

**DETERMINACIÓN DE MODO(S) DE FALLA(S) PARA MORDAZA DE AGARRE
DE ENVASE DE VIDRIO PARA OWENS-ILLINOIS S.A.**

ALEXANDRA ACEVEDO DUQUE

**UNIVERSIDAD LIBRE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C.
2019**

**DETERMINACIÓN DE MODO(S) DE FALLA(S) PARA MORDAZA DE AGARRE
DE ENVASE DE VIDRIO PARA OWENS-ILLINOIS S.A.**

ALEXANDRA ACEVEDO DUQUE

Proyecto de Grado

**Director
Ingeniero Mauricio Sierra Cetina
MSc. en Ingeniería – Materiales y Procesos**

**UNIVERSIDAD LIBRE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C.**

2019

NOTAS DE ACEPTACIÓN

FIRMA DE JURADO

FIRMA DE JURADO

BOGOTÁ D.C., 2019

DEDICATORIA

Quiero dedicar este proyecto a la base esencial de este logro, a mis padres, Juan Francisco Acevedo y Elizabeth Duque, por estar presentes en este sueño tan importante para mí, que se fue construyendo cada día y que hoy es la realización de una gran meta de las muchas más que me esperan en este recorrido exitoso, agradecer por su ayuda incondicional, palabras de aliento, conocimientos, consejos y su dedicación.

Será como árbol plantado junto corrientes de aguas,
Que da su fruto en su tiempo,
Y su hoja no cae;
Y todo lo que hace, prospera

Salmo 1:3

AGRADECIMIENTOS

En esta oportunidad y por medio de este proyecto quiero agradecer ante todas las cosas y en primer lugar a Dios, por fortalecerme y guiarme cada instante, donde los obstáculos eran fuertes para los humanos, pero no para el que va de la mano de él, por darme esa fuerza espiritual para empezar un camino de éxito. Pero en especial a mis padres por ser ese motor de arranque y mi mayor motivación, por su paciencia y comprensión, pero sobre todas las cosas por el amor que derramaron en mi para lograr lo que hoy soy.

Muestro mis más sinceros agradecimientos a mi tutor de proyecto, el Ingeniero Mauricio Sierra Cetina, por dirigir por medio de su gran conocimiento en este proyecto, ya que fue una pieza clave para que se desarrollara cada objetivo planteado en cada etapa de este proceso. A los que hoy son mis amigos, solo queda gratitud por todo su apoyo y conocimiento que me brindaron durante este tiempo, amistad que se fortaleció durante el paso en este camino en la Universidad Libre.

¡Muchas gracias por todo!

TABLA DE CONTENIDO

1. TÍTULO _____	13
2. INTRODUCCIÓN _____	13
3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA _____	14
4. JUSTIFICACIÓN _____	15
5. OBJETIVOS _____	16
5.1 OBJETIVO GENERAL _____	16
5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS _____	16
6. MARCOS DE REFERENCIA _____	17
6.1 MARCO TEÓRICO _____	17
6.1.1 Los envases de vidrio y su proceso _____	17
6.1.1.1 El vidrio _____	17
6.1.1.2 Proceso de fabricación y manipulación del vidrio _____	19
6.1.2 El Material de Pinzas de Agarre _____	22
6.1.2.1 El bronce _____	22
6.1.2.1.1 Bronces de baja concentración / Bronces rojos _____	22
6.1.2.1.2 Bronces de Alta concentración / Bronces Amarillos _____	22
6.1.2.2 Nomenclatura de los bronce [5] _____	23
6.1.2.3 Las propiedades del Cobre y sus aleaciones _____	23
6.1.2.4 Influencias de aleaciones _____	24
6.1.3 Análisis de falla en un material. _____	25
6.1.3.1 Tenacidad de fractura _____	26
6.1.3.2 Falla en los materiales y tipos de Fractura _____	30
6.1.3.3 Causas de falla _____	30
6.1.3.4 Esfuerzos y cargas _____	30
6.1.3 Fractografía _____	31
6.1.4.1 Fractura dúctil [11] _____	32
6.1.4.2 Fractura frágil _____	33
6.1.4.3 Aportes al método de fractografía en análisis de falla _____	34
6.1.4.4 Fractografía Óptica _____	34

6.1.4.5 Fractura por tracción _____	34
6.1.4.6 Fractura por fatiga [13] _____	37
6.1.4.7 Identificación del origen de una fractura [11] _____	38
6.1.4 SEM (microscopio óptico de barrido) _____	39
6.1.5.1 Los componentes básicos _____	41
6.1.5.2 Características de obtención de imágenes SEM _____	42
6.1.5.2.1 Aumento en el SEM _____	43
6.1.5.2.2 Resolución _____	43
6.1.5.2.3 Profundidad de campo _____	44
6.1.5.3 La aplicación del SEM en fractografía _____	44
6.1.5.4 Microanálisis por SEM _____	44
6.1.5.5 Mecanismos de fractura que se estudian en el SEM _____	45
6.1.6 Microdureza _____	45
6.1.6.1 Método Vickers _____	45
6.2 Marco Conceptual _____	47
6.3 Estado del Arte _____	49
6.4 Marco Legal y Normativo _____	50
7. MARCO METODOLÓGICO _____	51
7.1 Diseño Metodológico _____	51
7.2 Tipo de investigación _____	51
7.3 Diseño experimental _____	51
7.4 Metodología _____	53
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN _____	59
8.1 Parámetros de producción de las pinzas _____	59
8.1.1 Discusión de parámetros de producción de las pinzas _____	62
8.2 Variables de falla mecánica _____	62
8.2.1 Discusión de variables de falla mecánica _____	63
8.3 Características del Material _____	64
8.3.1 Discusión de características del material _____	65
8.4 Prueba de Microdureza _____	66
8.4.1 Discusión de Prueba de Microdureza _____	69

8.5	Análisis metalográfico y método SEM	71
8.5.1	Discusión del análisis metalográfico	72
8.5.2	Microestructura en las Probetas de la 1 a la 9	75
8.5.3	Resultados de la caracterización de materiales con el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM)	78
8.5.4	Discusión Microestructura y Método SEM Probetas de la 1 a la 9	83
8.5.4.1	Probeta N° 1	83
8.5.4.2	Probeta N° 2	84
8.5.4.3	Probeta N° 3	85
8.5.4.4	Probeta N° 4	86
8.5.4.5	Probeta N° 5	88
8.5.4.6	Probeta 06	88
8.5.4.7	Probeta N° 7	89
8.5.4.8	Probeta N° 8	90
8.5.4.9	Probeta N° 9	91
9.	CONCLUSIONES	92
10.	RECOMENDACIONES	94
	BIBLIOGRAFÍA	95

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 Partes principales de un recipiente</i>	18
<i>Figura 2 Principales tipos de terminados para envases de vidrio</i>	19
<i>Figura 3 Maquina IS independiente con 6 secciones, Owens-Illinois S.A. (Planta Vidriería Fenicia)</i>	20
<i>Figura 4 Técnica de formación de envases</i>	21
<i>Figura 5 Diagrama esfuerzo – deformación</i>	25
<i>Figura 6 Comparación de mismo material y aplicación de la misma fuerza</i>	25
<i>Figura 7 Coordenadas del campo de esfuerzos de una grieta</i>	26
<i>Figura 8 Efecto del espesor en la tenacidad de fractura</i>	28
<i>Figura 9 Fases de una fractura frágil</i>	32
<i>Figura 10 Esquema de superficies de una falla por tracción (Origen de rotura) ...</i>	35
<i>Figura 11 Esquema de superficies de una falla por tracción</i>	36
<i>Figura 12 Superficies de fractura sometidas a diferentes temperaturas</i>	36
<i>Figura 13 Superficies de fractura sometidas a diferentes temperaturas</i>	37
<i>Figura 14 Marcas de playa en una superficie</i>	38
<i>Figura 15 Orígenes de fracturas</i>	39
<i>Figura 16 Ilustración esquemática de la emisión de electrones, rayos X (RX) y de fotones por la interacción de un haz incidente de electrones con la muestra.</i>	40
<i>Figura 17 Diagrama de principio de la formación de imágenes en el SEM. La imagen en la pantalla del TLC es un mapa de las intensidades relativas de la emisión de electrones en la superficie de la muestra</i>	41
<i>Figura 18 Componentes del microscopio electrónico de barrido SEM</i>	42
<i>Figura 19 Variables del Diseño Experimental</i>	52
<i>Figura 20 Mordazas de agarre de vidrio</i>	53
<i>Figura 21 Diferentes tipos de mordazas para cada referencia de envases</i>	53
<i>Figura 22 Equipo de microdureza y sus respectivas huellas de las probetas que fueron analizadas</i>	54
<i>Figura 23 Probetas de mordazas de las maquinas A0 y A2</i>	55
<i>Figura 24 Pulidora de disco FORCIPOL1V - METKON</i>	56
<i>Figura 25 Maquina pulidora y Alúmina utilizada</i>	56
<i>Figura 26 Microscopio Óptico - Universidad Libre</i>	58
<i>Figura 27 Microestructura Caracterización material a 20x</i>	71
<i>Figura 28 Microestructura Caracterización material a 20x</i>	71
<i>Figura 29 Microestructura material 02 a 20x</i>	72
<i>Figura 30 Microestructura material 02 a 20x</i>	72
<i>Figura 31 Microestructura Caracterización material 03 a 20x</i>	72
<i>Figura 32 Microestructura Caracterización material 03 a 20x</i>	72
<i>Figura 33 Microestructura material 01 a 20x</i>	73
<i>Figura 34 Microestructura material 02 a 20x</i>	73

Figura 35 Microestructura material 03 a 20x.....	73
Figura 36 Microestructura material 02 a 50x. Presencia de precipitados de Estaño.	74
Figura 37 Microestructura a 100X del bronce nacional.....	74
Figura 38 Microestructura material 03 a 20x. Presencia de pocos precipitados y áreas moteadas por el óxido de cobre similares a los de la Figura	74
Figura 39 Efecto del contenido de oxígeno de 0,09% resulta en dendritas primarias de cobre (blancas) y áreas moteadas oscuras por el óxido de cobre	74
Figura 40 Microestructura probeta 1 a 20x	75
Figura 41 Microestructura probeta 1 a 100x	75
Figura 42 Microestructura probeta 02 a 20x	75
Figura 43 Microestructura probeta 2 a 100x	75
Figura 44 Microestructura probeta 3 a 20x	76
Figura 45 Microestructura probeta 03 a 100x	76
Figura 46 Microestructura probeta 04 a 20x	76
Figura 47 Microestructura probeta 04 a 100x	76
Figura 48 Microestructura probeta 05 a 20x	76
Figura 49 Microestructura probeta 06 a 50x	76
Figura 50 Microestructura probeta 06 a 20x	77
Figura 51 Microestructura probeta 06 a 100x	77
Figura 52 Microestructura probeta 7 a 20x	77
Figura 53 Microestructura a 50x	77
Figura 54 Microestructura probeta 8 a 20x	77
Figura 55 Microestructura probeta 8 a 100x	77
Figura 56 Microestructura probeta 9 a 10x	78
Figura 57 Microestructura probeta 9 a 100x	78
Figura 58 Imagen a 800x800 micras.....	78
Figura 59 Imagen a 80x80 micras.....	78
Figura 60 Imagen a 80 x 80 micras.....	78
Figura 61 Caracterización del material de la probeta 01 (parte A).....	79
Figura 62 Imagen en cuadrícula de 80x80 micras	79
Figura 63 Caracterización del material de la probeta 02.....	79
Figura 64 Imagen a 800x800 micras.....	80
Figura 65 Imagen a 80x80 micras.....	80
Figura 66 Imagen a 80x80 micras.....	80
Figura 67 Caracterización del material de la probeta 03.....	80
Figura 68 Imagen probeta 04 a 80 x 80 micras	80
Figura 69 Caracterización de la matriz de la probeta 04.....	81
Figura 70 Caracterización general del material de la probeta 04.....	81
Figura 71 Imagen de 800x800 micras.....	81
Figura 72 Imagen de 40x40 micras.....	81

<i>Figura 73 Caracterización del material de la probeta 05.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 74 Imagen de 800 x 800 micras.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 75 Imagen de 80 x 80 micras.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 76 Imagen de 40 x 40 micras.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 77 Imagen de 80 x 80 micras.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 78 Caracterización general del material de la probeta 06.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 79 Caracterización matriz del material de la probeta 06.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 80 Microestructura probeta 1 a 100x.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 81 Probeta 1: Imagen a 800x800 micras.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 82 Microestructura probeta 02 a 100x.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 83 Imagen SEM probeta 02.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 84 Imagen SEM probeta 02.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 85 Identificación de cada fase según su morfología para la posterior caracterización microestructural.</i>	<i>85</i>
<i>Figura 86 Imagen a 80x80 micras Probeta 03.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 87 Microestructura probeta 3 a 100x.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 88 Detalle de estructuras de óxido de cobre en un Bronce estañado.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 89 Microestructura probeta 04 a 20x.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 90 SEM probeta 04 a 80 x 80 micras.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 91 Detalle de las fases de la probeta 04.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 92 Morfología fases en el bronce NAB.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 93 Microestructura probeta 05 a 20x.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 94 Imagen SEM probeta 05.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 95 Microestructura probeta 06 a 50x.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 96 Imagen probeta 06 de 80 x 80 micras.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 97 Microestructura probeta 7 a 50x.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 98 Microestructura probeta 7 a 20x.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 99 Microestructura probeta 8 a 20x.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 100 Microestructura probeta 8 a 100x.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 101 Microestructura probeta 9 a 10x.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 102 Microestructura probeta 9 a 50x.....</i>	<i>91</i>

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1 Colores más importantes de aleaciones base cobre confortable</i>	24
<i>Tabla 2 Tiempo de penetración Vickers</i>	46
<i>Tabla 3 Soluciones químicas utilizadas en el Ataque Químico de este proyecto</i>	57
<i>Tabla 4 Parámetros de producción maquina A0 ref. Ac-0682</i>	59
<i>Tabla 5 Parámetros de producción maquina A2 ref. AC-4361</i>	60
<i>Tabla 6 Parámetros de producción maquina A2 ref. AC-4223</i>	61
<i>Tabla 7 Variables de falla mecánica en mordazas de máquinas A0 y A2</i>	62
<i>Tabla 8 Caracterización del material (SEM)</i>	64
<i>Tabla 9 Resultado de ensayo de micro dureza</i>	66
<i>Tabla 10 Composición de las probetas vs. Microdureza</i>	70
<i>Tabla 11 Microestructura de caracterización del material 1-2-3</i>	71
<i>Tabla 12 Microestructura probetas</i>	75
<i>Tabla 13 Caracterización de materiales por SEM probeta N° 1</i>	78
<i>Tabla 14 Caracterización de materiales por SEM probeta N° 02</i>	79
<i>Tabla 15 Caracterización de materiales por SEM probeta N° 03</i>	80
<i>Tabla 16 Caracterización de materiales por SEM probeta N°04</i>	80
<i>Tabla 17 Caracterización de materiales por SEM probeta N°05</i>	81
<i>Tabla 18 Caracterización de materiales por SEM probeta N° 06</i>	82
<i>Tabla 19 Microestructura y método SEM probeta 01</i>	84
<i>Tabla 20 Microestructura y método SEM probeta 02 comparación</i>	85
<i>Tabla 21 Identificación estructuras de óxido de cobre probeta 03</i>	86
<i>Tabla 22 Microestructura y método SEM probeta 04</i>	87
<i>Tabla 23 Comparación fases probeta 04</i>	87
<i>Tabla 24 Microestructura y método SEM probeta 05</i>	88
<i>Tabla 25 Microestructura y método SEM probeta 06</i>	89
<i>Tabla 26 Microestructura probeta 07</i>	90
<i>Tabla 27 Microestructura probeta 08</i>	90
<i>Tabla 28 Microestructura y método SEM probeta 09</i>	91

1. TÍTULO

DETERMINACIÓN DE MODO(S) DE FALLA(S) PARA MORDAZA DE AGARRE DE ENVASE DE VIDRIO PARA OWENS-ILLINOIS S.A.

2. INTRODUCCIÓN

Tanto los materiales, como la ingeniería han tenido una evolución con el paso del tiempo y continúan en constante transformación. Las fallas en los materiales estructurales frecuentemente nacen desde su fabricación y mediante su uso, formando y/o iniciando una irregularidad tipo grieta. A través de la historia se ha estudiado la capacidad que tiene un material para soportar determinada carga, presión, roturas durante su vida útil.

La mecánica de fractura tiene como objetivo estudiar las causas que provocan diferentes fallas en los materiales y calcular su vida útil. Así mismo estudia la capacidad de carga puntuales de los componentes fisurados y los materiales que son sometidos a altas resistencias.

La grieta de un material en condiciones de carga y operación normal generan un campo de esfuerzos alrededor; donde el factor de intensidad de esfuerzos es la tensión cuantificada, es decir que cuando el valor límite del material presenta fallas es más conocido como tenacidad de fractura. A medida que la grieta del material va creciendo así mismo se va reduciendo su resistencia o capacidad de soporte de carga, llegando a una condición crítica.

Todos los mecanismos son susceptibles a presentar cualquier tipo de falla, ya que, en condiciones y característica del material, fabricación y utilización, pueden presentar daños en donde es necesario implementar una metodología de análisis de falla, con esto establecer las causas y toma de acciones correctivas a futuro.

Este proyecto se pretende evaluar las causales de falla frecuentes en el material de estudio y por qué se presenta, por medio de un análisis en las propiedades mecánicas y fracturas del bronce del cual están hechas las mordazas de este proyecto.

3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En la elaboración de envases de vidrio de la multinacional Owens – Illinois SAS, es indispensable el uso de mordazas y/o pinzas para el agarre de envases de vidrio, durante la fabricación de las referencias. Es común que este mecanismo presente grietas, fisuras y desgaste excesivo del material durante un determinado tiempo de uso, afectando así el terminado del envase; esta es una razón suficiente para evaluar las propiedades de resistencia al desgaste y dureza.

Así mismo, determinar las causas de fallas recurrentes que generan pausas imprevistas de secciones de la máquina de producción, incrementos en los costos de mantenimiento, reparación, defectos y pérdidas de tiempo por la intervención en la corrección de la falla.

Esta investigación pretende evaluar las causales del porqué se presenta una falla recurrente en el material, por medio de un análisis en las propiedades mecánicas y en la microestructura del bronce del cual están hechas las mordazas.

El objetivo principal es identificar cuál es el motivo que hace que este material sufra daños después de un determinado tiempo, para este análisis no se conocen antecedentes enfocados en este tipo de mecanismo, por tal razón se toman algunos artículos donde se presta atención en los tratamientos térmicos aplicados a este tipo de material y sus aleaciones junto con propiedades mecánicas, estudios realizados para la mejora en su dureza y desgaste.

4. JUSTIFICACIÓN

En la ingeniería es indispensable tener un amplio conocimiento en el área de materiales, ya que esto nos permite hacer un uso adecuado de las propiedades y características de cada material. En el área de los materiales encontraremos el termino aleaciones el cual nos permite combinar las propiedades de dos o más elementos dándonos así una notable mejoría en las condiciones ya existentes, como es el caso del bronce, que al tener algunas incrustaciones con otros elementos puede aumentar las propiedades mecánicas , teniendo en cuenta que este no es el único camino para que se puedan mejorar las propiedades mecánicas, los tratamientos térmicos pueden llegar a ser una buena herramienta, ya que este no cambia las propiedades químicas sino solamente las propiedades físicas.

La presente investigación es enfocada al estudio y resolución de las fallas en las mordazas para el agarre en los envases de vidrio, ya que debido a las constantes e imprevistas fallas y paradas de producción y basándonos en el comportamiento de los componentes del material del cual están fabricadas se ha visto afectado por las altas temperaturas a las cuales está sometido. Así mismo el presente proyecto permitirá mostrar las causas por el cual el material está fallando y profundizar los conocimientos sobre las propiedades de resistencia mecánica, dureza y transferencia térmica, buscando soluciones que permitan minimizar la falla en el proceso de producción.

5. OBJETIVOS

5.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar la(s) causa(s) de falla recurrente en mordazas de agarre de envases de vidrio para la empresa Owens-Illinois S.A.

5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar el comportamiento mecánico de las mordazas de agarre de vidrio por medio de micro dureza y caracterizar fractográficamente.
- Analizar los parámetros de funcionamiento del mecanismo mordazas durante el proceso de producción.
- Caracterizar por medio de SEM la microestructura y fractura de las mordazas de agarre de envases de vidrio.
- Proponer posibles soluciones para evitar la falla recurrente en mordazas de agarre para envases de vidrio.

6. MARCOS DE REFERENCIA

6.1 MARCO TEÓRICO

6.1.1 Los envases de vidrio y su proceso

6.1.1.1 El vidrio

El vidrio es un material que se encuentra en la naturaleza, es inorgánico con dureza, fragilidad y amorfo; aunque puede ser fabricado por la industria. Se caracteriza por ser de la rama de los materiales cerámicos y su solidificación sin cristalizar. Tiene una viscosidad inferior a 10¹³ poises y su estructura no tiene orden predeterminado. Para la producción de vidrio se emplean los elementos como:

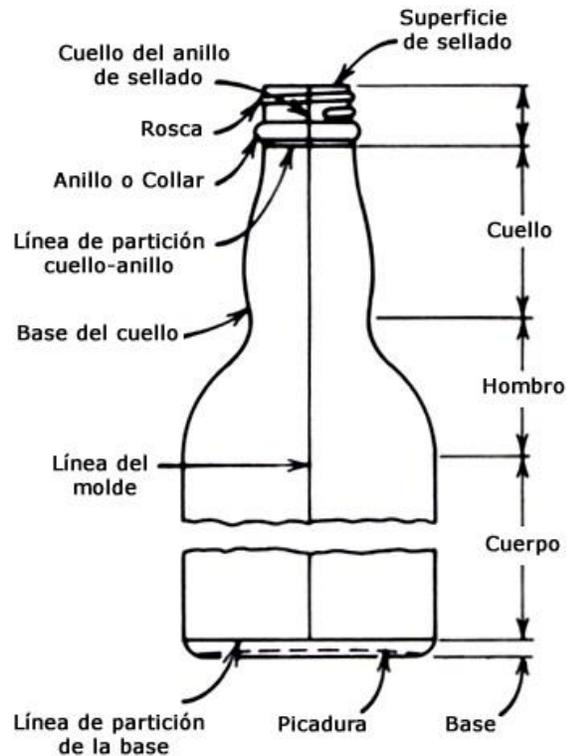
- Arena de sílice (SiO₂)
- Carbonato de sodio (Na₂CO₃)
- Caliza (CaCO₃)

Los recipientes de vidrio se consideran uno de los productos más comunes en la industria, estos recipientes se destacan por su pequeño diámetro de abertura o boca, lo que permite que un producto líquido sea envasado. Estas botellas de vidrio son de un tipo sodo-cálcico, donde sus principales características son el color, la boca, el cuello, el cuerpo, base. [1]

Una de las ventajas de estos envases es la conservación del producto que es envasado, sobre todo en los almacenamientos prolongados, ya que el vidrio es impermeable a los gases, vapores y líquidos. Por otro lado, es químicamente inerte frente a líquidos y productos alimentarios y no presenta problemas de compatibilidad. Otra de las características de este material es su higiene y además permite una fácil limpieza y es esterilizable, así como no conserva olor después de utilizado ni afecta el gusto del consumidor final. [1]

Las principales partes en un envase de vidrio son:

Figura 1 Partes principales de un recipiente



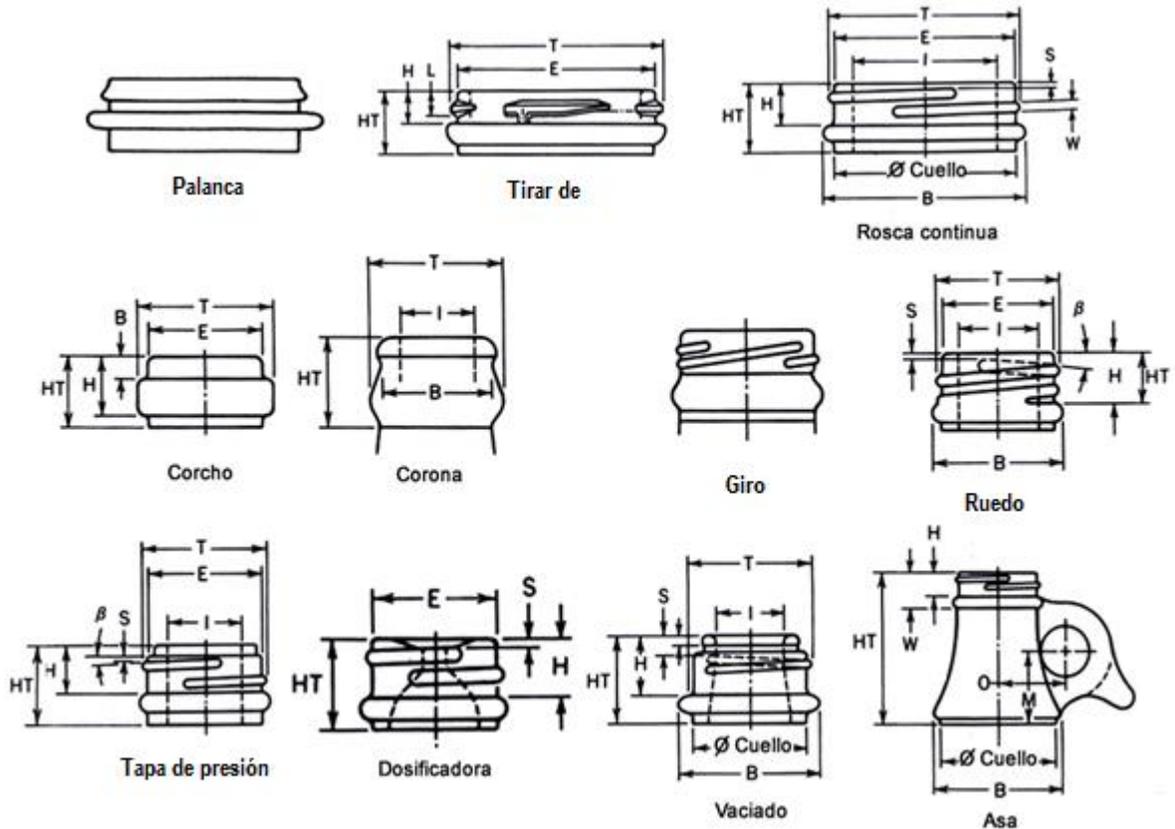
Fuente: [2]

Otras de las características técnicas de las botellas de vidrio son [2]:

- El diámetro interior y exterior de la boca dado en milímetros (mm).
- Tipo de boca o cierre.
- Altura máxima en milímetros (mm)
- Capacidad (ml)
- Peso (gramos)
- Color

Las especificaciones técnicas de los envases de vidrio se seleccionan por el tipo de terminado que se vaya a utilizar, para esto existe un marco normativo muy completo según el tipo de terminado. En la figura 2 se muestran algunos tipos de bocas más habituales en el mercado:

Figura 2 Principales tipos de terminados para envases de vidrio



Fuente: [2]

6.1.1.2 Proceso de fabricación y manipulación del vidrio

En la industria de los envases de vidrio actualmente se utilizan dos procesos básicos en su fabricación, que son:

- Soplado-soplado: recipientes, frascos o botellas de boca estrecha
- Prensado-soplado: recipientes, frascos o botellas de boca ancha.

La maquinaria que se utiliza en este proceso son tipo IS, es decir; máquinas de selección individual o independiente que son alimentadas por un horno o varios en donde pueden llegar a temperaturas de 2000°C y soporten una producción de 300 a 500 envases por minuto y manipular toneladas de vidrio al día.

En el proceso de elaboración de las botellas de vidrio, inicia cuando las materias primas son mezcladas y conducidas a un horno de fusión a temperaturas aproximadas de los 1000°C . Sea uno o varios hornos en el proceso. Dichos hornos funcionan las 24 horas del día los 365 días del año, donde su vida útil es de 12 a 15 años aproximadamente. En él se introducen las materias primas, una vez fundidas

y acondicionadas, estas son llevadas por un ducto refractario (alimentadores), a través de un Fedeer, el vidrio fundido es cortado hasta la formación de una gota, esta es distribuida en las diferentes secciones de la maquina por medio de canales de distribución hasta llegar a los moldes que posee el mecanismo, donde una serie de procesos de presión da forma a los envases. [1]

Figura 3 Maquina IS independiente con 6 secciones, Owens-Illinois S.A. (Planta Vidriería Fenicia)



Fuente: Autor del proyecto

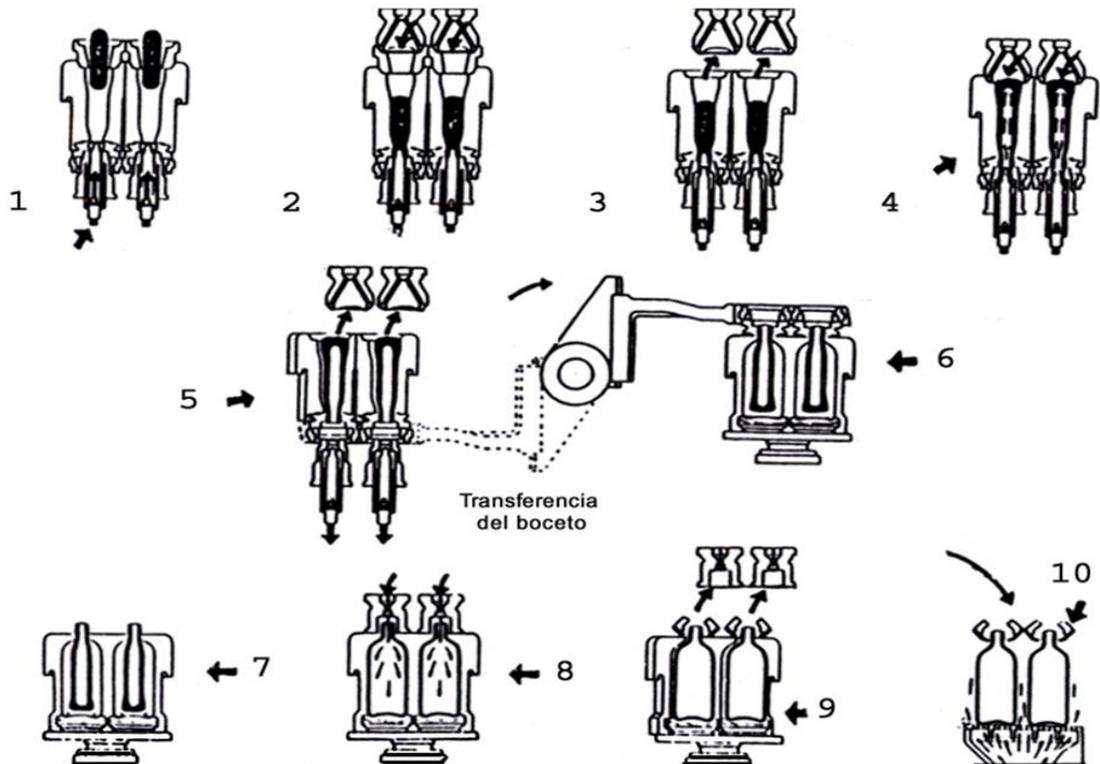
Los envases se distinguen en dos familias:

- Botellas, destinadas generalmente a contener productos líquidos.
- Envases, diseñados para alimentos sólidos y semisólidos.

En el proceso de fabricación existen dos técnicas: soplo-soplo, utilizado para la fabricación de botellas, prensado – prensado, utilizado para los envases de boca ancha como también boca estrecha. Las máquinas para este tipo de producción funcionan de forma independiente ya que está dividida por secciones, donde se puede trabajar en SG (gota sencilla –“un envase por sección”-) o DG (Doble gota – “Dos envases por sección”-) hasta de tres y cuatro gotas por sección. [1]

Una vez ya pasado el envase por un lado pre molde y un lado molde, la botella es sujeta por pinzas para efectuar su enfriamiento, el envase es sostenido por las pinzas unos segundos encima de las planchas de enfriamiento, últimamente se realiza el desplazamiento y liberación del envase sobre el Cross (cinta transportadora), es llevado a un túnel llamado archa donde entra a un proceso de recocido para evitar la formación de tensiones internas (debidas a un enfriamiento rápido) donde se van controlando temperaturas hasta su enfriamiento. Es así como adquiere un mayor grado de resistencia [1]. Ver Figura 4

Figura 4 Técnica de formación de envases



Fuente: [3]

1. La gota de vidrio es formada desde los alimentadores y es conducida a la sección del equipo de entrega que están conformados por: embudos intermedios, cucharas del distribuidor, canales y deflectores. Este proceso se cataloga "Cargue". Las piezas de moldura en este punto son de pre-molde, se encuentran en posición para recibir la gota de vidrio y dar forma. Es importante saber que la gota debe ser de la misma forma de la cavidad del pre-molde.
2. **Soplo inicial:** una vez la gota cae al pre-molde, la tapa cae en él y se da el primer soplo o soplo de asentamiento.
3. Recalentamiento del terminado, se procede a la formación del terminado.
4. **Contra soplo:** en este paso, por medio de un mecanismo llamado aguja el vidrio recibe un soplo de aire para la formación de las paredes del envase.
5. **Transferecia:** este se realiza cuando el pre-molde se abre y pasa por medio de un mecanismo de inversión para el lado molde.
6. **Sopladora abajo:** nuevo ciclo de soplos para la terminación del envase.
7. **Estiramiento:** la sopladora se posiciona para estirar el vidrio y dar formación al envase.
8. **Soplo final:** el aire que entra a presión previamente regulado es el encargado de dar forma final a la botella. Y sus presiones varían según la referencia del envase.

9. **Recalentamiento de la botella:** al terminar el sople final, el molde se abre; la botella ya está formada y a continuación vienen unas PINZAS que se abren y cierran, toman la botella y hacen el recorrido desde el molde hasta una plancha muerta.
10. **Enfriamiento:** las pinzas transportan el envase a un enfriamiento por un tiempo determinado en unas planchas muertas, este es un sople de aire a determinadas presiones antes de ser soltada y empujada por un barredor hacía la banda transportadora. [1]

6.1.2 El Material de Pinzas de Agarre

6.1.2.1 El bronce

El bronce es un material compuesto por aleaciones de cobre, estaño, plomo, zinc, aluminio y silicio. Esta aleación tiene como principal compuesto químico es el cobre; como base inicial y una variable proporción de estaño en la colada, y otros compuestos entre 3 – 20% para generar una mayor concentración con el objetivo de generar una mayor resistencia y obtener características de dureza mayores al cobre. [4]

Este material tiene dos tipos:

6.1.2.1.1 Bronces de baja concentración / Bronces rojos

Esta mezcla tiene aleaciones de cobre con estaño, plomo y zinc, donde se destacan los siguientes: [5]

- C905000 SAE 62: Aleación de bronce más estaño, este compuesto se identifica por tener una gran resistencia al desgaste y al ataque con elementos ácidos.
- C907000 SAE 65: Este compuesto tiene gran resistencia a la corrosión.
- C93700 SAE 64: Aleación de bronce más estaño y plomo, este compuesto se identifica por tener una buena manejabilidad, resistencia mecánica, descaste, soporta cargas pesadas y resistentes a la corrosión.

6.1.2.1.2 Bronces de Alta concentración / Bronces Amarillos

Esta mezcla tiene aleaciones de cobre con hierro, aluminio, manganeso y silicio. Donde se destacan: [5]

- C61400 AMPCO 8: Material resistente al desgaste y a la corrosión, y puede llegar a una dureza de 84 Rockwell B
- C95400 AMPCO 18: Material resistente a la abrasión, fatiga y tiene una deformación baja. Tiene una dureza mayor que los de la cadena del 8.

6.1.2.2 Nomenclatura de los bronce [5]

- C1xxxx (cobre>99.3) y cobre alto (99.3>Cu>96)
- C2xxxx aleado con Zn (latones)
- C3xxxx aleado con Zn y Pb (latones de plomo)
- C4xxxx aleado con Zn y Sn (Latones de estaño)
- C5xxxx aleado con Sn (bronce fosforados)
- C6xxxx aleado con Al (bronce al aluminio) aleado con Si (bronce al silicio)
- C7xxxx aleado con Ni y Ni-Zn (plata de níquel)

6.1.2.3 Las propiedades del Cobre y sus aleaciones

El cobre además de tener una buena resistencia mecánica, fatiga y la confortabilidad, existen otras propiedades que se pueden o se deben tener en cuenta en la utilización de este elemento:

- Resistencia a la corrosión:

El cobre (Cu) es un metal noble y puede ser atacado por reactivos comunes o por el medio ambiente. El (Cu) puro resiste muy bien los ataques corrosivos de la mayoría de los medios agresivos, sin embargo, algunas aleaciones de Cu tienen una utilidad limitada en determinados medios debido a que sufren degradación por causa del fenómeno de fragilidad por hidrogeno y corrosión bajo tensiones. [5]

- Conductividad Térmica:

El Cu y sus aleaciones son muy buenos conductores del calor puesto que exhiben un número elevado de electrones libres que participan en la conducción térmica. La propiedad que caracteriza la capacidad de un material para trasportar calor se define por la expresión:

$$q = \frac{dT}{dx}$$

Ecuación 1 Flujo de calor

Donde (q) representa el flujo de calor que atraviesa la unidad de área (perpendicular a la dirección del flujo de calor) por unidad de tiempo. La unidad de (q) es: W/m² y W/m-k respectivamente. [6]

- Color

El cobre y sus aleaciones se utilizan con fines decorativos solo, o cuando un color y acabado particular se combina con una propiedad mecánica o física deseable de la aleación. La tabla a continuación enumera la gama de colores que pueden ser obtenidos con aleaciones de cobre estándar. [6]

Tabla 1 Colores más importantes de aleaciones base cobre confortable

Numero UNS	Nombre común	Color
C11000	Cobre electrolítico	Rosado
C21000	Metal dorado, 95%	Marrón-rojizo
C22000	Bronce comercial, 90%	Bronce dorado
C23000	Latón rojo, 85%	Marrón-dorado
C26000	Latón de cartuchería, 70%	dorado verdoso
C28000	Metal de Muntz, 60%	Marrón dorado claro
C63800	Bronce al aluminio	dorado
C65500	Bronce con alto silicio, A	Marrón-lavanda
C70600	Cobre-Níquel, 10%	Lavanda suave
C74500	Níquel-Plata, 65-10%	Blanco grisáceo
C75200	Níquel-Plata, 65-18%	plateado

Fuente: [6]

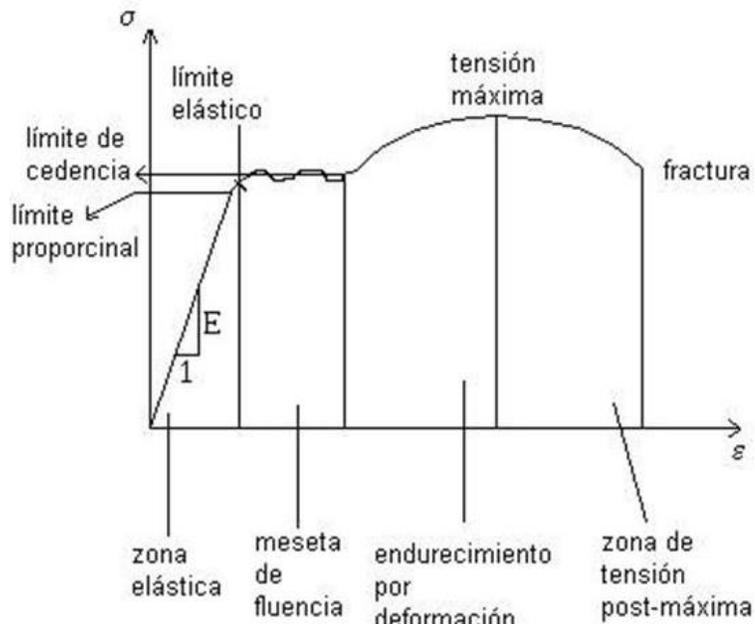
6.1.2.4 Influencias de aleaciones

- **Aluminio:** Aumento de resistencia al desgaste, no es recomendable en bronce de baja concentración ya que genera oxidación en el material.
- **Estaño:** da firmeza al asentamiento de corrosión, propiedades mecánicas más altas.
- **Fosforo:** disminuye el tamaño del grano del material y aumenta la dureza.
- **Hierro:** disminuye el tamaño del grano del material y aumenta la dureza.
- **Níquel:** Aumenta la resistencia de alargamiento y tracción, mejorando la estructura.
- **Plomo:** crea una capa en la colada donde hace que el material llegue al estado de oxidación.
- **Silicio:** en bronce de baja concentración no es recomendable su uso este genera zonas quebradizas, afectando la cristalización de la aleación.
- **Zinc:** incrementa las propiedades mecánicas en especial la dureza del material, el proceso de soldadura se hace más conforable y más resistente a la corrosión.

6.1.3 Análisis de falla en un material.

La falla en un material o fractura se da cuando se gasta debido a la aplicación de diferentes cargas externas. En la mayoría de los casos la fractura se asocia a la limitación y al esfuerzo basado en la curva de esfuerzos (ver Figura 5). En una deformación de los materiales es probable que se agriete o rompa a esfuerzos menores, que su resistencia a la tensión o al esfuerzo de fluencia.

Figura 5 Diagrama esfuerzo – deformación

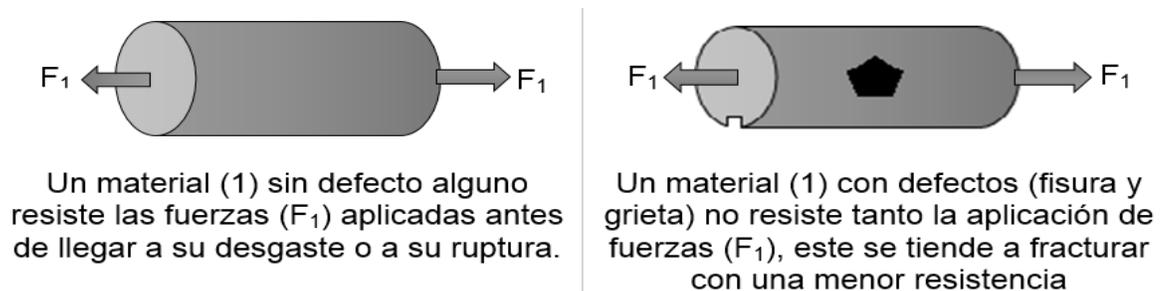


Fuente: [7]

Las fracturas de los materiales expuestos a esfuerzos menores se deben a la presencia de:

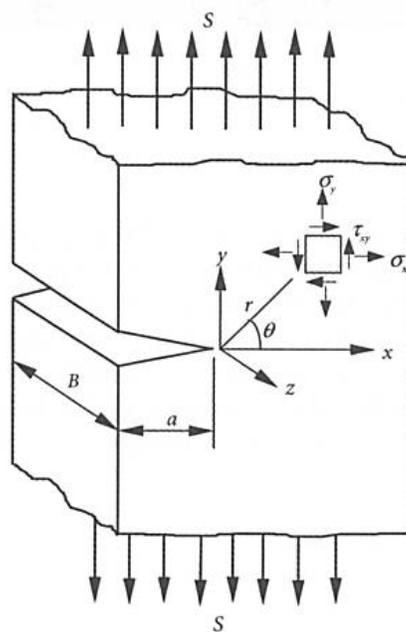
- Defectos de fabricación del material
- Fisuras.
- Grietas

Figura 6 Comparación de mismo material y aplicación de la misma fuerza



En un sólido, las grietas generan un campo de esfuerzos elásticos, de tal manera que se desplazan perpendicularmente al plano de la fractura. Como lo muestra la figura 7 [8].

Figura 7 Coordenadas del campo de esfuerzos de una grieta



Fuente: [8]

Donde $[r, \theta]$ son las coordenadas polares de un elemento de material en la vecindad del frente de grieta. [8]

Teniendo en cuenta la redistribución de los esfuerzos de deformación plástica frente a una grieta, Irwin estimó la expresión de la zona plástica en el frente directo de punta de grieta r_p , donde se da la siguiente expresión [9].

$$r_p = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_I}{S_y} \right)^2 \quad \text{para esfuerzo plano}$$

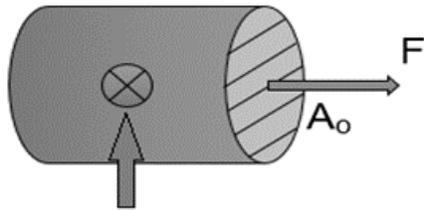
Ecuación 2

Es decir que el tamaño de la zona plástica en deformación plana es aproximadamente 1/3 del tamaño de la zona plástica en esfuerzo plano. [8]

6.1.3.1 Tenacidad de fractura

Esta mide, la capacidad que tiene un material con imperfecciones para resistir las fuerzas que serán aplicadas, sin que este llegue al punto de fractura.

En un bloque de material, el esfuerzo en la zona donde se encuentra ubicado el defecto y sus alrededores hace que este sea mayor que el esfuerzo nominal, ya que en la demarcación de la imperfección lo que hace es aumentar el esfuerzo real del material.



$$\text{Esfuerzo nominal: } \frac{F}{A_o}$$

Ecuación 3

El factor de intensidad del esfuerzo K mide cuanto puede llegar a resistir un material y se define por la siguiente ecuación.

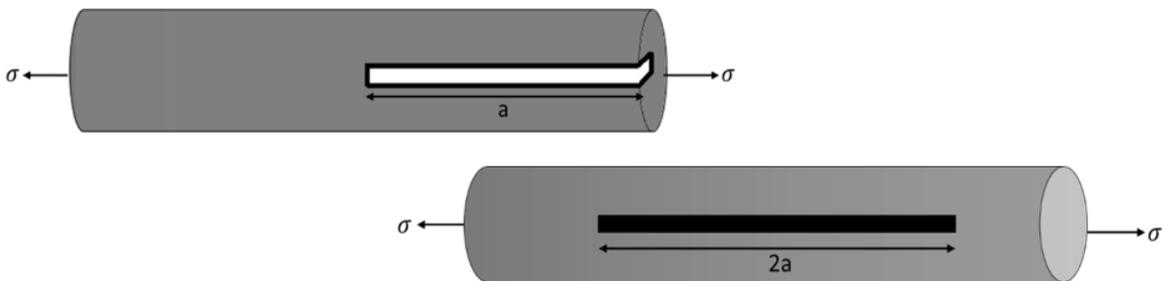
$$K = F\sigma\sqrt{\pi a}$$

Ecuación 4

F: factor geométrico (fuerza aplicada)

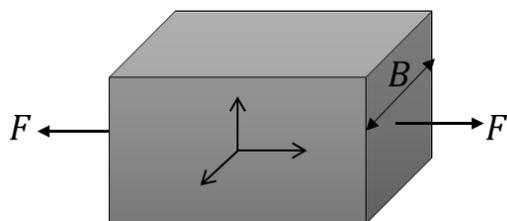
σ : esfuerzo nominal aplicado

a: tamaño del defecto (si el defecto es en la superficie se toma la longitud total. Si es interno, se toma la mitad)



El valor de K hace que la imperfección crezca y cause la falla, se llama tenacidad de fractura o intensidad del esfuerzo y está dado por K_c . Este depende mucho del espesor del material por tal motivo es considerado una propiedad mecánica

$K_c = K$; este es requerido para que la imperfección cause fractura y crezca.



Si el material tiene un espesor mayor a 2.5 cm; los esfuerzos, defectos y deformaciones son a nivel tridimensional.



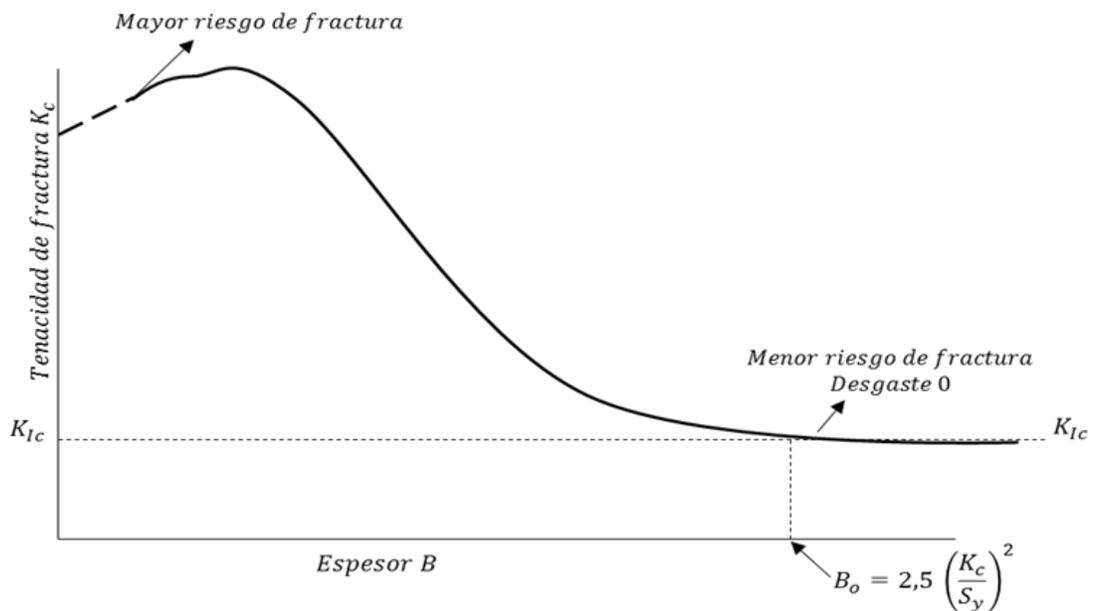
Si el material tiene un espesor menor a 2.5 cm; las deformaciones y los defectos se mantienen en el plano. Esto se llama deformación plana

El valor de K_{Ic} en la deformación plana es totalmente autónomo del espesor del material por ende se considera una propiedad mecánica. Esta propiedad se llama K_{Ic} tenacidad a la fractura en deformación plana.

Si se considera el efecto del espesor B en la tenacidad de fractura K_{Ic} , por lo general se observa experimentalmente una variación esquemáticamente como lo muestra la Figura 8. [8]

K_{Ic} se considera como la propiedad del material que cuantifica la resistencia a la prolongación de grietas. [8]

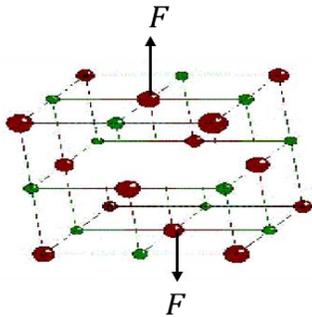
Figura 8 Efecto del espesor en la tenacidad de fractura



Fuente: [8]

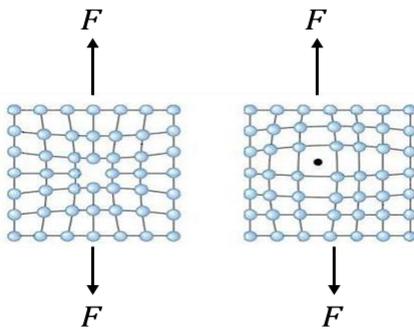
El material se le encuentra una rotura debido a que en unos de sus defectos se prolonga espontáneamente, dilatándose en el material. En los materiales pueden ocurrir dos cosas importantes para que las imperfecciones crezcan.

- Se destruyen los enlaces químicos de los átomos.



Los átomos ubicados en la superficie del defecto del material, se encuentra con más represa de energía que los otros que se encuentran a su alrededor.

- Formación de una superficie nueva, donde está por medio de la falla se forma.



Cuando se le aplica una fuerza al material, este tiende a su deformación. Las conexiones entre los átomos tienen una elongación guardando una energía elástica.

Cuando las conexiones entre el enlace químico de los átomos comienzan a romperse o se elongan por las fuerzas aplicadas, se libera un almacenamiento de energía estática. Al inicio de la destrucción de estos enlaces se va formando la superficie del defecto hasta llegar a la falla o fractura. La nueva superficie va reservando energía elástica para que se valla formando, donde se relacionan dos tipos de energía:

- Una liberación de energía elástica almacenada
- Una absorción de energía guardada para la formación de la nueva superficie de la fractura.

Ante las causas anteriormente nombradas, existen dos posibilidades:

1. Cuando la energía elástica es minoritaria a la energía requería no se produce una formación de superficie de falla del material. La grieta que se genera en el material no se puede prolongar ya que la superficie no se puede formar. En este caso el material puede llegar a resistir las fuerzas aplicadas sin que se llegue a la falla.

2. Cuando la energía elástica es mayor a la energía requería se produce la formación de superficie de falla del material. La grieta que se genera en el material se prolonga hasta llegar a la fractura.

6.1.3.2 Falla en los materiales y tipos de Fractura

En el mundo de los materiales existe la probabilidad que estos lleguen a tener alguna falla, como también ha crecido el estudio para saber la causa de su origen y la disminución de estas. La falla de un material está muy ligada a fractura del elemento, por eso es importante tener claro los tipos y las causas por las que se dieron dicha falla. [10]

6.1.3.3 Causas de falla

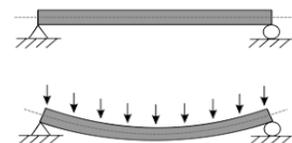
El origen del deterioro de los materiales está directamente relacionado con:

- Producción inapropiada en la pieza. (tratamiento térmico y mecanizado)
- Selección del material inadecuado para lo cual va a ser sometida la pieza o herramienta.
- Cálculos erróneos de diseño. (diámetros, longitudes, esfuerzos y espesores).
- Mal mantenimiento de servicio en la herramienta o pieza.

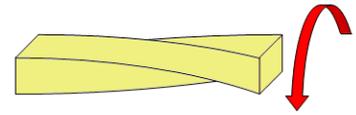
6.1.3.4 Esfuerzos y cargas

En las fallas de los materiales, es necesario que se aplique una fuerza externa sobre el elemento. Teniendo claro que la fuerza no es la causa de fractura. Los tipos de carga son:

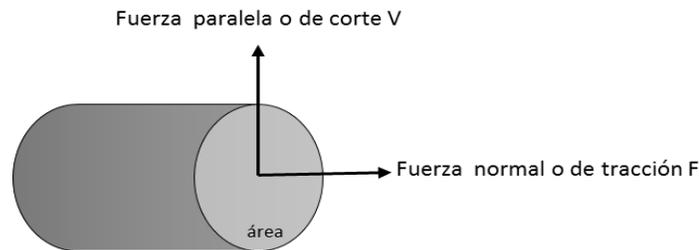
- Tensión: estas son las que se dan en sentidos opuestos al material.
- Compresión: las cargas tratan de comprimir el elemento.
- Flexión: fuerza aplicada perpendicular al eje longitudinal de la pieza.



- Torsión: las fuerzas aplicadas van en sentido tangencial al eje longitudinal de la pieza, generando un movimiento en giro o deformación angular. Los que son sometidos a esta fuerza tienden a retorcerse.
- Cortante: dos fuerzas aplicadas contrarias en una sección transversal del material, con un movimiento proporcional entre ellas.



Los esfuerzos, es una resistencia interna que tiene todo tipo de material en la aplicación de fuerzas, en él se encuentran dos tipos: la axial y la de corte.



6.1.3 Fractografía

La definición de fractura es la separación de un material sólido en dos o más cuerpos debido a una fuerza externa a él, mediante un proceso de deformación plástica. Es importante el análisis y clasificación de la rotura para determinar las causas que la provocan.

El estudio de las diferentes formas de un material, su comportamiento bajo a diferentes condiciones de trabajo ha llevado al desarrollo de diferentes estudios para tratar de resolver las causas que originan este inconveniente.

Cualquier causa que se presente con el material, está relacionada con la procedencia de éste; entre los materiales metálicos la falla originada por una fractura es el principal problema.

En la deformación plástica de un material expuesto a una carga equivalente se rompen los átomos de superficie llegando a la reducción de valores en el área, a esto se le determina fractura dúctil. Cuando una fractura no llega a la plasticidad y en la zona de región lineal presenta fisuras pequeñas prolongadas rápidamente sobre la superficie con una baja energía superficial se le denomina fractura frágil.

En algunas ocasiones puede ocurrir que en el mismo material ocurran las dos fracturas, pero por regla solo pueden ser dúctiles o frágiles. [10]

6.1.4.1 Fractura dúctil [11]

Esta se origina cuando un material es sometido a una desmesurada deformación plástica, esto se origina en materiales que tienen una zona de deformación plástica considerable. Tiene las siguientes características:

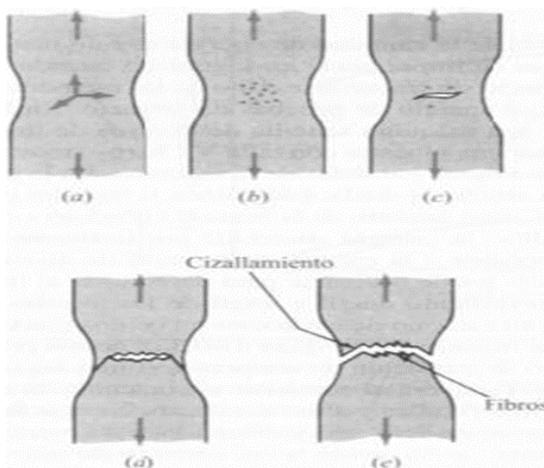
- A) Formación de cuello de botella en el área fracturada.
- B) Desproporción plástica permanente.
- C) Elongación del material.
- D) Reducción del área transversal

Las principales causas que ocasionan una fractura son las impurezas del material, y las incrustaciones que esta pueda tener (carburos, óxidos, etc.). Cuando la carga máxima no es la misma el material se deforma plásticamente y alcanza su carga máxima cediendo hasta llegar a fracturarse. [10]

En una prueba de tensión realizada a una aleación (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), se contemplan los siguientes pasos:

- A) Formación del cuello de botella y agrupación de esfuerzos en la parte central de la probeta (a y b)
- B) Los esfuerzos provocan que el material empiece a fracturarse y la fractura se empieza a propagar. (c)
- C) La fractura llega a la superficie y aparece de forma total provocando la falla de la probeta. (d y e)

Figura 9 Fases de una fractura frágil



Fuente: [12]

6.1.4.2 Fractura frágil

Suele ocurrir antes o durante una deformación plástica, esta se origina especialmente en materiales no cristalinos, a temperaturas muy bajas la que en estas temperaturas no existe ningún movimiento atómico, lo que evita una deformación plástica en este tipo de fractura se define por el inicio de la fractura a nivel intergranular y propagación de la fractura.

En el inicio de una fractura intergranular es importante realizar un esfuerzo normal en un área específica de un par de planos cristalinos, este esfuerzo debe ser mayor a la resistencia de adhesión de los planos. Los diferentes casos muestran que el esfuerzo que se requiere es mayor a 106 PSI, en el caso que no se presente ninguna concentración de esfuerzos en el material. [10]

Este esfuerzo en algunos casos se puede generar mediante la presencia de una deformación plástica y para que aparezca debe existir dos condiciones:

1. Las dislocaciones provocadas por la deformación deben interactuar entre sí para generar largas concentraciones de esfuerzo.
2. El material no debe aumentar su resistencia a los esfuerzos a causa de la deformación.

Por el contrario, la fractura rápida se da por la expansión de grietas en el material. Una vez la grieta crezca, las cargas internas de la estructura se aceleran y se propagan para llegar a la ruptura final.

La clasificación se da por medio de macroscópica o microscópica. En la observación de la fractura se conoce:

- **La textura:** esta determina por la velocidad de propagación. Las que tienen una rápida prolongación presenta una superficie áspera y las de lenta prolongación presenta una superficie más suave.
- **Color:** plata o negro. El color define el tipo de fractura.
- **Reflectividad:** el punto de haz de luz. Fractura brillante es frágil y las dúctiles poco se reflejan a la luz
- **Superficie.**

En la mecánica de fracturas se buscan siempre tres parámetros importantes para buscar las tensiones y longitud de las grietas. [5]

1. Las fuerzas aplicadas en el material (σ).
2. Las propiedades de resistencia del material y sus principales características.
3. El tamaño de grieta.

6.1.4.3 Aportes al método de fractografía en análisis de falla

El resultado de un estudio de falla es determinar las causas por las cuales el material presenta roturas en servicio y la manera eficaz de evitarlo, cambiando y a su vez modificando su diseño y material.

En las investigaciones en las que se contribuyó a los análisis de falla óptica y electrónica, se han llegado a conclusiones principales de rupturas por medio de tensión o sobrecargas que se produjeron en el material de forma excesiva. Como ejemplo se toma la carga final para observar en estudio si este se dio por proceso de corrosión o fatiga en el material.

La observación de la superficie de fractura puede proporcionar información sobre los siguientes parámetros, que caracterizan la rotura del componente o probeta de laboratorio: [11]

- Mecanismo de propagación de la fisura.
- Fractotenedad del material.
- Configuración de tensiones: distribución y magnitud.
- Medio químico.
- Origen de la fractura

En las fracturas, cuando hay mayores componentes de análisis se puede estudiar los orígenes o comienzos de esta. Todo se empieza con una observación visual del exterior donde se obtiene la primera información de sus inicios como: dirección de prolongación, tamaño de grieta, y por último el núcleo.

6.1.4.4 Fractografía Óptica

En el estudio de las superficies de fallas de un material, se puede observar a bajos aumentos como puede ser: a simple vista, lupa, o por medio microscópico. Estos medios pueden dar a conocer información de los aspectos, geometrías y condiciones físicas que produjeron a la grieta [11].

6.1.4.5 Fractura por tracción [11]

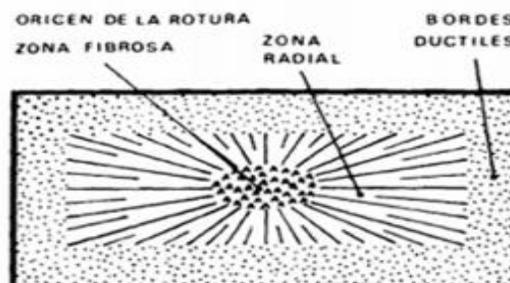
En este tipo de falla se tiene en cuenta los componentes principales al que fue sometido el material, dando así unas marcas características en él. En la distinción de la fractura es importante tener en cuenta si es dúctil (sometido a alta energía) o frágil (sometido a baja energía), este indicador nos brinda el grado de ductilidad o fragilidad del material cuando es sometido a diferentes cargas o mecanismos de trabajo, por tal motivo aparecen tres (3) etapas de zonas en una fractura:

1. **Zona fibrosa:** se forma y da origen de la fisura. En este caso la zona que es afectada por la grieta presenta una mayor concentración de energía y por este motivo hay una deformación plástica, que es causada generalmente por imperfecciones en el material.
2. **Zona radial:** las grietas originadas en esta zona son causadas por las condiciones de inestabilidad del material, microestructura, temperatura a la que es sometida, y tienden a que su propagación sea rápida. Esta superficie puede presentar dos tipos de marcas como son las finas (aceros de alta resistencia, estructurales, baja temperatura) y las gruesas (aceros baja resistencia y temperaturas ambientes o superiores). Es común que las huellas que deja esta fractura sean rectas.
3. **Zona de bordes dúctiles:** en esta faceta se da la extensión de la fisura desde la superficie al interior del material produciendo así una tensión dentro de él y afectando sus propiedades mecánicas. En esta zona es importante resaltar las posibles secuencias que se pueden llegar a presentar en un material junto con otras zonas de falla:
 - Zona fibrosa – borde dúctil
 - Zona radial – borde dúctil
 - Zona fibrosa – zona radial – borde dúctil
 - Borde dúctil solamente

En la Figura 10 y 11 se ilustra las variaciones de las zonas de un material que presenta fracturas en una sección y en diferentes espesores:

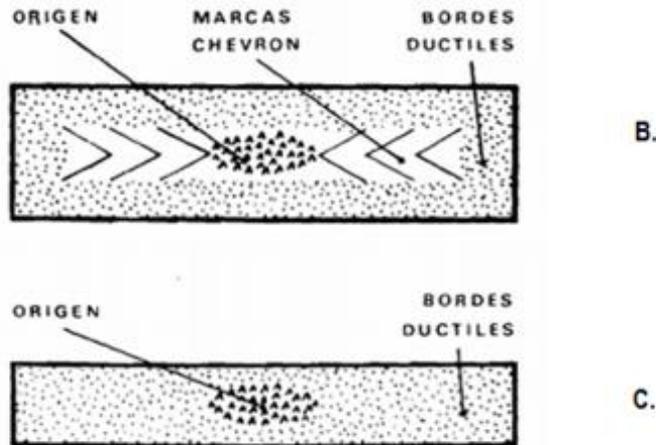
- A. La formación de una zona fibrosa a partir de una falla mecánica, luego como se expande a una zona radial y su formación de bordes dúctiles.
- B. A partir del origen de una zona radial se ve la formación de las marcas chevron que van apuntando hacia el inicio de la fractura.
- C. En muestras muy delgadas es muy difícil encontrar zonas radiales en ella, ya que no aparecen.

Figura 10 Esquema de superficies de una falla por tracción (Origen de rotura)



Fuente: [11]

Figura 11 Esquema de superficies de una falla por tracción



Fuente: [11]

En la figura siguiente, hay una variación de espesores donde se va afectado el material y la presencia de marcas en cada zona, tanto en A, B y C hay un punto de origen el cual es causado por presencia de formación de poros o fisuras que se van prolongando hasta llegar al punto de falla. En el numeral C presenta un centro de origen de falla y un borde dúctil, ya que su espesor es menor y da comienzo a zona fibrosa alrededor.

En la figura 12 y 13 se ilustra cómo puede ser los inicios de falla en un material a diferentes temperaturas que se van presentando en un proceso.

- A. A temperaturas bajas (por debajo de temperaturas ambientes), el tipo de fractura que se origina es frágil, en la observación se reflejan marcas chevron con mayor propagación y en dirección de la fractura por donde se va originando con mayor intensidad.
- B. A temperaturas medias (37°C - 750°C) las marcas se van desplazando con una inclinación de 45° y dando origen a bordes dúctiles.
- C. Temperaturas mayores a 760°C , los orígenes de fractura son totalmente dúctiles y esta se genera a 45° de las marcas chevron.

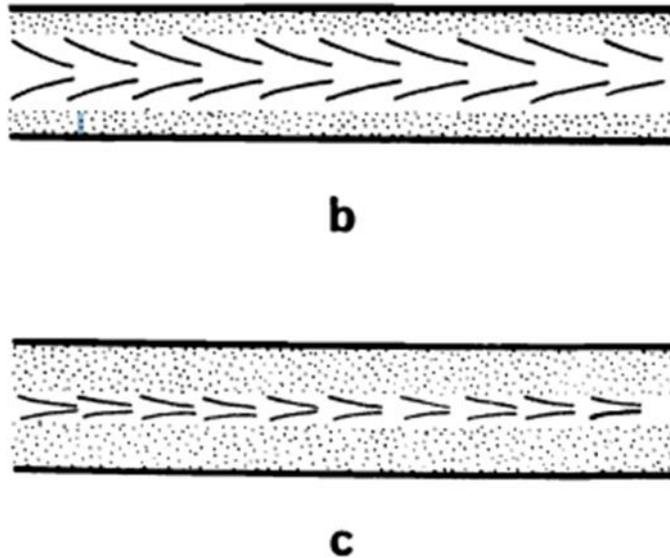
Figura 12 Superficies de fractura sometidas a diferentes temperaturas



a

Fuente: [11]

Figura 13 Superficies de fractura sometidas a diferentes temperaturas



Fuente: [11]

6.1.4.6 Fractura por fatiga [13]

Las fallas por fatiga son esfuerzos cíclicos o repetitivos de componentes metálicos que se rompen a tensiones menores de aquellas que puedan soportar. Esta falla se origina en un punto de concentración, en un extremo, extendiéndose casi completamente por toda la sección antes de que ocurra la fractura final.

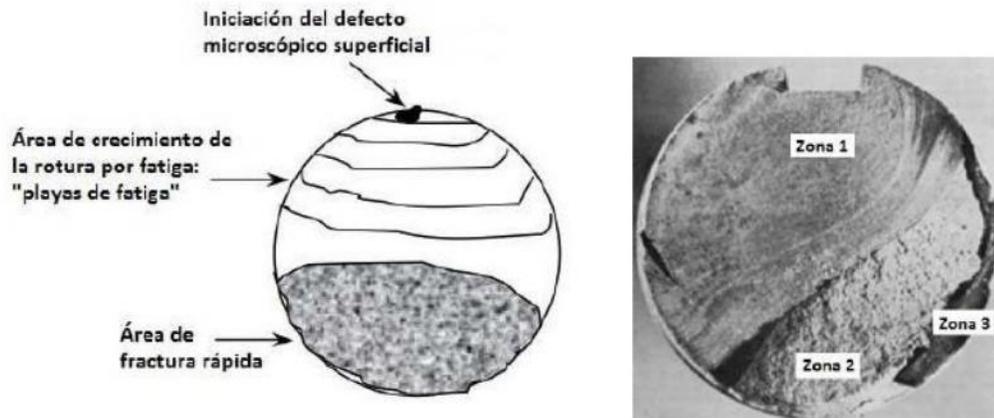
En el ensayo de fatiga, se utilizan numerosos tipos de ensayo para determinar la vida o fatiga del material, el que se utiliza normalmente, es por flexión rotativa en el cual la probeta se somete a tensiones de tracción y compresión de la misma magnitud durante la rotación, el número y ciclos que causa la fractura aumenta a medida que la tensión disminuye.

En este tipo de fractura, se aplican esfuerzos por encima del límite elástico de cada material, esto va generando una deformación en cada ciclo de uso o proceso, formando una falla en el material. En los estudios de análisis de falla por fatiga es importante tener en cuenta toda la superficie de la pieza, debido a que esta puede brindar información como el resto de la estructura por donde se dio el inicio de propagación de fractura.

En este tipo de fractura se presentan diferentes tipos de marcas según las propiedades mecánicas del material.

- **Marcas playa o Beach Marks:** la presencia de estas marcas identifica que el material presenta una falla por fatiga y es la más común en este tipo de procesos. Estas aparecen cuando el material ha sufrido una detención, y muestra sus orígenes ya sea por: a) deformación plástica (interrupción de procesos o periodos de esfuerzos cortos) b) por corrosión (exposición a un medio ambiente agresivo).

Figura 14 Marcas de playa en una superficie



Fuente: [13]

-
- **Marcas de nivel o Ratchet Marks:** estas se presentan perpendiculares a la superficie y tienen el mismo parecido a las de playa.
- **Estrías**

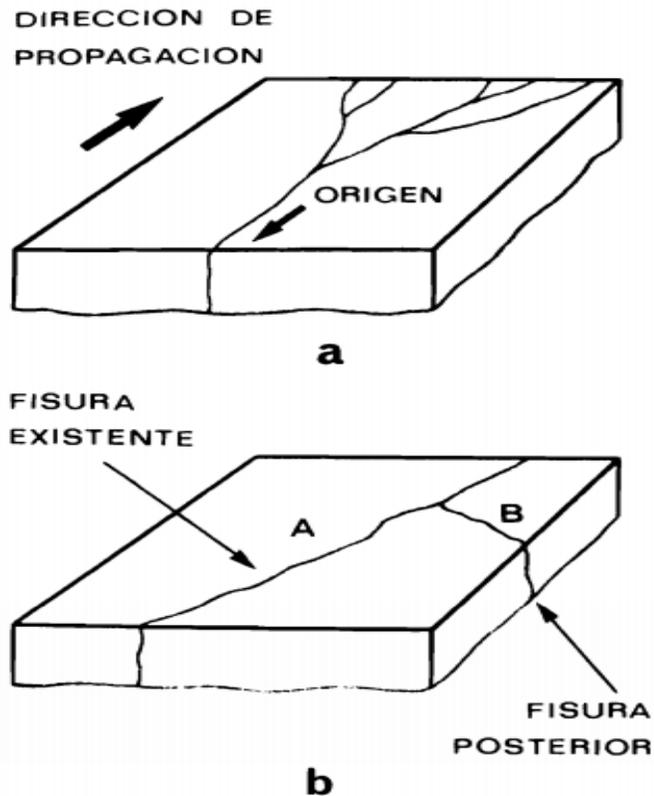
6.1.4.7 Identificación del origen de una fractura [11]

Todo análisis de falla es identificar el componente que dio origen a la rotura en un material, y poder identificar el punto de origen y la dirección de propagación, los ángulos de encuentro entre fisuras generalmente son muy cercanos a los 90° , es muy probable que una nueva fisura se de gracias a otra existente.

En la figura 15 se muestra como determinar el origen de la fractura.

- A) El origen de la fractura se encuentra en la dirección opuesta a la ramificación de la fisura.
- B) Si una fisura B termina en otra fisura A bajo un ángulo próximo a los 90° , el origen de la fractura debe buscarse siguiendo la fisura A, puesto que ésta es anterior a la fisura B.

Figura 15 Orígenes de fracturas



Fuente: [11]

6.1.4 SEM (microscopio óptico de barrido)

Gracias a las investigaciones y análisis Max Koll Glas en el año 1930, Manfred Von Arden quien inventa en 1937 el MEB (instrumento de haz de electrones), que con actualizaciones del autor se convierte en un microscopio electrónico de barrido. Donde su principal función es dirigir a un punto preciso y exacto en la superficie de la muestra, albergando una señal electrónica emitiendo imágenes de alta apariencia y resolución dentro los intervalos amplios de forma tridimensional. Lo cual facilita determinar hasta los más mínimos mecanismos que se producen dentro de la evolución de la fractura, debido al aumento de la imagen a través de los lentes. [8]

También funciona o realiza microanálisis de partículas detallando la presencia cuantitativa o cualitativa de materias, como es el caso de los aceros u otras combinaciones metálicas con dos o más elementos. El SEM se utiliza especialmente cuando se investiga o se hacen estudios de materiales que requieren un análisis profundo de sus diferentes superficies o roturas en las que ha fallado

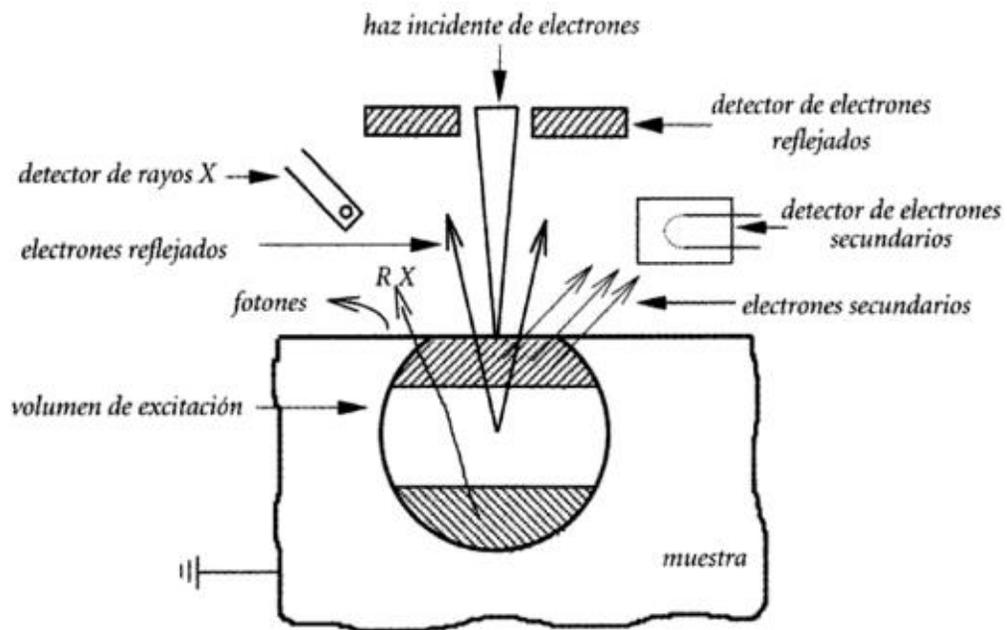
como también posibles causas. Cabe anotar que pueden ocurrir varias clases de fracturas: [8]

- **Fractura intergranular:** la que se produce entre cristales y granos.
- **Fractura transgranular:** rotura que se hace a través de los granos que propagan en los materiales cristalinos o en la combinación de ambas dando la sensación de profundidad.

En el SEM, por medio de los rayos x, una muestra de material puede brindar información de cada uno de los componentes y aleaciones, lo cual es captado con un detector como se puede apreciar en la figura 16, que al producirse una señal eléctrica facilita determinar hasta los más mínimos mecanismos que se producen dentro de la evolución de la fractura.

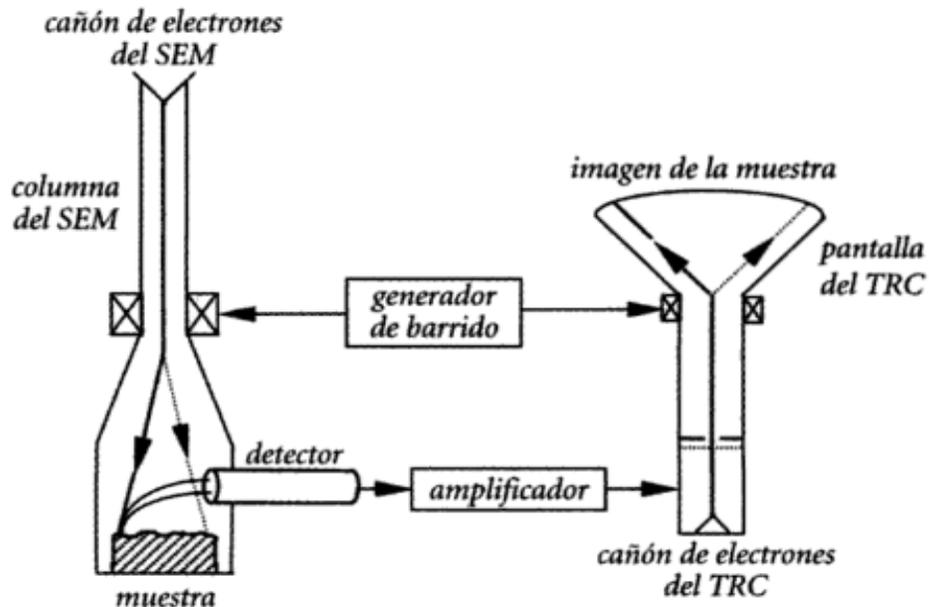
También funciona como microanálisis de partículas, detallando la presencia cuantitativa o cualitativa de las materias, como en el caso de los aceros u otras combinaciones metálicas, con dos o más elementos electrónicos que causan un barrido sincronizado del haz incidente del tubo de rayos catódicos.

Figura 16 Ilustración esquemática de la emisión de electrones, rayos X (RX) y de fotones por la interacción de un haz incidente de electrones con la muestra.



Fuente: [8]

Figura 17 Diagrama de principio de la formación de imágenes en el SEM. La imagen en la pantalla del TLC es un mapa de las intensidades relativas de la emisión de electrones en la superficie de la muestra



Fuente: [8]

Hay fenómenos físicos elásticos que se producen cuando algunos electrones de haz primario salen a la superficie de la muestra sin mucha pérdida de energía y son llamados electrones reflejados. La mayoría de los choques son inelásticas y también originan otros efectos como emisiones de electrones secundarios. La preparación de las muestras es fácil debido a que solo se requieren que sean conductoras y por lo general se recubren con una capa fina de metal de carbono. [8]

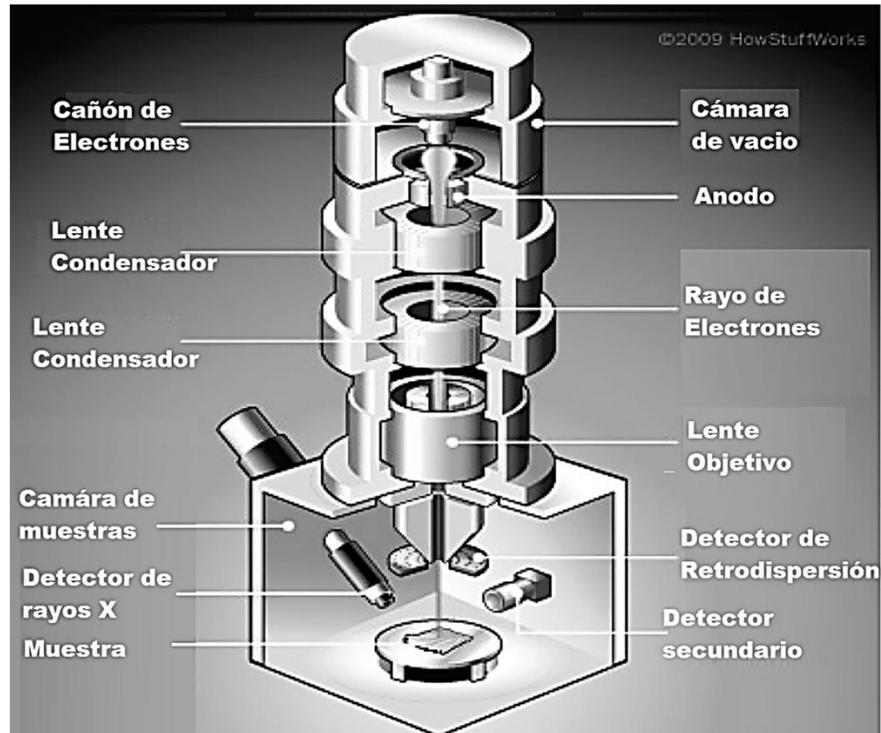
6.1.5.1 Los componentes básicos

- **Canón de electrones:** es el elemento que sirve para generar y dirigir un haz de electrones de la mejor manera posible y con la energía suficiente. Se considera parte fundamental de un tubo de imagen, de un SEM y la fuente de electrones.
- **Lentes electromagnéticas condensadoras:** minimizan el diámetro del haz y son el equivalente de los lentes de vidrio en un microscopio óptico. Da apertura final, que es la que controla la divergencia del haz que repercute en su medida angular del incremento de su diámetro de la muestra.

Un lente objetivo enfoca el haz en una superficie de la muestra siendo esto fundamental en su transmisión al permitir revelar detalles interiores de la materia.

- **Sistema de barrido:** este sistema hace que reboten los electrones que permiten producir imágenes de alta resolución de la superficie de la muestra debido a esto las partículas que son analizadas por los diferentes sensores que hacen su posible reconstrucción de una figura tridimensional de la superficie.
- **Detectores de señales:** Poseen una gran profundidad de campo y debido a esto enfocan una mayor parte de la muestra permitiendo examinarlo amplifícadamente (electrones secundarios, electrones reflejados, rayos X, etc.).
- **Tubos de rayos catódicos:** Gracias a su tecnología permiten visualizar imágenes mediante un haz de Rayos Catódicos constantemente dirigido contra una pantalla de vidrio recubierta de fósforo y plomo. [8]

Figura 18 Componentes del microscopio electrónico de barrido SEM



Fuente: [33]

6.1.5.2 Características de obtención de imágenes SEM

Para producir una imagen en la pantalla de rayos catódicos TRC, se necesita de un haz de electrones en la columna del microscopio y que barra la superficie de estudio y remita algunas partículas, las cuales son analizadas por sensores reconstruyendo

una imagen tridimensional y enfocándola con ínfimas de la muestra, lo cual permite ser investigadas con mayor ampliación, construyendo así la superficie de la muestra punto por punto, obteniendo información topográfica de ella para modular la intensidad o brillo del haz en el TRC, al ampliarse la señal generada por los electrones secundarios permitiéndole esta propiedad. Posteriormente, se arrastran electrones acelerados los cuales se desplazan por el cañón y que con la ayuda de electroimanes se mide la cantidad e intensidad de electrones que muestran figuras en tres dimensiones obteniendo así de esta manera imágenes digitales. Al caer el haz sobre la muestra, se realizan interacciones entre los electrones y los átomos de la muestra. Habiendo unos que rebotan y otros que pueden chocar con la muestra, en este caso puede que los electrones salgan y produzcan los rayos X. [8]

6.1.5.2.1 Aumento en el SEM

Los microscopios electrónicos de transmisión pueden aumentar hasta en un millón de veces la dimensión que se desea analizar, como también pueden agrandar un objeto debido a su potencia amplificadora que poseen y permiten enfocar la muestra definiendo así su aumento. En el SEM el aumento se determina así: [8]

$$\frac{\text{dimensión lineal de barrido de pantalla}}{\text{dimensión lineal de barrido en la muestra}}$$

Ecuación 5 Dimensión lineal de barrido en la pantalla

6.1.5.2.2 Resolución

La resolución produce imágenes de alta definición donde se puede y nos permite observar minuciosamente los detalles mínimos gracias a su nitidez y su mayor resolución, permitiéndonos una calidad visual dependiendo de tres factores a saber:

1. **El tamaño del diámetro del haz:** la distancia de observación.
2. **La Distancia Focal:** número atómico de la muestra con su tamaño y forma. Según y dependiendo el tipo de señal que se utilice, por ejemplo, los electrones secundarios, rayos X, electrones reflejados, en este caso para obtener las imágenes topográficas con mejor resolución se deben usar los electrones.
3. **El enfoque y la distancia:** es la acción de ajustar o encuadrar. Al hacer que la imagen obtenida por un mecanismo óptico se produzca en el plano u objeto determinado elegido el cual a menor distancia de trabajo la resolución, nitidez y claridad es mucho mejor. [8]

6.1.5.2.3 Profundidad de campo

Para esto es necesario utilizar una distancia de trabajo amplia y que su variación de la profundidad debe enfocarse aceptablemente. El SEM es el microscopio especializado en examinar estas superficies de fracturas las cuales se dividen en fracturas dúctil y fracturas frágiles. [8]

6.1.5.3 La aplicación del SEM en fractografía

Es usada en diferentes clases de superficies que presenten impactos o alteraciones como las fracturas u ondulaciones rugosas, estos aspectos se deben tener en cuenta ya que son propiedades que generalmente se presentan determinados minerales donde la unión de los átomos se vuelve más débil, siempre en armonía con la simetría mineral. Es decir, donde se constituyen los posibles planos de ruptura o fractura que depende de su composición y estructura, ofreciendo así alternativas sobresalientes de profundidad de campo en elevada y alta resolución, permitiendo hacer un seguimiento al crecimiento de la grieta por cada etapa de esfuerzo.

6.1.5.4 Microanálisis por SEM

Es un análisis químico punto a punto en una superficie muy pequeña del orden del miligramo. Su estructura micro se puede caracterizar mediante la energía dispersa de rayos X siendo así, diagnosticadas las formas prismáticas. Se debe llevar a cabo la optimización del sistema fijando las variables físicas que se van a estudiar y las cuales deben mantener sus constantes durante la investigación.

La producción de los rayos X en una materia se designa a una descarga electromagnética invisible al ojo humano capaz de atravesarla y de imprimir películas fotográficas o radiografías fundamentalmente. También, se pueden analizar partículas tan pequeñas como un Micrón o Micra que es la milésima parte de un milímetro. De manera tal, que se puede lograr un estudio profundo de los fragmentos o partículas más pequeñas de la materia, manteniendo las propiedades químicas.

En las energías de los rayos X, las cualidades se deben a que los átomos de la materia o cuerpos que se atraen y retienen la energía de los electrones del haz primario, como desenlace se manifiestan exhalaciones de electrones de las capas internas hacia fuera del átomo (ionización), que es la conversión de los átomos de un compuesto cargados electrónicamente. [8]

6.1.5.5 Mecanismos de fractura que se estudian en el SEM

Al actuar una carga cíclica, es decir, aquella que repite movimientos cada cierto tiempo, puede dar inicio a un cambio de estado iniciando una grieta como consecuencia de su deformación, por algún factor externo como, por ejemplo: el calor, inclusiones, porosidades, puntos débiles, blandos o en discontinuidades mecánicas. Generalmente esta deformación plástica ocurre tan microscópicamente que se puede decir que es casi imposible obtener tal escala para mostrarse, ya que esto carece de mediaciones de uso común de ingeniería.

En los sitios del núcleo de la grieta se han encontrado evidencias de deformación plástica microscópica, debido al deslizamiento en planos orientados positivamente para que ocurra durante el incremento de esfuerzo en un ciclo de carga, se puede obtener que este se desplace en contacto continuo en cierta dirección. [8]

6.1.6 Microdureza

La dureza de un material es la propiedad de su capa superficial, de poder resistir toda deformación o destrucción elástica y plástica; debido a la acción de esfuerzos de contactos locales ocasionados por otro cuerpo llamado indentador o penetrador.

Los métodos de dureza por indentación, presuponen la presencia de esfuerzos de contacto, por lo tanto, la dureza puede ser cuantificada dentro de una escala. Como también en este tipo de prueba se puede observar la resistencia de un material y las características estructurales (morfología).

6.1.6.1 Método Vickers

En el ensayo de dureza Vickers llamado ensayo universal, sus cargas van de 5 a 125 kilopondios, el penetrador es una pirámide de diamante con un ángulo base de 136°, se emplea para láminas delgadas.

Para determinar el número de dureza se aplica la siguiente fórmula:

$$Hv = 1854.4 \frac{P}{d^2}$$

Ecuación 6 Calculo dureza Vickers

Este ensayo constituye una mejora al ensayo Brinell, se presiona el indentador contra una probeta bajo cargas más ligeras que las utilizadas en el ensayo Brinell. Se miden las diagonales de la impresión cuadrada y se halla el promedio para aplicar la fórmula antes mencionada. (Ecuación 6)

Tabla 2 Tiempo de penetración Vickers

TIEMPOS DE PENETRACION

MATERIAL	TIEMPO (segundos)
Hierro - Acero	0 - 30 seg
Cobre - Bronce - Laton	30 seg
Aleacion ligera	60 - 120 seg
Estaño - plomo	120 seg
Material Blando	120 seg

Este tipo de ensayo es recomendado para durezas superiores a 500HB (en caso de ser inferior se suele usar el ensayo de dureza Brinell). Este ensayo, además puede usarse en superficies no planas. Sirve para medir todo tipo de durezas, y espesores pequeños.

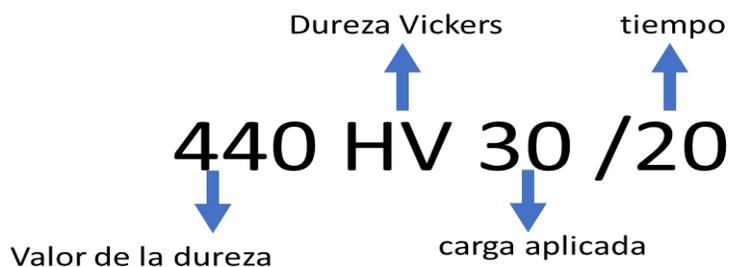
Las ventajas que ofrece este método son las siguientes:

- Escala continua de dureza
- Impresión pequeña que no destruye el material
- Precisión de medidas en investigaciones
- Todos los materiales
- Cualquier espesor del material

También se pueden encontrar desventajas en este método como:

- Tiempo de ensayo prolongado
- Preparación del material
- Proceso costoso

Designación



6.2 Marco Conceptual

- **Aleación:** Es la mezcla de un metal principal con otros elementos para mejorar las propiedades físicas y mecánicas del metal puro. Variando la composición de las aleaciones se puede conseguir un rango de propiedades diferentes para una amplia gama de aplicaciones. Por ejemplo, pequeñas cantidades de Berilio en (Cu) metálico aumenta notablemente la dureza y resistencia. [14]
- **Amorfo:** es cuando una estructura de un material pasa de estado líquido a estado gaseoso.
- **Arena de sílice:** La arena sílica o arena de sílice es un compuesto resultante de la combinación de la sílice con el oxígeno. Su composición química está formada por un átomo de sílice y dos átomos de Oxígeno, formando una molécula muy estable: SiO. Los usos industriales de la sílice derivan de sus importantes propiedades físicas y químicas, destacándose especialmente su dureza, resistencia química, alto punto de fusión, piezoelectricidad, piroelectricidad y transparencia.
- **Caliza:** es una roca sedimentaria. Está formada por más de un 50% de carbonato de calcio (calcita – CaCO₃). Sirve de base para el cemento; Como piedra de dimensión para la decoración de paredes y pisos; En la producción de fertilizantes calcáreos, papel, petroquímicos, plaguicidas, vidrio, etc.
- **Carbonato de sodio:** es una sal blanca y translúcida, muy alcalina, cuya fórmula química es Na₂CO₃. Es una sustancia natural procedente de un mineral llamado trona. Es usada desde hace cientos de años en la fabricación de jabón, vidrio y tintes.
- **Cross:** Es una banda transportadora que utiliza para el transporte de artículos calientes.
- **Deformación elástica:** Es aquella en la que el cuerpo recupera su forma original al retirar la fuerza que le provoca la deformación. [14]
- **Deformación plástica:** Es aquella en la que el cuerpo no recupera su forma original al retirar la fuerza que le provoca la deformación. [14]
- **Metalografía:** Es la rama de la metalurgia que estudia la estructura de un metal y la relaciona con la composición química, con las propiedades mecánicas y físicas. Este estudio es llevado a cabo con la aplicación de diversas y variadas técnicas especiales. [15]

- **Metal noble:** son un grupo de metales caracterizados por ser muy inertes químicamente, es decir, que no reaccionan químicamente con otros compuestos químicos, lo que los convierte en metales muy interesantes para muchos fines tecnológicos. [16]
- **Morfología:** es el estudio de las estructuras internas que se encuentran en un material y sus componentes internos.
- **Normalizado:** tratamiento cuyo objetivo es dejar un material en estado normal sin tensiones en su interior y una uniformidad en su contenido de carbono generalmente se emplea previo al temple y revenido. [17]
- **Polímeros:** Los polímeros son una estructura compleja formada por la repetición de una unidad molecular llamada monómero. [18]
- **Recocido:** consiste en elevar la temperatura de una pieza metálica durante largos tiempos para dar ductilidad y mejorar la maquinabilidad. [17]
- **Revenido:** Tratamiento térmico cuyo objetivo es reducir la dureza de la pieza mediante la descomposición de las fases en equilibrio. [17]
- **Sodio – Cálculo:** Vidrio constituido por silicatos de sodio y calcio. Su composición aproximada es: sílice (65-75%), óxido de sodio (10-18%), óxido de calcio (8-15%). De escasa resistencia a los agentes químicos, se utiliza para usos ordinarios (botellas, laminados, bombillas, etc.). [1]
- **Tenacidad:** Es la capacidad de un material de absorber energía en forma de impacto sin fractura. [17]

6.3 Estado del Arte

La influencia de la composición y el tratamiento térmico en las propiedades mecánicas de aleaciones de bronce aluminio, son elementos que contienen entre 5-12% de hierro, níquel y manganeso. Los bronce al aluminio son concentradores nominales entre el 10-13% de aluminio y hierro, estos presentan unas notables características mecánicas, donde los valores de resistencia y dureza son medianamente elevados; mientras que también presentan una elevada ductilidad y tenacidad. [19]

En el análisis del desgaste para el par bronce-acero en un molino de caña de azúcar, se realizó un estudio metalográfico al molino para identificar el mecanismo de desgaste de par bronce-acero, perjudicando su operación. En el estudio realizado se recomienda que para este tipo de material se le puede aplicar tratamientos térmicos artificiales para mejorar su rendimiento. [20]

En la evaluación de propiedades mecánicas en recubrimientos obtenidos por la proyección térmica, se evaluó que el módulo de Young, la resistencia máxima y la tenacidad a la rotura de diversos recubrimientos obtenidos por la proyección térmica, donde se observó que los valores de tenacidad a rotura de los recubrimientos hallados por las técnicas de dentición, muestran una importante anisotropía ya que depende claramente de la dirección que fue analizada, se finaliza con una relación de las propiedades mecánicas analizadas en el trabajo con la estructura de los recubrimientos. [21]

En el mejoramiento de la aleación de bronce al aluminio se presentan resultados donde fueron sometidos a diferentes tipos de temperatura y moldes, en los cuales se observaron poros debido al tipo de molde. Las piezas coladas en los moldes se obtuvieron sin defectos observables a simple vista y fueron sometidas a ensayos de dureza, tracción y microestructura. En este proceso se controla la pérdida del aluminio, que es reducido por su oxigenación, con el tratamiento térmico no se logra mejorar las condiciones mecánicas como se esperaba, esto se debe a que no existió una transformación completa de la martensita. [22]

El análisis de las propiedades mecánicas del bronce dependiendo el tratamiento térmico, se enfoca en las transformaciones que suceden en el bronce sometido a diferentes tratamientos térmicos cuyo fin es mejorar las resistencias mecánicas donde son sometidos a diferentes temperaturas y diferentes recocidos y enfriamientos, en los cuales se observan las propiedades y modificaciones en la estructura y una explicación en el aumento o disminución de las propiedades mecánicas. [23]

Sistematización isométrica de bronce reforzada con partículas de alúmina, se realizó un estudio de pequeñas dosis de alúmina sobre las propiedades mecánicas,

densidad y microestructura del bronce, este proceso se obtuvo por medio de tratamientos de sintonización isotérmica y la gran influencia de la alúmina sobre las propiedades y microestructuras de las aleaciones, incrementado sus densidades conforme a la concentración de alúmina donde esta presenta la mejores resultados en la relación a la dureza y homogeneidad. [24]

La resistencia al desgaste de recubrimientos de bronce aluminio producidos con técnica de proyección térmica. Se evaluó la resistencia al desgaste agresivo de recubrimientos de bronce – aluminio depositados con la técnica de protección térmica, donde los resultados obtenidos sobre esta técnica indican el recubrimiento con una presión de oxígeno de 78 Psi y de acetileno 8 Psi, arrojando como resultado una mejor resistencia al desgaste en comparación a los rodamientos producidos. [25]

6.4 Marco Legal y Normativo

- ASTM E384-11e1 (Método de prueba estándar para Knoop y Vickers dureza en dureza de materiales). [3]

Con esta norma se procede para la toma de datos de dureza, aplicando los estándares de calidad y estructura del material.

- ASTM E2809-13 (Método estándar para el uso de microscopía electrónica de barrido) [3]

Con esta norma se procede analizar los componentes del material

- ASTM E407 (Práctica estándar para metales y aleaciones de micrograbado) [3]

Con esta norma se procede para dar el respectivo proceso químico con el que se van a atacar las probetas, para el examen microscópico. Teniendo en cuenta el tiempo de duración de ataque dicha en la norma.

7. MARCO METODOLÓGICO

7.1 Diseño Metodológico

- A. Obtener las pinzas que estuvieron en uso hasta la falla.
- B. Evaluar los parámetros de las pinzas durante el proceso de producción.
- C. Determinar las variables de falla mecánica (desgaste, fractura).
- D. Se prosigue a realizar un estudio microestructural del material del cual están mecanizadas las pinzas por medio SEM.
- E. Realizar pruebas de ensayo fractografía (macroscopía) y microdureza.
- F. Analizar las propiedades de morfología de la fractura y dureza.
- G. Se procede con la toma de datos de microcopia óptica y microscopia electrónica de barrido.
- H. Se observa los datos y análisis de dureza del material.
- I. Se una recopilación de datos y análisis para obtención de conclusiones.
- J. Se propone posibles soluciones al problema de falla recurrente.

7.2 Tipo de investigación

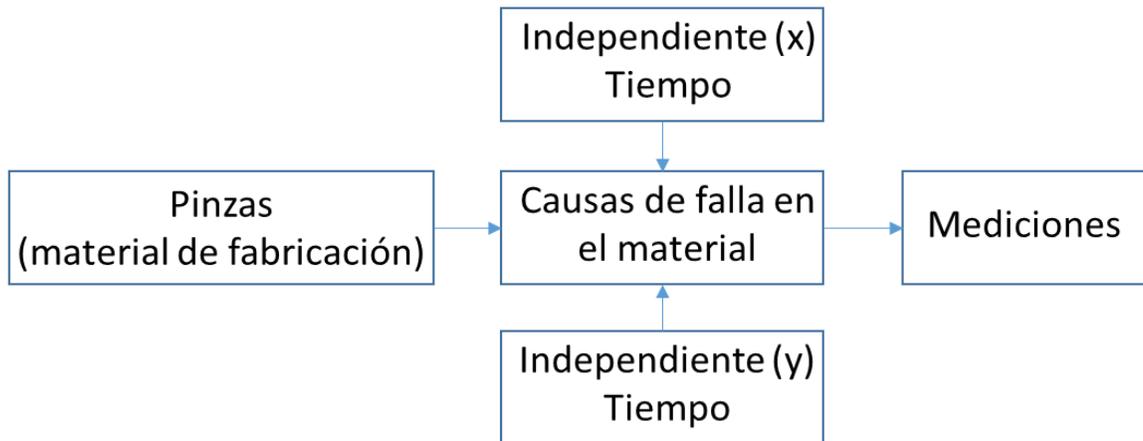
Esta investigación cuantitativa, tiene como objetivo evaluar e identificar cuales con las fallas que presentan las mordazas, que son utilizadas en el agarre de los envases de vidrio. Estas están hechas de aleaciones de metales, material que se toma como estudio para desarrollar un diseño de investigación, recolectando muestras y sacando análisis de datos de microestructura, microdureza y morfologías, para así tener un resultado y con base a éste proporcionar soluciones o nuevas alternativas en este mercado, ya que actualmente el material que es utilizado presenta muchas fallas de fracturas durante el proceso de producción.

7.3 Diseño experimental

El objetivo del diseño experimental es desarrollar un proceso en el cual se determinan las causas de falla de unas mordazas de material bronce, con el fin de obtener una micro caracterización en el material, para ello es necesario desarrollar una serie de pruebas y así obtener las características y propiedades que brinda el material cuando se expone a temperaturas altas después de un determinado tiempo y proceso de producción.

En el diseño experimental de esta investigación se determinó como variables independientes el tiempo (duración en horas a las que está expuesta la pinza) y las variables dependientes son la temperatura a la que están expuestas las pinzas.

Figura 19 Variables del Diseño Experimental



- 5 mediciones de temperatura aleatorias
- $\alpha = 0.01$
- Probabilidad de 0.90
- Φ^2 (parametro)

$$\Phi^2 = \frac{n \sum_{i=1}^a \tau_i^2}{a \sigma^2} = \frac{n}{5} (5) = n$$

$$\Phi^2 = 4, \quad \Phi = 2 \quad 5(3) = 15 \quad \text{grados de libertad de error}$$

$\beta \cong 0.38$ (curvas de operacion caracteristicas para analisis de varianza)

Potencia de prueba aproximada es: $1 - \beta = 1 - 0.38 = 0.68$

(El valor 0.68 es menor a una probabilidad de 0.90, por esta razón 4 tomas no son suficientes)

n	Φ^2	Φ	$a(n - 1)$	β	potencia $= (1 - \beta)$
4	4	2.00	15	0.38	0.62
5	5	2.24	20	0.18	0.82
6	6	2.45	25	0.06	0.94

Por la tabla anteriormente ilustrada se debe tener en cuenta $n=6$ tomas para tener pruebas con la potencia requerida. Los objetivos de este experimento con respecto a la temperatura / tiempo son:

- Determinar las variables que pueden influir
- Determinar el ajuste que puede llegar a tener la temperatura mediante el tiempo al que fue expuesto.

7.4 Metodología

En el desarrollo de esta investigación se siguió un diseño metodológico que contribuyó a cada uno de los objetivos planeados. En este proyecto a estudiar, se evalúa las fallas recurrentes que se presentaban en unas mordazas debido a su material y diseño.

1. Junto con el director del proyecto se evaluó una metodología a seguir y que solución podría dar a la industria en este tipo de piezas. El material para evaluar fue el Bronce y sus aleaciones.
2. Obtener las pinzas que estuvieron en uso hasta la falla o desgaste. Estas mordazas se utilizaron en la empresa OWENS-ILLINOIS S.A. en la de línea de producción A2 y A0 en la sección 1 y 2.

Figura 20 Mordazas de agarre de vidrio



Fuente: Autor del Proyecto

Figura 21 Diferentes tipos de mordazas para cada referencia de envases

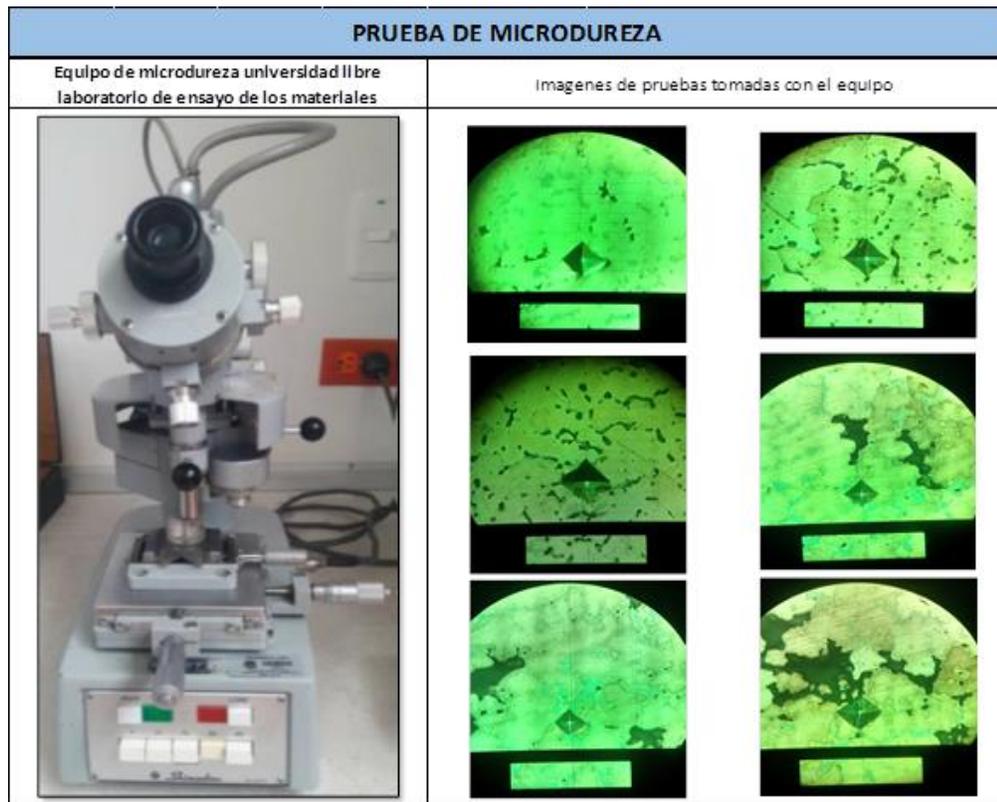


Fuente: Autor del Proyecto

3. Se e valúan los parámetros a los cuales fueron sometidas las pinzas durante el proceso de producción, en OWENS-ILLINOIS S.A. en la de líneas de producción A2 y A0 en la sección 1 y 2.
4. Determinar las variables de falla mecánica.
5. Se prosigue a realizar un estudio microestructural por medio del SEM, para definir el material del cual están mecanizadas las pinzas. Esta prueba se hace a través de la Universidad Nacional Sede Bogotá. Donde son arrojados los siguientes datos, para así mismo realizar la microestructura del material.
6. Pruebas de micro dureza

Esta prueba se realiza en las instalaciones de la Universidad Libre sede el bosque, en los laboratorios de materiales. En este ensayo se vio la resistencia del material y sus características estructurales. Se manejó el método Vickers, ya que este método deja una impresión en el material mínima y poco notoria, y su precisión es la más utilizada en procesos de investigación.

Figura 22 Equipo de microdureza y sus respectivas huellas de las probetas que fueron analizadas



Fuente: Autor del proyecto

7. Se procede con la toma de datos de microscopia óptica y microscopia electrónica de barrido.
 - Preparación de probetas para metalografía.
 - A. Se hace una limpieza química a las mordazas que van a ser analizadas.
 - B. Se selecciona una muestra de las pinzas que fueron escogidas para esta investigación.
 - C. Se procede hacer una base donde el material este sostenido. Esto brinda una facilidad en la manipulación de la prueba.
 - D. Ya teniendo la base, se realiza un molde donde es invertido un líquido polimérico que se solidifica a temperatura ambiente, este se deja un periodo de 48 horas en secado.
 - E. Se prepara la superficie de la cual se va a obtener la muestra metalográfica.

Figura 23 Probetas de mordazas de las maquinas A0 y A2



Fuente: Autor del proyecto

- F. Se hace un procedimiento de pulimiento.
 - **Pulido burdo:** se realiza un desbaste de pulido por medio de lijas (papel), de diferentes calibres (tamaño de grano que la conforman) pasando desde la 60 y termina en una lija 600, donde la última es la más fina.

Para este proceso, se utiliza la mesa de pulido rotatoria (laboratorios de ingeniería de la universidad libre), una vez que va girando la maquina la lija tiene que permanecer húmeda, cuando la probeta tiene el rayado de la superficie en dirección al pulido es importante recalcar que en cada precisión de la probeta da un giro de 90°, y así en cada cambio de lija. La máquina se manejó con una velocidad que varía de 120 rpm y 320 rpm.

Figura 24 Pulidora de disco FORCIPOL1V - METKON



Fuente: Autor del proyecto

- **Pulido fino:** este pulido se da a partir de la lija 1000 a la 1200, para luego proceder el pulido final, con paño y alúmina.

Se utilizó una alúmina de suspensión 0.03 micras, está ya como último paso da el acabado espejo en la probeta, terminado el pulido se procede a limpiar la probeta cuidadosamente con jabón líquido y agua destilada. Ya para finalizar se hace un secado con aire frío en convección.

Figura 25 Maquina pulidora y Alúmina utilizada



Fuente: Autor del proyecto

G. Ataque químico: ya teniendo la última pasada de pulido, se procede hacer ataque químico. Este proceso lo que hace es generar una corrosión controlada en el material. La solución química depende del material y sus componentes, por eso se utiliza la norma ASTM E407 donde se muestra la solución química que se debe utilizar, como también dice el tiempo de ataque y temperaturas, entre otros. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran las soluciones químicas utilizadas en este proyecto.

Tabla 3 Soluciones químicas utilizadas en el Ataque Químico de este proyecto

ATAQUE QUÍMICO						
PROBETA	NORMA ASME	METAL	NOMENCLATURA	COMPOSICIÓN		TIEMPO
				CANTIDAD		
1-2	E407	Cu-Sn (bronce y estaño)	51	2 g	FeCl ₃ cloruro de hierro	Sumergir por unos minutos 00:01:30
				5 ml	HCl ácido clorhídrico	
				30 ml	H ₂ O agua	
				60 ml	etanol	
		52	1 g	Dicromato de sodio	limpiar por unos segundos 00:00:30	
			1 g	NaCl cloruro de sodio		
			4 ml	H ₂ SO ₄ ácido sulfúrico		
			250 ml	h ₂ o agua		
3		aleaciones	28	1 g	FeNO ₃ nitrato de hierro	limpiar o sumergir unos segundos a un minuto 00:01:30
				100 ml	h ₂ o agua	

Fuente: Norma ASME E407

H. Se realiza el análisis de las superficies de las probetas de caracterización de material y de prueba, se utiliza un microscopio óptico, con varias combinaciones de graduación óptica.

Figura 26 Microscopio Óptico - Universidad Libre



Fuente: Autor del proyecto

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 Parámetros de producción de las pinzas

En las siguientes tablas se recopilamos todos los parámetros de producción de las maquinas A0 y A2, de las secciones 1 y 2. En este punto se tiene en cuenta como enfoque principal la temperatura del proceso y la que es transmitida a la mordaza, como también la presión de agarre.

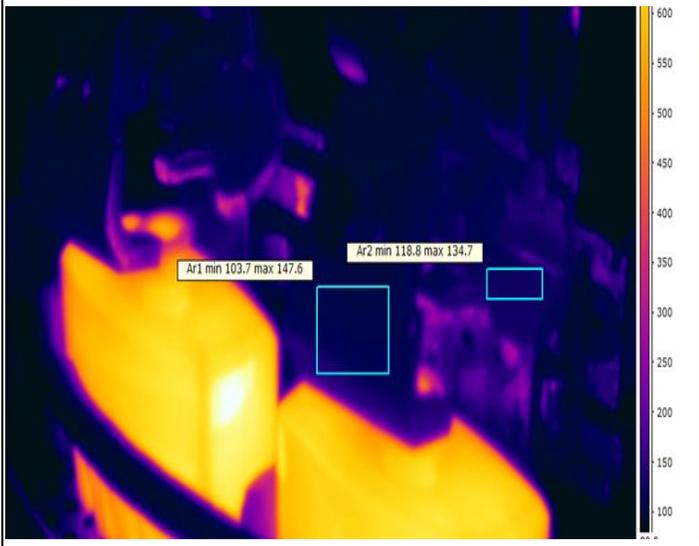
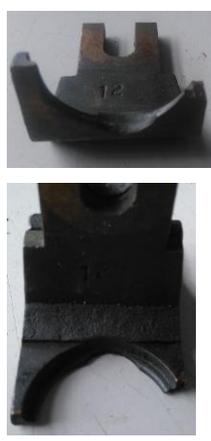
Tabla 4 Parámetros de producción maquina A0 ref. Ac-0682

PARAMETROS DE DE PRODUCCION DE LAS PINZAS					
REFERENCIA DE ENVASE	AC-0682	MAQUINA	A0		
INFORMACION GENERAL DE REFERENCIA					
FECHA	09/08/2016	HORA DE INICIO DE CAMBIO DE REFERENCIA	07:15 a. m.		CAMBIO DE PINZA OBSERVACIONES
SISTEMA	GD	HORA DE FALLA DE LA PINZA	SECCION	HORA	
VELOCIDAD	144		S1-G2	04:30 p. m.	se realiza cambio por desgaste y fractura de la pieza, hora de trabajo de produccion 9 horas con 15 minutos hasta la falla
PESO	48	TEMPERATURA DE PROCESO	MAX	740,7 C°	
TERMINADO	12-ESP		MIN	80,0 C°	
PINZA SEGÚN MOLDE	BRONCE	TEMPERATURA DE PINZA	MAX	160,4 C°	
MATERIAL	BRONCE		MIN	129,6 C°	
NUMERO	105				
NUMERO DE CAMBIO	202				
PRESION DE AGARRE	25 PSI				
TERMOGRAFIA					
EVIDENCIA FOTOGRAFICA					<p>PINZA TRABAJO 1</p> <p>PINZA TRABAJO 2</p>

Tabla 5 Parámetros de producción maquina A2 ref. AC-4361

PARAMETROS DE DE PRODUCCION DE LAS PINZAS																	
REFERENCIA DE ENVASE	AC-4361	MAQUINA	A2														
INFORMACION GENERAL DE REFERENCIA																	
FECHA	10/08/2016	HORA DE INICIO DE CAMBIO DE REFERENCIA	06:20 a. m.		CAMBIO DE PINZA OBSERVACIONES												
SISTEMA	GD	HORA DE FALLA DE LA PINZA	SECCION	HORA													
VELOCIDAD	104		S1-G1	02:15 p. m.	se realiza cambio por fractura de la pieza, hora de trabajo de produccion 8 horas con 5 minutos hasta la falla												
PESO	48																
TERMINADO	018-0415-1a06																
PINZA SEGÚN MOLDE	BRONCE	TEMPERATURA DE PROCESO	MAX	759,0 C°													
MATERIAL	BRONCE		MIN	80,0 C°													
NUMERO		TEMPERATURA DE PINZA	MAX	137,4 C°													
NUMERO DE CAMBIO			MIN	129,6 C°													
PRESION DE AGARRE	25 PSI																
TERMOGRAFIA	 <div style="float: right; border: 1px solid gray; padding: 5px; font-size: 8px;"> <p>IR_6590.jpg Size: 179 KB Created: 13/04/2016 10:10:33 a.m Camera: FLIR T400 Western Lens: FOL18</p> <p>Image Description</p> <hr/> <p>Text comments Object parameters External Sensor</p> <p>Emissivity: <input type="text" value="0.96"/> °C Reflected apparent temperature: 20.0 °C Atmospheric temperature: 22.3 °C Relative humidity: 50.0 % Distance: 1.0 m <input type="button" value="Apply"/></p> <p>Measurement</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Label</th> <th>Min</th> <th>Max</th> <th>Average</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Image</td> <td>80.0 °C</td> <td>759.0 °C</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Ar1</td> <td>124.0 °C</td> <td>137.4 °C</td> <td>132.9 °C</td> </tr> </tbody> </table> </div>					Label	Min	Max	Average	Image	80.0 °C	759.0 °C		Ar1	124.0 °C	137.4 °C	132.9 °C
Label	Min	Max	Average														
Image	80.0 °C	759.0 °C															
Ar1	124.0 °C	137.4 °C	132.9 °C														
EVIDENCIA FOTOGRAFICA					<p>PINZA TRABAJO 1</p> 												
					<p>PINZA CAMBIO</p> 												

Tabla 6 Parámetros de producción maquina A2 ref. AC-4223

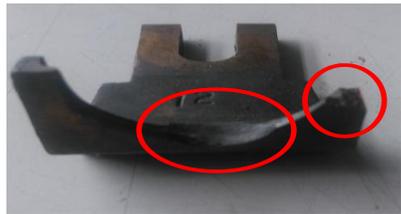
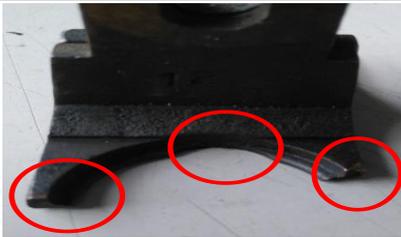
PARAMETROS DE DE PRODUCCION DE LAS PINZAS																																														
REFERENCIA DE ENVASE	AC-4223	MAQUINA	A2																																											
INFORMACION GENERAL DE REFERENCIA																																														
FECHA	12/08/2018	HORA DE INICIO DE CAMBIO DE REFERENCIA	09:15 a. m.		CAMBIO DE PINZA																																									
SISTEMA	GD	HORA DE FALLA DE LA PINZA	SECCION	HORA	se realiza cambio por fractura de la pieza, hora de trabajo de produccion 9 horas con 39 minutos hasta la falla																																									
VELOCIDAD	72		S2-G1	06:54 p. m.																																										
PESO	198	TEMPERATURA DE PROCESO	MAX	766,3C°																																										
TERMINADO	018-2720-LA-03	TEMPERATURA DE PINZA	MIN	80,0 C°																																										
PINZA SEGÚN MOLDE	BRONCE		S1-G1	MAX			147,6 C°																																							
MATERIAL	BRONCE	S1-G2	MIN	103,7 C°																																										
NUMERO			MAX	123,1 C°																																										
NUMERO DE CAMBIO		MIN	118,8 C°																																											
PRESION DE AGARRE	25 PSI																																													
TERMOGRAFIA					<table border="1"> <thead> <tr> <th>Text comments</th> <th>Object parameters</th> <th>External Sensor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Emissivity:</td> <td>0.96</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Reflected apparent temperature:</td> <td>20.0 °C</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Atmospheric temperature:</td> <td>22.3 °C</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Relative humidity:</td> <td>50.0 %</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Distance:</td> <td>1.0 m</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="3" style="text-align: center;">Apply</td> </tr> <tr> <th colspan="3">Measurement</th> </tr> <tr> <th>Label</th> <th>Min</th> <th>Max</th> <th>Average</th> </tr> <tr> <td>Image</td> <td>80.0 °C</td> <td>766.3 °C</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Ar1</td> <td>103.7 °C</td> <td>147.6 °C</td> <td>112.5 °C</td> </tr> <tr> <td>Ar2</td> <td>118.8 °C</td> <td>134.7 °C</td> <td>123.1 °C</td> </tr> </tbody> </table>		Text comments	Object parameters	External Sensor	Emissivity:	0.96		Reflected apparent temperature:	20.0 °C		Atmospheric temperature:	22.3 °C		Relative humidity:	50.0 %		Distance:	1.0 m		Apply			Measurement			Label	Min	Max	Average	Image	80.0 °C	766.3 °C		Ar1	103.7 °C	147.6 °C	112.5 °C	Ar2	118.8 °C	134.7 °C	123.1 °C
Text comments	Object parameters	External Sensor																																												
Emissivity:	0.96																																													
Reflected apparent temperature:	20.0 °C																																													
Atmospheric temperature:	22.3 °C																																													
Relative humidity:	50.0 %																																													
Distance:	1.0 m																																													
Apply																																														
Measurement																																														
Label	Min	Max	Average																																											
Image	80.0 °C	766.3 °C																																												
Ar1	103.7 °C	147.6 °C	112.5 °C																																											
Ar2	118.8 °C	134.7 °C	123.1 °C																																											
EVIDENCIA FOTOGRAFICA					<p>PINZA TRABAJO 1</p> 																																									

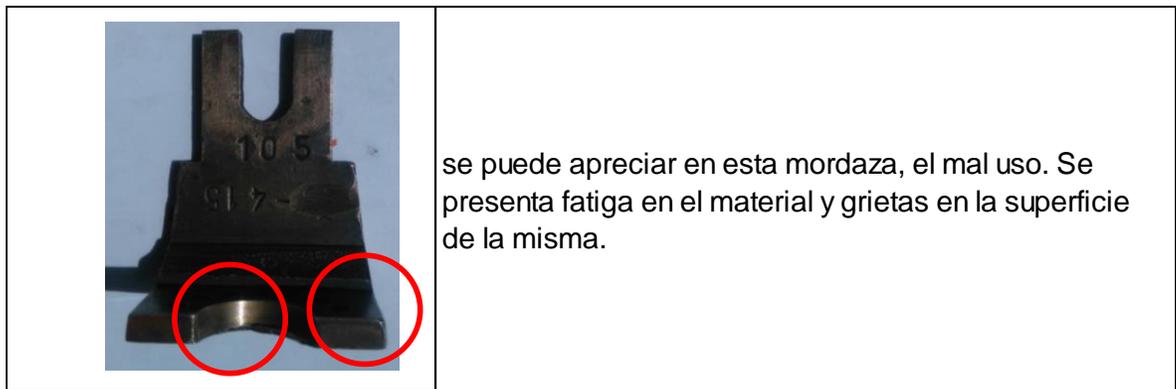
8.1.1 Discusión de parámetros de producción de las pinzas

Las mordazas hechas en bronce fueron cambiadas entre las 8 a 9 horas en promedio de trabajo de producción hasta presentar la falla. Las temperaturas máximas de las pinzas oscilaron entre los 123° C y los 160° C y las mínimas entre 103° C y 129° C. Todas estuvieron sometidas a una presión de agarre de 25 PSI. La temperatura máxima reportada para los procesos en las tres máquinas fue de 766° C y la mínima fue de 80° C.

8.2 Variables de falla mecánica

Tabla 7 Variables de falla mecánica en mordazas de máquinas A0 y A2

VARIABLES DE FALLAS	
En las pinzas que se obtuvieron en este proceso, se observó que la mayoría presentaba estas variables	
PINZAS CON FALLA	OBSERVACIÓN
	<p>El constante contacto de las superficies de las pinzas provocan un desgaste adhesivo, ya que fueron sometidas a altas cargas de producción, temperatura y presión; el movimiento continuo que se presenta hace que el material se separe y se rompa en pequeñas secciones.</p> <p>Se puede observar que la superficie queda áspera, debido a la deformación que presenta la pieza por altas cargas a la que fue sometida.</p>
	<p>En esta imagen se puede apreciar que la mordaza presenta una fractura dúctil y desgaste, ya que fue expuesta a cargas equivalentes en donde la superficie tuvo una ruptura de los átomos internos en el material. Como también presenta un desgaste.</p>
	<p>debido a la exposición constante de cargas equivalentes, claramente se puede observar una fractura tipo frágil. Como también la expansión de grietas en el material hacen que se desarrolle una fractura rápida.</p>
	<p>Este tipo de falla que presenta esta mordaza se puede observar la fractura rápida, donde se observa una textura áspera.</p>



8.2.1 Discusión de variables de falla mecánica

En estas piezas se encontró que las fallas mecánicas se debían a que:

- No se manejaba un control de protección ambiental, ya que estas piezas estaban expuestas a diferentes cambios drásticos de temperaturas y humedad.
- Las condiciones previas a la operación. En este ítem no se hizo una investigación anterior del material y diseño, como tampoco se realizó un análisis de resistencia del material o de esfuerzos a los cuales iba ser sometido.
- En el proceso del tratamiento térmico, no se sabe cuál fue el que se realizó por el fabricante, no se tiene información si el que fue tratado iba adecuado con el material para no afectar las propiedades de este.
- Mantenimiento inadecuado
- Errores de diseño, no se tienen en cuenta las propiedades del material, ya que estas mordazas fallan constantemente y se tiene una discontinuidad en el proceso industrial.
- Mal uso. Ya que estas mordazas están sometidas a diferentes cambios de temperatura, los esfuerzos de deformación plástica son más altos. Como también, las cargas permanentes generadas por la máquina y sus esfuerzos cíclicos generen grietas en la mordaza.

Las mordazas presentaron fracturas de tipo dúctil y frágil, además de desgaste adhesivo, fatiga en el material y grietas en el mismo. Estos resultados pueden atribuirse a la presencia de impurezas en el material y las incrustaciones que puedan presentar la aleación, y cuando la carga máxima no es la misma el material se deforma, hasta llegar a fracturarse. La presencia de las grietas reafirma el postulado de las imperfecciones en el material. Según Ipohorski [10] a temperaturas medias (37°C - 750°C) las marcas se van desplazando con una inclinación de 45° y dando origen a bordes dúctiles, y si tenemos en cuenta que las temperaturas de las piezas oscilaron entre los 80 y los 160° C, se puede afirmar que las fallas que

se hayan presentado en las piezas durante el trabajo se categorizan en esta clasificación. Este mismo autor establece que las fracturas que se originan a temperaturas por debajo del ambiente son frágiles y que los orígenes de fracturas a temperaturas por encima de los 760° C son completamente dúctiles. Si se tiene en cuenta esta última afirmación y se considera la presencia de fallas dúctiles, se puede contemplar dentro del análisis de causalidad de las fallas, la temperatura alcanzada en el proceso que es de 766° C y que puede estar afectando de una forma indirecta las mordazas.

En lo referente a la fatiga del material, en el caso de este estudio se debe a que la pieza está sometida a esfuerzos repetitivos y tal como dicen la teoría, esta falla se originó en un punto de concentración, en un extremo, extendiéndose casi completamente por toda la sección. Los autores estipulan la importancia de tener en cuenta toda la superficie de la pieza, debido a que esta puede brindar información como el resto de la estructura por donde se dio el inicio de propagación de fractura. Este enunciado se cumplió en este trabajo ya que la determinación de la fractura se realizó teniendo en cuenta la totalidad de la pieza. Las fracturas identificadas fueron del tipo Estría. Este tipo de falla se puede atribuir a que las pinzas están siendo sometidas a esfuerzos por encima del límite elástico del material del que está constituida.

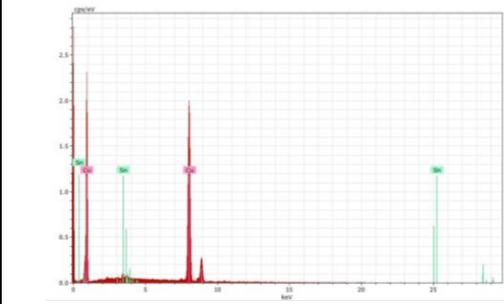
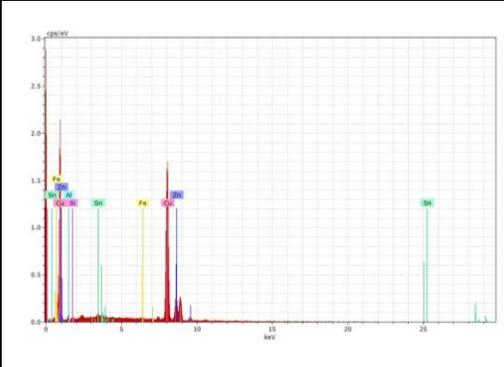
8.3 Características del Material

El estudio microestructural del material del cual están hechas las mordazas se realiza por medio SEM (microscopía electrónica de barrido), ya que por este método es posible saber detalladamente las características del material y su composición química, este análisis se realiza en los laboratorios de la Universidad Nacional, Facultad de Física.

Tabla 8 Caracterización del material (SEM)

CARACTERIZACION DEL MATERIAL							
PRUEBA	ELEMENTO	AN	SERIE	UNN C. %	NORM.C %	ATOM	GRAFICA
1	Cu (cobre)	29	K	78.08	90.39	94.61	
	Sn (estaño)	50	L	8.03	9.61	5.39	
	TOTAL			86.38	100	100	

anexo 1

2	Cu (cobre)	29	K	81.58	96.47	98.08		anexo 2
	Sn (estaño)	50	L	2.99	3.53	1.92		
	TOTAL			84.57	100	100		
3	Cu (cobre)	29	K	69.75	78.98	75.96		anexo 3
	Zn (zinc)	30	K	12.81	14.5	13.56		
	Al (aluminio)	13	K	2.71	3.07	6.96		
	Sn (estaño)	50	L	1.74	1.98	1.02		
	Si (silicio)	14	K	0.73	0.83	1.81		
	Fe (hierro)	26	K	0.56	0.63	0.69		
	TOTAL			88.31	100	100		

8.3.1 Discusión de características del material

El método SEM permite realizar microanálisis de partículas detallando la presencia cuantitativa o cualitativa de materias, como es el caso de los aceros u otras combinaciones metálicas con dos o más elementos como es el caso de este estudio en donde el material de estudio es el bronce, que es el producto de una aleación entre dos o más minerales.

El material de la mordaza de la prueba 01 fue Bronce producto de la aleación de Cobre (Cu) y Estaño (Sn) donde el 90,39% corresponde a Cu y el 9,61% a Sn. La aleación de la prueba 02 fue Bronce producto de la aleación de Cobre (Cu) y Estaño (Sn) donde el 96,47% corresponde a Cu y el 3,53% a Sn. La última prueba fue una aleación de Bronce donde el 78,98% fue Cu; el 14,5% fue Zinc (Zn); el 3,07% fue Aluminio (Al), el 1,98% fue Sn, el 0,83% fue Silicio (Si) y el 0,63% fue de Hierro (Fe).

Las dos primeras pruebas corresponden a la aleación metálica donde los compuestos químicos principales son el cobre como base inicial y una variable proporción de estaño en la colada, respecto a la tercera prueba tiene otros elementos y otros compuestos entre 3 – 20% para generar una mayor concentración con el objetivo de generar una mayor resistencia y obtener características de dureza mayores al cobre.

Las dos primeras pruebas se componen de la aleación de cobre más estaño, este compuesto se destaca según Aguilar Schafer [5] por tener una gran resistencia al desgaste y al ataque con elementos ácidos y se pueden enmarcar dentro de los bronce de baja concentración o bronce rojos. El estaño brinda al compuesto propiedades mecánicas más altas

La tercera prueba por tener aparte del Cobre dentro de la composición minerales como el Zinc, Hierro, Aluminio y Silicio se le pueden adjudicar propiedades de los Bronces de Alta Concentración (Bronces Amarillos), es decir mayor resistencia al desgaste, a la abrasión y a la fatiga. En el caso de la prueba 3 destaca la gran cantidad de Zinc (14,5%), y aunque tiene Estaño, la cantidad de este es mínimo (solo el 1,98%), esta concentración de Zinc confiere mayor dureza al material, también tiene Aluminio que incrementa la resistencia al desgaste (3,07%), y aunque tiene Hierro que incrementa la dureza en un 0,63%, la mayor presencia de Silicio que de Hierro (0,83% vs. 0,63%) puede ser contraproducente por generar el Silicio áreas quebradizas.

8.4 Prueba de Microdureza

Para el ensayo de microdureza se implementó el método Vickers, y fue realizado en los laboratorios de la Universidad Libre, facultad de Ingeniería, con el equipo de microdureza Shimadzu. Se realizaron 12 mediciones de las diferentes probetas manejadas en esta investigación, y se escogió para cada una de ellas 5 muestras y se promedió para un valor final. Se realizó este ensayo para determinar la resistencia del material y su deformación.

Tabla 9 Resultado de ensayo de micro dureza

PRUEBA DE MICRODUREZA										
PROBETA	TIEMPO DE PRUEBA		PESO (gr) 300	PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	DESIGNACIÓN	PESO (gr) 200	PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	DESIGNACIÓN
	TIEMPO (seg)	PRUEBA N°								
CARACTERIZACIÓN DE MATERIAL 1	30	1	100,2	107,92	8,56	107,92HV300/30	132,54	13,06	132,54HV200/30	126,3
		2	109,4							155,7
		3	101,6							125,3
		4	106,7							129,6
		5	121,7							125,8

PRUEBA DE MICRODUREZA										
PROBETA	TIEMPO DE PRUEBA		PESO (gr) 300	PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	DESIGNACIÓN	PESO (gr) 200	PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	DESIGNACIÓN
	TIEMPO (seg)	PRUEBA N°								
CARACTERIZACIÓN DE MATERIAL 2	30	1	74,01	65,694	10,18	65,694HV300/30	66,64	69,536	3,31	69,536HV200/30
		2	75,75				70,95			
		3	67,18				74,62			
		4	60,49				67			
		5	51,04				68,47			
CARACTERIZACIÓN DE MATERIAL 3	30	1	74,01	65,694	10,18	65,694HV300/30	66,64	69,536	3,31	69,536HV200/30
		2	75,75				70,95			
		3	67,18				74,62			
		4	60,49				67			
		5	51,04				68,47			
PROBETA 1	30	1	66,45	76,562	5,78	76,562HV300/30	NO SE REGISTRA DATOS			
		2	77,91							
		3	80,75							
		4	77,91							
		5	79,79							
PROBETA 2	30	1	165,4	166,28	14,01	166,28HV300/30	170,8	165,72	4,47	165,72HV200/30
		2	188,7				167,9			
		3	154,5				161			
		4	154,5				167,9			
		5	168,3				161			
PROBETA 3	30	1	65,73	65,01	10,01	65,01HV300/30	170,8	82,206	49,58	82,206HV200/30
		2	72,66				57,95			
		3	76,1				60,96			
		4	51,43				63,37			
		5	59,13				57,95			

PRUEBA DE MICRODUREZA										
PROBETA	TIEMPO DE PRUEBA		PESO (gr) 300	PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	DESIGNACIÓN	PESO (gr) 200	PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	DESIGNACIÓN
	TIEMPO (seg)	PRUEBA N°								
PROBETA 4	30	1	63,64	64,302	9,50	64,302HV300/30	129,7	108,68	11,91	108,68HV200/30
		2	65,02				100,5			
		3	49,05				105,8			
		4	69,45				104,4			
		5	74,35				103			
PROBETA 5	30	1	115,2	118,08	10,91	118,08HV300/30	70,56	116,232	26,92	116,232HV200/30
		2	116,8				127,2			
		3	105,8				137,2			
		4	116,8				114,2			
		5	135,8				132			
PROBETA 6	30	1	165,4	162,62	20,09	162,62HV300/30	157,7	170,98	22,21	170,98HV200/30
		2	174,3				164,4			
		3	177,4				179,1			
		4	168,3				205,3			
		5	127,7				148,4			
PROBETA 7	30	1	68,68	59,116	6,05	59,116HV300/30	58,68	58,754	6,27	58,754HV200/30
		2	56,76				69,6			
		3	60,36				54,49			
		4	52,44				55,84			
		5	57,34				55,16			
PROBETA 8	30	1	70,23	59,574	9,25	59,574HV300/30	65,93	62,85	3,65	62,85HV200/30
		2	57,93				56,53			
		3	45,56				64,21			
		4	59,13				63,37			
		5	65,02				64,21			

PRUEBA DE MICRODUREZA										
PROBETA	TIEMPO DE PRUEBA		PESO (gr) 300	PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	DESIGNACIÓN	PESO (gr) 200	PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR	DESIGNACIÓN
	TIEMPO (seg)	PRUEBA N°								
PROBETA 9	30	1	115,2	103,788	9,67	103,788HV300/30	120,4	108,056	8,96	108,056HV200/30
		2	113,5				96,48			
		3	97,6				110,2			
		4	96,32				103			
		5	96,32				110,2			

8.4.1 Discusión de Prueba de Microdureza

A todas las probetas se les realizó el método Vickers para una carga designada de 300gr y de 200gr por un tiempo de 30 seg. El valor de dureza promedio para la carga de 300 en la caracterización del material 1 fue de 107,92; para el material 2 y el material 3 coincidió en el valor de 65,694.

Respecto a las probetas sometidas a 300gr de carga las de mayores valores de dureza promedio fueron la probeta 2 con 166,28, la probeta 6 con 162,62, la probeta 5 con 118,08 y la probeta 9 con 103,79; en los valores medios estuvieron la probeta 1 con 76,562; la probeta 3 con 65,01 y la No. 4 con 64,302; y por último con valores bajos estuvieron las probetas 8 y 7 con 59,574 y 59,116 respectivamente

Los mayores valores de dureza para el peso de 200gr se dieron en la probeta 6 con 170,98; la probeta 2 con 165,72, la probeta 5 con 116,232; la probeta 4 con 108,68 y la probeta 9 con 108,05. En estos valores destaca que la probeta 6 paso de 162,62 a 170,98 y la probeta 4 paso de 64,302 a 108,68, siendo las dos que presentaron mayor diferencia entre los valores de dureza; los valores medios se dieron en la probeta 3 con 82,206; y por último con valores bajos estuvieron las probetas 8 y 7 con 62,85 y 58,754 respectivamente. Para la probeta 1 no se registraron datos. Al contrastar los valores de dureza para el peso de 300gr vs. 200gr, llama la atención que hubo una disminución en los valores de dureza para las probetas No. 2 (166,28 vs. 165,72); la No. 5 (118,08 vs. 116,232) y la No. 7 (59,116 vs. 58,754). En la tabla a continuación se contrasta la composición identificada en el método SEM con los valores de microdureza.

Tabla 10 Composición de las probetas vs. Microdureza

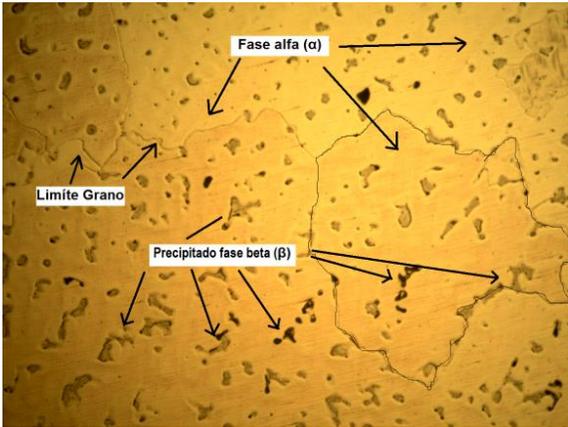
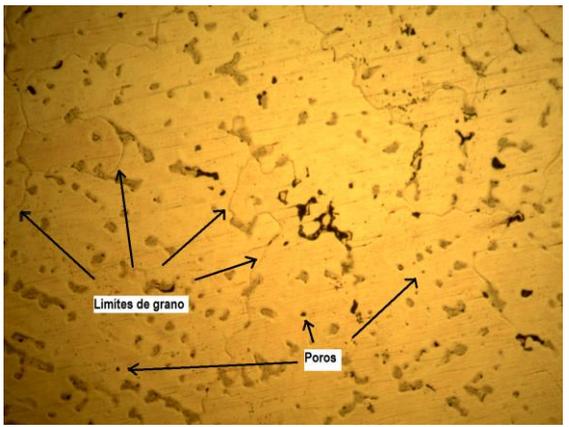
ID	COMPOSICIÓN	MICRODUREZA (300gr)	MICRODUREZA (200gr)
Probeta 02	Plomo (Pb): 67,88% Oxígeno (O): 21,44% Cobre (Cu): 7,69% Aluminio (Al): 2,98%	166,28	165,72
Probeta 06	EDX OSCURO Silicio (Si): 98,05% Cobre (Cu): 1,95% EDX MATRIZ Cobre (Cu) 89,67% Tecnecio (Tc) 5,26% Estaño (Sn) 2,88% Azufre (S) 2,19%	162,62	170,98
Probeta 05	Cobre (Cu): 74,64% Estaño (Sn): 16,78% Aluminio (Al): 2,67% Azufre (S): 2,59% Oxígeno (O): 1,71% Silicio (Si): 1,60%	118,08	116,232
Probeta 09		103,79	108,056
Probeta 01	Plomo (Pb) con 45,39% Oxígeno (O) con 22,15% Azufre (S) con 7,54% Cobre (Cu) con 12,5% Estaño (Sn) con 1,40% Hierro (Fe) con 4,96% Aluminio (Al) con 2,89% Zinc (Zn) con 3,62%	76,562	
Probeta 03	Cobre (Cu) 85,77% Estaño (Sn) 6,43% Oxígeno (O) 4,07% Silicio (Si) 3,74%	65,01	82,206
Probeta 04	EDX Matriz Cobre (Cu) 73,88% Estaño (Sn) 26,12% EDX Oscuro Cobre (Cu) 71,34% Níquel (Ni) 10,36% Zinc (Zn) 9,63% Aluminio (Al) 7,69% Hierro (Fe) 0,98%	64,302	108,68

ID	COMPOSICIÓN	MICRODUREZA (300gr)	MICRODUREZA (200gr)
Probeta 08		59,574	62,85
Probeta 07		59,116	58,754

8.5 Análisis metalográfico y método SEM

A continuación, se muestran imágenes de la caracterización del material después del ataque químico.

Tabla 11 Microestructura de caracterización del material 1-2-3

MICROESTRUCTURA DE CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PROBETA 1-2-3	
MICROESTRUCTURA	OBSERVACIONES
<p><i>Figura 27 Microestructura Caracterización material a 20x</i></p> 	<p><i>Figura 28 Microestructura Caracterización material a 20x</i></p> 

En la microestructura de caracterización del material se muestra una matriz dendrítica, límites de grano muy diferenciados y precipitaciones en los bordes del grano, también se aprecian poros.

Figura 29 Microestructura material 02 a 20x

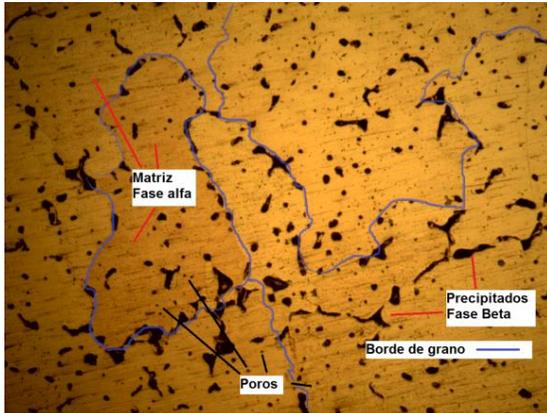
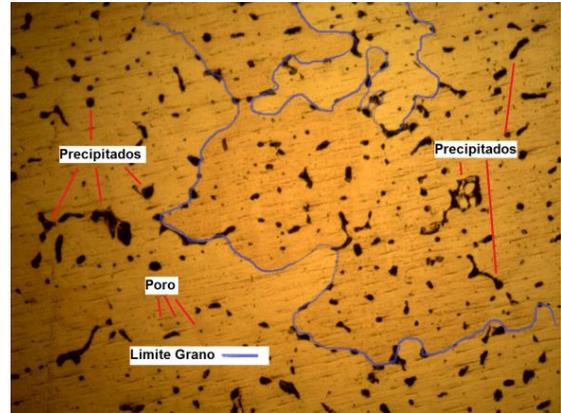


Figura 30 Microestructura material 02 a 20x



En la microestructura de caracterización del material se evidenció una fuerte coloración de los precipitados, que son más abundantes que en las otras dos caracterizaciones y se unen entre ellas, formando redes en algunos sectores.

Figura 31 Microestructura Caracterización material 03 a 20x

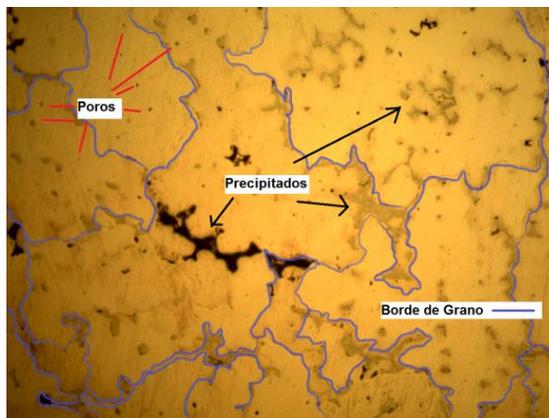
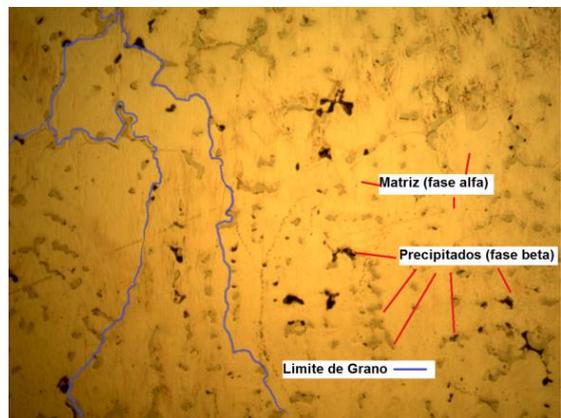


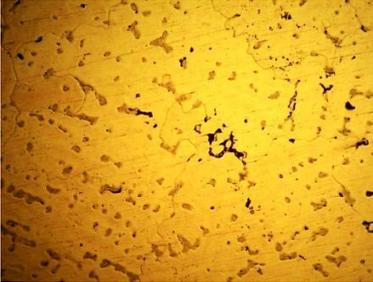
Figura 32 Microestructura Caracterización material 03 a 20x



En esta probeta se identifica la matriz dendrítica igual que en las otras dos, se encuentran precipitaciones de tonalidades medias y oscuras, y también hay formación de redes, pero mucho más continuas que en la probeta 2 y de un color más claro.

8.5.1 Discusión del análisis metalográfico

A continuación, se realiza la comparación entre las imágenes de las probetas después del ataque químico que se realizó usando FeCl₃, HCl, H₂O por ser el recomendado para revelar los límites de grano, el contraste entre granos y la deformación en frío de las aleaciones de cobre porque oscurece la fase β. [26]

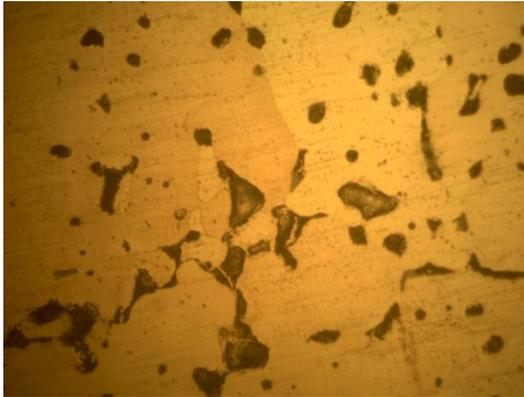
<i>Figura 33 Microestructura material 01 a 20x</i>	<i>Figura 34 Microestructura material 02 a 20x</i>	<i>Figura 35 Microestructura material 03 a 20x</i>
		
<p>Cu (90,39%) y Sn (9,61%)</p>	<p>Cu (96,47%) y Sn (3,53%)</p>	<p>Cu (78,98%), Zn (14,5%), Al (3,07), Sn (1,98%), Si (0,83%), Fe (0,63%).</p>

El material de la mordaza de la prueba 01 fue Bronce producto de la aleación de Cobre (Cu) y Estaño (Sn) donde el 90,39% corresponde a Cu y el 9,61% a Sn. La aleación de la prueba 02 fue Bronce producto de la aleación de Cobre (Cu) y Estaño (Sn) donde el 96,47% corresponde a Cu y el 3,53% a Sn. La microestructura dendrítica de fase alfa y eutectoide (áreas de óxido moteado redondeado en el cobre) en el espacio inter dendrítico se da como consecuencia de la segregación del estaño en la última porción de líquido que solidifica [26] y [27].

Para las tres caracterizaciones la aleación esté compuesta por una fase continua, (matriz), y por una segunda fase, en menor proporción, de precipitados, que se encuentra muy marcado en el caso de la probeta 2 (Cu: 96,47% y Sn: 3,53%) y que se constituye por los rebordes oscuros. En todas se identifican los bordes de grano. Al comparar las Figuras siguientes se encuentra similitud visual con el bronce nacional en lo referente al tamaño y a la distribución de las fases.

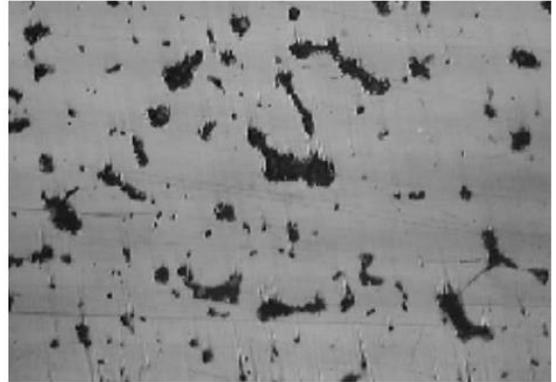
En este punto es importante traer a colación la microdureza, que para el caso de la probeta 01 es de 107,92, el más alto respecto a los otros dos materiales, que tuvieron resultados de 65,694 tanto para el material 02 como para el material 03. Este mayor valor en la propiedad mecánica se puede deber al contenido de estaño, más alto que las otras dos probetas.

Figura 36 Microestructura material 02 a 50x. Presencia de precipitados de Estaño.



Fuente: Autor del Proyecto

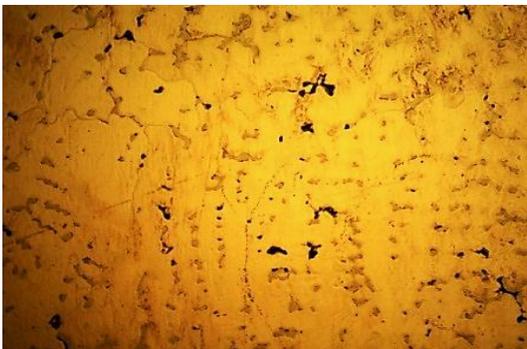
Figura 37 Microestructura a 100X del bronce nacional



Fuente: [28]

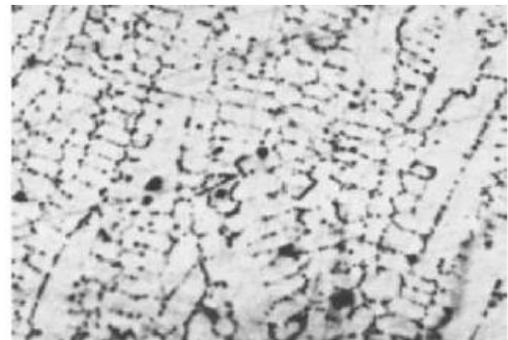
Para la tercera prueba donde las aleaciones tienen bajos contenidos de aleantes, es decir, contenidos muy bajos de Pb o Sn la situación es análoga a la de las aleaciones isomórficas binarias, formándose una sola fase [26] y [3] esto es corroborado por [29]. El Bronce Ordinario (aquel con menos del 7% de Estaño) resulta de carácter monofásico y que a mayores porcentajes de Estaño pueden aparecer precipitados de δ y raramente de ϵ . La tercera prueba tiene menos precipitación en los límites del grano que la prueba 2, Llano [28] plantea que esto es debido a que los precipitados presentes en el borde del grano presentan un mayor contenido de soluto que el de la matriz, por lo cual los átomos de soluto se difunden desde la matriz adyacente hacia las partículas del borde del grano para ayudar en el crecimiento de los precipitados.

Figura 38 Microestructura material 03 a 20x. Presencia de pocos precipitados y áreas moteadas por el óxido de cobre similares a los de la Figura



Fuente: Autor del proyecto

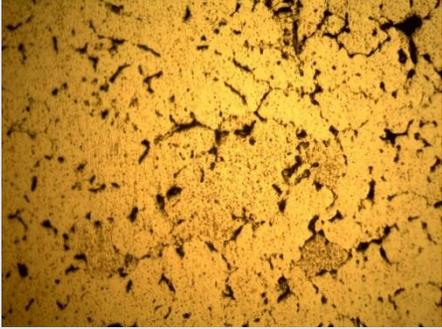
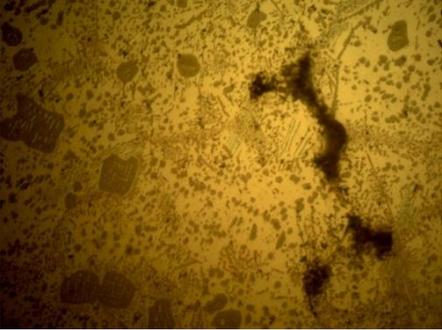
Figura 39 Efecto del contenido de oxígeno de 0,09% resulta en dendritas primarias de cobre (blancas) y áreas moteadas oscuras por el óxido de cobre

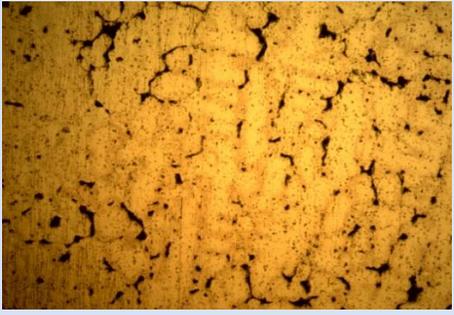
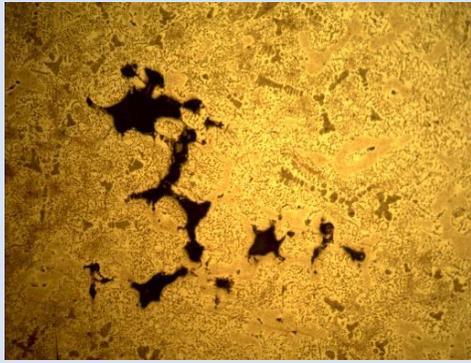
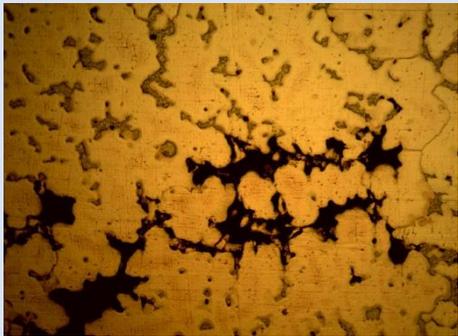


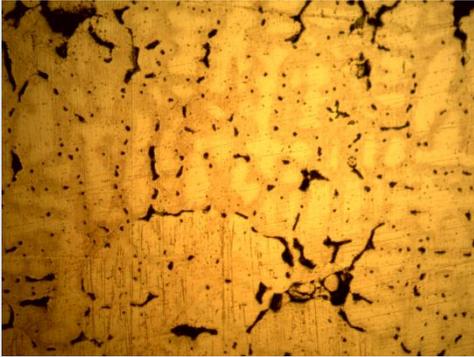
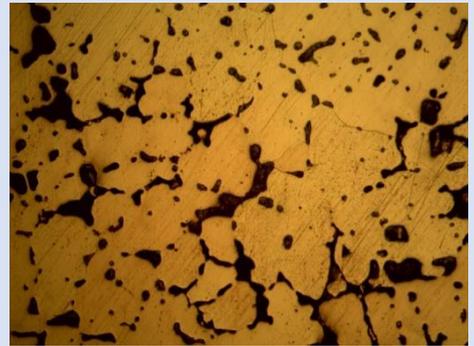
Fuente: [26]

8.5.2 Microestructura en las Probetas de la 1 a la 9

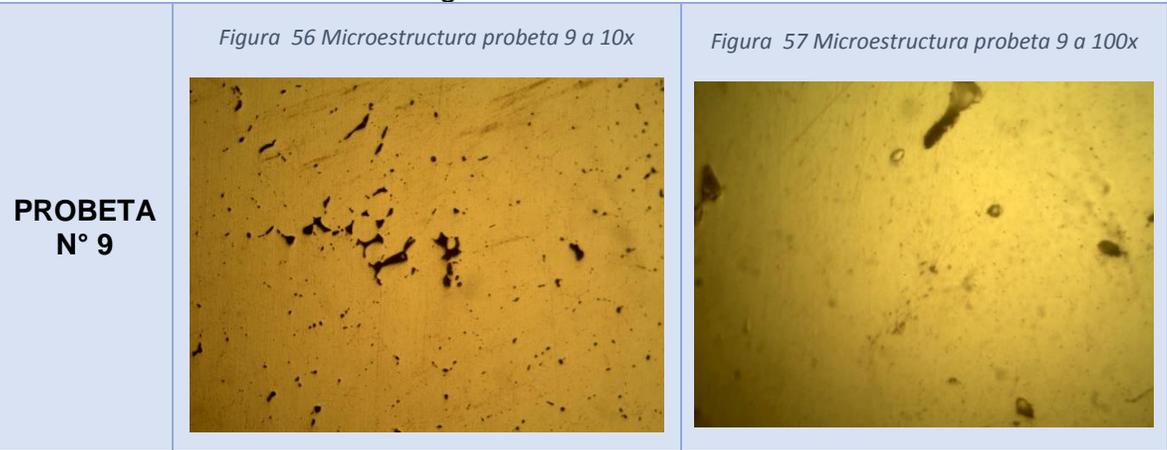
Tabla 12 Microestructura probetas

N° DE PROBETA	MICROESTRUCTURA	OBSERVACIONES
<p>PROBETA N° 1</p>	<p><i>Figura 40 Microestructura probeta 1 a 20x</i></p> 	<p><i>Figura 41 Microestructura probeta 1 a 100x</i></p> 
<p>Matriz dendrítica con límites de grano muy definidos con una superficie granulosa. Al incrementar el detalle se evidencia una superficie de carácter granuloso y se aprecia con mayor detalle los precipitados.</p>		
<p>PROBETA N° 2</p>	<p><i>Figura 42 Microestructura probeta 02 a 20x</i></p> 	<p><i>Figura 43 Microestructura probeta 2 a 100x</i></p> 
<p>En la probeta 02 la matriz es más heterogénea que la probeta 1 por tener varias fases. Al tener un mayor detalle de la probeta 2 (Figura 43) se aprecian partículas en forma globular y lineal, además de multitud de material en forma de puntos.</p>		

<p>PROBETA N° 3</p>	<p><i>Figura 44 Microestructura probeta 3 a 20x</i></p> 	<p><i>Figura 45 Microestructura probeta 03 a 100x</i></p> 
	<p>En la probeta 03 la matriz es homogénea con presencia de partículas granulares y una textura con una superficie levemente rayada en una misma dirección. Se tiene la presencia de un precipitado en forma de anillo que se prolonga con una línea de carácter continua.</p>	
<p>PROBETA N° 4</p>	<p><i>Figura 46 Microestructura probeta 04 a 20x</i></p> 	<p><i>Figura 47 Microestructura probeta 04 a 100x</i></p> 
	<p>En la probeta 04 el material de matriz es fuertemente heterogéneo, con diferentes fases.</p>	
<p>PROBETA N° 5</p>	<p><i>Figura 48 Microestructura probeta 05 a 20x</i></p> 	<p><i>Figura 49 Microestructura probeta 06 a 50x</i></p> 
	<p>En la probeta 05 el material de matriz dendrítica con bordes de grano definidos. Presencia de poros y de precipitados en el borde y al interior del grano, estos con presencia globulosa.</p>	

<p>PROBETA N° 6</p>	<p><i>Figura 50 Microestructura probeta 06 a 20x</i></p> 	<p><i>Figura 51 Microestructura probeta 06 a 100x</i></p> 
	<p>En la probeta 06 las estructuras son de mayor tamaño, se tiene gran cantidad de precipitados en los bordes de grano.</p>	
<p>PROBETA N° 7</p>	<p><i>Figura 52 Microestructura probeta 7 a 20x</i></p> 	<p><i>Figura 53 Microestructura a 50x</i></p> 
	<p>La probeta 07 tiene granos de tamaño medio, precipitados en los bordes. En el detalle se aprecian leves estrías a modo de rayón en sectores de la matriz.</p>	
<p>PROBETA N° 8</p>	<p><i>Figura 54 Microestructura probeta 8 a 20x</i></p> 	<p><i>Figura 55 Microestructura probeta 8 a 100x</i></p> 

En la probeta 08 el material tiene mayor cantidad de partículas que el anterior. Estas inclusiones son de bordes redondeados y se conectan en sectores. En el detalle se aprecia que estas inclusiones en tamaños pequeños son circulares y al incrementar el tamaño se elongan.



Esta última probeta tiene una matriz muy homogénea de carácter dendrítico en color poco diferenciado respecto a la matriz en general. Se tienen inclusiones puntuales y en sitios son grandes y se conectan.

8.5.3 Resultados de la caracterización de materiales con el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM)

Tabla 13 Caracterización de materiales por SEM probeta N° 1

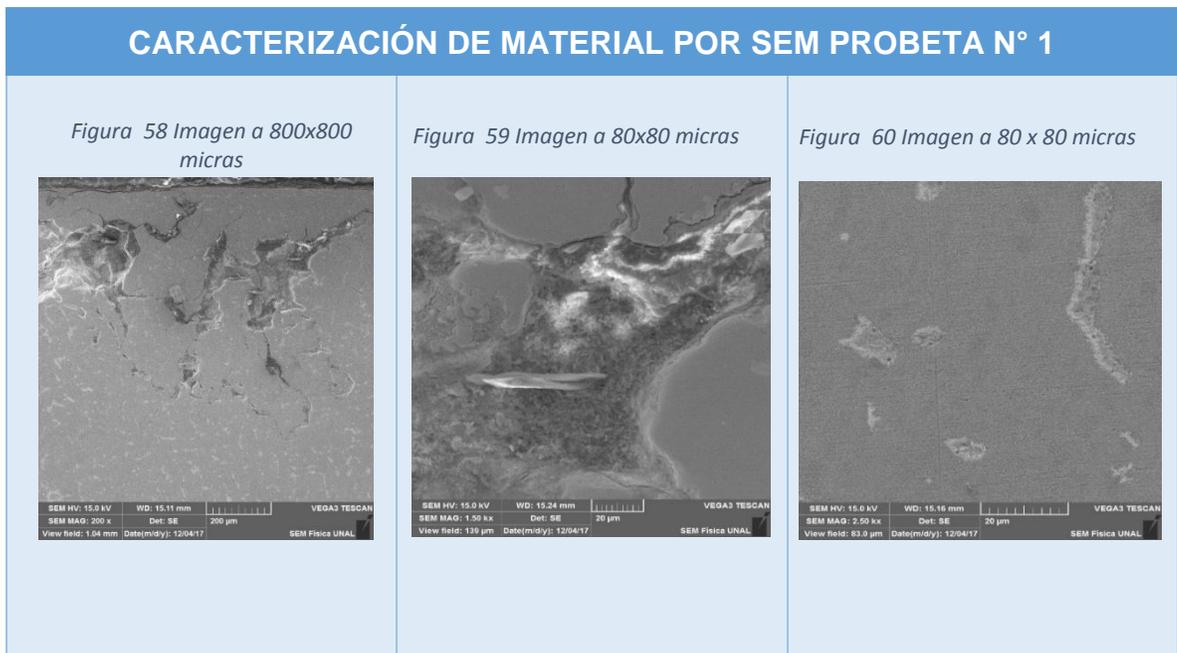
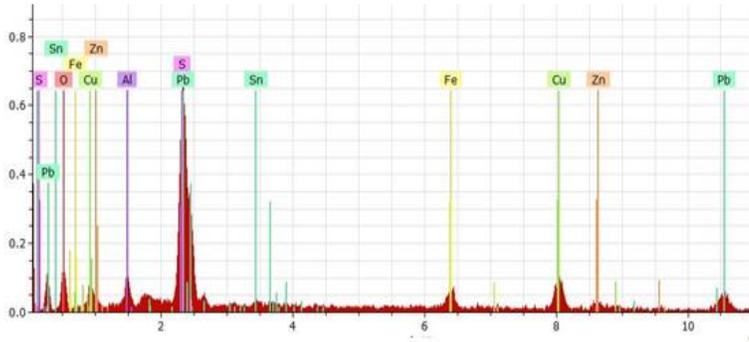


Figura 61 Caracterización del material de la probeta 01 (parte A)



OBSERVACIONES

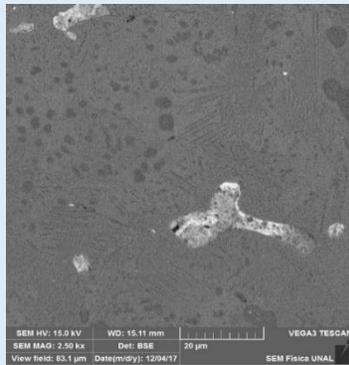
Según el método SEM, la probeta 01 tiene:

- . Plomo (Pb) con 45,39%
- . Oxígeno (O) con 22,15%
- . Azufre (S) con 7,54%
- . Cobre (Cu) con 12,5%
- . Estaño (Sn) con 1,40%
- . Hierro (Fe) con 4,96%
- . Aluminio (Al) con 2,89%
- . Zinc (Zn) con 3,62%

Tabla 14 Caracterización de materiales por SEM probeta N° 02

CARACTERIZACIÓN DE MATERIAL POR SEM PROBETA N° 2

Figura 62 Imagen en cuadrícula de 80x80 micras



OBSERVACIONES

En el SEM de esta probeta se tiene:

- . Plomo (Pb): 67,88%
- . Oxígeno (O): 21,44%
- . Cobre (Cu): 7,69%
- . Aluminio (Al): 2,98%

Figura 63 Caracterización del material de la probeta 02

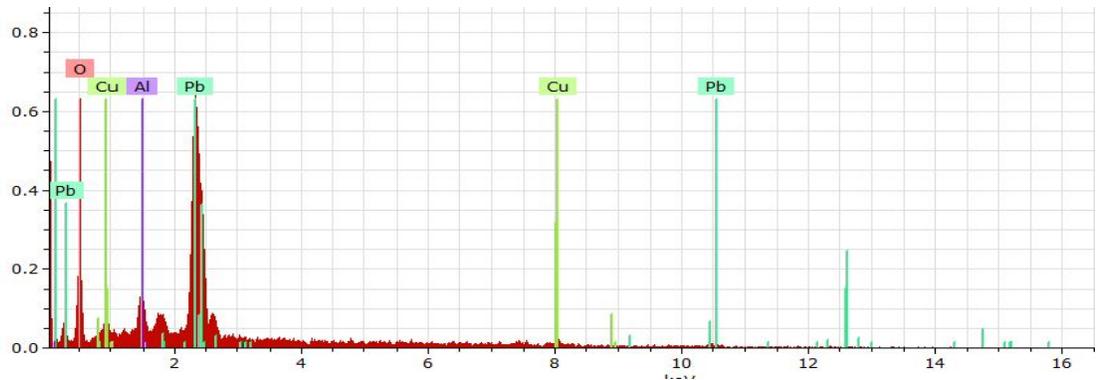


Tabla 15 Caracterización de materiales por SEM probeta N° 03

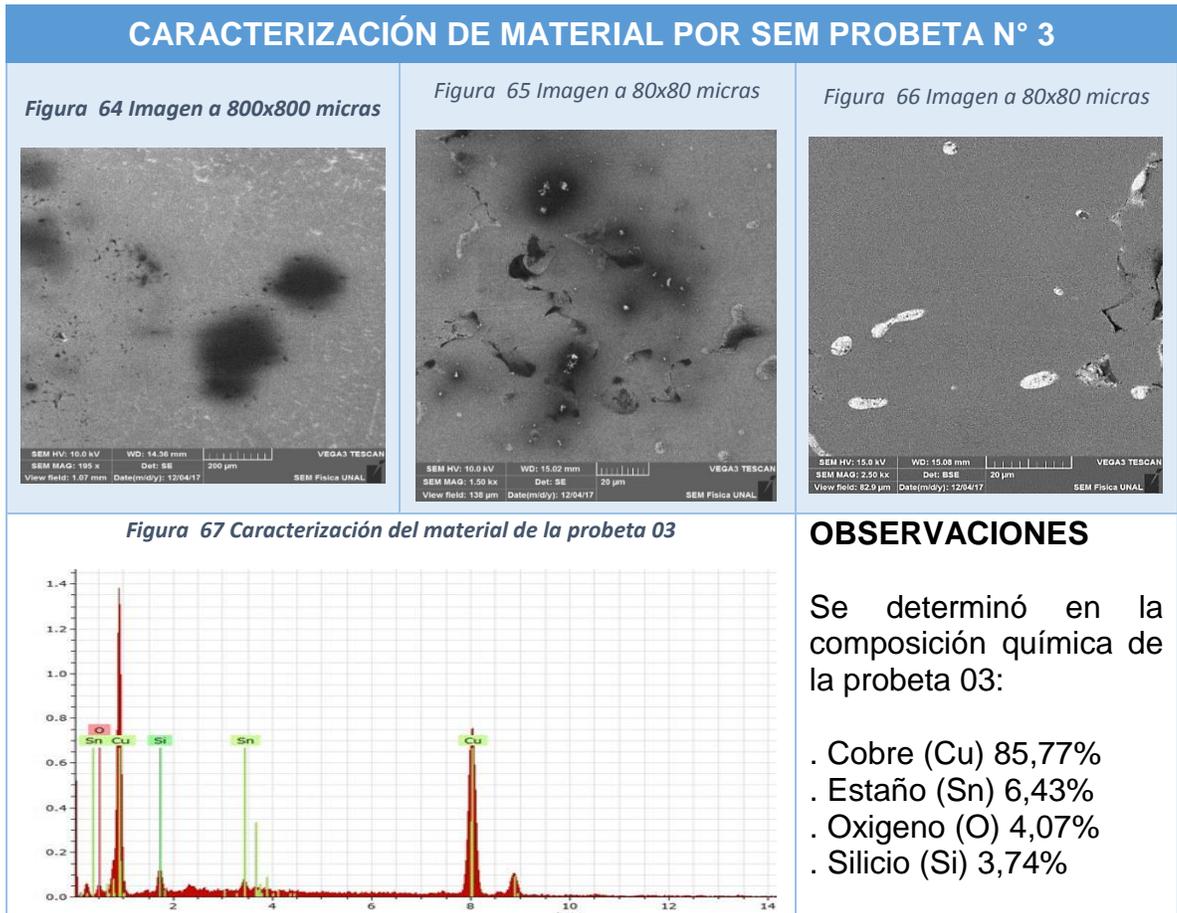


Tabla 16 Caracterización de materiales por SEM probeta N°04

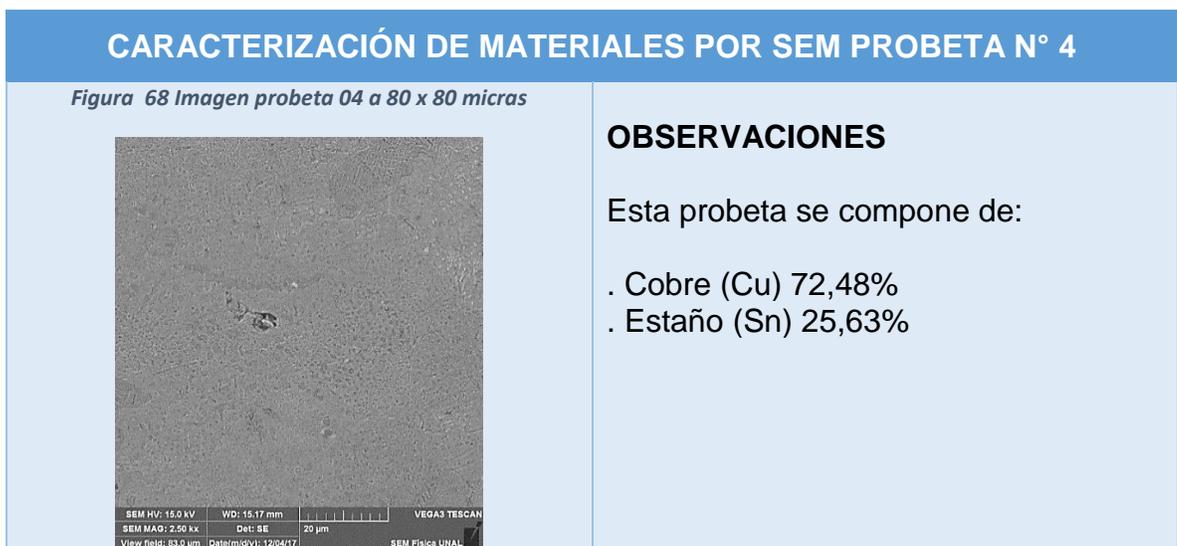


Figura 69 Caracterización de la matriz de la probeta 04

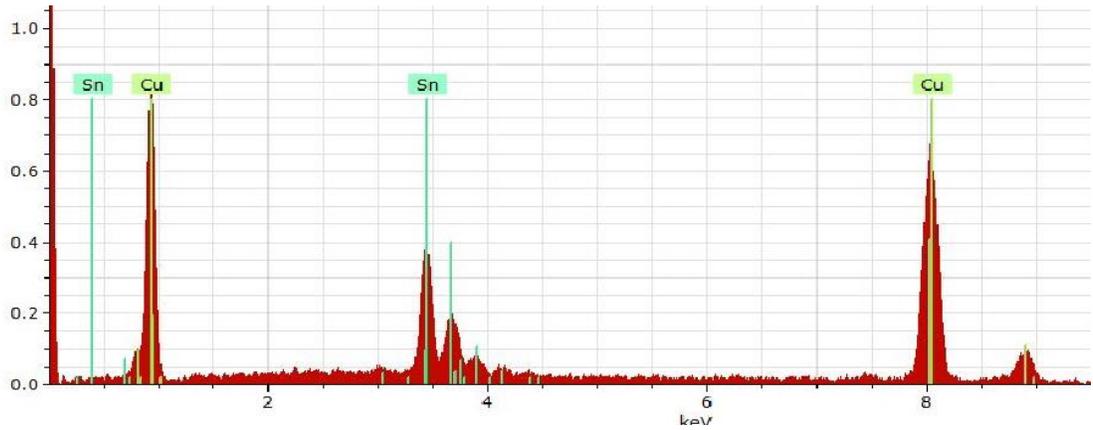
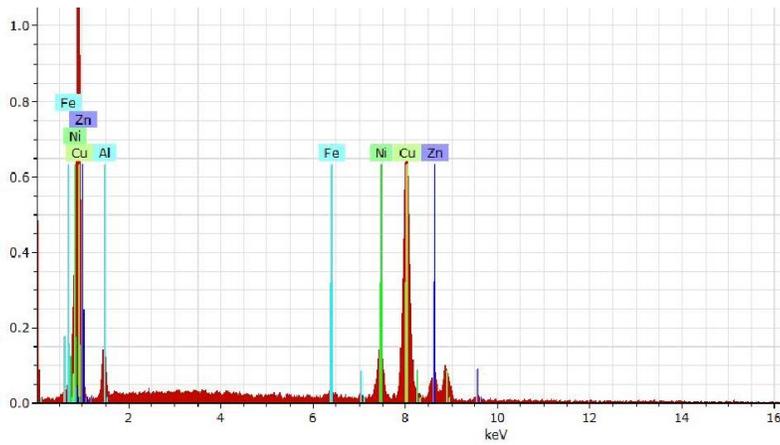


Figura 70 Caracterización general del material de la probeta 04



OBSERVACIONES

Esta probeta se compone de:

- . Cobre (Cu) 71,34%
- . Níquel (Ni) 10,36%
- . Zinc (Zn) 9,63%
- . Aluminio (Al) 7,69%
- . Hierro (Fe) 0,98%

Tabla 17 Caracterización de materiales por SEM probeta N°05

CARACTERIZACIÓN DEL MATERIALES POR SEM PROBETA N° 5

Figura 71 Imagen de 800x800 micras

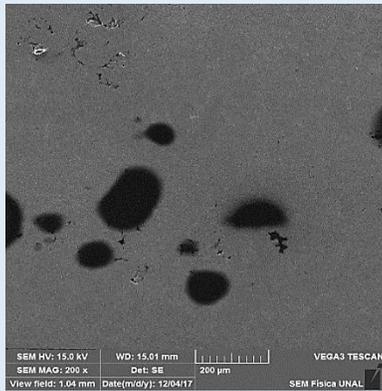


Figura 72 Imagen de 40x40 micras

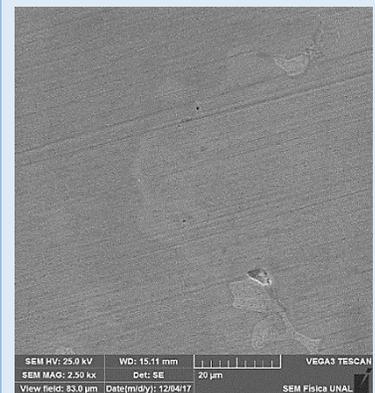
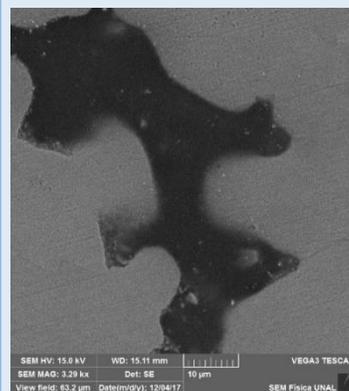
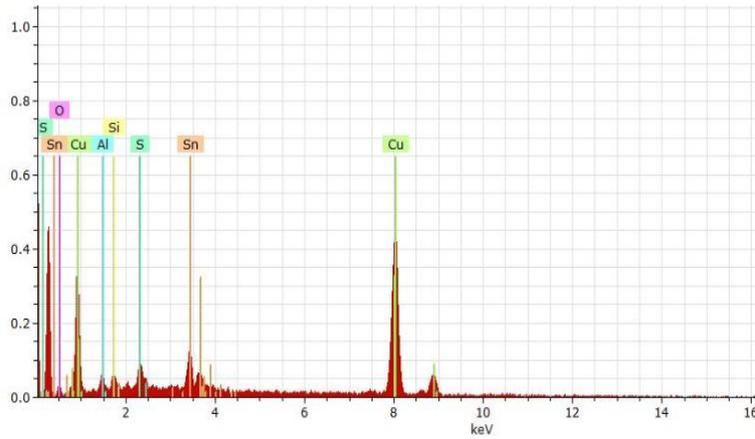


Figura 73 Caracterización del material de la probeta 05



OBSERVACIONES

En la probeta 5 se determinó:

- . Cobre (Cu): 74,64%
- . Estaño (Sn): 16,78%
- . Aluminio (Al): 2,67%
- . Azufre (S): 2,59%
- . Oxígeno (O): 1,71%
- . Silicio (Si): 1,60%

Tabla 18 Caracterización de materiales por SEM probeta N° 06

CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES POR SEM PROBETA N° 6

Figura 74 Imagen de 800 x 800 micras

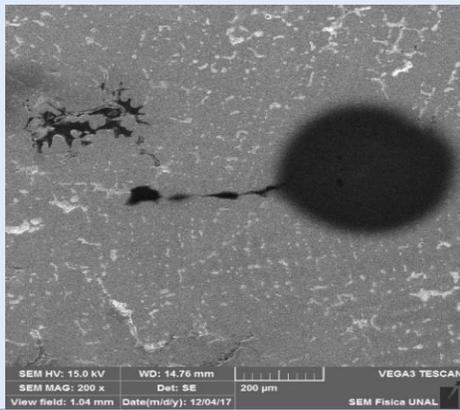


Figura 75 Imagen de 80 x 80 micras

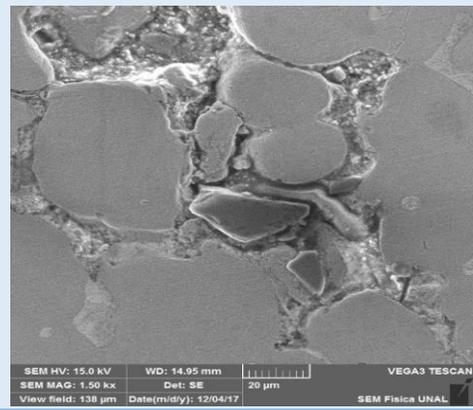


Figura 76 Imagen de 40 x 40 micras

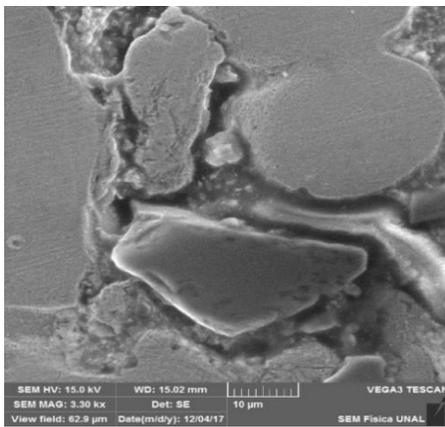


Figura 77 Imagen de 80 x 80 micras

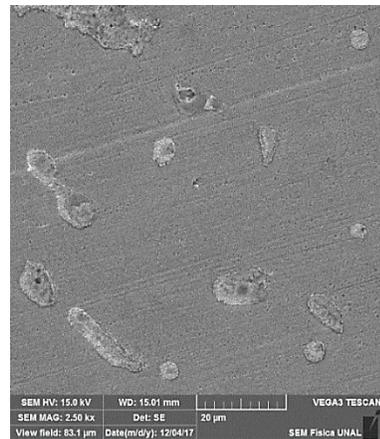
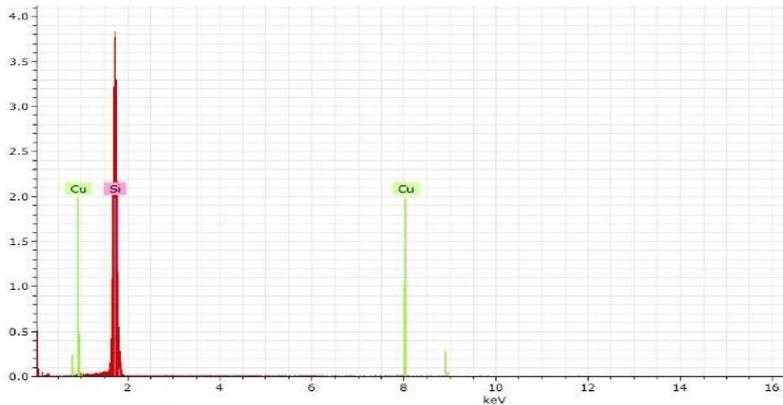


Figura 78 Caracterización general del material de la probeta 06

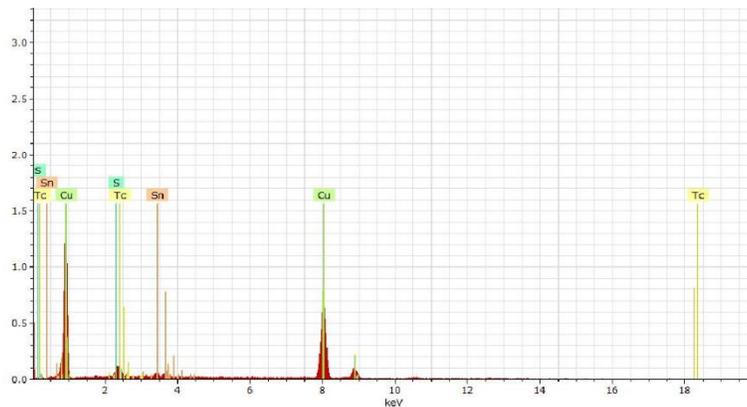


OBSERVACIONES

En la caracterización EDX oscura de la probeta 6:

- . Silicio (Si): 98,05%
- . Cobre (Cu): 1,95%

Figura 79 Caracterización matriz del material de la probeta 06



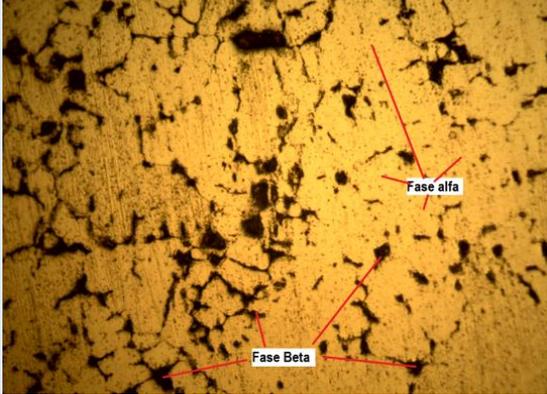
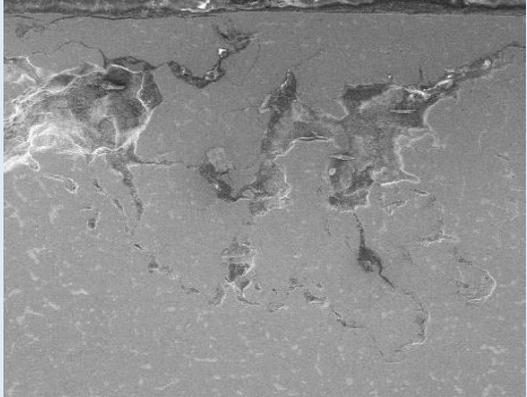
En la caracterización EDX matriz de la probeta 6:

- . Cobre (Cu) 89,67%
- . Tecnecio (Tc) 5,26%
- . Estaño (Sn) 2,88%
- . Azufre (S) 2,19%

8.5.4 Discusión Microestructura y Método SEM Probetas de la 1 a la 9

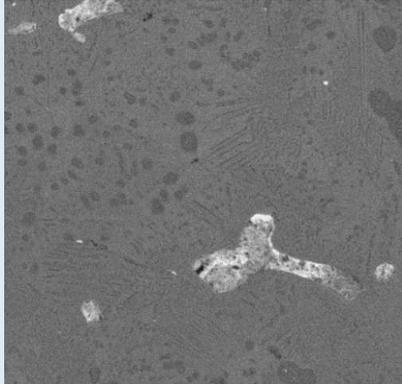
8.5.4.1 Probeta N° 1

La probeta 01 se compone en un 45% de Plomo y la participación del cobre es relativamente baja (12,5%). El resultado de microdureza de esta probeta fue de 76,562 para el peso de 300, valor medio para los reportados en las demás. Para el peso de 200 no se reportaron datos. El valor de dureza se puede atribuir a la gran cantidad de precipitados en los bordes de grano que facilitan la formación de grietas y por ende de dislocaciones.

MICROESTRUCTURA Y MÉTODO SEM PROBETA N° 1	
<p><i>Figura 80 Microestructura probeta 1 a 100x</i></p>  <p><i>Fuente: Autor del proyecto</i></p>	<p><i>Figura 81 Probeta 1: Imagen a 800x800 micras</i></p>  <p><i>Fuente: Autor del proyecto</i></p>

8.5.4.2 Probeta N° 2

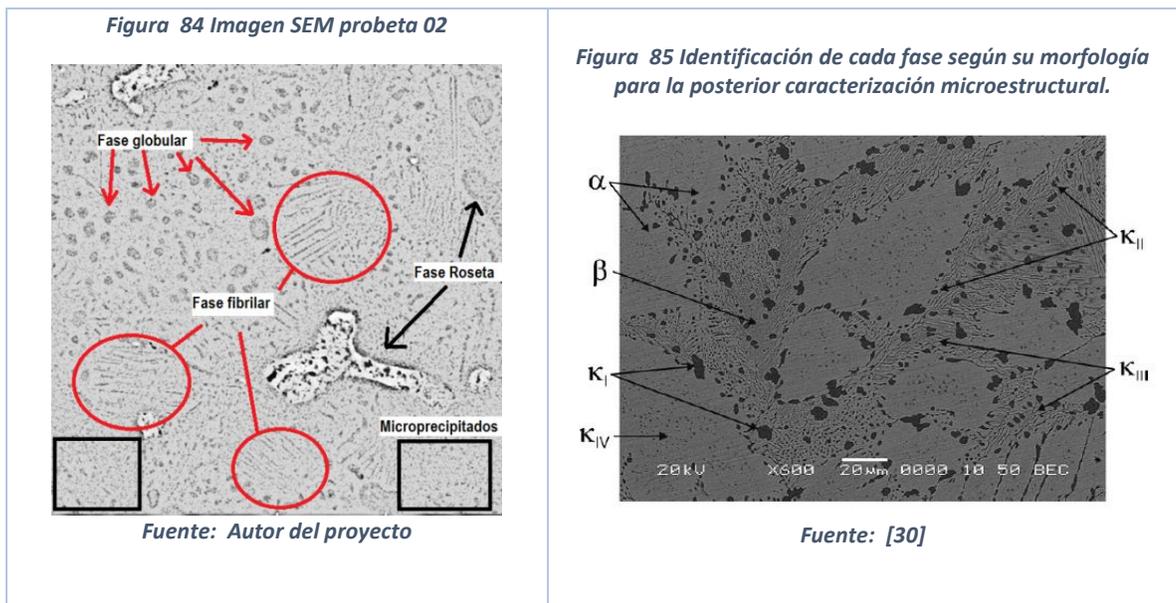
Respecto a la composición de la probeta 02, la alta presencia de plomo (67,88%) puede brindar mayor resistencia mecánica y poner un límite bajo de elasticidad [26]. También tiene un importante porcentaje de Oxígeno (21,44%) lo que resulta en menores dendritas primarias de Cobre que tienen una representación en porcentaje de 7,69% [26]. En la prueba de microdureza esta probeta presento el mayor valor con 166,28. Este valor se puede atribuir a la poca cantidad de precipitados en los bordes de grano, aspecto que incrementa la microdureza.

MICROESTRUCTURA Y MÉTODO SEM PROBETA N° 2	
<p><i>Figura 82 Microestructura probeta 02 a 100x</i></p>  <p><i>Fuente: Autor del proyecto</i></p>	<p><i>Figura 83 Imagen SEM probeta 02</i></p>  <p><i>Fuente: Autor del proyecto</i></p>

La imagen SEM de la probeta 02 se compara a continuación con una imagen reportada por Llano [30] en la que se puede identificar tanto los granos α como de la fase β , y las diferentes fases de los precipitados K porque se distinguen la fase K_I en forma de roseta, la K_{II} globular, la K_{III} fibrilar y los microprecipitados K_{IV} .

Para facilitar la comparación se puso la imagen de la probeta 02 en negativo y se pueden identificar la fase alfa y beta, además de precipitados en forma de roseta, la fase globular y los micro precipitados.

Tabla 20 Microestructura y método SEM probeta 02 comparación

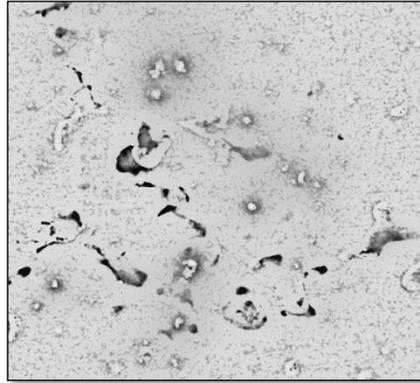


Según Llano [30] a medida que aumenta el tiempo y la temperatura del tratamiento térmico, se observa menos cantidad de la fase Beta (β) retenida y se forma la fase fibrilar (K_{III}).

8.5.4.3 Probeta N° 3

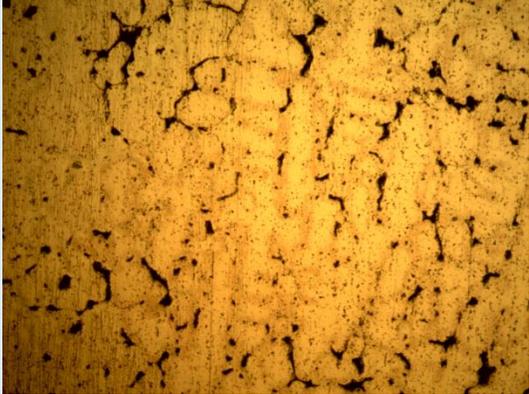
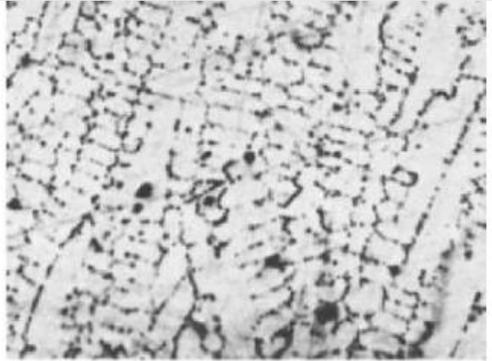
Respecto a la probeta 03 La matriz es homogénea con presencia de partículas granulares y una textura con una superficie levemente estriada en una misma dirección. Esta es la probeta que tiene más porcentaje de Cobre (85,77%), tiene presencia de Estaño (6,43%), Oxígeno (4,07%) y Silicio (3,74%). Esta probeta tiene un valor de microdureza medio con un 65,01. Este resultado coincide con la caracterización del material No. 02 con una composición de Cu (96,47%) y Sn (3,53%) y una dureza de 65,694. Aunque el tamaño del grano es mediano, la alta cantidad de precipitados en los bordes disminuye la microdureza de la probeta.

Figura 86 Imagen a 80x80 micras Probeta 03



El efecto del contenido de oxígeno resulta en dendritas primarias de cobre (blancas), áreas moteadas oscuras por el óxido de cobre y precipitados de estaño. Presenta similitud visual con lo reportado por Plasencia [26].

Tabla 21 Identificación estructuras de óxido de cobre probeta 03

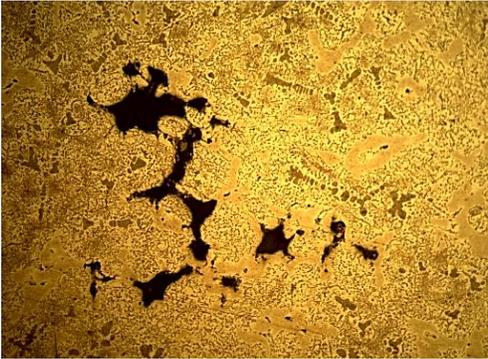
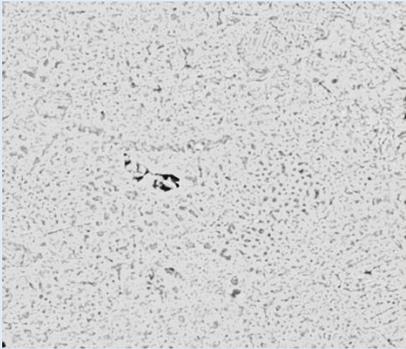
IDENTIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS DE OXIDO DE COBRE EN PROBETA N° 3	
<p>Figura 87 Microestructura probeta 3 a 100x</p>  <p>Fuente: Autor del proyecto</p>	<p>Figura 88 Detalle de estructuras de óxido de cobre en un Bronce estañado</p>  <p>Fuente: [26]</p>

8.5.4.4 Probeta N° 4

Esta probeta tiene dos SEM. El primero corresponde a las zonas oscuras y corresponde con un cobre estañado (Cobre=72,48% vs. Estaño=25,63%), por ende, se infiere que las precipitaciones (inclusiones de color negro son de estaño). La segunda caracterización SEM (matriz) indica una alta composición de cobre (71,34%) con una importante presencia de Níquel (10,36%), de Zinc (9,63%) y de

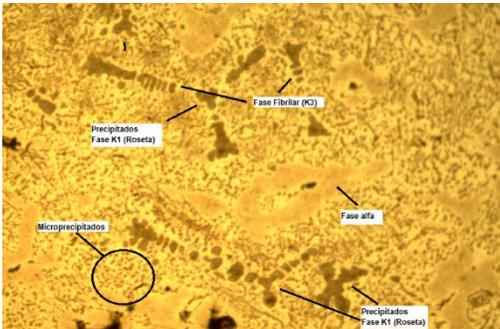
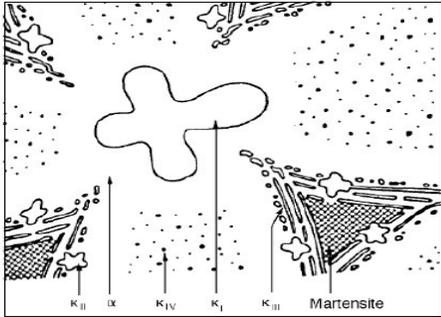
Aluminio (7,69%), también contiene una pequeña proporción de Hierro (0,98%). La probeta 04 tuvo un resultado de microdureza de 64,302 con el peso de 300 y de 108,68 con el peso de 200. El bajo valor de microdureza se puede atribuir a los grandes precipitados alojados a los bordes del grano, lo que facilita la generación de grietas y por ende de dislocaciones.

Tabla 22 Microestructura y método SEM probeta 04

MICROESTRUCTURA Y MÉTODO SEM PROBETA N° 4	
<p>Figura 89 Microestructura probeta 04 a 20x</p>  <p>Fuente: Autor de proyecto</p>	<p>Figura 90 SEM probeta 04 a 80 x 80 micras</p>  <p>Fuente: Autor del proyecto</p>

El material de la matriz de la probeta 04 está en su mayoría en fase Beta, y la fase alfa es escasa. Se aprecian precipitados y diferentes fases (la roseta, la globular, la fibrilar y los micro precipitados). En las imágenes a continuación se describe en una macro de la imagen las fases que se encuentran y se muestran con un gráfico que muestra la morfología de las fases del bronce.

Tabla 23 Comparación fases probeta 04

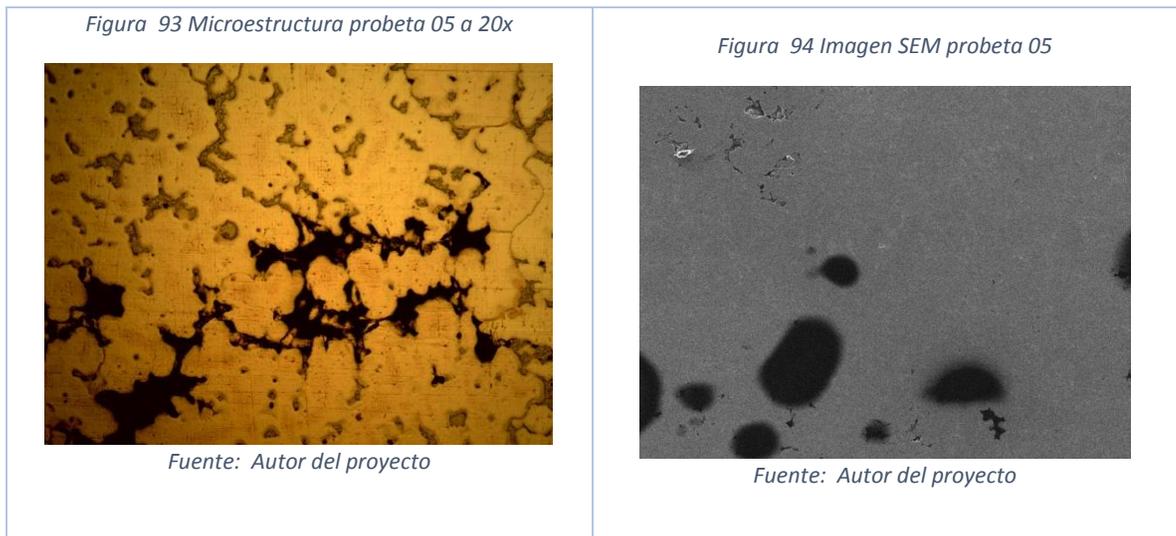
<p>Figura 91 Detalle de las fases de la probeta 04</p>  <p>Fuente: Autor del proyecto</p>	<p>Figura 92 Morfología fases en el bronce NAB</p>  <p>Fuente: [30]</p>
--	---

Esta microestructura con por lo menos cuatro tipos de k se debe a la presencia de ciertos elementos de los cuproaluminios, tales como el hierro y níquel, los cuales producen la nueva fase denominada kappa, (k), compuesta por Fe-Ni-Al, que empieza a formarse a los 900° C aproximadamente por descomposición de β en $\alpha + k$, de forma laminar y en algunos casos globular. La presencia del hierro y el níquel evitan la formación del eutectoide, disminuyendo así la fragilidad que se presenta por la aparición de este precipitado [22].

8.5.4.5 Probeta N° 5

Material con división de grano, de matriz predominantemente cúprica (Cu: 74,64%), se evidencian claramente las fases alfa y beta. Los precipitados se localizan al borde grano y son de Estaño (16,78%). También contiene Aluminio (2,67%), Azufre (2,59%), Oxígeno (1,71%) y Silicio (1,60%). Es una de las probetas con el tercer mayor valor en la prueba de dureza con 118,08. Este resultado se puede atribuir al tamaño del grano, que es mediano y la presencia del aluminio y del silicio lo que ¹aporta resistencia mecánica, además, tiene precipitados al interior del grano que incrementa la dureza [23].

Tabla 24 Microestructura y método SEM probeta 05



8.5.4.6 Probeta 06

En este material los granos son visibles y de mayor tamaño que otras probetas. Las fases alfa y beta son claramente distinguibles, los precipitados son abundantes y se

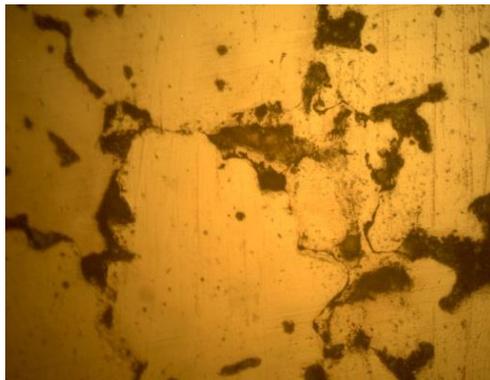
¹ La martensita, llamada así en honor al metalurgista Adolf Martens, es el nombre usado para designar la microestructura más dura encontrada en los aceros al carbono templados. Sin embargo, últimamente el énfasis se ha puesto en la naturaleza de la transformación más que en el producto. La transformación martensítica también ocurre en muchos sistemas no ferrosos metálicos como Cu-Al y Au-Cd, y en óxidos tales como SiO₂ y ZrO₂ [6].

encuentran en un 35% de la imagen. En el detalle se aprecia que la matriz tiene precipitados al interior del grano.

Esta probeta tiene dos SEM en el primero que corresponde a la fase oscura se compone casi en su totalidad de Silicio (98,05%) y una mínima parte de Cobre (1,95%). El EDX de la matriz corresponde a Cobre (Cu) 89,67%, Tecnecio (Tc) 5,26%, Estaño (Sn) 2,88% y Azufre (S) 2,19%. Esta probeta tuvo el segundo mayor valor de dureza con 162,62 para el peso de 300 y el mayor valor para el peso de 200 con 170,98. Esta dureza puede ser brindada por los precipitados de silicio porque De Gorostiza [4], plantea que los bronce al silicio poseen excelentes propiedades para el trabajo en caliente combinadas con alta resistencia mecánica. Los precipitados al interior del grano también aportan al incremento de la dureza.

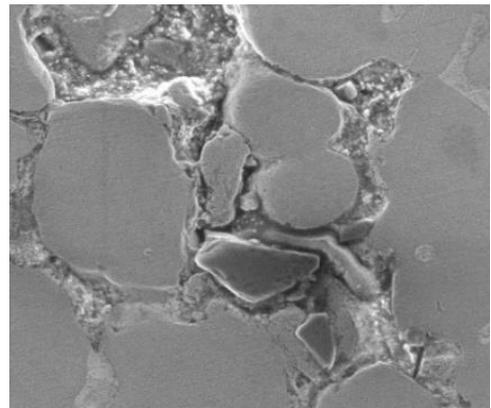
Tabla 25 Microestructura y método SEM probeta 06

Figura 95 Microestructura probeta 06 a 50x



Fuente: Autor del proyecto

Figura 96 Imagen probeta 06 de 80 x 80 micras



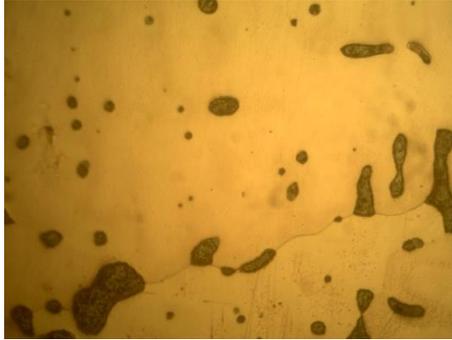
Fuente: Autor del proyecto

8.5.4.7 Probeta N° 7

Esta probeta tiene una matriz homogénea con precipitados en fase Globular. Se identifican los bordes de grano, y precipitados grandes en ellos. Los granos son pequeños. La fase alfa es muy evidente (regiones claras), al igual que la fase beta (zonas oscuras), la cual tienen una distribución regular en la superficie. Esta probeta tuvo el menor valor de microdureza para ambos pesos con un 59,116 para el peso de 300 y de 58,574 para el peso de 200. Esta probeta no cuenta con análisis SEM. En la probeta 7 se aprecia lo que parece una grieta intergranular, pero es solamente la acumulación de precipitados en los bordes del grano. El bajo valor obtenido en la prueba de microdureza se puede atribuir a la gran cantidad de precipitados en el borde del grano que puede facilitar el avance de dislocaciones por el mismo. Además, el grano es grande, lo que también contribuye al descenso de la dureza. [23]

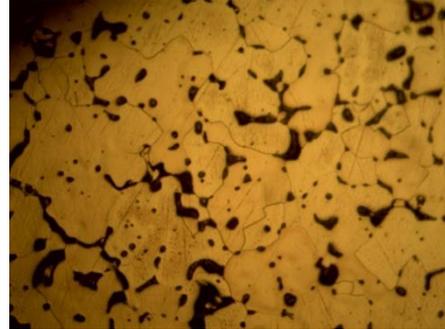
Tabla 26 Microestructura probeta 07

Figura 97 Microestructura probeta 7 a 50x



Fuente: Autor del proyecto

Figura 98 Microestructura probeta 7 a 20x



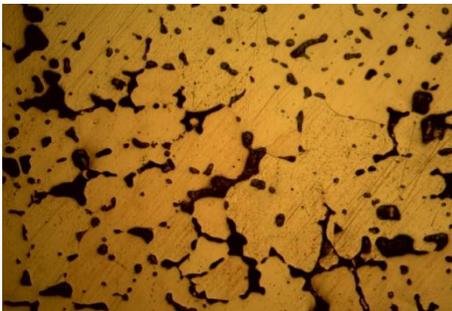
Fuente: Autor del proyecto

8.5.4.8 Probeta N° 8

Material muy similar al de la probeta 07. La fase alfa es muy clara, al igual que la Beta. Se aprecian la fase roseta y la globular en los precipitados. Material con mayor cantidad de partículas que el anterior. Estas inclusiones son de bordes redondeados y se conectan en sectores constituyendo una especie de red. En el detalle se aprecia que estas inclusiones en tamaños pequeños son circulares y al incrementar el tamaño se elongan. Los valores de la prueba de microdureza se contaron entre los más bajos con un 59,574 para la prueba de 300 y de 62,85 para la prueba de 200. Esta probeta no cuenta con análisis SEM. Este valor de microdureza se puede atribuir a la alta cantidad de precipitados en los bordes del grano, que aumentan la fragilidad de este, ya que el material del precipitado no es tan resistente como el grano [23].

Tabla 27 Microestructura probeta 08

Figura 99 Microestructura probeta 8 a 20x



Fuente: Autor del proyecto

Figura 100 Microestructura probeta 8 a 100x



Fuente: Autor del proyecto

8.5.4.9 Probeta N° 9

Esta última probeta tiene una matriz de carácter dendrítico en color poco diferenciado respecto a la matriz en general. Los granos son pequeños y la fase alfa es dominante y los precipitados se alojan a borde de grano, pero en una proporción más baja. También se encuentran precipitados esféricos en los granos. El valor de microdureza estuvo entre los más altos con 103,79 para el peso de 300 y de 108,05 para el peso de 200. Esta probeta no cuenta con análisis SEM. Este valor de la dureza se puede atribuir al tamaño del grano, de los más finos entre las probetas trabajadas.

Tabla 28 Microestructura y método SEM probeta 09

Figura 101 Microestructura probeta 9 a 10x



Fuente: Autor del proyecto

Figura 102 Microestructura probeta 9 a 50x



Fuente: Autor del proyecto

9. CONCLUSIONES

En la evaluación del comportamiento de las mordazas de la empresa de envases vidrio OWENS-ILLINOIS S.A., se dio a conocer que los valores de microdureza se pueden atribuir al tamaño de grano y a los precipitados que se presentan de forma diferente en las probetas, ya que en algunas se tienen precipitados con un tamaño óptimo y distribución homogénea dentro del grano, constituyendo un obstáculo eficaz para el deslizamiento de las dislocaciones, mientras que en otras, la concentración de precipitados se da en los bordes de grano generando mayor posibilidad de grietas y por ende de dislocaciones.

El porcentaje de plomo que se encontró en las pinzas, mostró una relación directamente proporcional con la prueba de microdureza, porque para un Pb=45% se tuvo un valor de 76,562HV vs. Pb=67,88% con un valor de 166,28HV. En ambas los valores de oxígeno fueron similares (P01=22,15% vs. P02=21,44%)

Se evidenció que la microdureza que se obtuvo de estos mecanismos, no tuvo relación con materiales con gran cantidad de fases en el precipitado, ya que la probeta 02 y la probeta 04 son similares por presentar las fases desde la roseta, pasando por la globular, la fibrilar, llegando a los micro precipitados que obtuvieron datos muy diferentes en las pruebas de microdureza (166,28HV vs. 64,302HV).

Por otro lado, cuando se hace el análisis de los parámetros de funcionamiento dentro de la planta de envases de vidrio OWENS-ILLINOIS S.A., se observa que estos mecanismos durante su proceso de producción son afectados por las condiciones ambientales, ya que están expuestos a cambios bruscos de temperatura y humedad. Como también presentan un mantenimiento inadecuado y esto hace que se vayan generando grietas.

Se puede señalar que en la elaboración de las mordazas, fue realizada de manera diferente por las variaciones visuales entre ellas, que se pueden atribuir a los métodos de enfriamiento, porque se tienen probetas donde no llegaron a formarse algunas fases y esto ocurre con enfriamientos bruscos (agua), mientras que en otras la presencia de diferentes fases puede atribuirse a enfriamientos lentos (aire), en el cual se dispone de más tiempo para la formación de las diferentes fases.

En la caracterización por el método SEM, se observó que, en la composición química, en algunas probetas se tienen altos contenidos de Plomo y de Silicio, los porcentajes de Cobre son diferentes en todas, al igual que las concentraciones de Estaño. En todas hay presencia de otros elementos en diferentes concentraciones, y aunque son minerales (azufre, aluminio, zinc, hierro, silicio y níquel) conocidos que mejoran las propiedades de la aleación, la falta de homogeneidad en las concentraciones de las probetas muestra que estas inclusiones pueden haber sido

producto del azar. Esto evidencia que no se tiene un control en los elementos participantes en la aleación y mucho menos una ficha técnica del material del cual están realizadas las mordazas.

Una solución que se le puede brindar a la empresa OWENS-ILLINOIS S.A. para que las mordazas no sigan presentando fallas, es mejorado el diseño, ya que presenta constantemente una discontinuidad en el proceso de producción de los envases y puede ser un motivo importante en sus fallas del mecanismo. Además, no se tienen en cuenta las propiedades del material, donde se observa en pruebas realizadas, que presenta un intervalo en el procedimiento industrial donde fueron hechas las coladas de estas y su tratamiento térmico.

Se recomienda para la planta de envases de vidrio, generar un plan tanto de control ambiental como de mantenimiento, para tratar adecuadamente este mecanismo. Puede que esto mejore y el mecanismo no sufra cambios bruscos en la marcha de trabajo que realiza. También se recomienda tener al margen las mordazas fuera de agentes agresivos que pueden corroer el material.

10. RECOMENDACIONES

Debe estandarizarse el proceso de elaboración de las mordazas, para esto, los materiales de la aleación deben ser los indicados para el uso que se les va a dar, y el proceso de tratamiento térmico debe ser controlado por el fabricante de estas, para que sea el adecuado para el material y que no afecte las propiedades de este.

Una vez se cuente con el control de las condiciones previas a la operación, se debe realizar análisis del material seleccionado y del diseño escogido, elaborando modelos y sometiéndolos a pruebas de resistencia en función a los esfuerzos a los cuales va a ser sometido, para de ser necesario realizar cambios.

Por último, se debe brindar en las instalaciones de almacenamiento de las mordazas protección ante los cambios bruscos de temperatura y humedad ambiental. Además, deben contar con mantenimiento periódico para preservar sus propiedades.

Para la empresa OWENS-ILLINOIS S.A. se recomienda tomar como alternativa un nuevo material para este mecanismo, como lo es el **Isotrópico (Grafito)**. Es un material formado principalmente por el elemento carbono (puro), donde se a estudiado que puede llegar a ser mucho más resistente al acero. Está compuesto de una fibra de carbono, es un material muy ligero, que soporta grandes cargas sin alguna deformación soportando fuerzas de flexión (se puede doblar sin que se raje).

El isotrópico tiene una gran resistencia mecánica, y se caracteriza por tener una microestructura uniforme, esto hace que el grafito sea fuerte y resistente al desgaste, soportando temperaturas de maquina de unos 600°C. este material se puede someter a oxidación por arriba de los 450°C.

BIBLIOGRAFÍA

[ANFEVI, «Vidrio,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.anfevi.com/>. [Último
1 acceso: 12 03 2019].

]

[R. SANLEÓN GRAS, «Botellas de Vidrio,» 2016. [En línea]. Available:
2 <http://www.guiaenvase.com/bases/guiaenvase.nsf/V02wp/D24C96B9564E2A4E>
] [C1256F250063FAA3?Opendocument](http://www.guiaenvase.com/bases/guiaenvase.nsf/V02wp/D24C96B9564E2A4E). [Último acceso: 07 jun 2019].

[N. ASTM, Norma ASTM.

3

]

[F. DE GOROSTIZA, Bronces y Latones, Mendoza: Universidad Católica
4 Argentina. Obtenido el 2 de mar de 2019 en
] [https://estudioyensayo.files.wordpress.com/2008/11/informe-bronces-y-](https://estudioyensayo.files.wordpress.com/2008/11/informe-bronces-y-latones.pdf)
latones.pdf, s.f..

[J. A. AGUILAR SCHAFER, «Cobre y sus Aleaciones,» 2015. [En línea]. Available:
5 http://biblio3.url.edu.gt/Libros/2013/cml/12-Cobre_aleaciones.pdf. [Último
] acceso: 13 mar 2019].

[E. G. MAFFIA, «Estructura y Propiedades de las Aleaciones: Cobre y sus
6 Aleaciones,» 2013. [En línea]. Available:
] [https://www.academia.edu/9272375/ESTRUCTURA_Y_PROPIEDADES_DE_LA](https://www.academia.edu/9272375/ESTRUCTURA_Y_PROPIEDADES_DE_LA_S_ALEACIONES_Cobre_y_sus_aleaciones)
S_ALEACIONES_Cobre_y_sus_aleaciones. [Último acceso: 16 feb 2019].

[A. PINO, «Diagrama esfuerzo-deformacion,» s.f.. [En línea]. Available:
7 [https://www.monografias.com/trabajos72/diagrama-esfuerzo-](https://www.monografias.com/trabajos72/diagrama-esfuerzo-deformacion/diagrama-esfuerzo-deformacion.shtml)
] [deformacion/diagrama-esfuerzo-deformacion.shtml](https://www.monografias.com/trabajos72/diagrama-esfuerzo-deformacion/diagrama-esfuerzo-deformacion.shtml). [Último acceso: 05 jun 2019].

[H. HERNÁNDEZ ALBAÑIL y H. ESPEJO MORA, «Mecánica de Fractura y
8 Análisis de Falla,» 2002. [En línea]. Available:
] http://bdigital.unal.edu.co/43147/6/9587012429_Parte%201.pdf. [Último acceso:
04 jun 2019].

[M. KANNINEN y K. POPELAR, Advanced Fracture Mechanics, Oxford University
9 Presss, 1986.

]

[J. L. ARANA y J. J. GONZÁLEZ, Mecánica de fractura, Bilbao: Universidad del
1 País Vasco. Disponible en

- 0 <https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/9356/Mecanica%20de%20fractura.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, 2002.
- 1 [M. IPOHORSKI y R. ACUÑA, «FRACTOGRAFIA - Aplicaciones al Analisis de
1 Fallas,» 1988. [En línea]. Available:
1 [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/22/018/22018630.pdf?](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/22/018/22018630.pdf?r=1&r=1)
] [r=1&r=1](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/22/018/22018630.pdf?r=1&r=1). [Último acceso: 28 ene 2019].
- 1 [J. ESTRADA, «Tipo de fracturas mecánicas en los materiales,» 2007. [En línea].
1 Available: [https://www.monografias.com/trabajos46/fracturas-](https://www.monografias.com/trabajos46/fracturas-mecanicas/fracturas-mecanicas2.shtml)
2 [mecanicas/fracturas-mecanicas2.shtml](https://www.monografias.com/trabajos46/fracturas-mecanicas/fracturas-mecanicas2.shtml). [Último acceso: 08 jun 2019].
]
- 1 [A. MONSALVE GONZALEZ, «Fractura por fatiga: Aspectos Morfológicos,» 2004.
1 [En línea]. Available: [https://www.metalurgia.usach.cl/apuntes-analisis-de-fallas-](https://www.metalurgia.usach.cl/apuntes-analisis-de-fallas-3)
3
]
- 1 [UNIVERSIDAD DE MÁLAGA, «Tema 3. Materiales Metálicos y Aleaciones,»
1 2004. [En línea]. Available:
4 http://webdeptos.uma.es/qicm/Doc_docencia/Prog_CCMM_04_05.pdf. [Último
] acceso: 18 ene 2019].
- 1 [UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL , «Teoría Metalografía,» 2015. [En
1 línea]. Available:
5 [http://www.inspt.utn.edu.ar/academica/carreras/67/TPracticos/Tecnologia/Traba](http://www.inspt.utn.edu.ar/academica/carreras/67/TPracticos/Tecnologia/TrabajosPracticos/ENSAYOS.LABORATORIO/1EnsayosMetalografia/2TeoriaMetalografia.pdf)
] [jos.Practicos/ENSAYOS.LABORATORIO/1EnsayosMetalografia/2TeoriaMetalog](http://www.inspt.utn.edu.ar/academica/carreras/67/TPracticos/Tecnologia/TrabajosPracticos/ENSAYOS.LABORATORIO/1EnsayosMetalografia/2TeoriaMetalografia.pdf)
rafia.pdf. [Último acceso: 13 ene 2019].
- 1 [R. BROOKS, Noble Metals and Biological Systems: Their Role in Medicine, Mineral
1 Exploration, and the Environment, CRC Press, 1992.
6
]
- 1 [W. SMITH y J. HASHEMI, «Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de
1 Materiales,» 2004. [En línea]. Available:
7 [http://www.pentathlon.org.mx/biblioteca/fundamentos-de-la-ciencia-e-ingenieria-](http://www.pentathlon.org.mx/biblioteca/fundamentos-de-la-ciencia-e-ingenieria-de-materiales-4ta-edicion-william-f-smith-javad-hashemi.pdf)
] [de-materiales-4ta-edicion-william-f-smith-javad-hashemi.pdf](http://www.pentathlon.org.mx/biblioteca/fundamentos-de-la-ciencia-e-ingenieria-de-materiales-4ta-edicion-william-f-smith-javad-hashemi.pdf). [Último acceso:
12 feb 2019].
- 1 [POCO GRAPHITE INC, «Materials and Services,» 2014. [En línea].
1

]

[I. CENOZ ECHEVERRÍA y FERNÁNDEZ CARRASQUILLA, «Influencia de la composición y el tratamiento térmico en las propiedades mecánicas de aleaciones de bronce al aluminio,» *Revista de Metalurgia*, vol. 43, nº 4, pp. 272-283. Obtenido el 13 de mar de 2019 en DOI: <https://doi.org/10.3989/revmetalm.2007.v43.i4.73> , 2007.

[J. J. CORONADO MARÍN, «Análisis del Desgaste Para el Par Bronce-Acero en un Molino de Caña de Azúcar,» *Ingeniería y Competitividad*, vol. 6, nº 2, pp. 83-092. DOI: <https://doi.org/10.25100/iyv.v6i2.2282>, 2004.

]

[J. GUILMANY, J. MIGUEL y S. VIZCAÍNO, «Evaluación de Propiedades Mecánicas en Recubrimientos Obtenidos por Proyección,» de *VIII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos*, Gandía, 2002.

]

[C. VEGA CALVO, H. SÁNCHEZ STEPHA, W. REVELO y I. CASTRO, «MEJORAMIENTO DE LA ALEACIÓN DE BRONCE AL ALUMINIO,» *Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, vol. S1, nº 3, pp. 1311-1316. Obtenido el 19 de feb ed 2019 en <http://www.rlmm.org/archives.php?f=/archivos/S01/N3/RLMMArt-09S01N3-p1311.pdf>, 2009.

[M. BRAVO LÁZARO, «Análisis de las propiedades mecánicas del bronce dependiendo del tratamiento térmico. Trabajo de Grado,» 2011. [En línea]. Available: <http://euitiz.unizar.es/es/indexestudios.php>. [Último acceso: 04 03 2019].

[J. OSORIO RAMOS, E. ROCHA RANGEL, F. SANDOVAL PÉREZ y A. ALTAMIRANO TORRES , «Sinterización isotérmica de bronce reforzadas con partículas de alúmina,» *Ingenierías*, vol. XII, nº 43, pp. 59-65. Obtenido el 13 de mar de 2019 en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2982087>, 2009.

[D. CÁRDENAS FERIA, L. HERRERA QUINTERO y J. OLAYA FLOREZ, «Resistencia al desgaste de recubrimientos de bronce al aluminio producidos con técnica de proyección térmica,» *Ingeniería Mecánica*, vol. 18, nº 3, pp. 173-180. Obtenido el 3 de mar de 2019 en <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu>, 2015.

[J. PLASENCIA BRICEÑO, «Metalografía y microestructuras de Cobre y sus Aleaciones,» 2017. [En línea]. Available: https://kupdf.net/queue/metalografia-y-6-microestructuras-de-cobre-y-sus-aleaciones_5a20d9a3e2b6f51d60f1a62e_pdf?queue_id=-1&x=1559696780&z=MTkwLjI2LjE0Mi4xNzk=. [Último acceso: 02 jun 2019].

[UNIVERSIDAD DE VALLADOLID, «Guia Docente: diagramas de fases en aleaciones metálicas,» [En línea]. Available: [https://alojamientos.uva.es/guia_docente/uploads/2013/469/45757/1/Documento 27.pdf](https://alojamientos.uva.es/guia_docente/uploads/2013/469/45757/1/Documento%2027.pdf). [Último acceso: 03 jun 2019].

[C. HOLGUÍN y J. CORONADO, «Estudio del desgaste por deslizamiento en bronces,» *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, n° 41, pp. 98-107, 2007.

[ParaLaFakYou mens, «Youtube,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=yboITdSgltU>. [Último acceso: 02 jun 2019].

[M. LLANO RIOS, «Caracterización microestructural de bronces NAB,» 2017. [En línea]. Available: [https://www.google.com/search?q=CARACTERIZACION+MICROESTRUCTURAL+DE+BRONCES+NAB+\(Microstructural+characterization+of+NAB+alloys\)&rlz=1C1CHBD_esCO760CO760&oq=CARACTERIZACION+MICROESTRUCTURAL+DE+BRONCES+NAB+\(Microstructural+characterization+of+NAB](https://www.google.com/search?q=CARACTERIZACION+MICROESTRUCTURAL+DE+BRONCES+NAB+(Microstructural+characterization+of+NAB+alloys)&rlz=1C1CHBD_esCO760CO760&oq=CARACTERIZACION+MICROESTRUCTURAL+DE+BRONCES+NAB+(Microstructural+characterization+of+NAB). [Último acceso: 2019 jun 03].

[Norma ASTM.

[INGEMECÁNICA, «Ensayos de Dureza en los Materiales,» s.f.. [En línea]. Available: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn218.html>.

[J. ATTEBERRY, «How Scanning Electron Microscopes Work,» 2009. [En línea]. Available: <https://science.howstuffworks.com/scanning-electron-microscope2.htm>. [Último acceso: 08 jun 2019].

3
1