

## Caracterización metalúrgica del acero SA-612 deteriorado después de quince años de servicio

Vega Ángeles Antonio<sup>1</sup>, Garfias García Elizabeth<sup>2</sup>, Baeza Pérez Rubén de Jesús<sup>4</sup>, Aguilar Sánchez Miriam<sup>2\*</sup>  
Rangel Torres Gilberto, Vargas Arista Benjamín<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma Metropolitana, Estudiante de Maestría en Ciencias e Ingeniería Materiales. Av. San Pablo No. 180, Azcapotzalco, Ciudad de México. C.P. 02200. México.

<sup>2</sup>Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de materiales. Av. San Pablo No. 180, Azcapotzalco, Ciudad de México. C.P. 02200. México.

<sup>3</sup>Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Av Tecnológico s/n, Col. La Comunidad, C.P. 54070, Tlalnepantla de Baz, Edo. De México, México

<sup>4</sup>Universidad Autónoma Metropolitana, Estudiante de Ingeniería Metalúrgica. Av. San Pablo No. 180, Azcapotzalco, Ciudad de México. C.P. 02200. México.

\*Autor para correspondencia: mas@azc.uam.mx

### Recibido:

29/julio/2019

### Aceptado:

13/septiembre/2019

### Palabras clave:

Acero deteriorado,  
tanque presurizado,  
análisis microestructural

### Keywords:

Deteriorated steel,  
pressurized tanks,  
metallographic analysis

### RESUMEN

Se analizó el deterioro en tanque estacionario para gas LP de acero SA-612 después de quince años de servicio, mediante un análisis microestructural en el Microscopio Electrónico de Barrido (MEB), ensayos de impacto Charpy, tensión uniaxial y dureza Rockwell C. Se encontró que la resistencia máxima a tensión y dureza disminuyeron 15 y 36%, respectivamente, mientras que la elongación incrementó del 16 al 40%, con respecto a propiedades originales. De la caracterización microestructural se observó que el acero está deteriorado con reducción en la cantidad de perlita y precipitación de partículas en límites de grano ferrítico con tamaño grande debido a la exposición en intemperie. Por lo tanto, este tanque mostro degradación microestructural y mecánica en tensión e impacto, es decir, presento una condición de sobre-envejecimiento, a causa de las condiciones de servicio, favoreciendo posibles fugas de gas y explosiones catastróficas.

### ABSTRACT

The deterioration in stationary tank for SA-612 steel LP gas after fifteen years of service was analyzed by microstructural analysis in the Scanning Electron Microscope (SEM), Charpy impact tests, uniaxial tension and Rockwell C hardness. It was found that the ultimate tensile strength and hardness decreased 15 and 36%, respectively, while the elongation increased from 16 to 40%, with respect to original properties. From the microstructural characterization, it was observed that the steel is deteriorated with a reduction in the amount of pearlite and precipitation of particles in limits of ferritic grain with large size due to exposure in the outdoor. Therefore, this tank showed microstructural and mechanical degradation under tension and impact, that is, it presented an over-aging condition, due to the service conditions, favoring possible gas leaks and catastrophic explosions.

## Introducción

Dentro de los materiales metálicos que se utilizan en la fabricación de tanques estacionarios y estructuras presurizadas se encuentran las aleaciones de aluminio y aceros mostrados en la tabla 1 (AHMSA, 2011). Cada uno de estos aceros se utilizan dependiendo de las condiciones de trabajo, ya que los esfuerzos a los que se somete un tanque estacionario, en el cual es prácticamente nulo el movimiento, son diferentes a los esfuerzos generados en tanque cisterna de ferrocarril bajo condiciones de constante movimiento.

**Tabla 1.** Aceros utilizados en la fabricación de recipientes presurizados.

Especificaciones	Descripción y aplicación final
ASTM/ASME SA 414 C	Aceros de baja y media resistencia para tanques estacionarios
ASTM/ASME SA 285 C	
ASTM/ASME SA 414 G	Tanques estacionarios de alta resistencia
NOM-011-SEDG-1999	Cuerpo y tapa de recipientes portátiles de alta resistencia
DOT-178-61-5 GR.3	
ASTM/ASME SA 455	Recipientes estacionarios de alta resistencia
ASTM/ASME SA 516 60 y SA 516 70	Recipientes de media resistencia para servicio de media y baja temperatura
ASTM/ASME SA 612	Tanques de ferrocarril

Algunos aceros con los que se fabrican los recipientes presurizados, en específico los aceros expuestos a la intemperie pierden propiedades mecánicas, debido a la fatiga provocada por el ciclo de llenado y vaciado del material que contienen, cambios de temperatura causados por la radiación solar a lo largo del día, esfuerzos residuales generados por el peso del material y corrosión que se presenta con el paso del tiempo. En la actualidad, han reportado varios estudios que demuestran el deterioro de la resistencia a la fatiga, así como la oxidación de estos recipientes en condiciones de servicio (Zhang et al., 2019). La degradación en aceros puede evaluarse por diferentes pruebas estandarizadas como impacto Charpy, dureza, tensión y microscopía electrónica de barrido (MEB), comprobando la pérdida de estas propiedades mecánicas (Vargas et al., 2008).

Para esta investigación se realizó el estudio microestructural en muestras de acero extraídas de un tanque estacionario que estuvo sometido a condiciones

de trabajo durante quince años. Este estudio se realizó debido a que existen tanques estacionarios que sobrepasan el tiempo de vida útil recomendado por el fabricante y aun así siguen siendo utilizados.

Se debe considerar que el deterioro del acero puede ocasionar fugas de gas o en su defecto explosiones que pueden generar pérdidas humanas, ecológicas y económicas, esto puede ser debido al agrietamiento o desgarramiento del material asociado con las presiones internas en el tanque (Paredes et al, 2018).

## Metodología

### Material

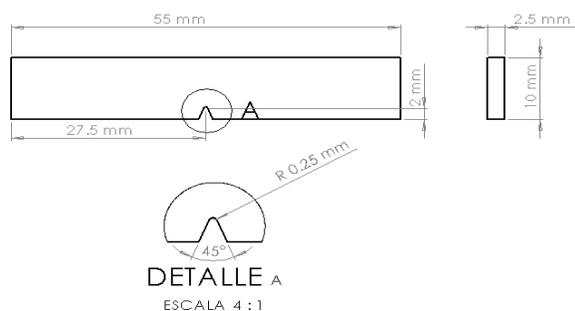
Se realizó la caracterización metalúrgica del acero con el que se fabricó un tanque estacionario en condiciones de servicio durante quince años. Para esto se realizaron pruebas de impacto Charpy, dureza Rockwell C (HRC), ensayo de tensión uniaxial y análisis microestructural. El tanque estudiado se fabricó de acero ASTM SA-612, que es el apropiado para la fabricación de autotanques donde se transportan materiales peligrosos. En la tabla 2 se muestra la composición química nominal, la cual corresponde a un acero al bajo carbono, así como las propiedades mecánicas originales de este acero.

**Tabla 2.** Composición química y propiedades mecánicas del acero SA-612 (AHMSA 2011).

Especificación	Composición química (% peso)				
	C	Mn	P	S	Si
Acero ASTM SA-612					
Espesor ≤ 0.500 pulg.	0.25	1-1.5	0.035	0.025	0.15-0.5
Propiedades mecánicas					
Espesor	Resistencia a la cedencia (MPa)	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Elongación (%)	Dureza (HRC)	
Espesor ≤ 0.500 pulg	345	572 a 724	16	de 7 a 16	

### Ensayo de impacto Charpy

La prueba Charpy consistió en colocar una probeta tipo A sujeta a un soporte, la cual presenta muesca en V con el objetivo de iniciar la fractura. Las dimensiones de esta probeta se muestran en la figura 1. Las probetas de impacto se maquinaron de acuerdo con el estándar (ASTM E23M, 2007).



**Figura 1.** Diagrama de las dimensiones de probeta utilizada en ensayo de impacto Charpy.

### Tratamientos térmicos

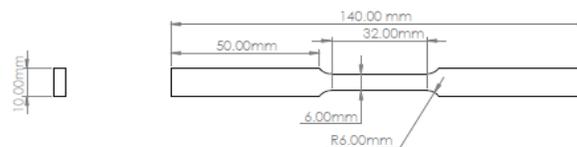
Las probetas fueron tratadas térmicamente antes de la prueba Charpy, por lo que en total se trabajaron doce probetas incluyendo tres condiciones diferentes más tres probetas como testigo (TS). Primero, se solubilizaron seis probetas a 900°C por una hora, de las cuales tres probetas fueron templadas en agua (T) y tres fueron templadas y revenidas a 200°C por una hora (TR). Por otra parte, tres probetas se calentaron a 100°C sin tratamiento térmico (ST) y ensayadas bajo impacto. Los tratamientos se realizaron en una mufla marca Carbolite modelo CSF 1200.

### Dureza Rockwell C (HRC)

Con este ensayo se mide la dureza de un material que proporciona la resistencia de la superficie a la penetración por otro material de mayor dureza (Askeland, 2013). Esta prueba se realizó en un durómetro marca Mitutoyo con un penetrador de diamante aplicando una precarga de 10 Kg<sub>f</sub> y una carga de 150 Kg<sub>f</sub>, bajo la escala Rockwell C y de acuerdo al estándar (ASTM E18, 2013). La superficie debe estar desbastada con una planicidad suficiente para aplicar la fuerza del indentador a 90°. Esta prueba se realizó en las probetas de impacto Charpy con el objetivo de analizar la dureza de cada una de las cuatro condiciones de tratamiento térmico mencionadas.

### Ensayo de Tensión Uniaxial

Las probetas de tensión fueron maquinadas con acero extraído del tanque estacionario, el cual tiene un historial de servicio de quince años. Las dimensiones de estas probetas se muestran en el diagrama de la figura 2. Este ensayo se efectuó con el objetivo de conocer la tenacidad, resiliencia, resistencia a la cedencia, resistencia máxima a la tensión, resistencia a la fractura y módulo de elasticidad. Las condiciones del ensayo fueron especificadas por el estándar (ASTM E8M, 2013) en una máquina universal para pruebas mecánicas marca SATEC Sistem Inc.



**Figura 2.** Diagrama de las dimensiones de probeta utilizada para el ensayo de tensión.

### Microscopia electrónica de barrido

El análisis por medio de MEB, se realizó con un equipo de emisión de campo marca Carl Zeiss modelo Supra 55VP, la muestra fue preparada metalográficamente hasta pulido a espejo y posteriormente atacada con Nital al 10% durante tres segundos de acuerdo al estándar (ASTME3M, 2011) seguido de una limpieza ultrasónica con acetona y alcohol isopropílico para un posterior secado. La imagen microestructural fue obtenida mediante electrones secundarios a 20kV y distancia de trabajo de 10.2 mm.

### Resultados y discusión

Los resultados de la energía de impacto Charpy se muestran en la tabla 3. Se observa que los valores fueron similares para las cuatro condiciones analizadas: temple, temple y revenido, calentamiento a 100° C y testigo. Por lo tanto, con los dos tratamientos isotérmicos propuestos y condición de calentamiento no se logra una mejora significativa en la resistencia al agrietamiento bajo impacto (tenacidad) del acero al bajo carbono ASTM SA-612. Esto indicó que el acero se encuentra degradado mecánicamente por lo que su resistencia al impacto, así como su capacidad de absorber energía durante la fractura fue mínima (Vargas et al., 2008).

**Tabla 3.** Valores de energía de impacto Charpy en diferentes condiciones de tratamiento térmico del acero SA-612.

Probeta	Energía de impacto (J)			
	Temple (T)	Temple y revenido (TR)	A 100 °C (ST)	Testigo (TS)
1	26	22	18.5	20
2	20	20	21	19.5
3	19	20	16	18
Promedio	22	21	19	19

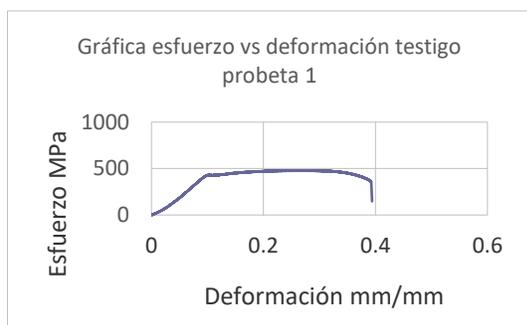
Los resultados de las pruebas de macro-dureza se muestran en la tabla 4. Se observa que después del tratamiento térmico de temple se alcanzó la mayor dureza Rockwell promedio, es decir se logró un evidente endurecimiento. Con el temple seguido del revenido, la dureza disminuyó tres números, por lo que el acero recuperó la capacidad de tenacidad al impacto. Además, para la condición de calentamiento a 100°C, la dureza encontrada fue baja en comparación con el temple y

revenido. Sin embargo, en las pruebas que se realizaron al acero testigo, los valores de dureza Rockwell fueron muy bajos, comparándolo con un acero nuevo de la misma calidad, lo cual presentó una condición de degradación mecánica en resistencia a la indentación del acero analizado (Vargas et al., 2006).

**Tabla 4.** Resultados de dureza Rockwell C en diferentes condiciones de tratamiento térmico para el acero SA-612.

Probeta	Dureza Rockwell (HRC)			Testigo (TS)
	Temple (T)	Temple y revenido (TR)	A 100 °C (ST)	
1	31	28	8	5
2	31	29	7	4
3	32	28	7	4
Promedio	31	28	8	4

En la figura 3 se observa la curva esfuerzo contra deformación ingenieril del ensayo de tensión para el acero al bajo carbono SA-612 con quince años de servicio. Es importante mencionar que se observa el fenómeno metalúrgico de la cedencia discontinua (Vargas et al., 2009). Con una serie de picos de deformación plástica heterogénea en el cambio de pendiente de la curva, la cual es típica de un acero envejecido por las condiciones de trabajo. Además, se encontró que la elongación fue del 36% (ver tabla 5) en comparación con el valor (16%) para este acero en condición original, lo cual significa que el acero es muy dúctil y por lo consiguiente, la dureza Rockwell disminuyó, tal como se comprobó con los resultados de dureza reportados en la sección previa. El incremento observado en la ductilidad fue debido a la degradación de la resistencia máxima a la tensión (496 MPa) del acero en comparación con su resistencia original (572 MPa) a causa de la condición de sobre-envejecimiento favorecida por el tiempo en servicio prolongado (Vargas et al., 2014).



**Figura 3.** Curva esfuerzo contra deformación del acero SA-612 de tanque estacionario con quince años de servicio.

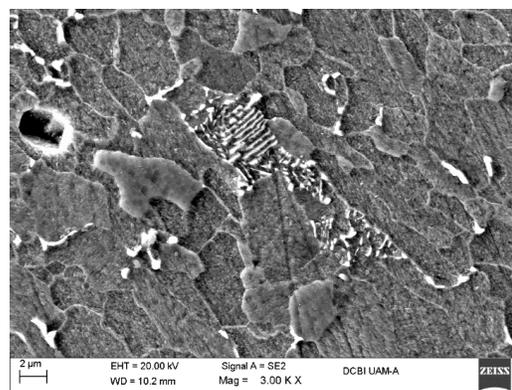
En la tabla 5 se enlistan los resultados de propiedades mecánicas bajo tensión del acero extraído del tanque estudiado: resistencias a la cedencia ( $\sigma_y$ ), máxima a la

tensión ( $\sigma_{max}$ ) y a la fractura ( $\sigma_f$ ), módulo de Young (E), resiliencia (R), tenacidad (T) y ductilidad (%). Estos resultados experimentales se compararon con las propiedades iniciales que debería tener este acero SA-612, resultando que la resistencia máxima a la tracción se redujo 15%. En cuanto a la elongación, se incrementó por más del 100% confirmado que el acero está degradado mecánicamente bajo tensión asociado con una condición de sobre-envejecimiento (Vargas et al., 2014). Para confirmar estos resultados y observar la degradación del acero SA-612 se analizó microestructuralmente una muestra del acero extraído del tanque.

**Tabla 5.** Resultados del ensayo uniaxial del acero SA-612 con quince años de servicio.

Propiedades mecánicas de tensión						
* $\sigma_y$ (Mpa)	$\sigma_{max}$ (Mpa)	$\sigma_f$ (MPa)	E (GPa)	R (MJ/m <sup>2</sup> )	T (MJ/m <sup>2</sup> )	E (%)
439	496	367	4.93	19.7	147.24	36

Se aprecia de la micrografía en la figura 4, obtenida por MEB, un acero al carbono formado por una matriz de granos ferríticos grandes, con presencia de un grano de perlita y varias partículas en los límites de grano. Del estudio microestructural en el MEB se aprecia que existe una disminución notoria de las colonias de perlita, esto debido a que el acero ha pasado por un proceso de deterioro, lo cual concuerda con los resultados obtenidos durante el estudio de las propiedades mecánicas bajo tensión, impacto e indentación observados en las tablas 3, 4 y 5, así como en la figura 3, ya que dichos resultados están por debajo a lo establecido para el acero de estudio.



**Figura 4.** Micrografía mediante MEB de la microestructura del acero SA612 deteriorado con carburos en límite de grano después de quince años de servicio.

Por lo anteriormente analizado, es posible mencionar que los tanques estacionarios utilizados en el almacenamiento de gas LP se van deteriorando con el tiempo favorecido por las condiciones de llenado y exposición a la intemperie. La dureza del acero fue menor

a la que debería presentar originalmente, esto se atribuyó a la degradación microestructural observada con el MEB relacionada con la menor cantidad de perlita, así como el crecimiento de los granos ferríticos a tamaños grandes, favoreciendo mayor ductilidad. La resistencia máxima a la tracción disminuyó 15% con respecto a la ficha técnica del acero SA-612 original (AHMSA, 2011). Finalmente, con respecto a la mínima energía de impacto Charpy del acero analizado, significó que este no absorbió la energía de un material que no ha sido utilizado en servicio, a causa de la degradación mecánica y microestructural (Vargas et al., 2007).

## Conclusiones

Después de la caracterización metalúrgica del acero al bajo carbono ASTM SA-612 utilizado en la fabricación de tanques estacionarios para contener y almacenar gas L.P., se encontró una microestructura con granos ferríticos grandes, con presencia de cantidad limitada de perlita, así como partículas en los límites de grano, esto aunado a la disminución de las propiedades mecánicas como son la resistencia máxima a la tensión, energía absorbida Charpy y dureza Rockwell C, respecto a las especificaciones del material original (AHMSA, 2011). Lo anterior podría estar directamente relacionado al paso del tiempo y exposición al ambiente. El deterioro del acero involucró la pérdida de dureza y disminución de la resistencia mecánica bajo tensión, así como la menor cantidad de perlita en la microestructura, que da como resultado un acero en condición de sobre-envejecimiento mecánico y microestructural. Los tratamientos térmicos de temple y revenido realizados confirmaron la degradación de la microestructura y propiedades mecánicas, ya que después de llevar a cabo ambos tratamientos, no se obtuvo la respuesta en la energía de impacto que se tendría con un material de reciente fabricación. Lo anterior representa un potencial peligro ya que pueden generarse fugas de gas, el cual es un material inflamable y por consiguiente podría causar una explosión.

## Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Autónoma Metropolitana en especial al área de materiales por el préstamo de las instalaciones para realizar las pruebas de caracterización.

## Referencias

- Altos Hornos de Mexico, S.A. de C.V. AHMSA (2011). Manual de especificaciones y garantías AHMSA, 5ª Ed, Coahuila México.
- American Society for Testing and Materials ASTM E-18 (2013). Standard test methods for Rockwell hardness of metallic materials.
- American Society for Testing and Materials ASTM E-23M (2007). Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials.
- American Society for Testing and Materials ASTM E8M (2013). Standard test methods for tension testing of metallic materials.
- American Society for Testing and Materials ASTM E3 (2011) Standard guide for preparation of metallographic.
- Askeland D.R., (2013). Ciencias e ingeniería de los materiales. 3ª Ed. Thompson, p.221.
- Paredes M., Sarzosa B.D.F., Saviolli R.G., Wierzicki T., Jeong DY., Tyrell David C., (2018). Ductile tearing analysis of TC128 tank car steel under mode I loading condition, *Theoretical and applied Fracture Mechanics*, 96, 658-675.
- Vargas-Arista B., Albitier C., Chavez A.J., Hallen J.M. (2006). Effect of Artificial Aging Time on the Mechanical Properties of Weldment on API 5L X-52 Line Pipe –Steel. *Metallurgy and Materials Transaction A-Physical Metallurgy and Materials Science*. 37A (9), 2683-90, issn1073-5623.
- Vargas-Arista B., Hallen M.J., Albitier (2007). A. Effect of the Artificial Aging on the Microstructure of Weldment on API5L X-52 Steel Pipe, *Materials Characterization*, 58 (8-9), 721-29.
- Vargas-Arista B., Chavez A., Albitier A., Halle M. J. (2009). Metallurgical Investigation of the Aging Process on Tensile Fracture Welded Joints in Pipeline Steel. *Materials Charact.* 60 (12), 1561-1568, ISSN 1044-5803.
- Vargas-Arista B., Albitier A., García V.F., Mendoza C.O., Hallen M.J. (2014) Effect of natural aging on the microstructural regions, mechanical properties, corrosion resistance and fracture in welded joints on API5L X52 steel pipeline. *Revista de Metalurgia*, 50(3), 1-11.
- Vargas-Arista B., Hallen J.M., Albitier A., Ángeles C. (2008). Degradación de la tenacidad al impacto durante el envejecimiento acelerado de soldadura en acero microaleado, *Revista de Metalurgia*, 44 (6), 485-492.
- Vega A. A., Barrales G. V.R., Vargas A B., Aguilar S. M., Barrales G. R., Polo V. A. (2019) Application of dimensional analysis in the study of impact behaviour on tank truck structures. *IOP Conference Serie: Journal of Physics*, 1221/012025 ISSN 1742-6588, E-ISSN 1742-6596.
- Zhang Z., Tan J., Wua, Hou H. E., Ke W., Rao J. (2019). Effects of temperature on corrosion fatigue behavior of 316LN stainless Steel in high-temperature pressurized water. *Corrosion Science*, 146: 80-89.