

GREENH₂PIPES

DESARROLLO DE COMPONENTES INNOVADORES PARA LA GENERACIÓN DE H₂ POR ELECTROLISIS, SU INYECCIÓN A LA RED DE GAS NATURAL Y SU TRANSPORTE A PARTIR DE PORTADORES LÍQUIDOS

ENTREGABLE 5.1.

Resultados del impacto del hidrógeno en materiales y componentes de la red expuestos a mezclas GN/H₂ y selección de materiales compatibles con la presencia de H₂

RESPONSABLE(S)	ENAGAS
PARTICIPANTE(S)	TEKNIKER, ENAGAS

INDICE

1.	INTRODUCCIÓN DE LA ACTIVIDAD Y TAREA.....	3
2.	OBJETO DE LA ACTIVIDAD	3
3.	ALTERNATIVAS PARA LOS ENSAYOS	4
4.	ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL IMPACTO DE H ₂ EN MATERIALES.....	8
4.1.	Bases conceptuales.....	8
4.2.	Metodología	10
4.3.	Diseño de probetas.....	10
4.4.	Optimización de la metodología	12
5.	RESULTADOS Y CONCLUSIONES	14
5.1.	Resultados de los ensayos en atmósfera de H ₂ (Fase 1 y 2)	14
5.2.	Resultados del estudio de inhibidores gaseosos (Fase 3)	16
5.3.	Análisis viabilidad ensayos presión/descompresión (Fase 4)	17
5.4.	Incidencias identificadas durante los ensayos	20
5.5.	Comparativa técnica entre ISO 11114-4 y ASME B31.12	22
5.6.	Conclusiones.....	23
6.	ANEXOS.....	24
7.	BIBLIOGRAFÍA	25

1. INTRODUCCIÓN DE LA ACTIVIDAD Y TAREA

Este documento tiene por objeto describir los trabajos realizados durante el ejercicio 2023 correspondientes a la tarea T5.2–Estudio de la red de gas natural para la inyección de H₂.

Para el desarrollo de esta tarea se ha contado con la colaboración de la D. de Servicios Técnicos de Enagás Transporte SAU, para la realización de la subtarea *T5.2.1- Construcción del banco de ensayos HyLoop* y de TEKNIKER que se ha encargado de las subtareas *T5.2.2-Ensayos de caracterización del impacto de hidrógeno en materiales y componentes de la red de gas* y *T5.2.3-Estudio de inhibidores de fragilización del acero*.

Como paso previo a los trabajos desarrollados en el presente ejercicio se acometió la *T.1.3-Definición de las especificaciones para la inyección en red de gas natural* [1] en la que se analizaron los principales retos y requisitos para la descarbonización de la red de gas natural. Como resultado de dicha actividad se emitió un informe en el que se recoge la información sobre el impacto que la inyección de hidrógeno puede tener en la red de transporte [2], principalmente en aquellas áreas o subsistemas con implicación directa en el proyecto GreenH2Pipes, y sobre la que se asientan las bases de los trabajos realizados en la presente tarea.

2. OBJETO DE LA ACTIVIDAD

La inyección de hidrógeno en la red de gas natural se identifica como una estrategia para la descarbonización de sectores de difícil electrificación, a través del uso de una infraestructura ya existente. Para ello es necesario diseñar las instalaciones específicas en las que se cumplan con los requisitos establecidos por la regulación sobre calidad de gas y seguridad.

El uso de la infraestructura gasista existente es esencial para acercar el hidrógeno a sectores de difícil electrificación. No obstante, es necesaria más investigación para conocer la concentración de hidrógeno admisible en la red de gas sin consecuencias para su seguridad, integridad y operación. En el caso de España, el transporte de hidrógeno en mezclas con gas natural es un campo todavía sin desarrollar.

Para llevar a cabo estos estudios, como parte del alcance de los trabajos realizados en la presente tarea, T5.2.1, Enagás consideró la construcción de una instalación de referencia consistente de un anillo para la realización de ensayos de componentes y materiales de la red de gas con mezclas de gas natural e hidrógeno, proyecto denominado HyLoop, que permitiera avanzar en la resolución de las actuales cuestiones técnicas que implica la inyección de hidrógeno en la red de gas. Finalmente, debido a ciertos retrasos debidos a la modificación del alcance y el diseño de las instalaciones del Hyloop, Enagás tomó la decisión de buscar alternativas que permitieran su ejecución.

En junio de 2024 se firma un acuerdo de colaboración entre FHa y Enagás para la realización del ensayo para el estudio sobre el envejecimiento del material de tubería de transporte de gas en presencia de H₂, conforme a la propuesta hecha por Enagás y el diseño expuesto por la FHa. La caracterización de los materiales habituales de la red de gas natural en atmósferas de H₂ podrán ejecutarse en TEKNIKER.

Por otro lado, una de las mayores incertidumbres de la inyección de hidrógeno en la red de gas natural es su impacto en los materiales para las condiciones de operación existentes a alta presión. En esta tarea, T5.2.2, se realizarán ensayos para evaluar el comportamiento mecánico de los materiales de los distintos elementos o componentes de la red española de transporte de gas, así como de los aceros utilizados en la red y su sensibilidad a sufrir fragilización por hidrógeno. Para ello, se realizará un estudio del comportamiento mecánico y de la durabilidad de diferentes materiales tanto materiales base, como materiales con unión soldada y recubrimientos, utilizados en la red de gas natural cuando están en presencia de mezclas de H₂GN.

La pureza del hidrógeno es importante para las aplicaciones donde es utilizado este gas, pero en el transporte por tubería ciertas impurezas pueden emplearse para retardar o evitar el fenómeno de agrietamiento debido a la presencia del hidrógeno. Esto es debido a que la permeabilidad del hidrógeno en los metales puede reducirse por reacción de la superficie del metal con los inhibidores. Como parte de esta tarea, T5.2.3, se realizarán ensayos para la identificación de estas sustancias inhibidoras y el manejo adecuado de su concentración para su consideración en el transporte del hidrógeno, tanto puro como en mezcla con gas natural.

3. ALTERNATIVAS PARA LOS ENSAYOS

Como se indicó anteriormente, tras contactar con diversos centros tecnológicos y de investigación nacionales, solo la **FHa** disponía de los recursos necesarios para realizar ensayos de caracterización de materiales en condiciones reales de operación, conforme a los requisitos técnicos del proyecto, ciclos de compresión y descompresión. En ningún caso ha sido posible encontrar una alternativa para la realización de los ensayos de la unidad de separación de H₂SITE.

En junio de 2024 se firma un acuerdo de colaboración entre FHa y Enagás para la realización del ensayo para el estudio sobre el envejecimiento del material de tubería de transporte de gas en presencia de H₂, conforme a la propuesta hecha por Enagás y el diseño expuesto por la FHa. Véase la siguiente figura (*Fig.1*).

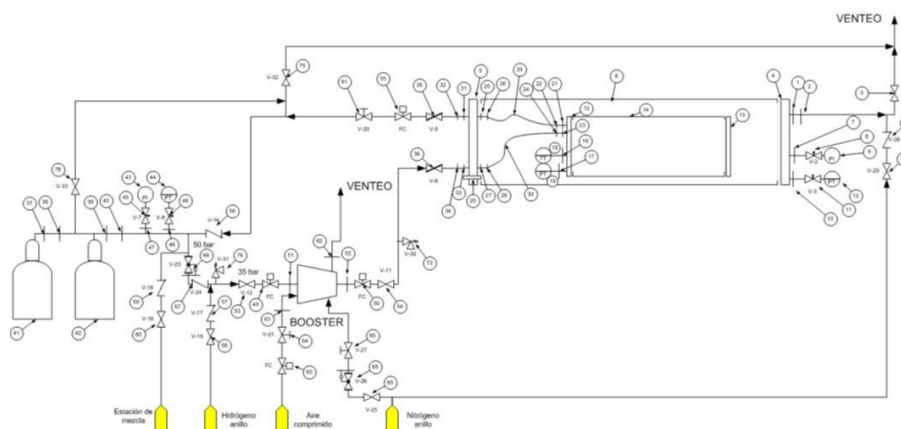


Fig.1.- PI&D de la instalación de ensayo de envejecimiento del material de la tubería de transporte de gas natural.

Para la realización de los ensayos de caracterización de materiales en condiciones reales de operación, Enagás suministró a la FHa, además de la tubería, un equipo adaptado específicamente para este propósito. El equipo, originalmente una trampa de rascadores de 36x40" y 7 metros de longitud, fue modificado para funcionar como cámara de seguridad. Se cerró en su extremo de 36" mediante un cap soldado, y se equipó con bridas ciegas para garantizar el aislamiento del interior. Estas bridas fueron posteriormente taladradas para permitir la soldadura de *nipples* roscados de 1/2", facilitando las conexiones necesarias con el interior del sistema.



Fig. 2.- Equipamiento de gasoducto disponible en los almacenes de Enagás (trampa de rascadores) como propuesta de cámara de seguridad para los ensayos (equipo certificado para su uso a presión).

El conjunto ha sido homologado y certificado como equipo a presión, cumpliendo con los requisitos normativos aplicables. Además, se incorporó una puerta de acceso al interior, certificada bajo el estándar ASME VIII Div. 1, que permite la instalación de probetas o equipos de análisis. Las conexiones con el sistema de almacenamiento de gas y el compresor se realizan a través de las tubuladuras existentes, completando así la funcionalidad requerida para los ensayos.

La adaptación del equipo suministrado por Enagás ha sido fundamental para llevar a cabo el ensayo sobre el envejecimiento de materiales en presencia de hidrógeno, en el marco del acuerdo de colaboración firmado con FHa. Este ensayo permitirá obtener datos relevantes sobre el comportamiento del acero bajo condiciones reales de presión y exposición prolongada al hidrógeno, información clave para evaluar la seguridad y durabilidad de futuras redes de transporte de gas en escenarios de uso con hidrógeno.



Fig. 3.- Instalación de ensayos de envejecimiento acelerado de un carrete de tubería aplicando ciclos de presión con hidrógeno.

La tubería objeto del ensayo, material de grado X60, de 26" de diámetro y 3,4 metros de longitud, fue instalada en el interior de la cámara de seguridad previamente adaptada para este fin. Esta tubería incorpora una soldadura circunferencial representativa de las utilizadas habitualmente por Enagás en sus redes de transporte.

La FHa ha desarrollado un sistema automatizado para la realización de ensayos de descompresión cíclica con hidrógeno (*Fig.*). Este sistema está diseñado para reproducir condiciones reales de operación en redes de transporte de gas, simulando los ciclos de presión y descompresión que se producen durante el funcionamiento habitual de dichas infraestructuras.

El objetivo del procedimiento es acelerar el envejecimiento del material sometido a ensayo, permitiendo así analizar su comportamiento estructural y su resistencia a la fragilización inducida por hidrógeno. Esta información es fundamental para determinar la idoneidad de los materiales empleados en redes de transporte de gas natural para su uso en el transporte de hidrógeno, garantizando su seguridad y resistencia en condiciones reales de operación.

El sistema desarrollado por la FHa incluye una interfaz de control que permite gestionar de forma automática el proceso de compresión y descompresión. Esta interfaz facilita la configuración y monitorización de parámetros críticos del ensayo, tales como el número de ciclos, los tiempos de compresión y descompresión, y las presiones máximas y mínimas. Además, incorpora indicadores en tiempo real de presión en distintos puntos del sistema, así como opciones de control manual y configuración de alarmas de seguridad.

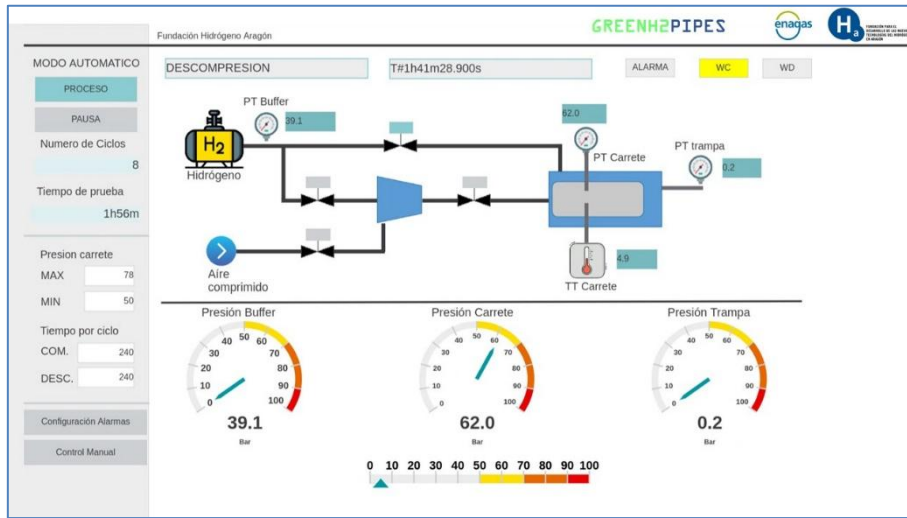


Fig. 4.- Interfaz desarrollado por la FHa para el control automático del proceso de compresión-descompresión, replicando las condiciones reales de operación para el estudio del envejecimiento de la tubería.

El diagrama asociado (*Fig.*) muestra el flujo de hidrógeno desde el tanque de almacenamiento hasta el carrito de tubería sometido a ensayo, mostrando cuales son los valores de presión en distintos puntos del sistema y cómo se replican las condiciones reales de operación para estudiar el envejecimiento del material.

Finalizado el ensayo de envejecimiento, se han registrado los siguientes datos:

- Duración del ensayo: **169 días** (~6 meses)
- Número de ciclos realizados: 465
- Frecuencia media: 2,75 ciclos/día
- Equivalente de envejecimiento: **1,27 años**

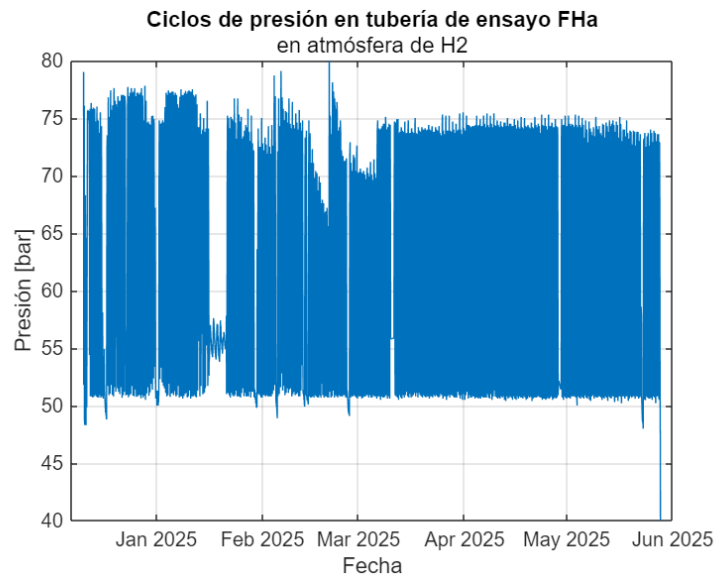


Fig. 5.- Representación de los valores de presión a la que ha sido sometida la tubería en el ensayo de envejecimiento acelerado.

Tras la finalización del ensayo, se lleva a cabo una evaluación detallada de las propiedades mecánicas del material en los laboratorios de TEKNIKER. El objetivo es identificar posibles variaciones provocadas por la exposición prolongada al hidrógeno, lo que permitirá validar su comportamiento frente a la fragilización y su viabilidad para aplicaciones futuras en redes de transporte de hidrógeno.

4. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL IMPACTO DE H₂ EN MATERIALES

Enagás realizará un estudio del comportamiento mecánico y de la durabilidad de diferentes materiales, tanto materiales base como en soldaduras de construcción (zona afectada térmicamente y soldadura), utilizados en la red de transporte de gas natural para ver su comportamiento cuando se inyecte hidrógeno en la red ("blending", mezclas de H₂GN) y también en previsión de reconversión de dicha infraestructura a transporte de 100% H₂. Se realizará para ello ensayos simulando condiciones reales de operación (presión de H₂ y tensión equivalente a la presión de operación).

La posibilidad de determinar algunas propiedades mecánicas de los aceros de una forma más sencilla que la empleada hasta ahora, aplicando la norma ISO 11114-4 [3] método "B", están suscitando interés en algunos de los más reputados centros y grupos de investigación del mundo, como el *National Institute of Standards and Technology* (NIST), EPRG, PRCI, etc., así como principales asociaciones de fabricantes y TSO (Transmission System Operators) gasistas, los cuales están inmersos en un proceso tanto de adaptación de sus redes existentes de gas al transporte de hidrógeno como a la construcción de nuevas redes dedicadas.

Se pretende con estos estudios correlacionar los valores del factor de intensificación de tensiones (K_{IH}) obtenidos de una forma más directa y sencilla, con los determinados por los métodos tradicionales basados en normativa ASME (B31.12 [4], BPVC Sec. VIII Div.3 Art. KD-10) y ASTM (E1681 y E1820). Ello permitirá caracterizar materiales de una forma más rápida y simple y con ello determinar su aptitud para su empleo en redes de transporte de hidrógeno.

4.1. Bases conceptuales

Para el estudio previsto es necesario preparar el material a estudio mediante la aplicación de técnicas de preagrietamiento de las muestras que, combinado con ensayos en ambientes de hidrógeno, permite estudiar y comprender el efecto que el hidrógeno puede tener en el material y concretamente en la fragilización por hidrógeno, un fenómeno crítico que puede comprometer la integridad de los materiales metálicos

El preagrietamiento implica la creación de una grieta inicial en una probeta de material, generalmente mediante métodos de fatiga, para simular defectos o daños que podrían ocurrir en condiciones de operación. El preagrietamiento permite estudiar cómo se comporta una grieta existente en el material bajo diversas condiciones de prueba.

Cuando las probetas preagrietadas se exponen a un ambiente de hidrógeno durante los ensayos, los átomos de hidrógeno pueden difundirse en el material y acumularse en la punta de la grieta. Esto puede causar una disminución en la resistencia del

material y aumentar la probabilidad de propagación de la grieta al alterar sus propiedades mecánicas como la ductilidad y la resistencia a la fatiga, lo que se conoce como fragilización por hidrógeno.

Al realizar ensayos en probetas preagrietadas se puede evaluar cómo la fragilización por hidrógeno afecta a la resistencia del material facilitando la propagación de grietas. Se mide el factor de intensidad de tensiones de hidrógeno (K_{IH}) para determinar la susceptibilidad del material a la fragilización.

El factor de intensidad de tensiones es un coeficiente que depende de la geometría del material, el tamaño y la ubicación de la grieta, así como de la magnitud y distribución de las cargas aplicadas y disminuye conforme los átomos de hidrógeno se absorben y difunden en las grietas de las probetas.

Existen tres modos principales de carga que se describen mediante el factor de intensidad de tensiones:

- *Modo I (Modo de apertura)*: Es el modo más común y ocurre cuando las caras de la grieta se separan perpendicularmente a la dirección de la grieta. Se representa con K_I y se asocia con tensiones de tracción normales a la superficie de la grieta.
- *Modo II (Modo de deslizamiento)*: Sucede cuando las caras de la grieta se deslizan una sobre la otra en una dirección paralela al frente de la grieta. Se representa con K_{II} y se relaciona con tensiones de cizalladura en el plano de la grieta.
- *Modo III (Modo de desgarro)*: Se da cuando las caras de la grieta se mueven relativas entre sí y paralelas al frente de la grieta. Se representa con K_{III} y está asociado con tensiones de cizalladura fuera del plano de la grieta.

La teoría elástica lineal predice que la distribución de tensiones, σ , cerca de la punta de la grieta tiene la forma:

$$\sigma_{i,j} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta)$$

donde K es el factor de intensidad de tensiones, r es la distancia desde la punta de la grieta, y θ es el ángulo polar en coordenadas centradas en la punta de la grieta. La función $f_{ij}(\theta)$ varía con la carga y la geometría.

La fragilización por hidrógeno está estrechamente relacionada con las fracturas en materiales:

- *Interacción con defectos*: El hidrógeno tiende a difundirse y concentrarse en defectos del material, como las grietas, debido a su pequeño tamaño atómico. Esto puede aumentar la tensión localizada en la punta de la grieta.
- *Reducción de la ductilidad*: La presencia de hidrógeno puede reducir la ductilidad del material, lo que significa que el material se vuelve más quebradizo y susceptible a la fractura bajo cargas que normalmente soportaría sin fracturarse.
- *Promoción de fracturas frágiles*: El hidrógeno puede facilitar la separación de los bordes de la grieta, promoviendo un modo de fractura frágil, incluso en materiales que normalmente fracturarían de manera dúctil.

- *Mecanismos de fractura:* La fragilización por hidrógeno puede causar fracturas transgranulares (a través de los granos del material) o intergranulares (a lo largo de los límites de grano), dependiendo del material y las condiciones del entorno.
- *Efecto en la propagación de grietas:* El hidrógeno puede acelerar la propagación de grietas, lo que lleva a una falla prematura del material. Esto es particularmente peligroso en aplicaciones estructurales y de alta presión.

La fragilización por hidrógeno puede comprometer significativamente la integridad estructural de un material, llevando a fracturas que podrían no ocurrir en ausencia de hidrógeno.

Por tanto, los resultados de estos ensayos son fundamentales para seleccionar los materiales resistentes a la fragilización por hidrógeno, lo que es esencial para las aplicaciones como las que nos ocupan: transporte por tubería y diseño de componentes estructurales en entornos ricos en hidrógeno.

4.2. Metodología

Enagás se ha responsabilizado del acopio de material de interés para el proyecto, conforme a la especificación de los materiales indicados a TEKNIKER durante la fase de preparación del proyecto, y que se corresponden con los existentes en la red de transporte de gas natural que puede ser reconvertida al transporte de H₂, tanto en mezclas H₂GN como de H₂ puro. El material (tubos en carretes de 20", 26" y 30", grados X60 y X70) proviene de las instalaciones de Enagás y se remitió a CIMONTUBO para su corte, preparación y posterior soldadura de acuerdo con las especificaciones de Enagás y procedimientos homologados (soldadura automática, GMAW) y habitualmente empleados para la construcción de infraestructuras para Enagás.

Proceso Fabricación	Grado	NPS	Espesor (mm)	Proceso de soldadura	Material de aporte	Clamp	Revest.
H-SAW	X60	26"	7,92	GMAW	Hilo (ER70S-6)	Interno	Revest.
L-SAW	X70	20"	22,23	GMAW	Hilo (ER70S-6)	Interno	Revest.
H-SAW	X70	30"	14,27	GMAW	Hilo (ER70S-6)	Interno	Desnuda

Tabla 1.- Materiales ensayados.

4.3. Diseño de probetas

El diseño de las muestras necesarias para los ensayos se ha realizado de acuerdo con la norma ISO 11114-4, teniendo en cuenta la geometría de los tubos que se tenían que caracterizar y teniendo en cuenta también las capacidades del equipo **Autoclave Cormet** de TEKNIKER.

Una vez en disposición del material, tubos de distinto material con soldadura, éste se envió a EMOISA para proceder a la extracción y mecanización de 108 probetas, de distintas tipologías de tubo y tratamiento (material base, soldadura, afectado térmicamente), de acuerdo con las especificaciones de geometría dada en norma ISO 7539-6:2011 y mencionadas en la norma UNE-EN ISO 11114-4:2017 [3] por la que se van a regir los ensayos.

Se utilizan tres geometrías distintas para las muestras, seleccionadas en función del espesor y del diámetro exterior del tubo del que se extraen. En la figura siguiente se

muestran las tres configuraciones acordadas, donde puede observarse que el único parámetro que varía entre ellas es el espesor del material.

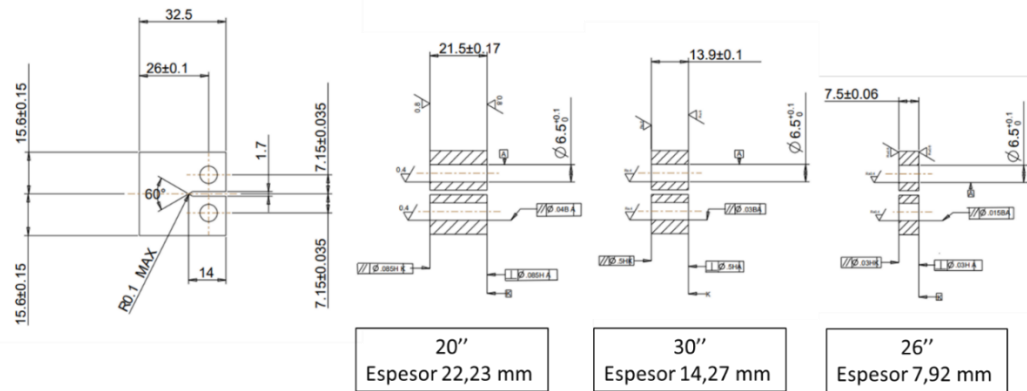


Fig. 1.- Dimensiones de las probetas de material para los ensayos según norma ISO 11114-4.

Para evaluar de forma precisa la susceptibilidad del material a la fragilización por hidrógeno, se han tomado muestras de tres zonas diferenciadas de la tubería (Fig.7): el material base (B), la zona de soldadura (S) y la zona afectada térmicamente (ZAT o HAT). Esta división responde a la heterogeneidad microestructural que se genera durante los procesos de fabricación y unión de los tubos.

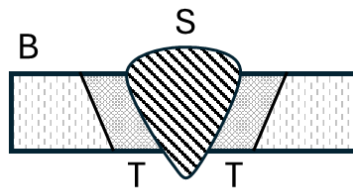


Fig. 7.- Zonas de material a ensayo: B=material base, T= material afectado térmicamente, S= zona con soldadura.

El material base representa el estado original del acero, sin alteraciones térmicas ni mecánicas significativas. Su comportamiento frente al hidrógeno sirve como referencia para comparar los efectos inducidos por procesos posteriores. Por otro lado, la zona de soldadura incluye el metal de aporte y la región fundida, que suele presentar microestructuras más duras y con mayor densidad de defectos, lo que puede incrementar su susceptibilidad a la fragilización.

La zona afectada térmicamente es especialmente crítica. Esta región, situada entre el metal base y la soldadura, ha sido sometida a temperaturas elevadas durante el proceso de unión, sin llegar a fundirse. Como resultado, su microestructura puede variar significativamente, generando gradientes de dureza, tensiones residuales y cambios en la distribución de inclusiones. Estas características hacen que esta zona sea una de las zonas más vulnerables a la penetración y acumulación de hidrógeno, y por tanto, a la aparición de grietas inducidas por este fenómeno.

Estudios recientes han demostrado que la fragilización por hidrógeno depende fuertemente de la microestructura local, y que zonas como la ZAT pueden presentar fractura frágil repentina, incluso bajo cargas moderadas [5]. Por ello, el análisis

separado de estas tres zonas permite obtener una visión completa del comportamiento del tubo frente al hidrógeno, identificar los puntos críticos y establecer recomendaciones específicas para su uso en redes de transporte de gas.

TEKNIKER llevó a cabo la primera fase de preparación de las muestras para los ensayos procediendo al preagrietamiento por fatiga cíclica a temperatura ambiente de las probetas. La actividad de preagrietamiento se realizó en los primeros meses del 2023 y, una vez se dispuso del sensor de crecimiento de grietas mencionado, se realizaron los ensayos en presencia de hidrogeno en presión.

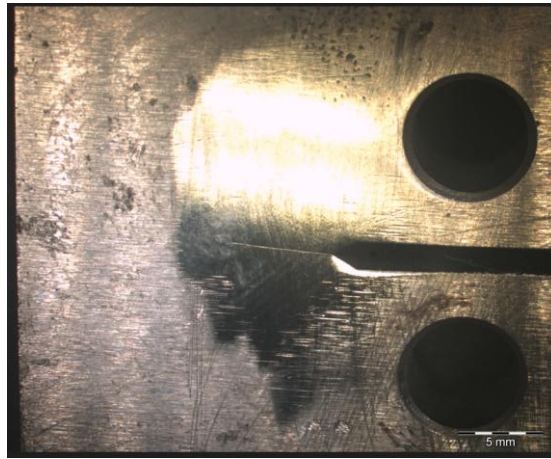


Fig. 8 – Muestra con preagrietamiento.

4.4. Optimización de la metodología

Durante el periodo de preparación del material, TEKNIKER ha procedido a la modificación del equipo Autoclave Cormet y a la adaptación del laboratorio en el que se ubicará dicho equipo, comprobando la seguridad del laboratorio para poder realizar los ensayos con hidrogeno en presión acometiendo las acciones necesarias para minimizar las posibles fugas de gas.

Alguna de estas acciones ha sido la determinación de:

- Volumen crítico de hidrógeno para la actuación de la centralita control del sistema de detección.
- Tiempo necesario para la renovación completa del aire del laboratorio.
- Caudal de fuga de hidrógeno a través de las juntas de sellado del equipo en las condiciones del ensayo (uso de He para su determinación experimental) y el correspondiente volumen de hidrógeno fugado durante el tiempo del ensayo.
- Volumen de hidrógeno fugado en el caso de rotura de la vasija en las condiciones de presión máxima de operación.
- Presión máxima de la vasija para que, en caso de rotura de la vasija, la cantidad de gas en la atmósfera haga que actúe la centralita de control del sistema de detección, asumiendo que no existen otros focos de emisión de hidrógeno.
- Presión máxima de la vasija para que, en caso de rotura de la vasija, la cantidad de gas en la atmósfera alcance el límite inferior de explosividad del hidrógeno, asumiendo que no existen otros focos de emisión de hidrógeno.

Los resultados obtenidos permiten afirmar que el laboratorio cuenta con las medidas de seguridad adecuadas para poder realizar los ensayos previstos y que los sistemas de detección y renovación de aire son los necesarios.

A continuación, se procedió a adaptar el equipo Autoclave Cormet para poder cumplir con lo indicado en la norma bajo la que se realizarán los ensayos, UNE-EN ISO 11114-4:2017 [3]. Ha sido necesario diseñar unos utensilios específicos que permiten el correcto agarre de las muestras y que generan el correcto esfuerzo para la muestra y el equipo. También, se ha comprobado la idoneidad del sensor de crecimiento de grietas en una atmósfera de hidrógeno y se ha optado por cambiar el sensor existente en el equipo por otro más específico para ello.

Las modificaciones del equipo se centraron en primer lugar en mejorar la precisión y la seguridad durante los ensayos.

El sensor de crecimiento de grieta fue mejorado para detectar cambios más pequeños y sutiles, lo que permite una monitorización más temprana y precisa de la propagación de grietas. Esto es crucial para prevenir fallos y garantizar la integridad estructural de los sistemas de tuberías.

- Se instaló el sensor *Direct Current Potential Drop (DCPD)* recomendado por la norma ISO 11114-4 para ensayos en ambientes de hidrógeno a presión. Este sensor mide el potencial eléctrico a través de la muestra, variando su valor según el tamaño de la grieta, lo que permite detectar su crecimiento. El aumento de la corriente aplicada durante los ensayos (hasta 10A) mejoró la detección de grietas menores, lo cual es crucial para evaluar de manera precisa la fragilización del material en presencia de hidrógeno.
- Se mejoraron los sellos de los canales de los cables para evitar fugas de hidrógeno en el autoclave, comprobando una menor pérdida de presión y mejorando la seguridad de los ensayos.

Además, se optimizó la conexión de los cables, pasando de conexiones soldadas a uniones roscadas. Esta modificación reduce el riesgo de fallos en las conexiones debido a la fatiga del material y facilita el mantenimiento y la sustitución de componentes.

La fragilización del material se mide utilizando varias técnicas y herramientas especializadas. Aquí hay un resumen de cómo se llevó a cabo la medición:

- *Sensor de crecimiento de grietas*: Se utilizó un sensor de potencial de caída directa (DCPD) para medir el crecimiento de las grietas en tiempo real. Este método es sensible y preciso, permitiendo detectar incluso pequeñas extensiones de grietas.
- *Extensómetro COD*: Para medir la apertura de las grietas, se empleó un extensómetro de desplazamiento de apertura de grieta (COD). Esto ayudó a correlacionar la apertura de la grieta con el crecimiento observado por el sensor DCPD.
- *Análisis de fractografía*: Después de los ensayos, se examinaron las superficies fracturadas de las probetas mediante microscopía electrónica de

barrido (SEM), lo que proporcionó información detallada sobre los modos de fractura y la presencia de fragilización por hidrógeno.

- *Mediciones de k_{IH}* : Se calcularon los factores de intensidad de tensiones de hidrógeno (k_{IH}) durante los ensayos. Estos valores son indicativos de la susceptibilidad del material a la fragilización por hidrógeno y se obtuvieron a partir de los datos de crecimiento de grietas y las condiciones de los ensayos.

Estas técnicas combinadas ofrecieron una comprensión integral de cómo el hidrógeno afecta la integridad de los materiales y permitieron desarrollar estrategias para mitigar los riesgos asociados con la fragilización por hidrógeno en sistemas de tuberías

5. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

5.1. Resultados de los ensayos en atmósfera de H₂ (Fase 1 y 2)

Una vez ajustado el sistema de medición DCDP, se realizaron ensayos para obtener el factor de intensidad de tensiones (k_{IH}) en dos fases: *fase 1* en atmósfera de nitrógeno y *fase 2* en atmósfera de hidrógeno. Estos ensayos se llevaron a cabo en los materiales seleccionados para zona B (material base), S (metal aportado en costuras de construcción) y Z (ZAT en costuras de construcción).

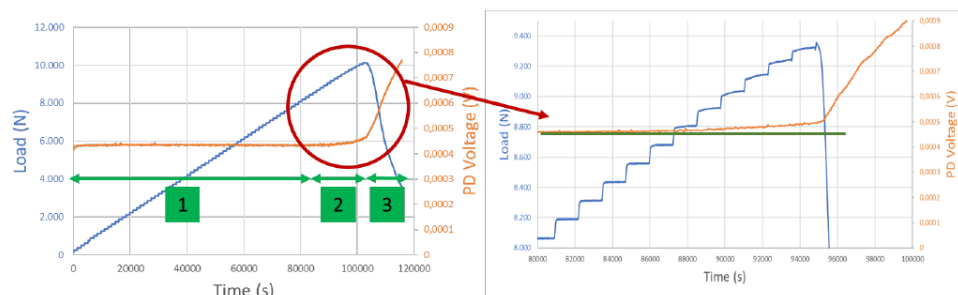


Fig. 9.- Ensayos ISO 11114-4 método B. Carga aplicada relacionado con el factor de intensidad de tensiones del material (línea azul) y respuesta del DCPD (línea naranja).

En la *Fig.* se muestra un ejemplo de los resultados de un ensayo para uno de los materiales. La línea azul muestra el control de carga según la norma ISO 11114-4, método B, donde se aplica una carga equivalente a $1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ y se mantiene durante 20 minutos. Si no hay crecimiento de grieta, evidenciado por una variación en el valor de PD (*Potencial Drop*), se incrementa nuevamente el valor de la carga hasta que ocurra el fallo. Como se observa en la figura, hay tres tramos diferenciados en el valor de PD: primero, una zona estable sin variación en el tamaño de la grieta; segundo, un tramo con un pequeño incremento en el valor de PD donde hay crecimiento de grieta; y, por último, un incremento exponencial en la pendiente de PD debido a una fractura acelerada de la probeta (Véase la *Fig. 1* para ver el diseño de la probeta).

A continuación, se indican los principales resultados encontrados en los ensayos de los diferentes materiales y espesores en atmósfera de nitrógeno (Fase 1) y atmósfera de hidrógeno (Fase 2):

- X60 (26" e=7,92mm): Se observaron los tres tramos para el valor de PD durante los ensayos (véase Fig.), lo que permitió calcular el factor de intensidad de tensiones (k_{IH}). La presencia de hidrógeno en fase 2 provocó la disminución de los valores de k_{IH} debido a la fragilización del material como era de esperar.
- X70 (20" e=22,23 mm): En fase 1 no se detectó crecimiento de grieta hasta el límite operativo de la máquina de ensayos. En fase 2, los utillajes sufrieron fragilización y rotura por hidrógeno.
- X70 (30" e=14,27mm): En fase 1 si se detectó crecimiento de grieta. En fase 2, los utillajes también sufrieron problemas de fragilización por hidrógeno.

Como resumen de los ensayos puede indicarse que:

- Fase 1 (en atmósfera de Nitrógeno): Se realizaron ensayos para obtener el factor de intensidad de tensiones (k_{IH}) en atmósfera de nitrógeno. La carga se incrementó en tramos hasta que se produjo el fallo, permitiendo calcular el k_{IH} de referencia.
- Fase 2 (en atmósfera de Hidrógeno): Ensayo similar a los de la Fase 1, pero en atmósfera de hidrógeno. Los ensayos demostraron la fragilización por hidrógeno en distintos espesores y diámetros de tuberías, observándose disminución del k_{IH} debido a la fragilización por hidrógeno, efecto esperado en las propiedades del material. Cabe destacar que los valores medios de los ensayos son superiores a $K_{IH}=55 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, valor recomendado por la normativa (ASME Boiler and Pressure Vessel Code), y que determina el valor por el cual es posible utilizar un material en tuberías de distribución de gases.

Los análisis fractográficos confirmaron la presencia de fracturas dúctiles en nitrógeno y transgranulares en hidrógeno, como se muestra en la Fig. 10.

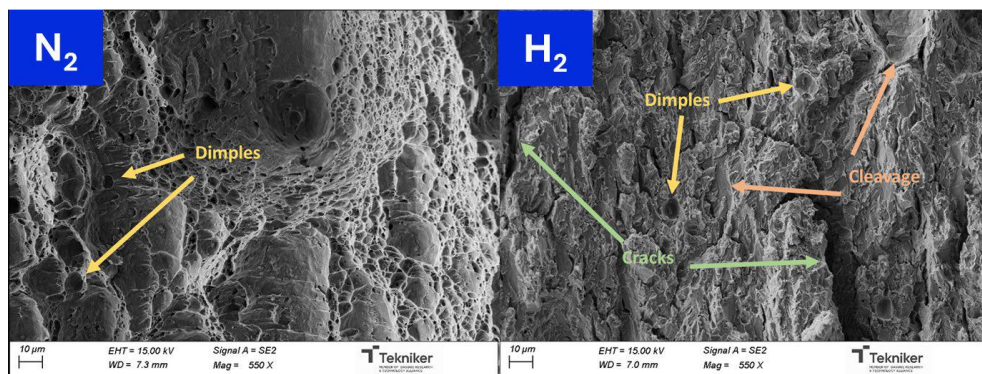


Fig. 2.- Fractografías SEM de acero de tubería x60 (izq.) en ambiente de nitrógeno a 80 bar y drch.) hidrógeno a 80 bar.

Los ensayos realizados en atmósferas de nitrógeno e hidrógeno han evidenciado de forma clara el impacto de la fragilización por hidrógeno en los aceros de tubería analizados. La comparación entre ambas fases muestra que, mientras en nitrógeno los materiales mantienen una elevada resistencia al crecimiento de grietas y presentan fracturas de tipo dúctil, la exposición al hidrógeno conduce a una disminución significativa del factor de intensidad de tensiones (K_{IH}) y a la aparición de fracturas transgranulares, signos inequívocos de la fragilización inducida por hidrógeno. Este efecto ha sido especialmente notable en los utillajes y materiales de mayor resistencia, donde incluso se han producido fallos prematuros bajo condiciones de hidrógeno.

A pesar de la reducción de K_{IH} en atmósfera de hidrógeno, los valores medios obtenidos en los ensayos se han situado por encima del umbral de seguridad recomendado por la normativa ($55 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), lo que respalda la viabilidad técnica de los materiales estudiados para su uso en redes de distribución de gases, siempre que se tengan en cuenta las condiciones específicas de operación y los riesgos asociados a la presencia de hidrógeno. Los resultados fractográficos y mecánicos obtenidos aportan una base sólida para el desarrollo de estrategias de selección y diseño de materiales resistentes a la fragilización por hidrógeno en aplicaciones críticas.

5.2. Resultados del estudio de inhibidores gaseosos (Fase 3)

La fragilización por hidrógeno en aceros de tuberías ocurre cuando el hidrógeno molecular se disocia en átomos en la superficie del acero, se adsorbe y difunde hacia el interior del material, afectando sus propiedades mecánicas. El mecanismo de inhibición por fase gaseosa se basa en la interferencia de este proceso mediante la adición de gases inhibidores al entorno de hidrógeno. Gases como el oxígeno (O_2), el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de azufre (SO_2) han demostrado una alta eficacia en bloquear los sitios activos de adsorción en la superficie del acero, impidiendo la disociación y posterior absorción del hidrógeno.

Estos gases actúan ocupando los sitios de adsorción preferentes en la superficie metálica, lo que eleva la barrera energética para la adsorción disociativa del hidrógeno. En algunos casos, también pueden reaccionar con el hidrógeno adsorbido, promoviendo su desorción [6]. Este efecto superficial reduce significativamente la cantidad de hidrógeno que puede ingresar al acero, mitigando así los mecanismos de fragilización como la decohesión interatómica o la plasticidad localizada inducida por hidrógeno.

Como parte del análisis de la fragilización por hidrógeno se ha llevado a cabo una fase experimental centrada en la evaluación de gases inhibidores. El objetivo fue determinar si ciertos compuestos gaseosos podían reducir la susceptibilidad del material a la penetración y acumulación de hidrógeno, mitigando así los efectos de fragilización.

Sin embargo, la eficacia de esta estrategia depende de múltiples factores: la presión parcial del hidrógeno, la concentración y tipo del gas inhibidor, la microestructura del acero, la frecuencia de carga cíclica y el rango de intensidad de esfuerzos. Por ejemplo, a frecuencias bajas, el tiempo disponible para que el gas inhibidor cubra nuevas superficies generadas por el crecimiento de grietas es mayor, lo que mejora la inhibición. En cambio, a altas presiones o en aceros de alta resistencia, puede requerirse una mayor concentración de inhibidor para lograr el mismo efecto.

Por razones de seguridad, el oxígeno fue descartado debido al riesgo de formación de atmósferas explosivas al mezclarse con hidrógeno. El dióxido de azufre, aunque prometedor desde el punto de vista químico, fue excluido por su elevada toxicidad y complejidad de manejo. Finalmente, se seleccionó el monóxido de carbono (CO) como inhibidor para los ensayos, en una concentración de 100 ppm mezclado con hidrógeno.

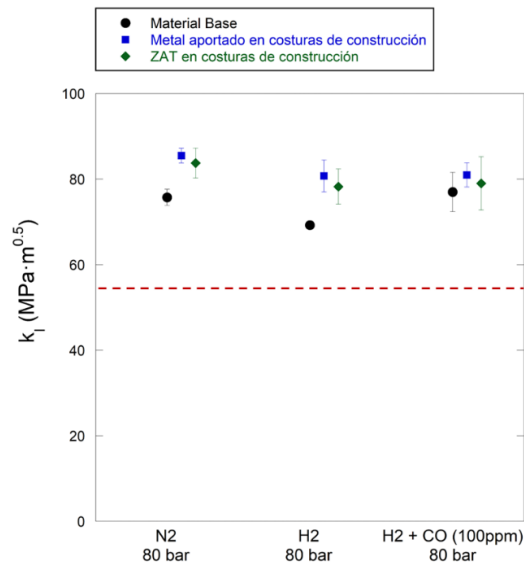


Fig. 11.- Resultados para las fases 1(N₂), 2(H₂) y 3(H₂+100ppmCO) del material de 26" en las distintas zonas de interés de la tubería. Umbral de seguridad: 55 MPa·m^{0.5}.

Como en las fases anteriores, los ensayos se realizaron siguiendo el método B de la norma ISO 11114-4, utilizando probetas CT preagrietadas extraídas de las tres zonas representativas de la tubería. Los resultados mostraron que la presencia de CO en la atmósfera de ensayo produjo una reducción significativa en la fragilización por hidrógeno, especialmente en el material base, donde se observó una recuperación parcial del valor de K_{IH} . En las zonas de soldadura y HAZ, el efecto fue más moderado, pero igualmente positivo.

Los valores de K_{IH} obtenidos en presencia de CO se mantuvieron por encima del umbral de seguridad de 55 MPa·m^{1/2}, lo que confirma la viabilidad técnica del uso de CO como inhibidor gaseoso en redes de transporte de hidrógeno. Estos resultados respaldan la hipótesis de que el CO actúa como competidor en la adsorción superficial, bloqueando los sitios activos donde el hidrógeno podría penetrar y causar daño estructural.

El CO es viable como inhibidor en sistemas de blending, especialmente en mezclas con bajo contenido de H₂ (≤20%). En estos casos, concentraciones de CO del orden de 1000 ppm pueden ser suficientes para mitigar la HE. Sin embargo, su eficacia disminuye con el aumento del porcentaje de H₂ en la mezcla, lo que requiere ajustes en la concentración de CO y una evaluación cuidadosa de los efectos secundarios [6].

Este estudio abre nuevas líneas de investigación para el desarrollo de estrategias de mitigación basadas en la composición de la atmósfera de transporte, y plantea la posibilidad de incorporar inhibidores gaseosos como medida complementaria en el diseño de infraestructuras seguras para el hidrógeno

5.3. Análisis viabilidad ensayos presión/descompresión (Fase 4)

Antes de proceder con la externalización de los ensayos de envejecimiento del material, por ciclos de compresión/descompresión, TEKNIKER evaluó una alternativa viable para simular en el laboratorio condiciones reales de operación. Esta consistía

en aplicar ciclos de fatiga mecánica en aire directamente sobre los tubos, con el objetivo de inducir un estado de carga acumulada similar al que se genera en servicio.

Una vez completados los ciclos de fatiga, se procedería al mecanizado de probetas tipo CT a partir de las zonas afectadas del tubo. Estas probetas serían posteriormente ensayadas en atmósfera de hidrógeno presurizado, siguiendo el protocolo establecido por la norma ISO 11114-4. Esta estrategia buscaba reproducir de forma indirecta los efectos de los ciclos de presión sin necesidad de realizar ensayos en hidrógeno directamente sobre el tubo completo.

Sin embargo, tras un análisis detallado de la distribución de tensiones mediante simulaciones por elementos finitos (FEM), se concluyó que esta alternativa no permitía garantizar una correlación precisa entre los esfuerzos inducidos y los resultados esperados. Por ello, se optó finalmente por externalizar los ensayos de presión/descompresión, asegurando así la validez técnica y normativa de los resultados obtenidos.

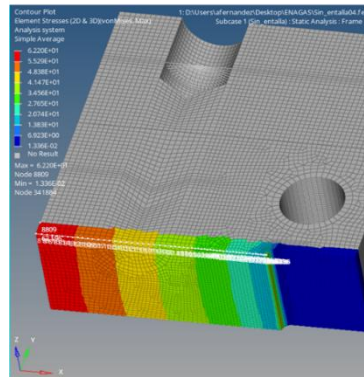


Fig. 12.- Ejemplo de análisis FEM de las probetas diseñadas para los ensayos de presión/descompresión en laboratorio donde no hay homogeneidad de las tensiones producidas.

Una vez finalizados los ensayos de envejecimiento de un carrete de tubería de acero grado X60, con 26 pulgadas de diámetro, habitualmente utilizado en redes de transporte de gas natural, se llevó a TEKNIKER para el análisis del material en el laboratorio.

Este procedimiento permite simular los efectos acumulativos de las variaciones de presión, que son habituales en la operación de redes de distribución y transporte. Dichos ciclos pueden inducir tensiones internas, favorecer la difusión de hidrógeno en el material y acelerar procesos de degradación como la fragilización por hidrógeno.



Fig. 13.- Carrete de tubería del material de 26" envejecido (equivalente a 1,37 años de operación) mediante los ciclos de presión/descompresión. Mecanizado de la tubería para extraer las probetas a ensayar.

El análisis posterior de los materiales sometidos a estos ciclos proporciona información clave sobre su resistencia mecánica, integridad estructural e idoneidad para su uso en entornos de hidrógeno.

Los resultados obtenidos en esta fase 4 para el factor de intensidad de tensiones (Fig. 14) muestran valores similares para el material base en comparación con los obtenidos en la fase 2 ($69 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ vs. $70 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), lo que indica una sensibilización mínima tras ciclos de presión/descompresión. Las ligeras diferencias están dentro del rango de error y sugieren solo una leve sensibilización.

Por otro lado, tanto en el material aportado en costuras de construcción como en la zona afectada térmicamente (ZAT), se observa una pequeña disminución de K_I respecto a la fase 2 (material aportado: 81 a 78 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$; ZAT: 78 a 75 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), lo que evidencia mayor fragilización por la microestructura de soldadura. Sin embargo, todos los valores siguen superando los requisitos normativos para materiales en sistemas de H₂, confirmando su viabilidad.

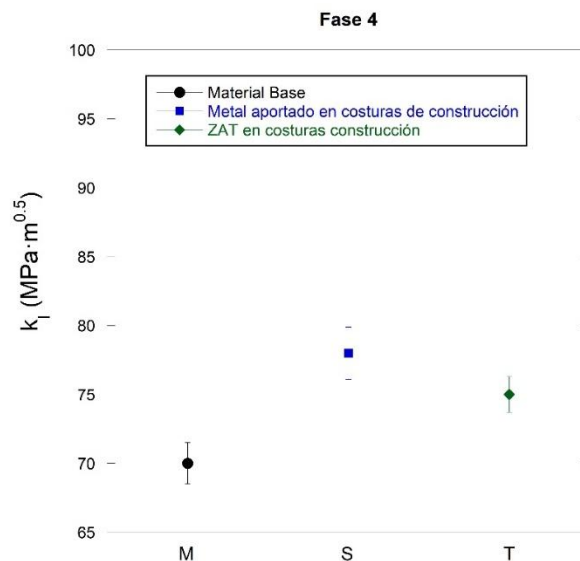


Fig. 14.- Resultados de la Fase 4 del material de 26" en las distintas zonas de interés de la tubería.

5.4. Incidencias identificadas durante los ensayos

Conforme lo previsto, los ensayos comienzan a principios de 2023 y durante las primeras pruebas de fatiga en probetas de mayor espesor se observa que los utillajes y bulones se deforman plásticamente debido a las propiedades mecánicas del material seleccionado (Véase Fig.15).

Se sustituyó el material original de los utillajes por acero inoxidable martensítico AISI 440B debido, como se ha mencionado, a fallos por deformación plástica. Este cambio mejoró la resistencia mecánica en ambientes de hidrógeno para las probetas de menos espesor. Es necesario una correcta selección de materiales y diseño ajustado del utillaje para evitar deformaciones plásticas y roturas por fragilización de hidrógeno

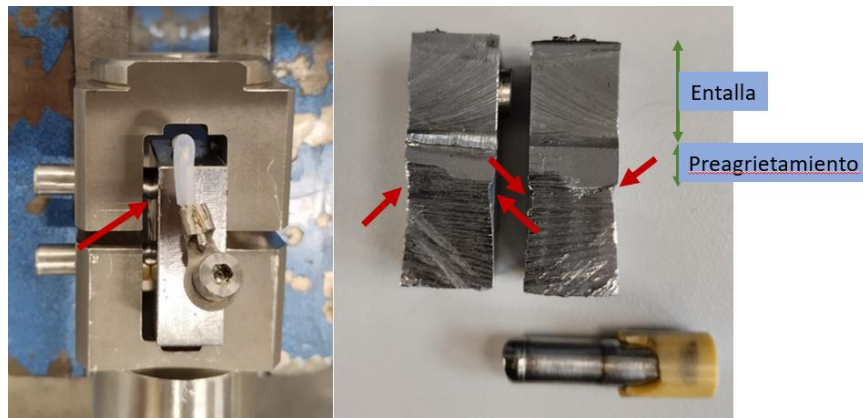


Fig. 15.- Efecto de deformación plástica en utillaje, probetas y bulones durante los ensayos.

Asimismo, en algunos casos, durante la preparación de muestras mediante preagrietamiento, se observa un "despegue" de la soldadura producido por la fatiga del material (tensiones residuales) en lugar del crecimiento propio de la grieta en la entalla realizada. Esto obligó a cambiar el método de mecanizado de las entallas. La técnica de mecanizado por electroerosión mejoró los resultados al evitar los despegues de soldaduras.

Antes de iniciar los ensayos en atmósfera de hidrógeno, ya se habían identificado problemas con los materiales de los utillajes utilizados en el equipo de ensayo (Autoclave Cormet). Estos problemas surgieron durante los ensayos preliminares en atmósfera inerte (N₂), que se realizaron como referencia y para validar el sistema de ensayo.

Durante la ejecución de los ensayos mecánicos en atmósferas de hidrógeno presurizado, se identificaron diversos problemas relacionados con los utillajes utilizados en el equipo de ensayo. En particular, los utillajes fabricados inicialmente en aleación Hastelloy C276 (UNS N10276) presentaron deformaciones plásticas significativas al someterse a cargas elevadas, especialmente en probetas de mayor espesor (por ejemplo, L-SAW X70 - 20" con 22.23 mm). Esta deformación comprometía la integridad del ensayo y la fiabilidad de los resultados obtenidos.

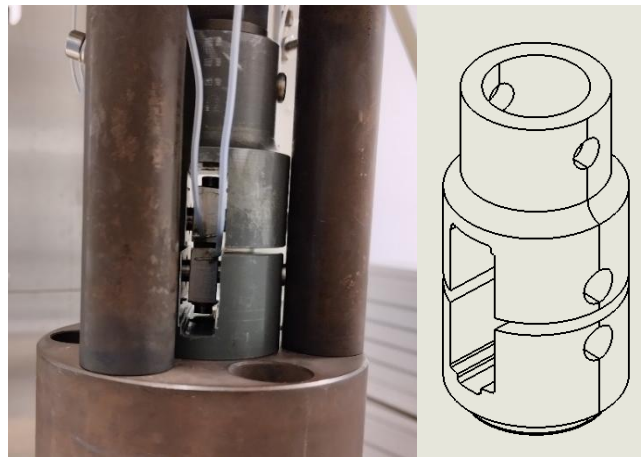


Fig. 16.- Diseño de los utillajes con material de alto límite de fluencia.

Además, en los ensayos realizados en atmósfera de hidrógeno, se observó un fenómeno de fragilización por hidrógeno en los utillajes, lo que provocó su fractura prematura. Este comportamiento se atribuye a la alta susceptibilidad de ciertos materiales de alta resistencia mecánica a los efectos del hidrógeno, especialmente bajo condiciones de presión elevada (80 bar) y carga cíclica.

Ante estos problemas, se evaluaron diferentes alternativas de material para mejorar la resistencia mecánica y la compatibilidad de los utillajes con atmósferas de hidrógeno. Se seleccionó el acero inoxidable martensítico AISI 440B como primera opción, debido a su alto límite elástico, lo que permite soportar las cargas requeridas sin deformación plástica. Sin embargo, este material también presenta cierta vulnerabilidad a la fragilización por hidrógeno, por lo que se realizaron tratamientos térmicos adicionales (templado y distensionado) para mejorar su comportamiento.

Paralelamente, se exploró el uso de recubrimientos de carbono tipo diamante (DLC) aplicados mediante técnicas de PECVD, desarrolladas en TEKNIKER. Estos recubrimientos han demostrado ser eficaces como barreras de permeación de hidrógeno en otros proyectos. No obstante, debido a la geometría compleja de los utillajes y las limitaciones del proceso de deposición, la cobertura no fue uniforme, y los resultados no fueron concluyentes.

Finalmente, se identificó el Incoloy 907 como un material altamente prometedor por su resistencia mecánica y menor susceptibilidad a la fragilización. Sin embargo, su adquisición fue inviable debido a restricciones comerciales, ya que no se encontraba disponible en cantidades inferiores a una tonelada.

Fase	Problemas detectados	Material inicial	Soluciones adoptadas	Material alternativo
Fase 1 Preparación y atmósfera inerte (N ₂)	Deformación plástica en probetas gruesas; desgaste por fricción	Aleación C276 (UNS N10276)	Revisión de diseño; búsqueda de mayor límite elástico	AISI 440B (templado y distensionado)
Fase 2 Ensayos en H ₂	Fragilización por hidrógeno; fractura prematura	Aleación C276	Sustitución por material más resistente;	AISI 440B

			tratamientos térmicos	
Fase 3 Ensayos con inhibidores gaseosos (H ₂ + CO)	Compatibilidad química limitada; cobertura irregular de recubrimientos	AISI 440B	Aplicación de recubrimientos DLC; evaluación de nuevos materiales	Recubrimiento DLC; Incoloy 907 (no disponible comercialmente)
Fase 4 Ensayos en condiciones reales	Geometría no compatible con distribución de tensiones; necesidad de rediseño	AISI 440B	Simulación FEM; mecanizado específico; purga con N ₂	AISI 440B (mantenido con ajustes)

Tabla 2.- Resumen de los problemas y soluciones encontradas en los utillajes en cada una de las fases de ensayos.

5.5. Comparativa técnica entre ISO 11114-4 y ASME B31.12

En el marco del desarrollo de infraestructuras para el transporte de hidrógeno, la selección y validación de materiales metálicos requiere el uso de normas técnicas que permitan evaluar su comportamiento frente a la fragilización por hidrógeno. Dos de las referencias más utilizadas en este ámbito son la norma ISO 11114-4 y la ASME B31.12, cada una con enfoques complementarios.

La norma ISO 11114-4 establece métodos para determinar la compatibilidad de materiales metálicos con gases comprimidos, incluyendo el hidrógeno, mediante ensayos de mecánica de fractura con probetas preagrietadas. El método B, utilizado en el presente proyecto, permite obtener el umbral de intensidad de tensiones (KIH) por debajo del cual no se produce crecimiento de grieta inducido por hidrógeno. Esta norma ha sido ampliamente aplicada en estudios de fragilización, aunque su origen está más vinculado al diseño de cilindros de alta presión que a tuberías.

Por otro lado, la norma ASME B31.12 está específicamente orientada al diseño de sistemas de tuberías para hidrógeno, incluyendo tanto redes de distribución como instalaciones industriales. Esta norma no prescribe directamente métodos de ensayo, pero reconoce la susceptibilidad de los materiales y permite su uso siempre que se limiten las condiciones de operación (presión, temperatura, esfuerzo) en función de datos experimentales. En este sentido, ASME B31.12 referencia artículos del código ASME BPVC, como el KD-10, que incorporan criterios de diseño basados en ensayos en hidrógeno.

Estudios realizados por instituciones como Sandia National Laboratories [7], en colaboración con el Departamento de Energía de EE.UU. (DOE), han validado experimentalmente la utilidad de los datos obtenidos bajo ISO 11114-4 para justificar el uso de materiales en diseños regulados por ASME B31.12. Estos trabajos han demostrado que, aunque los enfoques normativos son distintos, los resultados de mecánica de fractura obtenidos mediante ISO 11114-4 pueden ser utilizados para definir límites operativos seguros en el marco de ASME B31.12, siempre que se acompañen de una evaluación técnica rigurosa.

En conclusión, la complementariedad entre ambas normas permite a los diseñadores y operadores de redes de hidrógeno disponer de herramientas fiables para la

selección de materiales. ISO 11114-4 aporta una base experimental sólida para caracterizar la fragilización, mientras que ASME B31.12 proporciona el marco normativo para su aplicación en sistemas reales. Esta sinergia es clave para garantizar la seguridad y la fiabilidad de las futuras infraestructuras de hidrógeno.

5.6. Conclusiones

- Fase 2: Estudio en atmósfera de hidrógeno

Aunque la reducción de K_{IH} en atmósfera de hidrógeno fue notable, los valores medios superaron el umbral de seguridad ($55 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), lo que confirma la viabilidad técnica de los materiales para redes de gases, considerando las condiciones operativas y riesgos del hidrógeno. Los análisis fractográficos y mecánicos respaldan estrategias para seleccionar y diseñar materiales resistentes a la fragilización por hidrógeno en aplicaciones críticas.

- Fase 3: Estudio de inhibidores gaseosos

En esta fase se investigó el efecto de ciertos gases inhibidores sobre la fragilización por hidrógeno en aceros utilizados en redes de transporte. En primer lugar, se realizó un estudio bibliográfico que identificó al oxígeno (O_2), monóxido de carbono (CO) y dióxido de azufre (SO_2) como los más prometedores, debido a su capacidad para competir con el hidrógeno en la adsorción sobre la superficie del acero.

Aunque inicialmente se intentó trabajar con mezclas de $\text{H}_2 + \text{O}_2$, las restricciones técnicas y de seguridad impidieron su uso. Finalmente, se seleccionó una mezcla de $\text{H}_2 + 100 \text{ ppm de CO}$ para los ensayos. Los resultados mostraron que el CO tiene un efecto inhibitorio significativo, especialmente en el material base, donde se observó una recuperación parcial de las propiedades mecánicas. En las zonas de soldadura y afectadas térmicamente también se detectaron mejoras, aunque más leves.

Los valores del factor de intensidad de tensiones (K_{IH}) obtenidos en esta fase se mantuvieron por encima del umbral de seguridad de $55 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, lo que confirma la viabilidad del uso de inhibidores gaseosos como estrategia de mitigación en redes de hidrógeno.

En resumen, la inhibición por fase gaseosa es una estrategia prometedora para mitigar la fragilización por hidrógeno en sistemas de transporte por *blending*. Su implementación requiere una caracterización cuidadosa de las condiciones de servicio y una evaluación integral de los efectos a corto y largo plazo sobre la integridad del material y la calidad del gas transportado [6].

- Fase 4: Estudio en condiciones reales de operación

Esta fase del estudio abordó el comportamiento de los materiales de una tubería utilizada habitualmente en redes de gas natural, tras someterla a un proceso de envejecimiento simulado en atmósfera de hidrógeno. Para ello, se aplicaron ciclos de compresión y descompresión, reproduciendo de forma controlada las condiciones reales de servicio que experimentan las infraestructuras de transporte de gas durante su operación.

Del estudio realizado al material de tubería de acero grado X60 sometido a estos ciclos de presión descompresión, se concluye que el envejecimiento inducido por

estas condiciones operacionales típicas de redes de transporte no genera una degradación significativa en la resistencia mecánica ni en la integridad estructural del material base. Los valores del factor de intensidad de tensiones (K_{IH}) obtenidos tras el envejecimiento son prácticamente equivalentes a los medidos antes de los ciclos ($69 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ frente a $70 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), lo que indica una sensibilización mínima y confirma la robustez del material frente a los efectos acumulativos de la operación.

En las zonas de soldadura y en la zona afectada térmicamente (ZAT) se detecta una ligera disminución de K_{IH} , atribuible a la mayor susceptibilidad de estas microestructuras a la fragilización por hidrógeno. Sin embargo, todos los valores permanecen por encima de los requisitos normativos para aplicaciones en sistemas de hidrógeno, lo que valida la idoneidad del material y los procedimientos de soldadura empleados. En conjunto, los resultados respaldan la viabilidad del uso de este tipo de acero en infraestructuras de transporte de hidrógeno sometidas a variaciones cíclicas de presión, aportando confianza en su comportamiento a largo plazo bajo condiciones reales de servicio.

6. ANEXOS

Relación de documentos elaborados por los distintos grupos de trabajo involucrados en la actividad del proyecto, Enagás Transporte SAU y TEKNIKER, durante el ejercicio 2022

1. Demostrador de tecnologías del hidrógeno – Hyloop. Ingeniería de Detalle CNH2. diciembre 2021. [8]
2. Registro Documental. Ingeniería de detalle del Demostrador de Tecnologías del Hidrógeno – HyLoop. CNH2. diciembre 2022. [9]
3. Proyecto HyLoop. Propuesta ampliación. Enagás Transporte SAU. Agosto, 2022. [10]
4. GreenH2Pipes. Actividad 2022. TEKNIKER. 21 diciembre 2022. [11]

Relación de documentos elaborados por los distintos grupos de trabajo involucrados en la actividad del proyecto, Enagás Transporte SAU y TEKNIKER, durante el ejercicio 2023

1. INF-I-531/23: Proyecto HYLOOP+. Ingeniería básica. Enagás Transporte SAU, Diciembre, 2023. [12]
2. HLP-IDO-PT-ED-7001: Proyecto Ambiental de Actividad Clasificada y Básico HyLoop+. IDOM, Noviembre, 2023. [13]
3. Descripción de ensayos a externalizar, Zaragoza: Enagás, Noviembre, 2023. [14]
4. HLP-IDO-GE-RP-001: Informe de Progreso Mensual - Junio 2024, IDOM, Mayo, 2024. [15]
5. GreenH2Pipes. Actividad 2023. TEKNIKER. 7 agosto 2024. [16]

Relación de documentos elaborados por los distintos grupos de trabajo involucrados en la actividad del proyecto, Enagás Transporte SAU y TEKNIKER, durante el ejercicio 2024

1. HLP-IDO-PT-ED-7002-00A Proyecto de Ejecución. IDOM, septiembre, 2024 [17]

2. HLP-IDO-GE-RP-0001-R00 Informe de progreso mensual - Agosto y Septiembre 2024, IDOM, octubre, 2024 [18]
3. GreenH2Pipes. Reunión de seguimiento, septiembre, 2024 [19]
4. GreenH2Pipes. Reunión de seguimiento, noviembre, 2024 [20]
5. GreenH2Pipes. Reunión de seguimiento, enero, 2025 [21]
6. Efecto del hidrógeno a alta presión en tuberías de distribución de gas natural. I Encuentro internacional de materiales en contacto con Hidrógeno, Gijón, 16-23 junio, 2025 [22]
7. GreenH2Pipes. Informe Técnico Final, TEKNIKER, agosto, 2025 [23]

Algún contenido de los documentos anteriores puede ser considerado confidencial.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Enagás Transporte SAU, *E1.3 - Especificaciones para la inyección de hidrógeno en red de transporte de gas natural*, Proyecto GreenH2Pipes, 2022.
- [2] Enagás Transporte SAU, *Impacto de la inyección de hidrógeno en el sistema de gasoductos*, Dirección General de Infraestructuras, noviembre, 2021.
- [3] UNE-EN ISO 11114-4:2017, *Botellas para el transporte de gas. Compatibilidad de los materiales de la válvula y de la botella con el gas contenido. Parte 4: Métodos de ensayo para la selección de materiales metálicos resistentes a la fragilización por hidrógeno.*, ISO, 2017.
- [4] *ASME B31.12 - Hydrogen piping and pipelines*, 2019.
- [5] J.-w. Cao, Z.-g. Liu, M. Zhai, L. Qiao, Z.-m. Lei, M. Wang y R.-f. Li, «A review on hydrogen embrittlement of welded joint of low-alloy steel: focusing on welding technologies.,» *J. Iron Steel Res. Int.*, April 2025.
- [6] M. Röthig, J. Hoschke, C. Tapia, J. Venezuela y A. Atrens, «A review of gas phase inhibition of gaseous hydrogen embrittlement in pipeline steels.,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 60, p. 1239–1265, 2024.
- [7] Sandia National Laboratories, «Technical Reference for Hydrogen Compatibility of Materials.,» 2012.
- [8] CNH2, *Demostrador de tecnologías del hidrógeno - Hyloop. Ingeniería de Detalle*, Centro Nacional del Hidrógeno, diciembre, 2021.
- [9] CNH2_2002600_HDA_05v6, *Registro Documental. Ingeniería de detalle del Demostrador de Tecnologías del Hidrógeno – HyLoop.*, Centro Nacional del Hidrógeno, diciembre, 2022.
- [10] Enagás Transporte SAU, *Proyecto HYLOOP. Propuesta ampliación*, Dirección de Servicios Técnicos, agosto, 2022.
- [11] TEKNIKER, *GreenH2Pipes. Actividad 2022*, diciembre, 2022.
- [12] Enagás Transporte SAU, *INF-I-531/23: Proyecto HYLOOP+. Ingeniería básica.*, Zaragoza: Dirección de Servicios Técnicos - Gerencia de Instrumentación y Medición, Diciembre, 2023.

- [13] IDOM, *HLP-IDO-PT-ED-7001: Proyecto Ambiental de Actividad Clasificada y Básico HyLoop+.*, Zaragoza: Ing. IDOM, Noviembre, 2023.
- [14] Enagás, *Descripción de ensayos a externalizar*, Zaragoza: Enagás GIT-WF, Noviembre, 2023.
- [15] IDOM, *HLP-IDO-GE-RP-001: Informe de Progreso Mensual - Junio 2024*, Zaragoza: Ing. IDOM, Mayo, 2024.
- [16] TEKNIKER, *GreenH2Pipes. Actividad 2023*, agosto, 2024.
- [17] IDOM, «HLP-IDO-PT-ED-7002-00A Proyecto de Ejecución_FIRMADO,» Ing. IDOM, Zaragoza, Septiembre, 2024.
- [18] IDOM, *HLP-IDO-GE-RP-0001. Informe de progreso mensual– Agosto y Septiembre 2024*, Zaragoza: Ing. IDOM, 2024.
- [19] TEKNIKER, *GreenH2Pipes. Reunión seguimiento*, 2024.
- [20] TEKNIKER, *GreenH2Pipes. Reunión de seguimiento*, 2024.
- [21] TEKNIKER, *GreenH2Pipes. Reunión de seguimiento*, 2025.
- [22] E. Tabares, F. Pagano, A. Fernández, L. Gutiérrez, I. Montero y J. Barriga, *EFFECTO DEL HIDRÓGENO A ALTA PRESIÓN EN TUBERÍAS DE DISTRIBUCIÓN DE GAS NATURAL*, Gijón: I Encuentro internacional de materiales en contacto con H₂, 2025.
- [23] TEKNIKER, «GreenH2Pipes. Informe Técnico Final,» Agosto, 2025.
- [24] *ASME B31.8 - Gas transmissions and distribution piping systems*, 2020.
- [25] API, *Specification 5L, Specification for Line Pipe*, EEUU: American Petroleum Institute, , 2012.
- [26] TEKNIKER, *GreenH2Pipes. Actividad 2023*, 2024.
- [27] Enagás Transporte SAU, «INF-GI-02/22. Estudio de la capacidad de transporte de las mezclas H₂-GN.,» Dirección de Servicios Técnicos, Zaragoza, Octubre, 2022.
- [28] Enagás Transporte SAU, *INF-I-531/23: Proyecto HYLOOP+. Ingeniería básica.*, Zaragoza: Dirección de Servicios Técnicos - Gerencia de Instrumentación y Medición, 2023.
- [29] IDOM, «HLP-IDO-PT-ED-7001: Proyecto Ambiental de Actividad Clasificada y Básico HyLoop+.,» Ing. IDOM, Zaragoza, Noviembre, 2023.
- [30] Enagás, «Descripción de ensayos a externalizar,» Enagás GIT-WF, Zaragoza, Noviembre, 2023.
- [31] IDOM, *HLP-IDO-GE-RP-001: Informe de Progreso Mensual - Junio 2024*, Zaragoza: Ing. IDOM, 2024.