



LOS LIBERTADORES
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

ANÁLISIS DE FALLA DE UNA MORDAZA DE PRENSA DE BANCO, TORNILLO
ELEVADOR Y TUBO DE TRANSPORTE DE AMONIACO

DIEGO FERNANDO ROMERO GARCÍA
ÁLVARO FABIÁN MARTÍNEZ PÁEZ

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS BÁSICAS
BOGOTÁ D. C.
2018

**ANÁLISIS DE FALLA DE UNA MORDAZA DE PRENSA DE BANCO, TORNILLO
ELEVADOR Y TUBO DE TRANSPORTE DE AMONIACO**

**ANÁLISIS DE FALLA DE UNA MORDAZA DE PRENSA DE BANCO, TORNILLO
ELEVADOR Y TUBO DE TRANSPORTE DE AMONIACO**

**DIEGO FERNANDO ROMERO GARCÍA
ÁLVARO FABIÁN MARTÍNEZ PÁEZ**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Mecánico.

Director:

**ING. JOSÉ DAVID CASTRO CASTRO
MAGISTER EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C
2018**

Dedicatoria

A Dios y a mi madre por ser los que me dieron todo lo que soy, a mi esposa por sacrificar su tiempo para que yo pudiera cumplir mi objetivo y a mis hijos por ser el motor de mi vida.

Diego Fernando Romero García

A mis padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy.

Álvaro Fabián Martínez Páez

Agradecimientos

A nuestro director de proyecto Jose David Castro Castro por su ayuda en la construcción de esta tesis.

A la fundación Universitaria Los Libertadores por darnos la oportunidad de graduarnos como Ingenieros Mecánicos.

Al grupo de profesores que aportaron su conocimiento para el desarrollo de nuestra carrera

A todos nuestros compañeros por estar con nosotros a lo largo de este camino y brindarnos su apoyo incondicional.

Resumen

En este proyecto se realizó el diagnóstico de las fallas que se presentaron en una mordaza para prensa de banco, un tornillo elevador y un tubo de transporte para amoniaco. Para hacer esto, se realizó una inspección visual del objeto de estudio, con apoyo de técnicas de caracterización como la microscopía óptica y medición de dureza. Los análisis de las muestras tomadas ayudan a recopilar evidencias para aclarar el panorama general de la raíz de la falla. Después de estudiar la información recolectada, se concluye que la mordaza falló por fatiga ya que muestra una serie de huellas características de este tipo de fenómeno. El tornillo elevador falló debido a un esfuerzo a flexión ocasionando que se presentara una fractura frágil. Por último, el tubo para transporte de amoniaco falló por corrosión en forma de picaduras ocasionadas por el entorno al cual estaba expuesto. Esta clase de estudios ayuda a definir parámetros de diseño para evitar fallas en máquinas y estructuras, así como crear un historial de fallas con causas definidas que servirán como apoyo a futuros proyectos.

Palabras clave: Análisis de falla, metalografía, inspección visual, microestructura, fractografía.

Abstract

In this project the diagnosis of the faults that were presented in a vice for the bench press, a lifting screw and a transport tube for ammonia was made. To do this, a visual inspection of the object of study was carried out, with the support of characterization techniques such as optical microscopy and hardness measurement. The analyzes of the samples help to gather evidence to clarify the general panorama of the root of the fault. After studying the information collected, it is concluded that the gag was due to fatigue and that it shows a series of traces characteristic of this type of phenomenon. The steel screw is due to a bending stress causing a brittle fracture to occur. Finally, the tube for the transport of ammonia was due to corrosion in the form of bites caused by the environment to which it was exposed. This type of studies helps to define design parameters to avoid faults in machines and structures, as well as create a history of failures with defined causes that serve as support for future projects.

Keywords: Failure analysis, metallography, visual inspection, microstructure, fractography.

Contenido

Dedicatoria.....	III
Agradecimientos.....	IV
Resumen.....	V
Abstract.....	V
Lista de Ilustraciones.....	VIII
Lista de tablas.....	IX
Lista de diagramas.....	X
Introducción.....	1
1 Objetivos.....	2
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos.....	2
2 Marco teórico.....	3
2.1 Definición de fractura y fatiga desde la perspectiva de los metales.....	3
2.2 Crecimiento dúctil de la grieta.....	4
2.3 Transición de dúctil a frágil en un material.....	7
2.4 Agrietamiento intergranular.....	7
2.5 Falla por fatiga.....	8
2.5.1 Proceso general de la fatiga.....	9
2.6 Corrosión.....	10
2.6.1 Corrosión por picadura.....	10
3 Desarrollo experimental.....	12
3.1 Metodología.....	13
3.2 Inspección visual.....	13
3.2.1 Inspección visual de mordaza para prensa de banco.....	13
3.2.2 Inspección visual de tornillo elevador.....	15
3.2.3 Inspección visual del tubo de transporte de amoniaco.....	17
3.3 Datos obtenidos del laboratorio.....	19
3.3.1 Mordaza de prensa para banco.....	19
3.3.2 Tornillo elevador.....	25
3.3.3 Bayoneta de transporte de amoniaco.....	28

**ANÁLISIS DE FALLA DE UNA MORDAZA DE PRENSA DE BANCO, TORNILLO
ELEVADOR Y TUBO DE TRANSPORTE DE AMONIACO**

3.4	Diagnóstico.....	31
4	Conclusiones	32
5	Bibliografía.....	33

ANÁLISIS DE FALLA DE UNA MORDAZA DE PRENSA DE BANCO, TORNILLO ELEVADOR Y TUBO DE TRANSPORTE DE AMONIACO

Lista de Ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1. FRACTURA DE COPA Y PUNTO, TÍPICA DE UN ENSAYO DE TRACCIÓN, CON FORMACIÓN DE MICRO HUECOS.	3
ILUSTRACIÓN 2. FORMACIÓN DE MICROHUECOS.	5
ILUSTRACIÓN 3. LABIOS DE CORTADURA EN UNA PLACA FACTURADA, LA FRACTURA CAMBIA DE DIRECCIÓN DE 45° A 90° (A), (B) Y (C) LA GRIETA SE VUELVE PERPENDICULAR A LA SUPERFICIE CON LABIOS CARACTERÍSTICOS A 45° A LOS COSTADOS.	6
ILUSTRACIÓN 4. MICROGRAFÍA DE CRECIMIENTO DÚCTIL EN GRIETA EN UN ACERO DE MEDIA ALEACIÓN Y ALTA RESISTENCIA.	6
ILUSTRACIÓN 5. FRACTOGRAFÍA DONDE SE DENOTA LA FALLA A LO LARGO DEL LÍMITE DEL GRANO.	8
ILUSTRACIÓN 6. ETAPAS DE UNA FALLA POR FATIGA.	9
ILUSTRACIÓN 7. PICADURA POR CORROSIÓN EN SUPERFICIE METÁLICA.	11
ILUSTRACIÓN 8. PICADURA EN UN TUBO DE COBRE ELECTROLÍTICO.	11
ILUSTRACIÓN 9. FOTOGRAFÍA DE COMPARACIÓN MORDAZA DONDE EVIDENCIA 1) DEFORMACIÓN DE LOS AGUJEROS DE FIJACIÓN, 2) INICIOS DE FALLA, 3) DEFORMACIÓN PLÁSTICA EN LA PARED CILÍNDRICA DEL AGUJERO.	14
ILUSTRACIÓN 10. FOTOGRAFÍAS DE LA CARA ANTERIOR DE LA MORDAZA DONDE SE EVIDENCIA DEFORMACIÓN DE LOS AGUJEROS.	14
ILUSTRACIÓN 11. FOTO LATERAL DE LA MORDAZA, SE EVIDENCIA DESCAMACIÓN (1) Y PICO DONDE TERMINA LA FALLA (2).	15
ILUSTRACIÓN 12. FOTOGRAFÍA DEL TORNILLO DURANTE INSPECCIÓN VISUAL, SE EVIDENCIO CAMBIO DE PASO DEL TORNILLO (1) Y RASTROS DE OXIDO EN LA BASE DEL ELEMENTO (2)	16
ILUSTRACIÓN 13. DETALLE DE LA DEFORMACIÓN DE LOS HILOS DEL TORNILLO.	16
ILUSTRACIÓN 14. DETALLE DE LA FRACTURA DEL TORNILLO.	17
ILUSTRACIÓN 15. FOTO DE BAYONETA DE TRANSPORTE DE AMONIACO.	18
ILUSTRACIÓN 16. DETALLE DEL PUNTO DE FALLA DE LA TUBERÍA.	18
ILUSTRACIÓN 17. CORTE DE MORDAZA EN CORTADORA.	20
ILUSTRACIÓN 18. PULIDO DE MORDAZA.	20
ILUSTRACIÓN 19. ATAQUE QUÍMICO CON ÁCIDO NÍTRICO AL 5%.	21
ILUSTRACIÓN 20. MICROESTRUCTURA DE LA MORDAZA PARA PRENSA DE TALLER PULIDA Y ATACADA CON NITAL AL 2%. 100X.	21
ILUSTRACIÓN 21. MICROESTRUCTURA DE LA MORDAZA DE LA ILUSTRACIÓN 20 A 500X.	22
ILUSTRACIÓN 22. MICROESTRUCTURA DEL ACERO AISI W1 CON PRESENCIA DE CARBUROS POR TRATAMIENTO TÉRMICO.	22
ILUSTRACIÓN 23. PUNTOS DE MEDICIÓN DE DUREZA EN MORDAZA PARA PRENSA DE TALLER.	24
ILUSTRACIÓN 24. CORTE LONGITUDINAL DEL TORNILLO ELEVADOR.	25
ILUSTRACIÓN 25. DIVERSOS PUNTOS DE INTERÉS EN EL TORNILLO ELEVADOR, SITIO DE APLICACIÓN DE SOLDADURA (1), TORNILLO (2), ZONA DE AFECTACIÓN POR TEMPERATURA DE LA SOLDADURA (3), ARANDELA (4).	26
ILUSTRACIÓN 26. MICROESTRUCTURA DEL TORNILLO ELEVADOR ATACADO CON NITAL AL 5%. 100X	26
ILUSTRACIÓN 27. MICROESTRUCTURA DE UN ACERO SAE 4340.	27

ANÁLISIS DE FALLA DE UNA MORDAZA DE PRENSA DE BANCO, TORNILLO ELEVADOR Y TUBO DE TRANSPORTE DE AMONIACO

ILUSTRACIÓN 28. MICROESTRUCTURA DEL ACERO DE LA BAYONETA DE TRANSPORTE DE AMONIACO ATACADO CON NITAL AL 2%. 100X.	29
ILUSTRACIÓN 29. MICROESTRUCTURA DE UN ACERO ASTM A106, GRADO A.	29
ILUSTRACIÓN 30 IMAGENES DONDE SE EVIDENCIAN MICROHUECOS EN LA ESTRUCTURA DEL TUBO	30

Lista de tablas

TABLA 1. MEDICIÓN DE DUREZAS DE LA PROBETA DE LA MORDAZA PARA PRENSA DE TALLER.....	24
TABLA 2. PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN ACERO SAE 4340.	28
TABLA 3. MEDICIÓN DE DUREZAS DE PROBETA DE LA BAYONETA DE TRANSPORTE DE AMONIACO.	30
TABLA 4. DIAGNÓSTICO DE CAUSA DE FALLA RAÍZ EN LOS OBJETOS DE ESTUDIO.....	31

ANÁLISIS DE FALLA DE UNA MORDAZA DE PRENSA DE BANCO, TORNILLO ELEVADOR Y TUBO DE TRANSPORTE DE AMONIACO

Lista de diagramas

DIAGRAMA 1. FLUJOGRAMA DE EXPERIMENTACIÓN DE ESTE PROYECTO.....	12
DIAGRAMA 2. DIAGRAMA TTT DE ACERO W1.	23

Introducción

Las fallas en elementos mecánicos ha sido una de las ramas que más se ha estudiado en la ingeniería mecánica con el fin de evitarlas. Esto tiene gran importancia en la sociedad industrializada ya que contribuye a detectar las causas mas frecuentes de manera metódica y crear un conocimiento acerca de como se debe prevenir las fallas que pueden ocasionar millonarias pérdidas de dinero, así como un aumento en la calidad de las operaciones de las diversas máquinas que satisfacen la variedad de necesidades que tenemos en la actualidad.

En este proyecto, se trazó como objetivo identificar la causa raíz de falla de tres componentes mecánicos que estaban en servicio en la Cervecería Leona, actualmente cervecería de Tocancipá, perteneciente a la empresa Bavaria S.A.. El primer objeto de estudio fue una mordaza de prensa para banco de taller, la cual presentó fractura en los extremos de la cavidad donde se aloja el tornillo de fijación, el segundo elemento estudiado fue un tornillo utilizado para elevar o nivelar piezas y la tercera pieza de estudio es una bayoneta (cambio de dirección con codos) de una tubería en acero de ½" SCH 40, utilizada para el transporte de amoniaco en los tanques de fermentación de la cervecería.

Para diagnosticar las fallas presentadas, se utilizarón los equipos de la Fundación Universitaria Los Libertadores, específicamente el microscopio metalográfico, que permitió reconocer la microestructura de los materiales que componen los diversos objetos de estudio, y el durómetro Rockwell, con el cual se puede hacer una valoración en cuanto a dureza y esfuerzo que soportan los materiales. Con una inspección visual detallada, una evaluación de las condiciones de trabajo de las partes estudiadas y las herramientas antes mencionadas, se realizaron los analisis correspondientes para discernir las posibles causas raíz de falla de cada uno de los elementos.

1 Objetivos

1.1 Objetivo general

Realizar el procedimiento de análisis de falla para determinar las posibles causas del daño de una mordaza de una prensa de banco, un tornillo elevador y una bayoneta de transporte de amoniaco.

1.2 Objetivos específicos

Contextualizar el análisis a realizar con información relevante acerca de las piezas a estudiar y estudios de falla realizados en elementos similares.

Ejecutar pruebas metalográficas, inspecciones visuales y pruebas de dureza para determinar las posibles causas del daño de los elementos estudiados.

Utilizar el método de RCA para determinar las posibles causas de daño de los elementos en estudio.

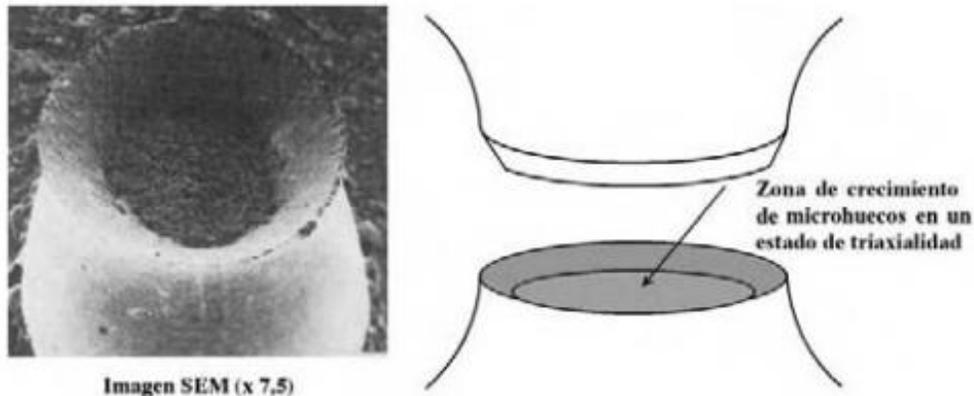
2 Marco Teórico

2.1 Definición de fractura y fatiga desde la perspectiva de los metales

Dentro del estudio de las fracturas en materiales, se destacan dos grandes grupos, la fractura dúctil y la fractura frágil. La fractura dúctil se asocia con la deformación plástica, en algunos casos de falla, la deformación plástica necesaria para producir una fractura será limitada con una tasa de energía pequeña. A la vista de ingeniería, este tipo de fallas sería considerada una fractura frágil y puede iniciar en un entalle o grieta aguda con valores de tensión nominal bajos, sobre todo si se presenta una deformación plana que disminuye la posibilidad de deformación plástica.

Los ensayos más comunes de fractura que presentan patrones de fractura dúctil son los ensayos de tracción, en los cuales se evidencia una formación de copa y cono en la zona de fractura debido a que cuando se alcanza la máxima carga la deformación plástica se concentra en una pequeña área de la probeta produciéndose una estricción. En la siguiente ilustración, se muestra una fractura con esta naturaleza.

Ilustración 1. Fractura de copa y punto, típica de un ensayo de tracción, con formación de micro huecos.¹



En metales libres de fases secundarias, una probeta se puede estricción hasta reducir el valor de su área hasta en un 100%. Esta deformación produce formas de cuchillos o bandas apiladas en planos de deslizamiento.

¹ Tomado de Mecánica de Fracturas , José Luis Arana y Javier Jesús Gonzales, Universidad del País Vasco, pág. 151

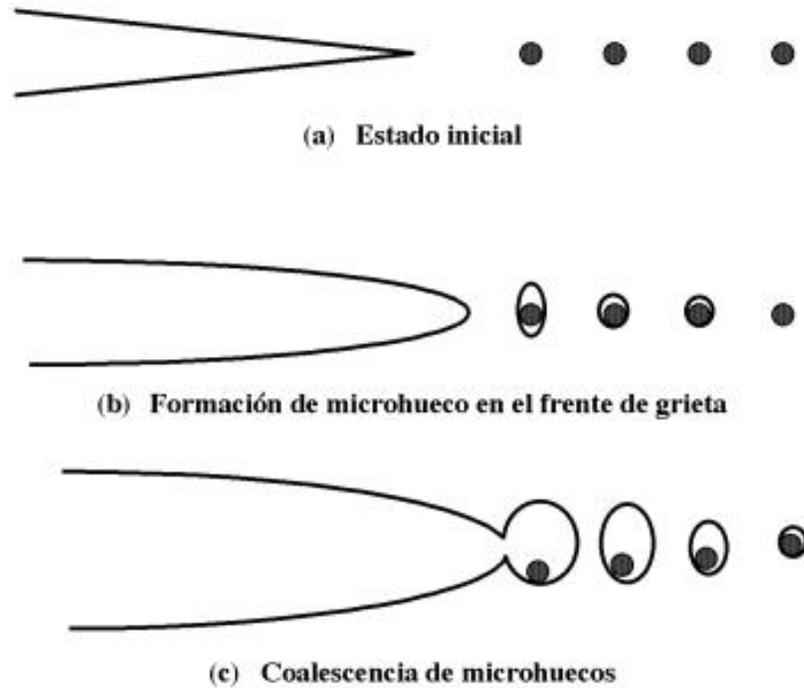
Los materiales de ingeniería normalmente contienen partículas secundarias en grandes cantidades, que pertenecen a elementos usados para aleaciones que mejoran sus propiedades mecánicas, térmicas y químicas. Estas partículas se clasifican según su tamaño:

- Partículas visibles al microscopio óptico: Poseen tamaños variables de hasta 20 micrómetros. Consisten en inclusiones no metálicas adicionadas en aceros y aleaciones metálicas para mejorar su colabilidad, maquinabilidad o afinar el grano. Ejemplo de estos son los carburos, usados para mejorar las propiedades de algunos aceros de herramientas.
- Partículas de tamaño mediano: Su tamaño comprende entre 50 y 500 nm, solamente visibles al microscopio electrónico. Normalmente están compuestos de aleaciones duras, esenciales para la obtención de mejoras en las propiedades mecánicas como los aceros microaleados de endurecimiento por dispersión.
- Partículas de tamaño pequeño: Visibles al microscopio electrónico. Su tamaño puede variar entre 5 y 50 nm. Estas partículas se producen en el endurecimiento de aleaciones metálicas durante procesos de tratamientos térmicos, sobretodo en procesos de endurecimiento estructural.

2.2 Crecimiento dúctil de la grieta

Al recibir carga una pieza que posee una grieta, aparece una zona plástica frente a la misma que corresponde a la curvatura de la punta de la grieta en cuestión. Esto, produce un crecimiento de microhuecos debido a la coalescencia en el frente de la grieta. El resultado de este proceso es una serie de tensiones y deformaciones frente a la grieta y que los microhuecos que se presentan pueden unirse generando una grieta y así, su propagación en el material. En la ilustración 2, se observa que en el estado inicial a), la fractura tiene una terminación en punta aguda y hay nucleación. En la etapa b), vemos como los agujeros crecen debido a esfuerzos ocasionados en el material y la falla toma una punta roma, lo que conlleva a la etapa c), donde la falla se une a los agujeros haciendo que la falla se propague por el material.

Ilustración 2. Formación de microhuecos.²



Cuando la grieta crece por coalescencia de microhuecos, se evidencia un rápido crecimiento por el centro de la placa, debido a una mayor tensión. Esta carga varía a lo largo del espesor del material, produciendo patrones de labios de cortadura, característica principal de una falla dúctil. En la ilustración 3, se muestran los diferentes labios de cortadura que se forman en una placa fracturada. En la ilustración 4, se observa el crecimiento de una grieta a lo largo de una placa de acero de alta resistencia.

² Tomado de Mecánica de Fracturas , José Luis Arana y Javier Jesús Gonzales, Universidad del País Vasco, pág. 154

ANÁLISIS DE FALLA DE UNA MORDAZA DE PRENSA DE BANCO, TORNILLO ELEVADOR Y TUBO DE TRANSPORTE DE AMONIACO

Ilustración 3. Labios de cortadura en una placa facturada, la fractura cambia de dirección de 45° a 90° (a), (b) y (c) la grieta se vuelve perpendicular a la superficie con labios característicos a 45° a los costados.³

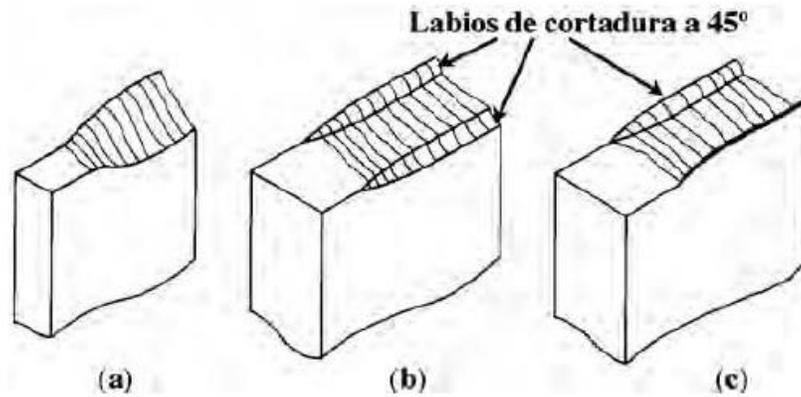
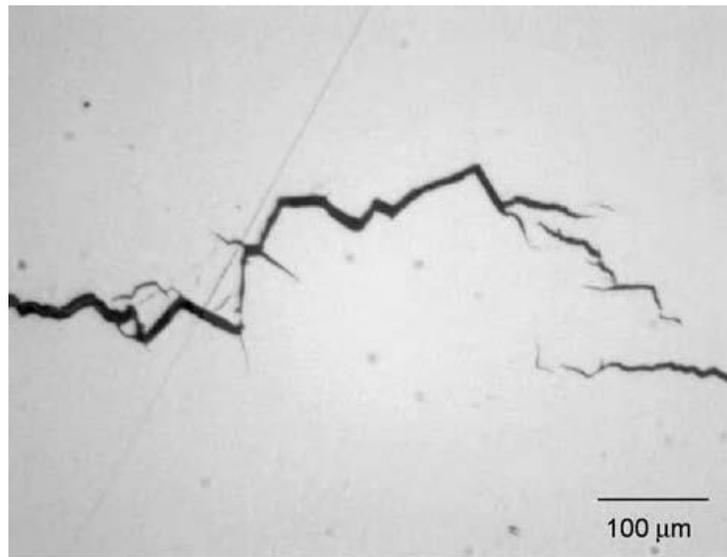


Ilustración 4. Micrografía de crecimiento dúctil en grieta en un acero de media aleación y alta resistencia.⁴



³ Tomado de Mecánica de Fracturas , José Luis Arana y Javier Jesús Gonzales, Universidad del País Vasco, pág. 155

⁴ Tomado de Mecánica de Fracturas , José Luis Arana y Javier Jesús Gonzales, Universidad del País Vasco, pág. 156

2.3 Transición de dúctil a frágil en un material

Todos los materiales metálicos poseen una temperatura de transición de dúctil a frágil, cuanto más elevada es la temperatura por encima del límite de transición, la tenacidad a fractura se eleva, es decir que aumenta su capacidad de resistir una carga aplicada sin causar fractura aún teniendo una grieta. De manera contraria, a temperaturas por debajo de la temperatura de transición, la tenacidad a la fractura se vuelve muy baja. Estos efectos son notables en aceros ferríticos que su estructura cristalina pertenece al grupo de BCC.

Debido a estas características del material, las fallas también cambian su comportamiento, es decir, la fractura a bajas temperaturas se da por la fragilidad del acero y su crecimiento es por clivaje, pero a altas temperaturas la fractura es dúctil y crece por coalescencia.

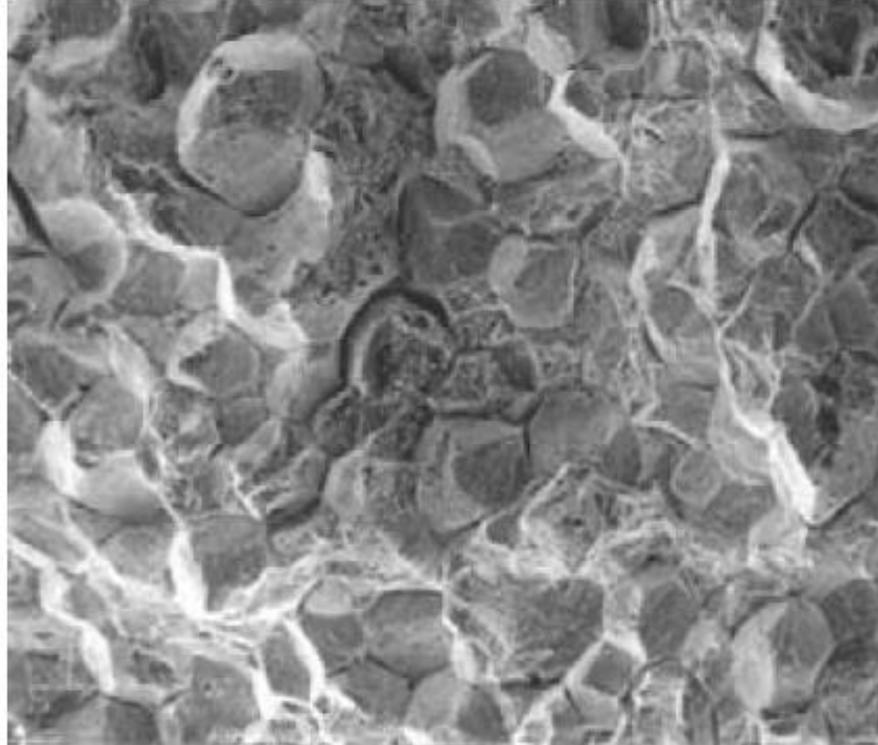
2.4 Agrietamiento intergranular

Existe una tercera forma de fractura, adicional a las fracturas por clivaje y crecimiento de microhuecos. Esta se llama agrietamiento intergranular. Este tipo de fracturas ocurre en casos como la corrosión bajo tensión, y son debido a diferencia de potenciales entre el límite de grano y el interior del mismo, como consecuencia de las segregaciones de soluto.⁵

Comúnmente el agrietamiento intergranular ocurre por la presencia de hidrógeno producido durante la misma corrosión. También existe un segundo caso donde la presencia de unas cuantas partes por millón de hidrógeno en aceros de alta resistencia desencadena agrietamiento con el paso del tiempo cuando se ejerce una carga estática. En la ilustración 5, se observa una grieta por el borde de un conjunto de granos.

⁵ Tomado del libro de Universidad del país vasco, Jose Luis Arana: *Mecánica de la fractura*

Ilustración 5. Fractografía donde se denota la falla a lo largo del límite del grano.⁶



2.5 Falla por fatiga

Dentro de los procesos de falla se ha identificado una causa raíz relacionada con los ciclos de funcionamiento de un elemento, este se llama fatiga. El modelo de falla por fatiga genera fracturas en piezas que han soportado su régimen de funcionamiento satisfactoriamente y sin que hubieran rebasado su carga límite para falla estática.

La fatiga se define como la falla producida por esfuerzos que se repiten un gran número de veces. Estos esfuerzos pueden ser variables, repetidos, alternantes o fluctuantes y siempre están entre los niveles de carga inferiores a la resistencia máxima del elemento, generando fallas instantáneas.

Los patrones de falla por fatiga muestran propagaciones de grietas existentes en el material de estudio previas a la rotura por carga cíclica.

⁶ Tomado de Mecánica de Fracturas , José Luis Arana y Javier Jesús Gonzales, Universidad del País Vasco, pág. 158

2.5.1 Proceso general de la fatiga

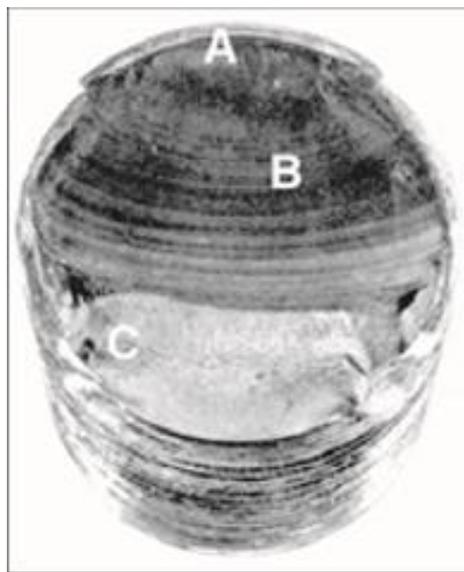
Las fallas por fatiga suelen ser, en apariencia, muy similares a la falla frágil, debido a que las superficies en la falla son planas y perpendiculares al eje de esfuerzo con ausencia de adelgazamientos.

Sin embargo, las características de la falla por fatiga son diferente de la falla dúctil debido a sus etapas de desarrollo. Entre las cuales están:

- **Etapa I:** Formación de microgrietas debido a la deformación plástica cíclica seguida de una propagación cristalográfica que se aprecia en la zona de inicio de fractura. Estas grietas no son visibles a simple vista.
- **Etapa II:** Las microgrietas se convierten en macrogrietas, formando superficies paralelas en forma de mesetas separadas por crestas a lo largo del material. Estas superficies comúnmente poseen colores oscuros y claros. Comúnmente, esto se denomina marcas de playa o de concha.
- **Etapa III:** Ocurre cuando el material se encuentra en su último ciclo esfuerzo. Cuando el material que resta por fracturarse no soporta la carga cíclica y se fractura de manera súbita.

En la ilustración 6, se evidencia las etapas de la falla por fatiga. La zona A corresponde a la etapa I de la falla, la zona B corresponde a la etapa II y la zona C corresponde a la etapa III.⁷

Ilustración 6. Etapas de una falla por fatiga.⁸



⁷ Tomada Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, pagina 259

⁸ Tomada Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, pagina 259

2.6 Corrosión

La corrosión se define como el daño de un material por un ataque electroquímico. Este daño es de carácter oxidante y la velocidad de daño depende de la exposición a la sustancia oxidante. La reacción ocurre cuando una corriente de electrones se establece debido a la diferencia de potencial entre los materiales que interactúan.

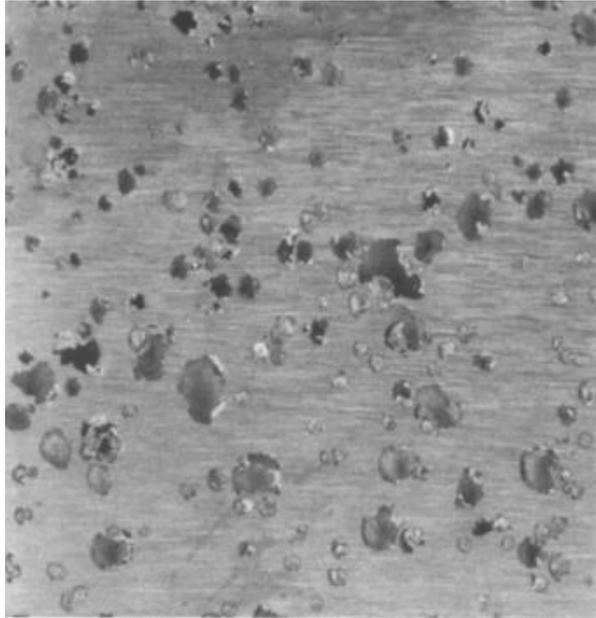
Existen dos grandes grupos de corrosión, el primer grupo es la corrosión general o uniforme, este tipo de corrosión se produce por una pérdida regular de material superficial, en esta se estudia los ambientes corrosivos que hay, ejemplo, atmosférica, marina, industrial, etc. El segundo grupo se denomina localizada y estudia la pérdida de material en un área discreta, por ejemplo, corrosión por fisuras o "Crevice", Corrosión por picadura o "Pitting" y la corrosión microbiológica.

Para efectos de este proyecto, se estudiara la corrosión por picadura o "Pitting".

2.6.1 Corrosión por picadura

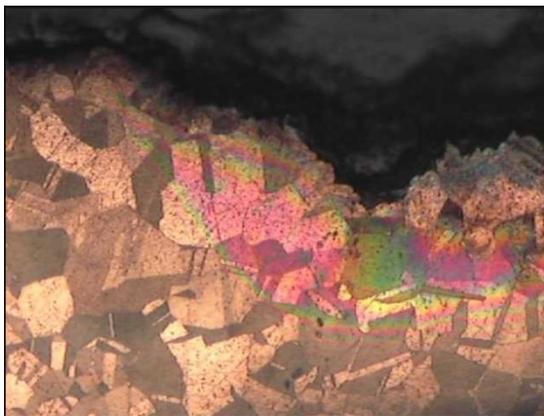
La corrosión por picadura ocurre cuando una reacción química cruza la capa de pasivación que poseen los metales en proceso de oxidación, debido a una descomposición de la película en presencia de sustancias aniónicas agresivas (usualmente, sustancias con presencia de cloruros). La velocidad de degradación de un metal varía con el logaritmo de la concentración de cloruro existente en el punto de falla. Las capas de pasivación ocurren de forma natural para proteger la superficie del metal pero cuando la corrosión cruza esta capa, ocasiona la disolución del metal subyacente. En la ilustración 7, se observa picaduras generadas en la superficie de un metal.

Ilustración 7. Picadura por corrosión en superficie metálica.⁹



Las picaduras por corrosión son auto catalíticas, lo que significa que una vez creada la perforación, las condiciones locales se alteran de tal forma que la velocidad de corrosión del metal aumenta. Estudios revelan que el metal se disuelve en el agujero mientras se mantenga un alto grado de acidez en el cráter. Otro ejemplo de este tipo de afectación, se muestra en la ilustración 8, en la cual se aprecia una tubería de cobre afectada por picadura.

Ilustración 8. Picadura en un tubo de cobre electrolítico.¹⁰



⁹ Tomado de ASM Vol 13, Corrosion: fundamentals, testing, and protection, Asm International , pág. 590

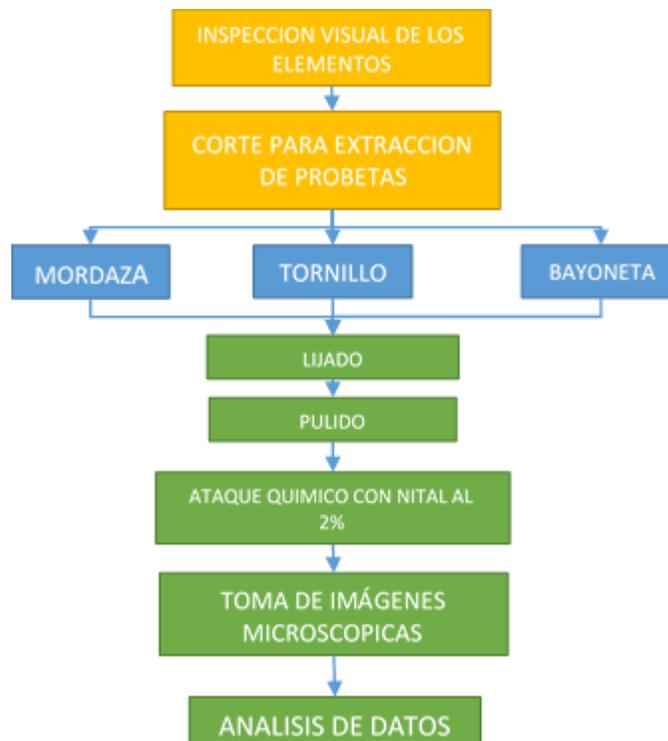
¹⁰ Tomado de https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm12/pfcm12_4_3.html

3 Desarrollo experimental

Para el análisis de falla, es necesario usar dos herramientas; una es la inspección visual y la otra es la metalografía. La inspección visual nos ayuda a localizar partes donde las fallas inician o terminan, oxidación de piezas, cambios de materiales, deformaciones, defectos que no son necesarios observar en el microscopio. El estudio metalográfico tiene como finalidad estudiar la estructura de los metales y sus aleaciones para poder caracterizarlo de acuerdo a su composición química, forma estructural y propiedades mecánicas. El uso de microscopio con aumentos entre 50 y 1000X se usan para el estudio de esta naturaleza y con la ayuda de una solución reactiva, se puede evidenciar la microestructura de un metal. Para la mayoría de los aceros, se utiliza ácido nítrico o Nital como solución reveladora. La muestra se expone por algunos segundos al ácido y luego se neutraliza con alcohol etílico. También es necesario el uso de un durómetro en escala Rockwell para establecer propiedades mecánicas de los objetos de estudio.

Para desarrollar la parte experimental de este proyecto, se planteó el procedimiento expuesto en el siguiente diagrama.

Diagrama 1. Flujograma de experimentación de este proyecto.



3.1 Metodología

Para la realización de la inspección visual, se tuvo en cuenta la procedencia, forma, estado superficial, defectos visibles y deformaciones.

Para realizar las pruebas metalográficas, se utilizó una cortadora de disco, el microscopio metalográfico Olympus GX 41, una máquina de pulido, alúmina, paño de pulido, ácido nítrico al 5% y un durómetro con precarga de 150 kg para lectura de dureza en escala Rockwell.

En el laboratorio, se realizó el siguiente procedimiento para toma de datos:

1. Se hizo corte de las piezas a estudiar para extraer fragmentos que serían utilizados para aplicar técnicas de metalografía y determinar el tipo de material.
2. Se realizó el pulido de piezas con lijas de agua con tamaños de grano 80, 100, 150, 220, 400, 1000 y 1200 en dirección perpendicular a las líneas del anterior lijado, con el fin de reducir irregularidades en la sección de corte, hasta obtener una superficie lo menos rayada posible.
3. En la máquina de pulido, se utilizó un paño con alúmina hasta obtener brillo espejo de la piezas, teniendo cuidado que la presión ejercida en la pieza no sea excesiva para evitar rayones no deseados. Esta operación se realizó a 180 revoluciones por minuto con constante suministro de una suspensión de alúmina con agua.
4. Se ejecutó el ataque químico de cada probeta con ácido nítrico y así poder visualizar la microestructura del material.
5. Se capturan imágenes a diferentes aumentos con el microscopio óptico.
6. Se mide la dureza de las probetas en el durómetro Rockwell.

3.2 Inspección visual

3.2.1 Inspección visual de mordaza para prensa de banco

Este elemento, se encontraba instalado en el taller de mantenimiento de la cervecería de Tocancipá. La prensa se había instalado dos meses antes de fallar. En el momento de la fractura, se realizaba tareas de mantenimiento de tornillos fijadores en un filtro de cerveza. Al colocar el sistema de fijación en la prensa e iniciar a realizar el trabajo, luego de varios ciclos donde se hizo esfuerzos perpendiculares a la cara de la mordaza, se presentó la fractura. Luego de retirar

ANÁLISIS DE FALLA DE UNA MORDAZA DE PRENSA DE BANCO, TORNILLO ELEVADOR Y TUBO DE TRANSPORTE DE AMONIACO

las partes dañadas, se reporta tornillería de la mandíbula suelta como causa inicial de falla.

De acuerdo a su hoja de vida, se realizó una inspección visual de la mordaza para buscar evidencias de fallas y se encontró deformación en el área donde hay una perforación para el tornillo sujetador. Se evidencia que el inicio de la falla fue en la parte central derecha de la mordaza (ver ilustración 9). También, se observa una deformación en la pared cilíndrica de la cavidad del perno y en la zona inferior de la mordaza. Se nota un pico por lo que fue en este sitio donde finalizó la fractura.

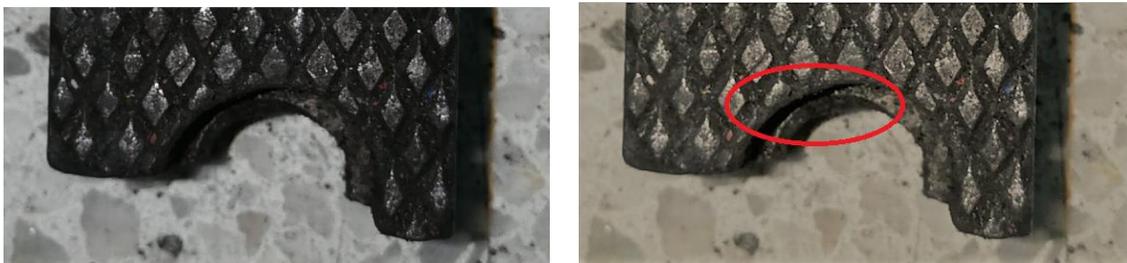
Estos hallazgos evidencian una alta carga sobre la mordaza de manera irregular, llevándola hasta una deformación plástica y posterior fractura por fatiga, debido a la deficiente fijación contra la mandíbula y un indebido uso de la herramienta. En el agujero de menor diámetro, se evidencia marcas de fatiga, por carga cíclica, en esta zona hay deformación superficial y cambio del volumen.

Ilustración 9. Fotografía de comparación mordaza donde evidencia 1) deformación de los agujeros de fijación, 2) inicios de falla, 3) deformación plástica en la pared cilíndrica del agujero.



Realizando una inspección a la cara frontal de la mordaza, se encontró que los agujeros ya no son cilíndricos ni concéntricos (ilustración 10), esto se debió a la alta carga que el elemento sufrió y como consecuencia los agujeros se han deformado.

Ilustración 10. Fotografías de la cara anterior de la mordaza donde se evidencia deformación de los agujeros.



La fractura dejó evidencias que son de fácil identificación, por ejemplo, se nota una descamación ubicada en la zona central de la arista de la mordaza (1) (ilustración 11), la cual indica que allí fue el inicio de la falla. Adicional a esta huella, en la parte inferior del elemento quedó un pico elevado, donde indica el final de la falla (2).

Ilustración 11. Foto lateral de la mordaza, se evidencia descamación (1) y pico donde termina la falla (2).



3.2.2 Inspección visual de tornillo elevador

Este tornillo de elevación era usado comúnmente para nivelar y sostener estructuras de tamaño pequeño. Este elemento evidencia que fue construido de manera artesanal en un taller. En la inspección visual, se revisa el sitio de la falla antes de ser cortado para iniciar el procedimiento metalográfico. Se encontró deformación de los hilos del perno (1) que resultaron involucrados en la fractura y se evidencia rastros de óxido en la unión del tornillo con la base metálica (2), ver ilustración 12 y 13.

ANÁLISIS DE FALLA DE UNA MORDAZA DE PRENSA DE BANCO, TORNILLO ELEVADOR Y TUBO DE TRANSPORTE DE AMONIACO

Ilustración 12. Fotografía del tornillo durante inspección visual, se evidencio cambio de paso del tornillo (1) y rastros de oxido en la base del elemento (2)



Revisando la forma de la fractura se evidencia una falla debida a flexión. Este tipo de fractura es provocada por fragilización del material y el inicio de la falla ocurre en el filete #9, contando desde la cabeza del tornillo, provocando una propagación rápida por el área del tornillo y generando fractura. La evidencia de la flexión, es indicada por el cambio de paso del tornillo justo en el filete donde se inició la falla (ilustración 13).

Ilustración 13. Detalle de la deformación de los hilos del tornillo.



Las marcas diametrales en la fractura dan indicios de fragilización de la falla. Esta, termina en el sector donde está el tallado del filete (ilustración 14).

Ilustración 14. Detalle de la fractura del tornillo.



3.2.3 Inspección visual del tubo de transporte de amoniac

Esta tubería está relacionada con las fábricas de cerveza. La bayoneta es un dispositivo que se encarga de transportar amoniac líquido hacia las chaquetas de refrigeración de los tanques de fermentación de la cervecería. Estos tubos se encuentran aislados térmicamente con poli-isocianurato y cuando el tanque está en etapa de producción, el tubo y su aislante se congelan hasta $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Luego, cuando el tanque queda vacío, cesa el paso de refrigerante y la tubería se descongela. El elemento al que se le realizó el estudio se desmonta por producirse una fuga de amoniac al ambiente.

Inicialmente, se realizó una revisión de las superficies interna y externa del tubo de $\frac{1}{2}$ " en acero al carbono SCH 40. La superficie interna del tubo conservó su integridad, pero la zona exterior de la tubería presento picaduras por toda su superficie como lo muestran las ilustraciones 15 y 16.

**ANÁLISIS DE FALLA DE UNA MORDAZA DE PRENSA DE BANCO, TORNILLO
ELEVADOR Y TUBO DE TRANSPORTE DE AMONIACO**

Ilustración 15. Foto de bayoneta de transporte de amoniaco.



Ilustración 16. Detalle del punto de falla de la tubería.



El poli-isocianurato que rodea a la bayoneta, hace parte de los poliuretanos usados más comúnmente como aislantes térmicos en tuberías de transporte de criogénicos. Este químico está basado en la reacción de un polisocinato orgánico (carbón) y un alcohol. Este compuesto contiene un elemento A llamado polioliol y un componente B llamado isocianato en una mezcla de 5 partes a 1. El polioliol es un tipo de alcohol polihídrico que contiene varios grupos de hidroxilos. Este tipo de compuesto está clasificado entre los inositoles o ciclitoles, los cuales se derivan del ciclohexano, en los cuales un elemento hidrógeno (H+) se reemplaza por un hidroxilo (OH). El isocianato fundamentalmente, es un compuesto de fórmula $-N=C=O$. Cuando una sustancia contiene dos compuestos de estos, se llama Di-isocianato, los diisocianatos son síntesis de los poliuretanos. Los isocianatos en función, son sales del ácido isocianico, en contacto permanente con el agua, se puede transformar en isocianato de amonio, (H_4NNCO). Al unir estos compuestos, se forma una espuma rígida que se crea a partir de una reacción exotérmica creando un compuesto termoestable. Esta reacción se llama polimerización. La espuma formada contiene burbujas, las cuales se llaman celdas y contienen gas el cual se encarga de formar la forma de panal que caracteriza este tipo de polímero. Adicional, la espuma contiene urea que genera el entrecruzamiento de las moléculas para formar un elemento sólido, y esta es una de las 17 reacciones químicas que se forman en la mezcla epóxica.

Debido a las concentraciones de hidrogeno (H+) y amoniaco en todos los compuestos del poli-isocianato y al exponerse al agua, que se produce por la congelación de la humedad en el ambiente, se generan cationes como el amonio, ocasionando el inicio de una reacción favorable para la corrosión localizada como es el caso.

3.3 Datos obtenidos del laboratorio

En este trabajo de grado, las piezas de estudio fueron llevadas al laboratorio de la Fundación Universitaria Los Libertadores, para realizar análisis de dureza y metalográficos y así determinar posibles cambios de microestructura, identificación de material y visualización de fallas. Estos ensayos se realizan bajo la luz de la norma ASTM E-301 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens.

3.3.1 Mordaza de prensa para banco

Se realizó un corte de la mordaza en la parte opuesta a la falla, para realizar una inspección metalográfica con la cortadora de disco. Este corte se hace con refrigeración constante para que la microestructura del material no sufra cambios.

ANÁLISIS DE FALLA DE UNA MORDAZA DE PRENSA DE BANCO, TORNILLO ELEVADOR Y TUBO DE TRANSPORTE DE AMONIACO

Ilustración 17. Corte de mordaza en cortadora.



Después de realizar extracción de la probeta, se realizó el lijado correspondiente hasta alcanzar brillo espejo en la superficie de corte (ilustración 18).

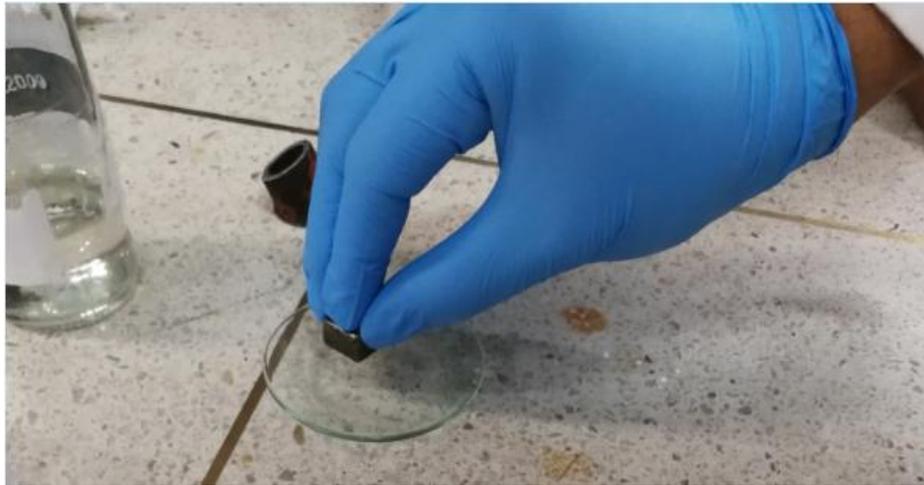
Ilustración 18. Pulido de mordaza.



ANÁLISIS DE FALLA DE UNA MORDAZA DE PRENSA DE BANCO, TORNILLO ELEVADOR Y TUBO DE TRANSPORTE DE AMONIACO

Luego del proceso de pulido, se realiza el ataque químico con ácido nítrico al 5% por 2 segundos y se neutraliza la reacción con alcohol etílico como lo muestra la ilustración 19.

Ilustración 19. Ataque químico con Ácido Nítrico al 5%.



Después de este procedimiento, se toman fotografías microscópicas de la estructura mostradas en las siguientes ilustraciones.

Ilustración 20. Microestructura de la mordaza para prensa de taller pulida y atacada con Nital al 2%. 100x.

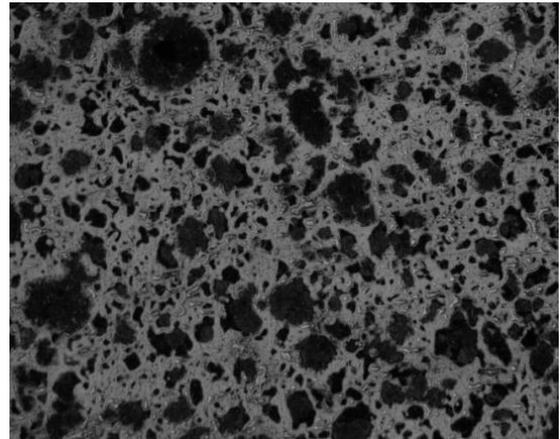
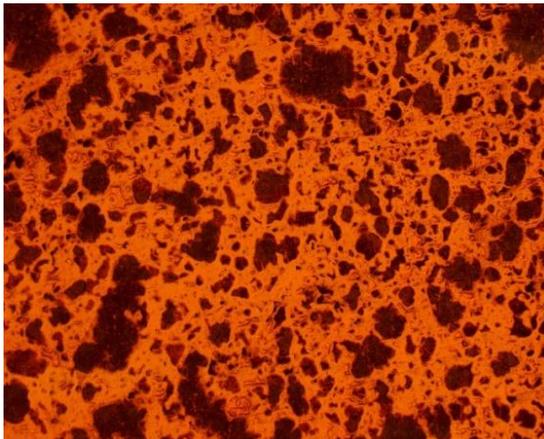
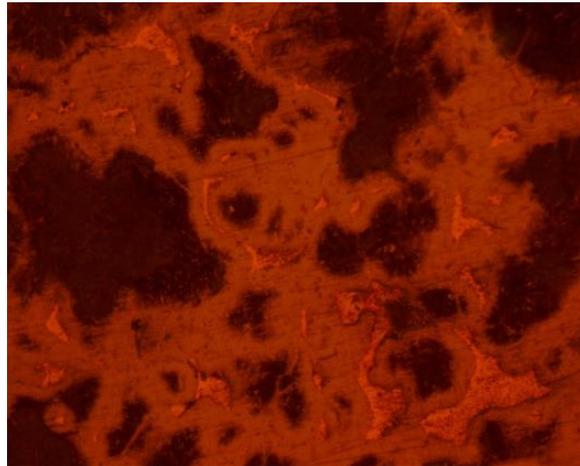
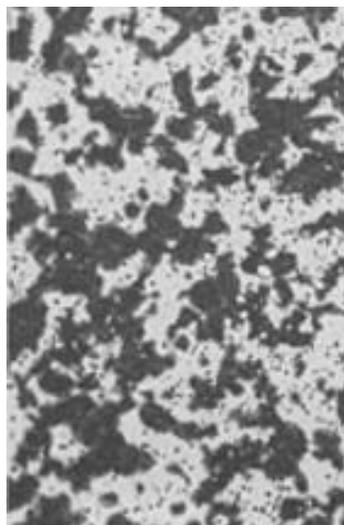


Ilustración 21. Microestructura de la mordaza de la ilustración 20 a 500x.



En la Ilustración 21, se observan carburos (islas brillantes), lo que es un indicio de tratamiento térmico. Las marcas oscuras son de una fase perlítica y la zona de color claro indica presencia de martensita. De acuerdo a lo consultado en el handbook de Metalografía de ASM, esta estructura podría pertenecer de un acero AISI W1 (ilustración 22). Este acero es usado comúnmente en la fabricación de herramientas de conformación sin mecanizado, ejemplo, cuñas, mordazas, estampas para trabajo en frío, etc., posee alta dureza superficial y buena tenacidad. Su contenido de Carbono esta entre 1.05 ~ 1.40%, esta aleado con Cr, Ni, Si, y otros elementos en bajas proporciones.

Ilustración 22. Microestructura del acero AISI W1 con presencia de carburos por tratamiento térmico.¹¹



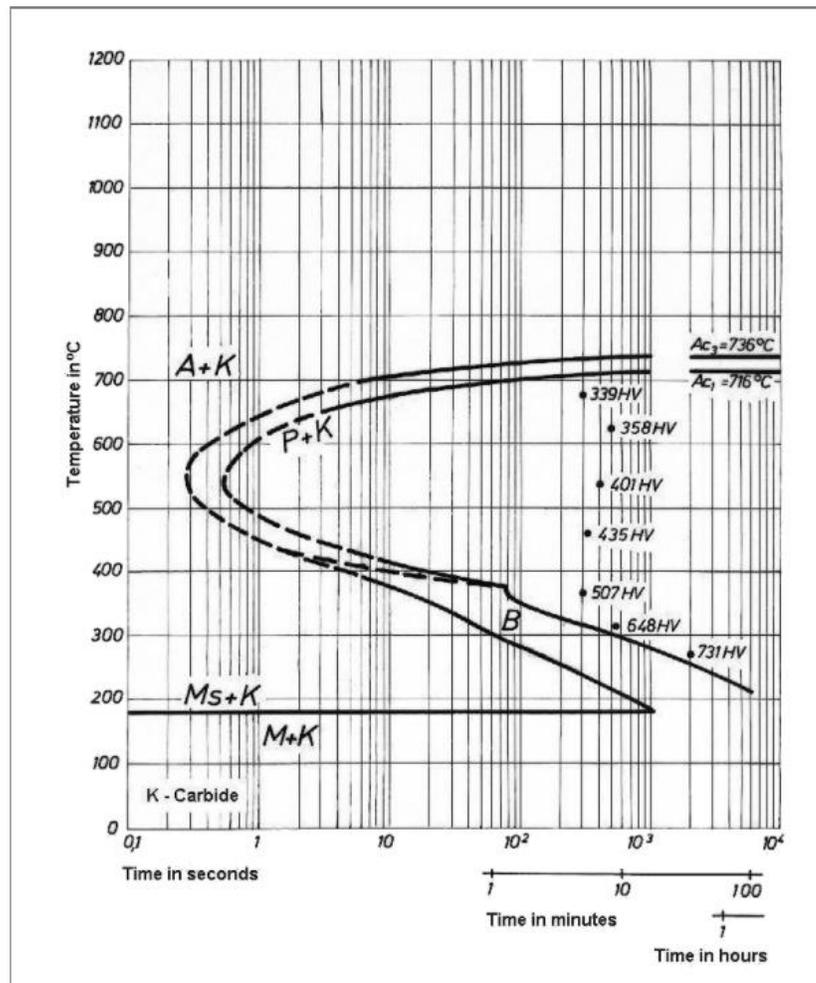
¹¹ Tomado de ASM Handbook volumen 9, Metallography and microstructure, pag 504, fig 88.

ANÁLISIS DE FALLA DE UNA MORDAZA DE PRENSA DE BANCO, TORNILLO ELEVADOR Y TUBO DE TRANSPORTE DE AMONIACO

Esta estructura se encuentra en zona de transición en el diagrama de equilibrio. El material posee martensita, la cual se forma a partir de la transformación de fases sin dilución a una velocidad cercana a la velocidad del sonido del material.

Es probable que para el templado de este material, se debe subir la temperatura por encima de los 700°C (diagrama 2), luego bajar la temperatura con agua, salmuera o aceite. Es recomendado el agua o la salmuera para mejores resultados de dureza. Después de esto, el fabricante SISA, recomienda realizar un doble revenido con tiempos de permanencia de 2 horas cada uno.

Diagrama 2. Diagrama TTT de acero W1.¹²



¹² Tomado de <https://steelselector.sij.si/steels/OC100.html>

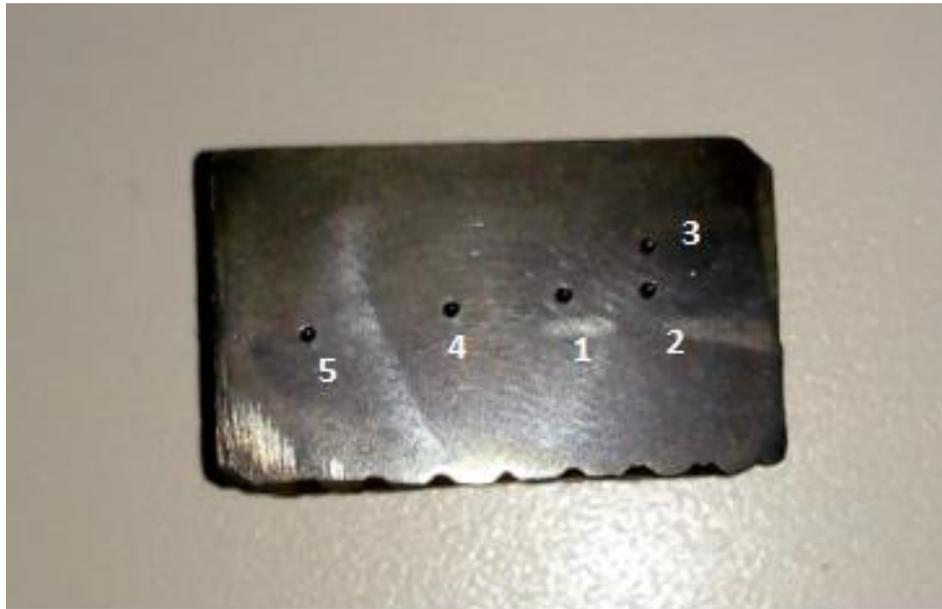
ANÁLISIS DE FALLA DE UNA MORDAZA DE PRENSA DE BANCO, TORNILLO ELEVADOR Y TUBO DE TRANSPORTE DE AMONIACO

Con estas imágenes podemos suponer que este material es AISI W1 y por información del handbook de metalografía posiblemente es una estructura con tratamiento térmico en salmuera. Luego de esto, se hace toma de dureza a lo largo de la probeta de la mordaza (ilustración 23), obteniendo los siguientes datos.

Tabla 1. Medición de durezas de la probeta de la mordaza para prensa de taller.

PUNTO	DUREZA (HRC)
1	33
2	32
3	33
4	38
5	35

Ilustración 23. Puntos de medición de dureza en mordaza para prensa de taller.



La dureza promedio es 34.2 HRC (314.2 HRV), esto indica que el material no tuvo falla por cambio de estructura debido a cambios de temperatura, la dureza es uniforme en toda la probeta. Las estructuras vistas no presentan oclusiones, fisuras ni grietas internas, lo que indica que el material es homogéneo, y este es un indicio que la falla no fue inducida por defectos en el material sino por otras causas, de acuerdo a lo determinado en párrafos anteriores la falla en esta pieza sería por fatiga en el elemento.

3.3.2 Tornillo elevador

Se hizo un corte en el tornillo para extraer una probeta de toda la sección longitudinal de elemento (ilustración 24).

Ilustración 24. Corte longitudinal del tornillo elevador.



Esta probeta es llevada a lijado, pasando por los diferentes tamaños de grano. Luego, se lleva a proceso de pulido con paño y solución con alúmina para poder darle acabado de espejo a la superficie. Después, se hace el ataque químico con ácido nítrico al 5% durante 2 segundos y posterior neutralización con alcohol etílico. Al realizar el ataque químico se ve el cambio de color sobre el sector donde se realizó la unión por soldadura o zona afectada por la temperatura (3). También, se ven el material de la arandela (4), material del tornillo (2) y sitio donde se aplicó la unión por soldadura (1). A continuación, se muestran los puntos de interés en el objeto de estudio mencionado.

ANÁLISIS DE FALLA DE UNA MORDAZA DE PRENSA DE BANCO, TORNILLO ELEVADOR Y TUBO DE TRANSPORTE DE AMONIACO

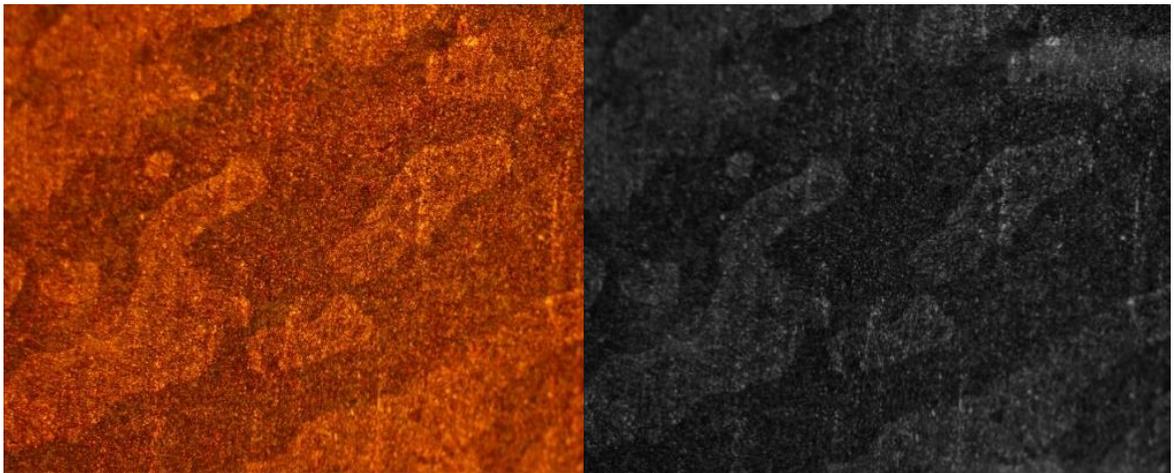
Ilustración 25. Diversos puntos de interés en el tornillo elevador, sitio de aplicación de soldadura



(1), tornillo (2), zona de afectación por temperatura de la soldadura (3), arandela (4).

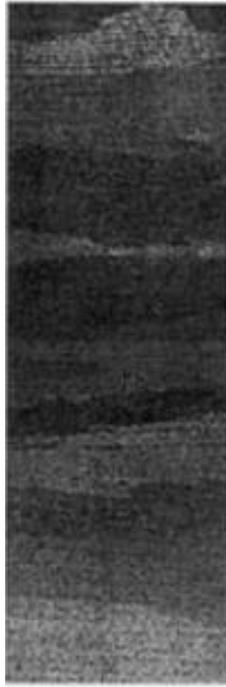
Después de realizar la inspección visual, se lleva al microscopio óptico y se toman las siguientes imágenes de microestructura.

Ilustración 26. Microestructura del tornillo elevador atacado con Nital al 5%. 100x



Se realiza una comparación de microestructuras similares y se encontró en el handbook de metalografía de ASM, una estructura similar correspondiente a un acero AISI 4340 (ilustración 27).

Ilustración 27. Microestructura de un acero SAE 4340.¹³



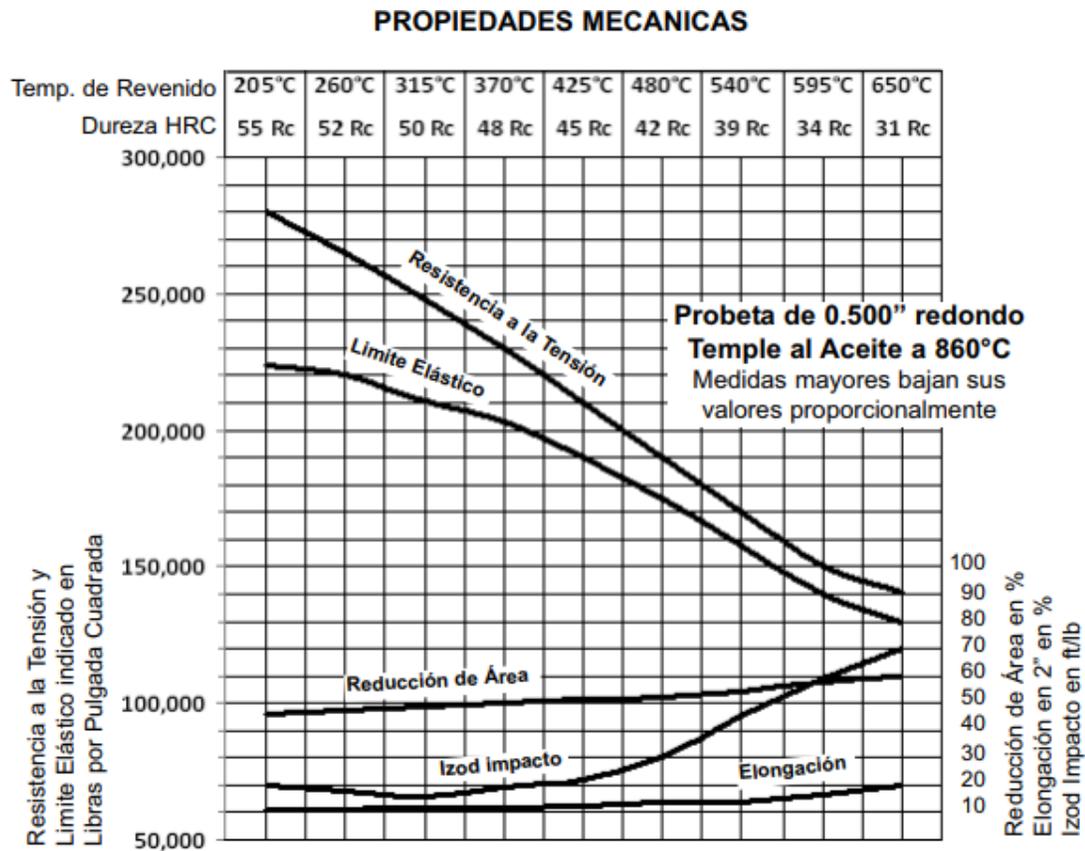
Esta imagen muestra un patrón de dendrita (parte oscura de la ilustración 27), debido a una deformación en caliente, este patrón lleva la dirección de la solidificación del material. Los patrones dendríticos, ocurren cuando ocurren hay deformación severa en caliente, tal y como ocurre cuando se realiza la conformación del tornillo. De acuerdo a estas imágenes podemos sugerir que el material es un acero SAE 4340.

Se realizaron pruebas de dureza con precarga de 150 kgf y la dureza promedio fue de 36.4 HRC. Estos datos sirvieron para cotejarlos con las tablas de aceros del fabricante SISA y se confirmó que esta dureza es característica del tipo de acero sugerido.

¹³ Tomado de ASM Handbook volumen 9, Metallography and microstructure, pag 1354

ANÁLISIS DE FALLA DE UNA MORDAZA DE PRENSA DE BANCO, TORNILLO ELEVADOR Y TUBO DE TRANSPORTE DE AMONIACO

Tabla 2. Propiedades mecánicas de un acero SAE 4340.



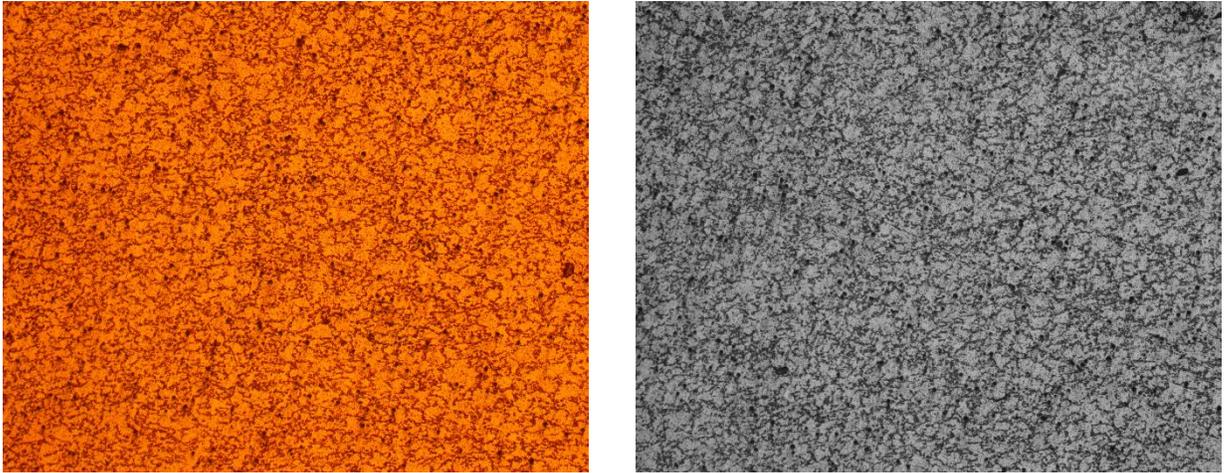
Con los datos obtenidos de material y dureza, se realiza la revisión en la tabla de propiedades mecánicas de SISA y encontramos que este material pudo ser tratado también con un revenido una temperatura entre 540 y 595°C, lo que nos produciría un rango de durezas entre 34 y 39 HRC. Las imágenes obtenidas, muestran que la estructura conserva su integridad, no presenta fracturas, grietas y oclusiones, los daños del tornillo no fueron producidos por factores térmicos o de fabricación del tornillo.

3.3.3 Bayoneta de transporte de amoniaco

Después de la inspección visual, se realiza el procedimiento descrito en el metodología. Después de realizado el ataque químico a la superficie pulida con ácido nítrico al 2%, se realiza la revisión de la superficie en el microscopio y se tomaron las siguientes imágenes.

ANÁLISIS DE FALLA DE UNA MORDAZA DE PRENSA DE BANCO, TORNILLO ELEVADOR Y TUBO DE TRANSPORTE DE AMONIACO

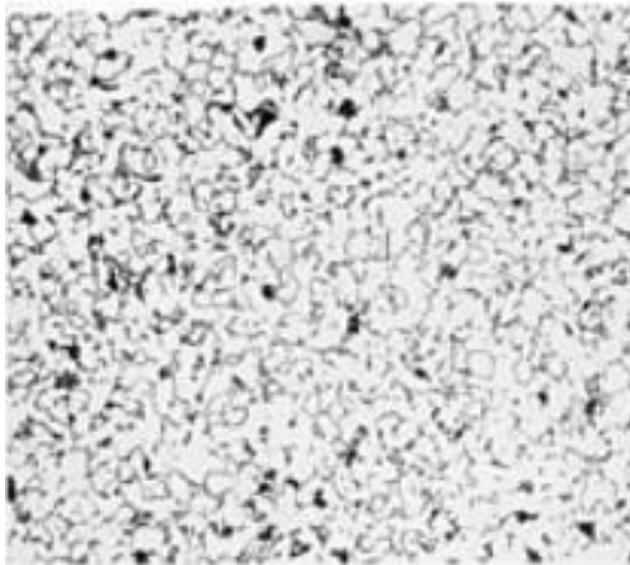
Ilustración 28. Microestructura del acero de la bayoneta de transporte de amoniaco atacado con Nital al 2%. 100x.



Realizando comparaciones de este material con la bibliografía especializada, se puede deducir que es un acero con bajo contenido de carbono. Este material contiene una matriz clara correspondiente a una fase de ferrita en gran cantidad y una fase de perlita (áreas oscuras).

Haciendo una contrastación con imágenes de handbook de metalografía de la ASM, este acero puede ser el ASTM A106 (ilustración 29), el cual es recomendado para el uso en sistemas de transporte de amoniaco, según ANSI/IIAR -2.

Ilustración 29. Microestructura de un acero ASTM A106, grado A.¹⁴



¹⁴ Tomado de ASM Handbook volumen 9, Metallography and microstructure, pag 398

ANÁLISIS DE FALLA DE UNA MORDAZA DE PRENSA DE BANCO, TORNILLO ELEVADOR Y TUBO DE TRANSPORTE DE AMONIACO

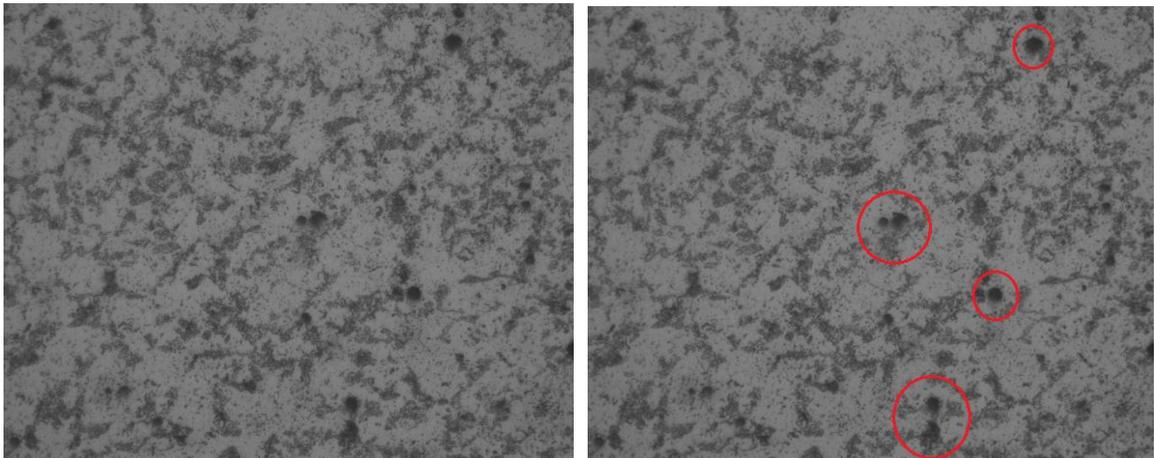
Se realizó la medición de dureza en las probetas obteniendo un valor promedio de 27.6 HRC. La diferencia en estos valores se reproduce por la dificultad de tomar las mediciones ya que la estructura del espécimen se encuentra muy corroída.

Tabla 3. Medición de durezas de probeta de la bayoneta de transporte de amoniaco.

PUNTO	DUREZA (HRC)
1	20
2	29
3	34

En las siguientes imágenes, se evidencian microhuecos dentro de la estructura. Estas cavidades se propagaron por la pared del tubo a baja velocidad. Teniendo en cuenta la historia del tubo, el cual se instaló en el año 1994 en la cava #1 de la cervecería de Tocancipá (Cervecería Leona), la causa de esta falla fue la interacción de los componentes químicos del poli-isocianurato que cubre el tubo y el agua proveniente del congelamiento de la humedad del ambiente. Estos fueron los factores que favorecieron la corrosión por picadura.

Ilustración 30 imagenes donde se evidencian microhuecos en la estructura del tubo



ANÁLISIS DE FALLA DE UNA MORDAZA DE PRENSA DE BANCO, TORNILLO ELEVADOR Y TUBO DE TRANSPORTE DE AMONIACO

3.4 Diagnóstico

De acuerdo a los datos obtenidos y análisis realizados, se puede generar la siguiente tabla de diagnóstico de las fallas.

Tabla 4. Diagnóstico de causa de falla raíz en los objetos de estudio.

ELEMENTO	DIAGNÓSTICO
MORDAZA DE PRENSA PARA BANCO	Las evidencias obtenidas, muestran una deformación del tipo plástica producida por un alto nivel de carga. La fractura fue producida por fatiga . La pieza muestra signos de una mala práctica en el uso de herramientas.
TORNILLO ELEVADOR	Los datos extraídos del área de la fractura, indican que el elemento falló por una carga radial excesiva . Indicio de ello es la deformación que presenta el filete que quedó expuesto en la zona. Las marcas transversales vistas en la falla indican una fragilización del material.
BAYONETA DE TRANSPORTE DE AMONIACO	Las marcas encontradas en la superficie externa del tubo, y las cavidades encontradas en las fotografías en el microscopio evidencian pitting como la causa de falla raíz de este elemento. Esto ocurre a raíz de la reacción de óxido-reducción de los componentes del poliisocianurato y el agua con el acero de la bayoneta. Esto pudo haberse presentado porque se presenta congelamiento cuando hay paso de amoniaco en el tubo a raíz de la humedad atrapada en el aislamiento.

4 Conclusiones

- i. Se realizó una investigación exhaustiva en artículos de análisis de falla en elementos similares, los cuales dieron indicios acerca de los materiales, propiedades y demás elementos de peso para poder realizar un análisis de falla lo más cercano a la realidad.
- ii. Se ejecutaron pruebas metalográficas, inspecciones visuales, y pruebas de dureza, las cuales fueron pruebas suficientes para poder verificar tipo de material, y las posibles fallas en los elementos estudiados.
- iii. Se utilizó el método RCA, para evaluar las posibles causas de falla de los especímenes estudiados. Esto ayuda a fortalecer la metodología experimental realizada para el presente proyecto.
- iv. Se hizo uso de material bibliográfico de varias fuentes, como soporte de la investigación. Esta información es muy relevante debido a su gran aporte en el desarrollo del proyecto.
- v. Se evidencio que la falla ocurrida en la mordaza, fue **fatiga**, debido a uso indebido de la herramienta.
- vi. El tornillo elevador sufrió fractura por fragilizacion de material, a causa de los esfuerzos que actuaron en la pieza.
- vii. La bayoneta de transporte de amoniaco, fallo por pitting por corrosión, debido a la reacción entre el aislante térmico y el material de la tubería.

5 Recomendaciones

- a. Antes de iniciar a usar las prensas de banco, se debe realiza rutina de inspección para verificar la correcta fijación de los elementos que la componen.
- b. Las tuberías de amoniaco se deben cambiar antes de que ocurran fallas catastróficas al sistema y las personas que están en el proceso.
- c. Los tornillos de elevación, deben ser diseñados de acuerdo a la aplicación, para esto se deben hacer los respectivos estudios y cálculos para evitar este tio de fallas.

6 Bibliografía

- [1] ASM International. Handbook Committee: *ASM handbook*. Vol. 9: *Metallography and Microstructures*. ASM International, 2004
- [2] ASM International. Handbook Committee: *ASM handbook*. Vol. 1: *Properties and Selection_ Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. ASM International, 1990
- [3] ASM International. Handbook Committee: *ASM handbook*. Vol. 12: *Fractography*. ASM International, 2004
- [4] ASM International. Handbook Committee: *ASM handbook*. Vol. 13A: *Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection*. ASM International, 2003
- [5] Colegio de Ingenieros electricistas, mecánicos e industriales; David Solis Moya: *Seminario de refrigeración industrial IIAR “La refrigeración industrial con amoníaco, asunto estratégico para el planeta”*; “ANSI/IIAR -2” Norma Nacional Americana para Equipos, Diseño e Instalación de Sistemas Mecánicos de Circuito Cerrado con Refrigerante Amoníaco
- [6] Aceros SISA, Servicio industrial, S.A de C.V.: *Tabla de aceros SAE- AISI, México*
- [7] VII congreso Bolivariano de Ingeniería Mecánica, Rolando Núñez: *análisis de falla en tubería de acero inoxidable 304L para la industria cervecera*. Perú, octubre 2012
- [8] Universidad Autónoma del Caribe, Ing. Henry Santamaría de la Cruz: *Análisis de falla en perno de sujeción de unidad de bombeo mecánico Lufkin a640d – 427 – 144*. Diciembre de 2007.
- [9] Universidad EAFIT, Edgar Alexander Ossa: *Análisis de falla de la mordaza plana de una prensa hidráulica*. Junio 2008
- [10] Universidad del país vasco, Jose Luis Arana: *Mecánica de la fractura*. ISBN: 84-8373-455-9
- [11] <https://wiltonvisепarts.wordpress.com/2013/11/15/vise-jaw-steel-and-heat-treating-why-it-matters/>
- [12] Aceros SISA, Acero SISA W1 Acero grado herramienta al carbón, servicio industrial, S.A. de C.V.
- [13] Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, Richard G. Budynas y J. Keith Nisbett, Mc GrawHill.