tal como recibido y 3 diferentes tratamientos térmicos la cuales fueron cortadas por electroerosión; fueron fabricadas mediante la técnica de fusión en lecho de polvo por láser (L-PBF) utilizando el equipo Concept Laser M2 Cushing, como materia prima se empleó polvo metálico MetcoAdd 17-4PH-A (Oerlikon Metco) con una granulometría de 15 a 45 μm , El proceso se llevó a cabo bajo una atmósfera controlada de argón, manteniendo la concentración de oxígeno por debajo del 0,2 % para evitar la oxidación.

A continuación, se muestran las muestras en el estado tal como recibido:



Figura 2. Muestras recibidas. Fuente: autora

De acuerdo con el estudio de procesabilidad realizado por el Instituto SENAI de Inovação (Brasil), la selección de parámetros se basó en la optimización de la densidad relativa y el acabado superficial. Se determinó que el mejor resultado para la técnica L-PBF se obtiene utilizando una potencia de láser de 200 W y una velocidad de escaneamiento de 650 mm/s, Otros parámetros incluyeron un hatch distance de 105 μm y un espesor de capa de 30 μm , empleando una estrategia de escaneo continuo con rotación de 90° entre capas.

En las siguientes figuras se puede observar el equipo industrial de fabricación aditiva por fusión selectiva por láser (SLM/LPBF) con el que fueron fabricadas las piezas estudiadas y las muestras de acero inoxidable 17-4PH LPBF después de su fabricación.



Figura 3. Maquina Utilizada para la Fabricación. Fuente: Instituto SENAI-Reporte de fabricación de piezas

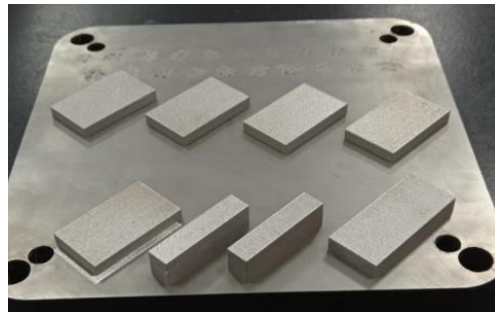


Figura 4. Resultado de Piezas fabricadas. Fuente: Instituto SENAI-Reporte de fabricación de piezas

Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos se realizaron en un equipo dilatométrico de alta precisión perteneciente al Laboratorio de Transformaciones de Fases de la Universidad de São Paulo (USP), el cual permitió un monitoreo riguroso de la temperatura mediante un convenio de colaboración. La Figura 5 presenta el equipo dilatómetro utilizado para la realización de los tratamientos térmicos de las muestras.

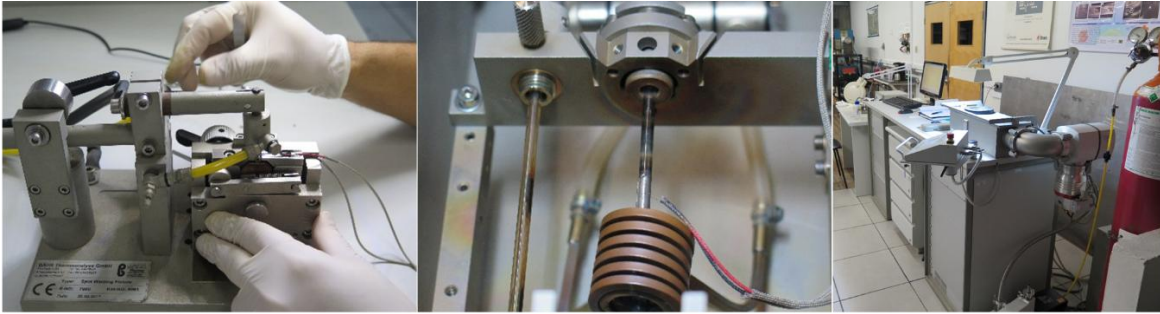


Figura 5. Equipo dilatómetro. a) arreglo interno con instalación del pin entre dos varas de silicio. b) aspecto externo del equipo. Fuente: JWC

las muestras fueron sometidas a los siguientes ciclos térmicos:

- Homogeneizado (H): 1175 °C por 2,5 h.
- Solubilizado (S): 1040 °C por 30 min.
- Envejecido (E): Realizado a 480 °C con tiempos de permanencia de 1 hora y 4 horas para promover el endurecimiento por precipitación de fases ricas en cobre.

caracterización microestructural

Las muestras caracterizadas fueron pines de acero 17-4 PH en diferentes etapas de tratamiento térmico: Tal como fabricado (TCR), Homogeneizado (H), Homogeneizado + solubilizado (HS), Homogeneizado + Solubilizado + Envejecido por 1 hora (HS1h) y Homogeneizado + Solubilizado + Envejecido por 4 horas (HS4h).

Para el análisis de las fases, las muestras pasaron por un proceso de embutido en baquelita dejando uno de los extremos descubiertos para la posterior preparación metalográfica estándar que se llevó a cabo lijando las muestras de acero inoxidable 17-4PH LPBF hasta grano 1000 y pulido con paños metalográficos y suspensión diamantado de 6, 3 y 1 μm .

Para revelar la microestructura, se optó por el uso del reactivo Fry (cloruro férrico, ácido clorhídrico y agua), para verificar diferencias microestructurales entre materiales bajo la misma condición de tratamiento térmico.

En la siguiente tabla se muestran los materiales y las cantidades utilizadas para la realización del reactivo FRY:

Tabla 2. *Composición de los materiales del reactivo FRY*

<i>Material</i>	<i>Medidas utilizadas</i>
Ácido cúprico	0.17 (g)
Etanol	6.7 (ml)
Agua destilada	1 (ml)
HCL	0.82 (ml)

A continuación, se presenta la figura donde se observa la inmersión de la muestra en la solución reactiva.



Figura 6. Suspensión de muestra de acero inoxidable 17-4 PH LPBF en reactivo FRY. Fuente: autora.

La caracterización microestructural se realizó mediante microscopía óptica (Mo), empleando un microscopio Nikon Labopho del laboratorio de ingenierías de la CUR, para cuantificar la porosidad y observar la morfología de grano de cada una de las muestras.



Figura 7. Microscopio Nikon Labopho. Fuente: autora.

Ensayos de dureza

Los valores de microdureza fueron obtenidos de un micro durómetro Shimadzu HMV-2TDQDW perteneciente a la Universidad de São Paulo (USP), con el apoyo de

investigadores que colaboran con nuestro equipo de investigación, MATREA (Materiales transformación energética y ambiente).

Ensayos electroquímicos

Para medir la resistencia a la corrosión de las muestras de acero inoxidable 17-4PH LPBF, se emplearon diferentes técnicas electroquímicas, para cada muestra se realizó triplicata de los diferentes ensayos utilizando una celda de tres electrodos y un potencióstato (Gamry 1010), las pruebas se realizaron en una solución de NaCl al 3.5%.

Se obtuvieron curvas de polarización potencio dinámica para determinar el potencial de corrosión (E_{corr}) y la densidad de corriente, además de realizar pruebas de espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) para analizar la estabilidad de la capa pasiva.

En la figura 8 se muestra el montaje experimental utilizado para realizar los ensayos electroquímicos de las muestras de acero inoxidable 17-4PH LPBF.



Figura 8. Montaje de la Celda electroquímica para ensayos. Fuente: autora

Resultados y Discusión

Resultados Caracterización microestructural

En este apartado, se presentan los resultados obtenidos del análisis microestructural realizado a las muestras de acero inoxidable 17-4 PH fabricadas mediante la técnica LPBF. Se incluyen las imágenes obtenidas mediante microscopía óptica, así como la descripción cualitativa de las principales características observadas. También, se discuten aspectos relevantes relacionados con la morfología de los granos, la presencia de porosidad y la posible formación de fases derivadas del proceso de fabricación aditiva.



Figura 9. Tal como recibido (TCR)

La figura 9 muestra la imagen de MO obtenida para el material en estado tal como recibido. Nótese una estructura tipo celular donde se distingue claramente los límites entre regiones, se evidencia el paso del láser a través de patrones lineales asociados a la trayectoria de haz durante el proceso; lo que incide en los cambios microestructurales como variaciones en la textura y la modificación del grano entre las zonas directamente afectadas.

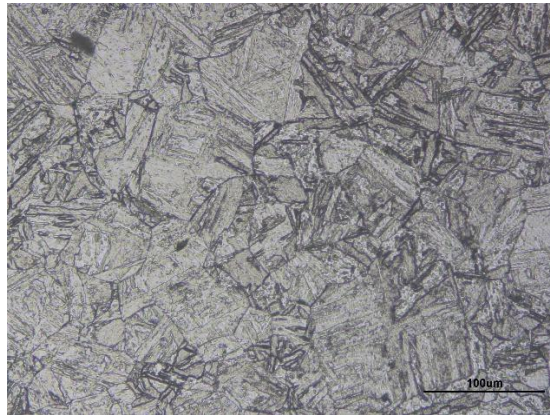


Figura 10. Homogeneizado(H)

La Figura 10 presenta la microestructura del material homogeneizado con granos equiaxiales, con una distribución relativamente homogénea, aunque aún se observan contrastes internos y estructuras orientadas dentro de algunos granos. Esto sugiere una reorganización microestructural asociada al tratamiento térmico, con reducción de la heterogeneidad respecto a una condición inicial más marcada. Esta estructura favorece una respuesta más eficiente frente a ambientes corrosivos.

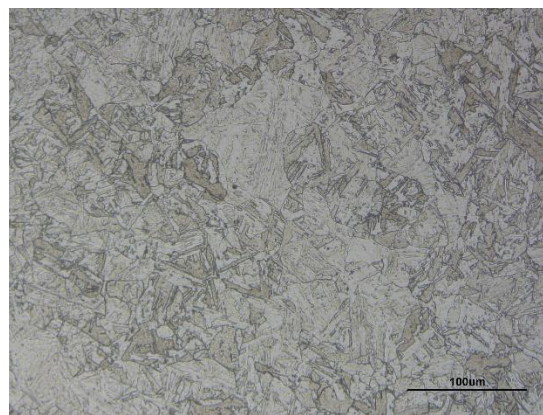


Ilustración 11. Homogeneizado+Solubilizado (HS)

En la figura 11 se presenta una microestructura irregular y tamaños variables distribuidos de manera aleatoria, los granos presentan contornos bien definidos de granos aciculares distribuidas en varias orientaciones dentro de la matriz, esto indica una solidificación sin una dirección preferencial marcada.

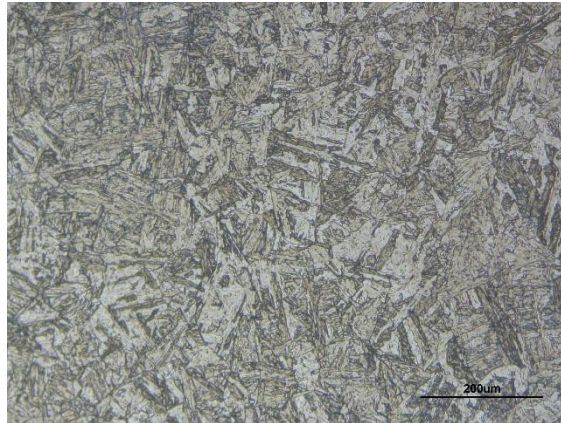


Figura 12. Homogeneizado+Solubilizado+Envejecido_1hora (HSE1h)

La muestra homogeneizada + solubilizada + envejecida durante 1 hora presenta una microestructura densa formada por granos alargados y circulares definidos distribuidos de manera entrecruzada y con orientaciones aleatorias dentro de la muestra. Esta apariencia es indicativa de los cambios microestructurales inducidos por el tratamiento de envejecimiento, asociados a la precipitación de fases que contribuyen al endurecimiento del material, donde el crecimiento direccional dio lugar a una morfología tipo lamina o aguja.

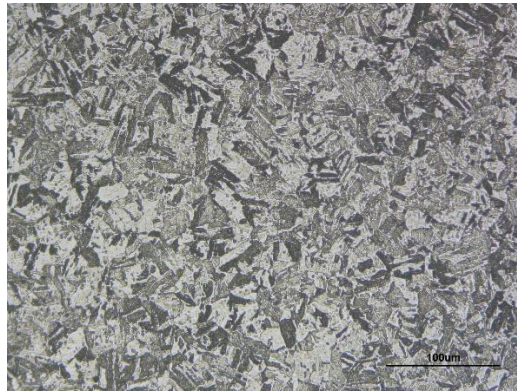


Figura 13. Homogeneizado+Solubilizado+Envejecido_4hora (HSE4h)

La muestra homogeneizada, solubilizada y envejecida durante 4 hora presenta una microestructura más fina y homogénea, con una morfología irregular y angular, distribuidos de manera uniforme en toda la muestra. Este comportamiento sugiere una evolución microestructural más intensa asociada al envejecimiento prolongado, con una mayor presencia de precipitados y modificaciones en la organización interna del material.

En comparación con la condición TCR, que exhibe una microestructura fina y anisotrópica típica del estado as-built LPBF con rasgos celulares de solidificación rápida, la muestra homogeneizada muestra granos más equiaxiales y una matriz notablemente más uniforme, reduciendo la heterogeneidad inicial. Respecto a esta, la condición homogeneizada + solubilizada presenta estructuras aciculares más definidas en la matriz martensítica, evidenciando mayor disolución de segregados.

A su vez, frente a la solubilizada, el envejecimiento de 1 hora incrementa significativamente los contrastes internos y la nucleación de precipitados finos ricos en Cu, mientras que el envejecimiento extendido a 4 horas en comparación con 1 hora genera una microestructura aún más contrastada con mayor volumen de precipitados gruesos y zonas

oscuras heterogéneas, reflejando un avanzado de fases endurecedoras. Esta progresión comparativa valida la optimización secuencial de tratamientos térmicos en 17-4 PH LPBF.

Resultados de dureza

En la tabla 3 se muestran los resultados de dureza obtenidos para las diferentes muestras de acero inoxidable LPBF de los ensayos mecánicos realizados.

Tabla 3. Resultados de dureza del acero 17-4PH LPBF

<i>PIEZA</i>	<i>VALOR</i>
Homogeneizada (H)	327 HV
Homogeneizada + Solubilizada (HS)	307 HV
Homogeneizada + Solubilizada + Envejecida 1h (HSE1h)	429 HV
Homogeneizada + Solubilizada + Envejecida 4h (HSE4h)	452 HV

La Tabla 3 presenta los valores de dureza Vickers (HV) obtenidos de los ensayos realizados al acero inoxidable martensítico 17-4PH(LPBF), evaluados en condiciones específicas después del tratamiento térmico. La muestra (H) dio como resultado 327 HV, valor atribuible a la disolución de fases segregadas durante la homogeneización. La condición (HS) registra 307 HV, reflejando una ligera disminución por dilución microestructural y posibles tensiones residuales inducidas por el aporte del tratamiento solubilizado. Las muestras (HSE1h) incrementa la dureza a 429 HV, mientras que la (HSE4h) alcanza 452 HV, evidencia de la precipitación controlada de fases ricas en cobre y carburos en la matriz martensítica.

Resultados electroquímicos

En la siguiente sección se muestran los resultados de los ensayos electroquímicos realizados al acero inoxidable 17-4PH fabricado por LPBF, en diferentes condiciones térmicas. A través de las pruebas de potencial de circuito abierto (OCP), impedancia electroquímica (EIS) y polarización, se evaluó el comportamiento del material frente a la corrosión.

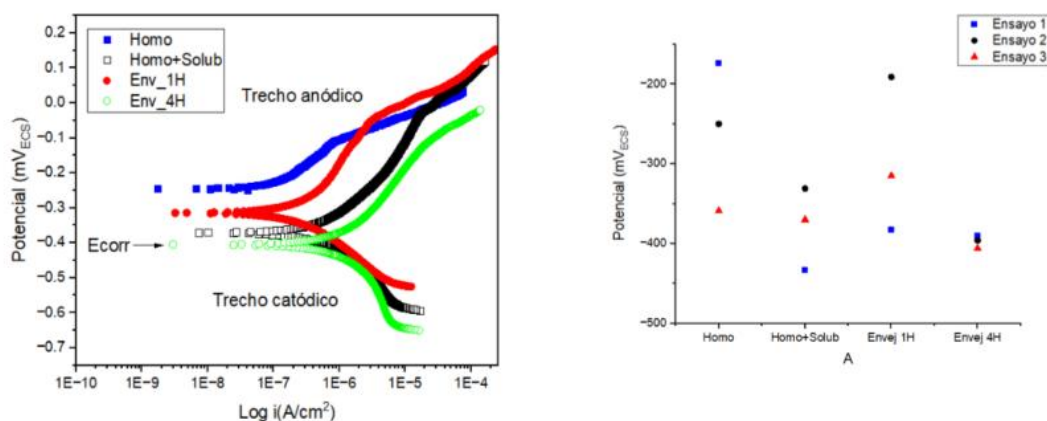


Figura 14. Resultados ensayos polarización potenciodinámica

En la Figura 14, la imagen izquierda presenta las curvas de polarización potenciodinámica para las diferentes condiciones del material (H, HS, HSE1h, HSE4h), donde se distinguen claramente los tramos catódico y anódico, así como el potencial de corrosión (E_{corr}). Las diferencias en el desplazamiento de las curvas y en la densidad de corriente evidencian el efecto de cada tratamiento sobre el comportamiento electroquímico del material. La muestra H muestra menores densidades de corriente y un E_{corr} con valor superior aproximadamente -0.28V Vs ECS, lo que indica mejor respuesta contra la corrosión en una solución salina (NaCl), mientras que la muestra HSE4h presenta las densidades de corriente más elevadas (Curva desplazada hacia la izquierda) y un potencial

más negativo -0.40V Vs ECS, asociándose con una menor resistencia a la corrosión. Las condiciones intermedias muestran un comportamiento progresivo entre estos dos extremos, reflejando cambios en la cinética de corrosión inducidos por los tratamientos aplicados.

La imagen derecha muestra los resultados de los potenciales de corrosión (E_{corr}) de todas las triplicata, donde se observa cierta dispersión de los materiales debido a la naturaleza estocástica. Esta variación se atribuye a pequeñas diferencias experimentales, como heterogeneidades locales del material, preparación superficial o ligeras fluctuaciones durante el ensayo. No obstante, los resultados presentan tendencias claras que permiten hacer comparaciones entre condiciones.

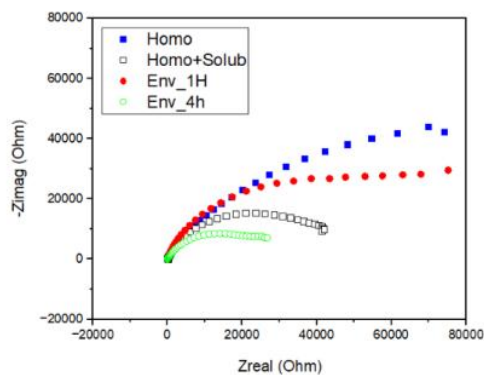


Figura 15. Resultados de impedancia electroquímica

Las curvas de impedancia electroquímica presentadas en la figura 15, se utilizaron para evaluar la resistencia a la corrosión en condiciones cercanas al equilibrio, analizando la resistencia a la transferencia de carga y la respuesta de la interfaz material-electrolito. En el diagrama de Nyquist, el diámetro de los arcos permite establecer la resistencia a la corrosión de cada muestra: los arcos de mayor tamaño corresponden a la muestra H y HSE1h. Mientras que los arcos con diámetros más pequeños corresponden a las muestras

HS y HSE4h indican menor resistencia a la transferencia de carga y subsecuentemente mayor susceptibilidad a la corrosión.

Estos resultados muestran una tendencia coherente con los ensayos electroquímicos previos, confirmando que los tratamientos térmicos influyen considerablemente en las reacciones electroquímicas entre material- electrolito.

Discusión

En este apartado se discuten las relaciones entre microestructura inducida por los diferentes tratamientos térmicos y el desempeño electroquímico y de dureza de los materiales. Este enfoque permite identificar la condición más favorable desde un punto técnico e industrial.

Relación de los resultados entre dureza y corrosión

En el siguiente gráfico se presenta una relación entre la dureza y los resultados electroquímicos de las muestras analizadas, con el fin de conectar los resultados del comportamiento mecánico y la respuesta frente a la corrosión de las diferentes muestras analizadas en el trabajo.

En la figura 16 se presentan los resultados de la resistencia contra corrosión (representados por los respectivos valores de E_{corr}) sobrepuestos a los resultados de dureza.

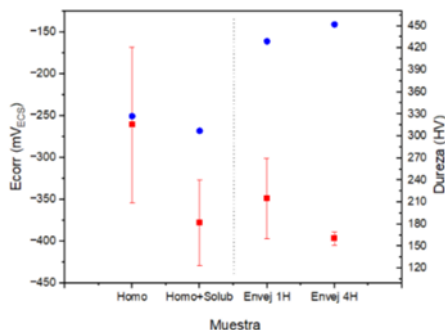


Figura 16. Relación entre dureza y potencial de corrosión

En el gráfico comparativo anterior, se muestra la relación entre el potencial de corrosión (E_{corr}) y la dureza de las muestras de acero inoxidable 17-4 PH por L-PBF bajo los diferentes tratamientos térmicos. Las muestras HSE1h y HSE4h, presentan las mayores durezas, especialmente la HSE1h, que supera los 430 HV, indicando una mayor precipitación de fases endurecedoras. Sin embargo, esta ganancia en dureza se acompaña de una disminución en la resistencia a la corrosión, evidenciada por valores de E_{corr} más negativos. Por el contrario, la muestra H muestra un mejor comportamiento frente a la corrosión (E_{corr} menos negativo) pero con menor dureza. Esto evidencia una clara relación inversa entre dureza y resistencia a la corrosión, influenciada por el tipo y tiempo de tratamiento térmico aplicado.

Los resultados obtenidos evidencian una clara correlación entre la microestructura resultante de los tratamientos térmicos aplicados al acero inoxidable 17-4 PH fabricado mediante manufactura aditiva (LPBF) y su comportamiento frente a la corrosión. Notese que al involucrar tratamientos de envejecimiento el material aumenta su dureza pero disminuye su resistencia contra la corrosión.

Esto se debe a que, antes de los tratamientos de envejecimiento, es decir, en las condiciones H y HS, la mayoría de los elementos se encuentran en solución sólida. Esto de acuerdo con (Zhao, Cong, Zhu, Liu, & Wang, 2021) que plantea que cuando los elementos están disueltos homogéneamente en la matriz, se minimizan las diferencias locales de potencial electroquímico y la formación de micro celdas galvánicas, lo que reduce la tendencia a la corrosión.

Por otro lado, en especímenes envejecidos se presentan microestructuras con precipitados que son los encargados de aumentar la dureza mediante el mecanismo de endurecimiento por precipitación, el cual actúa al impedir el movimiento de dislocaciones por mecanismos de corte de precipitados coherentes en etapas más avanzadas del envejecimiento (Callister & Rethwisch,, 2020; Sandström, 2024) Sin embargo, estos precipitados pueden provocar simultáneamente un deterioro del comportamiento frente a la corrosión, debido a la activación del mecanismo de corrosión microgalvánica, en el cual los precipitados y la matriz actúan como pares electroquímicos con distinto potencial, favoreciendo la disolución preferencial de la fase menos noble y acelerando la corrosión localizada o intergranular.

Para el caso investigativo, el enfoque principal se centró en las muestras envejecidas, dado que estas corresponden a las condiciones empleadas industrialmente, mientras que las muestras homogeneizadas y solubilizadas se consideraron como complemento para entender la evolución del material. Si bien las dos condiciones envejecidas presentan cierta dispersión en los valores de dureza, ambas se mantienen dentro de un rango similar 430HV Y 450HV aproximadamente . Por lo tanto, la muestra

envejecimiento por 4h presenta valores superiores de dureza que el envejecimiento de 1h, pero no son realmente significativos para la muestra en servicio. Mientras que si comparamos los valores promedio de resistencia contra corrosion representados por Ecorr (-350mV para 1h y -400mV para 4h), vemos que si hay diferencia significativa de 50 mV que en electroquímica hace la diferencia.

Por tanto, la condición HSE1h es la alternativa más viable, combina buen comportamiento mecánico (dureza similar), resistencia contra corrosion superior y menores tiempos de tratamiento de envejecimiento lo que se traduce en un ahorro energético y económico significativo.

Conclusiones

Los resultados obtenidos permiten concluir que:

- los tratamientos térmicos de envejecimiento incrementan significativamente la dureza del acero inoxidable 17-4PH LPBF. las muestras envejecidas presentaron un aumento notable en los valores de dureza en comparación con las condiciones homogenizada, homogenizada + Solubilizada, alcanzando valores superiores a los 400HV, el comportamiento se debe a la precipitación controlada de las fases ricas en cobre dentro de la matriz martensítica.
- Los tratamientos térmicos influyen directamente en el comportamiento frente a la corrosión del acero 17-4 PH LPBF, modificando la estabilidad de la capa pasiva y la cinética de corrosión.
- La condición HSE1h presentó mejores desempeños electroquímicos, reflejados en menores densidades de corriente en los ensayos de polarización potenciodinámica y mayores resistencias a la transferencia de carga de acuerdo con los ensayos de impedancia electroquímica.
- La muestra HSE1h es la condición más viable para producción a gran escala. Esta condición presenta un equilibrio óptimo entre alta dureza y adecuada resistencia a la corrosión, así como el menor tiempo de tratamiento de envejecimiento (1 hora en vez de 4) implicando menor consumo energético y económico.

Referencias

- Ahuir-Torres, J. I., Liu, X., Chadwick, J., & Tecelli Öpöz, T. (2025). *An Electrochemical Study of the Corrosion Behaviour of the Polished Atomic Diffusion Additive Manufactured 17-4PH Stainless Steel Using Centrifugal Mass Finishing Method in Saltwater*.
- Bahnini, I., Rivette, M., Rechia, A., Siadat, A., & Elmesbahi, A. (2018). *Additive manufacturing technology: the status, applications, and prospects*. New York: International Journal of Advanced Manufacturing Technology.
- C, S., Lass, E., & Campbell, C. (2016). *Additive Manufacturing of 17–4 PH Stainless Steel: Post Processing Heat Treatment to Achieve Uniform Reproducible Microstructure*. New York : Springer.
- Callister, W. D., & Rethwisch,, D. (2020). *Materials science and engineering: An introduction*.
- Chang, J.-K., Yu Lee, C., Tzeng, Y.-C., Lin, H., Ger, M.-D., Kao, C.-H., . . . Jian, S.-Y. (n.d.). *Electropolishing of Additive Manufactured 17-4 PH Stainless*. ESG.
- Coelho, L. C., Paris , A., Hatsue Suegama , P., Andrade Centeno, D. M., Goldenstein, H., & Gomes de Melo , H. (2025). *A comparative investigation of the electrochemical behavior of as-printed 17-4 PH stainless steel produced by L-PBF and L-DED*. . Reino Unido: Elsevier.
- Fernández, S. G. (2022). *Impacto de las estrategias de proceso y postproceso en la calidad de piezas de acero inoxidable 17-4PH fabricadas mediante fusión selectiva por láser*. España: Universidad de León.
- Garcia-Cabezón, C., Castro-Sastre, M., Fernandez-Abia, A., Rodriguez-Mendez, M., & Martin-Pedrosa, F. (2022). *Microstructure–Hardness–Corrosion Performance of 17–4 Precipitation Hardening Stainless Steels Processed by Selective Laser Melting in Comparison with Commercial Alloy*. Springer .
- J.C., D.-G., Granda-Gutiérrez, E., Naeem, M., & Acevedo-Davila, J. (2018). *Tratamiento por plasma para mejorar la resistencia al desgaste y a la corrosión bajo tensión en ambiente amargo de un acero endurecible por precipitación*. La Habana, Cuba : Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura.
- Kochmański, P., & Nowacki, J. (2006). *Activated gas nitriding of 17-4 PH stainless steel. Surface & Coatings Technology*. Amsterdam: Elsevier .

- Michla, J. R., Nagarajan, R., Oluwarotimi Ismai, S., & Ramprabhu, T. (2025). *Corrosion behaviours of additively manufactured nitrided 17-4*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (SAGE).
- Pasebania, S., Ghayoora, M., Badweb, S., Irrinkic, H., & Atrec, S. (2018). *Effects of atomizing media and post processing on mechanical properties of 17-4 PH stainless steel manufactured via selective laser melting*. Paisés Bajos: Elsevier .
- Qingyu, G., Yanfei, S., Liangliang, Z., Nan, W., & Xiaowei, L. (2026). *Passivation and Pitting Corrosion Behavior of Laser Directed Energy Deposited 17-4PH Stainless Steel*. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection.
- Sabooni, S., Chabok, A., Feng, S., Blaauw, H., Pijper, T., Yang, H., & Pei, Y. (2021). *Laser powder bed fusion of 17-4 PH stainless steel: A comparative study on the effect of heat treatment on the microstructure evolution and mechanical properties*. Amsterdam : Elsevier.
- Sandström, R. (2024). *Precipitation hardening. En Basic modeling and theory of creep of metallic materials* . Springer.
- Terrazas, A. B. (2000). *Influencia de los tratamientos térmicos en la corrosión asistida por esfuerzo en los aceros inoxidables 17-4PH y 17-7PH* . Chihuahua, Mexico : Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. (CIMAV).
- Thiese, A., & Chastinet, V. (2021). *Seleção de parâmetros e processamento da liga 17-4 PH por L-PBF*. Brasil: Instituto SENAI de Inovação.
- Zhao, Y., Cong, y., Zhu, X., Liu, W., & Wang, D. (2021). *olid-solution effect on grain boundary character distribution and corrosion resistance of 304 stainless steel*. Russian Journal of Electrochemistry.