



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”
Multidisciplinario
21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

Efecto del Envejecido en el Daño por Hidrógeno en el Acero API X60

¹Víctor Jorge Cortés Suárez, ¹Mayolo Alberto Mariano

¹Depto. de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad
Azcapotzalco

E-mail: vjcs@correo.azc.uam.mx, may66@hotmail.es.

Av. San Pablo No. 180, Col. Tamaulipas, México, D.F. 02200

a. Resumen

Se estudió el efecto de la temperatura de envejecido en la susceptibilidad al daño por hidrógeno en el acero API X60. Probetas para el ensayo de tracción fueron envejecidas a 315 y 650 °C. El hidrógeno fue introducido a las probetas de tracción mediante el ensayo de cargado catódico en un medio ácido y aplicando una densidad de corriente de 50 mA/cm², durante 24 horas. La susceptibilidad al daño por hidrógeno se determinó con ayuda de la reducción de área de las probetas de tracción fracturadas. Se encontró que el índice de fragilización es mayor y el modo de fractura cambia de dúctil a cuasiclivaje

Palabras Clave: Daño por hidrógeno, Envejecido, Cargado catódico, fractura dúctil y frágil.

b. Introducción

Una de las principales redes de transporte de hidrocarburos son los ductos. Parte de las tuberías instaladas se fabrican con acero grado API X60, que es un acero microaleado con Nb, V y Ti, de alta resistencia y baja aleación. Por esta red de ductos se distribuyen hidrocarburos, tales como gas, petróleo crudo y una gran



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

variedad de productos refinados del petróleo. Los hidrocarburos transportados contienen disueltos agentes que son agresivos para el acero. En particular, el sulfuro de hidrógeno (H_2S) que debido a reacciones de corrosión produce hidrógeno monoatómico, el cual entra y difunde en el acero hacia sitios de altos esfuerzos triaxiales, como son inclusiones no metálicas, límites de grano, defectos tipo grieta, etc., en donde se acumula y produce un efecto fragilizante, que se manifiesta en una fuerte pérdida de las propiedades mecánicas del acero. De esta manera, el hidrógeno reduce la vida útil del ducto, por esta razón, el estudio del efecto de la microestructura en la resistencia al daño por hidrógeno se vuelve importante. El objetivo de este estudio es determinar el efecto del envejecido en la susceptibilidad al daño por hidrógeno del acero API X60.

c. Metodología

El material bajo estudio fue un acero API X60 que proviene de un tubo de 106.68 cm (42 pulgadas) de diámetro y 1.27 cm ($\frac{1}{2}$ pulgada) de espesor de pared, utilizado para transportar petróleo, gas y productos derivados del petróleo. La composición química y propiedades mecánicas se presentan en la Tabla I y II, respectivamente.

1. Caracterización microestructural.

La microestructura del acero fue caracterizada en condición de recibido y con el tratamiento térmico de envejecido a 315 °C y 650 °C, aplicando la técnica metalográfica. La microestructura se reveló utilizando el reactivo nital 2.

2. Maquinado de Probetas.

Del tubo se maquinaron probetas para el ensayo de tracción subdimensionadas de 4 mm de diámetro y 16 mm de longitud de referencia. Las probetas fueron



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

sometidas al tratamiento térmico de envejecido, de acuerdo al siguiente ciclo térmico: solubilización a 1200 °C por una hora e inmediatamente templadas en agua con una agitación moderada. Posteriormente, las probetas se envejecieron a 315 y 650 °C por una hora. Las probetas testigo fueron sometidas a un tratamiento térmico de relevado de esfuerzos a 650 °C por una hora.

3. Cargado catódico.

Se construyó una celda electroquímica para introducir el hidrógeno en las probetas de tracción. Se utilizó un electrolito de 0.5 M de H₂SO₄ y para promover la entrada de hidrógeno al acero se le agregaron 5 gotas de bisulfuro de carbono (CS₂). En la celda electroquímica, la probeta de acero trabajó como cátodo y un alambre de platino como ánodo. La densidad de corriente utilizada fue de 50 mA/cm² y el tiempo de cargado catódico fue de 24 horas, para asegurar la saturación de hidrógeno en la matriz del acero. Una vez cargadas con hidrógeno, las probetas fueron ensayadas en tracción inmediatamente.

4. Ensayo de tracción.

Los ensayos de tracción se realizaron en una máquina universal para ensayos mecánicos marca Instron Modelo 5500-R de 100 kN de capacidad, a una rapidez de deformación de 10⁻⁴ s⁻¹ con el objetivo de que el hidrógeno disuelto interactúe con la microestructura del acero. Se ensayaron las probetas, sin hidrógeno y con hidrógeno disuelto. Se obtuvieron las gráficas esfuerzo - deformación para el análisis del comportamiento mecánico y determinación de las propiedades mecánicas: esfuerzo de fluencia, resistencia a la tracción, porcentaje de alargamiento y porcentaje de reducción de área.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

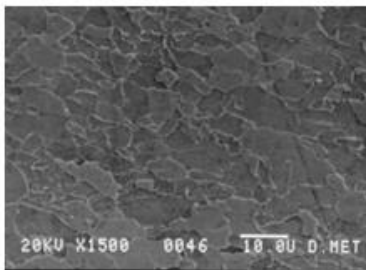
21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

5. Análisis de la Superficie de Fractura.

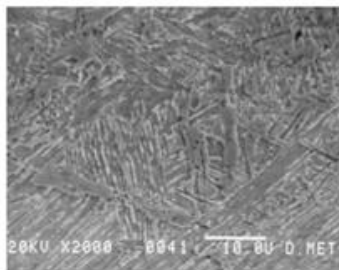
Se utilizó un microscopio electrónico de barrido (MEB) Marca Jeol Modelo HNU Systems para analizar las superficies de fractura que se originaron al ensayar en tracción las probetas con y sin hidrógeno. Se caracterizó si el material presenta un mecanismo de fractura: coalescencia de poros, clivaje o cuasiclivaje. Se determinó el efecto del hidrógeno sobre el modo de fractura en el acero API X60.

d. Resultados

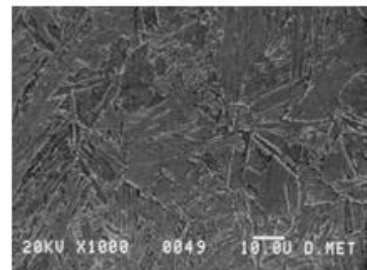
Las microestructuras obtenidas con los diferentes tratamientos se muestran en la Figura 1. En la Figura 1a, presenta la microestructura del acero con un relevado de esfuerzos, se observan granos de ferrita poligonal bien definidos. Debido al bajo contenido de carbono, no se encuentra la formación de la perlita. Los granos están orientados en la dirección de laminación. La Figura 1b, es la microestructura del acero envejecido a 315 °C; la cual consiste de ferrita acicular, bainita (ferrita bainítica) y martensita. La microestructura del acero envejecido a 650 °C se presenta en la Figura 1c, en donde se aprecia una mezcla de ferrita acicular y ferrita poligonal. Debido a la alta temperatura, la ferrita acicular tiende a recrystalizar para formar granos de ferrita poligonal.



(a)



(b)



(c)



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”
Multidisciplinario
21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

Figura 1. a) Relevado de esfuerzos a 650 °C, b) Envejecido a 3150°C, c) Envejecido a 650 °C

1.-Comportamiento mecánico.

En la Figura 2 se muestran las gráficas esfuerzo-deformación para la muestra testigo. En ambas, se observa la aparición del fenómeno del punto de fluencia, el esfuerzo de fluencia, la resistencia a la tracción y el porcentaje de elongación son mayores para la probeta sin hidrógeno. Se observa que el efecto del hidrógeno es el de disminuir las propiedades de resistencia y ductilidad del acero.

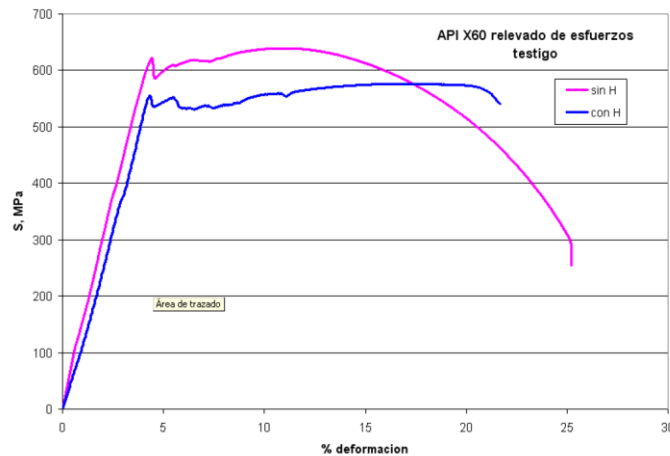


Figura 2. Gráfica esfuerzo – deformación para el acero en condición de relevado de esfuerzos a 650 °C.

En la Figura 3, se presenta la gráfica esfuerzo – deformación para el envejecido a 315 °C. Se observa que desaparece el fenómeno del punto de fluencia, en la probeta con hidrógeno se observa una pérdida significativa en la resistencia y ductilidad del acero con respecto a la probeta sin hidrógeno.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”
Multidisciplinario
21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

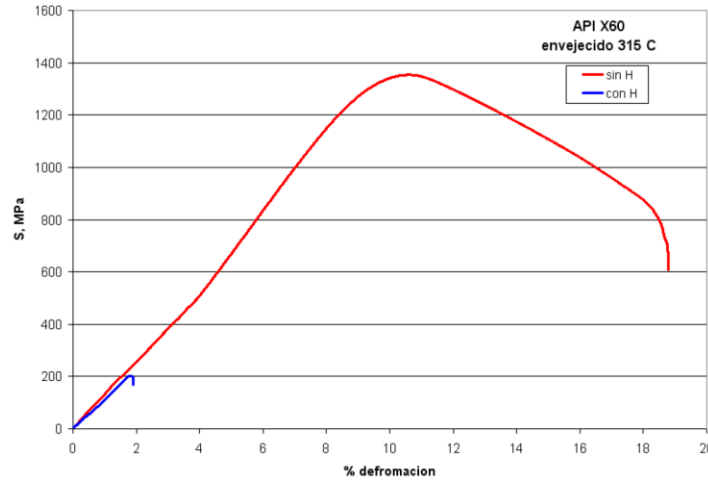


Figura 3. Gráfica esfuerzo – deformación para el acero en condición de envejecido a 315 °C.

El comportamiento mecánico del acero envejecido a 650 °C se muestra en la Figura 4. Con relación al relevado de esfuerzos, prácticamente desaparece el fenómeno del punto de fluencia, y la presencia de hidrógeno en el acero también disminuye la resistencia y ductilidad.

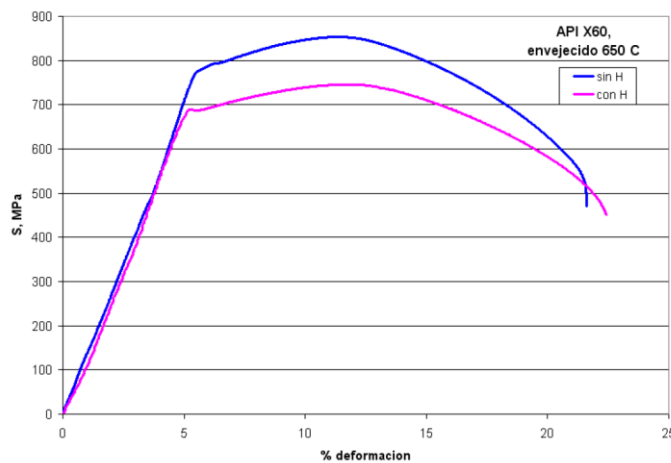


Figura 4. Gráfica esfuerzo – deformación para el acero en condición de envejecido a 650 °C.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”
 Multidisciplinario
 21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

2.-Índice de Fragilización por Hidrógeno.

La susceptibilidad al daño por hidrógeno se determinó mediante el Índice de Fragilización por Hidrógeno (FH), con la siguiente ecuación (1):

$$\%FH = \frac{\%RA_{sin H} - \%RA_{con H}}{\%RA_{sin H}} * 100 \tag{1}$$

Donde: $\%RA_{sin H}$ es el porciento de reducción de área de la probeta sin hidrógeno y $\%RA_{con H}$ es el porciento de reducción de área de la probeta con hidrógeno. Un índice de fragilización de 30% indica una susceptibilidad significativa que se manifiesta en una pérdida en las propiedades mecánicas del acero y un cambio en el modo de fractura, de coalescencia de poros hacia clivaje. En la Figura 5 se presenta el índice de fragilización para cada uno de los tratamientos aplicados al acero.

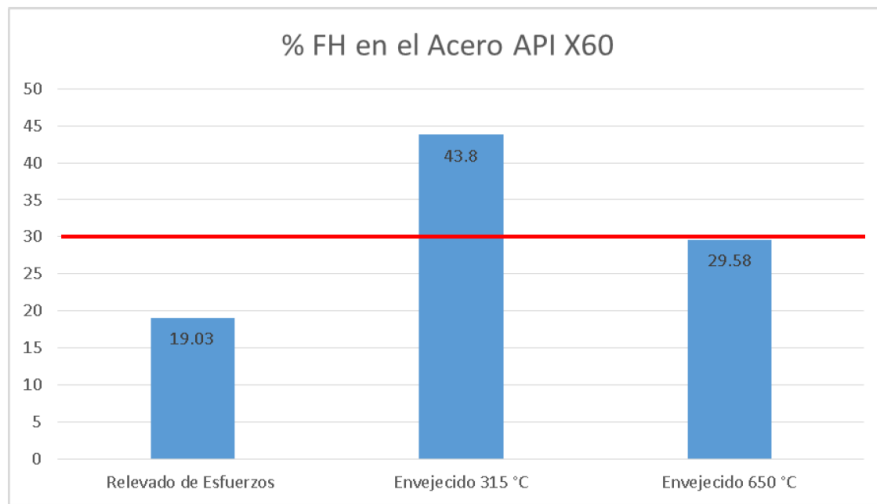


Figura 5. Índice de Fragilización por hidrógeno.

“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

Se observa que el acero envejecido a 315 °C alcanza un índice de fragilización de 44% y el envejecido a 650 °C un índice cercano al 30% es muy susceptible al daño por hidrógeno. Para prevenir la pérdida de propiedades mecánicas es recomendable evitar la microestructura que se forma a 315 °C.

3.-Superficie de fractura

La Figura 6 muestra las superficies de fractura de las probetas de tracción ensayadas. En (a) se aprecia una gran reducción de área, existe la coalescencia de poros que se asocia a una fractura dúctil. En (b), prácticamente no hay una reducción de área, es una superficie de fractura plana que se asocia a una fractura frágil. En (c), muestra una reducción de área que es menor que la mostrada en (a), también se observa un agrietamiento secundario.

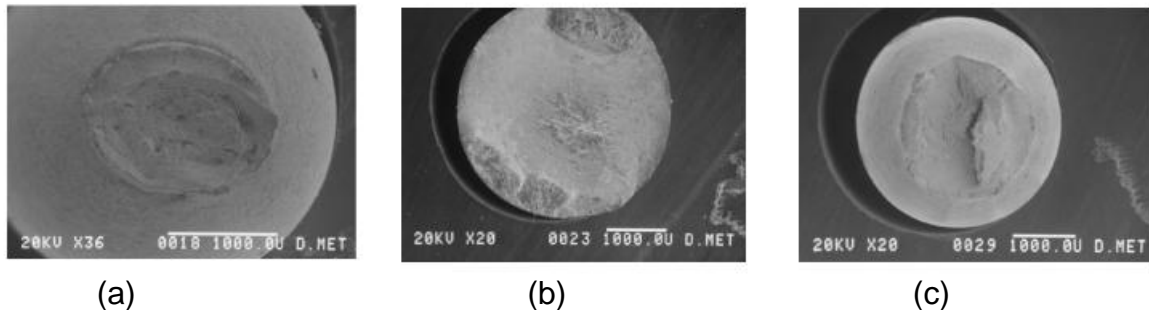


Figura 6. Superficies de fractura de las probetas de tracción sin hidrógeno. (a) relevado de esfuerzos a 650 °C, (b) envejecido a 315 °C, (c) envejecido a 650°C.

La Figura 7 muestra la superficie de fractura de las probetas con hidrógeno. En (a) la superficie de fractura es ovalada que se relaciona a una anisotropía en el material y un agrietamiento secundario muy apreciable. La reducción de área es baja pero es la fractura es dúctil. En (b), la superficie de fractura es plana, no hay

“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”
Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

reducción de área, y el mecanismo de fractura es frágil. En (c) se observa una reducción de área, acompañada de agrietamiento secundario. El mecanismo de fractura es dúctil.

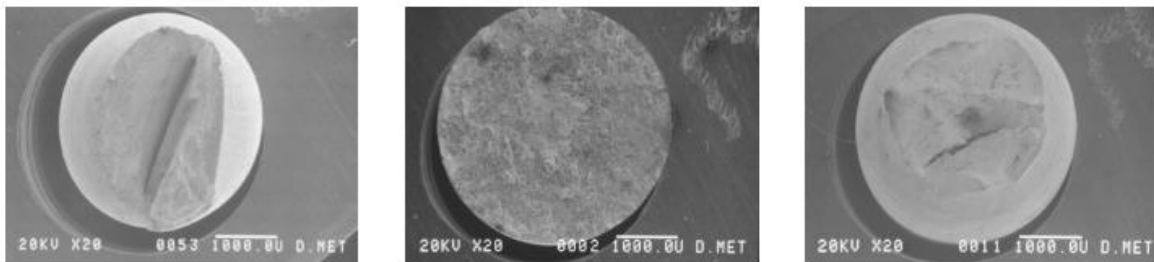


Figura 7. Superficies de fractura de las probetas de tracción con hidrógeno. a) Relevado de esfuerzos a 650 °C, (b) envejecido a 315 °C, (c) envejecido a 650°C.

e. Conclusiones

- La presencia del hidrógeno en el acero disminuye las propiedades de resistencia mecánica y ductilidad.
- La presencia del hidrógeno en el acero, cambia el modo de fractura de coalescencia de poros a clivaje en la condición de envejecido a 315°C.
- La microestructura menos susceptible al daño por hidrógeno es en la condición de relevado de esfuerzos.
- La microestructura más susceptible al daño por hidrógeno es en la condición de envejecido a 315 °C.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2016”

Multidisciplinario

21 y 22 de abril de 2016, Cortazar, Guanajuato, México

f. Bibliografía

- [1] William D. Callister, Jr. *“Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales”*. Editorial Reverte, 2007 España, 193-245.
- [2] INEGI, Cuéntame, disponible en: <http://cuentame.inegi.org.mx/impresion/economia/petroleo.asp>
- [3] PEMEX 2013, Producto y servicios, disponible en <http://www.pemex.org.mx> Petróleo crudo.
- [4] Beatriz Hernández Galván. *“Administración de la Integridad en sistema de transporte de hidrocarburos”*. Instituto Politécnico Nacional, 245-280.
- [5] Normas NRF-187-PEMEX-2013: MANTENIMIENTO A SISTEMAS DE TUBERÍA DE PROCESO EN INSTALACIONES MARINAS.
- [6] Mikell P. Groover. *“Fundamentos de Manufactura Moderna”*. Editorial Pearson, 1997 México, 580-640.
- [7] E. Saldaña, F.J. Belzunce y C. Rodríguez. 2002 INFLUENCIA DE LA MICROESTRUCTURA EN LA FRAGILIZACIÓN POR HIDRÓGENO DE ACEROS MICROALEADOS Universidad de Oviedo, E.T.S. Ingenieros Industriales.
- [8] S. Cabredo Pinillos, I. Sanz Vicente, J. Galban Bernal. 1995 NUEVO METODO PARA LA DETERMINACION DE SULFURO POR ESPECTROMETRIA DE ABSORCION MOLECULAR EN FASE GAS, zubia.
- [9] Cap. V. Daniel. *“Metalurgia de la Soldadura”* Seferian. Ed. TECNOS. Madrid.1962.