

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ANÁLISIS DE FALLA DE EJE DE POLEA MOTRIZ FRACTURADO
PERTENECIENTE A UNA FAJA TRANSPORTADORA**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico

AUTOR:

Bryam Alonso Condeso Carrizales

ASESOR:

Mg. Ing. Raúl Carlos Hurtado Espejo

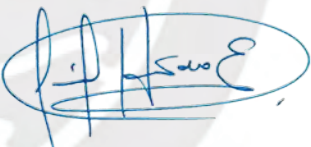
Lima, Marzo, 2026

Informe de Similitud

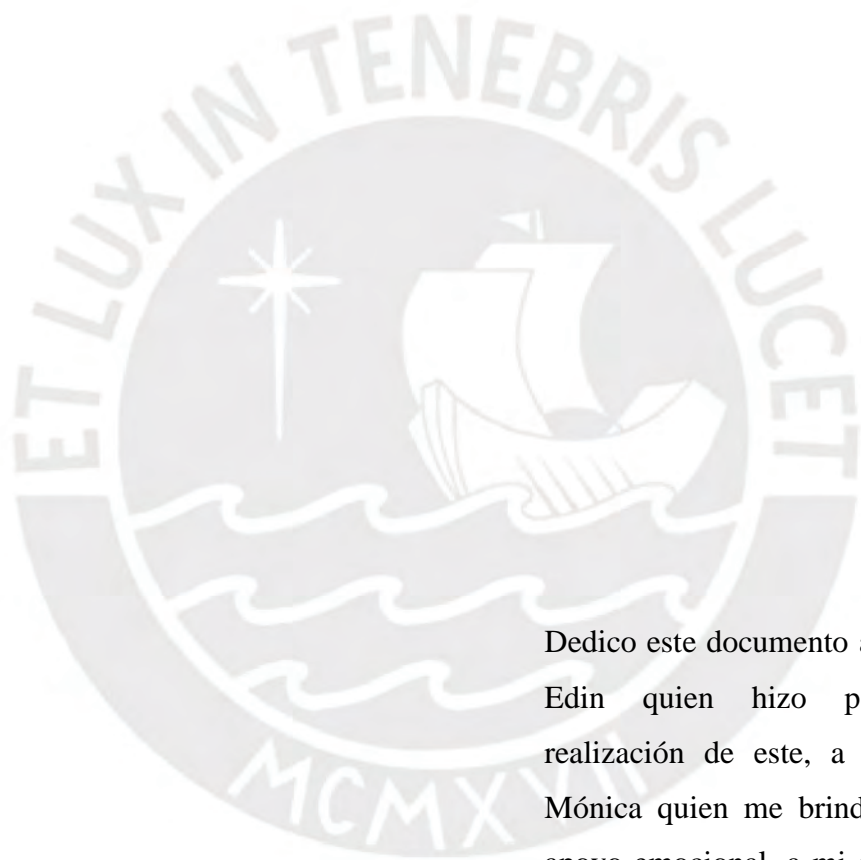
Yo, **RAÚL CARLOS HURTADO ESPEJO**, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada: **ANÁLISIS DE FALLA DE EJE DE POLEA MOTRIZ FRACTURADO PERTENECIENTE A UNA FAJA TRANSPORTADORA**, del autor **BRYAM ALONSO CONDESO CARRIZALES**, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de **20%**. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el **17/03/2026**.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima 17 de marzo de 2026.

Apellidos y nombres del asesor: HURTADO ESPEJO, RAÚL CARLOS	
DNI: 10610827	Firma 
ORCID: 0000-0002-8511-1767	

DEDICATORIA



Dedico este documento a mi padre Edín quien hizo posible la realización de este, a mi madre Mónica quien me brindo todo su apoyo emocional, a mi enamorada Tarcila quien me incentivo a seguir adelante en los momentos más difíciles, y a mis hermanos, Kevin y Joyce, quienes siempre estuvieron siempre ahí para mí.

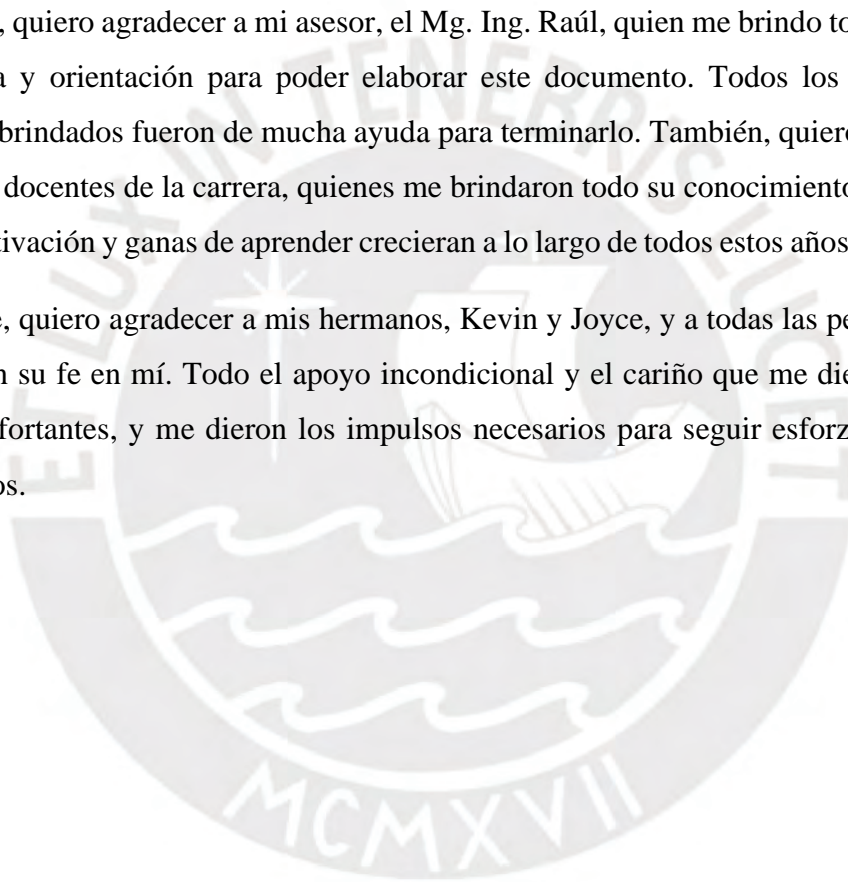
AGRADECIMIENTOS

Quiero mostrar todo mi agradecimiento a mis padres, Edin y Mónica, quienes hicieron posible mis estudios superiores en la universidad PUCP. Todo el amor, apoyo, cariño y esfuerzo fueron muy relevantes para completar mis estudios en esta prestigiosa universidad.

También, quiero agradecer a mi enamorada, Tarcila, por todo su apoyo y confianza que me dio a lo largo de todos estos años de estudio. Gracias a ella siempre pude encontrar las energías necesarias para poder seguir adelante con mis estudios y no rendirme jamás.

Así mismo, quiero agradecer a mi asesor, el Mg. Ing. Raúl, quien me brindo toda su vasta experiencia y orientación para poder elaborar este documento. Todos los consejos y materiales brindados fueron de mucha ayuda para terminarlo. También, quiero agradecer a todos los docentes de la carrera, quienes me brindaron todo su conocimiento e hicieron que mi motivación y ganas de aprender crecieran a lo largo de todos estos años de estudio.

Finalmente, quiero agradecer a mis hermanos, Kevin y Joyce, y a todas las personas que depositaron su fe en mí. Todo el apoyo incondicional y el cariño que me dieron fueron muy reconfortantes, y me dieron los impulsos necesarios para seguir esforzándome en mis estudios.



RESUMEN

El presente documento de tesis tiene como finalidad determinar la causa más probable de falla de la fractura de una polea motriz perteneciente a una faja transportadora mediante la metodología de análisis de falla. Todas las pruebas y ensayos que conlleva un correcto análisis de falla se realizaron en el Laboratorio de Materiales de la sección Ingeniería Mecánica de la PUCP.

El primer capítulo de la tesis se centra en la descripción y la funcionalidad de las fajas transportadoras, lo cual implica también a sus componentes, como los ejes motrices. Además, se define lo que es un análisis de falla y los fallos más comunes en los ejes. En el capítulo 2, se definen la metodología del análisis de falla y el procedimiento de los ensayos y pruebas implicados, los cuales vienen a ser el ensayo de tracción, el ensayo de impacto, el ensayo de dureza, el análisis químico, el ensayo metalográfico, la inspección visual y la inspección por partículas magnéticas. Finalmente, en el capítulo 3, se analizan los resultados de las pruebas y ensayos realizados, con los cuales se puede obtener la causa más probable de falla.

En conclusión, se puede decir que el mecanismo de falla que el eje presenta es por fatiga mecánica, la cual fue originado por una alta concentración de tensiones y cargas altas. La alta concentración de tensiones se debió al gran embridamiento generado por la unión por ajuste mecánico entre el acople y la polea. Además, el material del eje presenta una microestructura con fases ferrita y perlita con granos grandes, lo cual es compatibles con un estado de suministro bruto de colada.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	i
INDICE DE TABLAS	iv
INDICE DE FIGURAS	v
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVO GENERAL.....	2
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO	3
1.1. Fajas transportadoras.....	3
1.2. Ejes.....	8
1.2.1. Aceros para ejes	9
1.2.1.1. Propiedades de los tipos de acero	9
1.2.1.2. Tratamientos térmicos de los aceros	13
1.3. Fallos comunes en ejes	23
1.4. Análisis de falla.....	25
1.5. Análisis fractográfico	26
1.5.1. Fractura dúctil	27
1.5.2. Fractura frágil.....	28
1.5.3. Fractura por fatiga	31
CAPÍTULO 2: MÉTODOS EXPERIMENTALES.....	35
2.1. Caracterización del material	35
2.1.1. Ensayo de tracción.....	35
2.1.2. Ensayo de impacto	41
2.1.3. Ensayo de dureza	45
2.1.4. Análisis químico.....	52
2.1.5. Análisis Metalográfico.....	55
2.2. Evaluación de la fractura.....	59
2.2.1. Inspección visual y metrología	59

2.2.2. Inspección por partículas magnéticas.....	60
2.2.3. Análisis fractográfico	64
2.2.4. Análisis metalográfico adyacente al inicio de falla	65
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE RESULTADOS	68
3.1. Análisis de resultados de la caracterización del material.....	68
3.1.1. Resultados del ensayo de tracción	68
3.1.2. Resultados del ensayo de impacto	69
3.1.3. Resultados del ensayo de dureza	70
3.1.4. Resultados del análisis químico	71
3.1.5. Resultados del análisis metalográfico	72
3.2. Análisis de resultados de la fractura	74
3.2.1. Resultados de la inspección por partículas magnéticas.....	75
3.2.2. Resultados de la fractografía	75
3.2.3. Análisis metalográfico adyacente al inicio de falla	77
CONCLUSIONES	80
RECOMENDACIONES	81
BIBLIOGRAFÍA	82

INDICE DE TABLAS

CAPITULO 1

Tabla 1. 1. Composicion química del acero AISI 1040.....	9
Tabla 1. 2. Propiedades mecánicas del acero AISI 1040.....	10
Tabla 1. 3. Composición química del acero AISI 4140.....	10
Tabla 1. 4. Propiedades mecánicas del acero AISI 4140.....	10
Tabla 1. 5. Composición química del acero AISI SAE 4340	11
Tabla 1. 6. Propiedades mecánicas del acero AISI 4340.....	11
Tabla 1. 7. Composición química del acero AISI 5150.....	11
Tabla 1. 8. Propiedades mecánicas del acero AISI 5150.....	11
Tabla 1. 9. Composición química del acero AISI 6150.....	12
Tabla 1. 10. Propiedades mecánicas del acero AISI 6150.....	12
Tabla 1. 11. Composición química del acero AISI 8650.....	12
Tabla 1. 12. Propiedades mecánicas del acero AISI 8650.....	13

CAPITULO 3

Tabla 3. 1. Resultados del ensayo de tracción.....	68
Tabla 3. 2. Resultados del ensayo de impacto.....	70
Tabla 3. 3. Resultados del ensayo de dureza Brinell.....	70
Tabla 3. 4. Resultados del ensayo de dureza Vickers.....	71
Tabla 3. 5. Resultados del análisis químico.....	72

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO 1

Figura 1. 1. Componentes de una faja transportadora	3
Figura 1. 2. Disposiciones típicas de fajas transportadoras.....	5
Figura 1. 3. Arreglos para carga y descarga de material	6
Figura 1. 4. Componentes de una polea	7
Figura 1. 5. Tipos de poleas para fajas transportadoras	8
Figura 1. 6. Diagrama de fase de Fe-C para un acero hipoeutectoide de 0.4%C.....	14
Figura 1. 7. Diagrama de fase de Fe-C para un acero hipereutectoide de 1.2%C.....	14
Figura 1. 8. Microestructura de aceros hipoeutectoides	16
Figura 1. 9. Microestructura de aceros hipereutectoides.....	16
Figura 1. 10. Microestructura de esferoidita con partículas de Fe ₃ C de forma globular en una matriz ferrítica.....	18
Figura 1. 11. Bainita superior	20
Figura 1. 12. Bainita inferior	21
Figura 1. 13. Martensita	22
Figura 1. 14. Eje fracturado de un alternador para trenes	25
Figura 1. 15. Metodología para el análisis de falla utilizada en el laboratorio de materiales de la PUCP	26
Figura 1. 16. Superficie de fractura dúctil.....	27
Figura 1. 17. Fractura dúctil	28
Figura 1. 18. Ejemplo de superficie de fractura frágil.....	28
Figura 1. 19. Crestas radiales	29
Figura 1. 20. Marcas Chevron	29
Figura 1. 21. Fractura frágil por clivaje y fractura frágil intergranular.....	30
Figura 1. 22. Marcas de río.....	30
Figura 1. 23. Ejemplo de superficie de fractura por fatiga en un eje AISI 1040 sometido a flexión rotativa.....	31
Figura 1. 24. Ejemplo de estrías en un eje fallido de bomba de agua	32
Figura 1. 25. Morfología de la fractura para cargas de flexión y torsión rotativa en ejes	33

Figura 1. 26. Morfología de la fractura para cargas de tracción-tracción o tracción-compresión	33
Figura 1. 27. Morfología de la fractura para cargas de flexión unidireccional	34
Figura 1. 28. Morfología de la fractura para cargas de flexión bidireccional	34

CAPITULO 2

Figura 2. 1. Ejemplo de gráfico “esfuerzo vs deformación” de un material dúctil	36
Figura 2. 2. Ejemplo de gráfico “esfuerzo vs deformación” de un material frágil.....	36
Figura 2. 3. Probeta redonda estandarizada según norma ASTM E8.....	37
Figura 2. 4. Dibujo dimensionado de la probeta	38
Figura 2. 5. Probeta utilizada para el ensayo de tracción	38
Figura 2. 6. Máquina de ensayo para tracción electromecánica Zwick/Roell modelo Z250	40
Figura 2. 7. Probeta fracturada del ensayo de tracción.....	40
Figura 2. 8. Ensayo de impacto según método Charpy	42
Figura 2. 9. Ensayo de impacto por método Izod.....	42
Figura 2. 10. Probeta para el ensayo de impacto según método Charpy	43
Figura 2. 11. Dibujo dimensionado de la probeta	43
Figura 2. 12. Máquina para ensayo de impacto Zwick/Roell modelo RKP450	44
Figura 2. 13. Dimensiones para los cálculos	44
Figura 2. 14. Probeta fracturada en el ensayo de impacto.....	45
Figura 2. 15. Indentador Vickers	46
Figura 2. 16. Probeta para el ensayo de dureza Brinell	47
Figura 2. 17. Probeta para el ensayo de dureza Vickers.....	48
Figura 2. 18. Durómetro Brinell marca Foundrax modelo Brin 200 M	49
Figura 2. 19. Desbaste de la superficie de la probeta para el ensayo de dureza.....	49
Figura 2. 20. Pulido de la superficie de la probeta para el ensayo de dureza.....	50
Figura 2. 21. Superficie preparada para el ensayo de dureza	50
Figura 2. 22. Marcación y enumeración de la probeta	51
Figura 2. 23. Durómetro Zwick/Roell Indenter ZHV.....	52
Figura 2. 24. Cortadora de mesa LECO SX-100M	53
Figura 2. 25. Probeta para el análisis químico.....	54

Figura 2. 26. Espectrómetro de emisión óptica Bruker Q8 Magellan	54
Figura 2. 27. Probeta para análisis metalográfico	56
Figura 2. 28. Prensa de montaje Buehler Simplimet	56
Figura 2. 29. Equipo de esmerilado y pulido Struers Laboforce-3	58
Figura 2. 30. Microscopio digital invertido Leica DMI5000 M.....	58
Figura 2. 31. Parte larga del eje fracturado.....	59
Figura 2. 32. Parte corta del eje fracturado	60
Figura 2. 33. Pulido del eje fracturado	61
Figura 2. 34. Limpieza del eje fracturado	62
Figura 2. 35. Aplicación del líquido con partículas magnéticas	62
Figura 2. 36. Aplicación del campo magnético mediante un yugo	63
Figura 2. 37. Aplicación de la luz ultravioleta	63
Figura 2. 38. Superficie de fractura del eje	64
Figura 2. 39. Sierra de mano marca Ubermann.....	66
Figura 2. 40. Muestra cortada.....	66
Figura 2. 41. Probeta para el análisis metalográfico	67

CAPITULO 3

Figura 3. 1. Curva “esfuerzo vs deformación”	69
Figura 3. 2. Análisis microscópico sin ataque	73
Figura 3. 3. Análisis metalográfico con ataque químico	73
Figura 3. 4. Análisis metalográfico con ataque químico	74
Figura 3. 5. Grieta debida a la fractura del eje	75
Figura 3. 6. Presencia de marcas “Ratchet” en la superficie fracturada del eje	76
Figura 3. 7. Presencia de marcas de playa en la zona de fractura	77
Figura 3. 8. Muestra metalográfica adyacente al inicio de falla sin ataque (50 aumentos)	78
Figura 3. 9. Muestra metalográfica adyacente al inicio de falla con ataque (100 aumentos)	78
Figura 3. 10. Muestra metalográfica adyacente al inicio de falla con ataque (200 aumentos)	79

INTRODUCCIÓN

Una de las actividades económicas más importantes en el Perú es la minería, ya que permite el crecimiento, sustento y desarrollo del país. Dicha actividad representa el 13% de la inversión privada local y más del 60% del valor de las exportaciones (Osinermin, 2019). Además, la minería también representó el 9% del PBI peruano en el primer trimestre del año 2019 (Osinermin, 2019). Todos estos datos demuestran la importancia de esta actividad en el sector económico del país.

En la actividad minera del Perú, se extraen varios tipos de minerales, desde cobre hasta oro. Sin embargo, la extracción de minerales no es una labor sencilla. Este requiere de todo un proceso que involucra máquinas diseñadas y capacitadas en ciertas actividades. Una de ellas es la faja transportadora que se encarga del traslado de minerales, lo cual reduce el uso de camiones y, por ende, reduce el impacto ambiental y el consumo de combustible. La faja transportadora es un sistema de transporte continuo que consiste en una cinta de caucho reforzada que se mueve entre dos poleas gracias a la fricción que se genera entre ellas. Esta cinta o correa es arrastrada por una o más poleas a las que se conocen como “poleas motrices” que son accionadas por motores eléctricos. Además, la polea que sirve de retorno de la cinta transportadora se le conoce como “polea de cola o terminal”. La cinta es soportada por rodillos entre las poleas motrices y de cola. (Ecorsa, 2015).

El diseño de esta máquina y los materiales con los que está construida deben de ser los adecuados, ya que, si dicha máquina falla prematuramente, se interrumpiría los procesos operativos y supondría pérdidas millonarias para la empresa minera.

Es importante señalar que, de ser el caso de que algún componente de la faja transportadora falle, será necesario realizar un análisis de falla. El análisis de falla es un procedimiento que permite determinar la posible causa de falla de algún componente mecánico mediante el estudio de materiales y análisis de las condiciones operacionales en las que dicho componente estaba sometido. Es necesario realizar este estudio para determinar la razón principal por la cual una máquina presentó fallos prematuramente, que va desde negligencia operacional hasta el mal diseño, y, de esta manera, poder establecer algunos parámetros que prevengan que estas ocurran gracias a un mejor diseño,

una mejor selección de materiales, un mejor proceso de fabricación y/o una mejor condición de operación.

Para el presente proyecto de tesis, se determinará la posible causa de falla de un eje de polea motriz de una faja transportadora que falló en plena operación. Para ello, se realizarán los diferentes ensayos que corresponden a un adecuado análisis de falla como el ensayo de tracción, ensayo de dureza, ensayos no destructivos, análisis metalográficos, etc.

OBJETIVO GENERAL

Determinar la posible causa de la falla de un eje de polea motriz de faja mediante los diferentes ensayos que conlleva un correcto análisis de falla.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un estudio en la literatura acerca de fallas en componentes mecánicos.
- Caracterizar el material del eje fallido perteneciente a la faja transportadora y su fractura
- Realizar y evaluar los resultados de caracterización de material, ensayos mecánicos y ensayos no destructivos.
- Determinar la causa más probable de falla.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1. Fajas transportadoras

Una faja transportadora es un sistema de transporte continuo compuesto principalmente por una banda flexible de caucho reforzada, la cual se apoya sobre unos rodillos que poseen giro libre. Estos rodillos son los que soportan toda la carga, los impactos y, además, brinda un movimiento suave y continuo. El desplazamiento de la banda es posible gracias a la fricción que existe entre la banda transportadora y las poleas situadas en los extremos de dicha banda. Las poleas que son accionadas mediante un motor eléctrico y son las responsables de desplazar la banda, se les conocen como “poleas motrices o de cabeza” y las poleas que funcionan para retornar la banda transportadora se les conocen como “poleas terminales o de cola”. Todos estos componentes son soportados por una estructura metálica llamada bastidor, la cual le da soporte y cohesión al sistema. Además, las fajas transportadoras están compuestas de un sistema que permite regular la altura y, por ende, su inclinación. En la Figura 1.1, se puede observar los componentes que posee con mayor detalle.

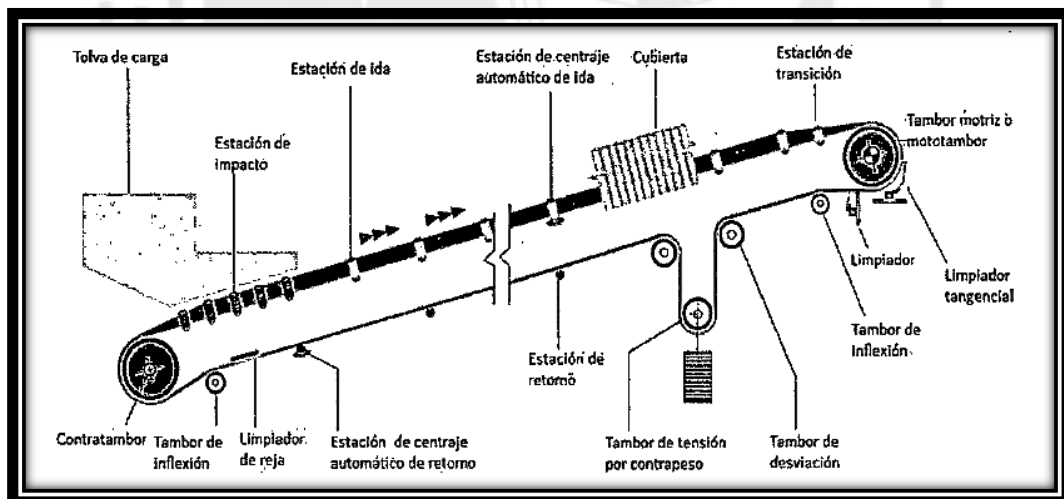


Figura 1. 1. Componentes de una faja transportadora

Adaptado de *Diseño de Cinta Transportadora y estructura auxiliar para planta de procesamiento de arcillas*, de Heras Lopez, A. A. (2014).

1.1.1. Principales estructuras de una faja transportadora

Los principales componentes que constituyen una faja transportadora y, además, permiten que esta funcione de manera eficiente y óptima son las siguientes (Quintana, 2017)

- **Estructura de soporte:** La estructura de soporte de una faja transportadora está compuesto por perfiles, en su mayoría de acero, del tipo H, C y L. Esta se encarga de dar estabilidad al sistema.
- **Elementos deslizantes:** Estos son los componentes sobre los cuales se apoya la carga a transportar de manera directa o indirecta. Los rodillos y la banda o cinta pertenecen a esta categoría.
- **Elementos motrices:** Los elementos motrices son eléctricos generalmente. A esta clasificación pertenecen todo componente responsable del movimiento de la faja, los cuales son: el motor eléctrico, las poleas, los engranajes, el motorreductor entre otros.
- **Elementos tensores:** Son aquellos componentes que permiten mantener tensionada la correa o banda, lo cual asegura un buen funcionamiento. La polea tensora y el tensor contrapeso son ejemplos de componentes que están dentro de esta clasificación.

1.1.2. Disposiciones comunes de fajas transportadoras

Las fajas transportadoras pueden ser diseñadas para cualquier tipo de necesidad tomando en cuenta la carga, el ángulo de inclinación o el espacio disponible. En la Figura 1.2, se muestra algunas disposiciones típicas de fajas transportadoras.

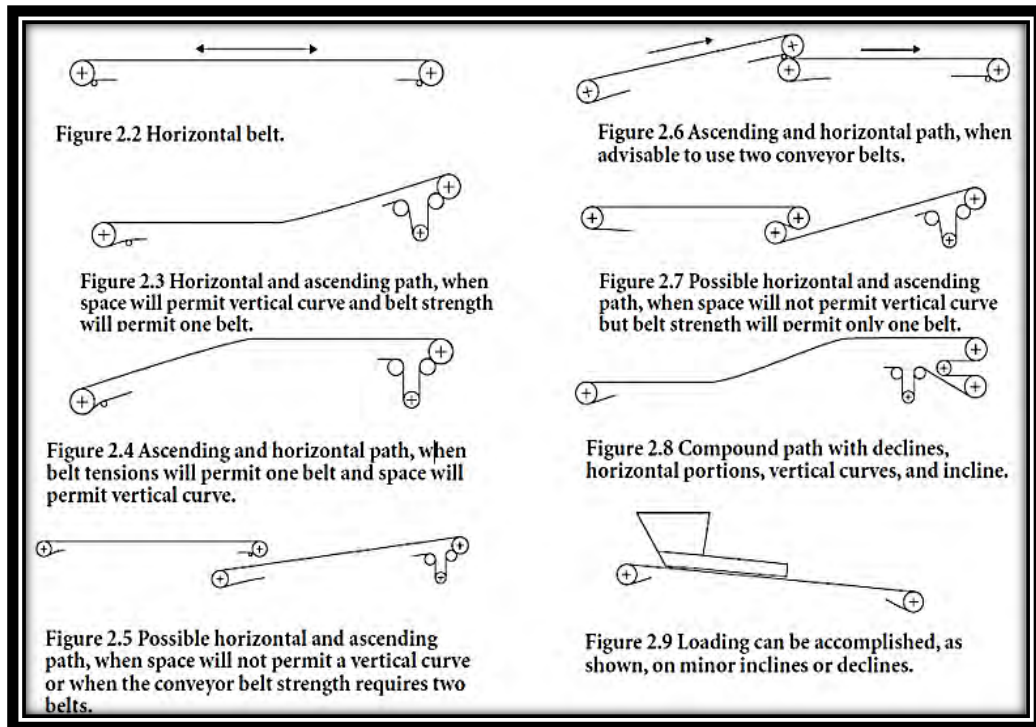


Figura 1. 2. Disposiciones típicas de fajas transportadoras

Adaptado de *Belt Conveyors for Bulk Materials*. De Conveyor Equipment Manufacturers Association. (1997)

Además, hay tipos de arreglos o disposiciones para cargar y descargar la carga de una faja transportadora. En la Figura 1.3, se muestran algunos ejemplos de estos arreglos.

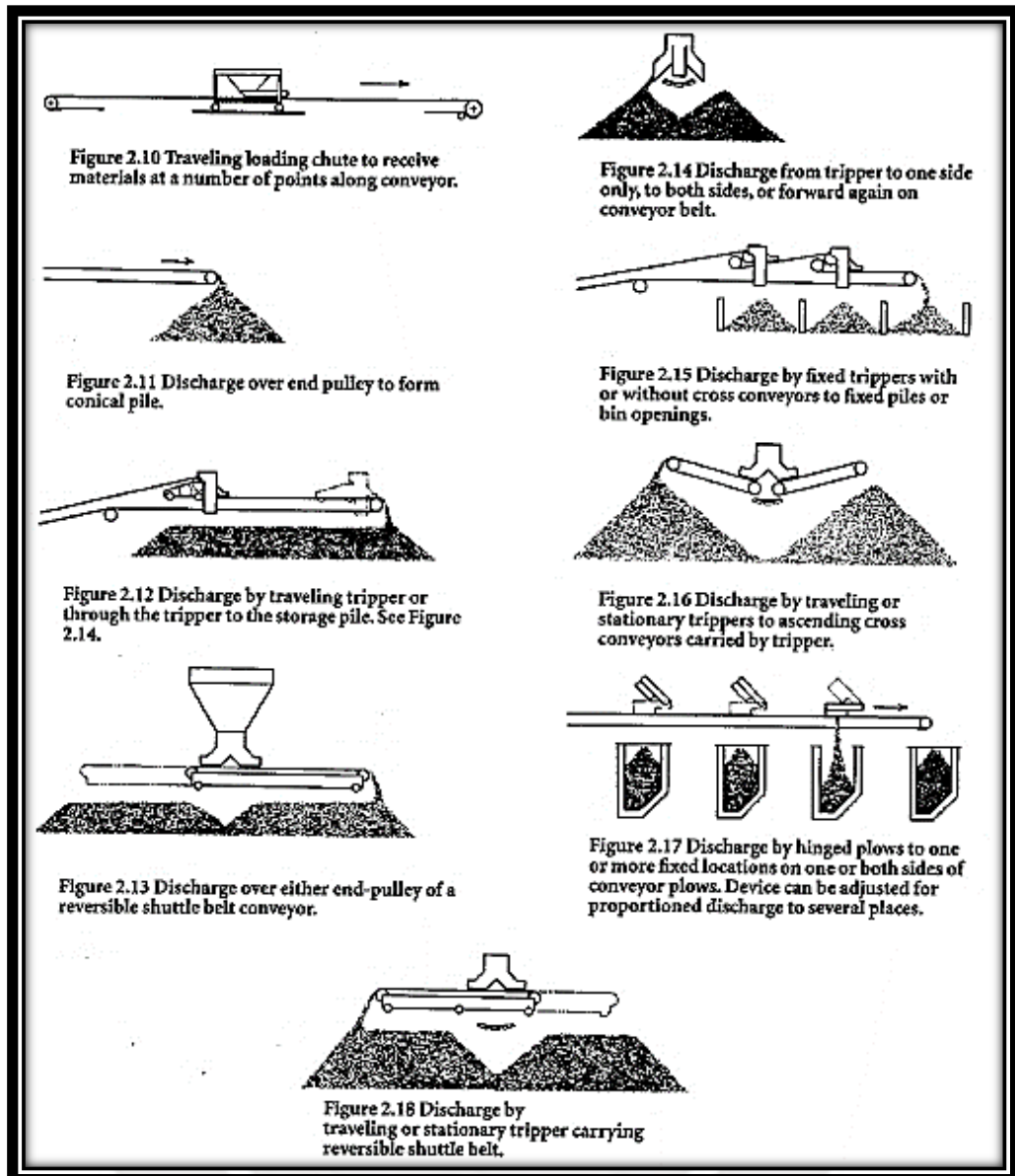


Figura 1. 3. Arreglos para carga y descarga de material

Adaptado de *Belt Conveyors for Bulk Materials*. De Conveyor Equipment Manufacturers Association. (1997)

1.1.3. Las fajas transportadoras en las industrias

Las fajas transportadoras son muy útiles para trasladar grandes cantidades de material en poco tiempo de manera segura y eficiente. Por esta razón, la faja transportadora es utilizada en diversos sectores, como la minería o pesca, donde se necesita un alto índice de productividad (CEMA,1997). Además, estas son económicas y permiten un ahorro considerable de tiempo.

Los sectores en los que mayormente se usan las fajas transportadoras son: el sector minero, sector construcción, sector alimenticio y el sector motriz (Quintana, 2017).

1.1.4. La polea

Como se mencionó líneas arriba, uno de los componentes más importantes de una faja transportadora son las poleas. Al igual que la faja transportadora, las poleas también poseen elementos mecánicos que lo conforman. Estos se pueden apreciar en la Figura 1.4.

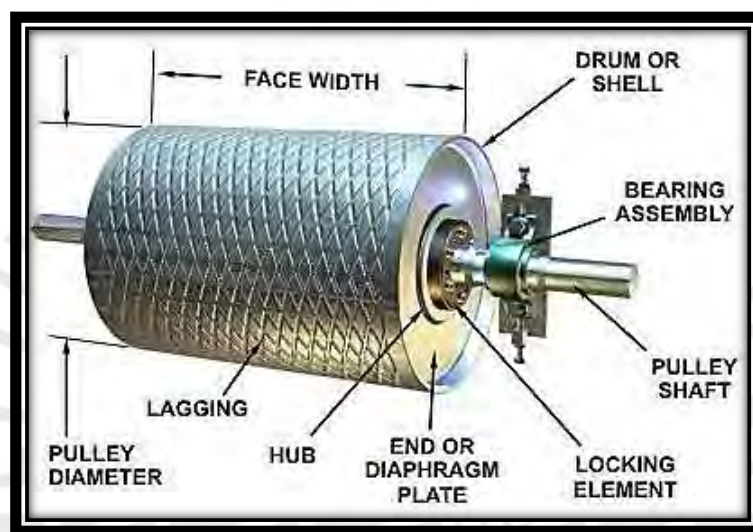


Figura 1. 4. Componentes de una polea

Adaptado de *Evaluación de sensores e instrumentación utilizados en análisis de fallas de maquinaria de transporte en minería*, de Ruiz, R. (2017)

El eje es el elemento de la polea responsable de brindar el movimiento rotacional. Este componente es parte del sistema de transmisión de movimiento entre el motor eléctrico y la polea. Por esta razón, es indispensable que este componente no falle.

Los esfuerzos a los que está sometido el eje son fluctuantes en el tiempo, por lo que el principal modo de falla de este elemento mecánico es por fatiga. Por lo tanto, el diseño y el material con el que está hecho este componente debe ser el adecuado. En la Figura 1.5, se muestran algunos tipos de poleas.



Figura 1. 5. Tipos de poleas para fajas transportadoras

Adaptado de *The Various Surface of Pulley*, de Beijing Qianzhentianzheng Engineering Technology (2022).

1.2. Ejes

Los ejes son elementos mecánicos que son diseñados para sistemas donde se necesita transmitir potencia y torque desde un accionamiento como un motor eléctrico o motor de combustión hacia otras partes del sistema. Estos componentes, generalmente de sección circular, sirven también de soporte para otros componentes mecánicos como engranajes o poleas. Por esta razón, estos soportan esfuerzos flectores generalmente. El eje puede ser de dos tipos: ejes fijos y eje móvil. El eje fijo es un elemento mecánico no giratorio o estático que sirve únicamente como apoyo de piezas rotatorias como ruedas, rodillos, engranajes, entre otros. En cambio, el eje móvil es un elemento rotatorio que es capaz de girar de manera solidaria a los componentes mecánicos que soporta.

Hay que tomar en cuenta que el eje móvil no es capaz de transmitir altas potencias, por lo que no soporta esfuerzo de torsión. Sin embargo, el elemento mecánico que

está diseñado para soportar tanto esfuerzos de flexión como de torsión y, por ende, es capaz de transmitir torque y potencia, se conoce como árbol de transmisión.

El tipo de eje que se usa para las poleas motrices en una faja transportadora es el árbol de transmisión, ya que, como se indicó, se necesitará de potencia y torque para el traslado de la carga. Por ello, este elemento mecánico no puede ser seleccionado independientemente de las cargas que soportan las poleas. De hecho, la capacidad de la carga que se le da a una polea está en función del eje que se instala dentro de la polea (Conveyor Equipment Manufacturers Association, 1997). Por esta razón, el material y el diseño del eje debe ser el adecuado, ya que el eje es el componente que generalmente se fractura cuando se presenta una falla en la polea,

1.2.1. Aceros para ejes

Por lo general, el eje de poleas para fajas transportadoras está hecho de acero aleado. Según Mott (2004), algunos aceros que se usan para la fabricación de ejes son: AISI 1040, AISI 4140, AISI 4340, AISI 5150, AISI 6150 y AISI 8650 (Mott, 2004).

1.2.1.1. Propiedades de los tipos de acero

- AISI 1040

El acero AISI 1040 pertenece a la familia AISI 10XX, los cuales poseen una cantidad de manganeso menor a 1%. La composición química y las propiedades mecánicas de este acero están en las Tablas 1.1 y 1.2 respectivamente.

Tabla 1. 1. *Composicion química del acero AISI 1040*

AISI 1040			
C (%)	Mn (%)	P máx (%)	S máx (%)
0.37 – 0.44	0.60 – 0.90	0.04	0.05

Tabla 1. 2. *Propiedades mecánicas del acero AISI 1040*

Propiedades mecánicas	Valor
Máximo esfuerzo a la tracción	620 MPa
Esfuerzo a la fluencia	415 MPa
Modulo elástico	190-210 GPa
Elongación	25%
Dureza Brinell	201 HB

- **AISI 4140**

Este acero pertenece a la familia AISI 41XX, los cuales son acero al cromo – molibdeno. La composición química y las propiedades mecánicas de este acero están en las Tablas 1.3 y 1.4 respectivamente.

Tabla 1. 3. *Composición química del acero AISI 4140*

AISI 4140							
C (%)	Mn (%)	P máx (%)	S máx (%)	Si (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)
0.38-0.43	0.75-1.00	0.035	0.040	0.15-0.35	-	0.80-1.10	0.15-0.25

Tabla 1. 4. *Propiedades mecánicas del acero AISI 4140*

Propiedades mecánicas	Valor
Máximo esfuerzo a la tracción	655 MPa
Esfuerzo a la fluencia	415 MPa
Modulo elástico	190-210 GPa
Elongación	25.7%
Dureza Brinell	197 HB

- **AISI 4340**

El acero AISI 4340 pertenece a la familia AISI 43XX, los cuales son acero al Níquel – Cromo – Molibdeno. La composición química y las propiedades mecánicas de este acero están en las Tablas 1.5 y 1.6 respectivamente.

Tabla 1. 5. Composición química del acero AISI SAE 4340

AISI 4340							
C (%)	Mn (%)	P máx. (%)	S máx. (%)	Si (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)
0.38- 0.43	0.60- 0.80	0.035	0.040	0.15- 0.35	1.65- 2.00	0.70- 0.90	0.20- 0.30

Tabla 1. 6. Propiedades mecánicas del acero AISI 4340

Propiedades mecánicas	Valor
Máximo esfuerzo a la tracción	745 MPa
Esfuerzo a la fluencia	470 MPa
Modulo elástico	190-210 GPa
Elongación	22%
Dureza Brinell	217 HB

AISI 5150

El acero AISI 5150 pertenece a la familia AISI 51xx, los cuales son acero al Cromo. La composición química y las propiedades mecánicas de este acero están en las Tablas 1.7 y 1.8 respectivamente.

Tabla 1. 7. Composición química del acero AISI 5150

AISI 5150							
C (%)	Mn (%)	P máx. (%)	S máx. (%)	Si (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)
0.48- 0.53	0.70- 0.90	0.035	0.040	0.15- 0.35	-	0.70- 0.90	-

Tabla 1. 8. Propiedades mecánicas del acero AISI 5150

Propiedades mecánicas	Valor
Máximo esfuerzo a la tracción	675 MPa
Esfuerzo a la fluencia	360 MPa
Modulo elástico	190-210 GPa
Elongación	21%
Dureza Brinell	197 HB

- **AISI 6150**

El acero AISI 6150 pertenece a la familia AISI 61xx, los cuales son acero al Cromo – Vanadio. La composición química y las propiedades mecánicas de este acero están en las Tablas 1.9 y 1.10 respectivamente.

Tabla 1. 9. *Composición química del acero AISI 6150*

AISI 6150								
C (%)	Mn (%)	P máx. (%)	S máx. (%)	Si (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)	V mín. (%)
0.48-0.53	0.70-0.90	0.035	0.040	0.15-0.35	-	0.80-1.10	-	0.15

Tabla 1. 10. *Propiedades mecánicas del acero AISI 6150*

Propiedades mecánicas	Valor
Máximo esfuerzo a la tracción	670 MPa
Esfuerzo a la fluencia	415 MPa
Modulo elástico	190-210 GPa
Elongación	23%
Dureza Brinell	197 HB

- **AISI 8650**

El acero AISI 8650 pertenece a la familia AISI 86xx, los cuales son acero al Níquel – Cromo – Molibdeno. La composición química y las propiedades mecánicas de este acero están en las Tablas 1.11 y 1.12 respectivamente.

Tabla 1. 11. *Composición química del acero AISI 8650*

AISI 8650								
C (%)	Mn (%)	P máx. (%)	S máx. (%)	Si (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)	V mín. (%)
0.48-0.53	0.75-1.00	0.035	0.040	0.15-0.35	0.40-0.70	0.40-0.60	0.15-0.25	-

Tabla 1. 12. *Propiedades mecánicas del acero AISI 8650*

Propiedades mecánicas	Valor
Máximo esfuerzo a la tracción	715 MPa
Esfuerzo a la fluencia	385 MPa
Modulo elástico	190-210 GPa
Elongación	22.5%
Dureza Brinell	212 HB

1.2.1.2. Tratamientos térmicos de los aceros

Los tratamientos térmicos son una combinación de procedimientos que consisten en calentar y enfriar por intervalos de tiempos determinados un metal o aleación en el estado sólido con la finalidad de obtener algunas propiedades deseadas de dicho material. Para este proyecto, se limitará a describir los tratamientos térmicos más conocidos para los aceros.

Para poder entender tanto los cambios en la microestructura de los aceros como los cambios en sus propiedades mecánicas, es necesario saber que microconstituyentes presentan los aceros.

- **Microconstituyentes principales de los aceros**

Según Prabhudev (1988), las propiedades mecánicas que tiene un acero dependen principalmente de su microestructura y, además, esta puede ser cambiada mediante tratamientos térmicos para obtener propiedades mecánicas deseables.

Como se sabe, el acero es una aleación de hierro y carbono (hasta 2%), de los cuales, el carbono es el que se encarga principalmente de controlar las propiedades mecánicas del acero.

El carbono se puede presentar en la microestructura disuelta, en su forma elemental como grafito o formando carburo de hierro (Fe_3C , también llamado cementita). El diagrama que presenta los cambios de fases que ocurren durante un lento calentamiento o enfriamiento del acero y, además, está relacionado al contenido de carbono se llama “Diagrama de fase de hierro-carbono”. En la Figura 1.6, se muestra las fases con sus respectivos cambios para aceros hipoeutectoides (menos de 0.77% de C), mientras que en la Figura 1.7 se muestra las fases con sus respectivos cambios para acero hipereutectoides (0.8% a 2% de C)

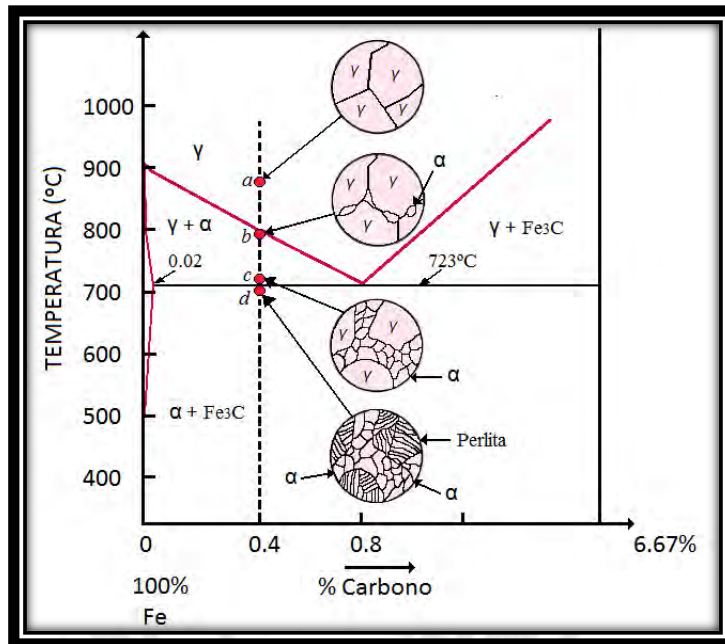


Figura 1. 6. Diagrama de fase de Fe-C para un acero hipoeutectoide de 0.4%C

Adaptado de *Handbook of Heat Treatment of Steels*, de Prabhudev (1988).

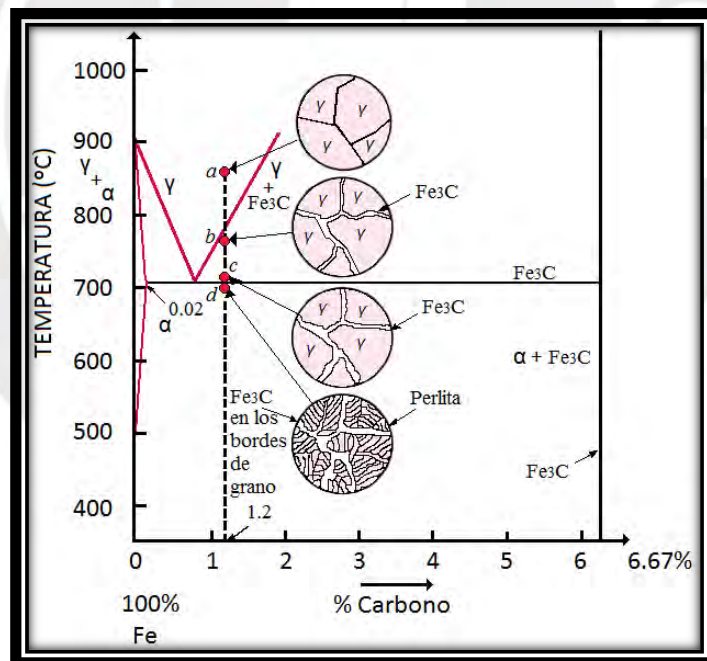


Figura 1. 7. Diagrama de fase de Fe-C para un acero hipereutectoide de 1.2%C

Adaptado de *Handbook of Heat Treatment of Steels*, de Prabhudev (1988).

En las Figuras 1.6 y 1.7, se puede observar 4 microconstituyentes que se mencionarán a continuación.

- **Austenita (γ)**

La austenita es un microconstituyente que no se presenta a temperatura ambiente generalmente. Es poco magnética, blanda, dúctil, tenaz y es el constituyente más denso de los aceros.

- **Ferrita (α)**

Es la fase más blanca y dúctil que se puede encontrar en el acero.

- **Cementita (Fe_3C)**

La cementita es extremadamente frágil y duro, por lo que posee alta resistencia a la compresión

- **Perlita (P)**

Es un microconstituyente que está compuesto por láminas de ferrita y cementita

Se puede observar en las Figuras 1.6 y 1.7 que todos los aceros poseen una microestructura netamente austenítica a elevadas temperatura y, dependiendo de la cantidad de carbono en la composición, la austenita se puede convertir en una microestructura que contiene ferrita (α) y perlita (P) para el caso de acero hipoeutectoides, o cementita (Fe_3C) y perlita (P) para el caso de aceros hipereutectoides. Cabe resaltar que para los aceros eutectoides (acero de 0.8% de C), la microestructura consta de solo perlita.

En las Figuras 1.8 y 1.9, se muestra algunos ejemplos de microestructuras para acero hipoeutectoides y para aceros hipereutectoides respectivamente. Cabe mencionar que el calentado o enfriamiento debe ser lento para obtener estas microestructuras.

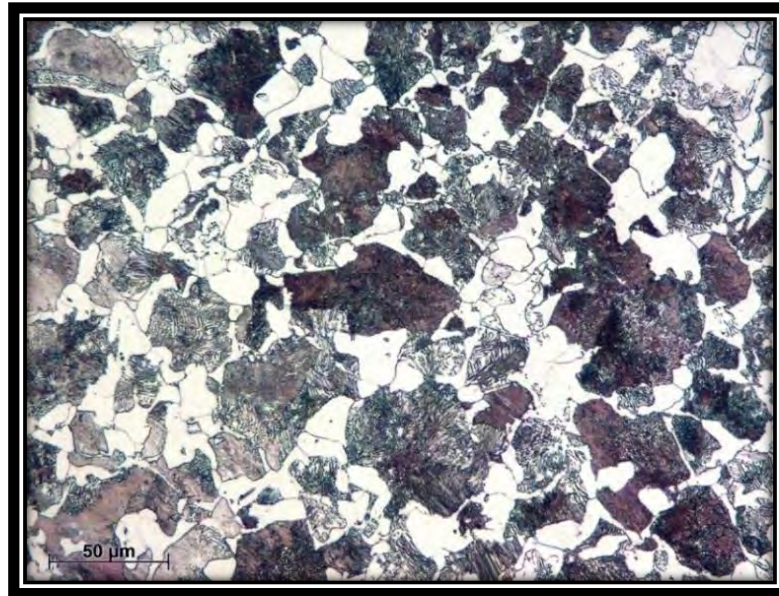


Figura 1. 8. *Microestructura de aceros hipoeutectoides*

Adaptado de *Atlas Metalográfico como Recurso Didáctico en el Aprendizaje de Microestructuras de Aleaciones de Interés Tecnológico*, de Arrabal et al. (2016). Nota. En la figura 1.8 se muestra la microestructura de un acero de 0.35% C. Las áreas negras representan a la perlita y las áreas blancas representan a la ferrita.



Figura 1. 9. *Microestructura de aceros hipereutectoides*

Adaptado de *Atlas Metalográfico como Recurso Didáctico en el Aprendizaje de Microestructuras de Aleaciones de Interés Tecnológico*, de Arrabal et al. (2016). Nota. En la figura 1.9 se muestra la microestructura de un acero de 1.3% C. las áreas negras representan a la perlita y las áreas blancas representan a la cementita.

Ahora que se conoce la microestructura de los aceros en condiciones de calentamiento y enfriamiento lento, se pasará a describir los tratamientos térmicos más comunes que se utilizan para mejorar las propiedades mecánicas, los cuales son: el recocido, el bainitizado, el temple y el revenido.

- **Recocido**

El recocido es un tratamiento térmico que consiste en calentar el acero a una temperatura determinada (no necesariamente hasta el rango de temperatura de austenitización), mantenerlo un determinado tiempo para que se de las transformaciones microestructurales o se alivie tensiones residuales, y enfriarlo lentamente (generalmente dentro del horno) para obtener una microestructura más estable, reducir la dureza o aumentar la ductilidad.

El recocido tiene diferentes formas, de las cuales las más conocidas son: recocido por difusión, recocido de ablandamiento, recocido completo, y recocido de alivio de tensiones y recristalización.

- **Recocido por difusión**

La finalidad del recocido por difusión es eliminar las heterogeneidades que se crean debido a la composición química del acero. En particular, se trata de eliminar las heterogeneidades por segregación (distribución no uniforme de los elementos químicos) que aparecen durante la cristalización de las aleaciones.

Estas heterogeneidades causan diferencia de microdurezas en el material. Por ello, cuando se utiliza este tratamiento, la dureza global del acero disminuye, ya que se eliminan las regiones segregadas que poseen alta dureza. De esta manera, se obtiene una dureza promedio mejor distribuida.

Por lo general, este tipo de recocido se realiza en el rango de la formación de la austenita a una temperatura de 1100 °C a 1300 °C (Totten, 2006)

- **Recocido de ablandamiento**

El recocido de ablandamiento es un tratamiento térmico utilizado para ablandar y aumentar la ductilidad del acero. Por lo general, este tratamiento se utiliza para generar una microestructura de perlita globular. Sin embargo,

puede haber casos donde haya un ablandamiento del acero, pero no haya un cambio en la microestructura.

La microestructura de perlita globular, también conocida como esferoidita, es blanda y se puede deformar fácilmente para procesos en frío como estirado, conformado, laminado en frío, entre otros. Cabe mencionar que esta microestructura de perlita globular favorece a aceros con una concentración de carbono mayor a 0.5%. Sin embargo, también se puede utilizar para aceros de bajo carbono, aunque no es lo común, ya que el acero se vuelve demasiado suave.

La esferoidización, que es el nombre del proceso mediante el cual se obtiene la perlita globular o esferoidita, consiste en cambiar la morfología de la cementita (Fe_3C), que se encuentra en la perlita, en partículas esferoidales. Este cambio morfológico reduce significativamente la dureza y mejora mucho la maquinabilidad del acero. Cabe mencionar que este tipo de recocido se utiliza generalmente en aceros de alto carbono. En la Figura 1.10, se puede observar la microestructura de esferoidita.

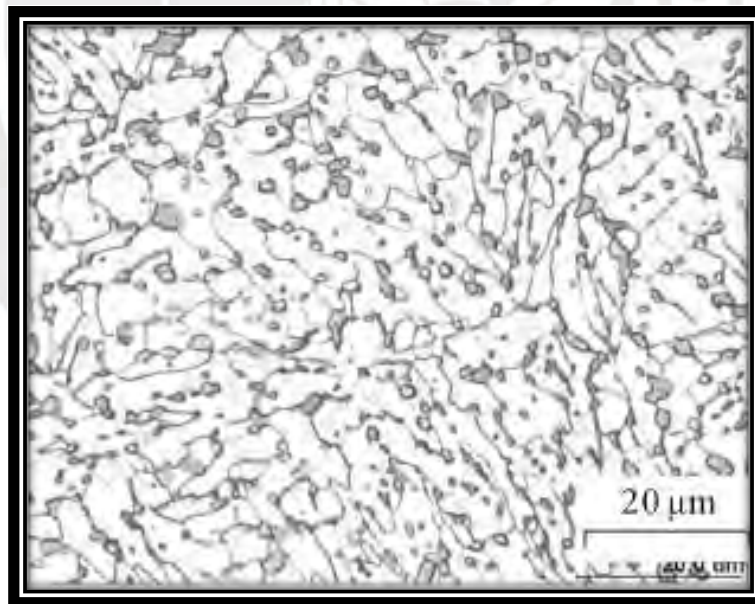


Figura 1. 10. *Microestructura de esferoidita con partículas de Fe_3C de forma globular en una matriz ferrítica*

Adaptado de *Recrystallization of ferrite in spheroidite of Fe-0.67%C Steel*, de Matusiewicz et al. (2010)

- **Recocido completo**

El recocido completo es un tratamiento térmico cuyo objetivo es obtener una microestructura de equilibrio y uniforme, reducir la dureza, mejorar la ductilidad y eliminar las tensiones internas.

Este tratamiento térmico consiste en austenizar completamente el acero y luego controlar la transformación de la austenita mediante enfriamientos lentos (generalmente dentro del horno) para la formación de una microestructura ferrito-perlítica. Por lo general, la perlita de la microestructura que se obtiene es gruesa.

El normalizado podría considerarse como una variante del recocido completo en un sentido amplio, ya que también implica austenización y transformación controlada a una microestructura ferrito-perlítica. Sin embargo, este se diferencia en la forma de enfriamiento, la cual se realiza al aire libre generalmente.

El proceso de normalizado consiste en obtener una microestructura con granos de perlita fina, la cual es más dura que la perlita gruesa. De esta manera, se logra que el acero tenga una mayor dureza y resistencia. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que la ductilidad puede disminuir. Cabe recalcar que, si la temperatura de calentamiento es mucho mayor que la temperatura de austenización, el grano puede volverse demasiado grueso. Y un tiempo de mantenimiento excesivamente prolongado puede producir el mismo efecto (Totten, 2006). Por lo tanto, el objetivo del normalizado es justamente aumentar la dureza y resistencia del acero, manteniendo cierta ductilidad aceptable.

- **Recocido de alivio de tensiones**

Existen acumulaciones de dislocaciones y distorsiones en la red cristalina que surgen debido a procesos de deformación en frío, los cuales pueden dar lugar a aparición de tensiones residuales. Por lo general, estas tensiones son muy altas y afectan negativamente en las propiedades mecánicas del acero. Dicho cambio puede corregirse mediante un calentamiento posterior. Cabe recalcar que cuanto mayor sea el grado de deformación, menor deberá ser la temperatura de calentamiento.

- **Bainitizado o austemplado**

El bainitizado es un tratamiento que se emplea para producir bainita, lo cual involucra austenitizar un acero y, luego, mantenerlo a determinadas temperaturas para transformar la austenita en bainita, la cual es una mezcla de ferrita y Fe_3C como la perlita. La diferencia de estos está en el mecanismo de transformación, la distribución de las fases y, lo más importante, las propiedades mecánicas. La bainita es más duro, más tenaz, pero mala en resistencia a la fátiga. Hay dos morfologías de bainita, las cuales se conocen como bainita superior (upper bainite) y bainita inferior (lower bainite). En las Figuras 1.11 y 1.12, se pueden observar las microestructuras de la bainita superior e inferior, respectivamente,

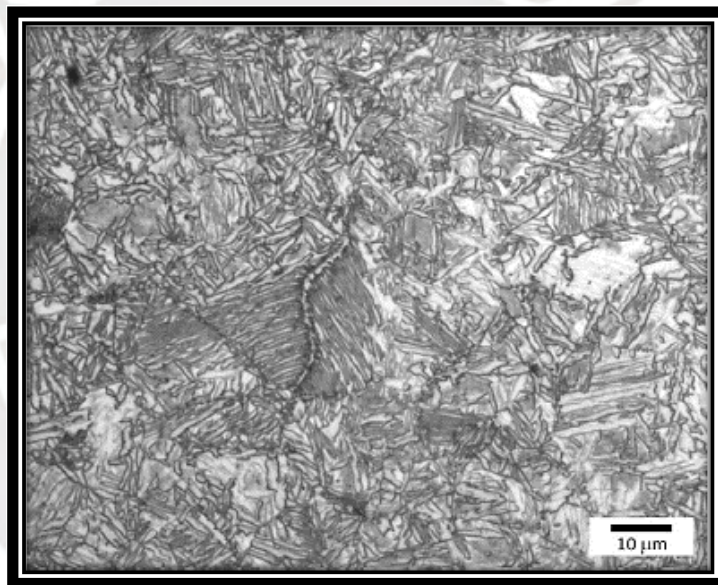


Figura 1. 11. *Bainita superior*

Adaptado de *Solidification and Solid-State Transformations of Metals and Alloys*, de Pero-Sanz et al. (2017)

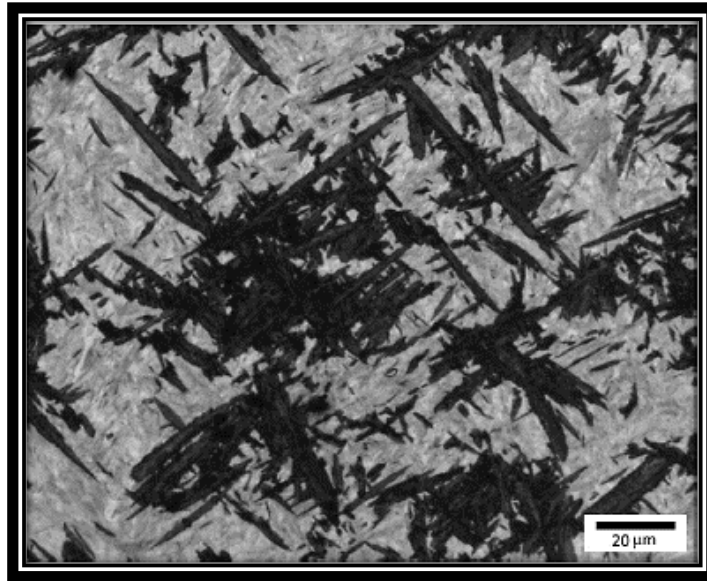


Figura 1. 12. *Bainita inferior*

Adaptado de *Solidification and Solid-State Transformations of Metals and Alloys*, de Pero-Sanz et al. (2017)

- **Temple**

El temple es un tratamiento térmico que consiste en enfriar desde el rango de temperatura de la solución sólida (austenita) a una velocidad tal que se suprimen las transformaciones en los intervalos de perlita y bainita, formándose martensita. En este estado, los aceros se caracterizan por tener la más alta dureza; sin embargo, también son frágiles.

En el temple, se puede distinguir dos tipos: el temple normal (para aceros de alto y medio carbono) y el temple tras un tratamiento químico (para aceros de bajo carbono)

- **Temple normal**

El temple normal es el tratamiento térmico por el cual un acero es austenizado y luego enfriado rápidamente para obtener martensita en la microestructura. En general, el medio de enfriamiento puede ser agua, aceite o aire. En la Figura 1.13, se muestra un ejemplo de la martensita obtenida de un temple.

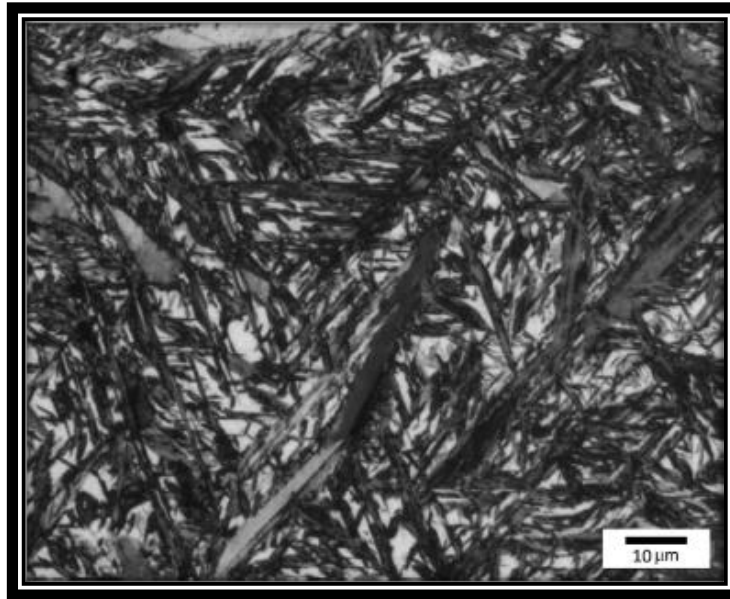


Figura 1. 13. Martensita

Adaptado de *Solidification and Solid-State Transformations of Metals and Alloys*, de Pero-Sanz et al. (2017)

En la práctica, muchos aceros aleados se someten a un temple escalonado para que la caída de temperatura sea menor y, en consecuencia, las tensiones causadas por el temple sean menores.

Por otro lado, entre los principales riesgos que tiene este tratamiento térmico se encuentra el exceso de mantenimiento a altas temperaturas y el sobrecalentamiento. Estos riesgos pueden causar defectos en el acero como agrandamiento de las agujas de martensita y fracturas de grano grueso. Esto provoca que el material sea altamente frágil y que se formen grietas en los límites de grano y, por ende, tenga baja resistencia a la fatiga (Totten, 2006)

- **Temple termoquímico**

Los principales tratamientos termoquímicos que se realizan para su posterior temple son la carburización, el cianurado y la carbonitruración. Por lo general, estos procesos se utilizan en aceros de bajo carbono (hasta 0.25%)

La carburización está asociada con la saturación del acero con carbono. Este se disuelve rápidamente en el hierro por el mecanismo intersticial y son capaces de difundirse rápidamente hasta una profundidad considerable. Esto

se logra mediante la carburización gaseosa en la que el acero se calienta en una atmósfera generada a partir de gas natural (que contiene predominantemente CH₄) o a partir de hidrocarburos líquidos (querosene, gasolina, etc).

Este tratamiento tiene como objetivo enriquecer la capa superficial en carbono y alcanzar el endurecimiento requerido mediante un posterior temple. Con este tratamiento, se logra un endurecimiento en la superficie del acero, mientras que en el interior permanece más blando. Esto favorece en las propiedades mecánicas del acero, ya que se logra mayor dureza y resistencia al impacto. Además, se logra un mayor volumen específico en la superficie que la del núcleo, lo que genera considerables tensiones de compresión en la capa y, por consiguiente, aumenta la resistencia a la fatiga (Totten, 2006).

El cianurado consiste en la saturación de la superficie del acero con carbono y nitrógeno en un baño de sales que contiene cianuro. La relación carbono–nitrógeno en la capa de difusión se controla mediante el cambio de composición del medio y la temperatura del tratamiento. Este proceso tiene como ventaja un menor tiempo de proceso y una mejor resistencia al desgaste y a la corrosión en comparación con la carburización (debido a la presencia del nitrógeno en la superficie)

La carbonitruración es similar al cianurado, pero se realiza mediante atmósferas gaseosas controladas.

- **Revenido**

El revenido es un tratamiento térmico que se aplica en un acero después de haber sido templado con el objetivo de reducir la fragilidad de la martensita y, por ende, mejorar la tenacidad manteniendo una buena parte de la dureza.

La microestructura que se obtiene se le conoce como martensita revenida, la cual es más oscura que la martensita normal. La distribución más dispersa de carburos y las propiedades más favorables se obtienen con dicha microestructura.

1.3. Fallos comunes en ejes

Según American Society for Metals (1986), los ejes pueden estar sometidos a una variedad de esfuerzos como: tracción, torsión, compresión, flexión o una combinación de dichos esfuerzos. Estos esfuerzos pueden ser estáticos o dinámicos, los cuales

dependen del tipo de aplicación para el que se necesita el eje. En su mayoría, los ejes son utilizados para la transmisión de movimiento y potencia. Por esta razón, los esfuerzos que soportan la mayoría de ejes son dinámicos y no estáticos, lo que nos lleva a la causa más común de falla en los ejes: la fatiga.

La fatiga viene a ser un tipo de falla debido a la aplicación de esfuerzos fluctuantes en el tiempo, a pesar de que dichos esfuerzos están por debajo de los esfuerzos máximos o de fluencia del material. Por lo general, este tipo de falla inicia por los puntos más vulnerables: los concentradores de esfuerzos (ASM, 1986).

En el caso de los ejes, los concentradores de esfuerzos son puntos donde se presenta discontinuidades, las cuales pueden ser debido al diseño, a la fabricación o al material.

- **Concentradores de esfuerzo debido al diseño**

Los concentradores de esfuerzo debido al diseño incluyen: cambios de sección, ranuras, canales chaveteros, agujeros para lubricación, entre otros.

- **Concentradores de esfuerzo debido a la fabricación**

Los concentradores de esfuerzo debido a la fabricación incluyen: grietas debido a un mal tratamiento térmico (quenching cracks), huellas de mecanizado, defectos por soldadura, imperfecciones en la superficie, imperfecciones internas, entre otros.

- **Concentradores de esfuerzo debido al material**

Los concentradores de esfuerzo debido al material incluyen: inclusiones no metálicas, fases indeseadas, entre otros.

Cabe resaltar que el ajuste que hay entre un eje y otros componentes, como los rodamientos, se consideran también un concentrador de esfuerzos. Dichos concentradores de esfuerzo reducen considerablemente la resistencia a la fatiga. En la Figura 1.14, se muestra un ejemplo de falla de un eje, la cual se localiza en un canal chavetero. Además, se puede observar que hay un cambio de sección

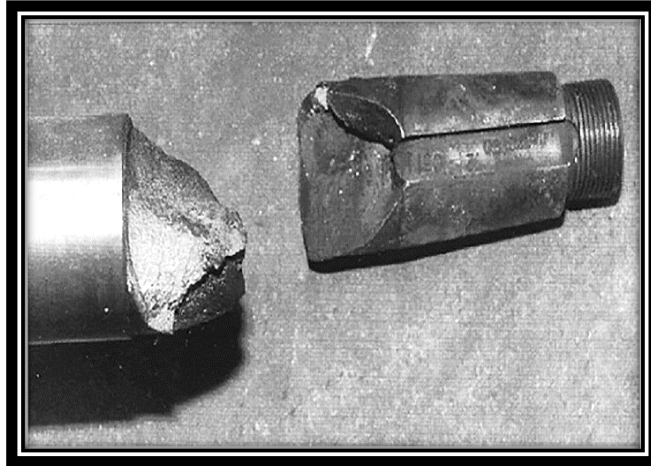


Figura 1. 14. Eje fracturado de un alternador para trenes

Adaptado de *Failure analysis and design optimization of alternator shaft used in rail coaches*, de Anoop, 2020.

Otro caso común de falla en los ejes, pero con menor ocurrencia que la falla por fatiga, es la fallas por mala elección del material. Esto incluye: materiales con baja resistencia a la fragilización por hidrógeno, materiales fragilizados por un inadecuado tratamiento térmico, materiales con diferente composición química, materiales con diferentes propiedades mecánicas para una aplicación determinada, entre otros (ASM, 1986).

Finalmente, otro caso común de falla en ejes que es importante considerar es la falla por desalineamiento de los rodamientos, el cual es debido a un inadecuado ensamblaje o a la desviación de ciertos componentes durante el servicio.

1.4. Análisis de falla

El análisis de falla es un procedimiento mediante el cual se determina la causa de una falla con la finalidad de que esta no se vuelva a repetir. Según Fosca (2021), el análisis de falla (FA) se limita a investigar la causa únicamente física que llevó a un componente a fallar. Sin embargo, el análisis de la causa raíz de la falla (RCFA) abarca un área más amplia. En el RCFA, se determina las razones físicas, humanas y latentes que hayan provocado una falla. Para este documento, se limitará a realizar un análisis de falla, por lo que se centrará únicamente en explicar los procedimientos necesarios que permitan determinar la razón física de una falla.

Para realizar un análisis de falla (FA), se utilizará el procedimiento detallado en la Figura 1.15.

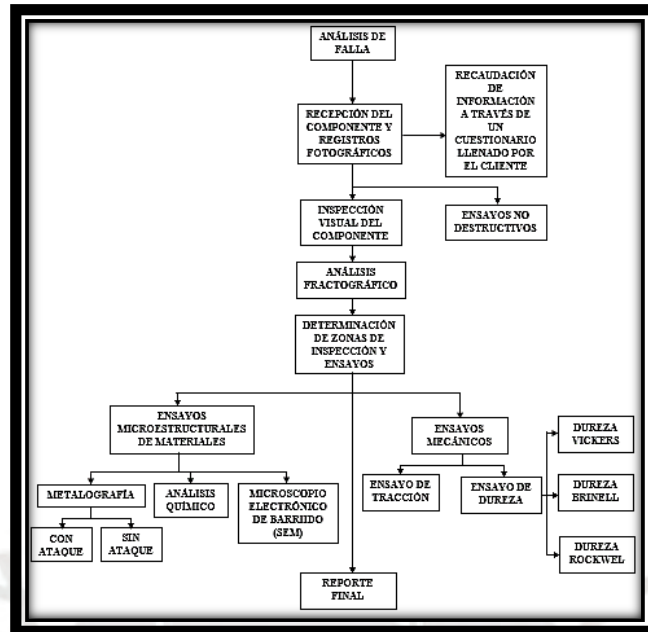


Figura 1. 15. Metodología para el análisis de falla utilizada en el laboratorio de materiales de la PUCP

Adaptado de *Determinación mediante la realización del análisis de falla de las causas más comunes de falla en ejes de equipos industriales*, de Díaz, 2017.

Como se puede observar en la Figura 1.15, los procedimientos van desde la recepción del componente hasta la realización de un informe final. Cabe recalcar que, para cada procedimiento, se utilizará las normas ASTM para que los resultados sean lo más preciso posible.

1.5. Análisis fractográfico

La fractografía es considerada una ciencia que tiene como finalidad analizar las superficies de fracturas de componentes fracturado, los cuales incluyen componentes metálicos y no metálicos. La finalidad de analizar la morfología de las superficies de fractura es descubrir cual fue el mecanismo de falla y el modo de propagación de la fractura; así como, determinar las posibles causas de la falla (Díaz, 2017).

El procedimiento para realizar una fractografía se divide en 2: macro-fractografía y micro-fractografía. La macrofractografía se puede realizar a ojo desnudo o con un

estereoscopio, mientras que la micro-fractografía se realiza con un microscopio electrónico de barrido (SEM).

Generalmente, la fractografía determina el mecanismo de fractura de un componente, las cuales son: fractura dúctil, fractura frágil y fractura por fatiga.

1.5.1. Fractura dúctil

La superficie de fractura por mecanismo de falla dúctil a nivel macro se caracteriza por tener una apariencia fibrosa, grisácea y se presentan deformaciones plásticas apreciables en la superficie. Además, la superficie de fractura puede ser plana o inclinada respecto a la dirección de aplicación de los esfuerzos máximos. En la Figura 1.16, se muestra un ejemplo de fractura dúctil.

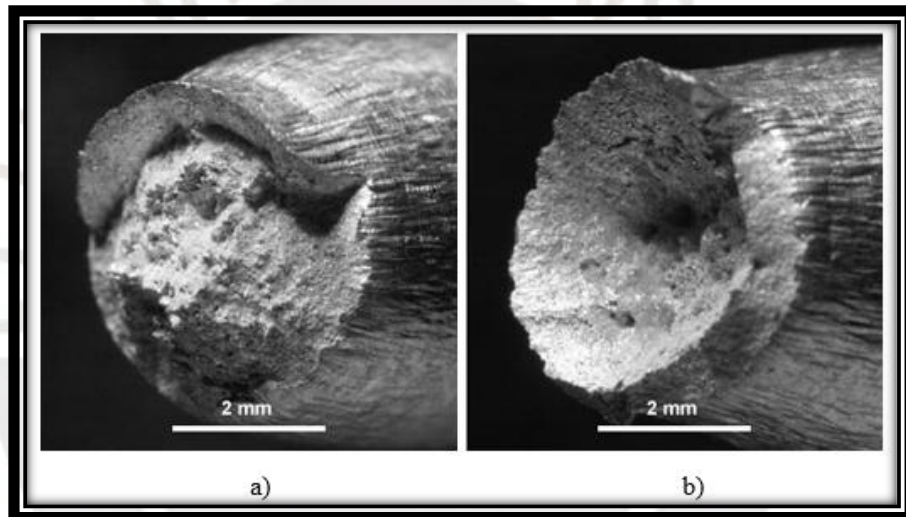


Figura 1. 16. Superficie de fractura dúctil

Adaptado de *Modos de fractura*, de Fosca, 2021.

A nivel micro, la superficie presenta micro-depresiones que son resultados de la coalescencia de microcavidades, las cuales son denominadas “dimples” u hoyuelos (Fosca, 2021). En la Figura 1.17, se muestra un ejemplo de fractura dúctil a nivel microscópico

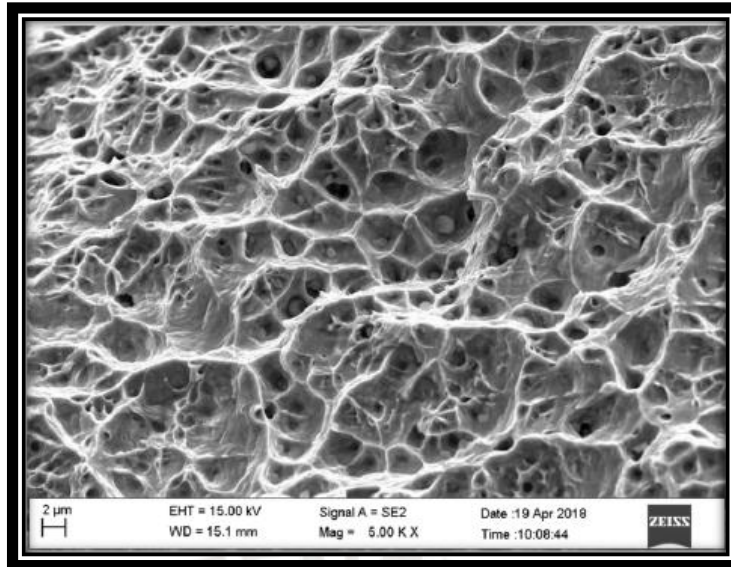


Figura 1. 17. *Fractura dúctil*

Adaptado de *Mecanismo de fractura dúctil*, de Fosca, 2021.

1.5.2. Fractura frágil

La superficie de fractura por mecanismo de falla frágil a nivel macro posee una apariencia granular, brillante y sin apreciables deformaciones plásticas. En la Figura 1.18, se muestra un ejemplo de fractura frágil.

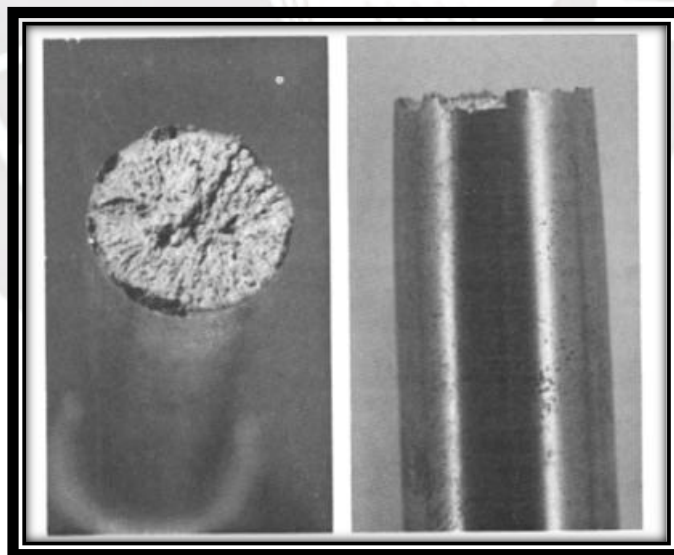


Figura 1. 18. Ejemplo de superficie de fractura frágil

Adaptado de *Mecanismo de fractura frágil*, de Fosca, 2021.

Por lo general, en las superficies de fractura frágil hay marcas que pueden ser fácilmente identificables, de las cuales las más conocidas son las crestas

radiales y las marcas Chevrón. Estas marcas brindan la información necesaria para determinar el origen de la falla. En la Figura 1.19 y 1.20, se pueden observar ejemplos de superficie donde se presenta dichas marcas.

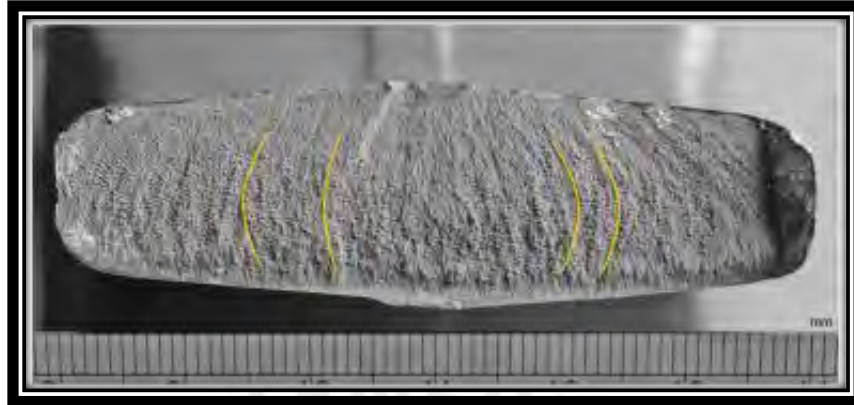


Figura 1. 19. Crestas radiales

Adaptado de *The Welding Engineer's Guide to Fracture and Fatigue*, de Moore et al, 2015.

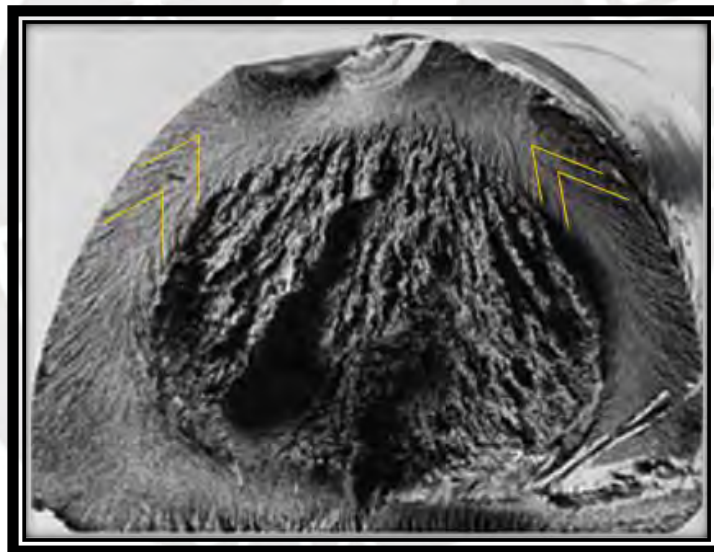


Figura 1. 20. Marcas Chevron

Adaptado de *Fatigue and Corrosion in Metals*, de Milella, 2013.

A nivel micro, se puede determinar dos tipos de fractura frágil: clivaje e intergranular. La fractura frágil por clivaje se caracteriza por la propagación de las fisuras a lo largo de planos cristalográficos, mientras que la fractura frágil intergranular se caracteriza por la propagación de las fisuras por el límite de grano (Fosca, 2021). En la figura 1.21, se muestra un ejemplo de fractura frágil

por clivaje (imagen izquierda) y fractura frágil intergranular (imagen derecha). Adicionalmente, en la fractura frágil por clivaje se pueden observar las conocidas marcas de río, las cuales aparecen cuando varios planos de clivaje se van uniendo durante la propagación de la grieta y forman patrones parecido a ríos que confluyen. En la Figura 1.22, se puede observar un ejemplo de dichas marcas.

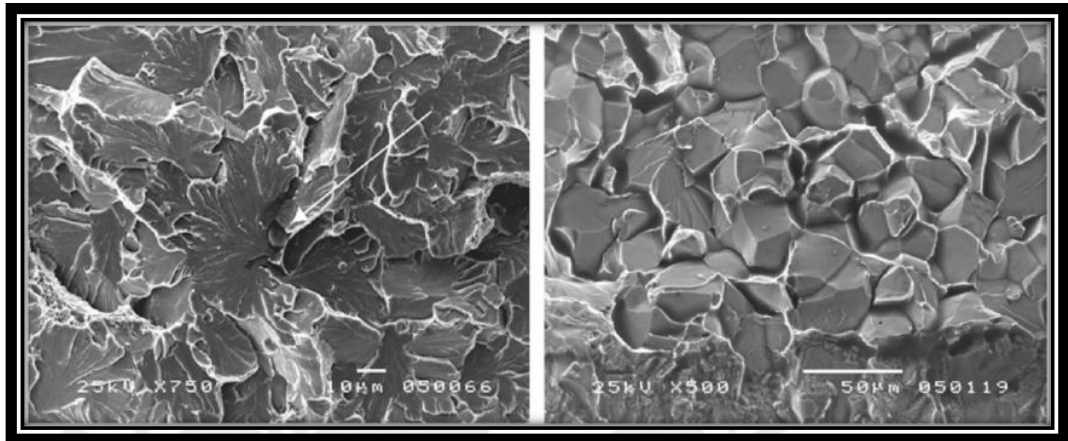


Figura 1. 21. Fractura frágil por clivaje y fractura frágil intergranular

Adaptado de *Mecanismo de fractura frágil*, de Fosca, 2021.

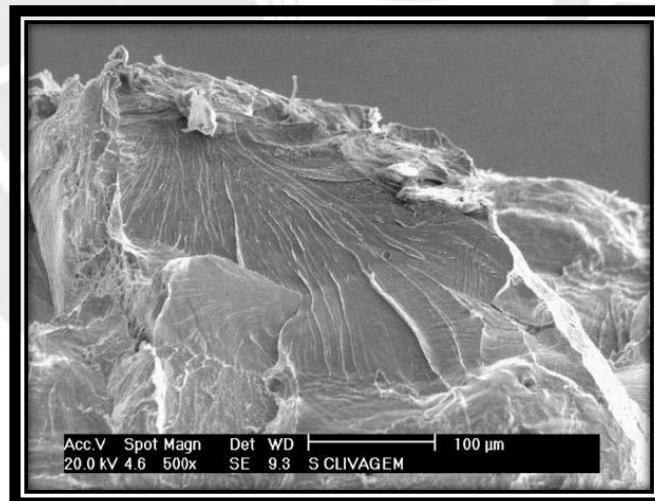


Figura 1. 22. Marcas de río

Adaptado de *Embrittlement of electrical steel laminations by nitrogen pick-up during heat treatment*, de Gomes et al, 2009

1.5.3. Fractura por fatiga

La superficie de fractura por mecanismo de falla por fatiga presenta dos zonas bien marcadas generalmente. La primera zona tiene una apariencia lisa debido al rozamiento entre las superficies abiertas mientras se propagan las fisuras. En esta zona, se encuentran las famosas “Marcas de playa” que son característicos de este mecanismo de falla, las cuales brindan información acerca del inicio de falla y de la velocidad de rotación de dicho componente. Además, también se pueden encontrar las marcas “Ratchet”, las cuales indican el inicio de fractura. La segunda zona, la cual se considera como la zona de rotura final frágil, se forma cuando el área resistente se reduce a tal punto que ya no es capaz de soportar las cargas, y da lugar a la fractura final (Díaz, 2017). Esta zona puede tener una apariencia de fractura dúctil o frágil, lo cual va a depender del material, de las condiciones de carga y del ambiente. En la Figura 1.23, se muestra un ejemplo de superficie de fractura por fatiga donde se pueden observar las marcas de playa (beach marks) y los múltiples inicios de falla (marcas Ratchet).

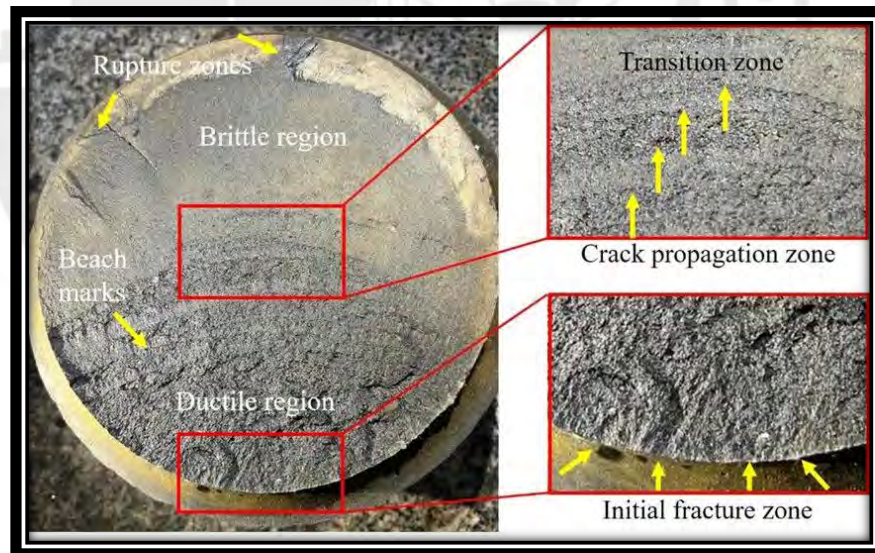


Figura 1. 23. Ejemplo de superficie de fractura por fatiga en un eje AISI 1040 sometido a flexión rotativa

Adaptado de *Metallurgical and Mechanical Examination of Fatigue-Induced Fracture in a Conveyor Drum Shaft*, de Fosca, 2021.

Estas dos zonas conjuntamente brindan información acerca del grado de concentración de tensiones y las cargas a las que fue sometido un componente durante el tiempo de servicio hasta su fractura. En las Figuras 1.25, 1.26, 1.27 y 1.28, se muestran esquemas del manual ASM donde se puede apreciar dicha información para superficies fracturadas debido al mecanismo de falla por fatiga. Las áreas blancas representan la zona lisa donde se encuentra las marcas de playa y el área gris representa la zona de fractura final.

A nivel micro, las cargas oscilantes provocan una acumulación de dislocaciones en la superficie, lo cual resulta en una superficie estriada que se puede observar en la Figura 1.24. Cabe resaltar que cada estría representa un ciclo de carga, lo cual brinda información acerca del modo de operación del componente (Fosca, 2021).

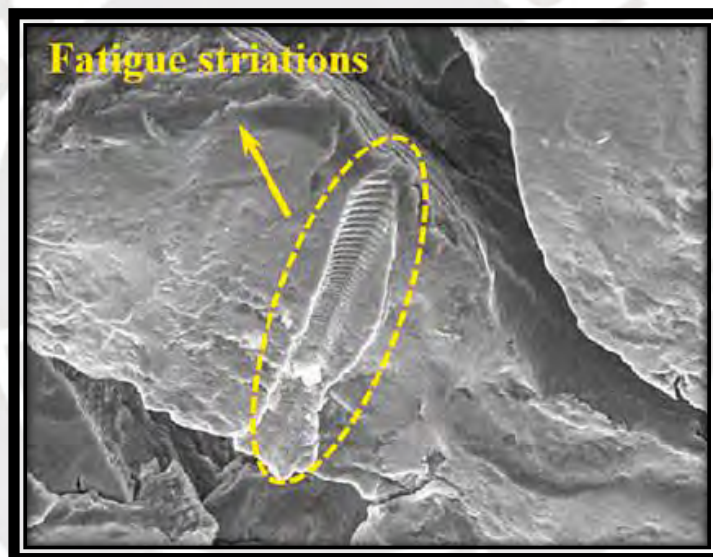


Figura 1. 24. Ejemplo de estrías en un eje fallido de bomba de agua

Adaptado de *Failure analysis and structural fatigue resistance design of multistage centrifugal pump shaft*, de Hua, 2023.

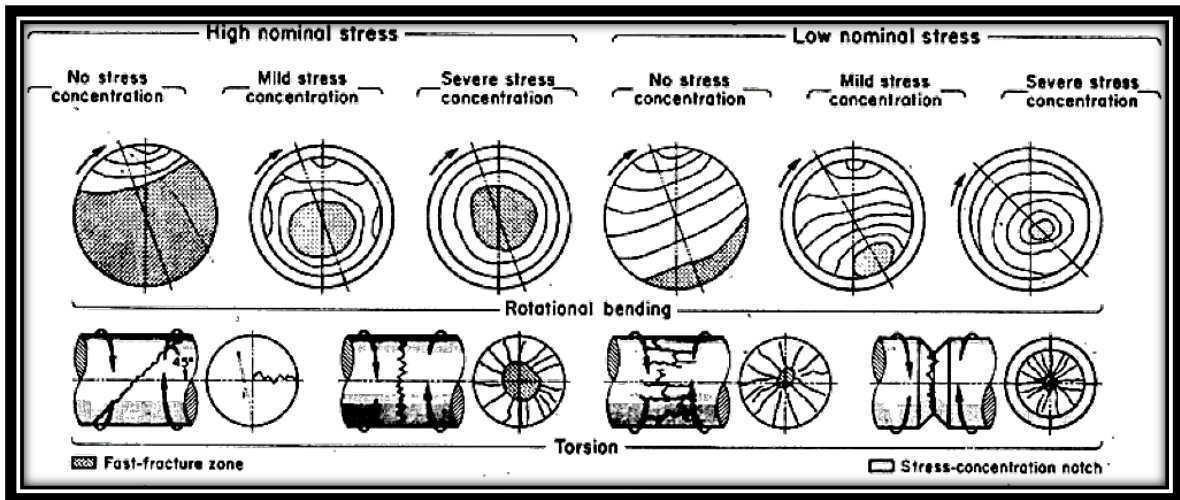


Figura 1. 25. Morfología de la fractura para cargas de flexión y torsión rotativa en ejes
 Adaptado de *Failure analysis and prevention*, de ASM, 2002.

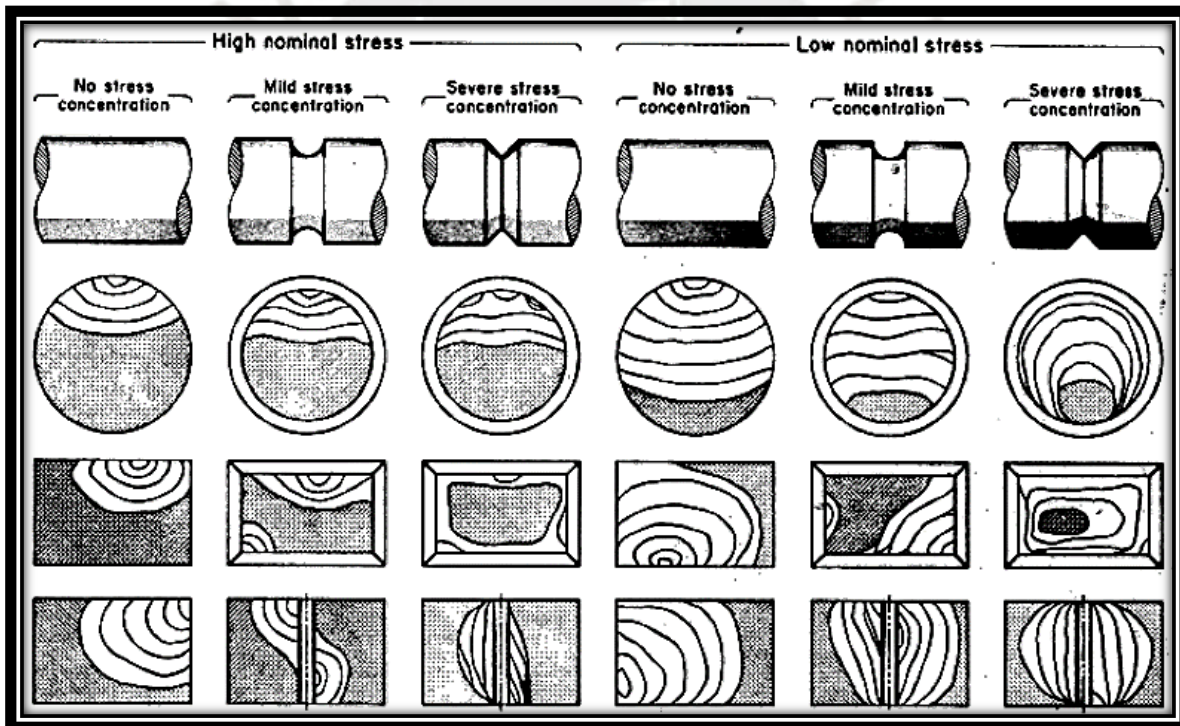


Figura 1. 26. Morfología de la fractura para cargas de tracción-tracción o tracción-compresión
 Adaptado de *Failure analysis and prevention*, de ASM, 2002.

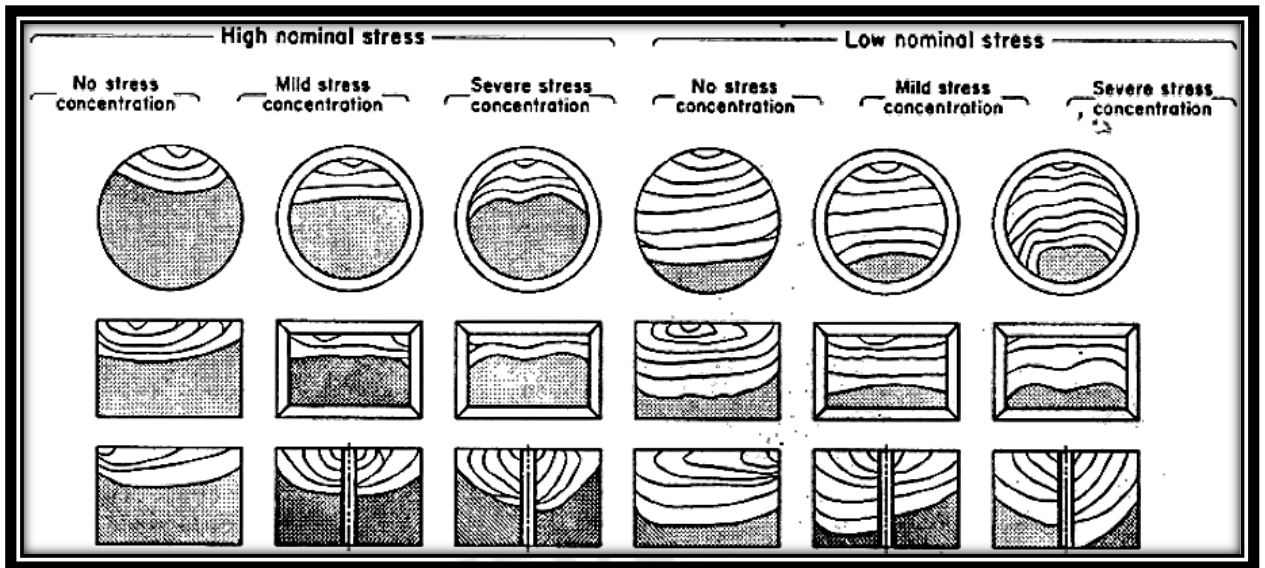


Figura 1. 27. Morfología de la fractura para cargas de flexión unidireccional

Adaptado de *Failure analysis and prevention*, de ASM, 2002.

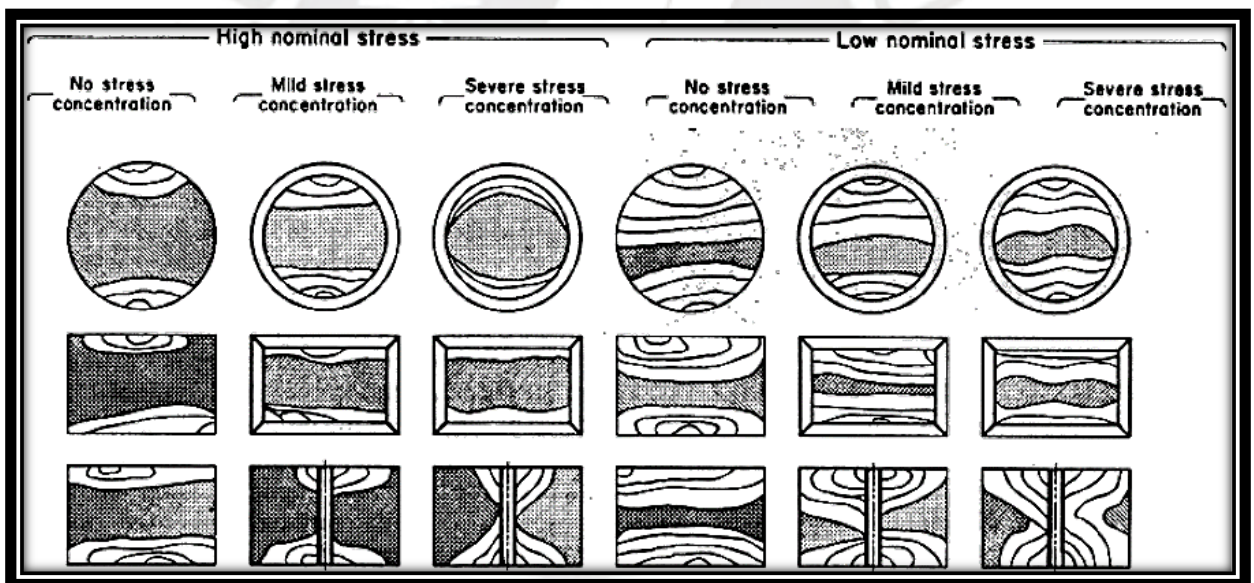


Figura 1. 28. Morfología de la fractura para cargas de flexión bidireccional

Adaptado de *Failure analysis and prevention*, de ASM, 2002.

CAPÍTULO 2

METODOS EXPERIMENTALES

2.1. Caracterización del material

Para este capítulo, se consideró los siguientes ensayos: ensayo de tracción, ensayo de impacto, ensayo de dureza, análisis químico y análisis metalográfico. Se describirá cada ensayo, así como el procedimiento que se seguirá bajo las normas ASTM correspondientes.

La parte del eje que se seleccionó mediante la inspección visual para fabricar las probetas y realizar los estudios correspondientes es la que se muestra en la Figura 2.32.

2.1.1. Ensayo de tracción

- **Descripción**

El ensayo de tracción es un procedimiento que provee de información acerca de la resistencia y la ductilidad de un material bajo esfuerzos de tensión uniaxiales. Esta información es útil para poder comparar materiales, observar el desenvolvimiento de las aleaciones, controlar la calidad y diseñar teniendo en cuenta necesidades específicas (ASTM International, 2021).

El ensayo de tracción consiste en aplicar un esfuerzo axial en aumento a una probeta hasta que este se fracture. La velocidad con la que se ensaya la probeta debe ser baja para tener resultados satisfactorios.

- **Objetivo**

Como se mencionó líneas arriba, el objetivo de realizar un ensayo de tracción es medir la resistencia y la ductilidad de un material mediante una probeta.

Los datos que se obtienen al realizar un ensayo de tracción son los siguientes: el esfuerzo a la fluencia, el máximo esfuerzo a la tracción, la ductilidad y el módulo de Young. De todos estos datos, solo nos enfocaremos en los 3 primeros, los cuales son los más importantes para este caso. Además, la forma de ruptura de la probeta nos da una idea de la dureza del material.

Por lo general, se obtiene un gráfico de “esfuerzo vs elongación” donde se puede obtener los datos ya mencionados. En las Figuras 2.1 y 2.2, se muestran ejemplos de gráficos que se pueden obtener de los aceros. En la Figura 2.1, el gráfico

corresponde a un acero con comportamiento dúctil (punto de fluencia observable – Yield stress), mientras que en la figura 2.2, se muestra un acero con comportamiento frágil (punto de fluencia no observable – Yield stress)

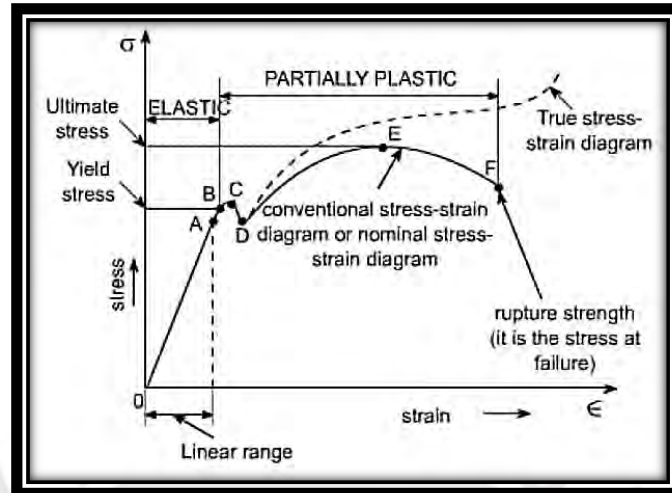


Figura 2. 1. Ejemplo de gráfico “esfuerzo vs deformación” de un material dúctil

Adaptado de *Stress-strain diagram for uniaxial loading of ductile and brittle materials*, de Thorat (2016), <https://learnmech.com/stress-strain-diagram-for-ductile-brittle-materials/>

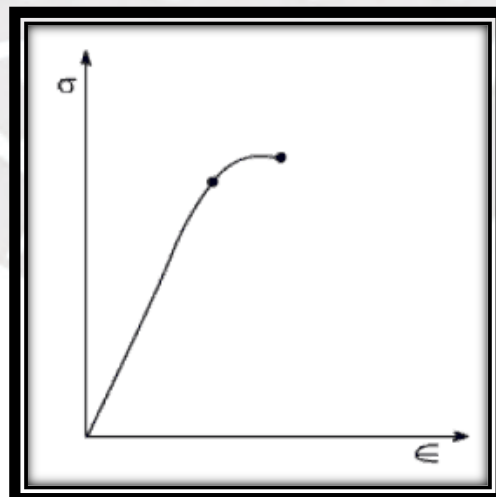


Figura 2. 2. Ejemplo de gráfico “esfuerzo vs deformación” de un material frágil

Adaptado de *Stress-strain diagram for uniaxial loading of ductile and brittle materials*, de Thorat (2016), <https://learnmech.com/stress-strain-diagram-for-ductile-brittle-materials/>

- **Probeta**

Las muestras que se someten al ensayo de tracción son probetas cuyas formas y dimensiones están estandarizadas según la norma ASTM E8, así como el procedimiento para hacer el ensayo. Cabe decir que los resultados de estas muestras que se sacan de una determinada porción de una pieza podrían no representar totalmente la resistencia y la ductilidad de esta (ASTM International, 2021). Sin embargo, estos métodos de ensayo son satisfactorios y aceptados en el ámbito comercial.

Como en este caso se tiene que sacar una probeta de un eje de acero, la muestra que se usa es de sección circular como se muestra en la Figura 2.3. En esta imagen se muestra dimensiones de muestra donde la longitud de referencia (Gauge length) es 4 veces el diámetro de la probeta

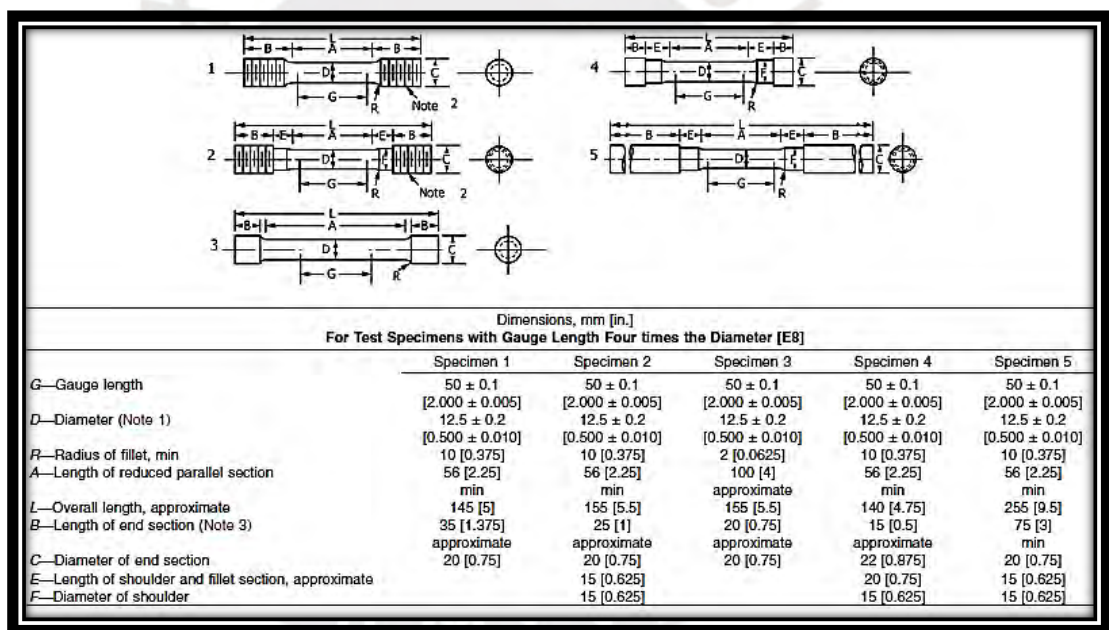


Figura 2. 3. Probeta redonda estandarizada según norma ASTM E8

Adaptado de *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. De ASTM International.

Como se puede observar en la figura 2.3, hay 5 especímenes que se podrían utilizar. Para esta ocasión, se utilizará el espécimen 2, ya que las mordazas que se utilizarán para sujetar la pieza en la máquina de ensayo poseen roscas. Además,

esta forma de sujeción ayuda a que la pieza se fracture en la sección reducida, tal como se desea. En la figura 2.4. se muestra un dibujo dimensionado de la probeta

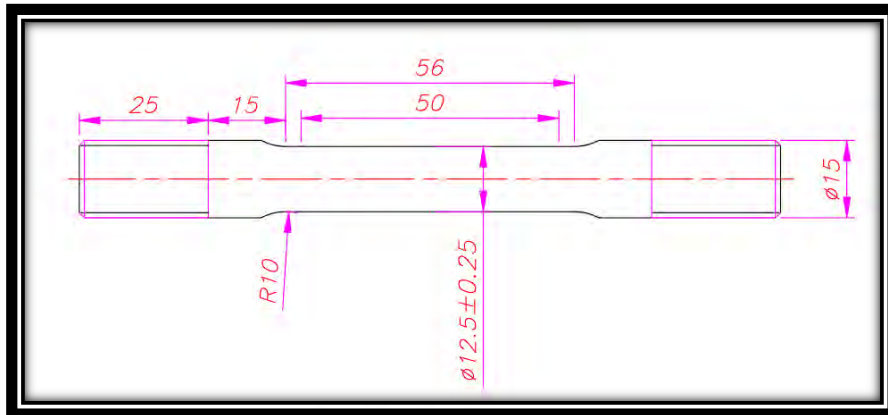


Figura 2. 4. Dibujo dimensionado de la probeta

- **Procedimiento**

Primero, se fabricó la probeta en el área de manufactura. Dicha muestra, se muestra en la Figura 2.5.



Figura 2. 5. Probeta utilizada para el ensayo de tracción

Segundo, se le colocaron los elementos de sujeción a la probeta. Y, posteriormente, se colocó en la máquina de ensayo para tracción electromecánica Zwick/Roell modelo Z250 (capacidad de hasta 250 kN), la cual se muestra en la Figura 2.6.

Para determinar las propiedades de fluencia del material como el límite de fluencia, deformación del límite de fluencia y el límite elástico (valores característicos que relacionan el cambio del comportamiento del material de elástico a plástico), la norma ASTM E8 sugiere 3 métodos de control.

- El primer método es el método de velocidad de tensión (método A), la cual se basa en el aumento del esfuerzo de tracción durante la carga. Este aumento de esfuerzo debe estar en el rango de 1.15 y 11.5 MPa/s (10.000 y 100.000 psi/min) durante la parte elástica lineal del ensayo (ASTM International, 2021).
- El segundo método es el método de control de la velocidad de deformación (método B), el cual se basa en controlar la tasa de deformación de la probeta durante la carga. La norma establece que la velocidad de deformación sea de 0.015 ± 0.006 in/in/min o mm/mm/min. Este método requiere de un extensómetro y es el que más se recomienda para materiales metálicos, ya que tener un control sobre la velocidad de deformación aumenta la precisión de los resultados. Los materiales metálicos, como los aceros, dependen en gran medida de la velocidad de deformación para obtener sus valores característicos como el esfuerzo de fluencia (ASTM International, 2021).
- El tercer método es el método de velocidad del travesaño (método C), el cual se basa en el control de la velocidad constante del travesaño. En este método, la velocidad del travesaño se ajusta para que la velocidad de deformación de la probeta sea de $0,015 \pm 0,003$ in/in/min o mm/mm/min. Este método se emplea cuando no hay una constante deformación del material (ASTM International, 2021).

Por lo tanto, como se requiere obtener las propiedades de fluencia de un acero, se utilizará el método B en esta ocasión.

Finalmente, se realizó el ensayo de tracción en la probeta. En la Figura 2.7, se muestra la probeta fracturada.



Figura 2. 6. *Máquina de ensayo para tracción electromecánica Zwick/Roell modelo Z250*



Figura 2. 7. *Probeta fracturada del ensayo de tracción*

- **Criterio de aceptación**

Se espera que los resultados del ensayo de tracción (resistencia a la fluencia, resistencia máxima a la tracción y la elongación) cumplan con los requisitos de las propiedades de los aceros aleados del capítulo 1. Por lo tanto, se espera una

resistencia a la fluencia de entre 360 MPa y 470 MPa, una resistencia máxima de entre 620 MPa y 745 MPa, y una elongación de entre 21% y 25%.

2.1.2. Ensayo de impacto

- **Descripción**

El ensayo de impacto consiste en romper una probeta con muesca o entalla mediante un martillo pendular. Este ensayo brinda información del comportamiento de un material (acero para nuestro caso) cuando este está sujeto a una carga que resulta en esfuerzos multiaxiales. Estos esfuerzos están relacionados a la entalla, cargas altas y, en algunos casos, altas o bajas temperaturas (ASTM International, 2022).

Existen 2 tipos de ensayos de impacto según la norma ASTM E23, las cuales son: el ensayo de impacto según método Charpy y el ensayo de impacto según método Izod. La diferencia de ambos ensayos radica en la forma de sujeción de la probeta. En el ensayo de impacto según método Charpy, la probeta se sujeta en posición horizontal desde los extremos de la probeta y el martillo del péndulo golpea en la probeta en el mismo nivel que la entalla. En el ensayo de impacto según Izod, la probeta se sujeta en posición vertical desde uno de los extremos de la probeta donde la entalla está al mismo nivel de la sujeción. En la Figura 2.8, se muestra el ensayo de impacto por método Charpy y, en la Figura 2.9, se muestra el ensayo de impacto por método Izod.

- **Objetivo**

El ensayo de impacto tiene como objetivo determinar la energía de impacto y la resistencia al impacto de un metal para poder analizar la fragilidad de este. En otras palabras, mide la energía absorbida por la probeta hasta su rotura debido al impacto.

Para el presente trabajo, se utilizará el ensayo de impacto por método Charpy.

- **Probeta**

Las dimensiones y la forma de la probeta que se utiliza para el ensayo de impacto según método Charpy se muestran en la Figura 2.10 según la norma ASTM E23. Como se puede observar en esta figura, hay dos tipos de entalla o muesca: entalla tipo V y tipo U.

Para esta ocasión, se utilizó una probeta con entalla tipo V. En la Figura 2.11, se muestra un dibujo dimensionado de la probeta.

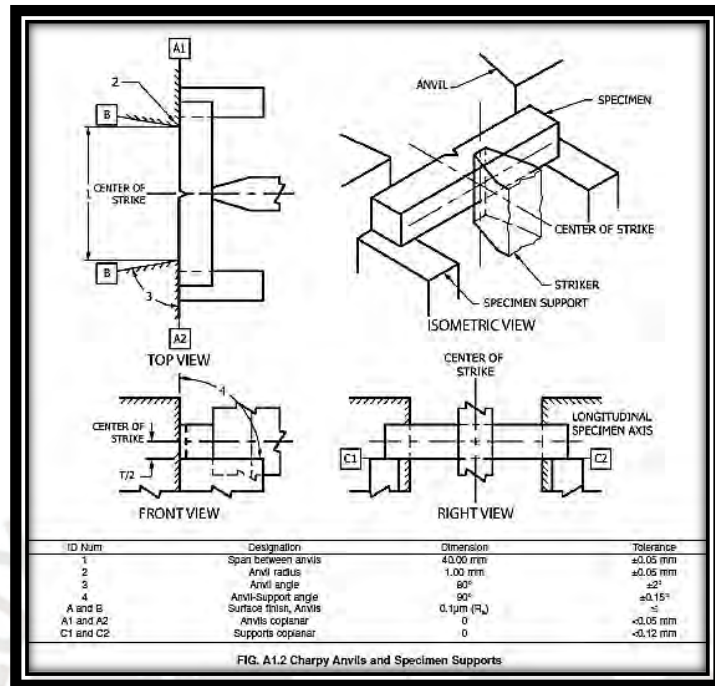


Figura 2. 8. Ensayo de impacto según método Charpy

Adaptado de *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials* de ASTM International (2022).

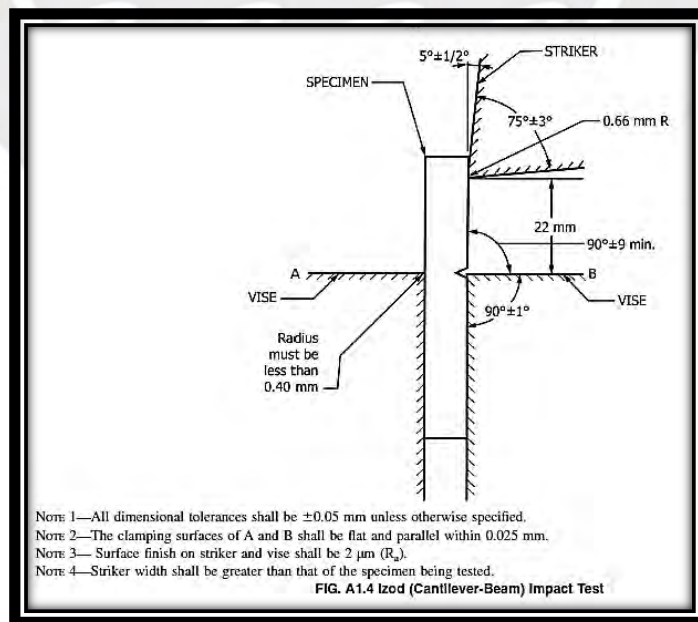


Figura 2. 9. Ensayo de impacto por método Izod

Adaptado de *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials* de ASTM International (2022).

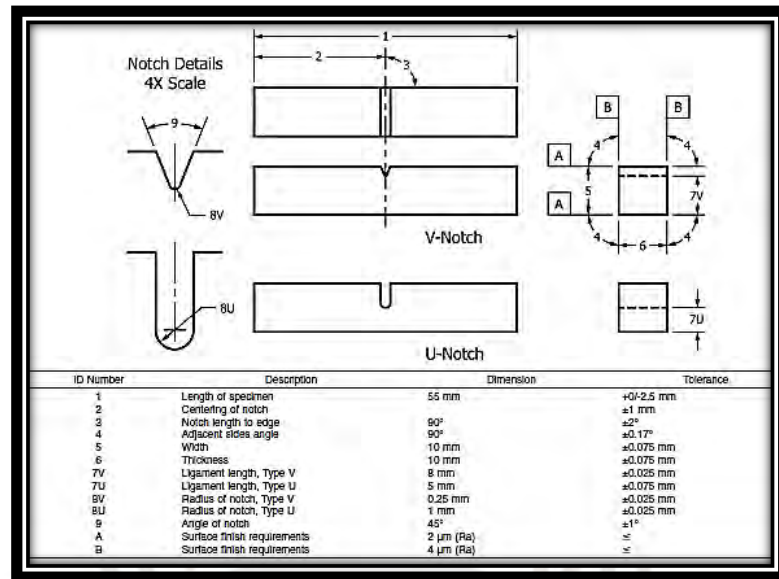


Figura 2. 10. *Probeta para el ensayo de impacto según método Charpy*

Adaptado de *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials* de ASTM International (2022).

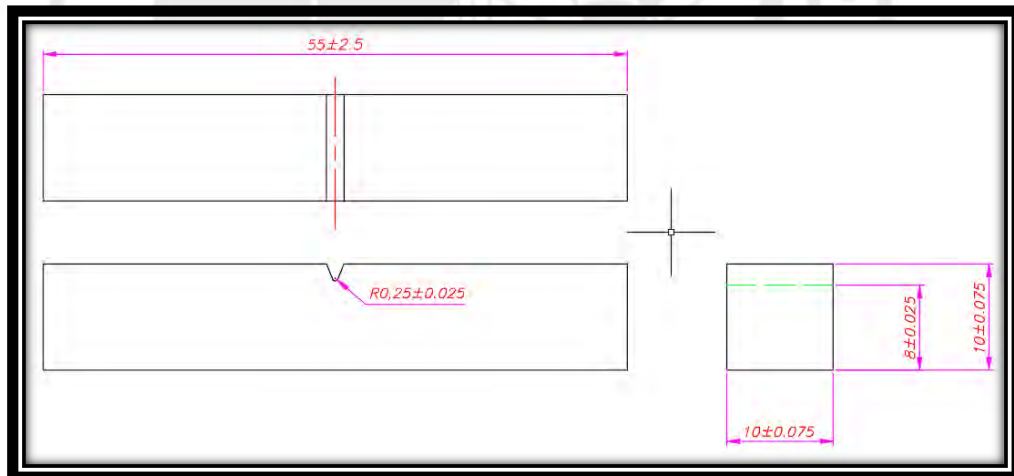


Figura 2. 11. *Dibujo dimensionado de la probeta*

- **Procedimiento**

Primero, se fabricaron 3 probetas en el laboratorio de manufactura y se colocaron en la máquina de ensayo para impacto según método Charpy de la marca Zwick/Roell modelo RKP450 con una capacidad de hasta 450J, la cual se muestra

en la Figura 2.12. Para determinar la energía que una probeta absorbió en el ensayo de impacto, se realizan cálculos geométricos con los datos que se obtienen del ensayo y que se muestran en la Figura 2.13. En dicha figura, se observa la altura (h) y el ángulo (β) en la que se deja caer el péndulo, así como la altura y el ángulo de alcance del péndulo después del impacto. Estos cálculos los realizan la computadora, por lo que no es necesario hacerlas a mano.

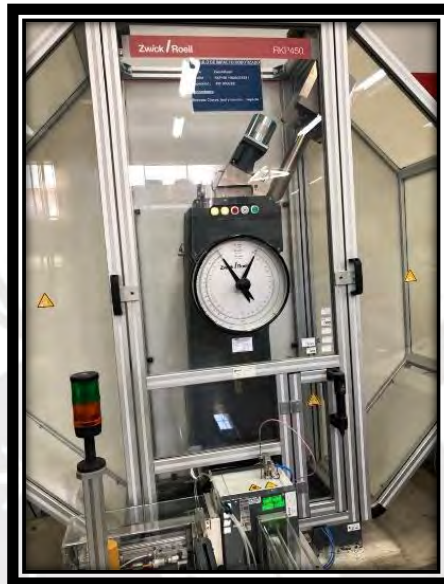


Figura 2. 12. Máquina para ensayo de impacto Zwick/Roell modelo RKP450

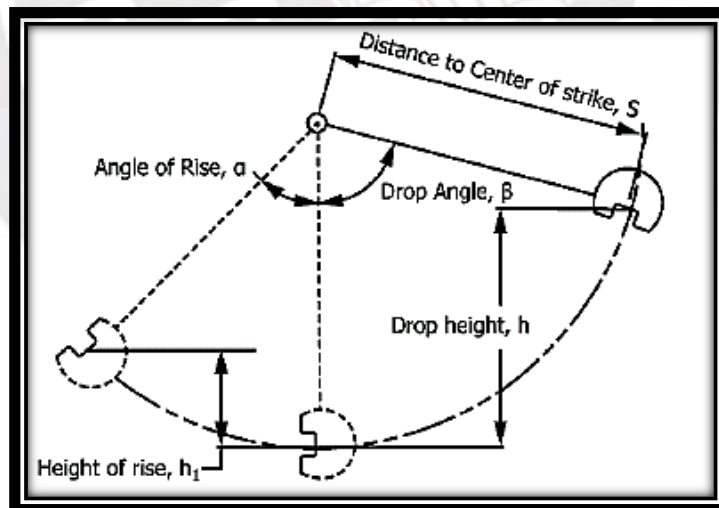


Figura 2. 13. Dimensiones para los cálculos

Adaptado de *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials* de ASTM International (2022).

Finalmente, se impactó cada probeta con el martillo tipo péndulo y se fracturaron. En la Figura 2.14, se muestran las 3 probetas fracturada.

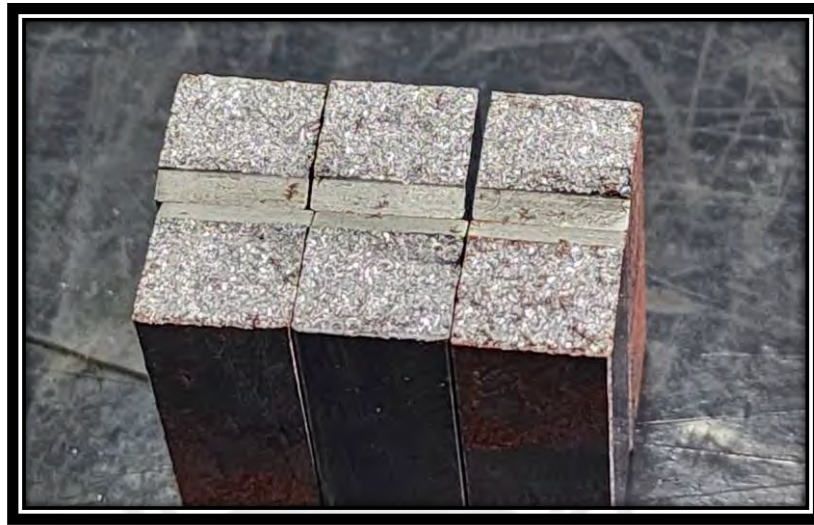


Figura 2. 14. *Probetas fracturadas en el ensayo de impacto*

- **Criterio de aceptación**

Se espera una energía promedio de 27 J y una energía mínima individual de 20J para cada probeta.

2.1.3. Ensayo de dureza

- **Descripción**

El ensayo de dureza es un procedimiento para determinar la resistencia de un material a ser deformado permanentemente por otro que es más duro.

Los cuatro ensayos de dureza más comunes son: el ensayo de dureza Rockwell (norma ASTM E18), el ensayo de dureza Brinell (norma ASTM E10), el ensayo de dureza Vickers (norma ASTM E384) y el ensayo de dureza Knoop (norma ASTM E384). Para nuestro proyecto, se usará el ensayo de dureza Brinell y Vickers.

El ensayo de dureza Brinell es un método utilizado para determinar la dureza de materiales metálicos midiendo la resistencia a la penetración de un indentador esférico (normalmente de carburo de tungsteno) bajo una carga determinada (de 1kgf a 3000 kgf según la norma). El diámetro del indentador puede ser de 10, 5, 2.5 o 1mm.

El ensayo de dureza Vickers consiste en el uso de un indentador que se compone de una pirámide de diamante con base cuadrada y ángulo de 136° como se observa en la Figura 2.15. El indentador aplica una fuerza relativamente pequeña (a partir de 1gf a 1000 gf según norma) a la superficie de la probeta usando una máquina especial y se mantiene por un tiempo.

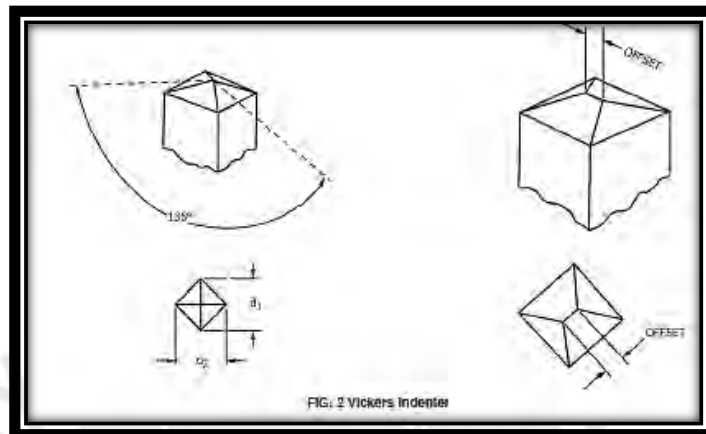


Figura 2. 15. Indentador Vickers

Adaptado de *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*, de ASTM International (2022).

El ensayo Vickers es un ensayo de microindentación, por ello, las indentaciones son medidas usando un microscopio con luz. Además, la superficie de la muestra a ensayar tiene que estar pulida y limpia para poder tener más precisión al momento de medir la microindentación.

- **Objetivo**

El ensayo de dureza tiene como objetivo analizar las propiedades de un material como la ductilidad y la resistencia al desgaste. Además, también puede determinar si el material o el tratamiento térmico aplicado a uno es adecuado para una determinada necesidad.

La dureza que se mide en el ensayo Vickers está en HV (dureza Vickers). Sin embargo, la unidad más común para medir la dureza es HB (dureza Brinell).

- **Probeta**

La probeta en el ensayo de dureza no tiene una forma ni dimensiones en específico. Sin embargo, la superficie donde se va a realizar las microindentaciones debe ser plana. Además, la superficie debe estar pulida y libre de algún tipo de daño. En las Figuras 2.16 y 2.17, se muestran las probetas que se mecanizaron para el ensayo. La probeta de la figura 2.16 se utilizó para medir la dureza general del eje (dureza Brinell), mientras que la probeta de la Figura 2.17 se utilizó para medir la penetración de la dureza (dureza Vickers).

La probeta tiene esta forma para poder medir la dureza a lo largo de la sección transversal del eje desde la superficie hasta el centro. Esto nos permitirá darnos una idea del tratamiento térmico que se utilizó para mecanizar el eje, ya que este está relacionado a la penetración de la dureza desde la superficie.



Figura 2. 16. *Probeta para el ensayo de dureza Brinell*



Figura 2. 17. *Probeta para el ensayo de dureza Vickers*

- **Procedimiento**

En primer lugar, se realizó un ensayo de dureza Brinell para tener una idea de la dureza general del eje. Para ello, se utilizó la probeta que se muestra en la Figura 2.16 y un durómetro Brinell marca Foundrax modelo Brin 200 M, el cual se muestra en la Figura 2.18. Se realizaron 4 indentaciones en el radio intermedio del eje tal como se muestra en la Figura 2.16. Cabe recalcar que primero se realizó una limpieza de la superficie antes de realizar el ensayo para obtener resultados más precisos.

Antes de realizar el ensayo de dureza Vickers, se realizó un desbaste en la superficie de la probeta con un esmeril de mano de la marca Bosch modelo GWS 17-125 CIE y un disco de lámina lijadora de la marca Pferd Polifan modelo PFF 115 A 40 SG-COOL. En la Figura 2.19, se muestra el procedimiento de desbaste. Luego, se realizó un pulido de la superficie con la ayuda de un taladro de la marca Bosch modelo GSB 13 RE y lijas con granulometría 160, 240, 320, 400 y 600. El proceso de pulido se observa en la Figura 2.20, y en la Figura 2.21 se muestra la superficie trabajada y lista para realizar el ensayo de dureza Vickers.



Figura 2. 18. *Durómetro Brinell marca Foundrax modelo Brin 200 M*



Figura 2. 19. *Desbaste de la superficie de la probeta para el ensayo de dureza*

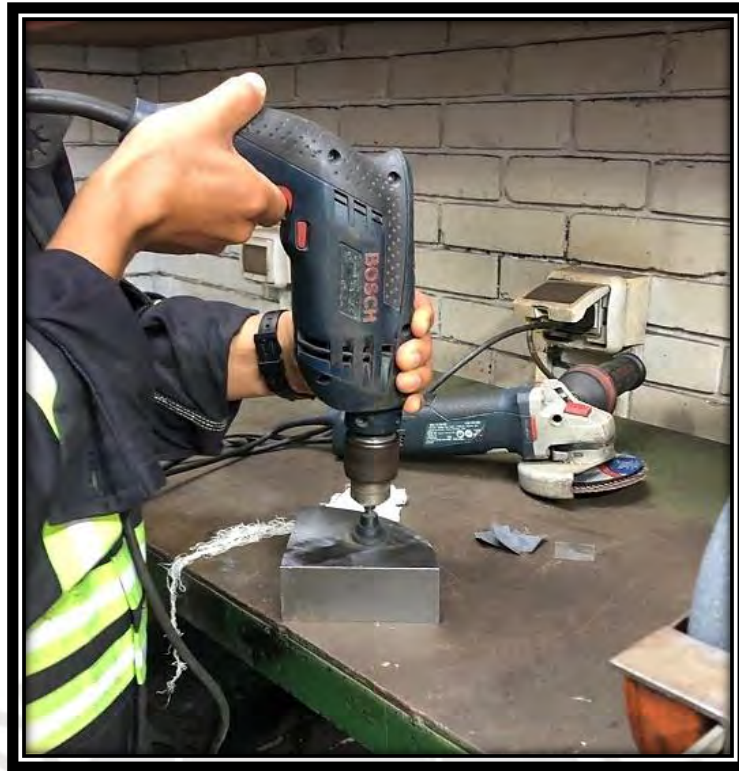


Figura 2. 20. Pulido de la superficie de la probeta para el ensayo de dureza



Figura 2. 21. Superficie preparada para el ensayo de dureza

Para realizar el ensayo de dureza Vickers, se marcaron y enumeraron los puntos desde la superficie hasta el centro donde se realizaron las microindentaciones del ensayo. En la figura 2.22, se muestra las marcas.

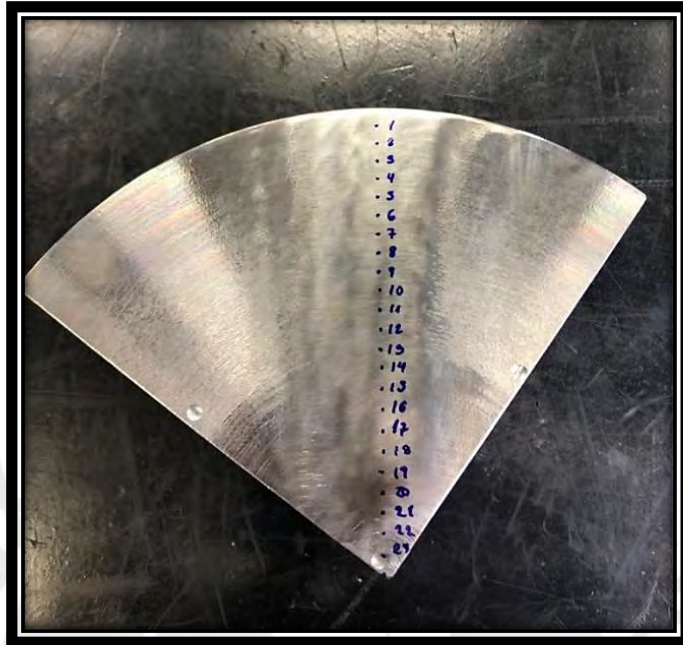


Figura 2. 22. Marcación y enumeración de la probeta

Luego, se colocó la probeta en un durómetro marca Zwick/Roell modelo Indenter ZHV, la cual se muestra en la Figura 2.23, y se procedió a realizar las mediciones. Según la norma ASTM E384, la fuerza con la que se hace la microindentación en el ensayo de dureza Vickers debe estar entre 25 gf y 1000 gf para tener resultados más precisos, ya que las microindentaciones que se realizan con fuerzas menores a 25gf pueden llegar a ser extremadamente pequeños de tamaño. Cabe resaltar que la dureza Vickers (HV) se halla con la siguiente fórmula.

$$HV = 1854.4 \left(\frac{P}{d^2} \right)$$

Donde:

- P: Fuerza aplicada [gf]
- d: longitud promedio de la diagonal de la microindentación [μm]



Figura 2. 23. *Durómetro Zwick/Roell Indenter ZHV*

- **Criterio de aceptación**

Se espera que la dureza del material sea parecida a la dureza de los aceros aleados mencionados en el capítulo 1. Por lo tanto, la dureza que presente este material debe estar dentro del rango de 197 HB a 217 HB.

2.1.4. Análisis químico

- **Descripción**

El análisis químico es un procedimiento para determinar la composición química de un material. Para este proyecto, se usará la norma ASTM E415, la cual describe un método de prueba para realizar una espectrometría de emisión atómica por chispa para metales.

La espectrometría es una técnica que analiza las longitudes de onda de los fotones emitidos por los átomos o moléculas durante la transición desde un estado de energía inferior, la cual se realiza en un pequeño espacio existente entre un par de electrodos mediante una chispa.

- **Objetivo**

Como se mencionó líneas arriba, el análisis químico determinará la composición química del acero con el que se mecanizó el eje fracturado. De esta manera, podremos determinar qué tipo de acero se usó para fabricarlo.

- **Probeta**

La probeta que se utiliza para el análisis no tiene una forma ni dimensiones definidas por la norma ASTM E415. Sin embargo, la superficie donde se realizará el análisis debe ser plana, estar libre de algún contaminante o imperfecciones como óxidos o pintura, y estar pulida para tener una mayor precisión de los resultados.

- **Procedimiento**

En primer lugar, se preparó la muestra mediante una cortadora de mesa de la marca LECO modelo SX-100M, la cual se muestra en la Figura 2.24. En la figura 2.25, se muestra la probeta para el análisis químico.



Figura 2. 24. Cortadora de mesa LECO SX-100M



Figura 2. 25. *Probeta para el análisis químico*

Finalmente, se limpió la superficie con alcohol y se colocó en el espectrómetro de emisión óptica de la marca Bruker modelo Q8 Magellan. En la Figura 2.26, se muestra la máquina.



Figura 2. 26. *Espectrómetro de emisión óptica Bruker Q8 Magellan*

- **Criterio de aceptación**

Se espera que los resultados de composición química en el análisis químico coincidan con alguno de los aceros aleados mencionados en el capítulo 1.

2.1.5. Análisis Metalográfico

- **Descripción**

El análisis metalográfico consiste en analizar la microestructura que presenta un material metálico como el tamaño del grano, inclusiones y fases existentes, Este análisis nos brinda información acerca de los tratamientos térmicos involucrados para la fabricación del material.

Este ensayo consiste en preparar una probeta relativamente pequeña, la cual se extrae del núcleo del eje, para poder analizarla bajo un microscopio electrónico de barrido. Es importante que esta probeta pase por un proceso de desbaste y pulido hasta obtener un acabado espejo antes de llevarla al microscopio, ya que esto influye en lo que se quiere observar y analizar en la microestructura.

- **Objetivo**

El objetivo de este análisis, en esta ocasión, será determinar el tratamiento térmico que se utilizó en la fabricación del eje y relacionarlo con las propiedades mecánicas que presenta dicho componente, las cuales fueron determinadas en el ensayo de tracción, el ensayo de dureza y el ensayo de impacto.

- **Probeta**

La probeta en el análisis metalográfico no presenta una forma ni dimensiones definidas. Sin embargo, la norma ASTM E3 (2017) sugiere que, si el espécimen o probeta es cuadrado, este debe de tener sus lados con longitud aproximadamente de 12 a 25 mm por lado, y si el espécimen es circular, este debe tener un radio aproximadamente de 12 a 25 mm.

Cabe recalcar que se debe tener mucho cuidado al momento de cortar el material para obtener la probeta, ya que este proceso de corte puede provocar alteraciones en la microestructura del material si no se realiza adecuadamente. La norma indica que, para metales ferrosos como el acero, es aconsejable utilizar un disco abrasivo de óxido de aluminio y líquido refrigerante para realizar los cortes.

- **Procedimiento**

En primer lugar, se sacó una pequeña muestra con la misma máquina cortadora que se utilizó para sacar la muestra para el análisis químico, la cual se muestra en la Figura 2.24. Esta muestra se colocó en una briqueta de resina translúcida, como se muestra en la Figura 2.27, con la ayuda de una prensa de montaje de la marca Buehler modelo Simplimet, la cual se muestra en la Figura 2.28.

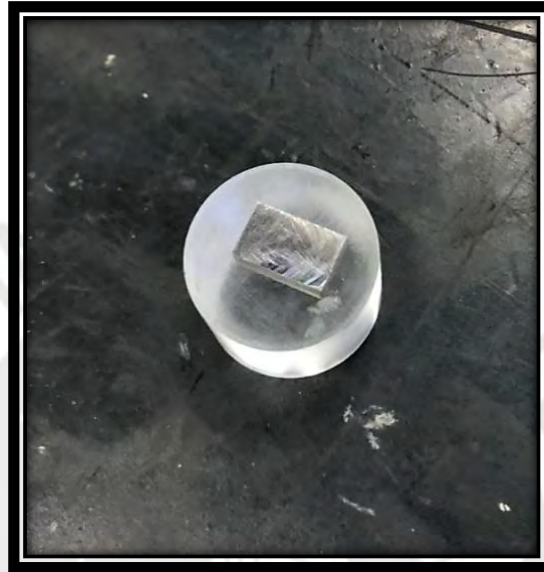


Figura 2. 27. *Probeta para análisis metalográfico*



Figura 2. 28. *Prensa de montaje Buehler Simplimet*

En segundo lugar, se utilizó una guía para realizar el desbaste y pulido de la muestra recomendada por la empresa Struers. Este proceso consta de 4 partes según la guía mencionada: un desbaste general, un desbaste fino, un pulido general y un pulido fino. En cada subproceso se utilizó un líquido abrasivo específico y una superficie abrasiva giratoria donde se realizó el desbaste o pulido a una determinada velocidad y tiempo, los cuales están estipuladas a continuación.

- El desbaste general se realizó en una superficie abrasiva de la marca Struers modelo MD-Piano 220 a una velocidad de 300 RPM por 2 minutos (no se utilizó ningún abrasivo para el desbaste general).
- El desbaste fino se realizó en una superficie abrasiva de la marca Struers modelo MD-Allegro utilizando un abrasivo de diamante de la misma marca modelo DiaPro Allegro/Largo 9 μ m, la cual contiene incrustaciones de diamante de 9 μ m de tamaño. Este subproceso se realizó a una velocidad de 150 RPM por 4 minutos.
- El pulido general se realizó en una superficie abrasiva de la marca Struers modelo MD-Dac utilizando un abrasivo de diamante de la misma marca modelo DiaPro Dac 3 μ m, la cual contiene incrustaciones de diamante de 3 μ m de tamaño. Este subproceso se realizó a una velocidad de 150 RPM por 4 minutos.
- El pulido fino se realizó en una superficie abrasiva de la marca Struers modelo MD-Nap utilizando un abrasivo de diamante de la misma marca modelo DiaPro Nap B 1 μ m, la cual contiene incrustaciones de diamante de 1 μ m de tamaño. Este subproceso se realizó a una velocidad de 150 RPM por 1 minutos.

Estos subprocesos se realizaron en un equipo de esmerilado y pulido de la marca Struers modelo Laboforce-3, la cual se muestra en la Figura 2.29.

Finalmente, se limpió la muestra con alcohol y se realizaron dos análisis. En el primer análisis, no se realizó ningún tipo de ataque químico mientras que, en el segundo análisis, se realizó un ataque químico en la superficie a analizar con Nital (95% alcohol y 5% ácido nítrico). Cabe resaltar que el análisis con ataque químico es en el que se va a estudiar la microestructura del eje.

Estos análisis se realizaron con un microscopio digital invertido de la marca Leica modelo DMI5000 M, la cual se muestra en la Figura 2.30.



Figura 2. 29. *Equipo de esmerilado y pulido Struers Laboforce-3*



Figura 2. 30. *Microscopio digital invertido Leica DMI5000 M*

- **Criterio de aceptación**

Se espera que la muestra tenga una microestructura de martensita revenida, tal como se muestra en la Figura 1.12, debido a los esfuerzos por los que generalmente están sometidos los ejes para fajas transportadoras (esfuerzos fluctuantes, esfuerzos cortantes).

2.2. Evaluación de la fractura

2.2.1. Inspección visual y metrología

- **Descripción**

La inspección visual es un procedimiento que consiste en observar detalladamente el componente fracturado que se puede realizar a simple vista o con la ayuda de algún instrumento auxiliar que permita una mejor percepción (Diaz, 2017).

- **Objetivo**

El objetivo de la inspección visual es determinar que parte del componente fracturado se utilizará para realizar los ensayos respectivos y una adecuada fractografía. Además, este procedimiento ayuda a realizar un diagnóstico preliminar sobre la superficie fracturada y el estado superficial del componente, y analizar la influencia de las formas y dimensiones del componente sobre la falla.

- **Probeta**

Se puede observar en las Figuras 2.31 y 2.32 las partes que conforman el eje fracturado. La metrología se realizó con un flexómetro de la marca Mitutoyo y una regla metálica de 100 cm de la marca Insize. Se eligió esta parte, ya que se pudo observar en la superficie fracturada más detalles que brindan más información acerca del modo de falla del eje. Además, al ser más pequeña esta parte, facilita el mecanizado de las probetas para sus respectivos ensayos.



Figura 2. 31. *Parte larga del eje fracturado*

Nota. Esta parte del eje tiene un largo de 129 cm y un diámetro de 23.5 cm en la sección fracturada.



Figura 2. 32. *Parte corta del eje fracturado*

Nota. Esta parte del eje tiene un largo de 30 cm y un diámetro de 23.5 cm en la sección fracturada.

- **Procedimiento**

Primero, se realizó una limpieza de las partes del eje para poder tener una mejor vista de la superficie fracturada y de la superficie del eje. La limpieza se realizó con un paño y alcohol. Luego, se tomaron las medidas correspondientes al eje (longitudes y diámetros).

2.2.2. Inspección por partículas magnéticas

- **Descripción**

La inspección por partículas magnéticas es un ensayo no destructivo que tiene como finalidad detectar grietas en la superficie o cerca de esta en materiales ferromagnéticos. Este procedimiento se basa en generar un campo magnético de alta densidad de flujo, el cual se obtiene al hacer pasar una corriente eléctrica a través del material o mediante el uso de una fuente externa de magnetización. Posteriormente, se aplican partículas magnéticas para detectar posibles discontinuidades en el material.

Las fugas de flujo del campo magnético creadas debido a discontinuidades, como grietas, permiten que las partículas magnéticas se acumulen en dichas áreas y, de esta manera, se logra localizar grietas superficiales o subsuperficiales.

Las partículas magnéticas se pueden encontrar como polvo seco (fluorescente o no fluorescente), concentradas en líquidos como agua o destilados ligeros de petróleo o pintura.

- **Objetivo**

En este caso, el objetivo de realizar una inspección de partículas magnéticas en el eje fracturado es encontrar grietas o discontinuidades que nos brinden información acerca del estado de la superficie.

- **Procedimiento**

Primero, se utilizó un esmeril de mano de la marca Bosch modelo GWS 17-125 CIE y un disco de lámina lijadora de la marca Pferd Polifan modelo PFF 115 A 40 SG-COOL para realizar un pulido de las zonas donde se realizará el procedimiento. Luego, se realizó una limpieza con un paño y alcohol. Estos procedimientos se observan en las Figuras 2.33 y 2.34.



Figura 2. 33. *Pulido del eje fracturado*



Figura 2. 34. *Limpieza del eje fracturado*

Luego de realizar el pulido y la limpieza, se roció un líquido con concentraciones de partículas magnéticas fluorescentes y se utilizó un yugo electromagnético para localizar discontinuidades, tal como se muestra en las Figuras 2.35 y 2.36.



Figura 2. 35. *Aplicación del líquido con partículas magnéticas*

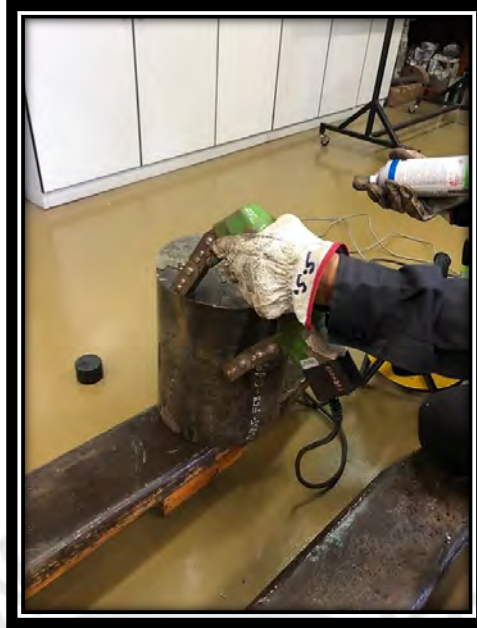


Figura 2. 36. *Aplicación del campo magnético mediante un yugo*

Finalmente, se utilizó luz ultravioleta para localizar grietas superficiales, tal como se muestra en la Figura 2.37.



Figura 2. 37. *Aplicación de la luz ultravioleta*

- **Criterio de aceptación**

Se espera detectar posibles fisuras en la superficie del eje.

2.2.3. Análisis fractográfico

- **Descripción**

Como ya se mencionó en el capítulo 1, la fractografía es un procedimiento que tiene como finalidad analizar la superficie de fractura de un componente, el cual es un eje de faja transportadora en este caso. Por lo general, una fractografía completa requiere de una macro-fractografía y una micro-fractografía.

- **Objetivo**

El objetivo en este caso será analizar la superficie de fractura del eje para obtener información acerca del mecanismo de falla (dúctil, frágil o por fatiga), así como identificar posibles concentraciones de tensiones en el componente y los tipos de cargas a las que estaba sometido.

- **Procedimiento**

Primero, se limpió la superficie de fractura con un paño y alcohol. En la Figura 2.38, se muestra la superficie de fractura a analizar.



Figura 2. 38. Superficie de fractura del eje

Finalmente, se analizó la superficie de manera macroscópica y microscópica.

- **Criterio de aceptación**

Los ejes están sometidos por cargas dinámicas generalmente. Por ende, se espera que el mecanismo de falla sea por fatiga. Además, se espera que la fractura se encuentre en un área donde haya concentración de tensiones.

2.2.4. Análisis metalográfico adyacente al inicio de falla

- **Descripción**

Este procedimiento consiste en realizar un análisis metalográfico adyacente al inicio de falla. De esta manera, se puede determinar si hubo un cambio en la microestructura en la zona de falla por efecto del calor, lo cual se puede dar con procedimientos de reparación por soldadura. Este cambio en la microestructura actúa como concentrador de esfuerzos que puede llegar a ser el causante de una falla.

- **Objetivo**

El objetivo para nuestro caso será realizar un análisis metalográfico en un punto cercano al inicio de falla del eje para determinar si hubo un cambio en la microestructura.

- **Probeta**

Como ya se mencionó anteriormente, la probeta en el análisis metalográfico no presenta una forma ni dimensiones definidas. Sin embargo, la norma ASTM E3 (2017) sugiere que, si el espécimen o probeta es cuadrado, este debe de tener sus lados con longitud aproximadamente de 12 a 25 mm por lado, y si el espécimen es circular, este debe tener un radio aproximadamente de 12 a 25 mm.

- **Procedimiento**

En primer lugar, se sacó una pequeña muestra con una sierra de mano marca Ubermann, la cual se muestra en la Figura 2.39. Esta muestra, la cual se puede observar en la Figura 2.40, se colocó en una briqueta de resina translúcida, como se muestra en la Figura 2.41, con la ayuda de la misma prensa de montaje que se

utilizó para el análisis metalográfico para la caracterización del material (figura 2.28).



Figura 2. 39. *Sierra de mano marca Ubermann*



Figura 2. 40. *Muestra cortada*



Figura 2. 41. *Probeta para el análisis metalográfico*

Luego, se utilizó el mismo procedimiento que en el análisis metalográfico para preparar la superficie a analizar.

Finalmente, se limpió la muestra con alcohol y se realizaron dos análisis. En el primer análisis, no se realizó ningún tipo de ataque mientras que, en el segundo análisis, se realizó un ataque químico en la superficie a analizar con Nital (95% alcohol y 5% ácido nítrico).

- **Criterio de aceptación**

Se espera que no haya ningún cambio en la microestructura en la zona adyacente al inicio de falla.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo, se mostrará y discutirá los resultados obtenidos en cada ensayo realizado para la caracterización del material.

3.1. Análisis de resultados de la caracterización del material

3.1.1. Resultados del ensayo de tracción

Del ensayo de tracción, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.1 y el gráfico “esfuerzo vs deformación” se observa en la Figura 3.1.

Utilizando las cargas mencionadas y las dimensiones de la probeta, se obtuvo un esfuerzo o resistencia a la fluencia de 512.12 MPa y un esfuerzo máximo a la tracción de 830.91 MPa. Estos valores son relativamente mayores que los valores de las propiedades mecánicas de los aceros aleados presentados en el capítulo 1. Sin embargo, estos valores se acercan más a las propiedades que presenta el AISI 4340 recocido, el cual tiene una resistencia a la fluencia y una máxima resistencia a la tracción de 470 MPa y 745 MPa respectivamente. Cabe resaltar que, estos datos son insuficientes para poder determinar el tipo de acero que es. Esto se determina con el análisis químico. Además, hay que tener en cuenta que la elongación obtenida (12.76 %) es relativamente baja en comparación con el AISI SAE 4340, el cual presenta una elongación promedio de 22%.

Tabla 3. 1. Resultados del ensayo de tracción

Muestra		1
Sección transversal	Diámetro (mm)	12.63
	Area (mm ²)	125.28
Cargas (kn)	Fluencia	64.16
	Máxima	104.10
Esfuerzos (mpa)	Fluencia	512
	Máxima	831
Longitud entre marcas (mm)		50.00
Longitud final entre marcas (mm)		56.38
Alargamiento (%)		12.76

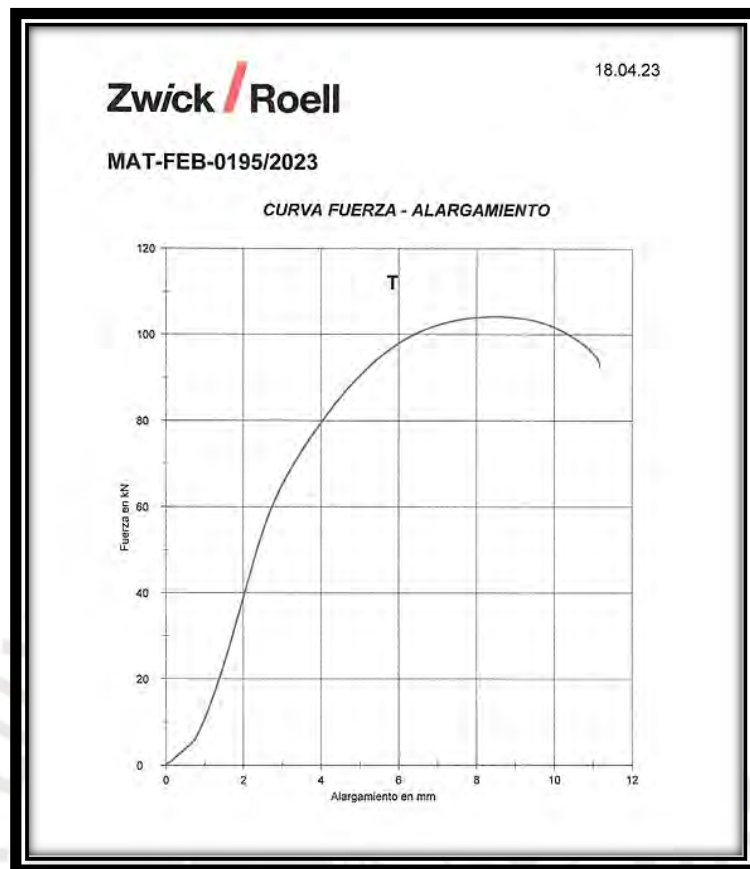


Figura 3. 1. Curva “esfuerzo vs deformación”

Por lo tanto, se podría decir que el material con la que se fabricó el eje es frágil, lo cual se evidencia por los valores relativamente grandes de resistencia a la fluencia y resistencia máxima a la tracción, y el valor relativamente bajo de elongación.

3.1.2. Resultados del ensayo de impacto

Los resultados del ensayo de impacto se pueden visualizar en la Tabla 3.2.

El promedio de energía que absorbieron las probetas hasta su fractura fue de 5 J. Este resultado es bajo, ya que la energía absorbida por probetas hechas de aceros aleados recocidos es mayor igual a 20 J generalmente. Asimismo, en las superficies de fractura de las probetas de impacto Charpy V que se muestran en la Figura 2.14, se observa comportamiento frágil del material.

Tabla 3. 2. *Resultados del ensayo de impacto*

Muestra	Temperatura de ensayo (°C)	Energía absorbida (Joules)	Energía promedio (Joules)
1	25	5.41	5
2	25	4.41	
3	25	5.74	

3.1.3. Resultados del ensayo de dureza

En las Tablas 3.3 y 3.4, se muestran los resultados del ensayo de dureza Brinell y Vickers, respectivamente.

Como se puede observar en los resultados, el promedio de dureza Brinell es de 234 HB y el promedio de dureza Vickers es de 295 HV, el cual es equivalente en dureza Brinell a 280 HB. Estos valores son relativamente altos en comparación de la dureza promedio que presentan los aceros aleados mencionados en el capítulo 1. Esto incluye al acero AISI 4340 recocido, el cual presenta la mayor dureza (217 HB).

Tabla 3. 3. *Resultados del ensayo de dureza Brinell*

Posición	1	2	3	4	Promedio
Dureza HBW	232	234	236	232	234

Tabla 3. 4. Resultados del ensayo de dureza Vickers

Muestra	Mediciones		
	Diagonal 1 (μm)	Diagonal 2 (μm)	HV
1	258.1	257.1	279
2	247.0	247.9	303
3	249.8	253.5	293
4	262.7	265.4	266
5	262.7	263.6	268
6	262.7	259.9	272
7	258.1	259.9	276
8	269.1	273.7	252
9	284.8	282.0	251
10	258.1	263.6	273
11	264.5	271.9	258
12	254.4	259.0	281
13	271.0	259.0	259
14	270	281.1	261

3.1.4. Resultados del análisis químico

En la Tabla 3.5, se muestran los resultados del análisis químico del material. Como se puede observar en los resultados de dicha tabla y, comparando estos con los aceros aleados mencionados en el capítulo 1, es muy probable que se trate de un acero AISI 4140. Se consideró también que se podría tratar de un acero AISI 4340. Sin embargo, el porcentaje de molibdeno (Mo) que presenta la muestra se sale del rango (0.2% - 0.3% de Mo para el acero AISI 4340)

Tabla 3. 5. Resultados del análisis químico

Elemento Químico	Material Base (%)	AISI 4140 (%)
C	0.425	0.38 – 0.43
Mn	0.815	0.75 – 1.00
P	0.015	Máx. 0.035
S	0.0025	Máx. 0.040
Si	0.1628	0.15 – 0.35
Cr	0.868	0.80 – 1.10
Ni	0.166	-
Mo	0.172	0.15 – 0.25
Cu	0.063	-
Nb	0.001	-
Ti	0.002	-
V	0.019	-
Co	0.0082	-
Al	0.0355	-
W	< 0.0015	-
Sn	0.0040	-
Fe	97.219	-
B	0.0006	-

3.1.5. Resultados del análisis metalográfico

El resultado del ensayo metalográfico sin ataque químico se muestra en la Figura 3.2. y el resultado del ensayo metalográfico con ataque químico se muestra en las Figuras 3.3 y 3.4.

En la Figura 3.2, se muestran inclusiones del tipo D (óxidos globulares) distribuidas aleatoriamente. Estas inclusiones disminuyen la resistencia del material ante la fatiga. Según la norma ASTM E45, la severidad del número de inclusiones es media.



Figura 3. 2. *Análisis microscópico sin ataque*

Nota. La foto está con un aumento de 100X.



Figura 3. 3. *Análisis metalográfico con ataque químico*

Nota. La foto de la microestructura está en 100X.



Figura 3. 4. *Análisis metalográfico con ataque químico*

Nota. La foto de la microestructura está en 500X.

Por otro lado, comparando las Figura 3.3 y 3.4 con la Figura 1.8 del capítulo 1 donde se habló de la microestructura de los aceros, se puede observar que la muestra presenta una microestructura de matriz perlítica (97%) y de ferrita en los límites de grano (3%), las cuales se forman en enfriamientos lentos como se mencionó en dicho capítulo. El hallazgo de un tamaño de grano de perlita tan grande es compatible con un estado bruto de colada, el cual presenta una disminución en sus propiedades mecánicas, especialmente en la tenacidad.

3.2. Análisis de resultados de la fractura

Como se mencionó en el capítulo 2 y se puede apreciar en las Figuras 2.31 y 2.32, el eje fracturado llegó en dos partes. En la figura 2.31, se observa el segmento más largo que tiene una longitud de 129 cm y diámetro de 23.5 cm aproximadamente, y corresponde al lado de la polea. En figura 2.32, se observa el segmento más pequeño que tiene una longitud de 30 cm y diámetro de 23.5 cm aproximadamente, y corresponde al lado del acople.

3.2.1. Resultados de la inspección por partículas magnéticas

En la figura 3.5, se observa una grieta que es consecuencia de la fractura del eje. Sin embargo, no se encontraron grietas superficiales o subsuperficiales a lo largo de este.



Figura 3. 5. *Grieta debida a la fractura del eje*

3.2.2. Resultados de la fractografía

Se pueden observar dos zonas bien marcadas en la Figura 3.6. La zona demarcada de color verde tiene un aspecto liso debido al rozamiento entre superficies y delimita la falla por fatiga (50%). La zona demarcada de color naranja que tiene un aspecto rugoso muestra la zona de fractura frágil final (50%). Además, las flechas rojas indican los múltiples inicios de falla (alto nivel de concentración de tensiones). Asimismo, se pueden observar marcas “Ratchet” en la figura 3.7, las cuales refuerzan dicha observación.

En la figura 3.8, se pueden observar marcas de playa en la superficie de fractura, lo cual indica mecanismo de falla por fatiga.

Finalmente, comparando la morfología de la superficie de fractura con las morfologías presentadas en la Figura 1.21, se puede deducir que las cargas soportadas por el eje fueron moderadas y la concentración de esfuerzos fueron

severas. Además, dichas cargas fueron de flexión unidireccional y el número de ciclos de trabajo fue alto.

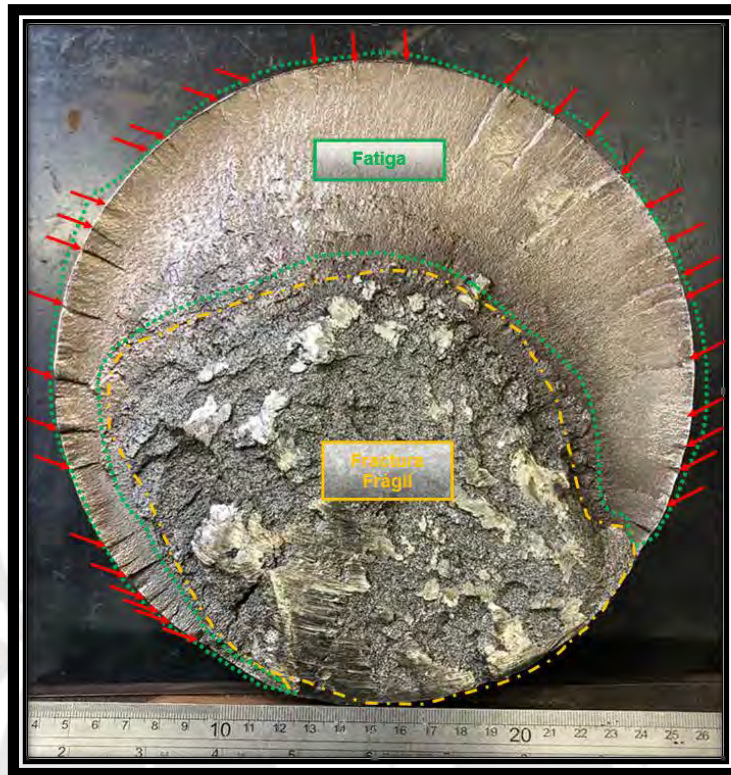


Figura 3. 6. *Superficie de fractura del eje de polea motriz*



Figura 3. 7. *Presencia de marcas "Ratchet" en la superficie fracturada del eje*



Figura 3. 8. *Presencia de marcas de playa en la zona de fractura*

3.2.3. Análisis metalográfico adyacente al inicio de falla

En la Figura 3.9, se pueden observar los resultados del análisis metalográfico sin ataque químico y, en las Figuras 3.10 y 3.11, se pueden observar los resultados del análisis metalográfico con ataque químico.

En el resultado metalográfico sin ataque, se puede observar inclusiones del tipo D (óxidos globulares) distribuidas aleatoriamente como en los resultados metalográficos de la muestra extraída del eje. Asimismo, en el resultado metalográfico con ataque químico, se puede observar que la microestructura presente en el inicio de falla es similar a la encontrada en la muestra mencionada anteriormente (perlita 97% y ferrita 3%). En otras palabras, no se encontró indicios de deformación plástica significativa, picaduras de corrosión u otro mecanismo de falla.

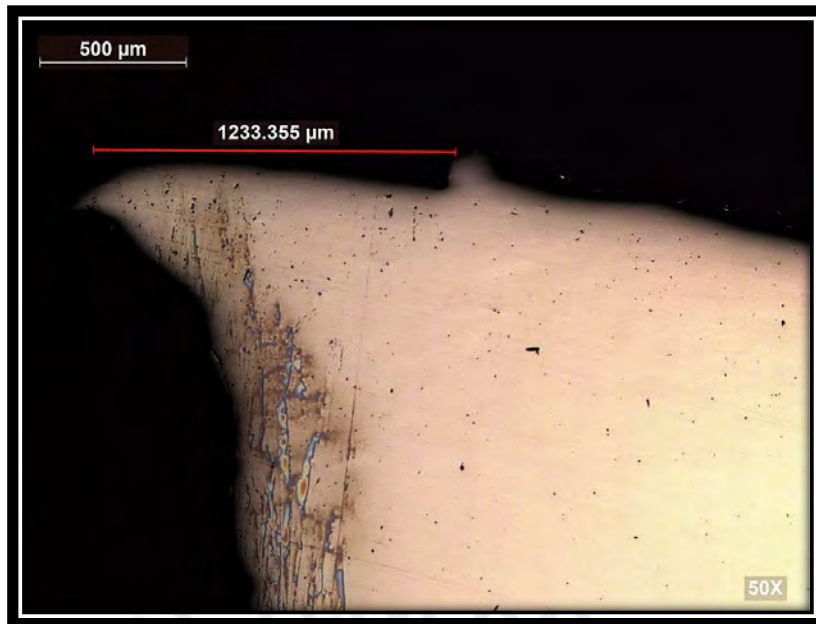


Figura 3. 9. *Muestra metalográfica adyacente al inicio de falla sin ataque (50 aumentos)*

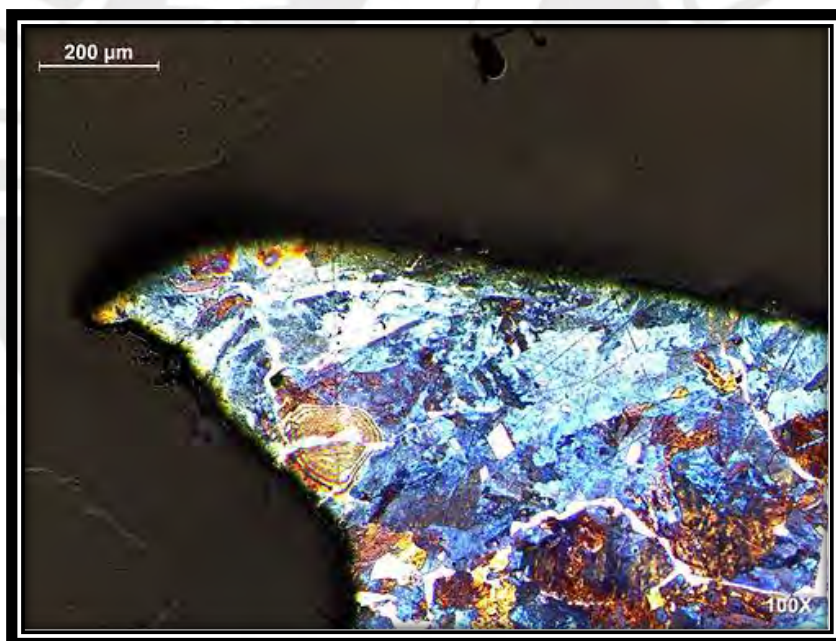


Figura 3. 10. *Muestra metalográfica adyacente al inicio de falla con ataque (100 aumentos)*

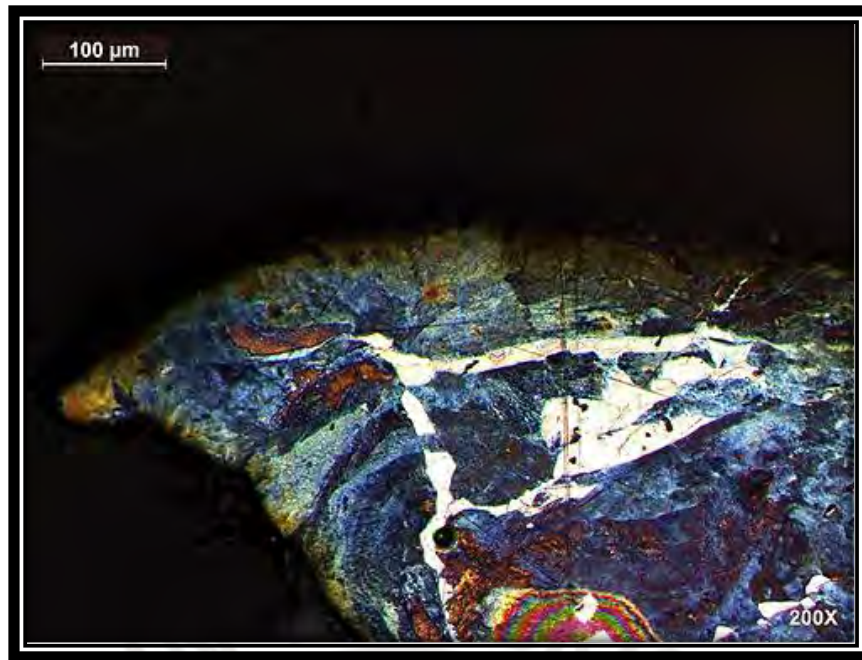


Figura 3. 11. *Muestra metalográfica adyacente al inicio de falla con ataque (200 aumentos)*



CONCLUSIONES

1. La composición química y el análisis metalográfico del material del eje de polea motriz de faja CVB002 fracturado es compatible con un acero de medio carbono aleado al Cromo - Molibdeno, compatible con el AISI-SAE 4140.
2. Los ensayos de tracción y de dureza nos muestran que las propiedades mecánicas del material del eje de polea motriz de faja CVB002 fracturado son heterogéneas y compatibles con un estado de suministro de bruto de colada.
3. La inspección visual y el análisis fractográfico nos permiten observar que la falla es compatible con una fatiga mecánica, de altos concentradores de esfuerzos, alto número de ciclos de trabajo y moderadas cargas de torsión y flexión unidireccional.
4. El análisis metalográfico nos muestra que la microestructura, del eje de polea motriz de faja CVB002, contiene una matriz perlítica (97%) y presencia de ferrita (3%) de forma reticular en los límites de grano. Asimismo, presenta inclusiones no metálicas del tipo óxido globulares y un tamaño de grano extremadamente grande. El gran tamaño de grano perlítico disminuye la tenacidad del material y aumenta su fragilidad. Las características expuestas son compatibles con un estado de suministro bruto de colada.
5. En el análisis fractográfico, se determinó que la fractura se dio por medio de un mecanismo de falla por fatiga en la zona donde el eje y el acople se unen. Analizando la morfología de la fractura, se determinó que hubo una alta concentración de esfuerzos debido al gran ajuste entre estos. También se pudo observar un cambio de sección muy pequeño (figura 3.8), producto de un mecanizado anterior, en la zona de falla que actuó como un concentrador de esfuerzos y contribuyó significativamente a la falla del eje.
6. Se deduce que la causa más probable de la falla del eje de cola se debió a fatiga mecánica, la cual se inició en los concentradores de tensión, producidos por el gran embridamiento generado por la unión por ajuste mecánico tanto del acople como de la polea, y progreso a través de la sección transversal del eje, favorecido por un metal base de baja tenacidad, hasta producir la fractura final.

RECOMENDACIONES

1. Al momento de querer buscar información acerca de materiales y tratamientos térmicos en los aceros, se dificultó obtener información más actualizada en la biblioteca de la universidad. Por ello, se recomienda actualizar el repertorio acerca de estos temas.
2. Se recomienda tener un lugar especial para poder realizar la inspección visual mediante partículas magnéticas de tal manera que se pueda visualizar de manera más cómoda y clara los resultados de este ensayo.
3. Al momento de sacar las fotografías con el microscopio en los ensayos metalográficos, hubo un problema con el software que se utilizaba en la computadora. Esto repercutió en la demora de la obtención de resultados. Se recomienda revisar dicho software.



BIBLIOGRAFÍA

- Organismo supervisor de la Inversión en Energía y Minería. (2017). *La industria de la minería en el Perú*. Gráfica Biblios.
- Organismo supervisor de la Inversión en Energía y Minería. (2019). *Reporte de análisis económico sectorial: Sector minería*. [https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios Economicos/RAES/RAES-Mineria-diciembre-2019-GPAE-OS.pdf](https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/RAES/RAES-Mineria-diciembre-2019-GPAE-OS.pdf)
- Ecorsa. (2015). *Fajas transportadoras*. <https://www.ecorsaperu.com.pe/fajas-transportadoras/>
- Motorex. (2020). *El uso de fajas transportadores en la industria*. <https://www.motorex.com.pe/blog/el-uso-de-la-faja-transportadora-en-las-industrias/>
- Otegui, José (2014). *Fundamentals and Applications in Mechanical Components*. Springer.
- Heras Lopez, A. A. (2014). *Diseño de Cinta Transportadora e Estructura auxiliar para planta de procesamiento de arcillas*.
- Quintana A. (2017). *Montaje de un sistema de fajas transportadoras para el mineral de hierro, en la empresa minera Shougang Hierro Perú S.A.A. Marcona-Ica*.
- Mott, R. L. (2004). *Machine elements in mechanical design*. Pearson/Prentice Hall.
- ASM International (1990). *Properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys*. Metals Park
- Acosta, Julio (2016). *Ingeniería de materiales I*. PUCP
- Askeland, D., y Wright, W. (2017). *Ciencia e ingeniería de materiales*. Cengage Learning.
- Prabhudev, K. (1988). *Handbook of Heat Treatment of Steels*. MacGraw-Hill
- ASTM International (2021). *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. ASTM Int'l

- ASTM International (2022). *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*. ASTM Int'1
- ASTM International (2022). *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials* ASTM Int'1
- ASTM International (2021). *Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry*. ASTM Int'1
- ASTM International (2017). *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*. ASTM Int'1
- ASTM International (2016). *Results of Interlaboratory Test Programs to Assess the Precision of Inclusion Rating by Methods A, C, and D of ASTM E45*. ASTM Int'1
- ASTM International (2021). *Standard Guide for Magnetic Particle Testing*. ASTM Int'1
- ASM (1986). *Metal Handbook: Failure Analysis and Prevention*. ASM International.
- Rodríguez, Jorge (2017). *Resistencia de Materiales 2*. PUCP
- Fosca, Carlos (2021). *Mecanismo de la fractura dúctil* [Diapositivas]
- Fosca, Carlos (2021). *Mecanismo de la fractura frágil por Clivaje* [Diapositivas]
- Fosca, Carlos (2021). *Mecanismo de la fractura frágil Intergranular* [Diapositivas]
- Fosca, Carlos (2021). *Fractura por fatiga: Mecanismo* [Diapositivas]
- Fosca, Carlos (2021). *Modos de fractura* [Diapositivas]
- Díaz, J. (2017). *Determinación mediante la realización de análisis de falla de las causas más comunes de falla en ejes de equipos industriales [Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico]*. PUCP
- Hua, M., Cao, C., Cai, Y., Ge, J., Zhong, F., Mao, J. (2023). *Failure analysis and structural fatigue resistance design of multistage centrifugal pump shaft*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107545>
- Anoop M., Dhanesh S. (2021). *Failure analysis and design optimization of alternator shaft used in rail coaches*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.093>

- Ruiz, R. (2017). *Evaluación de sensores e instrumentación utilizados en análisis de fallas de maquinaria de transporte en minería*. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Beijing Qianzhentianzheng Engineering Technology (2022). *The Various Surface of Pulley. Made in China*. <https://xin-ri-sheng.en.made-in-china.com/product/sJgRMUHjgxVW/China-Quality-Assurance-Belt-Conveyor-Diamond-Lagging-Take-up-Drive-Head-Drum-Pulley-with-The-Best-Price-for-Cement-Coal.html>
- Arrabal, R., Pardo, A., Merino, M., Gómez de Castro, C., Muñoz, J., Matykina, E., Gómez, G., Mohedano, M., Sancho, J., Sánchez, P., Mingo, B. (2016). *Atlas Metalográfico como Recurso Didáctico en el Aprendizaje de Microestructuras de Aleaciones de Interés Tecnológico*. Universidad Complutense de Madrid. <https://www.ucm.es/atlasmetalografico/presentacion>
- Pero-Sanz, J., Quintana, M., Verdeja, L. (2017). *Solidification and Solid-State Transformations of Metals and Alloys*. Elsevier.
- Matusiewicz, P., Ratuszek, W., Zielinska-lipiec, A. (2010). *Recrystallization of ferrite in spheroidite of Fe-0.67%C Steel*. AGH University of Science and Technology.
- Totten, G. (2006). *Steel Heat Treatment*. Taylor & Francis Group.
- ASM International (2014). *Heat Treating of Irons and Steels*. ASM International.
- Luiz, A., Goncalve, M., Peres, J., Ferreira, J., Araújo, I., Silva, M., Salas, A., Santos, E., Gomes, H., Silva, G., Filgueiras, S. (2025). *Metallurgical and Mechanical Examination of Fatigue-Induced Fracture in a Conveyor Drum Shaft*. ResearchGate. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2025-0286>
- Gomes, F., Tschiptschin, A. (2009). *Embrittlement of electrical steel laminations by nitrogen pick-up during heat treatment*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.11.006>