

Aplicación del Diseño Mecánico y Análisis por Elementos Finitos en la Evaluación de Fragilización por Hidrógeno en Metales. Caso de estudio: Desarrollo de un adaptador para ensayos de tracción en probetas huecas presurizadas con hidrógeno.

Application of Mechanical Design and Finite Element Analysis in the Evaluation of Hydrogen Embrittlement in Metals. Case study: Development of an adapter for tensile testing of hollow specimens pressurized with hydrogen.

DOI: <https://doi.org/10.82951/8bjq-qh89>

Luis Eduardo Santos García¹, Egon Delgado Ramírez²

¹*Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Magallanes, Chile,* ²*Departamento de Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile, egon.delgado@usm.cl (E.D.),*

Autor de correspondencia: egon.delgado@usm.cl

Recibido: 8 de diciembre de 2025.
Aprobado: 8 de diciembre de 2025.
Publicado: 25 de marzo de 2026.

Resumen

La fragilización por hidrógeno constituye uno de los mecanismos de degradación más complejos y críticos que afectan a los materiales metálicos empleados en aplicaciones industriales, energéticas y de transporte. La necesidad de evaluar experimentalmente este fenómeno ha impulsado el desarrollo de metodologías de ensayo mecánico en ambientes controlados de hidrógeno, las cuales suelen requerir equipamiento especializado de alto costo y limitada disponibilidad. En este contexto, el presente trabajo aborda el diseño, análisis y validación de un sistema adaptador desmontable que permite realizar ensayos de tracción en probetas huecas de metal presurizadas con hidrógeno, utilizando una máquina universal de ensayo convencional.

El desarrollo del sistema se llevó a cabo mediante una metodología integral que incluye análisis teórico, diseño asistido por computador, validación mediante análisis de elementos. Se seleccionó acero inoxidable ASTM 316 como material principal debido a su reconocida resistencia a la fragilización por hidrógeno y su uso extendido en aplicaciones de alta presión. Se describen las propuestas iniciales, iteraciones basadas en resultados de FEA (criterio de falla de von Mises), y la propuesta final optimizada. Los resultados obtenidos demuestran que el diseño propuesto cumple con los requisitos estructurales y funcionales necesarios para su aplicación experimental, constituyendo una alternativa viable y replicable para la evaluación de materiales metálicos en ambientes con hidrógeno.

Se proponen recomendaciones para futuros desarrollos, alineadas con normas como ASTM E8 y estudios de HE.

Palabras clave: Hidrógeno, Fragilización por hidrógeno, Ensayo de tracción, Diseño mecánico, Probetas huecas, Análisis de elementos finitos.

Abstract

Hydrogen embrittlement is one of the most complex and critical degradation mechanisms affecting metallic materials used in industrial, energy, and transport applications. The experimental evaluation of this phenomenon has driven the development of mechanical testing methodologies under controlled hydrogen environments, which usually require specialized and costly equipment. In this context, this work presents the design, analysis, and validation of a removable adapter system that enables tensile testing of hollow metal specimens pressurized with hydrogen using a conventional universal testing machine.

The system was developed through an integrated methodology including theoretical analysis, computer-aided design, finite element validation. ASTM 316 stainless steel was selected as the main construction material due to its recognized resistance to hydrogen embrittlement. Initial proposals, iterations based on FEA results (equivalent deformations and von Mises stresses), and the optimized final proposal are described. The results demonstrate that the proposed design meets the required structural and functional conditions for experimental application, providing a replicable solution for mechanical testing in hydrogen environments.

Recommendations for future developments are proposed, aligned with standards like ASTM E8 and HE studies.

Keywords: Hydrogen, Hydrogen embrittlement, Tensile testing, Mechanical design, Hollow specimens, Finite element analysis.

1. Introducción

El hidrógeno se ha posicionado como un vector energético clave en el contexto de la transición hacia sistemas más sostenibles y con menor impacto ambiental. Su potencial como combustible limpio ha impulsado el desarrollo de tecnologías asociadas a su producción, almacenamiento, transporte y utilización en diversos sectores industriales [1]. Sin embargo, la interacción del hidrógeno con materiales metálicos plantea importantes desafíos desde el punto de vista de la integridad estructural y la seguridad operacional.

Uno de los fenómenos más relevantes asociados a esta interacción es la fragilización por hidrógeno, la cual se manifiesta como una reducción significativa de la ductilidad, resistencia y tenacidad de los materiales. Este fenómeno puede provocar fallas frágiles inesperadas (ver Figura 1), incluso bajo niveles de carga inferiores a los diseñados originalmente (ver Figura 2), representando un riesgo crítico en componentes sometidos a esfuerzos mecánicos en ambientes ricos en hidrógeno.

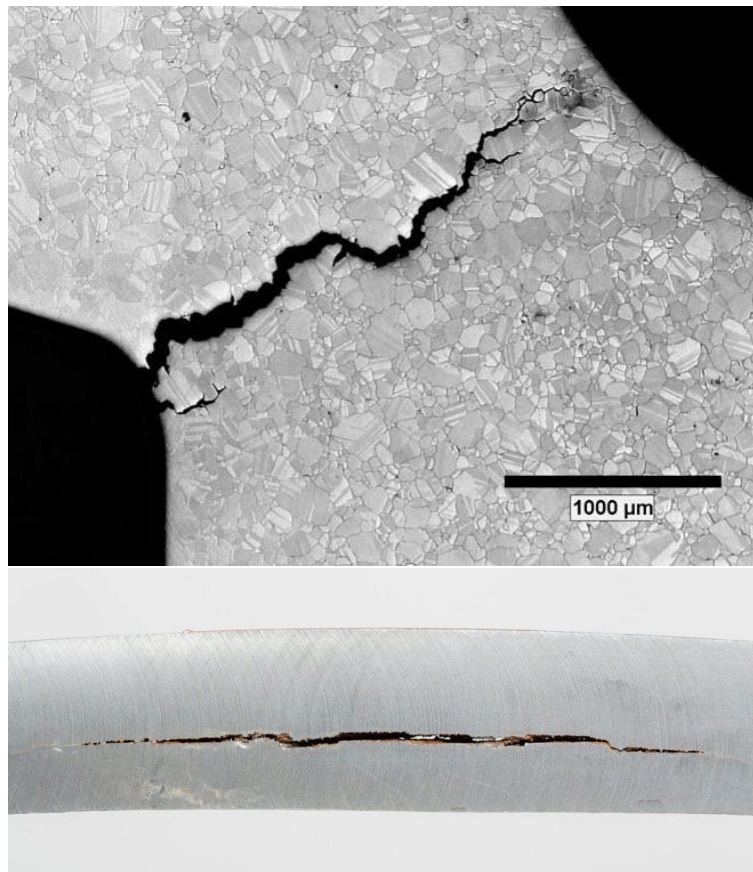


Figura 1.- Imagen superior muestra una fractura intergranular en una aleación de Inconel provocada por la exposición a un ambiente con hidrógeno. La imagen inferior muestra la sección de un ducto que sufrió fragilización y crecimiento de fisura inducida por el hidrógeno.
Extraído de [2]

La caracterización experimental del comportamiento mecánico de los materiales bajo la influencia del hidrógeno es, por tanto, un aspecto fundamental para el desarrollo de soluciones ingenieriles seguras y confiables. No obstante, los ensayos mecánicos en ambientes presurizados de hidrógeno requieren equipamiento especializado, como autoclaves o cámaras selladas integradas a máquinas de ensayo, cuyo costo y complejidad limitan su disponibilidad en laboratorios académicos e industriales (ver Figura 3).

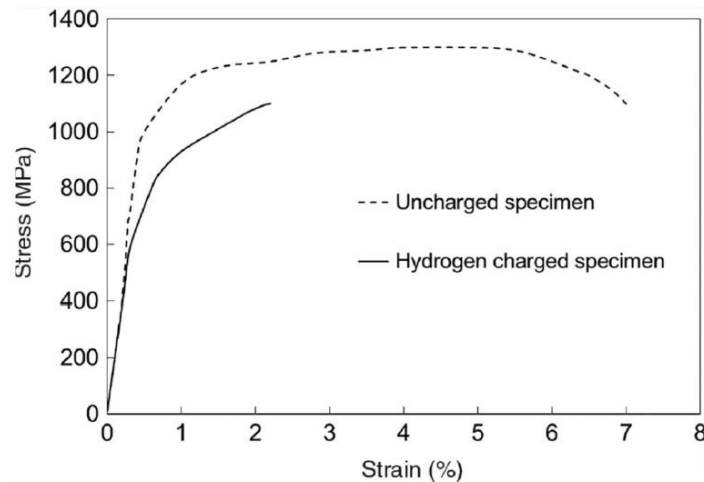


Figura 2.- Curvas tensión-deformación para un mismo material en dos muestras; cargada con hidrógeno comparada con una que no contiene carga de hidrógeno. Extraído de [3]

En este escenario, el desarrollo de sistemas adaptadores que permitan utilizar máquinas de ensayo convencionales para la realización de pruebas en ambientes controlados de hidrógeno surge como una alternativa técnica y económicamente atractiva. El presente trabajo se enfoca en el diseño y validación de un adaptador desmontable que posibilita la realización de ensayos de tracción en probetas huecas presurizadas con hidrógeno, manteniendo condiciones adecuadas de seguridad, repetibilidad y confiabilidad experimental.



Figura 3.- Autoclaves para realizar ensayos bajo presión de hidrógeno. Extraído de [4]

2. Marco teórico

La fragilización por hidrógeno es un fenómeno multifactorial que involucra mecanismos físico-químicos complejos, tales como la difusión del hidrógeno atómico en la red cristalina, la interacción con defectos microestructurales y la reducción de la energía de cohesión interatómica [5]. Diversos modelos han sido propuestos para explicar este comportamiento, incluyendo el mecanismo de decohesión inducida por hidrógeno (HEDE), la plasticidad localizada mejorada por hidrógeno (HELP) y modelos híbridos que combinan ambos enfoques [6].

Desde el punto de vista experimental, la evaluación de la fragilización por hidrógeno se ha abordado mediante diferentes técnicas de ensayo mecánico, entre las que destacan los ensayos de tracción lenta, ensayos de fatiga, ensayos de crecimiento de grieta y ensayos de tenacidad a la fractura, dentro de las cuales se encuentran las normas ASTM-F519, ASTM-F1624, ASTM-E1681 [7,8,9]. La selección de la metodología depende del objetivo del estudio, el tipo de material y las condiciones de servicio que se desean simular.

En particular, los ensayos de tracción en probetas huecas presurizadas permiten introducir hidrógeno directamente en el interior del material durante la aplicación de la carga mecánica (ver Figura 4), reproduciendo de forma más realista las condiciones operacionales de componentes sometidos a presión interna.

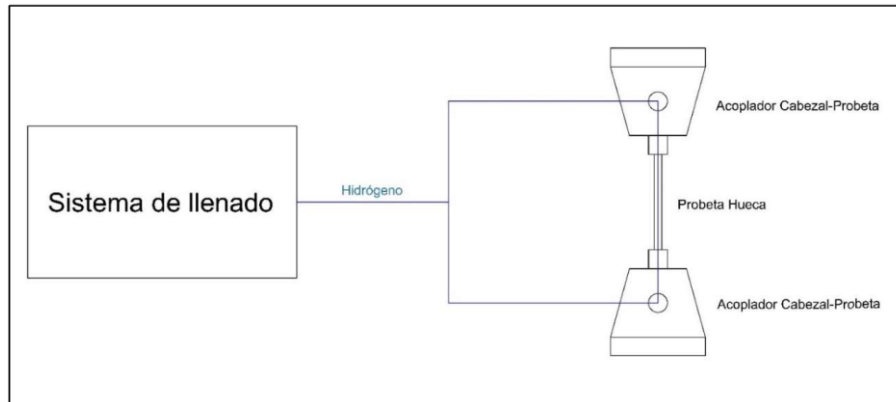


Figura 4.- Esquema del sistema para ensayos con probetas huecas sometidas a hidrógeno presurizado.

3. Metodología de diseño y validación

La metodología adoptada para el desarrollo del sistema adaptador se estructuró en tres etapas principales: definición de requerimientos, diseño geométrico, validación numérica a partir del criterio de fallas de Von-Mises.

En la primera etapa se establecieron los requerimientos funcionales del sistema, considerando la capacidad de carga axial (100kN), el rango de presión interna de hidrógeno (presión de botellas comerciales 200Bar), la compatibilidad geométrica con la máquina de ensayo existente y los criterios de seguridad asociados a la manipulación de gas a alta presión.

Posteriormente, se desarrolló el diseño geométrico de los componentes mediante software CAD (fig. 5-8), prestando especial atención a las zonas de sellado, transición geométrica y fijación de la probeta. Se seleccionó acero inoxidable ASTM 316 como material base (propiedades en Tabla 1), considerando su comportamiento frente a la fragilización por hidrógeno [10] y su disponibilidad comercial.

Tabla 1.- Propiedades mecánicas del acero inoxidable ASTM 316

Límite de fluencia (σ_{ys} MPa)	Resistencia a la tracción (σ_{UTS} MPa)
290	580

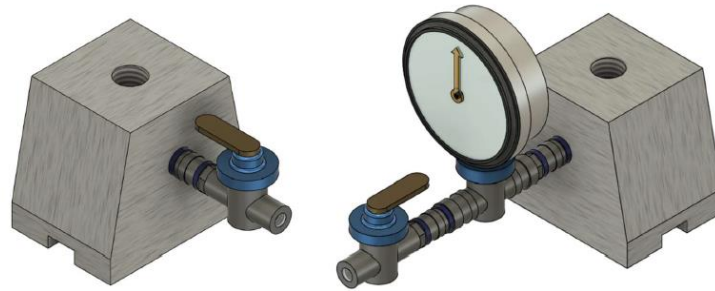


Figura 5.- Diseño de adaptadores para máquina de tracción universal.



Figura 6.- Conjunto de adaptadores y mordazas de máquina de tracción universal.



Figura 7.-Conexiones necesarias para cargar el sistema con hidrógeno.

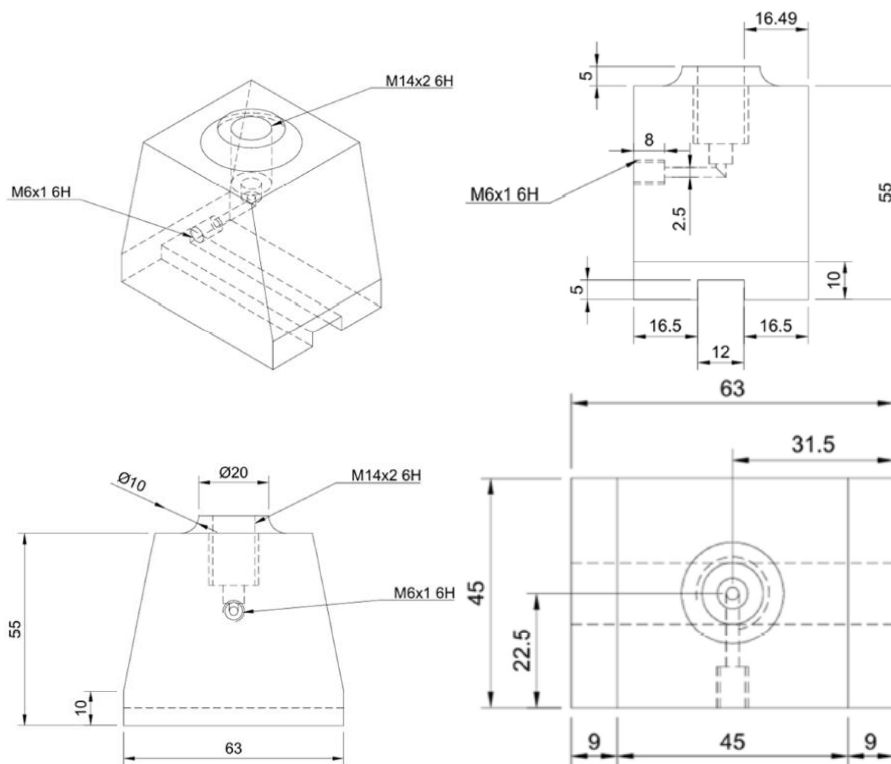


Figura 8.- Dimensiones del adaptador acoplador de probeta y mordazas de la máquina.

4. Análisis de elementos finitos

La validación estructural del diseño se realizó mediante análisis de elementos finitos, evaluando el comportamiento del sistema bajo condiciones críticas de carga axial. Se aplicaron condiciones de borde representativas del ensayo real, considerando restricciones en las zonas de contacto con la máquina de tracción y cargas distribuidas sobre la probeta, ver Figura 9.

Los resultados obtenidos permitieron identificar las zonas de mayor concentración de tensiones, principalmente en las regiones de transición geométrica entre el acoplador y la probeta. A partir de estos resultados, se implementaron ajustes geométricos orientados a reducir concentraciones de esfuerzo y mejorar el factor de seguridad del sistema.

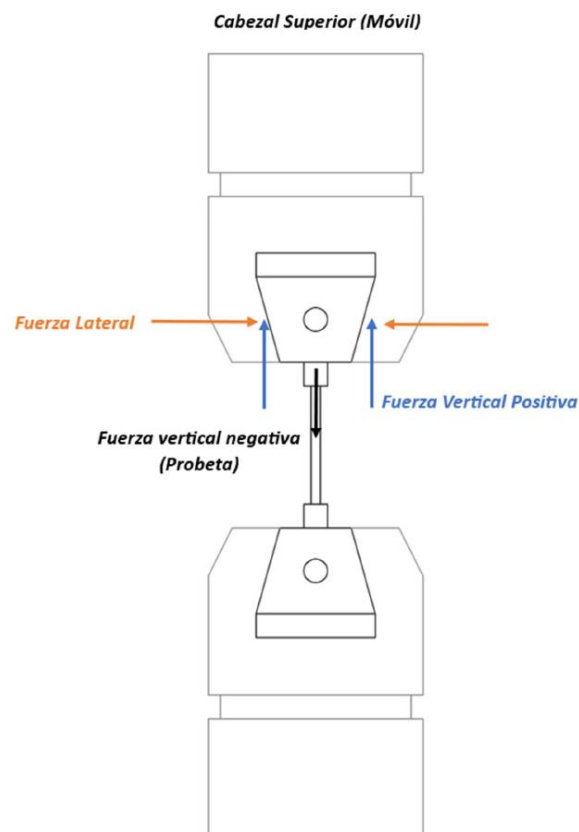


Figura 9.- Estudio de las condiciones de contorno del sistema de adaptador/probeta/mordaza (cabezal).

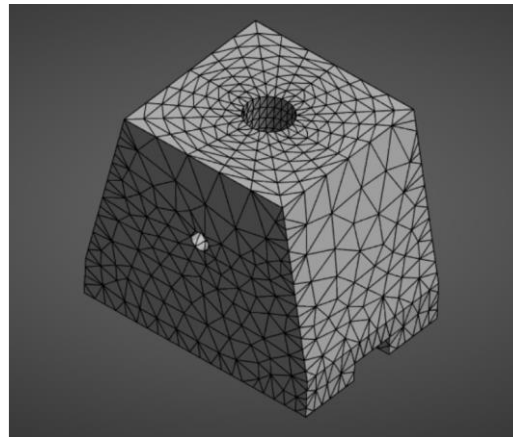


Figura 10.- Generación de mallado tetraédrico con tamaño mínimo de los elementos de 3mm, en configuración auto-adaptativos.

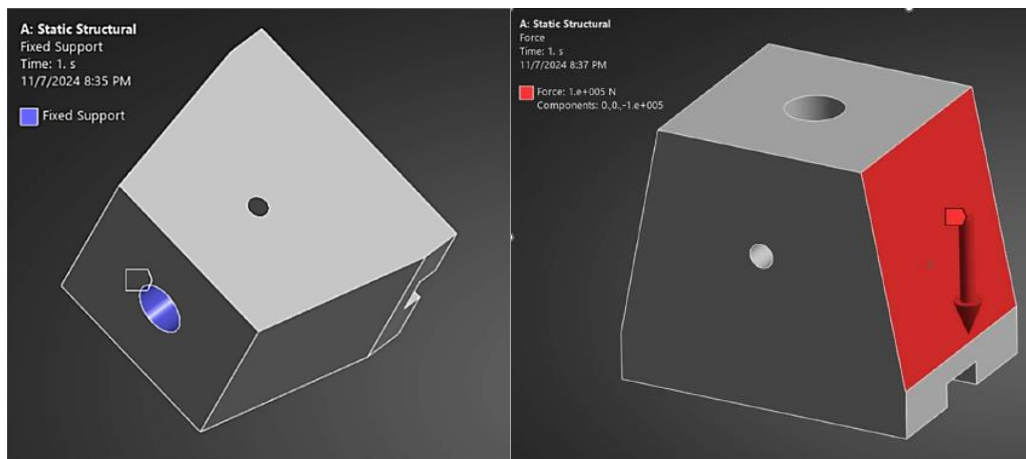


Figura 11.- Condiciones de contorno aplicadas al adaptador.

5. Resultados y discusión

El primer análisis se realizó sobre la pieza estructural correspondiente al soporte del adaptador, considerando la misma geometría de un componente existente (ver figura 12), el cual no fue originalmente diseñado para la función específica que se le asigna en el presente estudio. Los resultados obtenidos a partir del diseño original evidencian concentraciones de tensiones localizadas en los bordes vivos de la perforación central destinada al alojamiento de la probeta, alcanzando valores del orden de 372 MPa. Dichos niveles de tensión superan el límite de fluencia del material, lo que resulta inaceptable desde el punto de vista del diseño estructural.

No obstante, es importante señalar que estas concentraciones de tensiones están asociadas principalmente a características geométricas del diseño original, tales como aristas vivas, así como a posibles efectos numéricos derivados del mallado empleado en el análisis por elementos finitos. En este tipo de análisis es conocido que pueden aparecer concentraciones puntuales que no se manifiestan de manera equivalente en condiciones reales de servicio.

Por otra parte, el resto del componente no presenta niveles de esfuerzo elevados, observándose tensiones comprendidas entre 40 y 123 MPa, valores significativamente inferiores al límite de fluencia del acero utilizado. En contraste, los resultados correspondientes al diseño final optimizado muestran un comportamiento mecánico considerablemente más conservador (ver figura 12), logrando reducir de forma significativa las concentraciones puntuales de tensiones.

De este modo, el componente final cumple con los requerimientos estructurales y de seguridad establecidos para su aplicación en el dispositivo propuesto.

Desde un punto de vista ingenieril, el diseño propuesto permitiría reproducir condiciones de ensayo representativas de componentes sometidos a presión interna de hidrógeno, aportando una herramienta experimental de alto valor para el estudio de la fragilización por hidrógeno.

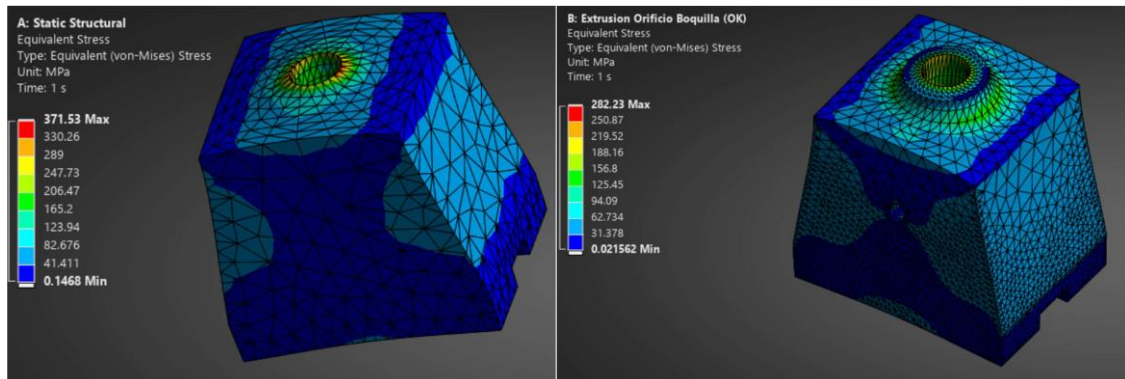


Figura 12.- Comparación de configuraciones de diseño antes y después de la optimización. (izquierda antes, derecha optimizada)

6. Conclusiones

Se desarrolló un sistema adaptador desmontable que permite realizar ensayos de tracción en probetas huecas de metal presurizadas con hidrógeno, utilizando una máquina de ensayo convencional.

El adaptador diseñado y validado por FEA ofrece una solución económica y segura para estudiar HE en condiciones realistas, contribuyendo al desarrollo de materiales para infraestructura de hidrógeno.

El diseño fue validado mediante análisis de elementos finitos bajo el criterio de falla de von-Mises, demostrando un comportamiento estructural adecuado bajo condiciones críticas de carga.

La metodología propuesta constituye una guía replicable para el desarrollo de adaptaciones similares, ampliando las capacidades experimentales para el estudio de materiales en ambientes con hidrógeno.

7. Recomendaciones para futuros desarrollos

Para futuros desarrollos del dispositivo, se recomienda optimizar el diseño geométrico del adaptador con el fin de minimizar concentraciones de tensiones, incorporando radios de transición acordes a criterios de diseño mecánico y a las tolerancias establecidas en normas como ASTM E8/E8M. Asimismo, se sugiere evaluar alternativas de sellado y materiales compatibles con hidrógeno para ampliar el rango operativo de presión y mejorar la seguridad del sistema. Finalmente, la incorporación de instrumentación adicional permitiría un control más preciso de las condiciones de ensayo, fortaleciendo la confiabilidad y repetibilidad del dispositivo en estudios de fragilización por hidrógeno.

8. Referencias

- [1] Li, H., Wang, K., Sun, Y., Lollar, C. T., Li, J., & Zhou, H. (2017). Recent advances in gas storage and separation using metal–organic frameworks. *Materials Today*, 21(2), 108-121. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.006>
- [2] WHA International, Inc. (2024, 6 marzo). Hydrogen Embrittlement: Hazards and Mitigation Strategies. <https://wha-international.com/hydrogen-embrittlement-hazards-and-mitigation-strategies/>.
- [3] Arya, A.K., Gautam, S., Yadav, S. (2022). Impact of Hydrogen Embrittlement in Pipeline Structures—A Critical Review. In: Mukherjee, K., Layek, R.K., De, D. (eds) Tailored Functional Materials. Springer Proceedings in Materials, vol 15. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2572-6_31
- [4] ZwickRoell. (s.f.). *Autoclaves: Ensayos con hidrógeno presurizado*. Autoclaves: Ensayos Con Hidrógeno Presurizado. <https://www.zwickroell.com/es/sectores/energia/autoclave-ensayos-con-hidrogeno-presurizado/>
- [5] Kong, X., Jiang, H., Lv, Y., Xie, W., Lu, S., & Xu, D. (2025). Research Progress on the Hydrogen Embrittlement Resistance Performance of High-Entropy Alloys. *Materials*, 18(12), 2862. <https://doi.org/10.3390/ma18122862>.
- [6] Chen, Y., Huang, C., Liu, P., Yen, H., Niu, R., Burr, P., Moore, K. L., Martínez-Pañeda, E., Atrens, A., & Cairney, J. M. (2024). Hydrogen trapping and embrittlement in metals – A review. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 136, 789-821. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.04.076>
- [7] ASTM International. (2018). ASTM F519-18: Standard test method for mechanical hydrogen embrittlement evaluation of plating/coating processes and service environments. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/F0519-18>
- [8] ASTM International. (2020). ASTM F1624: Standard test method for measurement of hydrogen embrittlement threshold in steel by the incremental step loading technique. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/F1624-20>
- [9] ASTM International. (2020). ASTM E1681: Standard test method for determining threshold stress intensity factor for environmentally assisted cracking of metallic materials. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E1681-20>
- [10] San Marchi, C., & Somerday, B. P. (2014). Comparison of stainless steels for high-pressure hydrogen service. *Volume 6B: Materials and Fabrication*.

Declaración ética

Conflicto de Interés: Nada que declarar. **Financiamiento:** Nada que declarar. **Revisión por Pares:** Doble ciego.



Todo el contenido de la RIMCEO — Revista de Activos de Ingeniería en Mantenimiento, Confiabilidad y Excelencia Operacional, está licenciada bajo Creative Commons, a menos que se especifique lo contrario o se trate de contenido recuperado de otras fuentes bibliográficas.