



EXPLORACIÓN DE LAS OPORTUNIDADES EN ESPAÑA PARA ENSAYAR PROPIEDADES DE MATERIALES EN CONTACTO CON HIDRÓGENO A PRESIÓN

Resumen

Desde el Foro de Transición Energética y Cambio Climático (TECC) de PLATEA, se quiere informar sobre las capacidades existentes en España de ensayo y determinación de propiedades de los materiales en contacto con hidrógeno a presión.

El presente documento surge de la necesidad identificada dentro de la línea de trabajo *Nuevos aceros para el almacenamiento y transporte de H₂ y CO₂* del Foro TECC. Se busca reconocer y localizar aquellos recursos y equipos nacionales que puedan llevar a cabo ensayos en esta área con el objetivo último de identificar necesidades. Para ello, se han elaborado unas fichas informativas de cada uno de los equipos, sus capacidades, ubicación, disponibilidad y datos de contacto del responsable.

Este documento es dinámico y será actualizado conforme se identifiquen otros equipos nacionales capaces de realizar estos ensayos. Si se descubre un equipo no detallado en este documento, se puede contactar con Carola A. de Celada (resp_forotecc@aceroplatea.es) y Milena Ferrari (mferrari@aceroplatea.es).

Al final del documento se presentarán las conclusiones obtenidas en el estudio, en concreto, sobre posibles instalaciones de interés a considerar a nivel nacional.

Autor

Dr. Francisco J. Belzunce Varela, *Universidad de Oviedo*. belzunce@uniovi.es

Proyecto PTR2022-001251 financiado por:





Participantes del GT3

- Universidad de Oviedo
- Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM-CSIC)
- Acerinox
- Eurecat
- Siderúrgica Sevillana
- UNESID

Para más información sobre este documento y el GT3, contacte con:

Carola A. de Celada – Líder del Foro TECC

resp_forotecc@aceroplatea.es

c.celada@cenim.csic.es

Milena Ferrari – Secretaría Técnica de PLATEA

mferrari@aceroplatea.es

PLATEA - Plataforma Tecnológica Española del Acero

www.aceroplatea.es

Castelló, 128

28006 (Madrid) ESPAÑA

T. +34 91 562 40 10 – info@aceroplatea.es

Historial del documento:

Versión	Fecha	Autor	Comentarios
V.1	6/10/2024	Javier Belzunce (UniOvi)	Primer borrador, relación de equipos, ubicación, disponibilidad
V.2.	4/03/2024	Javier Belzunce (UniOvi), Milena Ferrari (PLATEA), Carola Celada (PLATEA)	Motivación, objetivo, conclusiones
V.3	15/03/2024	Carola Celada (PLATEA)	Revisión, formato



<p>DENOMINACIÓN DEL EQUIPO/INSTALACIÓN</p> <p>Sistema de ensayo con autoclave integrado a alta presión y temperatura en ambiente de hidrógeno</p>
<p>ENTIDAD DE LA QUE DEPENDE EL EQUIPO Y PERSONA DE CONTACTO</p> <p>Universidad de Burgos, parque científico-tecnológico, laboratorio de tecnologías de hidrógeno Contacto: Iván Cuesta (ijcuesta@ubu.es) https://www.ubu.es/integridad-estructural-gie/laboratorio-de-tecnologias-del-hidrogeno</p>
<p>CARACTERISTICAS DEL EQUIPO (Presión de H₂, temperatura, etc.)</p> <p>Permite realizar una amplia variedad de ensayos normalizados para evaluar las propiedades mecánicas de los materiales en ambiente de hidrógeno gaseoso a alta presión y temperatura</p>
<p>PROPIEDADES QUE SE PUEDEN DETERMINAR (bajo presión de H₂)</p> <p>Ensayos a tracción, con probetas lisas o entalladas, ensayos de fractura y ensayos de fatiga</p>
<p>CONDICIONES Y LIMITACIONES DE LOS ENSAYOS</p> <p>Hasta 300 bares y 300°C</p>
<p>TIPO Y TAMAÑO DE LAS PROBETAS OBJETO DE ENSAYO</p> <p>Tamaño de probeta fijo, establecido según normativa. Consultar</p>
<p>INFORMACIÓN ADICIONAL</p> <p>Para finales de 2023 se prevé la instalación de nuevo equipamiento para la realización de ensayos de permeación bajo presión de hidrógeno gaseoso y autoclave que permitirá la carga de hidrógeno bajo presión y temperatura.</p>
<p>DISPONIBILIDAD DE USO</p> <p>Disponible</p>



<p>DENOMINACIÓN DEL EQUIPO/INSTALACIÓN</p> <p>Autoclave para ensayos estáticos con gas hidrógeno a alta presión Fabricante: Cortest, Inc.</p>
<p>ENTIDAD DE LA QUE DEPENDE EL EQUIPO Y PERSONA DE CONTACTO</p> <p>Tecnalia: Plataforma de materiales para condiciones extremas / hidrógeno, materiales y procesos <u>Responsable:</u> Raúl Caracena/Nicolás Larrosa</p>
<p>CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO (Presión de H₂, temperatura, etc.)</p> <ul style="list-style-type: none">- Autoclave fabricado en 316L SS, que lleva incorporado una cámara de guantes para carga de probeta compacta bajo deformación constante tipo CT-WOL- Presión de ensayo hasta 200 bar- Temperatura de ensayo hasta 100 °C- 11 litros de capacidad (205 mm ID x 355 mm)- Atmósfera cámara de guantes: < 5ppm O₂ y <50 ppmH₂O
<p>PROPIEDADES QUE SE PUEDEN DETERMINAR (bajo presión de H₂)</p> <ul style="list-style-type: none">- Umbral del factor de intensidad de tensión bajo desplazamiento constante (K_{TH}), mediante probeta prefisurada CT-WOL (ASTM 1681)- Umbral de tensión por debajo del cual no aparecen grietas en probetas bajo deformación constante tipo C-ring, 4pd.- En general, compatibilidad de materiales/componentes en presencia de gas hidrógeno a presión.
<p>CONDICIONES Y LIMITACIONES DE LOS ENSAYOS</p> <ul style="list-style-type: none">- Probetas de tamaño/número limitado a las dimensiones del autoclave (205mm ID x 355mm)- Temperatura: ambiente hasta 100 °C- Presión máxima de ensayo 300 bar
<p>TIPO Y TAMAÑO DE LAS PROBETAS OBJETO DE ENSAYO</p> <ul style="list-style-type: none">- Probetas tipo CT-WOL (ASTM 1681, ISO 7539-6)- Probetas C-ring (ISO 7539-5, ASTM G38)- Probetas 4pb (ISO 7539-2)- En general probetas y componentes cuyo tamaño está limitado a las dimensiones del autoclave (205mm ID x 355mm)
<p>DISPONIBILIDAD DE USO</p> <p>Disponible aprox. a partir de enero de 2024</p>



--

DENOMINACIÓN DEL EQUIPO/INSTALACIÓN Autoclave para ensayos de tracción a baja velocidad de deformación, SSRT/Ensayos de fatiga (2 equipos)
ENTIDAD DE LA QUE DEPENDE EL EQUIPO Y PERSONA DE CONTACTO Tecnalia: Plataforma de materiales para condiciones extremas / hidrógeno, materiales y procesos <u>Contacto:</u> Raul Caracena
CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO (Presión de H₂, temperatura, etc.) <ul style="list-style-type: none">• Volumen: 3L• Temperatura hasta 300°C. Presión hasta 300 bar• Capacidad de carga: 10 000 Lb• Frecuencia nominal a fatiga: 1Hz
PROPIEDADES QUE SE PUEDEN DETERMINAR (bajo presión de H₂) <ul style="list-style-type: none">• SSRT (ASTM G129 y G142) tensile strength, notched tensile strength, elongation, reduction in area etc.• Tenacidad a fractura bajo carga creciente, <i>K_I</i>, <i>J CTOD</i> (ASTM E1820)• Velocidad de crecimiento de grieta por fatiga (ASTME E647): da/dN vs ΔK
CONDICIONES Y LIMITACIONES DE LOS ENSAYOS <ul style="list-style-type: none">• Temperatura hasta 300°C. Presión hasta 300 bar• Célula de carga: 10 000 Lb• Frecuencia hasta 5 Hz
TIPO Y TAMAÑO DE LAS PROBETAS OBJETO DE ENSAYO Según el ensayo que se hace el tipo de probetas es distinto, limitado por el volumen de la cámara de gas.
DISPONIBILIDAD DE USO A partir de mayo de 2024



<p>DENOMINACIÓN DEL EQUIPO/INSTALACIÓN</p> <p>Sistema de ensayo multiprobeta (<i>Curved Compact Tension Specimen, CCTS</i>) a alta presión en ambiente de hidrógeno</p>
<p>ENTIDAD DE LA QUE DEPENDE EL EQUIPO Y PERSONA DE CONTACTO</p> <p>Centro de Investigación en Materiales Estructurales (CIME), de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Contacto: Juan Carlos Suárez-Bermejo (juancarlos.suarez@upm.es) https://blogs.upm.es/cime/</p>
<p>CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO (Presión de H₂, temperatura, etc.)</p> <ul style="list-style-type: none">- Equipo a presión fabricado en 316 SS. Homologado.- Permite ensayar probetas con curvatura, extraídas directamente de las tuberías en servicio- Dispone de utillaje diseñado y construido para ensayar hasta 5 probetas CCTS simultáneamente, siguiendo la metodología del <i>National Institute of Standards and Technology, NIST</i> (EEUU).- Célula de carga en el interior de la cámara de ensayo, además de la exterior.- Presión de ensayo hasta 100 bar- Temperatura de ensayo de acuerdo con grupo de material (ASME B16.34): 100 bar a +38 °C.- Cámara de ensayo en ambiente de hidrógeno con 11 litros de capacidad
<p>PROPIEDADES QUE SE PUEDEN DETERMINAR (bajo presión de H₂)</p> <p>Ensayos a tracción, con probetas lisas o entalladas, ensayos de tenacidad a la fractura y ensayos de fatiga.</p>
<p>CONDICIONES Y LIMITACIONES DE LOS ENSAYOS</p> <p>Hasta 100 bar en mezclas con hidrógeno u otras atmósferas de interés, con hasta 100 % de H₂, y temperatura ambiente.</p>
<p>TIPO Y TAMAÑO DE LAS PROBETAS OBJETO DE ENSAYO</p> <p>Tamaño de probeta fijo, establecido según normativa (ASME VIII Div. 3 KD-10; ASTM E647, ASTM E1681, ASTM E1820).</p>
<p>INFORMACIÓN ADICIONAL</p> <p>Operación en remoto desde sala de control. Sistemas de detección de hidrógeno y extracción forzada. Software de control y adquisición de datos desarrollado específicamente para este equipo.</p>
<p>DISPONIBILIDAD DE USO</p>



El equipo está siendo utilizado en exclusiva para la realización de ensayos de fatiga durante los próximos 2 años (2023 y 2024).
DENOMINACIÓN DEL EQUIPO/INSTALACIÓN Equipo para carga de hidrógeno a alta presión y temperatura
ENTIDAD DE LA QUE DEPENDE EL EQUIPO Y PERSONA DE CONTACTO Fundación Idonial, Avilés Rubén Coto González
CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO (Presión de H₂, temperatura, etc.) Hasta 200 bar y 500°C
PROPIEDADES QUE SE PUEDEN DETERMINAR (bajo presión de H₂) Ensayos de disbonding en materiales metálicos recargados
CONDICIONES Y LIMITACIONES DE LOS ENSAYOS Hasta 200 bar y hasta 500°C
TIPO Y TAMAÑO DE LAS PROBETAS OBJETO DE ENSAYO Limitado por el tamaño del depósito. Máximo de 70 mm de diámetro y 200 mm de longitud
DISPONIBILIDAD DE USO Equipo disponible y operativo



<p>DENOMINACIÓN DEL EQUIPO/INSTALACIÓN</p> <p>Equipo para realización de ensayos mecánicos en condiciones de hidrógeno a presión</p>
<p>ENTIDAD DE LA QUE DEPENDE EL EQUIPO Y PERSONA DE CONTACTO</p> <p>Fundación Idonial, Avilés Rubén Coto González</p>
<p>CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO (Presión de H₂, temperatura, etc.)</p> <p>Temperatura ambiente y 400 bares de presión.</p>
<p>PROPIEDADES QUE SE PUEDEN DETERMINAR (bajo presión de H₂)</p> <p>Cálculo del factor K umbral (K_{1H}) y ensayos SSRT.</p>
<p>CONDICIONES Y LIMITACIONES DE LOS ENSAYOS</p> <p>Temperatura ambiente. Capacidad de carga hasta 50 kN</p>
<p>TIPO Y TAMAÑO DE LAS PROBETAS OBJETO DE ENSAYO</p> <p>Probetas CT de 32x13 mm Probetas cilíndricas de 6 mm de diámetro</p>
<p>INFORMACIÓN ADICIONAL</p> <p>ASTM G142-98(2022); ASTM G146-01(2018); ASTM E1681-03(2020); ASTM G129-21; UNE-EN ISO 11114-1:2021; ASME International Boiler and Pressure Vessel Code. SECTION VIII Rules for Construction of Pressure Vessels. Division 3 Alternative Rules for Construction of High-Pressure Vessels.</p>
<p>DISPONIBILIDAD DE USO</p> <p>Equipo disponible</p>



DENOMINACIÓN DEL EQUIPO/INSTALACIÓN Equipo para el estudio de la permeabilidad de los materiales al hidrógeno gas
ENTIDAD DE LA QUE DEPENDE EL EQUIPO Y PERSONA DE CONTACTO EURECAT Contacto: Sílvia Molas (silvia.molas@eurecat.org), Amadeu Concustell (amadeu.concustell@eurecat.org)
CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO (Presión de H₂, temperatura, etc.) 100 bar de presión y temperatura hasta 200°C. Equipo especialmente diseñado para materiales poliméricos, compuestos y materiales metálicos con elevada permeabilidad al hidrógeno.
PROPIEDADES QUE SE PUEDEN DETERMINAR (bajo presión de H₂) Determinación de la solubilidad del hidrógeno en los materiales, difusividad del hidrógeno y permeabilidad al hidrógeno gas.
CONDICIONES Y LIMITACIONES DE LOS ENSAYOS Baja permeabilidad de los materiales
TIPO Y TAMAÑO DE LAS PROBETAS OBJETO DE ENSAYO Probetas diámetro 55 mm o cuadradas de 6 x 6 cm. Espesor de 2-5 mm.
DISPONIBILIDAD DE USO Equipo disponible a partir de verano 2024



POSIBLE INSTALACION DE INTERES PARA EL ENSAYO DE RECIPIENTES A PRESION BAJO CARGA DE HIDRÓGENO

Existen unas pocas instalaciones en el mundo capaces de ensayar y romper pequeños depósitos enteros bajo presión interna de hidrógeno con objeto de obtener información directa de la resistencia de estos componentes. Por ejemplo, en [1] se describe el ensayo de depósitos soldados de acero con diámetros internos de 200-300 mm, 500 mm de longitud aproximada y espesores de 25-30 mm.

Con objeto de acortar el tiempo de ensayo e iniciar el crecimiento de una grieta, mecanizan mediante electroerosión en una zona concreta del depósito una entalla semielíptica con una longitud, l , igual a 3-4 veces la profundidad, a , ($l/a = 3-4$) y con una profundidad máxima igual a 0.25-0.7 veces el espesor, t , del depósito ($a/t=0.25-0.7$).

Estos pequeños depósitos se introducen en un recipiente resistente a las explosiones, donde se ensayan a temperatura ambiente aplicando una presión interna cíclica. Los ensayos se realizan utilizando bien hidrógeno o agua (con objeto de disminuir el volumen necesario de hidrógeno, se rellenan parcialmente los depósitos con cilindros de aluminio). En el caso de los ensayos bajo presión de hidrógeno, ésta se varía p.e. entre 0.6 y 45 MPa bajo una frecuencia $f = 0.006$ Hz (166.6 s/c) y en el caso de utilizar agua comprimida se están utilizando idénticas presiones y una frecuencia de 0.03 Hz. Estos ensayos terminan bien con la rotura del recipiente o cuando la grieta ha atravesado el espesor completo del depósito ($a = t$). Se determina así el número de ciclos de fatiga necesarios para producir el fallo del depósito. En la publicación citada el número de ciclos hasta el fallo de los depósitos ensayados bajo las citadas presiones de hidrógeno varió entre unos 180 y 1800 en función del tamaño de la entalla inicial (tomando $f=0.006$ Hz, la duración de estos ensayos varía entre 8 h y 83 h).

Una vez roto el depósito, puede medirse con precisión la forma y el tamaño inicial de la entalla practicada, el crecimiento de la grieta por fatiga en el ensayo y el tamaño y forma final de la grieta en el momento del fallo. Además, se pueden utilizar los resultados previos en relación con la tenacidad a la fractura y la velocidad de crecimiento de grieta por fatiga bajo presión de hidrógeno, que se hubieran obtenido con ese mismo acero en instalaciones como las que se han citado en este mismo documento, para predecir el número de ciclos de fatiga que habría que aplicar para romper el depósito y compararlo con el resultado experimental obtenido y determinar de este modo la exactitud de los cálculos. Operando de este modo, las predicciones que se muestran en [1] son bastante buenas.

[1] Yamabe J. et al., Pressure cycle testing of Cr-Mo steel pressure vessels subjected to gaseous hydrogen, J. of Pressure Vessels Technology, Vol. 138, 2016, 011401