

Diseño conceptual de un laboratorio para ensayos de metales en contacto con hidrógeno aplicado
a la industria metalúrgica

Tania Gisela Galeano Flórez

Trabajo de grado para optar al Título en Ingeniería Metalúrgica

Director

Darío Yesid Peña Ballesteros

Dr. en Corrosión

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A mis queridos padres, Maritza Flórez y Reinaldo Galeano Peña, por todos sus esfuerzos, su apoyo y confianza puestos en mí durante este proceso, siempre estaré muy agradecida, siendo este logro por y para ellos.

A mi mejor amiga Eryka por estar presente e impulsarme a cumplir mis metas.

A mis amigos de la carrera, Isa, Fiallo y especialmente al Diego, personas que seguirán siendo grandes amigos, los cuales me brindaron su ayuda, compañía y gran apoyo durante este camino.

A Dwan por su apoyo emocional en los últimos semestres.

A la niña del 2016 que inicio sus estudios en la Uis, llena de inseguridades y con muchas ganas de cumplir sus sueños.

Agradecimientos

A mi respetada y amada Universidad Industrial de Santander por abrirme las puertas a la educación superior, por permitirme formar como profesional en esta tan importante institución.

Al profe Darío Yesid Peña Ballesteros por su confianza para la realización de este proyecto investigativo.

A todos los docentes y técnicos de la escuela de ingeniería metalúrgica, por brindarme y compartir sus valiosos conocimientos, contribuyendo a mi desarrollo como profesional.

A Paty nuestra querida secretaria, por su apoyo en la parte administrativa y sus lindos consejos, contribuyendo a mi crecimiento personal.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Fundamentación teórica	14
1.1 Diseño conceptual	14
1.2 El Hidrógeno	14
1.3 El acero y sus tipos	15
1.4 La electroquímica.....	16
1.5 Electroquímica del hidrógeno con el acero.....	16
1.6 Formas de permeación de hidrógeno en acero.....	17
1.6.1 Permeación por difusión y permeabilidad Intersticial	18
1.6.2 Solubilidad	18
1.6.3 Trampas de Hidrógeno.....	18
1.7 Efecto del hidrógeno en las propiedades mecánicas de los aceros.	19
1.8 Fenómenos asociados a daños estructurales en el acero en contacto con hidrógeno.....	20
1.8.1 Fragilización por hidrógeno (FPH).....	20
1.9 Ataque por Hidrógeno (APH).....	21
1.10 Agrietamiento de acero inducido por hidrógeno (AIH).....	21
1.11 Cinética de Corrosión	22
1.12 Métodos electroquímicos para el estudio de aceros en contacto con hidrógeno	23
2. Objetivos	24
2.1 Objetivo general.....	24

2.2 Objetivos específicos	24
3. Metodología	25
4. Resultados	26
4.1 Parámetros conceptuales de diseño de un laboratorio de ensayos electroquímicos para estudiar las propiedades de aceros usados en la industria hidrocarburo o ambientes ricos en hidrógeno	26
4.1.1 Estación básica de ensayos electroquímicos.....	28
4.1.2 Métodos Propuestos: Ensayos electroquímicos	30
4.1.2.1 Método SSRT con cámara de carga de hidrógeno in-situ.....	31
4.1.2.2 Espectroscopia de impedancia electroquímicas.....	35
4.1.2.3 Ruido electroquímico.....	36
4.1.2.4 Índice de Localizado (IL).....	37
4.1.2.5 Resistencia al Ruido (Rn).	37
4.1.2.6 cálculo de la velocidad de corrosión.....	38
4.1.2.7 Análisis superficial por microscopio electrónico de barrido (MEB).....	38
4.1.2.8 Técnica de Devathan-Stachurki: Método de permeación electroquímica de hidrógeno. ..	40
4.1.2.9 Ensayos de CTOD en probetas cargadas con hidrógeno.	44
4.1.2.10 Otras pruebas electroquímicas que se pueden hacer en la cámara atmosférica SSRT y configuración básica (Bipotenciostato, celda H, electrodos y accesorios y ordenador).....	47
4.2 Estudio del efecto de la corrosión en aceros industriales en diferentes Atmosferas y condiciones	48
4.2.1 Estudio del efecto del espesor de la tubería en procesos de permeación de hidrógeno (Técnica de Devathan)	49

4.2.2 Estudio de la carga de hidrógeno gaseoso a diferentes presiones (Pruebas SSRT).....	50
4.2.3 Estudio de la influencia de las concentraciones de hidrógeno en las propiedades mecánicas del acero (Pruebas SSRT)	51
4.2.4 Estudio de la mecánica de los aceros expuestos a soluciones con diferente concentración de inhibidor de corrosión (Pruebas SSRT)	53
4.3 Propuesta de requerimientos mínimos para el laboratorio que contemplen aspectos de eficiencia energética, economía y medio ambiental para el manejo de materiales por contacto con hidrógeno.....	55
4.3.1 Espacio y distribución de equipos.....	55
4.3.2 Análisis de Costos de equipos	59
4.3.3 Disposición de residuos y manejo medioambiental de la instalación.....	61
5. Conclusiones	63
6. Recomendaciones	65
Referencias Bibliográficas	66

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. APU equipos básicos laboratorio de pruebas electroquímica.....	59
Tabla 2. APU Prueba SSRT con carga Electroquímica in Situ	60
Tabla 3. APU de equipos y materiales para prueba de permeación de hidrógeno.....	60
Tabla 4. APU Permeación de Hidrógeno.....	60
Tabla 5. Precio total de los equipos contemplados para el montaje del laboratorio	61

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Reacciones que ocurren en la difusión de H en una red metálica	17
Figura 2. Efecto del hidrógeno en las propiedades mecánicas del acero	19
Figura 3. Condiciones que afectan en el proceso de fragilización por hidrógeno	21
Figura 4. Factores determinantes para que suceda el agrietamiento a temperatura ambiente	22
Figura 5. Bipotenciostato, galvanostato/EIS Metrohm dropsens.....	29
Figura 6. Electrodo, cableado y accesorios para pruebas electroquímicas	29
Figura 7. a) Representación esquemática de la prueba electroquímica	30
Figura 8. Estación para pruebas de ensayo SSRT y celda atmosférica de hidrógeno para soluciones líquidas	33
Figura 9. Recomendación de extracción, para probeta de ensayo de SSRT	34
Figura 10. Probetas para pruebas de SSRT según la norma ASTM F1624	34
Figura 11. Arreglo para prueba de espectroscopia de impedancia electroquímicas	36
Figura 12. Arreglo para prueba de ruido electroquímico.....	37
Figura 13. Reducción de área en de la fractura en las probetas	39
Figura 14. Análisis microscópico (MEB) de la morfología de fractura central para una probeta .	39
Figura 15. Representación del proceso de difusión de hidrógeno a través de una placa metálica	41
Figura 16. Esquema de la configuración del método de permeación por hidrógeno según norma ASTM G148.....	41
Figura 17. Celdas H y Accesorios.....	42
Figura 18. Probeta para ensayo de permeación de hidrógeno	43

Figura 19. Configuración para ensayo electroquímico de permeación de hidrógeno.....	44
Figura 20. Equipo para ensayos CTOD INSTRON modelo 8801 cap. Max. 100kN	45
Figura 21. Dimensiones y características para la muestra usada en el ensayo CTDO	45
Figura 22. Probeta metálica para ensayos CTOD.....	46
Figura 23. Esquema para carga de hidrógeno de las probetas de ensayo de CTOD.....	47
Figura 24. Resultados de curvas de permeación para tres diferentes valores de espesor de placa	49
Figura 25. Curvas de permeación de hidrógeno bajo diferentes presiones de hidrógeno.....	50
Figura 26. Curvas de tensión-deformación para un acero en mezclas gaseosas con concentraciones diferentes de hidrógeno	51
Figura 27. Morfología de fractura completa del acero	52
Figura 28. Curvas esfuerzo-deformación obtenidas de la prueba SSRT para el acero con diferentes concentraciones de inhibidor.....	54
Figura 29. Ejemplo de Velocidad de corrosión para un acero obtenida del monitoreo de la prueba SSRT con diferentes concentraciones de inhibidor	54
Figura 30. Propuesta de distribución de equipos para pruebas electroquímicas.....	58

Glosario

Bipotenciostato: dispositivo diseñado para emplear dos electrodos de trabajo, el cual controla el potencial eléctrico permitiendo estudiar redacciones redox.

Corrosión: consiste en la degradación de algunos materiales por consecuencia de reacciones electroquímicas, siendo un proceso espontaneo.

Electroquímica: es una rama de la fisicoquímica que define la correlación entre las reacciones químicas y la corriente eléctrica.

Hidrogeno: es el elemento químico más ligero de todos, siendo el más abundante también, usado como combustible.

Permeación: es la difusión de un gas o vapor a través de una película semipermeable, pasando de una zona de alta concentración a baja concentración.

Resumen

Título: Diseño conceptual de un laboratorio para ensayos de metales en contacto con hidrógeno aplicado a la industria metalúrgica *

Autor: Tania Gisela Galeano Flórez **

Palabras clave: Permeación, bipotenciostato, electroquímica, corrosión, hidrógeno.

Descripción:

El Hidrogeno resulta ser uno de los principales causantes de la corrosión en metales, ocasionando grandes fallas a nivel industrial, ya que, este genera el deterioro de las propiedades mecánicas de los materiales. En este proyecto se realiza el diseño conceptual de un laboratorio para ensayos electroquímicos de metales en contacto con el Hidrogeno; en el cual se genera una propuesta de distribución de equipos para el desarrollo de los métodos electroquímicos más comunes usados en la industria para calcular las tasas de corrosión, los cuales son SSRT con Carga electroquímica INSITU de hidrógeno, Espectroscopia de impedancia Electroquímica (SSRT y Celdas H), Ruido Electroquímico (SSRT y Celdas H), Resistencia al Ruido (Rn), Índice de Localizado (IL), Técnica de Devathan-Stachurki: Método de permeación electroquímica de hidrógeno, Ensayos de CTOD en probetas cargadas con hidrógeno el cual tendrá un tamaño aproximado de 5m x 4m el cual cuenta con dos mesones largos en forma paralela, el área ocupada por los equipos de ensayo SSRT y CTDO, la zona de administración de datos, el bipotenciostato, zona de pruebas con celdas H y otros arreglos electroquímicos con celdas y el microscopio, en el mesón más grande estará ubicado la zona de carga química de las muestras, gabinete de almacenamiento de productos químicos, zona de almacenamiento de herramientas y equipos y área de lavado.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingeniería Físicoquímicas, Ingeniería Metalúrgica. Director: Dr Darío Yesid Peña Ballesteros

Abstract

Title: Conceptual design of a laboratory for metal testing in contact with hydrogen applied to the metallurgical industry*.

Author: Tania Gisela Galeano Flórez**

Key Words: Permeation, bipotentiostat, electrochemistry, corrosion, hydrogen.

Description:

Hydrogen is one of the main causes of corrosion in metals, leading to major industrial failures, as it causes deterioration of the materials' mechanical properties. This project presents the conceptual design of a laboratory for electrochemical testing of metals in contact with hydrogen. In which a proposal is generated for the distribution of equipment for the development of the most common electrochemical methods used in the industry to calculate corrosion rates, which are SSRT with INSITU electrochemical hydrogen charging, Electrochemical Impedance Spectroscopy (SSRT and H Cells), Electrochemical Noise (SSRT and H Cells), Noise Resistance (R_n), Localized Index (IL), Devathan-Stachurki Technique: Electrochemical hydrogen permeation method, CTOD tests on hydrogen-charged probes which will have an approximate size of 5m x 4m which has two long tables in parallel, the area occupied by the SSRT and CTDO test equipment, the data management area, the bipotentiostat, test area with H cells and other electrochemical arrangements with cells and the microscope, the largest table will be located the chemical loading area of the samples, chemical storage cabinet, tools and equipment storage area and washing area.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingeniería Físicoquímicas, Ingeniería Metalúrgica. Director: Dr Darío Yesid Peña Ballesteros

Introducción

La corrosión es un ataque destructivo a un material metálico debido a las reacciones químicas y electroquímicas que se generan al material debido al ambiente al que está expuesto, por lo que los elementos que lo conforman intentaran volver a formar compuestos originales o similares, buscando menores estados de potencial energético. Los factores que ocasionan este fenómeno son diversos y en busca de mitigarlos se requiere analizar sus causas, en esta ocasión se evalúa al Hidrógeno como uno de los causantes principales, y es que este elemento es responsable de diversas fallas en los metales a nivel industrial, con lo que puede inducir a fragilización y la fisuración en el caso de los aceros, afectando peligrosamente las propiedades mecánicas del material.

Como ejemplo, en la industria del transporte y almacenamiento de hidrocarburos se presenta el Agrietamiento Inducido por Hidrógeno (AIH), el cual responde a uno de los problemas de deterioro asociados a la generación de hidrógeno por la interacción entre el metal y el medio. Este mecanismo de daño fundamentalmente consiste en la difusión del hidrógeno atómico a través de la red metálica y la acumulación de hidrógeno molecular en defectos internos, originando el aumento de la presión interna en la intercara defecto-matriz, propiciando la nucleación y propagación de una grieta; la cual puede derivar en la falla del componente y corrosión del metal.

Por lo tanto, resulta importante diseñar un laboratorio en el cual se puedan realizar ensayos de fragilización y deterioro de los metales en contacto con el Hidrógeno, por medio de un diseño conceptual. Debido a que su constante investigación y trabajo permitirá mantener un control de los procesos corrosivos de los metales, que se encuentran en contacto con este elemento en diferentes

atmosferas, por lo que se puede obtener información útil tanto académicamente como para la industria metalúrgica.

1. Fundamentación teórica

1.1 Diseño conceptual

El diseño conceptual conlleva una gran relevancia en el resultado del desarrollo de un producto, cuyo impacto define el coste y su fiabilidad. La conceptualización se basa en el resultado de la definición de dicho producto, guiada por unos requisitos y especificaciones, lo que consiste en generar una serie de soluciones y alternativas, buscando identificar la más adecuada (Horváth, 2005).

1.2 El Hidrógeno

El hidrógeno (H) es el elemento químico más ligero y pequeño, y consta de un protón y un electrón. Por su sencillez, es lo más importante del universo, mucho más grande que las estrellas y los planetas. En condiciones normales, el hidrógeno existe como la molécula de gas diatómica H_2 . Es un gas muy ligero con una densidad de solo $0,09 \text{ kg/m}^3$ y no se puede almacenar en un volumen adecuado. En resumen, alta energía y baja energía. Asimismo, su compresión,

endulzamiento o conversión a otros aceites requiere energía adicional, por lo que se debe considerar la eficiencia energética (Morante, et al., 2020).

1.3 El acero y sus tipos

El acero es una aleación, una combinación de hierro y carbono, con el hierro como elemento principal. Generalmente, el contenido de carbono es del 0,05% al 2%, y en ocasiones se añaden elementos como el níquel y el cromo. Este metal se puede dividir en tres categorías según su composición química: acero aleado, acero no aleado y acero inoxidable (Padilla, 1999).

Los aceros aleados se refieren a aleaciones que combinan otros elementos además del hierro y el carbono para obtener diferentes propiedades. Este grupo se puede dividir en metal alto (que contiene 5% de otros aditivos) y en aceros de baja aleación (que contiene menos de 5% de otros aditivos).

El no aleado contiene hierro y carbono, aunque a veces en combinación con otros elementos, pero en cantidades muy pequeñas. Dentro de este grupo se pueden formar tres grupos diferentes según sus carbonos. Los tres tipos son bajos en carbono (menos del 0,25 % de carbono), de medio carbono (de 0,25 % hasta 0,55 % aproximadamente de carbono) y alto en carbono, con un porcentaje de este superior a 0,55%) (Rodríguez, C., et al, 2012).

El acero inoxidable contiene aleaciones de elementos que le dan sus propiedades inoxidables, el Cromo principalmente, con un contenido de este de por lo menos un 10,5 % y un 1,2 % de carbono, otros elementos principales también son el Níquel y el Molibdeno.

La composición química del acero es fundamental, ya que, está íntimamente asociada a la velocidad de corrosión, es decir, existe un metal específico y tipo de acero según el ambiente al

que va a ser sometido, por esta razón es fundamental estudiar el comportamiento de diferentes tipos de aceros sometidos a condiciones controladas, de esta manera se puede determinar el comportamiento de cada uno frente a la interacción de este en un ambiente rico en hidrógeno específico (García, 2014).

1.4 La electroquímica

La electroquímica es una materia que estudia la conversión entre energía eléctrica y energía química, y se refiere a las reacciones químicas que ocurren en forma de electrones e iones. Aquí, el intercambio de electrones tiene lugar en una reacción redox (oxidación/reducción) llamada donde el agente reductor es el donante de electrones y el agente oxidante es el aceptor de electrones; nuestro principal interés es el uso de la química para generar electricidad (proceso de corriente eléctrica), que es la diferencia producida por las reacciones químicas (Gonzales Arrollo, 2020).

1.5 Electroquímica del hidrógeno con el acero

La electroquímica que existe entre el acero corresponde a intercambios iónicos donde el hidrógeno se produce por intercambios electroquímicos entre el metal y soluciones salinas o ácidos comúnmente, en este proceso de oxido-reducción, se produce hidrógeno libre, este hidrógeno inducido por cargas puede penetrar en la estructura del acero, esto crea intersticios a nivel estructural que van gradualmente debilitando el acero, volviéndolo más propenso a fracturas o daños (Pérez, 2015).

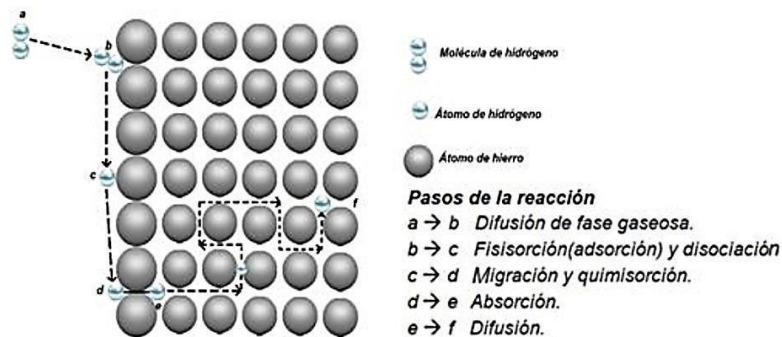
Para el caso tuberías de acero que se operan en el sector hidrocarburos, suelen encontrarse en presencia de ácidos como el H₂S o en ambientes altamente salinos como tubería off-shore, otros ácidos que pueden generar este efecto electroquímico son el ácido clorhídrico, fluorhídrico, acético, fórmico y ácidos orgánicos solubles en agua (García, 2014).

1.6 Formas de permeación de hidrógeno en acero

Existen diferentes formas en que el hidrógeno puede penetrar en las estructuras metálicas del acero, estas pueden ocurrir gracias a la difusión, solubilidad y trampas de hidrógeno. Este hidrógeno se origina principalmente, por electrolitos acuoso o H molecular gaseoso generado por reacciones químicas dentro de estos procesos industriales o transporte de hidrógeno gaseoso puro, suelen suceder diferentes etapas, inicialmente la molécula de H₂ debe absorberse, posteriormente disociarse y por último difundirse a través de la red metálica, dándose una migración de átomos (Zafra, 2016).

Figura 1.

Reacciones que ocurren en la difusión de H en una red metálica



Nota. Tomado de Orduz y Martínez (2022).

1.6.1 Permeación por difusión y permeabilidad Intersticial

La difusividad en el acero depende de su microestructura, según Orduz (2022), los materiales con estructura centrada en las caras (FCC) tienen menor permisividad de hidrógeno comparado con estructuras centradas en el cuerpo (BCC), esto está relacionado con el empaquetamiento de sus moléculas y el espacio que se crea entre ellas, la fuerza que genera el movimiento de la molécula es generado generalmente por un gradiente de concentración entre el metal y la solución o sustancia en la que está inmerso o en contacto, este movimiento puede verse afectado también por el diferencial de temperatura.

1.6.2 Solubilidad

La solubilidad está íntimamente asociada con el tamaño de las moléculas de hidrógeno, el cual suele ser más pequeño que muchos diámetros atómicos de componentes del acero, esto permite al H₂ moverse a través de los intersticios, otros factores como presión parcial del gas (Ley de sieverts), la microestructura del material, la temperatura, límite de grano, entre otros factores (Pérez, 2015).

1.6.3 Trampas de Hidrógeno

El movimiento y penetración de hidrógeno en aceros y metales, se ve ampliamente favorecido, en presencia de defectos microestructurales, las cuales corresponden a heterogeneidades en la red cristalina, estos microespacios funcionan como trampas para el

alojamiento de moléculas de hidrógeno, fomentando un aumento de la concentración de H₂ en estos sitios. Estos defectos funcionan como trampas que retienen y aumenta el ritmo de proceso de difusión y solubilidad.

1.7 Efecto del hidrógeno en las propiedades mecánicas de los aceros.

Los efectos de la presencia de hidrógeno en la conformidad estructural del acero, es negativa, ya que deteriora y disminuye las propiedades mecánicas del material en general, donde se destaca la disminución de la ductilidad, tendencia al fallo retardado, aumento de fragilidad, reducción en la tenacidad a la fractura y en consecuencia reducción de la resistencia mecánica (Zafra, 2016).

Figura 2.

Efecto del hidrógeno en las propiedades mecánicas del acero

Propiedad	Efecto a la exposición con H
Reducción de área	Probeta lisa: disminución de hasta el 50% Probeta entallada: disminución de hasta el 80%
Resistencia a la tracción	No afectada significativamente.
Límite elástico	No afectado significativamente.
Tenacidad a la Fractura	Disminuye al aumentar la presión de H.
Tasa de crecimiento de grieta por Fatiga	Influenciado por la presión de H, la frecuencia, el ratio de carga R, y la pureza del gas H.
Micromecanismo de fractura	Cambio desde coalescencia de microhuecos hasta fractura intergranular, pasando por clivaje transgranular.

Nota. Tomado de Zafra (2016).

Estas son algunas de los daños ocasionados en el acero por presencia de H₂.

1.8 Fenómenos asociados a daños estructurales en el acero en contacto con hidrógeno

La corrosión por hidrógeno también conocida como corrosión ácida, es un proceso electroquímico, que suele tener lugar en ambientes no oxigenados en contacto directo con medios ricos en hidrógeno, este penetra la red metálica del material y deteriora las propiedades mecánicas del mismo, las formas más comunes en que se presenta este fenómeno son, la fragilización por hidrógeno, corrosión interna por hidrógeno y fisuras. Este parámetro es de alta importancia para industrias como la petroquímica, la aeroespacial y la automotriz, por esta razón se han desarrollado materiales que tengan alta resistencia y baja susceptibilidad a la corrosión por hidrógeno o en su defecto usar técnicas preventivas para salvaguardar la integridad de equipos y tuberías.

1.8.1 Fragilización por hidrógeno (FPH)

El Hidrógeno puede ocasionar ciertas problemáticas, una de ellas es el efecto nocivo sobre los metales, conocido como "fragilización por hidrógeno" (FPH); esto es la degradación de las propiedades mecánicas, ocasionando gran pérdida de ductilidad en los aceros y a veces la formación de fisuras, siendo una seria amenaza en las grandes aplicaciones que estos representan en la industria, pudiendo generar una rotura de carácter catastrófico, como en el transporte y el almacenamiento de este gas, en donde se requieren para su empleo condiciones óptimas de seguridad (Funes, 1982).

Figura 3.

Condiciones que afectan en el proceso de fragilización por hidrógeno



Nota. Tomado de Zafra (2016).

1.9 Ataque por Hidrógeno (APH)

El ataque por Hidrógeno es ocasionado en aceros expuestos a temperaturas elevadas (>200°C) y altas presiones parciales (700kPa), genera deterioro de las propiedades mecánicas en el material, sufren descarburación, ocasionada por formación de metano, in situ, el cual no puede difundirse, esto por el tamaño de sus moléculas, por lo que se generan fisuras intergranulares, siendo un daño irreversible, principalmente presente en las refinerías de petróleo o plantas petroquímicas (CAB, s.f.).

1.10 Agrietamiento de acero inducido por hidrógeno (AIH)

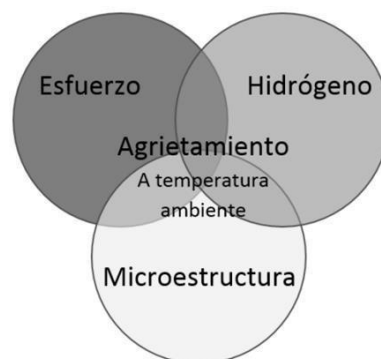
El agrietamiento inducido por hidrógeno (AIH) es un fenómeno dañino por el contacto con hidrógeno, el cual se ve principalmente en las tuberías de aceros expuestas a medios amargos. Un

medio amargo hace referencia a un fluido que contenga ácido sulfhídrico, bióxido de carbono y humedad (Funes, 1982). De esta manera, el hidrógeno atómico el cual es resultado de la reacción de corrosión de acero se esparce a través de este y se posiciona como hidrógeno molecular en defectos internos del metal (Rodríguez Pérez, s.f.).

Este problema es particularmente relevante en industrias como la del petróleo y el gas, donde la presencia de sulfuro es alta, y requiere la aplicación de medidas preventivas para evitar daños graves (Funes, 1982).

Figura 4.

Factores determinantes para que suceda el agrietamiento a temperatura ambiente



Nota. Tres factores son determinantes para que suceda el agrietamiento a temperatura ambiente: la presencia de hidrógeno, la tensión debido a sollicitaciones comunes y una microestructura con alta dureza o niveles de ductilidad baja. Tomado de Romero, et al. (2018).

1.11 Cinética de Corrosión

Hace referencia a la tasa a la que ocurre la degradación de un metal o aleación en un entorno específico, es cuantificable y se puede estimar utilizando la velocidad de la corrosión. Esta

estimación se logra a través del parámetro de velocidad de corrosión (V_{corr}), lo que proporciona información sobre la duración esperada de un material, equipo o estructura en el tiempo bajo condiciones corrosivas. Entendiendo la velocidad de corrosión, es posible determinar la cantidad de metal que puede perder una superficie metálica en contacto con un medio corrosivo en el tiempo.

La tasa de corrosión puede ser cuantificada en diversas unidades, tales como gramos por años (Gr/año) que representa la cantidad de masa perdida por el material debido a la corrosión en un año, milímetros por año (mm/año) o milésimas de pulgada por año (MPY), que es Longitud por unidad de tiempo, según la elección y necesidad del usuario.

1.12 Métodos electroquímicos para el estudio de aceros en contacto con hidrógeno

La velocidad de corrosión en un metal y cambio en las propiedades mecánicas, pueden ser analizada mediante técnicas electroquímicas, como la medición de su resistencia de polarización (R_p), la cual está inversamente relacionada con la corriente de corrosión. De acuerdo con las leyes de Faraday, esta corriente puede ser interpretada como la cantidad de desgaste o deterioro del acero, los métodos electroquímicos más comunes usados en la industria para calcular las tasas de corrosión y otros comportamientos del material son:

- Permeación de hidrógeno
- SSRT(Hibrido).
- Resistencia a la polarización lineal (LPR)
- Espectroscopia impedancias electroquímicas (EIS)
- Pendientes de Tafel.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Realizar un diseño conceptual de un laboratorio de ensayos para estudiar el daño ocasionado por Hidrógeno en materiales metálicos.

2.2 Objetivos específicos

Definir los parámetros de diseño de un laboratorio de ensayos electroquímicos para materiales en contacto con hidrógeno.

Investigar los protocolos de ensayo y procedimientos para conocer la corrosión de los metales que se encuentran en contacto con este elemento en diferentes atmosferas.

Elaborar una propuesta de requerimientos mínimos para el laboratorio que contemplen aspectos de eficiencia energética, economía, y medio ambiental para el manejo de materiales por contacto con hidrógeno.

3. Metodología

Como anteriormente fue mencionado, la metodología será guiada por un diseño conceptual, el cual tiene como principal objetivo obtener una solución de situaciones planteadas. El proceso de generación de ideas está guiado por la investigación de mercado, que informa las decisiones para crear nuevos desarrollos. El diseño del producto se basa en los resultados de la definición de los requisitos y otras necesidades. Su propósito es desarrollar y probar muchas soluciones a un problema para encontrar la mejor (Horváth, 2005). Para el desarrollo de este proyecto la problemática que se desea estudiar son los parámetros, desde equipos y espacios requeridos, para evaluar a los materiales metálicos que son afectados por el Hidrógeno.

Desde una perspectiva tradicional, el diseño conceptual es un proceso creativo de resolución de problemas potenciado por el conocimiento humano, la creatividad y la imaginación. También puede entenderse como un proceso cognitivo de generación de ideas, exteriorización, síntesis y gestión de productos mentales, denominado pensamiento creativo (Horváth, 2005).

Los métodos desde el inicio del proceso:

- Descripción.
- Ley.
- Estudio de mercado.
- Análisis de vida.

Hasta la definición del problema:

- Costo de obra.

El nacimiento de una idea:

- Dibujo.
- Esbozo. Hasta finalmente encontrando el significado del proyecto de diseño:
- Modelos 3D.
- Modelos rápidos.

El contenido del proceso de concepto difiere de otras partes del proceso de desarrollo de productos, desde el equilibrio de alto nivel hasta los detalles necesarios para definir una solución (Horváth, 2005).

Finalmente, la implementación de todos los pasos requeridos para el diseño conceptual de un laboratorio permitirá conocer la efectividad y el uso de este para la industria metalúrgica.

4. Resultados

4.1 Parámetros conceptuales de diseño de un laboratorio de ensayos electroquímicos para estudiar las propiedades de aceros usados en la industria hidrocarburo o ambientes ricos en hidrógeno

El objetivo principal del trabajo es proponer el diseño conceptual de un laboratorio para hacer pruebas que permitan el estudio del efecto corrosivo en aceros sometidos a cargas de hidrógeno, este tipo de aceros y condiciones son muy comunes en sistemas de transporte de fluidos en la industria petrolera y gas, estos pueden tener concentraciones de hidrógenos, comúnmente asociado a ácidos de azufre y agua ionizada.

Se establecieron criterios básicos para el diseño de la instalación, la distribución de equipos y el tipo de pruebas aplicadas, a través de análisis lógico enfocado en el cumplimiento de los objetivos siguiendo la normativa técnica, teniendo en cuenta variables como viabilidad técnica y económica, con el fin de que sea factible aplicarlo a la realidad, para esto primero se define los métodos propuestos.

Como se mencionó anteriormente las técnicas electroquímicas se fundamentan en aplicar perturbación iónica al sistema bajo análisis y luego medir las respuestas en forma de corriente y voltaje. A través de la interpretación de este tipo de pruebas se puede obtener información sobre diversos aspectos, como la velocidad de corrosión, el rendimiento de recubrimientos y películas, la formación de pasividades, la susceptibilidad a la corrosión localizada y otros detalles relevantes (Flores, 2013). Los criterios para definir los siguientes métodos son:

- Propiedades y cambios que se desean estudiar.
- Viabilidad económica
- Aplicabilidad
- Versatilidad y sencillez

Los métodos seleccionados para el laboratorio de pruebas electroquímicas fueron:

- SSRT con Carga electroquímica INSITU de hidrógeno
- Ruido Electroquímico (SSRT y Celdas H)
- Espectroscopia de impedancia Electroquímica (SSRT y Celdas H)
- Índice de Localizado (IL)
- Permeación de Hidrógeno
- Ensayos de CTOD en probetas cargadas con hidrógeno.

Otras pruebas que se pueden arreglar con los equipos del diseño descrito a continuación:

- Ensayo de polarización Anódica
- Polarización potencio dinámica
- Técnicas de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS)
- Prueba de penetración de hidrógeno (HPP)
- Método de pérdida de peso por interacción electroquímica
- Medición de potencial de corrosión en campo

Hay muchos métodos más que pueden ser aplicados a los aceros sometidos a cargas de hidrógeno, incluirlos dentro del plan aumentaría significativamente la inviabilidad del proyecto, sin embargo, serán mencionados por su importancia, entre ellos encontramos el:

- Small Punch Test (SPT)
- Incremental Step Loading Technique

4.1.1 Estación básica de ensayos electroquímicos

La finalidad del laboratorio y los ensayos de tipo electroquímicos propuestos en este proyecto están destinados para el estudio del efecto del hidrógeno en aceros usados en operaciones industriales que presentan ambientes ricos en H₂, como la industria Oil & Gas o transporte de hidrógeno puro gaseoso o licuado, este tipo de aceros se caracteriza por su alta resistencia a este tipo de contaminante, el cual se encuentra comúnmente en ácidos de azufre, agua, entre otros.

Para hacer este tipo de pruebas se disponen de diferentes equipos y materiales. Sin embargo, hay elementos y equipos que serán usados en todas pruebas, los principales equipos son a) Bipotenciostato/ galvanostato ver Figura 4, b) Computadora y software c) Electrodo y cableados ver Figura 5.

Figura 5.

Bipotenciostato, galvanostato/EIS Metrohm dropsens.



Nota. Tomado de Polco (s.f.)

El bipotenciostato es una gran alternativa para el diseño conceptual de laboratorio para pruebas electroquímicas, ya que ofrece opciones multicanales, que permitirán hacer pruebas como la permeación química bajo la técnica de Devathan-Stachurki, además permite una investigación multiusuarios y multipuebas, mejorando el rendimiento y optimizando el espacio del laboratorio, existen muchas marcas en el mercado como Metrom, Autolab, Gamry, ACM, entre otras marcas en el mercado.

Figura 6.

Electrodos, cableados y accesorios para pruebas electroquímicas



Nota. Tomado de LaborXing (s.f.).

Para hacer las conexiones se requieren de una serie de electrodos, cableados y accesorios que permiten interconectar el sistema compuesto por el bipotenciostato, las celdas electroquímicas o atmosféricas y el ordenador, estas conexiones varían según el tipo de pruebas. El ordenador es usado para modelar las lecturas y obtener los resultados de las pruebas, se requiere el uso de una Computadora con características y atributos mínimos indicados por las especificaciones del Software en cuestión, generalmente estos funcionan con pc estándar que usen Windows 10 y 11, así quedaría un esquema típico de pruebas electroquímicas para estudio de los metales sometidos a cargas de hidrógeno.

Figura 7.

a) *Representación esquemática de la prueba electroquímica*



Nota. Tomado de Metrohm (s.f.).

4.1.2 Métodos Propuestos: Ensayos electroquímicos

Las técnicas electroquímicas se fundamentan en aplicar perturbación iónica al sistema bajo análisis y luego medir las respuestas en forma de corriente y voltaje. A través de la interpretación de este tipo de pruebas se puede obtener información sobre diversos aspectos, como la velocidad de corrosión, el rendimiento de recubrimientos y películas, la formación de pasividades, la

susceptibilidad a la corrosión localizada y otros detalles relevantes (Flores, 2013). Los criterios para definir los siguientes métodos son:

- Propiedades y cambios que se desean estudiar.
- Viabilidad económica
- Aplicabilidad
- Versatilidad y sencillez

Los métodos seleccionados para el laboratorio de pruebas electroquímicas fueron.

- SSRT con Carga electroquímica de hidrógeno
- Ruido Electroquímico (SSRT y Celdas H)
- Espectroscopia de impedancia Electroquímica (SSRT y Celdas H)
- Índice de Localizado (IL)
- Permeación de Hidrógeno
- Ensayos de CTOD en probetas cargadas con hidrógeno.

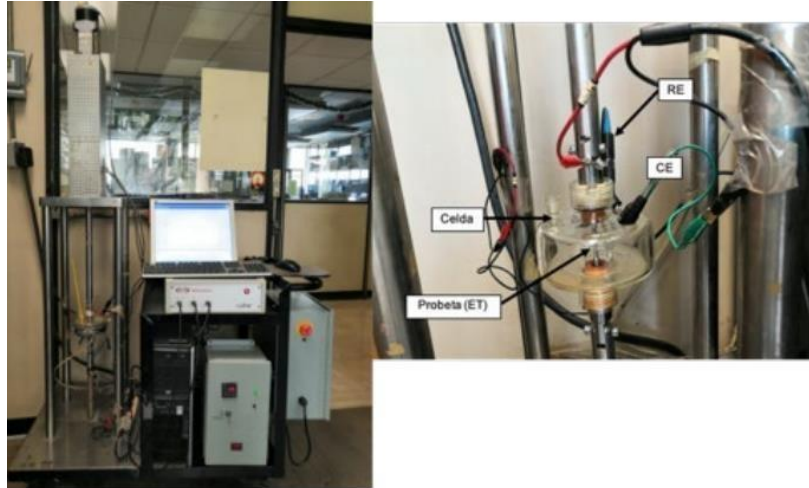
4.1.2.1 Método SSRT con cámara de carga de hidrógeno in-situ. Para estudiar el efecto de la saturación de hidrógeno en las propiedades mecánicas de los aceros, se usa ensayos de tracción en este caso lenta, esto permite evaluar propiedades mecánicas relevantes, al mezclarse con el método de carga electroquímica de hidrógeno en sitio, se puede obtener una prueba que permite evaluar las propiedades del acero antes y después de ser sometido a una carga química de hidrógeno, a su vez es sometida a una carga mecánica lenta, este ensayo se conoce como SSRT por sus siglas en inglés (Slow Strain Rate Testing), las especificaciones de la prueba están contempladas en la norma ASTM G129 y ASTM1G142 (Pulido, 2020).

Los resultados de este tipo de pruebas se procesan para evaluar el comportamiento de las propiedades mecánicas como índice de Susceptibilidad al SCC (I_{sc}), los resultados se complementan implementando observaciones a través de métodos de microscopia electrónica, para este caso se propone microscopia electrónica de barrido MEB, esto permite determinar si solo se presentaron grietas en la muestra o únicamente corrosión (Fabre, 2020).

Se compone principalmente de tres componentes: una máquina de ensayo SSRT, una estación de trabajo electroquímica (Esta será la misma que se usó para la prueba de permeación de hidrógeno) y una caja ambiental o atmosférica de hidrógeno que envuelve la probeta durante la prueba, esta caja puede ser para fluidos líquidos o gaseosos. En estas pruebas se pueden considerar variables como el tiempo de falla (TF), esfuerzo en la zona del límite elástico (ZLE), reducción de área (RA) y elongación plástica (EP); para calcular los índices de susceptibilidad al SCC en esta prueba se debe considerar el índice del tiempo de falla (ITF), la reducción del área (IRA) e índice de elongación plástica (IEP) (Fabre, 2020). El método de prueba adopta una polarización de corriente constante, el diseño conceptual considera las normas ASTM. por lo que la estación de trabajo para aplicación de este método se vería como en la Figura 7.

Figura 8.

Estación para pruebas de ensayo SSRT y celda atmosférica de hidrógeno para soluciones líquidas



Nota. Tomado de: Fabre (2020).

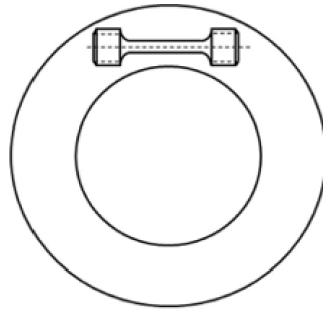
Durante esta prueba también se pueden obtener datos electroquímicos asociados a la corrosión, eso se logra a través de un arreglo en la cámara de condiciones.

Este arreglo consta de electrodos como se ve en la figura _ . y dicha configuración varía según el tipo de técnica, ya sea Ruido Electroquímico RE o Técnica de impedancia, por lo que en la misma estación se integran diferentes técnicas, pero con condiciones de esfuerzo y de carga electroquímica de hidrógeno distintas, lo cual crea resultados más acordes con la realidad y de gran valor técnico, también se pueden adaptar autoclaves para pruebas de cargas de hidrógeno en estado gaseoso (Wang et al. 2022).

Las muestras usadas en estas pruebas son extraídas directamente de la tubería a evaluar, es fundamental que las propiedades de la muestra sean iguales a la del espécimen estudiado, para esto se sugiere que se tome directamente de la tubería, ver Figura 8 y Figura 9.

Figura 9.

Recomendación de extracción, para probeta de ensayo de SSRT



Nota. Tomado de: Wang, et al. (2023).

Figura 10.

Probetas para pruebas de SSRT según la norma ASTM F1624



Nota. Tomado de Zwick/Roell (s.f.)

Con esta máquina de tracción se pueden llegar a evaluar otras propiedades a través de cambios en las condiciones de trabajo de la prueba, como por ejemplo la velocidad de rotación, sentido de compresión, dirección de tracción y fuerza, dando como resultados otras pruebas, porque para este se sugiere la maquina universal de tracción de la empresa ZickRoell.

- Ensayo de tracción en metales ASTM E8,
- Ensayo de fluencia ASTM E319 y E1457
- Creep Fatigue Crack Growth: ASTM E2714, ASTM E2760
- LCF - Low Cycle Fatigue : ASTM E606

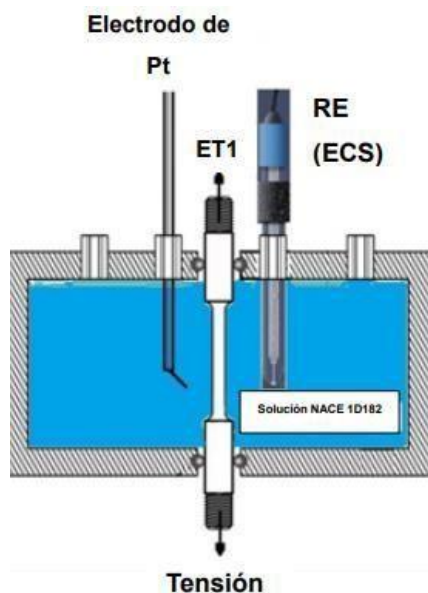
- HCF - High Cycle Fatigue (ensayo de fatiga de alto ciclo): DIN 50100, ASTM E466-15, ISO 1099.

4.1.2.2 Espectroscopia de impedancia electroquímicas. Estas pruebas pueden ser llevadas a cabo en celdas químicas, sin embargo, también se puede llevar a cabo en la cámara de atmosfera del equipo para pruebas SSRT, Fabre (2020) propone un arreglo para llevar a cabo pruebas electroquímicas como EIE y RE directamente en la cámara atmosférica, para esto se dispone del ordenador y del bipotenciostato.

La EIE consiste en un arreglo que se encarga de medir el potencial de corrosión (E_{corr}), posteriormente se somete a una resistencia la polarización (RP) y por último es que se mide el EIE, la duración de estas secuencias puede variar, pero se estima que es alrededor de una hora, esto se debe repetir una y otra vez hasta que la probeta se fracture. Para esta prueba se debe tener en cuenta factores como rango de frecuencia de la prueba Hz y la amplitud mV (Fabre, 2020).

Figura 11.

Arreglo para prueba de espectroscopia de impedancia electroquímicas

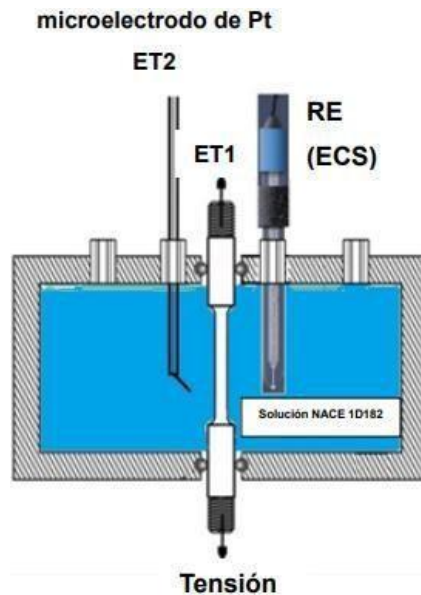


Nota. Tomado de: Fabre (2020).

4.1.2.3 Ruido electroquímico. En términos de ciencia, el ruido electroquímico hace referencias a variabilidades anormales fuera del comportamiento obtenidos en una prueba experimental, en este caso dicha técnica se usa para evaluar el efecto de la corrosión en los por efecto del hidrógeno. Esta técnica se encarga de evaluar las variaciones de las microcorrientes y potenciales electroquímicos generados por interacciones catódicas y anódicas producto del efecto de la corrosión y surgen a partir de la superposición de señales individuales en el tiempo que son detectadas a través del bipotenciostato y registradas en la computadora a través del software, a continuación, se muestra el arreglo en la celda de atmosfera de la prueba SSRT (Casquete, 2016).

Figura 12.

Arreglo para prueba de ruido electroquímico.



Nota. Tomado de: Fabre (2020).

4.1.2.4 Índice de Localizado (IL). Para calcular el índice de localización se hace un análisis estadístico del ruido eléctrico, se hace la recopilación de datos de la resistencia eléctrica en diferentes puntos, se procede a hacer un análisis de variabilidad para los datos, por último se calcula el Índice de localizado, es decir esta se puede resumir como la medida de la variación de la resistencia eléctrica en la superficie a estudiar, un IL alto indica problemas en la superficie de la muestra, mientras que un IL bajo indica uniformidad (Fabre, 2020).

4.1.2.5 Resistencia al Ruido (Rn). Esta prueba consiste en relacionar la corriente y el voltaje, este es producto de la relación entre la desviación estándar del ruido de potencial y la desviación estándar del ruido de la corriente, evalúa la facilidad y dificultad con que se transfieren las cargas a través de la superficie de los electrodos, estas magnitudes establecen una relación a

través de las curvas de Tafel según la ecuación de Stern-Geary, donde se relaciona el potencial y la densidad de la corriente (Casquete, 2016).

4.1.2.6 cálculo de la velocidad de corrosión. Para medir la velocidad de corrosión se dispone de la densidad de la corriente (i_{corr}) calculado a través de los equipos electroquímicos, la densidad del material, peso equivalente y una constante, de esta manera se establece la velocidad con que se propaga la corrosión en superficies y estructura interna de los aceros (Rubio, 2019).

4.1.2.7 Análisis superficial por microscopio electrónico de barrido (MEB). Es una técnica que no usa la luz para expresar sus imágenes sino que se basa en el uso de un haz de electrones focalizados que se encarga de escanear la superficie de las muestras y permite recopilar información detallada sobre su estructura, topografía, propiedades nanométricas e incluso composición química, por lo que se convierte en una herramienta de alto potencial para la caracterización de metales como aceros sometidos a altas cargas de hidrógeno, sin embargo el microscopio óptico se convierte en una opción más viable económicamente y también con buenos resultados (Cabrera, 2022).

Según Fabre (2020) para hacer el análisis superficial por microscopía electrónica de barrido (MEB), se sugiere cortar de manera longitudinal y transversalmente para pulir la muestra rota, esto permitirá estudiarla mucho mejor, se proponen dos pasos:

a) Se lleva a cabo un examen detallado de la superficie en la zona donde se provocó la fractura con el propósito de identificar el tipo específico de fractura. Esta evaluación proporciona la capacidad de detectar inclusiones, cavidades y microgrietas que pueden estar presentes internamente. Además, se pueden analizar los mecanismos de ruptura asociados con la corrosión

por tensión asistida (SCC). Asimismo, este procedimiento permite cuantificar el área superficial afectada para determinar la magnitud de la reducción de área, ver Figura 12.

Figura 13.

Reducción de área en de la fractura en las probetas

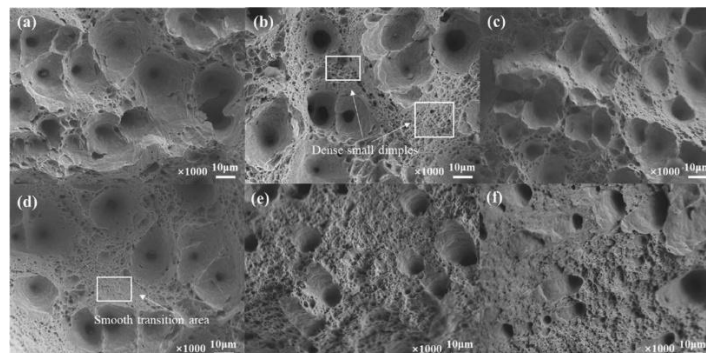


Nota. La segunda muestra de izquierda a derecha estuvo sometida a concentraciones más altas de hidrógeno. Tomado de Universidad de Burgos (s.f.).

b) El análisis longitudinal, ayuda a encontrar en las paredes laterales de la muestra ataque de corrosión localizada como hendiduras, picaduras o grietas, ver Figura 13.

Figura 14.

Análisis microscópico (MEB) de la morfología de fractura central para una probeta



Nota. Esta figura muestra la probeta sometida diferentes concentraciones de hidrógeno a)0% b)1%

c) 5% d)10% e)15% f)20%. Tomado de Wang, et al. (2022).

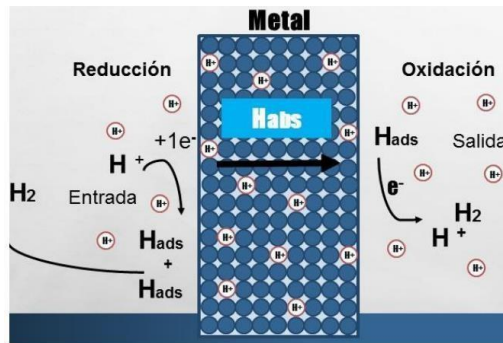
Aunque este sea el tipo de microscopio recomendado con el fin de obtener mejores resultados en a la evaluación superficial de las muestras y caracterización, otras técnicas tradicionales como inspección óptica a través de microscopios monoculares podría servir para verificar las muestras, sin embargo, el rango de precisión y facilidad de detección de las fallas en el material disminuye.

4.1.2.8 Técnica de Devathan-Stachurki: Método de permeación electroquímica de hidrógeno. La permeación electroquímica es un fenómeno que consiste en que el H₂ en forma gaseosa es capaz de atravesar el material de estudio basado en un gradiente de concentración y la aplicación de un potencial eléctrico Ver figura_. Gracias a su accesibilidad económica en laboratorios y su flexibilidad técnica para su aplicación, esta es hoy en día una de las técnicas más usadas (Zafa, 2021).

Este método es usado para medir la severidad de la carga de hidrógeno en un material generado por su exposición a condiciones corrosivas o mediante polarización catódica. Asimismo, son útiles para identificar las características esenciales de los materiales en relación con la difusión de hidrógeno, como la difusividad del mismo, y para evaluar cómo factores metalúrgicos, de procesamiento y ambientales influyen en la difusión del hidrógeno en los metales La información derivada de los ensayos de permeación de hidrógeno puede integrarse con otros ensayos pertinentes sobre la fragilización de hidrógeno o el craqueo inducido por este, con el fin de establecer umbrales críticos de flujo de hidrógeno o contenido de hidrógeno en el material que podría producirse durante el craqueo (Flores, 2019).

Figura 15.

Representación del proceso de difusión de hidrógeno a través de una placa metálica

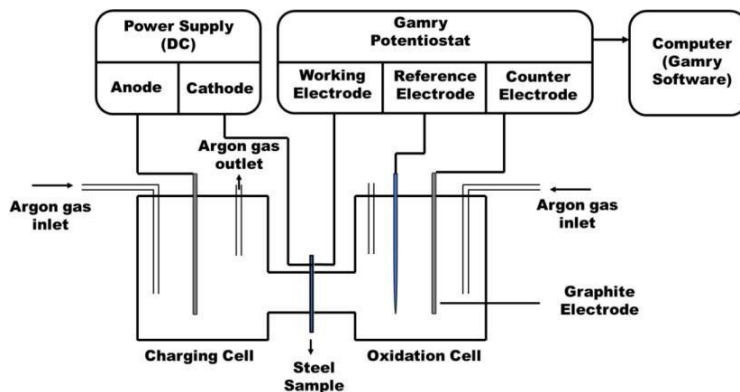


Nota. Tomado de: Flores (2019).

Se utilizaron experimentos de permeación de hidrógeno para analizar la difusión de hidrógeno en los aceros. Los experimentos se realizaron de acuerdo con la norma ISO 17081, para esta prueba se propone el uso de la Configuración de permeación Devanathan-Stachurski (ISO, 2018) la representación de dicha configuración se ve como en la Figura 15.

Figura 16.

Esquema de la configuración del método de permeación por hidrógeno según norma ASTM G148



Nota. Tomado de: Jack (2021).

Para este arreglo se usan celdas H, también conocida como celda de Devanathan-Stachurski ver figura 15, estas celdas electroquímicas, son usada para pruebas de permeación de hidrógeno por inducción electroquímica a través de un disco delgado de metal (probeta), comúnmente de acero, estos son los componentes de las celdas de Hidrógeno, ver Figura 16.

Figura 17.

Celdas H y Accesorios

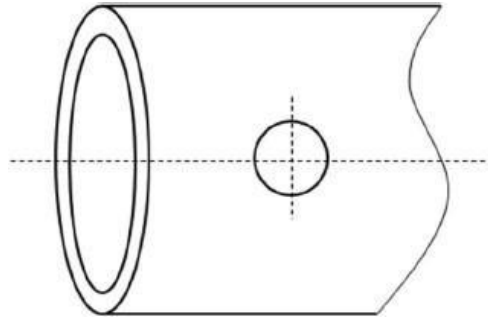


Nota. Tomado de LaborXing (s.f.).

Las muestras usadas para este procedimiento son extraídas directamente del sistema a estudiar, se recomienda una relación de radio a espesor de 10:1 o mayor, es aceptable una relación de radio a espesor de 5:1 si el radio del área expuesta en el lado de oxidación se reduce al 90 % del área del lado de carga (ver Figura 17).

Figura 18.

Probeta para ensayo de permeación de hidrógeno



Nota. Tomado de: Wang, et al. (2023).

La instalación consiste en disponer de dos celdas H, entre las cuales se ubica la probeta de metal, para este caso aceros de alta resistencias usadas en la industria de hidrocarburos y transporte de hidrógeno, los estándares de esta prueba se contemplan en la norma ASTM G148. Para completar esta configuración, se llenan las cámaras, estas deben tener concentraciones según las características de la prueba con el fin de facilitar las mediciones del equipo. Se instalan los diferentes electrodos y accesorios los cuales se conectan al bipotenciostato, esta configuración está diseñada para cumplir con los estándares del procedimiento ASTM G148 (ver Figura 18).

Figura 19.

Configuración para ensayo electroquímico de permeación de hidrógeno



Nota. Esta configuración tiene sus respectivas conexiones y cámaras H llenas, listas para la ejecución de la prueba según la Norma ASTM G148. Tomado de Metrohm (s.f.).

4.1.2.9 Ensayos de CTOD en probetas cargadas con hidrógeno. Este tipo de ensayos mecánicos son el principal aliado a la hora de calcular comportamientos asociados a la fatiga del material, además, a través de este también se pueden hacer ensayos para obtener información sobre propagación de grietas, estudios de tenacidad a la fractura entre otros. Al usar probetas de aceros cargadas con hidrógeno se puede obtener valiosa información sobre el efecto del hidrógeno en las propiedades del material que pueden ser evaluadas a través de esta Técnica (Pérez, 2015).

Para llevar a cabo esta prueba se propone el uso de la técnica de la Normas *critical J values of metallic materials* y ASTM E1820-01 *Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness* (ASTM, 2013). El principal equipo para esto es el uso de una máquina Servo hidráulica donde destacan la marca ISTRON, VTS, ZWICK/ROELL, entre otras, ver Figura 19.

Figura 20.

Equipo para ensayos CTOD INSTRON modelo 8801 cap. Max. 100kN

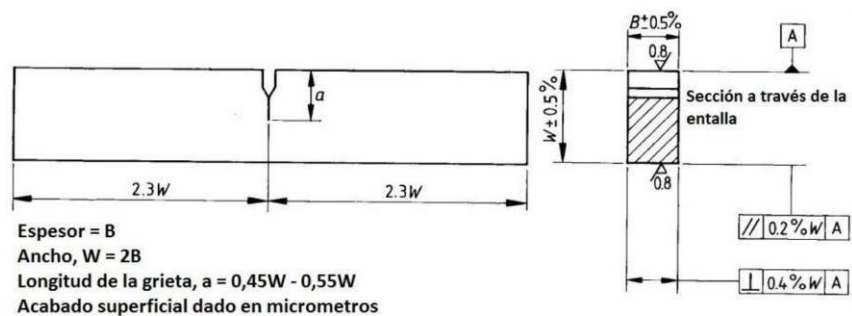


Nota. Tomado de: Pérez (2015).

Para este tipo de ensayos se utilizaron muestras rectangulares con dimensiones basadas en la norma, tal como se observa en la Figura 20.

Figura 21.

Dimensiones y características para la muestra usada en el ensayo CTDO

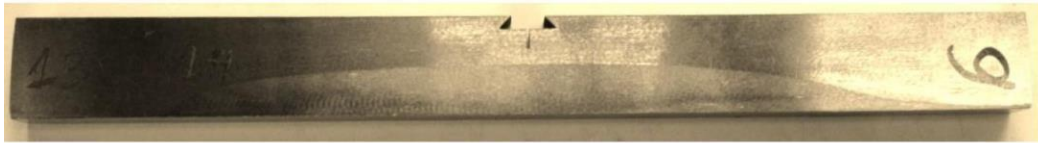


Nota. Tomado de: Pérez (2015).

Las muestras se producen por procesos mecánicos de corte y entallado mecánico o electroquímico, estas dimensiones están relacionadas con crear muestras que tengan cargas de hidrógenos similares a las usadas en pruebas de permeación de hidrógeno, a fin de comparar resultados, a continuación, se presenta una imagen de la muestra.

Figura 22.

Probeta metálica para ensayos CTOD.

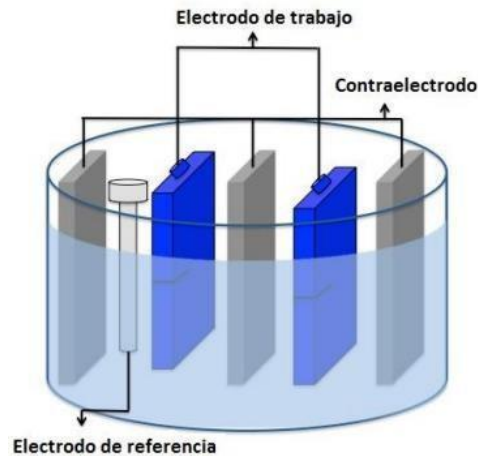


Nota. Tomado de: Pérez (2015).

Para la carga de hidrógeno se usa un proceso electroquímico a través de una configuración esquemática mostrada en la figura 22, que induce a través de una solución iónica la interacción de moléculas de hidrógeno con la superficie del metal a estudiar, la hidrogenación varía según la corriente utilizada y las concentraciones de H₂ en la solución.

Figura 23.

Esquema para carga de hidrógeno de las probetas de ensayo de CTOD



Nota. Tomado de: Pérez (2015).

Este método de precarga puede ser usado para cargar de hidrógeno para cualquier pieza metálica que sirva de muestra para diversos ensayos, por ejemplo para el ensayo SSRT, la carga de hidrógeno se puede hacer ex situ lo cual también permite evaluar el comportamiento de la red metálica de la pieza bajo estas condiciones, según prez (2017) las cargas de hidrógeno suelen afectar negativamente las propiedades mecánicas, se observa para estos casos que la tenacidad a la fractura se ve reducida drásticamente a medida que las cargas de hidrógeno son más agresivas en el material.

4.1.2.10 Otras pruebas electroquímicas que se pueden hacer en la cámara atmosférica SSRT y configuración básica (Bipotenciostato, celda H, electrodos y accesorios y ordenador).

Existen otras pruebas que se pueden hacer con los materiales y equipos bases de la propuesta de laboratorio, donde cambian las configuraciones, las propiedades medidas y las técnicas usadas para evaluar los resultados, de esta forma se pueden analizar y predecir comportamientos y datos

fundamentales para las empresas metalúrgicas y metalmeccánicas para ser aplicadas en diferentes situaciones y condiciones de trabajo, a continuación, se presenta otras pruebas:

- Ensayo de polarización Anódica
- Polarización potenciodinámica
- Prueba de penetración de hidrógeno (HPP)
- Método de pérdida de peso por interacción electroquímica
- Medición de potencial de corrosión en campo

En el último capítulo se hará un estudio de la viabilidad económica y energética de las pruebas, también se propondrá a través de un dibujo técnico, la posible distribución de los equipos y materiales dentro del laboratorio, además se hará un estudio de la disposición final de materiales contaminados con hidrógenos u otras sustancias químicas presentes en dichas pruebas, con el fin de cumplir con la normativa ambiental.

4.2 Estudio del efecto de la corrosión en aceros industriales en diferentes Atmosferas y condiciones

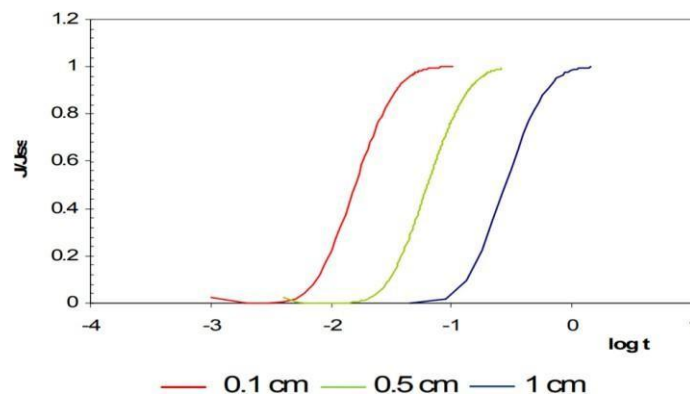
Las condiciones reales de las líneas de transportes de fluidos líquidos y gaseosos ricos en hidrógeno están sometidas a diferentes condiciones de operación, por lo que resulta de gran importancia estudiar las interacciones electroquímicas asociadas a la corrosión bajo diferentes parámetros y atmosferas de trabajo, de esta manera se recopila información fundamental para controlar y eliminar riesgos operativos asociados a estos daños.

4.2.1 Estudio del efecto del espesor de la tubería en procesos de permeación de hidrógeno (Técnica de Devathan)

En la industria es importante conocer el espesor adecuado para la fabricación de tuberías, por esta razón se debe estudiar la velocidad de difusividad del hidrógeno para diferentes espesores, de esta manera se estudian los tiempos que puede tardar el proceso de corrosión en la estructura metálica, para esto se debe hacer las pruebas de difusividad de hidrógeno con probetas de diferentes espesores (Villalobos et al., 2015). A continuación, se muestran resultados de las curvas de permeación para 3 tipos de espesores de las muestras.

Figura 24.

Resultados de curvas de permeación para tres diferentes valores de espesor de placa



Nota. Tomado de: Borbón (2006).

Como es de esperarse, al ser el mismo patrón quiere decir que es el mismo material, por lo que el perfil para las tres medidas es repetitivo, sin embargo, el tiempo de difusión es proporcional al espesor de la muestra, esto es coherente ya que, a mayor espesor, mas es el camino que debe recorrer la molécula de hidrógeno para permear a través del acero, esto puede ser usado para

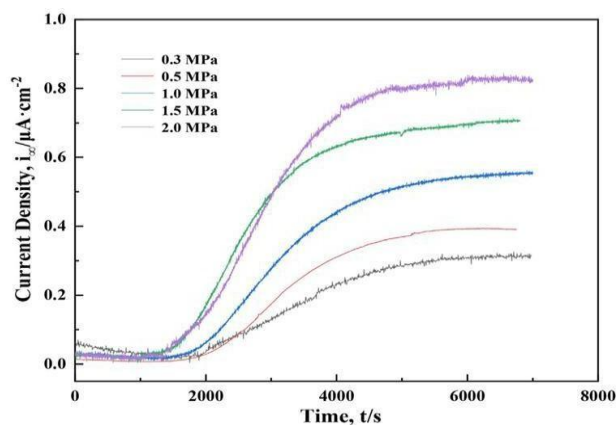
determinar espesores adecuados en tuberías expuestas a *pitting*, fracturas u otro tipo de perforación en la tubería.

4.2.2 Estudio de la carga de hidrógeno gaseoso a diferentes presiones (Pruebas SSRT)

No todos los sistemas de gasoductos trabajan a la misma presión, ni los tanques de almacenamientos se encuentran barométricamente iguales, por esta razón es fundamental estudiar el efecto de la presión en la permeación de hidrógeno. A continuación, se muestran las curvas de permeación de hidrógeno para un tipo de acero industrial, se ogra percibir que el tiempo de penetración del hidrógeno disminuyó ligeramente con el aumento de la presión en la cámara atmosférica, esto significa que la presión influye seriamente en la permeación de hidrógeno antes de la ruptura (Wang, et al., 2022). A continuación, se muestra un ejemplo del comportamiento de la densidad de corriente.

Figura 25.

Curvas de permeación de hidrógeno bajo diferentes presiones de hidrógeno



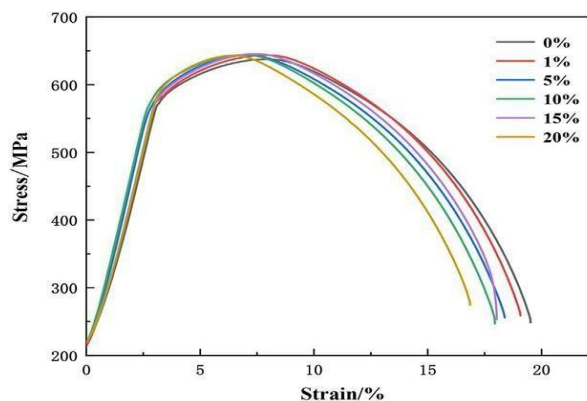
Nota. Tomado de: Wang, et al. (2022).

4.2.3 Estudio de la influencia de las concentraciones de hidrógeno en las propiedades mecánicas del acero (Pruebas SSRT)

No todos los ambientes presentan los mismos niveles de exposición a la corrosión por hidrógeno, ya que las concentraciones de H₂ cambian según sea el caso, por esta razón es de fundamental importancia estudiar cómo se ven afectadas las propiedades mecánicas y químicas del acero cuando se somete a ambientes de hidrógeno en diferentes concentraciones, estas condiciones se pueden adaptar a la naturaleza del fluido real, de esta forma se pueden obtener resultados importantes para el estudio de estos metales (Zafra, 2016).

Figura 26.

Curvas de tensión-deformación para un acero en mezclas gaseosas con concentraciones diferentes de hidrógeno



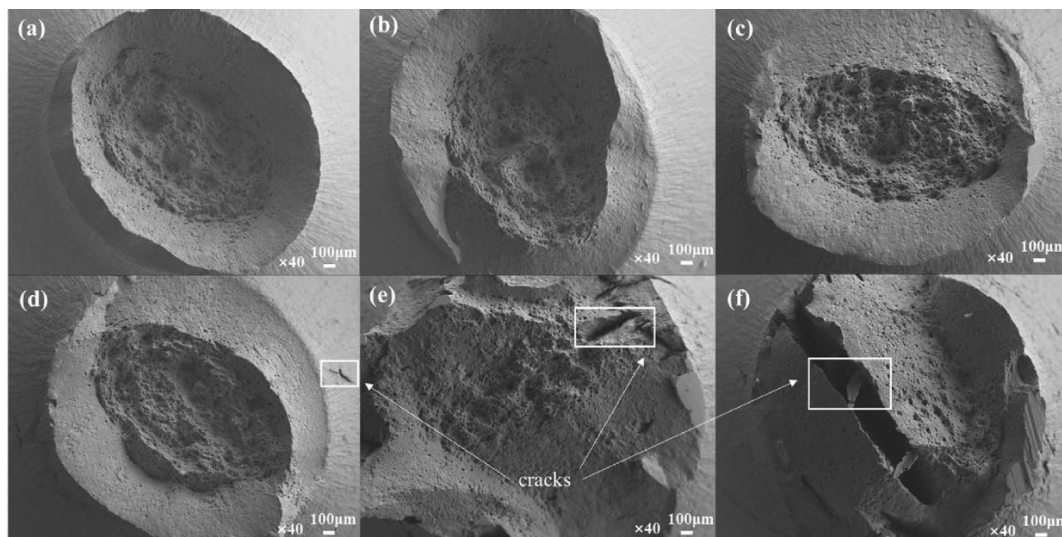
Nota. Tomado de: Wang, et al. (2022).

Para terminar de analizar las probetas después de la rotura, se procede a evaluar con el Microscopio electrónico de barrido (SEM) a través de esta evaluación se puede estudiar la

morfología de la fractura, de esta manera se puede estudiar el mecanismo de la fractura a diferentes concentraciones de hidrógeno, ver Figura 26.

Figura 27.

Morfología de fractura completa del acero



Nota. Esta figura muestra la fractura completa del acero bajo diferentes proporciones de mezclas de hidrógeno a) 0% b) 1% c) 5% d) 10% e) 15% f) 20%. Tomado de Wang, et al. (2022).

En este ejemplo podemos contemplar como a medida que aumentan las concentraciones de hidrógeno, es más notable el tamaño de las fracturas inducidas por el H₂, para el caso anterior desde concentraciones superiores al 10% se logra ver con claridad estas fracturas ocasionadas por la interacción iónica entre el fluido y el metal.

4.2.4 Estudio de la mecánica de los aceros expuestos a soluciones con diferente concentración de inhibidor de corrosión (Pruebas SSRT)

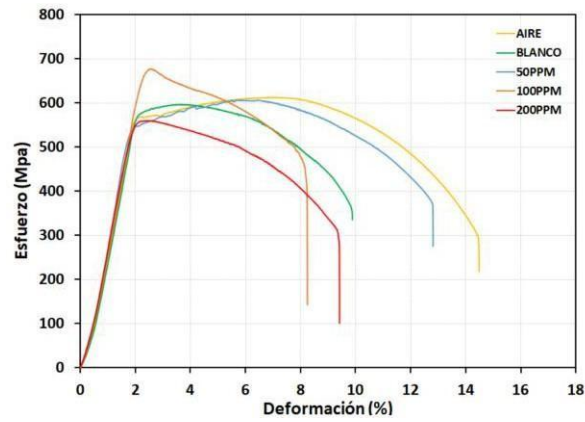
Los metales como aceros usados en procesos de transportes ricos en hidrógeno están sometidos a una alta carga electroquímica debido a la interacción entre el hidrógeno y el metal, para ayudar a reducir el daño de esta interacción, se usan sustancias químicas diluidas en el fluido a transportar o almacenar con el fin de reducir el daño de estas aleaciones.

Estos inhibidores o técnicas de inhibición son ampliamente utilizados y existen varios enfoques para aplicarlos en líneas de procesos, puede usarse directamente en la superficie del metal, cambiando las propiedades del medio para hacerlo menos corrosivo y para el caso en cuestión, este se disuelve en el líquido a transportar inhibiendo la reacción química que produce la corrosión, en las pruebas SSRT presentadas anteriormente se incluyen dentro de la solución de prueba estas sustancias, de esta forma se evalúa el daño en estos metales y cambios en sus propiedades en presencia del inhibidor.

Para estudiar el efecto de estas sustancias químicas, se debe incluir dentro de la cámara de atmosfera del equipo para prueba SSRT en los fluidos anódicos estos inhibidores, a continuación, se muestra un ejemplo de los resultados de estas pruebas a diferentes concentraciones de inhibidor, son muchas las propiedades que se pueden estudiar, el comportamiento de curvas de esfuerzo deformación para diferentes concentraciones ver figura, velocidad de corrosión ver figura, índice de localización entre otras propiedades, para este caso se hace una prueba al aire libre y después se estudia las propiedades mecánicas como esfuerzo de deformación y químicas como velocidad de corrosión a 0 , 50, 100 y 200 PPM de concentración, ver Figura 27 y Figura 28, otras propiedades pueden ser estudiadas.

Figura 28.

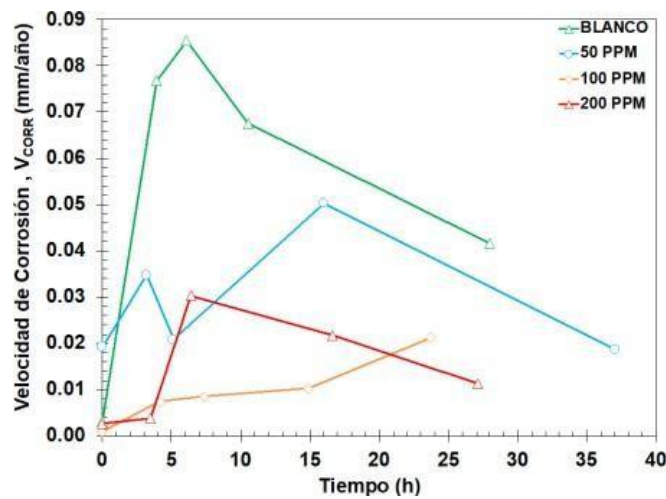
Curvas esfuerzo-deformación obtenidas de la prueba SSRT para el acero con diferentes concentraciones de inhibidor



Nota. Tomado de: Fabre (2020).

Figura 29.

Ejemplo de Velocidad de corrosión para un acero obtenida del monitoreo de la prueba SSRT con diferentes concentraciones de inhibidor



Nota. Tomado de: Fabre (2020).

La velocidad de corriente se obtiene a través del cálculo de la resistencia al ruido (R_n). Para la gráfica anterior, se observa menor velocidad para concentraciones de inhibidores de 100 y 200 ppm, no quiere decir que el inhibidor este actuando, si no, que se puede deber a la corrosión focalizadas, la cual crea microgrietas que muestran valores bajos en la densidad de la corriente (Fabre, 2020).

4.3 Propuesta de requerimientos mínimos para el laboratorio que contemplen aspectos de eficiencia energética, economía y medio ambiental para el manejo de materiales por contacto con hidrógeno

En esta sección se hace un estudio y repaso de los requerimientos mínimos para llevar a cabo el montaje del laboratorio en la realidad, aquí se hace una propuesta civil de distribución de equipo teniendo en cuenta los parámetros y normativa vigente, se hace un análisis de precios unitarios de todos los equipos, que permita tener una idea de los precios bases para hacer el montaje de equipos, también se hace un análisis de consumo energético y por ultimo los parámetros mínimos para disposición de residuos contaminado por hidrógeno u otras sustancias químicas, esta información es relevante ya que permite tener una estimación sobre costos de equipos y operativos, así como disposiciones mínimas.

4.3.1 Espacio y distribución de equipos

Para proponer el espacio requerido en el GIC para las pruebas descritas anteriormente se consideran el número de equipos y el tamaño de estos, el área ocupada por cada uno es tomada de

fichas técnicas de equipos usados en las pruebas proporcionadas por proveedores y distribuidores de estos equipos. Para Urbina (2022), para proponer un diseño se deben abordar aspectos técnicos fundamentales como, la seguridad industrial de equipos y personal, flujo de trabajo, cantidad de usuarios, costos y equipos instalados dentro del laboratorio.

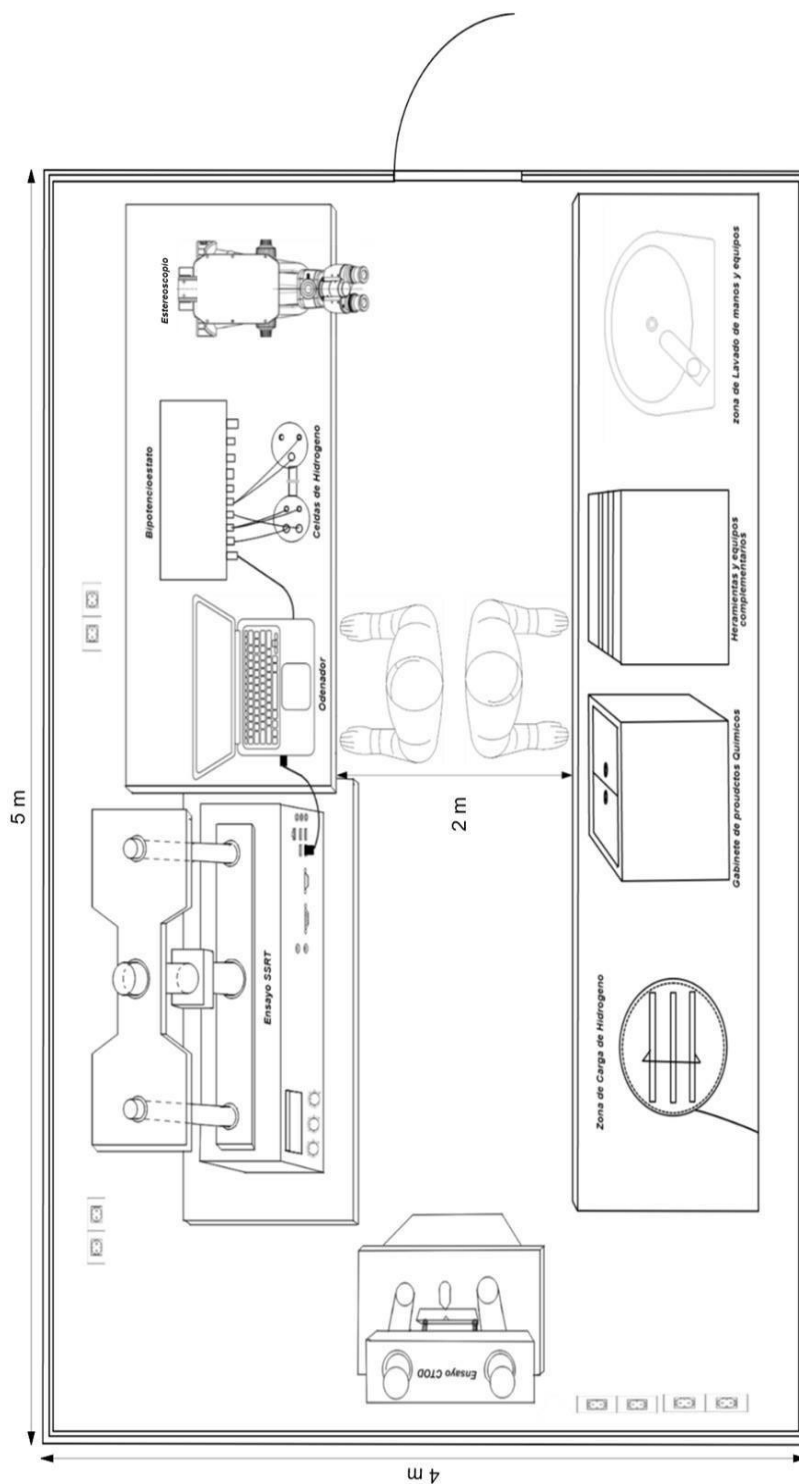
Después de hacer el estudio documental y visual, se llega a la conclusión que esta requiere un espacio estimado de 5m x 4m, esta área está destinada a almacenar todos los equipos descritos, teniendo un distanciamiento prudente entre ellos y la pared del recinto, se toma en cuenta el flujo de personal esperado y con el fin de aumentar la viabilidad se reduce el área a la mínima requerida, la norma UNE-EN 14056 Mobiliario de laboratorio proporciona recomendaciones que se deben usar y tener en cuenta para el diseño y la instalación, esta brinda información fundamental para crear espacios generosos, para este caso se cuenta con dos mesones largos ubicados de forma paralela y el área ocupada por los equipos de ensayo SSRT y CTDO, en el mesón más pequeño, se propone ubicar la zona de administración de datos, el bipotenciostato, zona de pruebas con celdas H y otros arreglos electroquímicos con celdas y el microscopio, en el mesón más grande estará ubicado la zona de carga química de las muestras, gabinete de almacenamiento de productos químicos, zona de almacenamiento de herramientas y equipos y área de lavado, debe contar con buena iluminación, buena ventilación, correcta gestión de almacenamiento de equipos y productos químicos, sistemas de seguridad como detectores de humo, extintores y equipos lava ojos, duchas y equipos de primeros auxilios en caso de exposición Química, todos estos parámetros están contemplados en la normas de seguridad y salud en el trabajo de la ISO 45001, donde se encuentran descritos los parámetros de seguridad necesarios.

Se proponen 4 puntos de energía los cuales cuentan con 2 conectores para un total de 8 puertos, estos puntos de conexiones deben ser de 110 V/220V para tener un rango amplio según

los requerimientos de los equipos, uno para el potencióstato, otro para la conexión del ordenador, otro para el equipo SSRT, uno para el CTOD , el resto de enchufes serán destinados para conexiones de dispositivos externo, ya sea equipos complementarios, móvil, entre otros en caso que lo requiera, el consumo de energía es relativamente bajo ya que la demanda energética de estos equipos son bajos, esto es porque los voltajes y niveles de corrientes usados en las pruebas son bajos. A continuación, se presenta un dibujo técnico que presentan los principales equipos y una propuesta a la distribución de los mismo, ver Figura 29.

Figura 30.

Propuesta de distribución de equipos para pruebas electroquímicas



Esta distribución es un bosquejo representativo y puede ser modificado según las especificaciones técnicas requeridas, por lo que no es una medida que encierre la posibilidad añadir, quitar y reubicar equipos según se requiera.

4.3.2 Análisis de Costos de equipos

A continuación se presenta un análisis de los costos, este tiene como finalidad detallar los gastos que giran en torno a la compra de equipos y materiales, no se tienen en cuenta costos de mantenimiento y operación ya que no se logró encontrar información precisa en cuanto a los costos asociados, esto paso es importante, ya que permite tener una idea del presupuesto necesario para ejecutar el proyecto, los costos anteriormente mencionados se encuentran plasmados en las siguientes tablas, aquí se muestra un análisis de precio unitario, en este se agrupa los costos de cada prueba.

Tabla 1.

APU equipos básicos laboratorio de pruebas electroquímica

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO DE EQUIPOS Y MATERIALES BASES PARA PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS.			
Equipos y materiales	Cant.	Precio Unitario	Precio Total
Bipotenciostato	1	\$90'000.000	\$ 90'000.000
Electrodos	5	\$1'000.000	\$ 5'000.000
Celdas Electroquímicas	4	\$1'500.000	\$ 6'000.000
Ordenador	1	\$2'500.000	\$2'500.000
Software	1	Incluido con el Bipotenciostato	\$ 0
Estereoscopio	1	\$35'000.000	\$35'000.000
	Total		\$138'500.000

Tabla 2.*APU Prueba SSRT con carga Electroquímica in Situ*

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO DE EQUIPOS Y MATERIALES PARA ENSAYO SSRT CON CARGA IN SITU			
Equipos y materiales	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Equipo Ensayo SSRT	1	\$5'000.000	\$ 5'000.000
Productos químicos para la prueba	1	\$500.000	\$ 500.000
Total			\$ 5'500.000

Tabla 3.*APU de equipos y materiales para prueba de permeación de hidrógeno*

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO DE EQUIPOS Y MATERIALES PARA PERMEACIÓN DE HIDRÓGENO			
Equipos y materiales	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Celdas H	2	\$3'000.000	\$ 6'000.000
Productos químicos para la prueba.	1	\$500.000	\$ 500.000
Total			\$ 6'500.000

Tabla 4.*APU Permeación de Hidrógeno.*

ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO DE EQUIPOS Y MATERIALES PARA ENSAYOS CTOD			
Equipos y materiales	Cant.	Precio Unitario en el mercado	Precio Total
Equipo de servohidráulica	1	\$100'000.000	\$100'000.000
Productos químicos para carga de hidrógeno.	1	\$500.000	\$500.000
Total			\$100'500.000

Luego de tener los precios de las diferentes pruebas, se procede a sacar el cálculo total requerido para la compra de todos los equipos del laboratorio, se toma el total de los APU de cada prueba y se procede a hacer un cálculo total.

Tabla 5.

Precio total de los equipos contemplados para el montaje del laboratorio

COSTO TOTAL DE EQUIPOS Y MATERIALES PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS	
Prueba	Costo (Pesos colombianos)
Equipos básicos	\$ 138'500.000,00
Ensayo SSRT	\$ 5'500.000,00
Método Devathan-Stachurki (Permeación de Hidrógeno)	\$ 6'500.000,00
Ensayo CTOD	\$ 100'500.000,00
Total Ensayos	\$ 251'000.000,00

Se observa que el costo total de los equipos es de \$ **251'000.000,00**, se debe tener en cuenta que, en este análisis de precios, no se contemplan gastos de envío, instalación, calibración, puesta en marcha, costos de mantenimiento de equipos e instalaciones, estos se deben contemplar y estudiar cuidadosamente en caso de aplicación a prospectos reales.

4.3.3 Disposición de residuos y manejo medioambiental de la instalación

La disposición de residuos es importante en todo contexto de ingeniería, para este caso el manejo adecuado de residuos y la gestión medioambiental para el laboratorio de materiales es un paso fundamental para garantizar la sostenibilidad y responsabilidad del lugar, esto con el fin de

minimizar el impacto medio ambiental y cuidar el recurso humano, por esta razón bajo las normas locales y estándares internacionales se deben disponer dichos residuos (Bayona et al, 2019).

En los laboratorios se suelen manejar diferentes tipos de sustancias, para este caso la mayoría de fluidos usados para la carga de hidrógeno y para la cámara atmosférica del ensayo SSRT en sitio, son salmueras con concentraciones específicas de electrolitos que ayudan al proceso de permeación de hidrógeno a través de la muestra metálica, estas salmueras no suelen ser altamente contaminantes, sin embargo para Peña (2023), las láminas cargadas de hidrógeno pueden presentar riesgos debido a la absorción de hidrógeno y posterior desorción, la cual consiste en la liberación progresiva del mismo, este afirma que este proceso varía según la aleación metálica, sin embargo logra sus mayores efectos en condiciones de altas de temperatura y presión, aunque no considera el uso de corriente eléctrica para inducir el proceso, otro caso sería si en la cámara atmosférica para las pruebas SSRT o en el procesos de cargas de hidrógenos, se use cargas de hidrógeno gaseoso a altas presiones, estas pruebas son muy usadas ya que actualmente se transporta hidrógeno gaseoso puro a altas presiones, aquí la norma ASME B31.12 es fundamental ya que da indicaciones sobre ensayos de tuberías y conductos que transportan H₂ (Zick/Roell, sf).

Otro caso que se puede presentar es que se opte por otras sustancias corrosivas presentes las cuales suelen estar en ambiente ricos en hidrógeno, por ejemplo, para el caso de los hidrocarburos suelen tener presencia de sustancias altamente corrosivas dentro de sus posibles componentes tales como HCL, H₂S, mercaptanos y ácidos Naftenos (-COOH) (Peña et al, 2010), estas sustancias pueden ser usadas para evaluar su efecto en el acero a diferentes concentraciones. En todo caso, la instalación debe contar con puntos de disposición de sustancias ordinarias, reciclables y peligrosas, estas últimas son las de mayor interese ya que es la que más dificultad presenta en el proceso. Estos residuos pueden ser gestionados bajo las normas ISO 14001: Sistema

de Gestión ambiental y la ISO 45001: Sistema de gestión de la seguridad y salud en el trabajo, estas sugieren tener un proceso controlado al momento de disponer los estos desechos. Como todo sistema de gestión se debe crear un proceso de planificación el cual se basa inicialmente en identificar qué tipo de residuos, reactivos o materiales se van a manejar, seguido se debe hacer un estudio de la normativa vigente, a nivel local, nacional e internacional y verificar que residuos podrían poner en riesgo la salud ambiental, teniendo claro esto, se asegura un sitio adecuado para el almacenamiento y bajo los protocolos de la normativa y política de disposición, se procede a ser transportado y dispuesto (Bayona, 2019).

5. Conclusiones

Es importante evaluar los costos asociados a las máquinas de ensayos e insumos, ya que, estos pueden cambiar según diferentes variables, tales como proveedores, país de compra, tasas de cambio, entre otros. Por tal razón, los costos asociados a compra de equipos e inversión inicial se pueden ver drásticamente afectado por esto, se recomienda ser muy cuidadoso, considerando que los precios establecidos corresponden al promedio del precio del mercado, se sugiere verificar al menos 3 proveedores por cada estación de ensayo para evaluar viabilidad y verificar presupuestos.

Para el cálculo de presupuesto para un proyecto de montaje de laboratorio se deben tener en cuenta en el análisis de precio, otros gastos que no se estudiaron, como gastos de envío, instalación, calibración, puesta en marcha, costos de mantenimiento de equipos e instalaciones,

estos se deben contemplar y estudiar cuidadosamente para planificar y gestionar acertadamente los recursos.

El estudio realizado genera una base conceptual importante para el entendimiento de los fenómenos físicos, químicos, termodinámicos y metalúrgicos relacionados con la interacción entre el acero y el hidrógeno, esto quiere decir que puede ser usado para comprender algunos fenómenos relacionados, además proporciona información relevante para llevar a cabo propuestas de proyectos sobre el montaje de laboratorios metalmecánicos, específicamente para el estudio de los efectos del hidrógeno sobre aceros industriales.

Este tipo de laboratorios suelen tener también una estación para preparar muestras, cortarlas, pulirlas y dejarlas en condiciones indicadas para ser estudiadas, las probetas de cada prueba son diferentes y muchas veces se deben fabricar, por otra parte, hay laboratorios que solo se encargan de hacer las pruebas y el cliente envía la pieza con las medidas específicas para cada equipo de ensayo.

La conceptualización de este laboratorio permite apreciar el proyecto de manera realista, abarcando todo lo que este implicaría para su construcción, costos, equipos, ensayos, entre otros, de tal manera que pueda estudiarse su viabilidad y conseguir llevar a cabo su realización, el cual estaría ubicado en las instalaciones de la Universidad Industrial de Santander, Sede Guatiguará para el uso y aprovechamiento del GIC.

6. Recomendaciones

Los costos asociados pueden variar según el mercado, método de compra, tipos de marca, costes de envío, tasa de cambio, por lo que los valores deben evaluarse al momento de ser tomados para hacer cálculos reales, con lo que se deberían considerar la compra de equipos de segunda mano en buen estado para reducir costos de inversión.

Pueden descartarse o agregarse pruebas al diseño conceptual según la necesidad de las pruebas, presupuesto, espacio, ente otros factores, con el fin de adaptar la idea a el alcance requerido y objetivos propuestos de algún proyecto de laboratorio de estudios de aceros y metales sometidos a cargas de hidrógeno.

Se puede optar por usar fluidos asociados a procesos de transporte de hidrocarburos como HCl, H₂S, mercaptanos y polisulfuros, sin embargo, se debe tener en cuenta todas las precauciones que giran en torno a la seguridad y manejo de productos químicos peligrosos, así como su posterior disposición.

Referencias Bibliográficas

ASTM. (2013). *ASTM E1820 -13: Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*.

[Norma Técnica]. <https://www.astm.org/e1820-11e01.html>

ASTM. (2018). *ASTM G148. Standard Practice for Evaluation of Hydrogen Uptake, Permeation, and Transport in Metals by an Electrochemical Technique*. [Norma International]

<https://www.astm.org/g0148-97r18.html>

Bayona, J. E. (2019). *Formulación de una propuesta de mejora para el proceso de almacenaje de sustancias peligrosas y materias primas, basado en la norma ISO 9001: 2015 e ISO: 45001*

2018, en la empresa industrias POLICAR de la ciudad de Bogotá. [Tesis de pregrado,

Universidad Cooperativa de Colombia].

[https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/735e8d24-d56c-49c4-8ea9-](https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/735e8d24-d56c-49c4-8ea9-7d55669b283c/content)

[7d55669b283c/content](https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/735e8d24-d56c-49c4-8ea9-7d55669b283c/content)

CAB (s.f.) *Daño por hidrogeno*

https://www.cab.cnea.gov.ar/ieds/images/extras/hojitas_conocimiento/2009/pag_07_y_08_dano_por_hidrogeno-ovejero_garcia.pdf

Casquete, A. (2016). *Técnica del ruido electroquímico para el estudio del comportamiento frente a la corrosión de los aceros inoxidables (wrought y pulvimetalúrgicos)*. [Tesis de pregrado,

Universidad de Valladolid]. [https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/18222/TFG-I-](https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/18222/TFG-I-419.pdf?sequence=1)

[419.pdf?sequence=1](https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/18222/TFG-I-419.pdf?sequence=1)

Fabre, P. (2020). *Estudio electroquímico de la corrosión asistida por esfuerzo de un acero API X70 inmerso en agua de formación con diferentes concentraciones de inhibidor*. [Tesis de

- maestría, Universidad Veracruzana].
<https://www.uv.mx/veracruz/mic/files/2022/04/Fabre-Pulido-Jecsan.pdf>
- Flores, L.M. (2019). *Estudio del funcionamiento de los aditivos para limitar la absorción de hidrógeno durante el proceso de electrodeposición de níquel*. [Tesis de maestría, Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica].
<https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/410/1/TESIS%20LUIS%20MANUEL%20FLORES%20MELO.%202019%20MAE%20a.pdf>
- Flores, M. I. (2013). *Estudio electroquímico del fenómeno de corrosión de aceros API 5L utilizados en sistemas de ductos que transportan hidrocarburos*. [Tesis de maestría, Universidad Veracruzana]. <https://www.uv.mx/veracruz/mic/files/2022/04/Flores-Cocuyo-Milagros-Irais.pdf>
- French, M.J. (1984). *Conceptual design for engineers*. Springer.
- Funes, A. (1982). *Daño por hidrógeno en los metales particularmente en aceros*. [Comisión general de energía atómica].
https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/14/749/14749336.pdf
- García, R. (2014). *Inhibidores de corrosión de acero en medios ácidos a partir de extractos naturales*. [Tesis doctoral, Universidad de Baja California].
<https://digital.csic.es/bitstream/10261/93762/1/Tesis%20Ramses%20Garc%C3%ADa.pdf>
- Gonzales Arrollo, L. (2020). *Electroquímica: conceptos básicos y usos en procesos industriales*. [Tesis de pregrado, Universidad del Valle].
- Horváth, I. (2005). On some crucial issues of computer support of conceptual design. *Product Engineering*, 123–142.

- ISO. (2014). *17081:2014 - Method of measurement of hydrogen permeation and determination of hydrogen uptake and transport in metals by electrochemical technique*, International Organization of Standardization. [Norma internacional].
<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/64514/65afecae4ef34e4596556fdd264850a1/ISO-17081-2014.pdf>
- Morante, J. R., et al. (2020) *Hidrógeno. Vector energético de una economía descarbonizada*. Fundación Naturgy, <https://www.fundacionnaturgy.org/publicacion/hidrogeno-vector-energetico-de-una-economia-descarbonizada>
- Orduz, J. S Y Martinez, A. (2022). *Análisis de diferentes mecanismos de daño por hidrógeno presentes en un reactor de una planta de hidrot ratamiento en una refinería*. [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander].
<https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/72636dfb-7672-41e1-8f3e-d6cb64717e0b/content>
- Ovejero, J. (2009). *Una mirada a daño por hidrógeno en materiales metálicos*. IEDS.
https://www.cab.cnea.gov.ar/ieds/images/extras/hojitas_conocimiento/2009/pag_07_y_08_dano_por_hidrogeno-ovejero_garcia.pdf
- Padilla, E. D. (1999). Aplicaciones de los aceros inoxidables. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 2(3), 11-22.
- Peña, D. Y., González, R., Quiroga, H., & Serna, A. (2010). Evaluación del efecto corrosivo de los crudos pesados sobre el acero 5cr-1/2mo utilizado en las unidades de destilación. *Revista ION*, 23(1). <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaion/article/view/960>
- Peña, V. M. & Prada, J. S. (2023). *Estado del arte de los materiales utilizados para el transporte y almacenamiento de Hidrógeno*. [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander].

- <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/4131e610-f030-42c6-827d-17339b3668ee/content>
- Pérez, A. M. (2015). *Estudio de la difusión y fragilización por hidrógeno de un acero inoxidable Super Duplex*. [Tesis doctoral, Universidad de Antioquia].
https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/7419/1/PerezAna_2017_EstudioDifusionFragilizacion.pdf
- Pulido, F. J. (2020). *Estudio electroquímico de la corrosión asistida por esfuerzo de un acero API X70 inmerso en agua de formación con diferentes concentraciones de inhibidor*. [Tesis de Maestría, Universidad Veracruzana].
<https://www.uv.mx/veracruz/mic/files/2022/04/Fabre-Pulido-Jecsan.pdf>
- Rodríguez Pérez, D. I. (s.f.). Análisis de la cinética de nucleación y crecimiento de grietas individuales inducidas por hidrógeno en aceros bajo carbono de grado API 5L.
- Rodríguez, C., et al. (2012). Aplicación del ensayo spt en la caracterización mecánica de distintos tipos de acero. *Anales de Mecánica de la Fractura*, 579-584.
- Universidad de Burgos. (s.f.). *Hidrogen Capabilities*. [Archivo PDF].
https://www.ubu.es/sites/default/files/portal_page/files/presentacion-h2lab.pdf
- Villalobos, J. C., Serna, S. A., Campillo, B., Flores, O., López, E. (2015). Acero micro aleado experimental sometido a tratamientos térmicos de revenido y su efecto sobre la fragilización por hidrógeno. *Revista I+D Tecnológico*.
<https://revistas.utp.ac.pa/index.php/id-tecnologico/article/download/590/html?inline=1>
- Wang, C et al., (2022). Study on hydrogen embrittlement susceptibility of X80 steel through in-situ gaseous hydrogen permeation and slow strain rate tensile tests. *Revista international journal of hydrogen Energy*, 48(2023), 243-256.

https://www.researchgate.net/publication/364466925_Study_on_hydrogen_embrittlement_susceptibility_of_X80_steel_through_in-situ_gaseous_hydrogen_permeation_and_slow_strain_rate_tensile_tests

Zafra, A. (2016). *Estudio de la difusividad y del agrietamiento por hidrógeno en aceros estructurales*. [Tesis de maestría, Universidad de Oviedo].

https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/39159/TFM_AlfredoManuelZafraGarcia.pdf?sequence=4&isAllowed=y

ZickRoell. (s.f.). *ASTM F1624 Fragilización por hidrógeno de materiales metálicos de alta resistencia*. <https://www.zwickroell.com/es/sectores/energia/astm-f1624/>.