ANÁLISIS DE FRACTURA EN TORNILLO

PAPIME-PE103822
Implementación de prácticas experimentales a distancia y presenciales para la asignatura de Deterioro de Materiales en la Facultad de Ingeniería

Índice general

1. Análisis preliminar 6
1.1. Definición del problema 6
1.2. Análisis de fractura 7
1.3. Metalografía 9
1.4. Medición de dureza 10
1.5. Conclusiones preliminares 11
2. Análisis comparativo 13
2.1. Análisis metalográfico 13
2.2. Prueba de dureza 15
2.3. Conclusiones de análisis comparativo 15
3. Conclusiones generales 16
4. Referencias, bibliografía y estándares utilizados 17

Índice de tablas

Tabla 1. Resultados de dureza HV0.5 (Realizado en base a ISO 6507) [5] 11
Tabla 2. Información relacionada a las muestras recibidas 13
Tabla 3. Resultados de dureza HV0.5 en análisis comparativo 15

Índice de figuras

Figura 1. Muestras entregadas para análisis preliminar 7
Figura 2. Vista lateral de la zona de fractura 7
Figura 3. Fractografía macroscópica 8
Figura 4. Aumento de inspección visual de la fractura sobre las marcas de playa 9
Figura 5. análisis metalográfico 9
Figura 6. Análisis metalográfico de muestra A 10
Figura 7. Mediciones de dureza Vickers 11
Figura 8. Muestras recibidas para análisis comparativo 13
Figura 9. Muestra A, proveedor externo 14
Figura 10. Muestra B, proveedor local 14
Figura 11. Muestra C, proveedor local 15

Resumen

En este trabajo se explicarán en detalle los resultados y análisis obtenidos durante un defecto encontrado en un sistema de producción real de una empresa automotriz. El procedimiento de análisis que se llevó a cabo tuvo como objetivo determinar si habría más condiciones defectuosas durante el proceso normal de manufactura, con el fin de poder descartar cualquier pieza posiblemente afectadas y tomar las medidas necesarias para evitar una parada de producción. Asimismo, el objetivo principal del análisis fue determinar los factores que inciden en la falla, realizando una comparación entre dos proveedores de la misma pieza, debido a que uno de ellos no reportó fallas por el momento a pesar de despachar a más plantas a lo largo del tiempo en el transcurso de varios años.

Capítulo 1

1. Análisis preliminar

1.1. Definición del problema

En una planta automotriz, se realiza el proceso de pintura a través de plataformas que sostienen la carrocería completa y ensamblada, consistiendo en el cofre, las puertas, el techo, la cajuela y el resto de las partes exteriores e interiores que formarán parte del esqueleto del vehículo. A estas plataformas se les denomina “skids”, los cuales son sostenidos sobre el circuito transportador, el cual es ensamblado por varios tornillos en la parte inferior del skid.

Durante el proceso de pintura, el skid va a cumplir el objetivo de sostener el peso del vehículo completo durante la inmersión de los baños de pretratamiento, aplicación de ``primer'' y capas de pintura. Durante la inmersión de los baños de pretratamiento y electrodepositación, la carrocería va dando vueltas dentro de los líquidos, por lo que los tornillos de sujeción sufren de cargas cíclicas de alta magnitud a lo largo de un sólo proceso de pintura, sin embargo, estos mismos tornillos son reutilizados consecutivamente a lo largo de la jornada.

Dichos tornillos provienen de 2 posibles proveedores, uno local y otro externo localizado en Alemania. Para el tornillo manufacturado por el proveedor alemán, estos se venden como tornillos Property class 10.9 con una longitud de 12.8 cms, sin embargo, para los manufacturados localmente, no se especifica la clase del material, además de que estos se venden con dos longitudes diferentes, uno de 12.8 cms y otro de 15.2, esto debido a que la planta automotriz manufactura varios modelos de su marca, y cada uno requiere de skids de diferentes dimensiones, sin embargo, en la planta mexicana sólo se utilizan los tornillos del proveedor local.

Fue durante tres de los procesos de pintura que se fracturaron tres tornillos durante el baño de electrodepositación, cabe recalcar que debido a que el skid es sujetado por varios tornillos en varias localizaciones, las carrocería no sufrieron daño alguno y pudieron concluir sus ciclo de pintura sin mayor problema, sin embargo, se pudo notar que los tres tornillos fracturados ocurrieron en la misma sujeción (por confidencialidad no se mostrará la sujeción o la localización en las carrocerías, sin embargo, se puede decir que los tres se localizaban en la parte trasera derecha del vehículo). En la Figura 1 se muestran los tornillos fracturados.

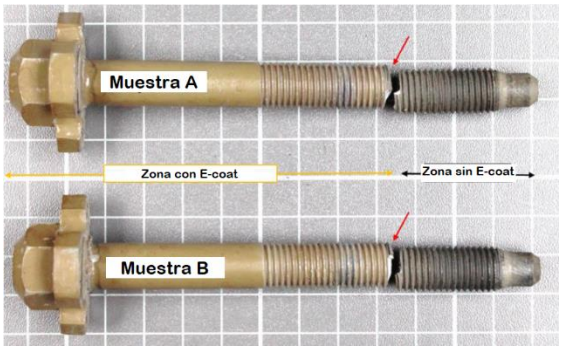

Figura 1. Muestras entregadas para análisis preliminar

Como puede observarse en La Figura 1, ambos tornillos coinciden con la localización de la fractura, estando esta justo cuando termina la parte sin pintura electrodepositada, esto nos indica que las fracturas se encuentran al final de las cuerdas atornilladas, que es justo donde se encuentra la carga cortante al momento de estar el vehículo en su posición horizontal normal. Igualmente, juzgando las características visuales de las cuerdas, se puede notar que estas son maquinadas, lo cual fue verificado por el asociado al proceso.

1.2. Análisis de fractura

Al momento de realizar una inspección visual en las zonas cercanas a la fractura, se puede observar en La Figura 2 que hay baja deformación plástica visible (necking[1]), por lo que puede clasificarse esta como una fractura frágil, además, no se muestran zonas dañadas en las cuerdas cercanas a las fracturas, por lo que pueden descartarse los golpes como causa raíz, además de que no existen marcas visibles de problemas durante el ensamble como sobretorque o cuerdas desalineadas (cross-threading).

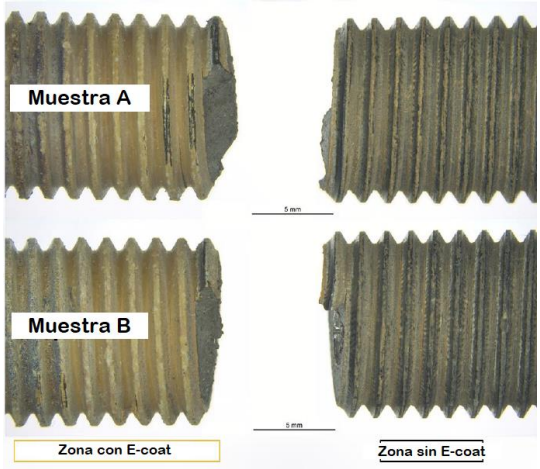

Figura 2. Vista lateral de la zona de fractura

Posterior a la inspección visual simple, se prosiguió con un análisis macroscópico con ayuda de un estereoscopio. Al principio fue complicado identificar el tipo de fractura en cuanto a su causa raíz, esto debido a que las condiciones visuales de la misma eran muy

pobres, sin embargo, se pudo encontrar que gran parte de la fractura estaba cubierta por pintura electrodepositada. Como puede observarse en La Figura 3, se pueden apreciar marcas de playa en la parte exterior izquierda del tornillo, además, se pueden apreciar zonas dentro de la fractura donde podemos ver anillos concéntricos de pintura en el borde del tornillo, mostrando entonces el comportamiento del crecimiento periódico de la grieta a través de los ciclos de pintura. Igualmente, se identificaron los orígenes de las fracturas con las flechas rojas.

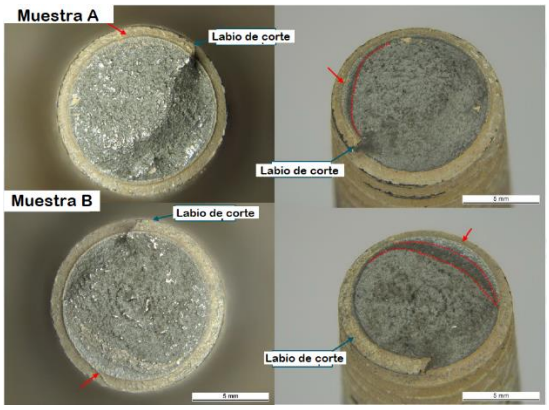

Figura 3. Fractografía macroscópica

Algo que puede apreciarse en ambas muestras es que el origen de la fractura se encuentra cubierto por pintura en ambas ocasiones, por lo que se sugiere que tuvo que haber al menos una grieta antes de comenzar con el proceso de recubrimiento. Algo que puede mencionarse igualmente es que la cuerda presenta una zona con ligera deformación plástica visible (marcados con una flecha azul como “shear lip”), los cuales pueden indicar el final de la fractura en este caso. A partir de La Figura 3, se pueden identificar las siguientes características del modo de falla:

- Se pueden encontrar 2 marcas de playa (1 escondida dentro de la pintura electrodepositada y otra en la parte final), por lo que ocurrieron únicamente dos ciclos de carga desde la nucleación de la grieta hasta que se llegó al punto crítico como se muestra en la Figura 4.

- Este tipo de fracturas ocurren cuando la carga media durante los ciclos de esfuerzo está cercanos al esfuerzo de cedencia, por lo que el tornillo estaba recibiendo cargas muy cercanas a su punto de capacidad mecánica máxima. Es importante mencionar que ambos tornillos fallaron con 1 mismo modelo de vehículo donde se retira uno de los soportes cercanos a esta zona, por lo que es posible que esto haya sido el factor clave para aumentar la carga a un punto crítico.

- La grieta inicial va a crecer hasta que se retire la carga lo suficiente respecto a su resistencia a la fractura, sin embargo, estas hendiduras van a afectar a la capacidad mecánica de los soportes en el skid paulatinamente hasta llegar a la fractura frágil final.

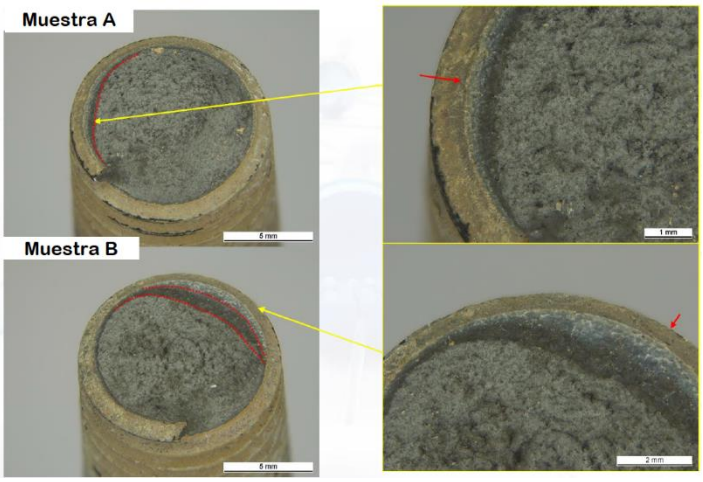

Figura 4. Aumento de inspección visual de la fractura sobre las marcas de playa

1.3. Metalografía

Para poder determinar si el material es el factor principal para la baja capacidad de ciclos de carga sobre el diseño del soporte, se decidió realizar una metalografía, utilizando una solución de Nital 3 sobre una superficie del corte transversal medio del tornillo. Las preparaciones fueron realizadas de acuerdo con la ISO/TR 20580[2] como referencia. El análisis metalográfico revelo que no hay signos de algún proceso de tratamiento térmico cobre el tornillo, además, se encontró que la estructura se correlaciona con bandas de perlita-ferrita, donde las zonas “blancas” muestran las bandas de ferrita y las “cafés” la zona de perlita, esto indica que se trata de un acero de medio carbono rolado en caliente, además, se indica con una flecha roja el inicio de la fractura, lo antes mencionado se puede observar en La Figura 5.

Figura 5. análisis metalográfico

El análisis microestructural reveló además la presencia de inclusiones[3] mostradas en La Figura 6. Debido a que se requería de entregar resultados inmediatos no se pudo realizar un análisis químico extenso de estas micro fases, sin embargo, basado en la forma de las inclusiones, están podrían corresponder a silicatos (inclusiones tipo C de acuerdo con la ASTM E45[4]), los cuales pueden trabajar como concentradores de esfuerzo en el tornillo debido a su naturaleza y distribución. Igualmente, en La Figura 5 podemos notar que existe un ligero recubrimiento de pintura electrodepositada sobre la superficie de la fractura, lo cual nos confirma que existía una condición de grietas iniciales que fueron extendiéndose periódicamente hasta llegar al tamaño crítico, el cual podría determinarse por el tamaño de la grieta con y sin pintura.

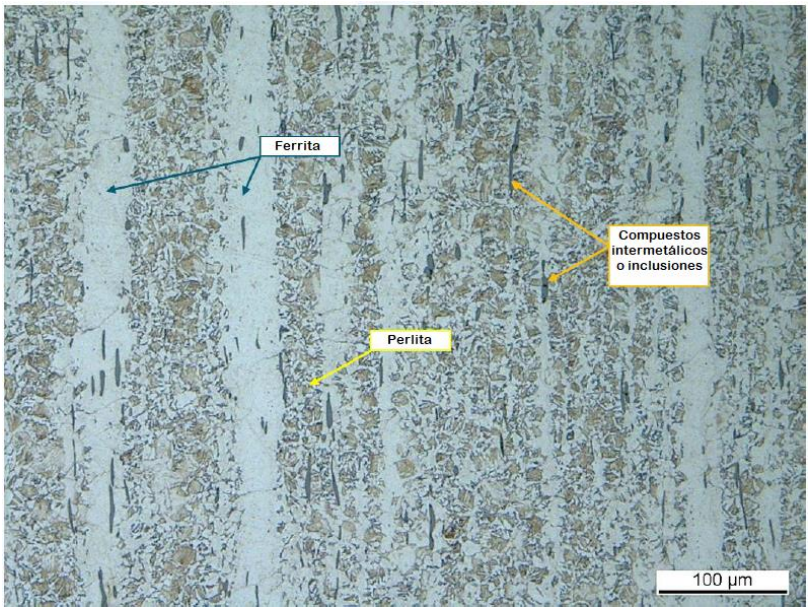

Figura 6. Análisis metalográfico de muestra A

1.4. Medición de dureza

Posterior al análisis metalográfico, se procedió a obtener los valores de dureza en la primera cuerda cercana a la fractura. En La Figura 7 se muestran las localizaciones de las mediciones y los valores obtenidos como se muestra en La Tabla 1.

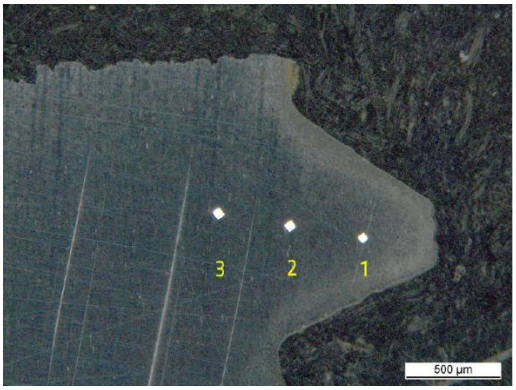

Figura 7. Mediciones de dureza Vickers

No	Muestra A	Muestra B
1	306	312
2	229	238
3	238	259
Promedio	258	278

Tabla 1. Resultados de dureza HV0.5 (Realizado en base a ISO 6507) [5]

Como puede juzgarse a través de los análisis metalográficos y de dureza, puede decirse que no hay evidencia de que exista algún tipo de tratamiento térmico sobre los tornillos del proveedor local.

1.5. Conclusiones preliminares

Basado en los resultados de las pruebas preliminares, se puede concluir lo siguiente:

- El mecanismo de falla puede ser descrito como una fatiga de bajo ciclo. Este tipo de falla ocurre cuando el material es sometido a cargas cíclicas cercanas al esfuerzo de cedencia, generando pequeñas deformaciones plásticas dentro del material.

- La fractura ocurrió en el área de concentración de máximos esfuerzos cortantes (borde de cuerdas atornilladas).

- El material del tornillo se compone de acero al medio carbono rolado en caliente con inclusiones posiblemente de silicatos. Dichas inclusiones pueden actuar como concentradores de esfuerzo en el tornillo, disminuyendo su capacidad mecánica máxima.

-

- No se encontró señal de algún proceso de tratamiento térmico (superficial o volumétrico) en el tornillo del proveedor local.

Nota: El proceso de electrodepositación no se consideró como un factor influyente en el proceso de fractura observado (como causante de fragilización por hidrógeno o proceso corrosivo)

Capítulo 2

2. Análisis comparativo

En este capítulo, se explicará el proceso de análisis que se llevó a cabo para hacer la comparación entre los tornillos de proveedor local y externo, intentando demostrar el efecto de la elección del material sobre la capacidad mecánica de una pieza real. Posterior a los resultados obtenidos en el análisis preliminar, se requirió realizar la comparación de las propiedades geométricas, de clase y de proveedor como se muestra en La Tabla 2 de las diferentes muestras representadas en La Figura 8:

Muestra	Detalles
A	Proveedor externo Property Class: 10.9 Longitud: 12.8 cm
B	Proveedor local Property Class: Indefinido Longitud: 12.8 cm
C	Proveedor local Property Class: Indefinido Longitud: 15.2 cm

Tabla 2. Información relacionada a las muestras recibidas

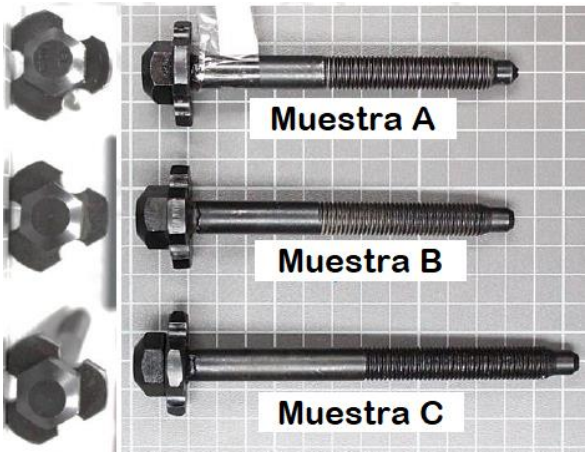

Figura 8. Muestras recibidas para análisis comparativo

El objetivo del análisis es determinar la diferencia en la dureza y microestructura de ambos materiales.

2.1. Análisis metalográfico

Las tres muestras fueron cortadas y preparadas para su análisis metalográfico. El corte fue realizado con una cortadora de precisión sobre el plano medio de los tres tornillos. Posteriormente se comenzó a lijar desde un grado 500 hasta llegar a 4000, donde finalmente se comenzó a pulir con una solución de 3 y 1 micras secuencialmente con

suspensión de polvo de diamante. Posterior a su preparación superficial, se trató con Nital 3 por una duración de 3 segundos. Los resultados serán descritos a continuación:

- Muestra A: La microestructura está compuesta de martensita templada, obtenida a través de un proceso de tratamiento térmico (templado y revenido). La Figura 9 muestra la microestructura presente en una cuerda a 100x, no se detecta oxidación presente. Figura 9(b) es una vista de detalle de la martensita templada a 500x.

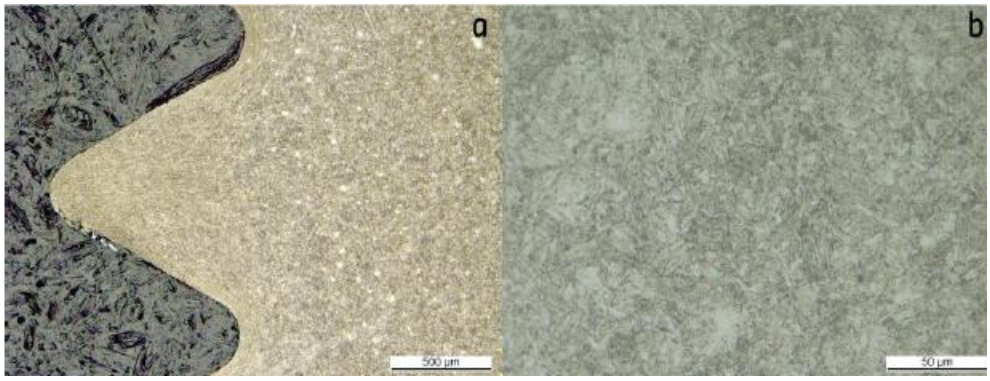

Figura 9. Muestra A, proveedor externo

- Muestra B: Compuesta de bandas de ferrita y perlita intercaladas, común en aceros al medio carbono rolados en caliente. En La Figura 10 dicha microestructura representa una falta de tratamiento térmico. Igualmente se volvieron a encontrar inclusiones de silicatos, los cuales pueden verse a mayor.

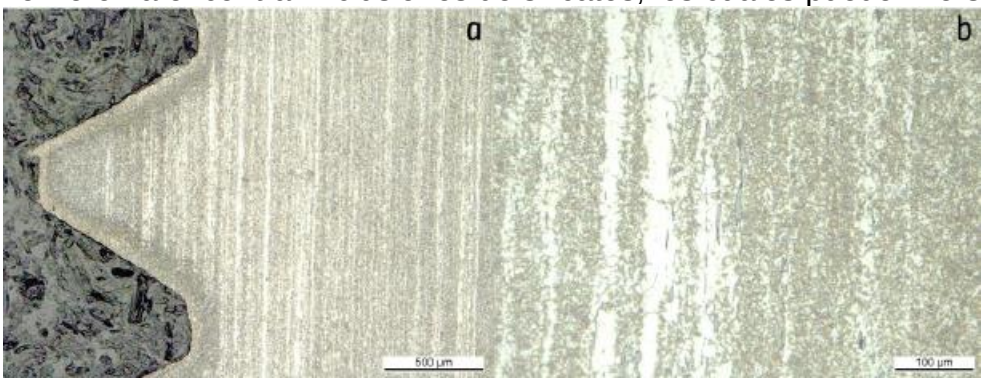

Figura 10. Muestra B, proveedor local

- Muestra C: Se pudo encontrar la misma composición que la muestra B, sin embargo, se realizó la prueba en ambas muestras para poder descartar que haya únicamente un lote defectuoso. En La Figura 11 podemos ver con mejor calidad visual las inclusiones de silicato con una magnificación de 500x.

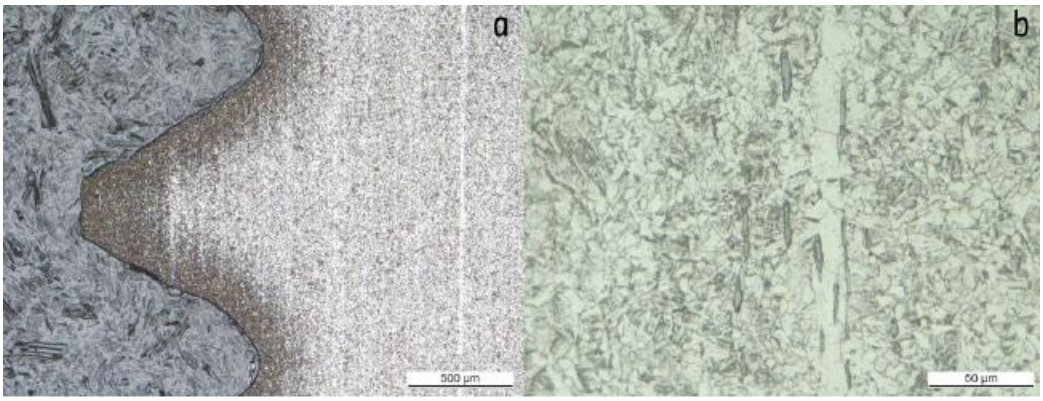

Figura 11. Muestra C, proveedor local

2.2. Prueba de dureza

De acuerdo con los estándares y normas, se realizó una prueba de dureza Vickers 0.5 para poder realizar la comparación entre ambos materiales. Igualmente se tomaron valores cercanos a la superficie y en el centro o núcleo del tornillo. Durante el procedimiento, se tomaron 3 mediciones por cada tornillo sobre cada una de las 2 áreas especificadas anteriormente. En La Tabla 3 se muestran los valores promediados obtenidos en las muestras:

Muestra	Microestructura	Dureza en cuerda (HV0.5)	Dureza en el núcleo (HV0.5)
A	Martensita templada	400	370
B	Bandas de ferrita-perlita con inclusiones de silicato	228	177
C	Bandas de ferrita-perlita con inclusiones de silicato	249	180

Tabla 3. Resultados de dureza HV0.5 en análisis comparativo

2.3. Conclusiones de análisis comparativo

- Puede observarse que las muestras manufacturadas por el proveedor externo muestran una dureza promedio de 385HV, casi el doble que las muestras del proveedor local de 208HV.

- El principal factor de esta diferencia es la presencia del tratamiento térmico de templado y revenido, sin embargo, la calidad química del acero externo influye igualmente debido a que no se encontraron inclusiones de silicatos en dicha muestra.

Capítulo 3

3. Conclusiones generales

A partir de todo el proceso realizado en el laboratorio, se pudieron llegar a los siguientes puntos:

- Al no existir falla alguna en los skids de todas las plantas externas de la compañía, se puede verificar que el factor clave en la falla presentada es el material del tornillo

- El proveedor local deberá de considerar dos posibles soluciones, la primera siendo cambiar de material, desde el componente inicial debido a las impurezas presentes, y el otro, comenzar a realizar tratamientos térmicos[6] posteriores al rolado del tornillo.

- El equipo interno del proceso de pintura puede igualmente considerar cambiar el diseño del skid para que las cargas se distribuyan en magnitudes menores, esto para evitar la concentración de esfuerzos cortantes en la unión y hacer un diseño más robusto.

- Igualmente, se debe de realizar una inspección y descarte de todos los tornillos presentes en la línea, ya que, al ser una falla por fatiga, no podemos saber con certeza la cantidad de tornillos que ya cuenten con alguna grieta inicial.

Capítulo 4

4. Referencias, bibliografía y estándares utilizados

[1] SureScreen Scientifics, “Ductile-Fracture”, 2021. https://www.surescreenscientifics.com\\/wp-content/uploads/2021/02/Ductile-Fracture-Whitepaper.pdf (consultado el 27 de marzo de 2023).

[2] Organización Internacional de Normalización, *ISO/TR 20580 Preparación de especímenes metalográficos*. 2022. Consultado: el 27 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.iso.org/standards.html

[3] P. J. L. Mériguet, “The assessment of non-metallic inclusions in steels and nickel alloys for ultra high vacuum applications”, 1992.

[4] Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales, *ASTM E45 Métodos de pruebas estándar para determinar el nivel de inclusiones del acero*. 2018. Consultado: el 27 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.astm.org/

[5] Organización Internacional de Normalización, *ISO 6507 Ensayo de dureza Vickers*. 2018. Consultado: el 27 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.iso.org/standards.html

[6] Sociedad Americana para Metales, *Practical Heat Treating*. 2006. Consultado: el 27 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/ACF180B.pdf

- Meriguét, P. (1992). The Assessment of Non-Metallic Inclusions in Steels and Nickel Alloys for Ultra High Vacuum Applications. JET Quality Group. https://cds.cern.ch/record/238642/files/JET-R%2092-01_001.pdf
- SureScreen Scientifics. (2021) *Ductile-Fracture*. https://www.surescreenscientifics.com\\/wp-content/uploads/2021/02/Ductile-Fracture-Whitepaper.pdf
- ASM. (2006). *Practical Heat Treating*. Second edition. ASM International. https://www.asminternational.org/documents/10192/1849770/ACF180B.pdf