 Minería y Geología / v.41 n.2/ abril-junio / 2025/ p. 213-225 ISSN 1993 8012

ARTÍCULO ORIGINAL

Comportamiento metalográfico en la fractura de un colgante de transportador de tornillo sinfín

Metallographic behavior in the fracture of a pendant of an endless screw conveyor

Lisander Romero-Breffe[1], Daniela García-Torres[1]

[1]Universidad de Moa, Holguín, Cuba.

*Autor para la correspondencia: lromerob@ismm.edu.cu

Resumen

La investigación se enfoca en determinar la estructura interna en la falla por fractura de un colgante de un transportador de tornillo sinfín fabricado de acero AISI 4340. Se realizó la inspección visual al elemento fracturado, el cual fue cortado en secciones, próximo al área fracturada y en la más alejada de ella para determinar el efecto de la dureza luego de ocurrido el fenómeno. Se estableció la metodología para establecer el porcentaje de microconstituyentes. Se determina que la falla por fractura del colgante es ocasionada por la formación de marcas circulares concéntricas con marcas de playa en fractura por fatiga, indicativo de fractura por mecanismo de clivaje, donde los valores de dureza en la zona de fractura se encuentran entre los 329,8 HV y en la zona más alejada de la falla, el valor es de 326,4 HV; propiedad que se alcanza al aplicar tratamiento térmico de revenido a 600°C.

Palabras claves: colgante, fractura, fatiga, grietas, estructura interna, transportador de tornillo sinfín

Abstract

This study aims to determine the internal structure in the fracture failure of pendant of an endless screw conveyor made of AISI 4340 steel. The fractured element was visually inspected and cut into sections, close to the damaged area and the furthest from it for determining the hardness effect after the event occurred. The methodology to establish the percentage of microconstituent was established. Our results showed that the fracture failure of pendant is caused by the forming concentric circular marks with beach marks on fatigue fracture, indicating fracture by cleavage mechanism, where hardness values in the fracture zone are between 329.8 HV and in the zone farther away from the failure, the value is 326.4 HV, property reached when applying tempering heat treatment at 600 °C.

Keywords: pendant, fracture, fatigue, cracks, internal structure, screw conveyor

1. INTRODUCCIÓN

La fatiga es una forma de fractura que se produce en estructuras metálicas sujetas a tensiones variables. El término fatiga es usado debido a que este tipo de fractura se produce después de un período de tensiones cíclicas, las cuales surgen por el efecto de cargas repetitivas. August Whöler introdujo las curvas S-N (tensión-número de ciclos) que llevan su nombre para describir la relación entre la amplitud de las tensiones cíclicas y el número de ciclos para su rotura. Las tensiones cíclicas aplicadas pueden ser de naturaleza axial, flexional o torsional (Cavalieri *et al.,* 2011; Gainza-Legrá, 2016).

La fractura por fatiga comienza por pequeñas grietas que crecen bajo la acción de estrés fluctuante donde se destaca por medio de un valor máximo menor que la resistencia a la tracción, la estructura cristalina del metal bajo la acción de aplicaciones de carga repetitiva de bajo nivel a este tipo de cambios puede llegar a formar pequeñas y grandes grietas, siempre y cuando la carga cíclica continúa y eso puede conducir a la fractura de la pieza. Una vez iniciado este tipo de falla puede propagarse a altas tensiones y ciclos bajos o por tensiones bajas y ciclos altos. Puede llegar a tener diferentes características, parecido a la fractura frágil o dúctil, dependiendo del tipo de material de la pieza que haya sido involucrado en las circunstancias de estrés o causas ambientales (Vázquez *et al.,* 2023; Megias *et al.,* 2023).

Las propiedades de la fatiga de los materiales se determinan a partir de ensayos en laboratorios. Dichos ensayos deben, en lo posible, reproducir con exactitud las condiciones de servicio del material. Tradicionalmente, se somete el material a tensiones cíclicas relativamente altas y se registra el número de ciclos hasta su rotura, luego se reduce la amplitud de las tensiones máximas y se repite el experimento. Es importante mencionar que el número de ciclos va asociado a la vida del material, es decir, se puede garantizar tiempo de vida útil de una estructura si las tensiones se mantienen en un valor fijo (Govindu & Jayananh, 2015; Inzana *et al.,* 2016).

Las cargas cuyas amplitudes son variables a lo largo del tiempo producen la rotura sobre las estructuras para valores de tensión inferiores a los que suceden en casos de cargas de amplitud constante. A este fenómeno es al que denominamos fatiga. Es definido de una manera general por las normativas ASTM como "el proceso de cambio estructural permanente, progresivo y localizado que ocurre en un punto del material sujeto a tensiones y deformaciones de amplitudes variables y que produce grietas que conducen

a una fractura total tras un número de ciclos" (Jaramillo & Bacca, 2009; Lee *et al.,* 2014).

Por otro lado, la teoría de la fractura por fatiga permite predecir el crecimiento de la grieta con los ciclos de carga. Es por ello por lo que los métodos tradicionales de cálculo junto con la teoría de la fractura por fatiga proporcionan una sólida base para el diseño de sistemas estructurales metálicos (Madenci & Guven, 2015).

El presente trabajo tiene como objetivo determinar el comportamiento metalográfico en la fractura de un colgante de un transportador de tornillo sinfín.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La Tabla 1 muestra la composición química del acero AISI 4340, según la *Alloy Casting Institute* (ACI), la AISI - SAE, de *la American Society for testing Materials* - ASTM y la SAE.

Tabla 1. Composición química del acero AISI 4340; % en masa

Grado	C	Mn	P	S	Si
AISI 4340	0,38-0,43	0,75-1	< 0,035	< 0,04	0,15-0,35
	Ni	**Cr**	**Mo**	**Fe**	
	< 0,25	0,8-1,1	0,20-0,30	Balance	

El acero AISI 4340 es de baja aleación, ya que contiene menos de 10 % de los elementos aleantes como la norma AISI (43XX). Los principales elementos son níquel, cromo y molibdeno, los cuales dan diferentes propiedades al material, tales como resistencia a la corrosión (Cr), aumento de la templabilidad y tenacidad del material (Ni), y aumento de la resistencia en caliente y la resistencia a la termofluencia (Mo) (Albarbar, 2013; Ayatollahi *et al*., 2014).

2.1. Preparación metalográfica de las probetas

El modelo de la Figura 1 fue el considerado para realizar el análisis metalográfico del colgante perteneciente a la artesa de un transportador de tonillo sinfín.

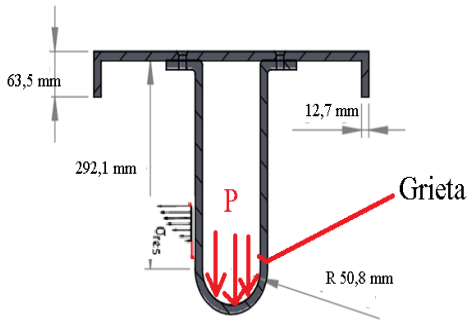


Figura 1. Condiciones de carga.

La distribución de tensiones residuales es un tipo de carga producido por las tensiones generadas durante el proceso de laminado. Puesto que se supone material elástico-lineal, el principio de superposición será aplicable y utilizado para tener en cuenta la distribución de tensiones residuales en el colgante.

Previo a la realización de la inspección visual se ejecuta una limpieza de la pieza para eliminar la cubierta de grasa o polvo, la cual se remueve en su totalidad con diluente y un cepillo de cerdas suaves. Se observan, como se muestra en la Figura 2, marcas circulares concéntricas en el colgante.

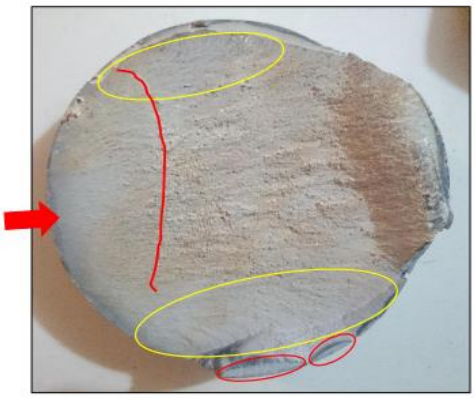


Figura 2. Mecanismo de fractura del acero AISI 4340.

En el mecanismo de fractura se observa el inicio de la grieta señalada por la flecha, además de marcas de playa en la zona destacada con un círculo amarillo; la frontera o cambio en las marcas del material se resalta por una línea roja, y posterior a esta línea en sentido de la flecha aparece un cambio en la morfología observándose otro tipo de fractura, como si esta se hubiese desgarrado, así como numerosas marcas de una fractura frágil, indicadas por círculos rojos, por la martensita de la superficie del material.

Para la preparación de las probetas se realizó un conjunto de operaciones con la muestra como son: selección, toma o corte, montaje y preparación, ataque, análisis microscópico y obtención de fotomicrografías (NC 10 - 56:86 y ASTM E 3 – 95).

Al seleccionar la parte a estudiar se tuvo en cuenta que en la misma no hubiese tenido incidencia otro proceso anteriormente ejecutado. El tamaño de la probeta se escogió de forma tal que permitiera sostenerse con la mano durante su preparación y en función del área de trabajo del microscopio elegido. Se seleccionaron muestras del colgante empleado en el proceso productivo.

2.2. Corte de las muestras

La máquina de corte empleada para la preparación de las probetas es del tipo CM 260, marca echo RD. Esta posee cinco chorros de líquido refrigerante que garantizan una constante lubricación para evitar calentamiento y, por consiguiente, transformaciones microestructurales en las superficies de contacto. En la Figura 3 se muestra el área de corte de las probetas.

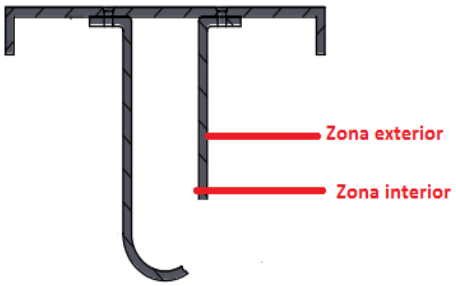


Figura 3. Área de corte de las probetas.

El corte se realizó de forma tal que se pudiera observar la microestructura según la configuración geométrica; que permitiera, además, su fácil manipulación y posterior nivelación, así como el ataque químico. Se consideraron tres probetas y se encapsularon con resina epoxi ROYAPOX 50-50 para poder realizar las operaciones de desbaste y pulido y garantizar el fácil manejo de estas. La operación se realizó con una máquina de marca echo RD, de tipo MP 350 A.

Para realizar el análisis microestructural en bordes de muestras deformadas es importante conservar un ángulo de 90º en toda el área de observación, ya que, durante las operaciones de desbaste y pulido, estos bordes se distorsionan redondeándose, y se obtiene una falsa observación de la imagen en el microscopio.

2.3. Operación de desbaste y pulido

Se realizó al variar la granulometría de los papeles abrasivos al ser aplicadas a la pieza de trabajo, desde la más gruesa a la más fina, del tipo No. 400, 600 y 800 (ASTM E 3-95). Las lijas se colocaron sobre una placa de vidrio (Figura 4). Se cambió el sentido del lijado a 90º al pasar de un pliegue a otro para eliminar la capa de material distorsionado y deslizado dejado por el

anterior; esto permitió obtener una superficie lisa y pulida, libre de impurezas o rayaduras. Por último, las muestras se pulieron en una pulidora metalográfica marca MONTASUPAL.

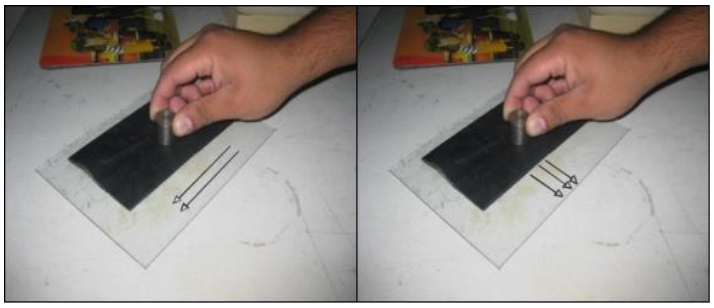


Figura 4. Desbaste de las probetas.

Para atacar las probetas se empleó como reactivo químico el nital al 5 %. Se vertió en una cápsula en la que se introdujo la probeta, se detuvo el ataque sumergiendo las probetas en el agua y luego se observó la superficie. Después del ataque se lavó la probeta nuevamente con abundante agua corriente, se secó con alcohol (absoluto) y al aire.

2.4. Comportamiento microestructural

Las probetas se observaron bajo un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM–100. Este está dotado de una cámara instalada mediante el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe que refleja la fotografía en el computador. Una vez regulada la altura del lente se obtuvo la fotomicrografía de 640 x 480 megapixeles, la cual fue obtenida a través del software *Scope Photo,* como se muestra en la Figura 5.

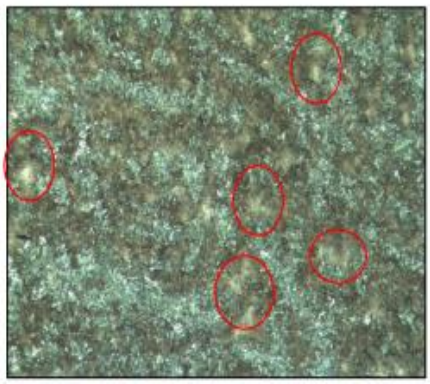


Figura 5. Metalografía de AISI 4340.

La microestructura es consistente con la presencia de bainita con algo de austenita retenida señalada por los círculos; básicamente es una microestructura esperada por este tipo de material por los porcentajes de níquel.

Para colocar las probetas en el microscopio y evitar una observación distorsionada de las imágenes, se colocaron en un dispositivo con plastilina, lo cual permitió una nivelación paralela con respecto al objetivo de observación. El análisis microestructural consistió en la observación de una muestra del acero AISI 4340. El objetivo de este análisis fue obtener una muestra sin afectación en su estructura cristalina que permitiera determinar el tratamiento térmico al que fue expuesto la tolva antes de su puesta en explotación.

2.5. Determinación de los microconstituyentes

Para ello se empleó un microscopio óptico binocular reflexivo marca echoLAB, dotado de una cámara instalada mediante el hardware que refleja la fotografía en el computador. Realiza la reflexión de la luz de la probeta pulida con una cámara digital acoplada, la cual va desde el microscopio hacia una laptop LENOVO, donde se encuentra un programa analizador de imágenes tomadas desde la cámara.

Se evaluaron las fases, tamaño del grano, inclusiones y afectaciones en los granos, y se elaboró un reporte técnico con estas características. En este ensayo los granos van a presentar colores diferentes, adicionalmente los átomos en los límites son más reactivos durante el ataque químico y se disuelven en mayor cantidad que el grano mismo, por ello la reflexividad cambia y se acrecienta su visibilidad. Las etapas consideradas para el procesamiento digital de imágenes son una constante para los distintos softwares, y su aplicación va en función del producto deseado.

El procedimiento para el análisis de los microconstituyentes según la norma ASTM A 247 se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Procedimiento para el análisis de los microconstituyentes

Microconstituyentes	Área	Área %
1	Área 1	Área 1
2	Área 2	Área 2
3	Área 3	Área 3

El procedimiento fue necesario para estimar los porcentajes de los microconstituyentes presentes en las diferentes zonas analizadas en la tolva, con los cuales, a su vez, se pueden estimar la dureza en esta zona. En este ensayo, cuando en la estructura los granos presentan diferentes colores, indica la existencia de más de un microconstituyente.

2.6. Ensayo de microdureza aplicado a las muestras

El ensayo de microdureza se realizó para determinar la dureza de volúmenes microscópicamente pequeños en la aleación. Se utilizó un microscopio modelo HTU 200 BVR D. La carga aplicada fue de 0,49 N, en un tiempo de 15 s. El indentador empleado fue el de pirámide de diamante, con un ángulo de 136º según la ASTM E 92-82.

3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Composición química del acero AISI 4340

La Tabla 3 muestra la composición química del acero AISI 4340 determinada en espectrómetro cuántico de masa, ESPECTROLAB 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón.

Tabla 3. Composición química del AISI 4340, % en masa

Grado	C	Mn	P	S	Si
AISI 4340	0,396	0,746	0,035	0,04	0,262
	Ni	**Cr**	**Mo**	**Fe**	
	1,771	0,81	0,25	Balance	

3.2. Comportamiento microestructural del colgante

El comportamiento microestructural del acero AISI 4340 se analizó posteriormente al del fenómeno de la fractura, teniendo en cuenta la microestructura del material en estado de entrega. La Figura 6 muestra una microestructura heterogénea de bainita, martensita revenida e islas de martensita sin revenir, también se aprecia la presencia de una zona de ferrita e inclusiones no metálicas de sulfuro de manganeso SMn.

El agregado de manganeso (Mn) en los aceros se debe a su mayor afinidad que el hierro para combinarse con el azufre y formar sulfuro de manganeso, que evita de este modo la formación indeseable de sulfuro de hierro que tiene un bajo punto de fusión y produce fisuras internas cuando se lamina en caliente al acero.

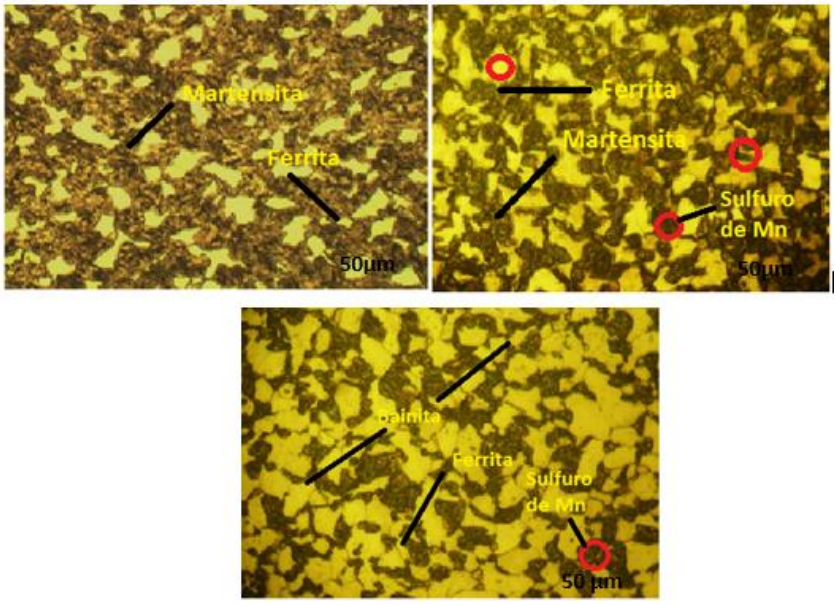


Figura 6. Microestructura del AISI 4340.

La estructura presenta bastones de bainita superior y granos de ferrita en menor proporción. La misma es producto de un enfriamiento al aire (normalizado) desde una temperatura superior a la de austenización, que ocurrió posterior al laminado. No se observan diferencias significativas entre las estructuras en el corte transversal al sentido de laminación, y esto se debe a que se produjo una recristalización total de los granos austeníticos luego de la deformación plástica.

La heterogeneidad microestructural observada es consecuencia de una diversidad química en el material que presenta tratamientos térmicos de temple y revenido. En aceros de más de 0,4 % C al templar a temperatura ambiente ocurre la descomposición de la austenita retenida provocado por el revenido a temperaturas entre 200 °C y 300 °C, que produce transformación de esta en bainita. Esto explica el aumento de dureza en aceros de alto carbono para revenidos de baja temperatura, debido a que la bainita tiene más dureza que la austenita. Sobre 350 °C la pérdida de dureza es causada por un efecto de recristalización, reportado por Srivastava *et al.* 2015).

La fractura del acero AISI 4340, perteneciente a la artesa del transportador de tornillo sinfín puede estar originado por fragilización de una etapa, mecanismo que podría ser causado por las impurezas del acero. Este fenómeno afecta a aceros de baja aleación templados a martensita y luego revenidos en el rango de 250 °C a 350 °C. Se caracteriza porque la dureza decrece continuamente, y la resistencia al impacto pasa por un mínimo, justo a los 350 °C, para luego ascender. Además, la fragilización va acompañada de fractura predominantemente intergranular. Elementos de aleación como el manganeso pueden tener un efecto indirecto en la promoción de

segregación de elementos de fragilización en los bordes de grano, criterio que coincide con Mantwatkar y Chavan (2016); Guerra-Fernández *et al.* (2019).

3.3. Fases presentes en el acero

El análisis de la distribución de los microconstituyentes en la estructura permitió determinar la influencia que ejerce la fase en el fenómeno de fractura del acero AISI 4340. La Figura 7a corresponde con la microestructura del acero y la 9b, con los microconstituyentes que pertenecen a esta distribución.

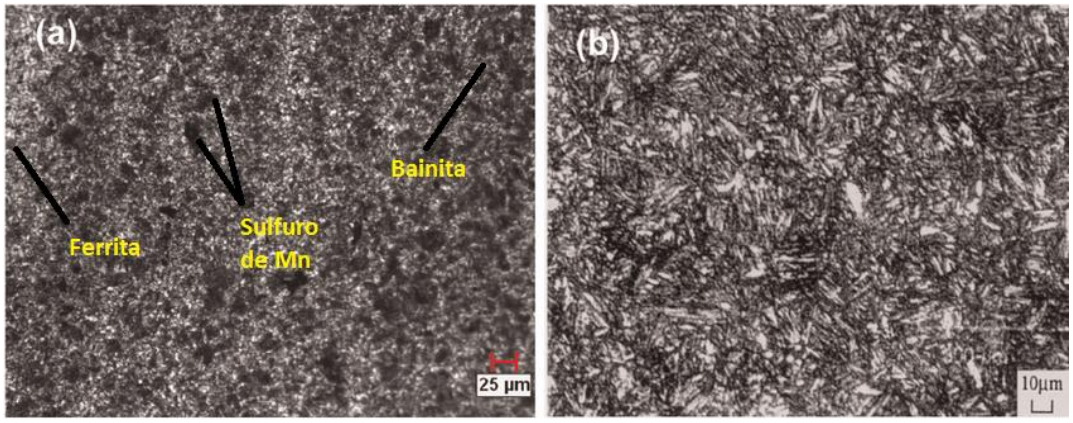


Figura 7. a) Microestructura AISI 4340 b) Microconstituyentes

En la distribución de los microconstituyentes o fases (Figura 7b) se observa una distribución heterogénea de estos sobre la estructura. Por otra parte, no se observan diferencias significativas entre las estructuras en el corte transversal al sentido de laminación, y esto se debe a que se produjo una recristalización total de los granos austeníticos luego de la deformación plástica. Se distingue una distribución de la bainita y de los granos de ferrita en forma de bastones, este comportamiento es producto de un enfriamiento al aire (normalizado) desde una temperatura superior a la de austenización, que ocurrió posterior al laminado.

La Tabla 4 muestra la distribución de las fases sobre la estructura y el área que ocupan sobre esta. La microestructura en el núcleo del colgante de la artesa del transportador de tornillo sinfín está compuesta por martensita (51,24 %), seguido de la ferrita con un área de 21,6 % y de la bainita con el 26,96 %, estructura que tiende a presentar granos de mayor tamaño y, por consiguiente, una reducción en la dureza. En la parte inferior que se presentó la falla, presumiblemente esta distribución provocó que, por efecto de la fase ferrítica, existiera el desgarrado en la dirección de aplicación de la fuerza.

Tabla 4. Datos de las fases presentes

Microconstituyentes	Área	Área %
Martensita	345 274	51,24
Ferrita	306 783	21,6
Bainita	167 671	26,96

3.4. Comportamiento de la dureza en el colgante

La dureza Vickers (HV) ha de considerarse como una dureza plástica, ya que se ha determinado a partir de la huella permanente o residual, es decir, sobre la deformación plástica, obtenida en la superficie del material después de la penetración. En la Tabla 5 se reportan los resultados de dureza obtenidos para el material de acuerdo a cada condición de selección de las muestras. Se muestra un esquema de la secuencia de la toma de durezas en las secciones transversales y longitudinales de las muestras.

Tabla 5. Comportamiento de la dureza

Prob	Zona de fractura			HVprom	Zona alejada de la fractura			HVprom
1	329,6	328,5	329,8	329,9	325,8	326,6	325,4	325,9
2	330,3	330,6	330,4	330,4	326,7	326,9	325,6	326,4
3	331,7	332,1	331,7	331,1	326,5	327,7	326,8	327,0

Los valores de dureza para la muestra medida en la zona de fractura se encuentra entre los 329,8 HV aproximadamente (32,3 HRC) y en la zona más alejada de la falla, el valor es de 326,4 HV (32,2 HRC). Este comportamiento es típico de estructura bainítica y martensita, lo que confirma la existencia de una heterogeneidad en las propiedades mecánicas producida por segregación química. El incremento de la dureza en la zona de fractura puede ser atribuible al efecto de la deformación plástica sobre esta propiedad.

4. CONCLUSIONES

- La falla por fractura del colgante perteneciente al transportador de tornillo sinfín fabricado de acero AISI 4340, se ocasiona por la formación de marcas circulares concéntricas con marcas de playa en fractura por fatiga, indicativo de fractura por mecanismo de clivaje.

- La fractura en el acero AISI 4340 pudiera originarse por fragilización de una de las etapas del tratamiento térmico asociada a la formación de sulfuro de manganeso; este fenómeno suele afectar a aceros de baja aleación templados a martensita y posteriormente revenidos en el rango de temperatura de 250 °C a 350 °C.

5. REFERENCIAS

Albarbar, A. (2013). An investigation into diesel engine air-borne acoustics using continuous wavelet transforms. *Journal of Mechanical Science and Technology*, (27).

Ayatollahi, M., Razavi, S., Chamani, H. (2014). Fatigue life extension by crack repair using stop-hole technique under pure mode-I and pure mode-II loading conditions. *Procedia Engineering*, *74*, 18-21.

Cavalieri, F., Luengo, C., Cardona, A. (2011). Análisis de fatiga en muy alto número de ciclos. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, *15*(1), 03-12.

Gainza-Legrá, A. (2016). *Análisis de rotura del espárrago situado en el cárter de los motores MAN de la unidad empresarial de base generación motores FUEL-OIL de Moa*. (Tesis de Ingeniero Mecánico, Universidad de Moa).

Govindu, N., Jayanand, T., & Venkadesh, S. (2015). Design and optimization of screwed fasteners to reduce stress concentration factor. *J. Appl. Mech. Eng*, *4*, 1000171.

Guerra-Fernández, Y., Ordoñez-Hernández, U., González-Fernández, V. (2019). Análisis de la falla de pernos de fijación de las zapatas polares de un motogenerador. *Ingeniería Mecánica*, *22*(3):156-160.

Inzana, J., Varga, P., Windolf, M. (2016). Implicit modelling of screw threads for efficient finite element analysis of complex bone-implant systems. *Journal of Biomechanics*, *49*(9), 1836-1844.

Jaramillo, H., & Bacca, L. (2009). Una propuesta para la determinación de la tenacidad a la fractura mediante elementos finitos. *Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, *S1*(4), 1641-1616.

Lee, C. H., Kim, B. J., & Han, S. Y. (2014). Mechanism for reducing stress concentrations in bolt-nut connectors. *International journal of precision engineering and manufacturing, 15*, 1337-1343.

Madenci, E., Guven, I. (2015). *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS*. Second Edition, Springer.

Mantwatkar, A., Chavan, S. (2016). Failure analysis of high tensile industrial fasteners. *International Journal of Scientific and Research Publications*, *6*(3), 132-37.

Megias, R., Belda, R., Vercher-Martínez, A., Giner, E. (2023). Estudio de la fractura a compresión de hueso trabecular sano, osteoporótico y artrósico

procedente de cabezas femorales humanas. *Revista Española de Mecánica de Fractura,* (5), 21-26.

Srivastava, A., Ponson, L., Osovski, S., Bouchaud, E., Tvrgaard, V., Ravi-Chandar, K., Needleman, A. (2015). The effect of loading rate on ductile fracture toughness and fracture surface roughness. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, *76*(7), 20-46.

Vázquez, A., Mantic, V., Muñoz-Reja, M., Távara, L. (2023). Nuevo elemento finito para singularidades logarítmicas de tensión en grietas de interfase tipo Winkler en modo III. *Revista española de mecánica de la fractura*, (5), 213-218.

Información adicional

Conflicto de intereses

El autor declara que no existen conflictos de intereses.

Contribución de autores

LRB: Concepción de la investigación. Preparación de las muestras y obtención de datos. Redacción del borrador del artículo, revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final. **DGT**: Concepción de la investigación. Preparación de las muestras y obtención de datos. Trabajó en el análisis e interpretación de las microestructuras y en la redacción del borrador del artículo, así como en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

ORCID

LRB, https://orcid.org/0009-0009-1791-0071

DGT, https://orcid.org/0009-0005-3798-2786

Recibido: 03/11/2024

Aceptado: 28/02/2025