



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**GUÍA PRÁCTICA DE ANÁLISIS METALOGRÁFICO PARA EL ALUMINIO Y
EL COBRE, EN EL LABORATORIO DE METALOGRAFÍA DE LA ESCUELA
DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE
GUATEMALA**

Herbert Samuel Figueroa Avendaño

Asesorado por el Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortiz

Guatemala, julio de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**GUÍA PRÁCTICA DE ANÁLISIS METALOGRAFICO PARA EL ALUMINIO Y
EL COBRE, EN EL LABORATORIO DE METALOGRAFÍA DE LA ESCUELA
DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE
GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

HERBERT SAMUEL FIGUEROA AVENDAÑO

ASESORADO POR EL ING. HUGO LEONEL RAMÍREZ ORTÍZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, JULIO DE 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soría
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. José Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Byron Giovanni Palacios Colindres
EXAMINADOR	Ing. Carlos Enrique Chicol Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Sergio Torres Hernández
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

GUÍA PRÁCTICA DE ANÁLISIS METALOGRÁFICO PARA EL ALUMINIO Y EL COBRE, EN EL LABORATORIO DE METALOGRAFÍA DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha de 18 de febrero de 2009.

Herbert Samuel Figueroa Avendaño



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, junio de 2009

Ing. Julio César Campos Paíz
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Campos:

Atentamente me dirijo a usted para presentarle el trabajo de graduación titulado: **“GUÍA PRÁCTICA DE ANÁLISIS METALOGRAFICO PARA EL ALUMINIO Y EL COBRE EN EL LABORATORIO DE METALOGRAFÍA DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA”**, realizado por el estudiante de ingeniería mecánica Herbert Samuel Figueroa Avendaño, el cual fue revisado por mí en su totalidad.

A mi juicio el presente trabajo cumple con los objetivos planteados, y creo necesario destacar la utilidad que el mismo puede tener como material de apoyo para el laboratorio de Metalurgia y Metalografía que actualmente se imparte en esta facultad.

Sin otro particular, me suscribo a usted como su seguro y atento servidor,

Una firma manuscrita en tinta negra, que parece ser la del Sr. Ramírez Ortiz, sobre una línea horizontal.

Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortiz

Asesor de Trabajo de Graduación

Colegiado No. 5545

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**

El Coordinador del Área de Laboratorios de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado GUÍA PRÁCTICA DE ANÁLISIS METALOGRÁFICO PARA EL ALUMINIO Y EL COBRE EN EL LABORATORIO DE METALOGRAFÍA DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, del estudiante **Herbert Samuel Figueroa Avendaño**, recomienda su aprobación.

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Carlos Amador Chicojay Coloma
Coordinador de Área

Guatemala, julio de 2009.

/behdei



**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**

El Director de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con la aprobación del Coordinador del Área de Laboratorios, al trabajo de Graduación titulado GUÍA PRÁCTICA DE ANÁLISIS METALOGRAFICO PARA EL ALUMINIO Y EL COBRE, EN EL LABORATORIO DE METALOGRAFÍA DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, del estudiante **Herbert Samuel Figueroa Avendaño**, procede a la autorización del mismo.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Julio César Campos Paiz

DIRECTOR



Guatemala, julio de 2009

JCCP/behdei



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **GUIA PRÁCTICA DE ANÁLISIS METALOGRAFICO PARA EL ALUMINIO Y EL COBRE, EN EL LABORATORIO DE METALOGRAFÍA DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA.**, presentado por el estudiante universitario **Herbert Samuel Figueroa Avendaño**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO



Guatemala, julio de 2009

/cc

AGRADECIMIENTOS A:

DIOS: Por tener misericordia de mí siendo un pecador.

MIS PADRES: Felicito Figueroa Camargo, María Angelina Avendaño de Figueroa. Con amor entrañable y por su apoyo incondicional en todo momento. Que Dios les bendiga hoy y siempre.

MIS HERMANOS: Miguel Ángel Figueroa Avendaño, Juan Gilberto Figueroa Avendaño. Que Dios les multiplique al ciento por uno.

MIS CUÑADAS: Iris Victoria Batres de Figueroa, Ana Lorena Velásquez de Figueroa.

MIS SOBRINOS: Como un ejemplo de motivación para su superación personal.

MI NOVIA: Ana Lucia Flores Figueroa, con amor.

MI ASESOR: Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortiz, con todo respeto por sus sabios consejos para desarrollar mi carrera.

MIS AMIGOS: Jorge López, Gerson Rivera, Ernesto Guevara, Evelyn Cojón, Carlos Cruz, Jorge Torres, Alfonso Paiz, Rosse Mary Ayala, Fam. Beltrán Galindo, Fam. Jiménez Milian por su ayuda, compañía y apoyo en todos los momentos.

MI COMUNIDAD: Por tenerme siempre en sus oraciones.

LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS: Por el conocimiento recibido.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XVII
OBJETIVOS	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. CONCEPTOS BÁSICOS	1
1.1 Metalografía	1
1.2 Fotomicrografía	3
1.3 Examen metalográfico	3
1.4 Examen macrográfico	5
1.5 Examen macroscópico	5
1.6 Examen micrográfico	6
1.7 Examen de la microestructura	6
1.8 El microscopio metalúrgico	7
1.9 Técnicas microscópicas especiales	9
1.10 Metalografía a temperaturas elevadas	12
2. MICROSCOPIO ÓPTICO	15
2.1 Microscopio	15
2.2 Historia del microscopio	15
2.3 Microscopio óptico	17

2.4	Microscopio óptico compuesto	18
2.4.1	Partes del microscopio óptico y sus funciones	18
2.4.2	Sistema de iluminación	20
2.4.3	Sistema óptico	22
2.4.4	Sistema mecánico	22
2.4.5	Manejo del microscopio óptico	23
2.4.6	Mantenimiento y precauciones	25
2.4.7	Aplicaciones del microscopio óptico	26
2.4.8	Principales elementos de un microscopio básico	27
3.	METALES	29
3.1	Metales	29
3.2	Estructura cristalina de los metales	30
3.3	Redes cristalinas de los metales	32
3.3.1	Cúbica centrada en el cuerpo BCC	32
3.3.2	Cúbica centrada en las caras FCC	33
3.3.3	Hexagonal compacta	34
3.4	Cobre (Cu)	35
3.4.1	Proceso de obtención	36
3.4.1.1	La metalurgia del cobre por vía seca	37
3.4.1.2	La metalurgia del cobre por vía húmeda	38
3.4.2	Definiciones del cobre	39
3.4.2.1	Cobre	40
3.4.2.2	Cobre metal	40
3.4.2.3	Cobre «Blister»	40
3.4.2.4	Cáscara de cobre o cobre de cementación	40

3.4.2.5	Cobre de afino térmico	41
3.4.2.6	Cobre electrolítico	41
3.4.2.7	Cobre OFHC	42
3.4.3	Propiedades del cobre	43
3.4.3.1	Propiedades mecánicas	45
3.4.3.2	Propiedades químicas	45
3.4.4	Influencia de las impurezas sobre las propiedades del cobre	46
3.4.5	Tratamientos del cobre	49
3.4.5.1	Tratamientos mecánicos	49
3.4.5.2	Recocido de estabilización	50
3.4.5.3	Recocido contra acritud	51
3.4.6	Aplicaciones del cobre	51
3.4.7	Aleaciones de cobre	52
3.4.7.1	Bronce de aluminio	53
3.4.7.2	Latones	53
3.4.7.3	Bronces	54
3.5	El aluminio	55
3.5.1	Proceso de obtención	56
3.5.1.1	Separación de la alúmina	57
3.5.1.2	Reducción de la alúmina	57
3.5.2	Propiedades del aluminio	59
3.5.2.1	Propiedades químicas	61
3.5.2.2	Propiedades mecánicas	62
3.5.3	Aplicaciones del aluminio	63
3.5.4	Aleaciones de aluminio	64
3.5.5	Tratamientos anticorrosivos, mecánicos y térmicos del aluminio y sus aleaciones	64

3.5.5.1	Tratamientos anticorrosivos	64
3.5.5.2	Tratamientos mecánicos	65
3.5.5.3	Tratamientos térmicos	65
3.5.6	Recocido del aluminio y sus aleaciones	65
3.5.6.1	Recocidos de estabilización	66
3.5.6.2	Recocido contra acritud	66
3.5.6.3	Recocido de homogeneización y regeneración	67
3.5.7	Aplicaciones de las aleaciones de aluminio	68

4. OPERACIONES A SEGUIR PARA PREPARAR UNA MUESTRA METALGRÁFICA

4.1	Corte	69
4.1.1	Corte por sierra	69
4.1.2	Corte por disco abrasivo	70
4.2	Montaje de muestra	71
4.3	Desbaste	71
4.3.1	Desbaste grosero	73
4.3.2	Desbaste intermedio	73
4.3.3	Desbaste final	73
4.4	Pulido	74
4.4.1	Pulido fino	74
4.4.2	Pulido electrolítico	75
4.5	Ataque	75

5. PRÁCTICAS DE METALOGRAFÍA

5.1	Práctica 1: Obtención de la probeta metalográfica y de la superficie durante el desbaste.	77
-----	---	----

5.1.1	Elementos de trabajo	78
5.1.2	Técnica operatoria	78
5.2	Práctica 2: Pulido mecánico de una probeta destinada a la observación microscópica	79
5.2.1	Elementos de trabajo	80
5.2.2	Técnica operatoria	81
5.3	Práctica 3: Pulido químico	82
5.3.1	Elementos de trabajo	83
5.3.2	Técnica operatoria	83
5.4	Práctica 4: Ataque químico de probetas metalográficas	84
5.4.1	Elementos de trabajo	85
5.4.2	Técnica operatoria	85
5.5	Práctica 5: Observación microscópica de estructuras de metales puros	86
5.5.1	Elementos de trabajo	86
5.5.2	Técnica operatoria	87
5.6	Práctica 6: Toma y proceso de una fotomicrografía	87
5.6.1	Elementos de trabajo	88
5.6.2	Técnica operatoria	90
6.	COMPLEMENTOS	93
6.1	Complemento de la práctica 1.	93
6.2	Complemento de la práctica 2.	99
6.3	Complemento de las prácticas 3 y 4.	100
6.4	Complemento de la práctica 5.	102
6.5	Complemento de la práctica 6.	104

CONCLUSIONES	111
RECOMENDACIONES	113
BIBLIOGRAFÍA	115
ANEXOS	117

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Pirómetro óptico tipo de filamento que desaparece	2
2. Microscopio metalúrgico y trayectoria de la luz a través del mismo	7
3. Estructura de un metal forjado	8
4. Precipitación discontinua	9
5. Determinación metalográfica del tamaño de grano	10
6. Diagrama de interferencia de huellas de microdureza	11
7. Platina calentadora para microscopía	12
8. Variaciones en la microestructura de una aleación	14
9. Microscopio compuesto fabricado en 1751 por <i>Magny</i> .	17
10. Microscopio compuesto	18
11. Partes del microscopio	20
12. Diagrama simple de la óptica de un microscopio	28
13. Red cúbica centrada en el cuerpo	33
14. Red cúbica centrada en las caras	34
15. Red hexagonal compacta y su celda unitaria	35
16. Minerales del cobre	36
17. Metalurgia del cobre por vía seca	38
18. Metalurgia del cobre por vía húmeda	39
19. Influencia de las impurezas de la resistividad del cobre	46
20. Variación de la dureza del cobre	50
21. El cobre y sus aleaciones	52

22. Bauxita	56
23. Separación de la alúmina	57
24. Reducción de la alúmina	58
25. Arco de sierra	70
26. Discos abrasivos	70
27. Prensa para oprimir plástico	71
28. Hojas de esmeril o lijas	72
29. Diferentes tipos de desbaste	74
30. Sucesivos estados del desbaste	95
31. Acción abrasiva de los granos	96
32. Dedución de b y a	97
33. Curva de la densidad trazada en función del tiempo de exposición	107
34. Acción del sulfito	109
35. Probetas de Al y Cu colado en coquilla	117
36. Probetas de Al y Cu colado en arena	117
37. Discos abrasivos, papeles abrasivos y planchas de vidrio	118
38. Reactivos químicos, pinzas y termómetro de 400 °C	118
39. Microscopio óptico	119
40. Fotomicrografía de probeta de Al con abrasivo # 180 pulido manual	120
41. Fotomicrografía de probeta de Al con abrasivo # 400 pulido manual	120
42. Fotomicrografía de probeta de Al con abrasivo # 600 pulido manual	121
43. Fotomicrografía de probeta de Cu con abrasivo # 180 pulido manual	121
44. Fotomicrografía de probeta de Cu con abrasivo # 400	

pulido manual	122
45. Fotomicrografía de probeta de Cu con abrasivo # 600	
pulido manual	122
46. Fotomicrografía de probeta de Al con abrasivo # 180	
pulido mecánico	123
47. Fotomicrografía de probeta de Al con abrasivo # 400	
pulido mecánico	123
48. Fotomicrografía de probeta de Al con abrasivo # 600	
pulido mecánico	124
49. Fotomicrografía de probeta de Cu con abrasivo # 180	
pulido mecánico	124
50. Fotomicrografía de probeta de Cu con abrasivo # 400	
pulido mecánico	125
51. Fotomicrografía de probeta de Cu con abrasivo # 600	
pulido mecánico	125
52. Fotomicrografía de probeta de Al pulido químico	
colado en coquilla	126
53. Fotomicrografía de probeta de Cu pulido químico	
colado en coquilla	126
54. Fotomicrografía de probeta de Al pulido químico	
colada en arena	127
55. Fotomicrografía de probeta de Cu pulido químico	
colada en arena	127
56. Fotomicrografía de probeta de Al ataque químico	128
57. Fotomicrografía de probeta de Cu ataque químico	128
58. Fotomicrografía de la estructura del Al colado en coquilla	129
59. Fotomicrografía de la estructura del Cu colado en coquilla	129
60. Fotomicrografía de la estructura del Al colado en arena	130

61. Fotomicrografía de la estructura del Cu colado en arena	130
62. Reacción de la probeta de aluminio en la solución utilizada para el proceso de pulido químico	131
63. Reacción de la probeta de cobre en la solución utilizada para el pulido químico	131
64. Desprendimiento de óxido de nitrógeno de la reacción entre la probeta de cobre y la solución de pulido químico	132
65. Solución producto del pulido químico de la probeta de cobre, de color verde por la presencia de iones níquel; en medio ácido	132
66. Probeta de cobre después de ser sometida al proceso de pulido químico	133
67. Probeta de cobre al momento de ser sometida al proceso de pulido químico en una solución de amoníaco	133
68. Coloración de la solución de pulido químico utilizada en la probeta de cobre, de color azul por la presencia de iones cobre en medio básico	134
69. Solución obtenida del proceso de pulido químico utilizada en la probeta de cobre, de color azul por la presencia de iones cobre, solución de amoníaco	134
70. Probeta de aluminio colado en arena al momento de ser sometida al proceso de ataque químico	135
71. Probeta de bronce colado en arena al momento de ser sometida al proceso de ataque químico con cloruro férrico	135

TABLAS

I.	Tabla periódica de los elementos	30
II.	Características de los sistemas cristalinos	31
III.	Estructura cristalina de los metales	32
IV.	Cualidades del cobre sin alear (UNE 37 103)	42
V.	Constantes del cobre	44
VI.	Color de los latones según su composición	54
VII.	Color de los bronces según su composición	55
VIII.	Constantes del aluminio	60
IX.	Calidades de aluminio de primera función (UNE 38 111)	62
X.	Reactivos para pulido químico	84
XI.	Reactivos para desarrollo de estructuras	118
XII.	Temperaturas aproximadas de recristalización para varios metales y aleaciones	119
XIII.	Reactivos de ataque para examen microscópico	119

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
E	Estado
i	Integridad
e	Estructura
%	Porcentaje
°C	Temperatura en grados Celsius
°F	Temperatura en grados <i>Fahrenheit</i>
mm	Milímetros
kg	Kilogramo
Lb	Libra
Plg	Pulgada
m	Metro
AN o A_N	Apertura Numérica
λ	Longitud de Onda
d	Límite definido

δ	Difracción
BCC	Cúbica Centrada en el Cuerpo
FCC	Cúbica Centrada en la Cara
HC	Hexagonal Compacta
Cu	Cobre
Al	Aluminio
Kw	Kilowatt
rpm	Revoluciones por minuto
t	Tiempo
\emptyset	Flujo luminoso
A	Acción Fotoquímica
K	Acción producida por la unidad de flujo
u	Onda Luminosa
li	Luz incidente
le	Luz emergente
n	Número de capas
D	Densidad
γ	Pendiente de la curva
μ	Micro

H	Dureza
F	Fuerza
h	Profundidad

GLOSARIO

ABRASIVO:	Es una sustancia que tiene como finalidad actuar sobre otros materiales con diferentes clases de esfuerzo mecánico “triturado, molienda, corte, pulido”. Es de elevada dureza y se emplea en todo tipo de procesos industriales y artesanos.
BAQUELITA:	Es la primera sustancia plástica totalmente sintética.
CONVEXIDAD:	Es la zona que se asemeja al exterior de una circunferencia o una superficie esférica; es el concepto opuesto a la concavidad.
COQUILLA:	Matriz de inyección de un material fundido.
CORROÍDO:	Oxidado.
DECANTACIÓN:	Es un método físico de separación de mezclas heterogéneas.
DENDRITAS:	Son prolongaciones protoplásmicas ramificadas, bastante cortas.

EMULSIÓN:	Es una mezcla de dos líquidos inmiscibles de manera más o menos homogénea.
HALOGENURO:	Son los compuestos que contienen los elementos del grupo VII en estado de oxidación -1.
HOMOGENEIDAD:	En industria, es la estandarización de las propiedades de un producto; objetivo que persigue la homogeneización.
INTERFERÓMETRO:	Es un instrumento que emplea la interferencia de las ondas de luz para medir con gran precisión longitudes de onda de la luz misma.
LEJÍA:	Es un compuesto químico, además de un fuerte oxidante químico cuya fórmula es NaClO.
MACROSCÓPICO:	Que se ve a simple vista sin ayuda del microscopio.
MICROCAVIDADES:	Menos de una micra de tamaño.
MICROFOTOGRAFÍA:	Se refiere a la reproducción de documentos en película de pequeño formato.
MICROSCOPIA:	Es la técnica de producir imágenes visibles de estructuras o detalles demasiado pequeños para ser percibidos a simple vista.

OPACIDAD:	Es una propiedad óptica de la materia, que tiene diversos grados y propiedades.
PROTOPLASMA:	Es un citoplasma más el núcleo.
REFRACCIÓN:	Es el cambio de dirección que experimenta una onda al pasar de un medio material a otro.
RETÍCULO:	Es un conjunto parcialmente ordenado.
SEDIMENTACIÓN:	Es el proceso por el cual el material sólido, transportado por una corriente de agua, se deposita en el fondo de un canal artificial o dispositivo construido especialmente para tal fin.
SEGREGAR:	Separar o apartar
SOLUBILIDAD:	Es una medida de la capacidad de una determinada sustancia para disolverse en otra.

RESUMEN

Este trabajo de graduación consiste en elaborar una guía práctica de análisis metalográfico para el aluminio y el cobre, para la observación en el microscopio óptico, en el laboratorio de metalografía de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Esta guía de prácticas se centrará en seis prácticas a realizar.

La metalografía consiste en el estudio de la constitución y la estructura de los metales y las aleaciones. La forma más sencilla de hacerlo es examinando las superficies metálicas a simple vista. Los estudios ópticos microscópicos producen resultados que son útiles no sólo a los científicos, sino también a los ingenieros. El examen de la microestructura es muy útil para determinar si un metal o una aleación satisfacen las especificaciones en relación con trabajos mecánicos anteriores, tratamientos térmicos y composición general. La microestructura es un instrumento para analizar las fallas metálicas y para controlar procesos industriales.

Esta guía delinea un método para preparar muestras pequeñas de aluminio y cobre con el fin de hacer un examen metalográfico. Los cuatro pasos que se requieren para efectuar los diferentes tipos de prácticas son: 1) hacer un corte transversal, 2) el montaje, 3) esmerilar y pulir, y 4) atacar con ácido.

Finalmente, todos estos conocimientos los ampliaremos en las prácticas de metalografía, las cuales se encuentran en los últimos capítulos, que tiene como objetivo principal ayudar al estudiante de ingeniería a comprender mejor la metalografía y entender la importancia que tiene esta última en el estudio del aluminio y el cobre tanto como colado en arena o colado en coquilla.

OBJETIVOS

GENERAL:

Servir de referencia para la realización de prácticas metalográficas del laboratorio de metalografía, de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

ESPECÍFICOS:

1. Conocer las técnicas y los procedimientos de cómo se ataca una probeta metalográfica.
2. Lograr observar, mediante el microscopio óptico, todas las estructuras que se puedan presentar en el aluminio y el cobre, tanto como colados en coquilla y arena, por medio de una probeta metalográfica.
3. Conocer las propiedades físicas, químicas y mecánicas, como también los principales tratamientos térmicos y entender cómo estos afectan o cambian la estructura del aluminio y el cobre.

4. Efectuar la toma y proceso de una fotomicrografía, mediante una cámara fotográfica acoplada al ocular del microscopio.

INTRODUCCIÓN

El método clásico de estudiar la estructura de los metales y aleaciones es la microscopía óptica a la que, con frecuencia, se aplica el nombre de “metalografía”. En esta guía se mostrará fotomicrografías obtenidas con ayuda de esta técnica y, dichas fotomicrografías son la base del estudio sistemático del comportamiento de los metales y aleaciones.

El microscopio es, sin ningún género de dudas, el instrumento más valioso de que dispone el metalurgista, no solo desde el punto de vista científico de investigación en el laboratorio, sino también en la práctica industrial, donde puede prestar relevantes servicios.

En esta guía desarrollaremos los procesos y las técnicas de cómo se debe tener la obtención de la probeta metalográfica y observación de la superficie durante el desbaste, el procedimiento de un pulido mecánico, pulido químico, ataque químico de una probeta y como se debe observar en el microscopio óptico.

Las técnicas metalográficas se han desarrollado precisamente para identificar las fases presentes en los metales y en sus aleaciones, y para explicar el mecanismo de su formación. Estas fases que constituyen el agregado metálico son, generalmente, de tamaño microscópico y, para su observación y estudio, es preciso preparar debidamente la probeta.

Una superficie metálica en la que se van a observar unas fases microscópicas ha de ser plana y estar pulida. Plana, porque la pequeña profundidad de foco de los sistemas ópticos de observación a grandes aumentos no permitiría enfocar la imagen simultáneamente en planos situados a distintos niveles; estar debidamente pulida para que sólo pueda aparecer en ella detalles propios de su estructura, y no circunstancias ajenas a ella que puedan enmascararla.

1. CONCEPTOS BÁSICOS

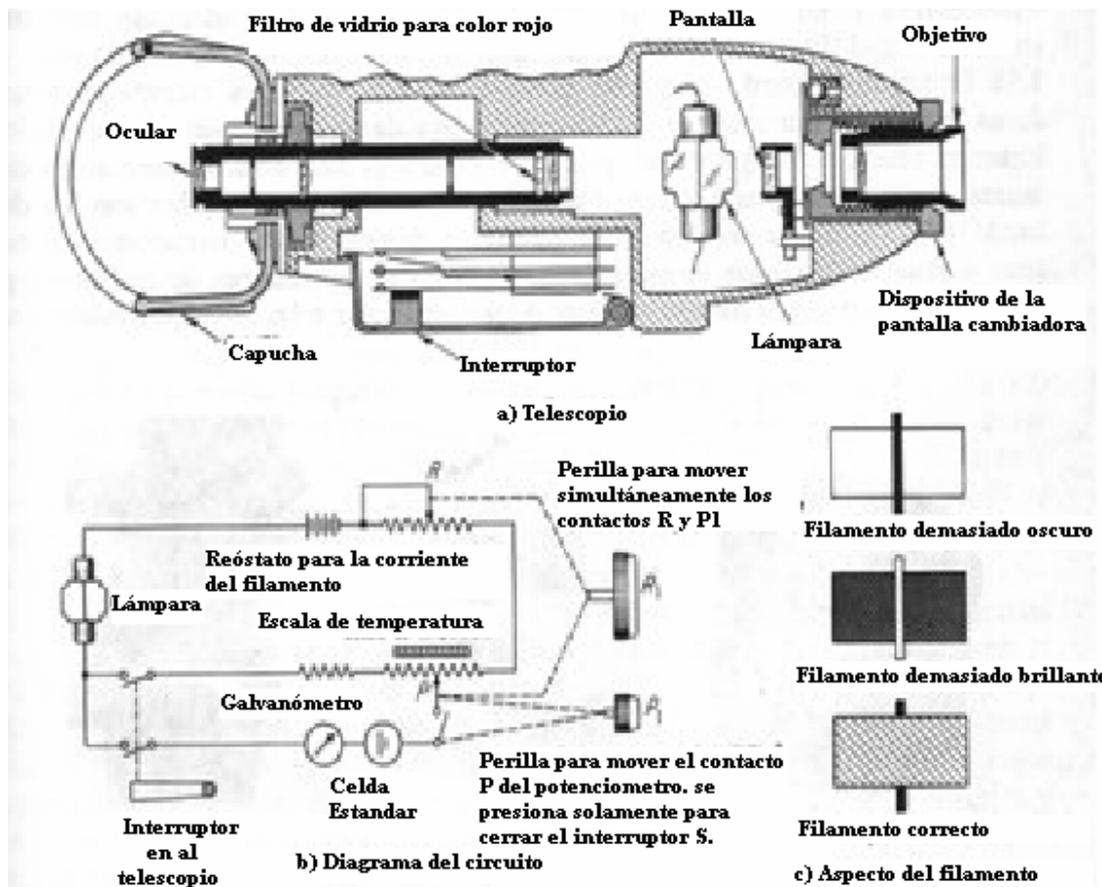
1.1 Metalografía

Es la ciencia que estudia las características estructurales o constitutivas de un metal o aleación relacionándolas con las propiedades físicas y mecánicas.

Entre las características estructurales están el tamaño de grano, el tamaño, forma y distribución de las fases que comprenden la aleación y de las inclusiones no metálicas, así como la presencia de segregaciones y otras irregularidades que profundamente pueden modificar las propiedades mecánicas y el comportamiento general de un metal.

Mucha es la información que puede suministrar un examen metalográfico. El principal instrumento para la realización de un examen metalográfico es el microscopio metalográfico, con el cual es posible examinar una muestra con aumentos que varían entre 50 y 2000, como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Pirómetro óptico tipo de filamento que desaparece:
 a) Telescopio; b) Diagrama del circuito; c) aspecto del filamento.



Fuente: Sydney H. Avner. *Introducción a la Metalurgia Física*. Pág. 27.

1.2Fotomicrografía

Fotografía con microscopio. Casi todas las cámaras SLR tienen adaptadores para acoplar el cuerpo al tubo del microscopio y su sistema de enfoque y lectura a través del objetivo las hace particularmente cómodas para esta especialidad.

El microscopio óptico alcanza hasta unos 2000 aumentos, y el eléctrico, que emplea un haz de electrones en lugar de luz, llega hasta 1000000 o más. Estos microscopios incorporan casi siempre una cámara especial.

Una fotografía tomada a través de un microscopio se llama fotomicrografía, términos que no deben confundirse con microfotografía, que se refiere a la reproducción de documentos en película de pequeño formato.

1.3Examen metalográfico

El examen metalográfico tiene como objeto establecer el estado de un metal en un instante dado en su vida. Puesto que el estado **E** de un metal o una aleación de composición conocida está determinado por su integridad **i** y su estructura **e**, es decir puesto que se cumple **E = f (i, e)**, resulta que el examen metalográfico, concretamente, persigue el estudio de la integridad y estructura de un metal o de una aleación dada.

La integridad de un material metálico está determinada por la continuidad o discontinuidad de la masa metálica. Se dice que un material metálico es íntegro o continuo cuando carece de discontinuidades físicas macroscópicas. La discontinuidad más frecuente son: fisuras, sopladuras, microcavidades de contracción e inclusiones no metálicas (refractarios o escorias).

El examen metalográfico se parece mucho al examen clínico. Ambos se aplican en una etapa de la vida, de un metal o de un hombre, respectivamente. El examen clínico se le aplica a un hombre antes de un trastorno patológico para establecer sus posibilidades y prevenir males ulteriores o después de un trastorno patológico para establecer la causa del trastorno. Análogamente, el examen metalográfico se aplica a una pieza antes de ser destinada a un fin para prevenir inconvenientes en su servicio o después de aparecer una falla en su trabajo para establecer la causa de la falla. Tanto en el examen metalográfico como en el clínico puede hacerse un diagnóstico y un pronóstico: el primero tiene como objeto establecer el estado presente y el segundo predecir el estado a alcanzarse con mayor probabilidad en el futuro. La analogía entre el examen metalográfico y el examen clínico va más lejos aún; ambas especialidades acuden al análisis químico para completar el conocimiento del síndrome. Sin embargo, entre el examen metalográfico y el examen clínico existe una diferencia fundamental: el clínico examina al enfermo en su totalidad, en tanto que el metalografista debe limitarse a una parte muy pequeña del todo, por lo cual no puede servirse de la semiología propedéutica y por tanto el cuadro sintomático a menudo es incompleto.

El examen metalográfico durante el servicio de una pieza, en la mayoría de los casos, se hace como consecuencia de no haber hecho el examen de control antes de entrar la pieza en servicio. Este examen es el más común. Se realiza sobre piezas que no han soportado un determinado servicio, es decir, piezas que en la mayoría de los casos se han deformado, roto, desgastado, corroído. En estos casos, lo que se pretende del metalografista es que determine la causa de la anomalía, lo que casi siempre es un problema complejo.

El examen metalográfico previo al uso de un metal (examen metalográfico de control) tiende a adelantarse a los resultados prácticos. El conocimiento de

la integridad y de la estructura de un metal o aleación permite predecir si puede servir para el uso a que está destinado. Un cobre que incluye mucho óxido cuproso en su estructura no debe ser destinado al trefilado de alambres porque seguramente no soportará el trabajo.

Debe recordarse que un diagnóstico correcto de un material examinado antes de entrar en servicio permite pronosticar sus resultados y por tanto, permite ahorrar mucho tiempo, mucho dinero y muchos disgustos.

1.4 Examen macrográfico

Es la forma más sencilla de realizar un estudio, este consta en examinar la superficie metálica a simple vista, pudiendo determinar de esta forma las características macroscópicas. Del cual se puede obtener datos sobre los tratamientos mecánicos sufridos por el material (es decir se puede determinar si el material fue trefilado, laminado, forjado, etc.) o determinar la distribución de defectos (como grietas superficiales, rechupes, partes soldadas, etc.)

1.5 Examen macroscópico

Dependiendo del estudio a realizar, se utilizan criterios para el tipo de corte a realizar (transversal o longitudinal) para extraer la muestra (por ejemplo un corte transversal para determinar la naturaleza del material, homogeneidad, segregaciones, proceso de fabricación de caños, etc., y un corte longitudinal

para controlar los procesos de fabricación de piezas, tipo y calidad de la soldadura, etc.).

1.6 Examen micrográfico

Es una técnica más avanzada que el macrográfico y necesita de una preparación más especial y cuidadosa de la muestra. Se basa en la amplificación de la superficie mediante instrumentos ópticos (microscopio) para observar características estructurales microscópicas (microestructura). Este tipo de examen permite realizar el estudio o controlar el proceso térmico al que ha sido sometido el metal, debido a que los mismos nos ponen en evidencia la estructura o los cambios estructurales que sufren en dicho proceso. Como consecuencia de ello también es posible deducir las variaciones que experimentan sus propiedades mecánicas (dependiendo de los constituyentes metalográficos presentes en la estructura).

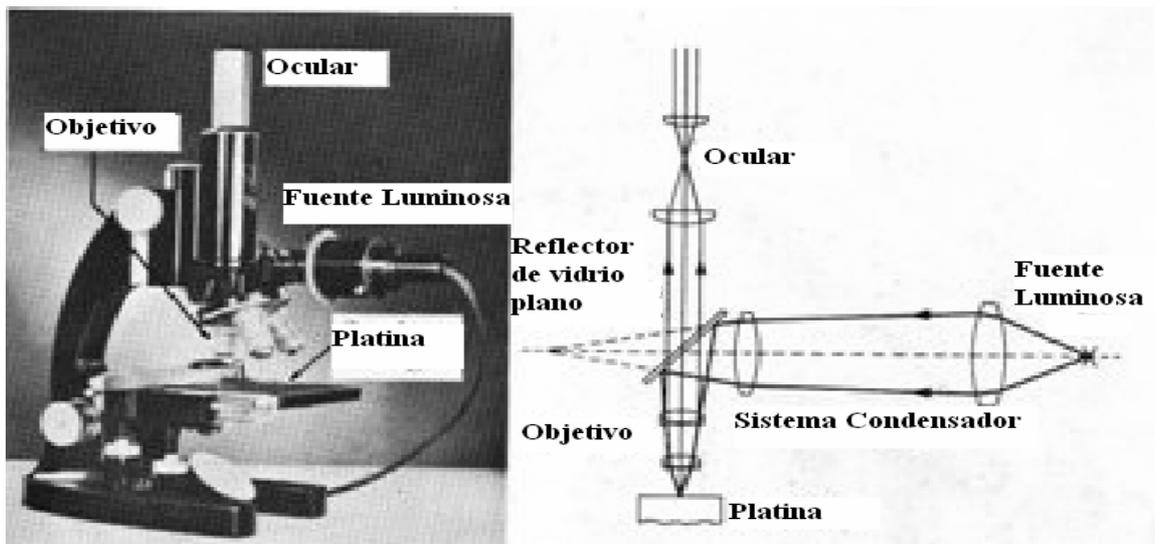
1.7 Examen de la microestructura

Este es muy útil para determinar si un metal o aleación satisface las especificaciones en relación a trabajos mecánicos, tratamientos térmicos y composición general. La microestructura es un instrumento para analizar las fallas metálicas y para controlar procesos industriales.

1.8 El microscopio metalúrgico

La técnica microscópica que se aplica a los metales difiere de la comúnmente empleada porque los metales son opacos. En consecuencia, el haz de iluminación debe incidir sobre la superficie de la probeta a observar aproximadamente en ángulo recto y reflejarse hacia el ocular. La figura 2 muestra una de las técnicas utilizadas para obtener dicha iluminación de “haz incidente”.

Figura 2. Microscopio metalúrgico y trayectoria de la luz a través del mismo

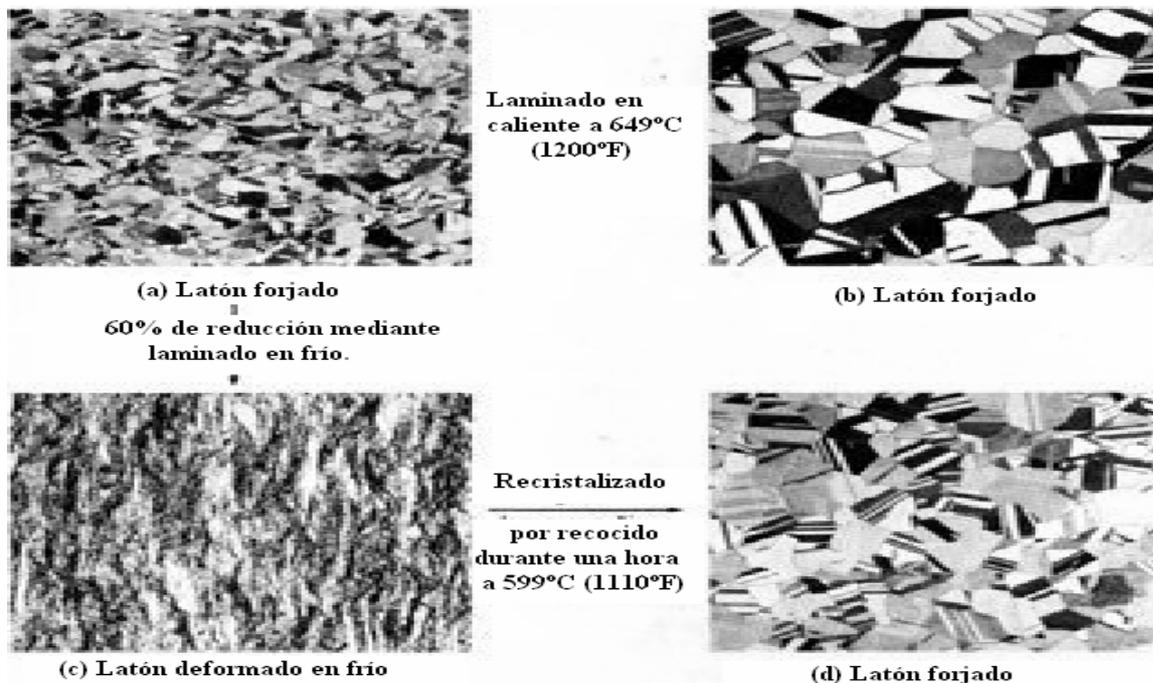


Fuente: Albert G. Guy. **Metalurgia Física para Ingenieros**. Pág. 71.

Como ejemplo de la utilidad de las micrografías la figura 3 proporciona una visión clara de la naturaleza de los metales laminados en caliente y en frío. Cuando una barra de latón con una microestructura como la que muestra la figura 3 (a), se lamina a temperaturas relativamente bajas, los granos se hacen

alargados y se deforman interiormente figura 3 (c). Es comprensible que tales aleaciones laminadas en frío posean propiedades características. Por otra parte, la forma externa de esta barra de latón puede variarse de una manera importante mediante laminación a temperaturas elevadas sin que varíe, de forma esencial, la microestructura de la aleación. Después de ser sometida a la laminación en caliente, la estructura de la figura 3 (b), muestra todavía granos equiaxiales normales y las propiedades son las mismas, excepto pequeñas diferencias debidas a cambios incidentales en el tamaño de grano. Si a una aleación deformada en frío, se le somete a un tratamiento térmico adecuado, su estructura se transforma, como se muestra en la figura 3 (d), con los consiguientes cambios en sus propiedades. Este es el fenómeno de recristalización.

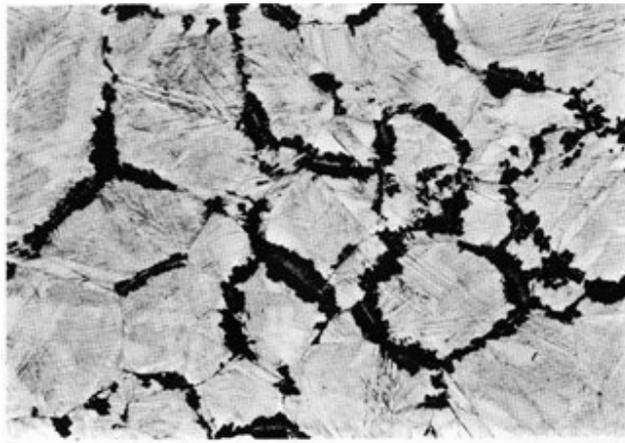
Figura 3. Ilustración del hecho de que la estructura de un metal forjado no varía necesariamente por deformación en caliente.



Fuente: Albert G. Guy. **Metalurgia Física para Ingenieros**. Pág. 72.

Un aspecto extremadamente importante de la metalografía es su empleo en el control de los procesos comerciales de tratamientos térmicos, puesto que los cambios estructurales pueden, a menudo, observarse al microscopio. Por ejemplo la figura 4 muestra la microestructura de una aleación de cobre con 2 % de berilio que se ha sometido a un tratamiento de endurecimiento por envejecimiento. Además de la reacción uniforme, perjudicial localizada en las proximidades de los límites de grano. Mediante un examen microscópico de este tipo, es posible de determinar la causa de las dificultades y proceder a su corrección, en este caso añadiendo cobalto.

Figura 4. Precipitación discontinua en los límites de grano de una aleación de cobre con 2 % de berilio (75 aumentos).



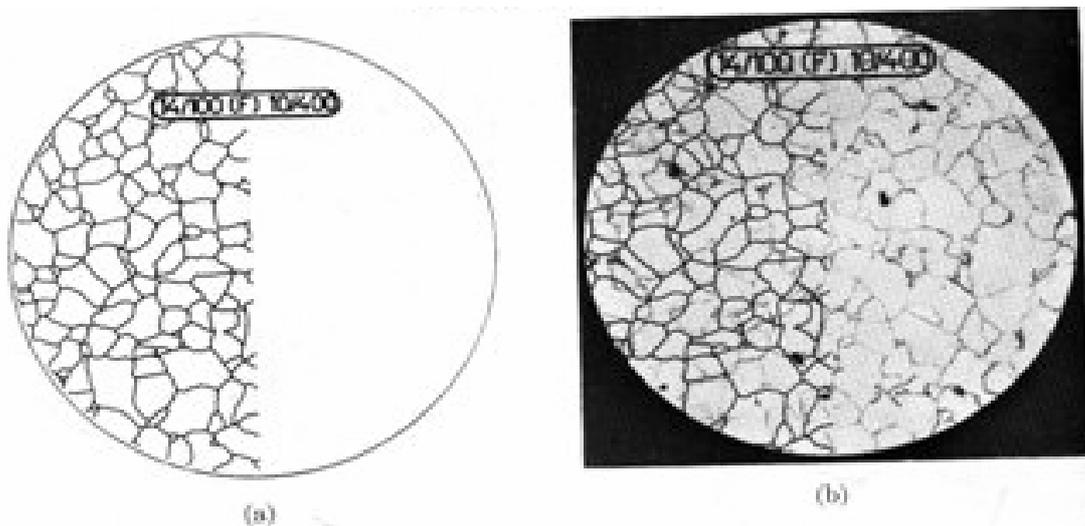
Fuente: Albert G. Guy. **Metalurgia Física para Ingenieros**. Pág. 73.

1.9 Técnicas microscópicas especiales

La utilidad del microscopio metalúrgico puede ampliarse con ayuda de diversos aparatos auxiliares, como son los que permiten observar aspectos estructurales que no son visibles en condiciones normales. Como base para la comprensión de estas técnicas especiales, debe hacerse notar el hecho que el

contraste bajo iluminación normal (campo claro) es el resultado de las diferencias en la cantidad total de luz reflejada en el ocular por las diversas zonas de la muestra. Por ejemplo, las zonas blancas de la figura 5 (b) difieren de las zonas negras solamente en la orientación de las facetas cristalinas submicroscópicas producidas por el procedimiento de ataque. Cuando estas “figuras de corrosión” reflejan hacia un lado la luz incidente, el área correspondiente aparece oscura bajo el microscopio, pero cuando las facetas están casi en el plano de la muestra, la luz incidente se refleja brillantemente. Haciendo variar las condiciones de iluminación, de forma que la luz incida sobre la superficie de la muestra en ángulo oblicuo (iluminación en campo oscuro) en vez de verticalmente, las zonas lisas de la muestra aparecerán oscuras, mientras las discontinuidades, por ejemplo los límites de grano, serán brillantes.

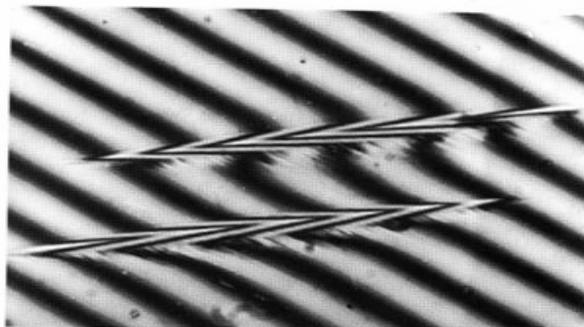
Figura 5. Ilustración de la determinación metalográfica del tamaño de grano (400 aumentos) (a) Patrón en un ocular especial. (b) El patrón supuesto a la microestructura de un acero.



Fuente: Albert G. Guy. **Metalurgia Física para Ingenieros**. Pág. 74.

Cuando se introducen principios que sirven para producir contraste se abren nuevas posibilidades de aplicación del microscopio. El empleo de la luz polarizada es especialmente efectivo para las escorias, minerales, inclusiones y sustancias no-metálicas similares, aunque también se ha aplicado a las estructuras de los metales. En la microscopía de contraste de fase se utiliza un segundo principio. En este tipo de microscopía se hace que el contraste dependa, en parte, de la fase de la luz reflejada. Puesto que el ojo humano es insensible a las diferencias de fase, debe incorporarse al microscopio un aparato óptico especial. Las diferencias de fase causadas por variaciones extremadamente pequeñas al nivel de la microestructura, se transforman, más tarde, en diferencias de intensidad en la imagen observada, revelando de esta forma aspectos casi invisibles bajo iluminación ordinaria de campo claro. Cuando han de realizarse medidas cuantitativas de aspectos estructurales, en los que se incluyen pequeños desplazamientos verticales en la superficie de la muestra, puede utilizarse uno de los diversos tipos de interferómetros existentes. La figura 6 muestra el tipo de imagen que se obtienen de huellas de microdurezas de forma piramidal alargada.

Figura 6. Diagrama de interferencia de huellas de microdureza fotografiadas con un Interferómetro de Polarización Nomarski (400 aumentos).

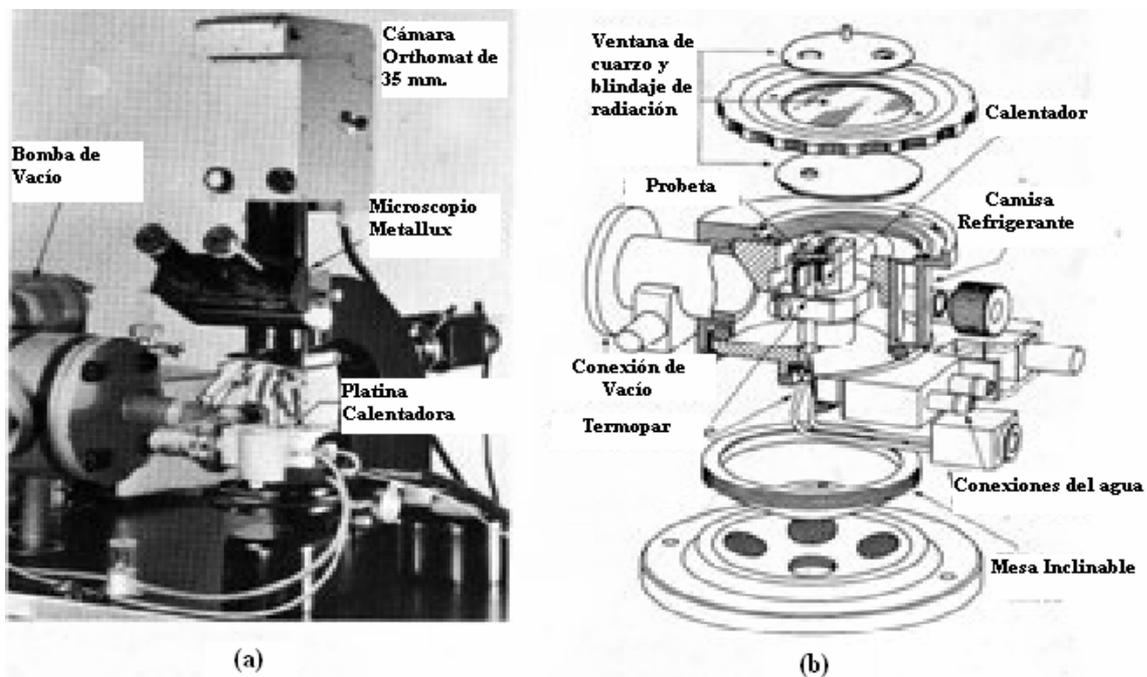


Fuente: Albert G. Guy. **Metalurgia Física para Ingenieros**. Pág. 75

1.10 Metalografía a temperaturas elevadas

Como las micrografías normales se toman en muestras que se encuentran a temperatura ambiente, solamente se obtiene así pruebas indirectas de las reacciones que dicha muestra ha soportado a temperaturas elevadas. Esta dificultad puede vencerse mediante el uso de una platina calentadora que, actualmente, puede adquirirse en diversos modelos comerciales como se muestra en la figura 7.

Figura 7. Platina calentadora para microscopía a temperaturas de hasta 1770°C (3100°F). (a) Platina calentadora colocada bajo un microscopio metalúrgico. (b) Esquema detallado en el que se muestra el diseño de la platina.



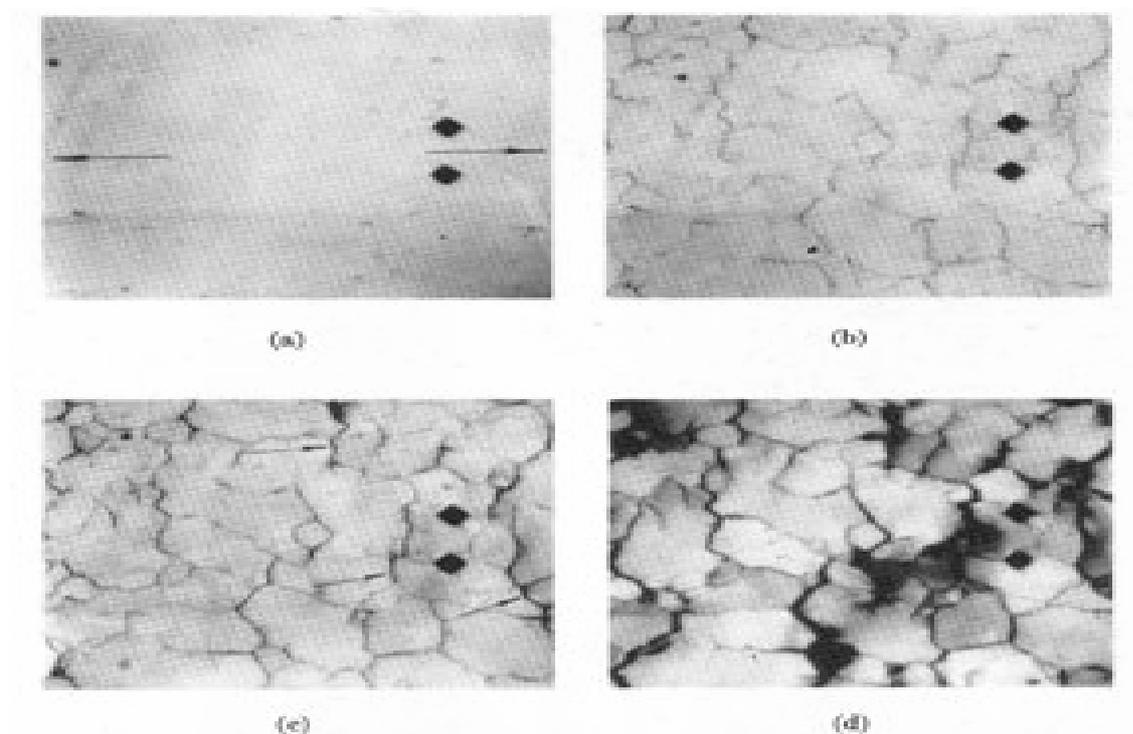
Fuente: Albert G. Guy. **Metalurgia Física para Ingenieros**. Pág. 76.

La muestra pulida se encierra en una cámara de vacío para proteger a la superficie de la muestra de la oxidación. Entonces se calienta la muestra, bien por contacto con una cinta de un metal refractario, como el volframio, o por radiación de la misma. Dicha cinta se calienta hasta una temperatura elevada por resistencia eléctrica. Para fotografiar las variaciones que se producen en la microestructura durante el tiempo que la probeta se encuentra a una temperatura determinada, o las que tienen lugar durante el calentamiento o el enfriamiento, puede utilizarse una cámara especial de 35 mm.

La serie de micrografías de la figura 8 se obtuvo por metalografía a alta temperatura, 649°C (1200°F), en una aleación que contenía 60 por ciento de níquel y 40 por ciento de cobre. En este caso, las variaciones en la microestructura fueron el resultado de un esfuerzo de tracción de 9500 lb/pulg.² (6.68 kg/mm²) a que estuvo sometida la muestra durante el tiempo de observación a alta temperatura. La probeta inicial pulida figura 8 (a) no muestra la estructura puesto que, intencionadamente, se le dejó sin atacar.

Las dos huellas de microdureza sirven solamente como puntos de referencia. En el curso de la deformación bajo la tensión aplicada en la dirección indicada por las flechas, los granos se desplazaron entre sí por lo que los límites de grano se hicieron visibles figura 8 (b). El espesor de los límites aumentó con el tiempo figura 8 (c) y, finalmente, poco antes que la muestra se rompiera, en dichos límites de grano aparecieron huecos y grietas figura 8 (d).

Figura 8. Variaciones en la microestructura de una aleación con 60% de níquel y 40% de cobre observadas mediante metalografía a alta temperatura durante un ensayo de fluencia serpeante (creep) a 650°C (1202°F) (164 aumentos). Tiempo de observación: (a) 0 horas; (b) 3 horas; (c) 6 horas; (d) 14 horas.



Fuente: Albert G. Guy. **Metalurgia Física para Ingenieros**. Pág. 77.

2. MICROSCOPIO ÓPTICO

2.1 Microscopio

De *micro* (pequeño) y *scopio* (observar), es un instrumento que permite observar objetos que son demasiado pequeños para ser vistos a simple vista. El tipo más común y el primero que se inventó es el microscopio óptico. Se trata de un instrumento óptico que contiene una o varias lentes que permiten obtener una imagen aumentada del objeto y que funciona por refracción.

En general, cualquier microscopio requiere los siguientes elementos: una fuente (como un haz de fotones o de electrones), una muestra sobre la que actúa dicha fuente, un receptor de la información proporcionada por la interacción de la fuente con la muestra, y un procesador de esta información (en general, un ordenador).

2.2 Historia del microscopio

El microscopio fue inventado hacia los años 1610, por Galileo, según los italianos, o por *Zacharias Jansen*, en opinión de los holandeses. La palabra microscopio fue utilizada por primera vez por los componentes de la *Accademia dei Lincei*, una sociedad científica a la que pertenecía Galileo y que publicaron

un trabajo sobre la observación microscópica del aspecto de una abeja. Sin embargo, las primeras publicaciones importantes en el campo de la microscopía aparecen en 1660 y 1665, cuando *Malpighi* prueba la teoría de *Harvey* sobre la circulación sanguínea al observar al microscopio los capilares sanguíneos y *Hooke* publica su obra *Micrografía*.

En 1665 *Robert Hooke* observó con un microscopio un delgado corte de corcho y notó que el material era poroso. Esos poros, en su conjunto, formaban cavidades poco profundas a modo de cajas a las que llamó Células. *Hooke* había observado células muertas. Unos años más tarde, *Marcelo Malpighi*, anatomista y biólogo italiano, observó células vivas. Fue el primero en estudiar tejidos vivos al microscopio.

A mediados del siglo XVII un comerciante holandés, *Anton Van Leeuwenhoek*, utilizando microscopios simples de fabricación propia describió por primera vez protozoos, bacterias, espermatozoides y glóbulos rojos. El microscopista *Leeuwenhoek*, sin ninguna preparación científica, puede considerarse el fundador de la bacteriología. Tallaba él mismo sus lupas sobre pequeñas esferas de cristal, cuyos diámetros no alcanzaban el milímetro (su campo de visión era muy limitado, de décimas de milímetro). Con estas pequeñas distancias focales alcanzaba los 275 aumentos.

Durante el siglo XVIII el microscopio tubo diversos adelantos mecánicos que aumentaron su estabilidad y su facilidad de uso aunque no se desarrollaron por el momento mejoras ópticas. Las mejoras más importantes de la óptica surgieron en 1877 cuando *Abbe* publica su teoría del microscopio y, por encargo de *Carl Zeiss*, mejora la microscopía de inmersión sustituyendo el agua por aceite de cedro, lo que permite obtener aumentos de 2000. A principios de los años 1930 se había alcanzado el límite teórico para los microscopios ópticos, no consiguiendo estos aumentos superiores a 500X o 1000X. Sin

embargo, existía un deseo científico de observar los detalles de estructuras celulares (núcleo, mitocondria, etc.).

El microscopio electrónico de transmisión (T.E.M.) fue el primer tipo de microscopio electrónico desarrollado. Utiliza un haz de electrones en lugar de luz para enfocar la muestra consiguiendo aumentos de 100000X. Fue desarrollado por *Max Knoll* y *Ernst Ruska* en Alemania en 1931. Posteriormente, en 1942 se desarrolla el microscopio electrónico de barrido (SEM).

Figura 9. Microscopio Compuesto fabricado en 1751 por *Magny*



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Desarrollo_del_microscopio

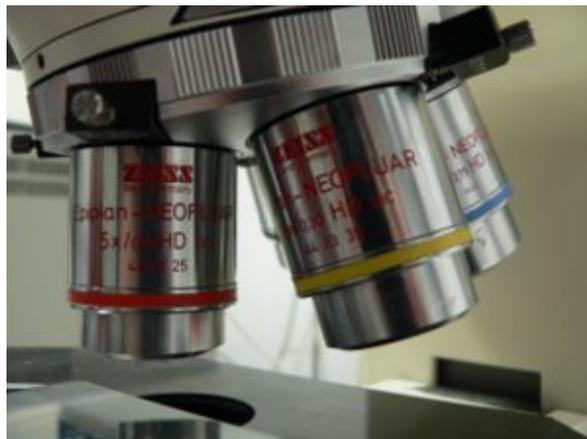
2.3 Microscopio óptico

Un microscopio óptico es un microscopio basado en lentes ópticas. El desarrollo de este aparato suele asociarse con los trabajos de *Anton Van*

Leeuwenhoek. Los microscopios de *Leeuwenhoek* constaban de una única lente pequeña y convexa, montada sobre una plancha, con un mecanismo para sujetar el material que se iba a examinar (la muestra o espécimen). Este uso de una única lente convexa se conoce como Microscopio simple, en el que se incluye la lupa, entre otros aparatos ópticos.

2.4 Microscopio óptico compuesto

Figura 10. Microscopio compuesto



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Microscopio_compuesto

2.4.1 Partes del microscopio óptico y sus funciones

Ocular: Lente situada cerca del ojo del observador. Amplía la imagen del objetivo.

Objetivo: Lente situada cerca de la preparación. Amplía la imagen de ésta.

Condensador: Lente que concentra los rayos luminosos sobre la preparación.

Diafragma: Regula la cantidad de luz que entra en el condensador.

Foco: Dirige los rayos luminosos hacia el condensador.

Lente ocular: Capta y amplía la imagen formada en los objetivos.

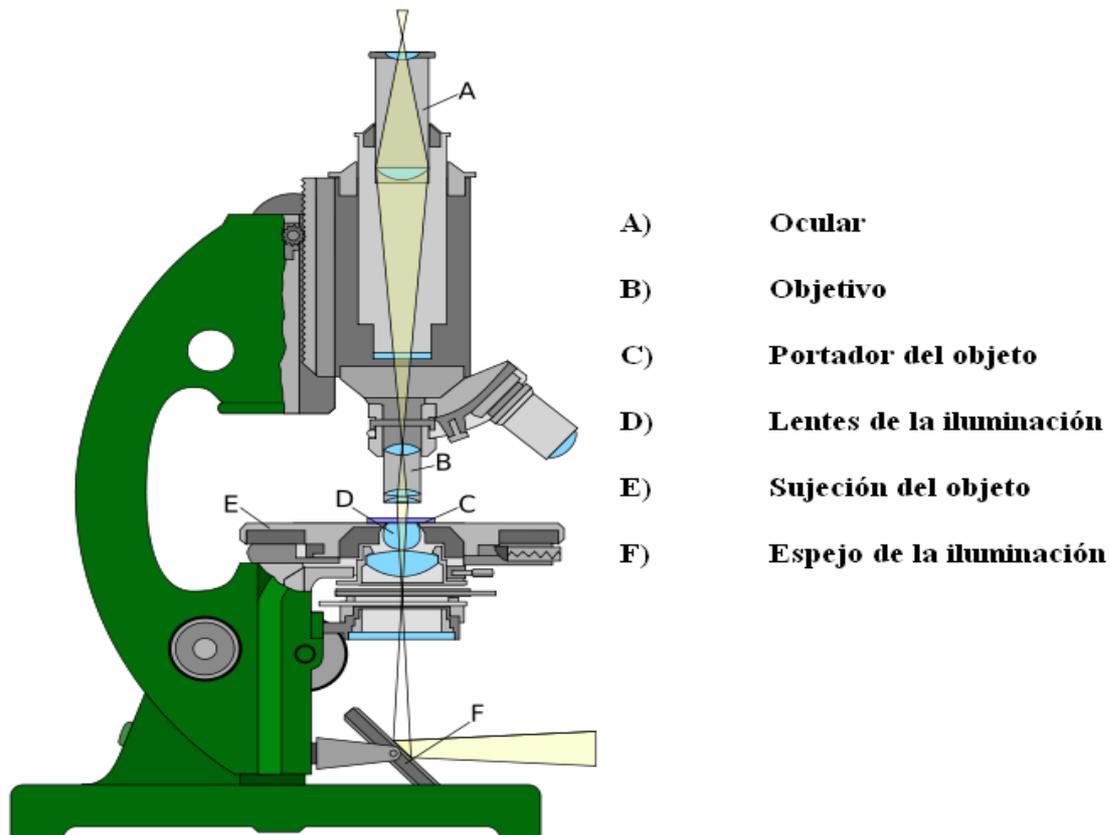
Tubo: Es una cámara oscura unida al brazo mediante una cremallera.

Revólver: Es un sistema que coge los objetivos, y que rota para utilizar un objetivo u otro.

Tornillos macro y micrométrico: Son tornillos de enfoque, mueven la platina hacia arriba y hacia abajo. El macrométrico lo hace de forma rápida y el micrométrico de forma lenta. Llevan incorporado un mando de bloqueo que fija la platina a una determinada altura.

Platina: Es una plataforma horizontal con un orificio central, sobre el que se coloca la preparación, que permite el paso de los rayos procedentes de la fuente de iluminación situada por debajo. Dos pinzas sirven para retener el portaobjetos sobre la platina y un sistema de cremallera guiado por dos tornillos de desplazamiento permite mover la preparación de delante hacia atrás o de izquierda a derecha y viceversa. En la parte posterior de uno de los laterales se encuentra un nonius que permite fijar las coordenadas de cualquier campo óptico; de esta forma se puede acudir a él cuando interesa.

Figura 11. Partes del microscopio



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Microscopio_%C3%B3ptico

2.4.2 Sistema de iluminación

Este sistema tiene como finalidad dirigir la luz natural o artificial de tal manera que ilumine la preparación u objeto que se va a observar en el microscopio de la manera adecuada. Comprende los siguientes elementos:

- **Fuente de iluminación.** Se trata generalmente de una lámpara incandescente de tungsteno sobre voltada. Por delante de ella se sitúa

un condensador (una lente convergente) e, idealmente, un diafragma de campo, que permite controlar el diámetro de la parte de la preparación que queda iluminada, para evitar que exceda el campo de observación produciendo luces parásitas.

- **El espejo.** Necesario si la fuente de iluminación no está construida dentro del microscopio y ya alineada con el sistema óptico, como suele ocurrir en los microscopios modernos. Suelen tener dos caras: una cóncava y otra plana. Goza de movimientos en todas las direcciones. La cara cóncava se emplea de preferencia con iluminación artificial, y la plana, para iluminación natural (luz solar).
- **Condensador.** El condensador está formado por un sistema de lentes, cuya finalidad es concentrar los rayos luminosos sobre el plano de la preparación, formando un cono de luz con el mismo ángulo que el del campo del objetivo. El condensador se sitúa debajo de la platina y su lente superior es generalmente planoconvexa, quedando la cara superior plana en contacto con la preparación cuando se usan objetivos de gran apertura (los de mayor ampliación); existen condensadores de inmersión, que piden que se llene con aceite el espacio entre esa lente superior y la preparación. La apertura numérica máxima del condensador debe ser al menos igual que la del objetivo empleado, o no se logrará aprovechar todo su poder separador. El condensador puede deslizarse verticalmente sobre un sistema de cremallera mediante un tornillo, bajándose para su uso con objetivos de poca potencia.
- **Diafragma.** El condensador está provisto de un diafragma-iris, que regula su apertura para ajustarla a la del objetivo. Puede emplearse, de manera irregular, para aumentar el contraste, lo que se hace cerrándolo

más de lo que conviene si se quiere aprovechar la resolución del sistema óptico.

2.4.3 Sistema óptico

Ocular: Lente situada cerca del ojo del observador. Amplía la imagen del objetivo.

Objetivo: Lente situada cerca de la preparación. Amplía la imagen de ésta.

Condensador: Lente que concentra los rayos luminosos sobre la preparación.

Diafragma: Regula la cantidad de luz que entra en el condensador.

Foco: Dirige los rayos luminosos hacia el condensador.

2.4.4 Sistema mecánico

Soporte: Mantiene la parte óptica. Tiene dos partes: el pie o base y el brazo.

Platina: Lugar donde se deposita la preparación.

Cabezal: Contiene los sistemas de lentes oculares.

Revólver: Contiene los sistemas de lentes objetivos. Permite, al girar, cambiar los objetivos.

Tornillos de enfoque: Macrométrico que aproxima el enfoque y micrométrico que consigue el enfoque correcto.

2.4.5 Manejo del microscopio óptico

1. Colocar el objetivo de menor aumento en posición de empleo y bajar la platina completamente. Si el microscopio se recogió correctamente en el uso anterior, ya debería estar en esas condiciones.
2. Colocar la preparación sobre la platina sujetándola con las pinzas metálicas.
3. Comenzar la observación con el objetivo de 4x (ya está en posición) o colocar el de 10 aumentos (10x) si la preparación es de bacterias.
4. Para realizar el enfoque:
 - a) Acercar al máximo la lente del objetivo a la preparación, empleando el tornillo macrométrico. Esto debe hacerse mirando directamente y no a través del ocular, ya que se corre el riesgo de incrustar el objetivo en la preparación pudiéndose dañar alguno de ellos o ambos.
 - b) Mirando, ahora sí, a través de los oculares, ir separando lentamente el objetivo de la preparación con el macrométrico y, cuando se observe algo nítida la muestra, gira el micrométrico hasta obtener un enfoque fino.
5. Pasar al siguiente objetivo. La imagen debería estar ya casi enfocada y suele ser suficiente con mover un poco el micrométrico para lograr el enfoque fino. Si al cambiar de objetivo se perdió por completo la imagen, es preferible volver a enfocar con el objetivo anterior y repetir la operación desde el inciso 3. El objetivo de 40x enfocar a muy poca distancia de la preparación y por ello es fácil que ocurran dos tipos de percances: incrustarlo en la preparación si se descuidan las

precauciones anteriores y mancharlo con aceite de inmersión si se observa una preparación que ya se enfocó con el objetivo de inmersión.

6. Empleo del objetivo de inmersión:

- a) Bajar totalmente la platina.
- b) Subir totalmente el condensador para ver claramente el círculo de luz que nos indica la zona que se va a visualizar y donde habrá que suministrar el aceite.
- c) Girar el revólver hacia el objetivo de inmersión dejándolo a medio camino entre éste y el de 40x.
- d) Colocar una gota mínima de aceite de inmersión sobre el círculo de luz.
- e) Terminar de girar suavemente el revólver hasta la posición del objetivo de inmersión.
- f) Mirando directamente el objetivo, subir la platina lentamente hasta la lente toca la gota de aceite. En ese momento se nota como si la gota ascendiera y se adosara a la lente.
- g) Enfocar cuidadosamente con el micrométrico. La distancia de trabajo entre el objetivo de inmersión y la preparación es mínima, aun menor que con el de 40x por lo que el riesgo de accidente es muy grande.
- h) Una vez se haya puesto aceite de inmersión sobre la preparación, ya no se puede volver a usar el objetivo 40x sobre esa zona, pues se mancharía de aceite. Por tanto, si desea enfocar otro campo, hay que bajar la platina y repetir la operación desde el paso 3.
- i) Una vez finalizada la observación de la preparación se baja la platina y se coloca el objetivo de menor aumento girando el revólver. En este

momento ya se puede retirar la preparación de la platina. Nunca se debe retirar con el objetivo de inmersión en posición de observación.

- j) Limpiar el objetivo de inmersión con cuidado empleando un papel especial para óptica. Comprobar también que el objetivo 40x está perfectamente limpio.

2.4.6 Mantenimiento y precauciones

1. Al finalizar el trabajo, hay que dejar puesto el objetivo de menor aumento en posición de observación, asegurarse de que la parte mecánica de la platina no sobresale del borde de la misma y dejarlo cubierto con su funda.
2. Cuando no se está utilizando el microscopio, hay que mantenerlo cubierto con su funda para evitar que se ensucien y dañen las lentes. Si no se va a usar de forma prolongada, se debe guardar en su caja dentro de un armario para protegerlo del polvo.
3. Nunca hay que tocar las lentes con las manos. Si se ensucian, limpiarlas muy suavemente con un papel de filtro o, mejor, con un papel de óptica.
4. No dejar el porta objetos puesto sobre la platina si no se está utilizando el microscopio.
5. Después de utilizar el objetivo de inmersión, hay que limpiar el aceite que queda en el objetivo con pañuelos especiales para óptica o con papel de filtro (menos recomendable). En cualquier caso se pasará el papel por la lente en un solo sentido y con suavidad. Si el aceite ha llegado a secarse

y pegarse en el objetivo, hay que limpiarlo con una mezcla de alcohol-acetona (7:3) o *xilol*. No hay que abusar de este tipo de limpieza, porque si se aplican estos disolventes en exceso se pueden dañar las lentes y su sujeción.

6. No forzar nunca los tornillos giratorios del microscopio (macrométrico, micrométrico, platina, revólver y condensador).
7. El cambio de objetivo se hace girando el revólver y dirigiendo siempre la mirada a la preparación para prevenir el roce de la lente con la muestra. No cambiar nunca de objetivo agarrándolo por el tubo del mismo ni hacerlo mientras se está observando a través del ocular.
8. Mantener seca y limpia la platina del microscopio. Si se derrama sobre ella algún líquido, secarlo con un paño. Si se mancha de aceite, limpiarla con un paño humedecido en *xilol*.
9. Es conveniente limpiar y revisar siempre los microscopios al finalizar la sesión práctica y, al acabar el curso, encargar a un técnico un ajuste y revisión general de los mismos.

2.4.7 Aplicaciones del microscopio óptico

Este instrumento ha sido de gran utilidad, sobre todo en los campos de la ciencia en donde la estructura y la organización microscópica es importante, incorporándose con éxito a investigaciones dentro del área de la Química en el estudio de cristales, la Física en la investigación de las propiedades físicas de los materiales, la geología en el análisis de la composición mineralógica de algunas rocas y por supuesto en el campo de la biología, en el estudio de

estructuras microscópicas de la materia viva, por citar algunas disciplinas de la ciencia. Hasta ahora se da uso en laboratorio de histología y anatomía patológica, la microscopía permite determinadas aplicaciones diagnósticas. Numerosas estructuras cristalinas, pigmentos, lípidos, proteínas, depósitos óseos, depósitos de amiloide etc.

2.4.8 Principales elementos de un microscopio básico

Los microscopios de este tipo suelen ser más complejos, con varias lentes en el objetivo como en el ocular. El objetivo de éstas lentes es reducir la aberración cromática y la aberración esférica. En los microscopios modernos el espejo se sustituye por una lámpara que ofrece una iluminación estable y controlable.

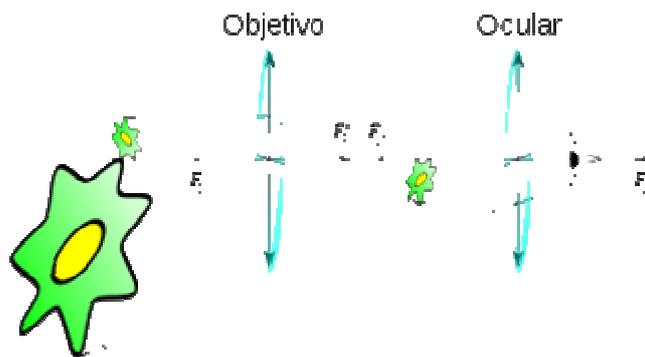
Los microscopios compuestos se utilizan para estudiar especímenes delgados, puesto que su profundidad de campo es muy limitada. Por lo general, se utilizan para examinar cultivos, preparaciones trituradas o una lámina muy fina del material que sea. Normalmente depende de la luz que atraviese la muestra desde abajo y usualmente son necesarias técnicas especiales para aumentar el contraste de la imagen.

La resolución de los microscopios ópticos está restringida por un fenómeno llamado difracción que, dependiendo de la apertura numérica (AN o A_N) del sistema óptico y la longitud de onda de la luz utilizada (λ), establece un límite definido (d) a la resolución óptica. Suponiendo que las aberraciones ópticas fueran despreciables, la resolución sería:

$$\delta = \frac{\lambda}{2 * A_N}$$

Normalmente, se supone una λ de 550 nm, correspondiente a la luz verde. Si el medio es el aire, la A_N práctica máxima es de 0.95, y en el caso de aceite de hasta 1.5. Ello implica que incluso el mejor microscopio óptico está limitado a una resolución de unos 0.2 micrómetros.

Figura 12. Diagrama simple de la óptica de un microscopio



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Microscopio_%C3%B3ptico

3. METALES

3.1 Metales

Se le denomina a los elementos químicos caracterizados por ser buenos conductores de calor y electricidad, poseer alta densidad, y ser sólidos a temperaturas normales.

La ciencia de los materiales define un metal como un material en el que existe un solape entre la banda de valencia y la banda de conducción en su estructura electrónica (enlace metálico). Esto le da la capacidad de conducir fácilmente calor y electricidad, y generalmente la capacidad de reflejar la luz, lo que le da su peculiar brillo.

El concepto metal refiere tanto a elementos puros, así como aleaciones con características metálicas, como el acero y el bronce. Los metales comprenden la mayor parte de la tabla periódica de los elementos y se separan de los no metales por una línea diagonal entre el boro y el polonio. En comparación con los no metales tienen baja electronegatividad y baja energía de ionización.

Tabla I. Tabla periódica de los elementos

1	2																	18	
1	H																		He
2	Li	Be																	Ne
3	Na	Mg																	Ar
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	Cs	Ba	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
7	Fr	Ra	Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt										
6			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb			
7			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No			

Fuente: <http://herramientas.educa.madrid.org/tabla/>

3.2 Estructura cristalina de los metales

Como los átomos tienden a adoptar posiciones relativamente fijas, esto da lugar a la formación de cristales en estado sólido. Los átomos oscilan alrededor de puntos fijos y están en equilibrio dinámico, más que fijos estáticamente. La red tridimensional de líneas imaginarias que conecta los átomos se llama red especial, en tanto que la unidad más que tiene la simetría total del cristal se llama celda unitaria.

Sólo hay catorce tipos posibles de redes especiales, y pueden clasificarse en siete cristalinos; los cuales están enumerados en la **Tabla II**.

Afortunadamente, la mayoría de los metales importantes se cristalizan ya sea en los sistemas cúbicos o en los hexagonales, y sólo tres tipos de redes

especiales se encuentran comúnmente: la BCC (cúbica centrada en el cuerpo), la FCC (cúbica centrada en las caras), y la HC (hexagonal compacta).

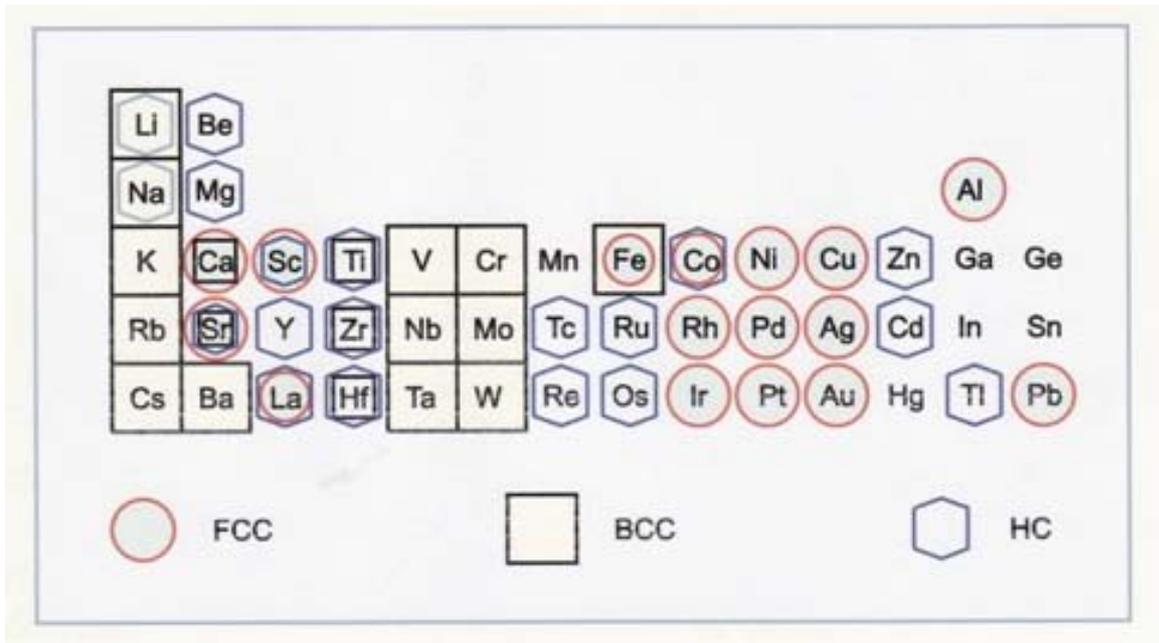
Tabla II. Características de los sistemas cristalinos

Estructura	Ejes	Ángulos entre ejes
Cúbica	$a = b = c$	Todos los ángulos de 90°
Tetragonal	$a = b \neq c$	Todos los ángulos de 90°
Ortorrómbica	$a \neq b \neq c$	Todos los ángulos de 90°
Hexagonal	$a = b \neq c$	Dos ángulos de 90° , un ángulo de 120°
Romboédrica	$a = b = c$	Todos los ángulos son iguales y ninguno es de 90°
Monoclínica	$a \neq b \neq c$	Dos ángulos de 90° , un ángulo β distinto a 90° .
Triclínica	$a \neq b \neq c$	Todos los ángulos son distintos y ninguno es de 90°

Fuente: Askeland, Donald R. **La ciencia e ingeniería de los materiales**. Pág. 41.

A continuación se muestra (Tabla III) los tipos de estructura cristalina de todos los metales que se encuentran en la tabla periódica.

Tabla III. Estructura cristalina de los metales



Fuente: <http://www.acienciasgalilei.com/qui/pdf-qui/estruct-element-metales.pdf>

3.3 Redes cristalinas de los metales

Como se mencionó anteriormente, los metales se pueden agrupar en los sistemas cristalinos siguientes:

3.3.1 Cúbica centrada en el cuerpo BCC

Si los átomos se presentan como esferas, el átomo del centro toca a cada átomo de las esquinas, pero éstos no se tocan entre sí. Como cada átomo de las esquinas lo comparten ocho cubos adyacentes y el átomo del centro no

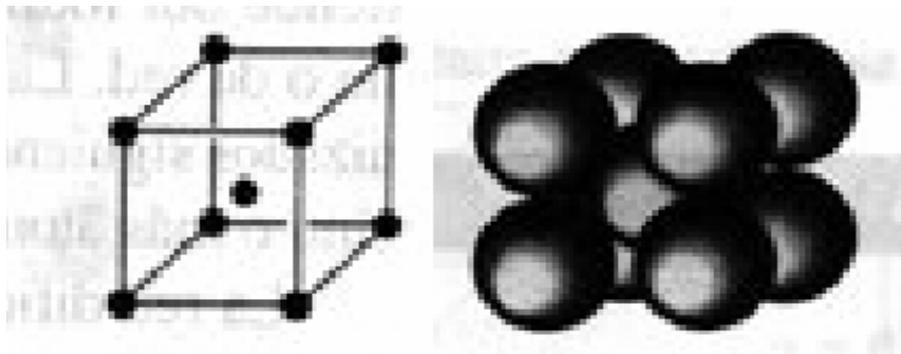
puede compartirlo ningún otro cubo, la celda unitaria de la estructura BCC contiene:

8 átomos en las esquinas $\times 1/8 = 1$ átomo

1 átomo central = 1 átomo

Total = 2 átomos

Figura 13. Red cúbica centrada en el cuerpo



Fuente: Askeland, Donald R. *La ciencia e ingeniería de los materiales*. Pág. 40 - 42.

3.3.2 Cúbica centrada en las caras FCC

Además de haber un átomo en cada esquina del cubo, hay uno en el centro de cada cara, pero ninguno en el centro del cubo. Cada átomo de las caras toca los átomos de las esquinas más próximas. Como cada átomo de las esquinas lo comparten ocho cubos adyacentes y cada átomo de las caras es compartido sólo por un cubo adyacente la celda unitaria contiene:

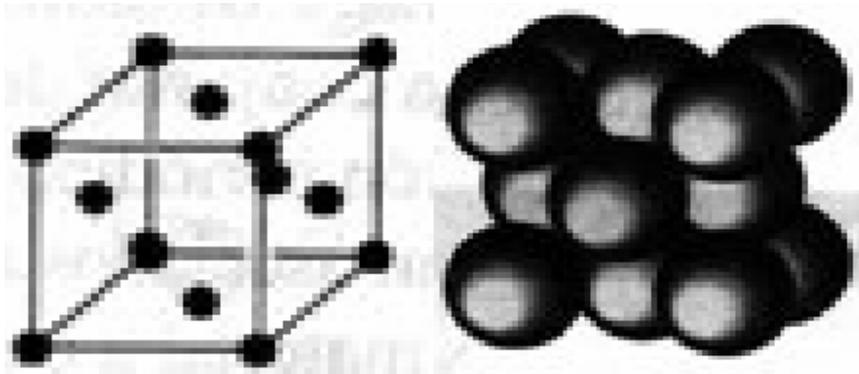
8 átomos en las esquinas $\times 1/8 = 1$ átomo

6 átomos centrados en las caras $\times 1/2 = \underline{3 \text{ átomos}}$

Total = 4 átomos

Esto indica que la estructura FCC está más densamente empaquetada que la BCC.

Figura 14. Red cúbica centrada en las caras



Fuente: Askeland, Donald R. **La ciencia e ingeniería de los materiales**. Pág. 40 - 42.

3.3.3 Hexagonal compacta

La figura usual de la red hexagonal compacta muestra dos planos basales en forma de hexágonos regulares, con un átomo tanto en cada esquina del hexágono como en el centro. Además, hay tres átomos en forma de triángulo a la mitad de la distancia entre los dos planos basales. En total esta celda unitaria contiene:

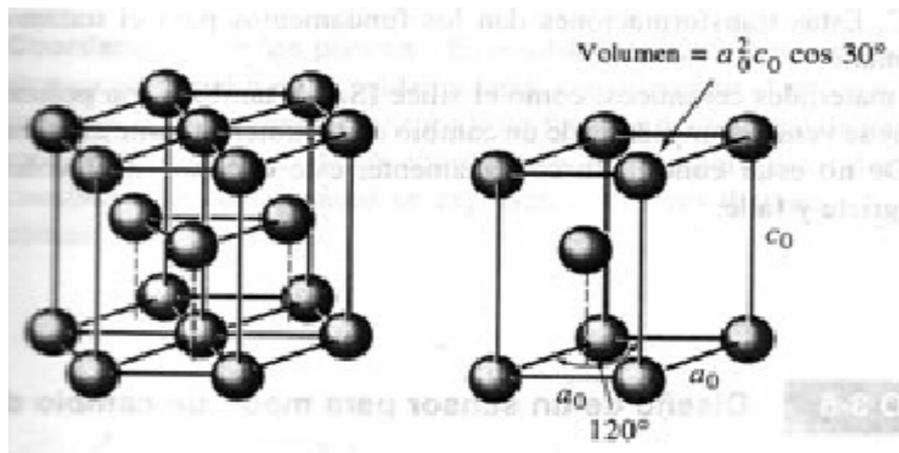
12 átomos en las esquinas $\times 1/6 = 1$ átomo

2 átomos centrados en las caras superior e inferior $\times 1/2 = 1$ átomo

3 átomos en el centro de la red $\times 1 = \underline{3 \text{ átomos}}$

Total = 6 átomos

Figura 15. Red hexagonal compacta y su celda unitaria



Fuente: Askeland, Donald R. *La ciencia e ingeniería de los materiales*. Pág. 45.

3.4 Cobre (Cu)

El cobre fue uno de los primeros metales empleados por el hombre, ya que en tiempos remotos debió de existir con relativa abundancia en la naturaleza en estado nativo. Todavía cantidades relativamente importantes en América, al sur del lago superior, en el *Lake Cooper* y en *Cocoroco* (Brasil).

Sin embargo, en la actualidad la casi totalidad de la producción de cobre se obtiene de minerales que lo contienen en forma de:

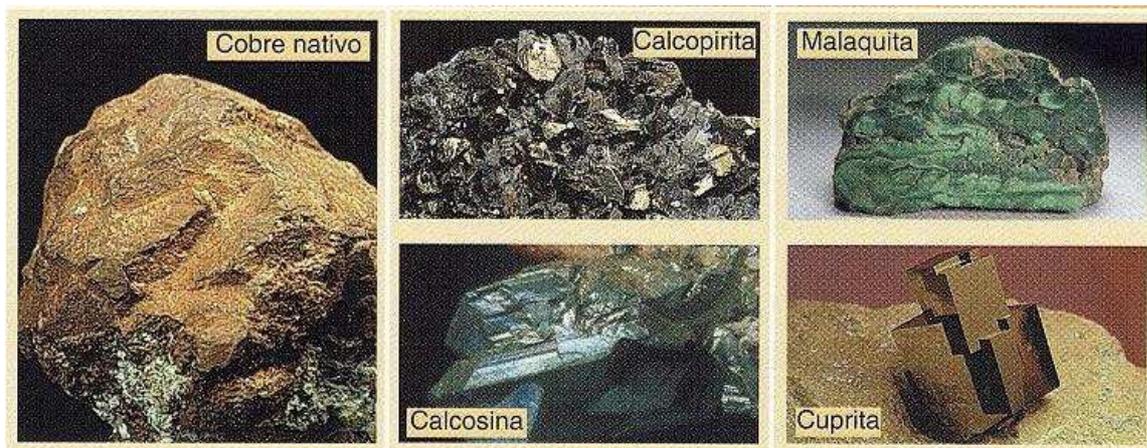
Sulfuros: Calcopirita, $\text{S Cu}_2 \text{ S}_3 \text{ Fe}_2$ (mezclada generalmente con pirita de hierro, $\text{S}_2 \text{ Fe}$); y Calcosina, S Cu_2 .

Óxidos: Cuprita, O Cu_2 .

Carbonatos: Malaquita, $\text{CO}_3 \text{ Cu (HO)}_2 \text{ Cu}$; Azurita, $2 \text{ CO}_3 \text{ Cu (HO)}_2 \text{ Cu}$.

Los minerales más usados son los sulfuros, que contienen hierro de gran cantidad y otras impurezas más o menos interesantes de arsénico, antimonio, plomo, bismuto, oro, plata y níquel. La ganga es, generalmente, muy siliciosa.

Figura 16. Minerales del cobre



Fuente: www.iestiemposmodernos.com/depart/dtec/Recursos/metalesnoferrosos.pdf

3.4.1 Proceso de obtención

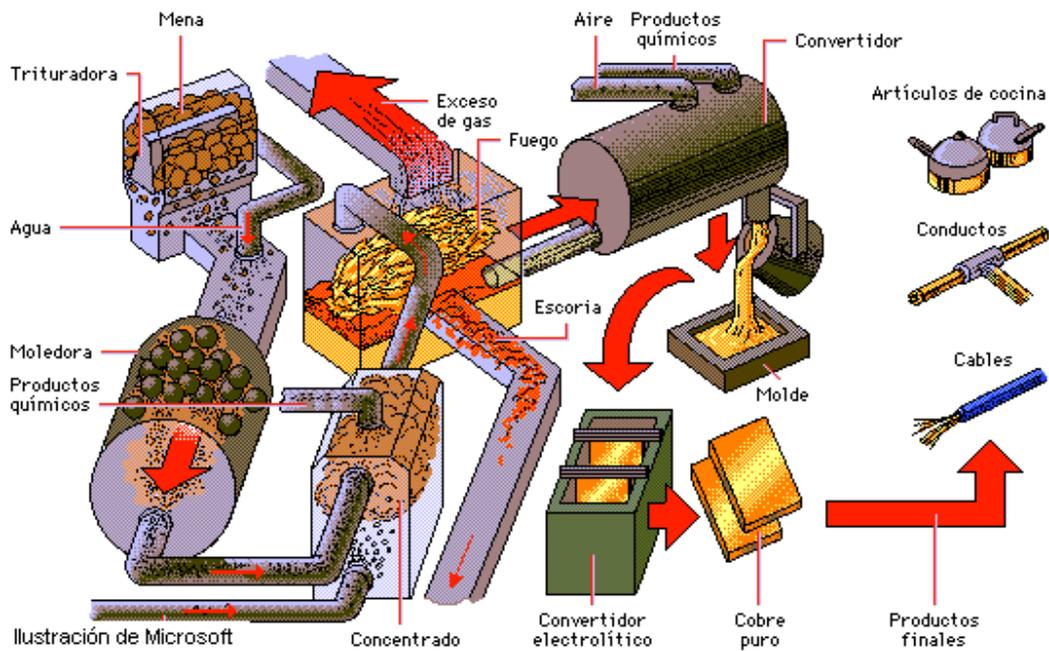
La obtención del cobre se realiza por dos métodos fundamentales, que se denominan de vía seca y vía húmeda. La metalurgia del cobre por vía seca es la más utilizada, pero sólo se puede aplicar a minerales con concentración mínima del 10 por ciento del cobre. La vía húmeda se emplea para minerales de contenido de cobre entre el 3 y el 10 por ciento. Los minerales de contenido de cobre inferior al 3 por ciento, por ahora, no se benefician.

3.4.1.1 La metalurgia del cobre por vía seca

Está se realiza en cuatro fases:

1. Concentración de mineral por flotación, a fin de eliminar parte de la ganga, y conseguir un porcentaje de cobre de un 20 por ciento, aproximadamente.
2. Eliminación parcial del hierro por tostación incompleta, que elimina también parte del azufre en forma de **SO₂**, que se utiliza para la fabricación de ácido sulfúrico (**SO₄H₂**). El hierro se elimina en forma de óxido de hierro. Y queda un producto intermedio denominado **mata**, formado por sulfuros de cobre y de hierro (**S Cu₂ Sn Fe**).
3. Oxidación de la mata en convertidores para eliminar el hierro que resta por tostación y reacción, y obtener cobre bruto.
4. Afino del cobre en horno de reverbero, por oxidación del cobre y reducción después, y finalmente afino por electrólisis, hasta conseguir una pureza de 99.99 por ciento.

Figura 17. Metalurgia del cobre por vía seca



Fuente: www.iesvillalbahervastecnologia.wordpress.com

3.4.1.2 La metalurgia del cobre por vía húmeda

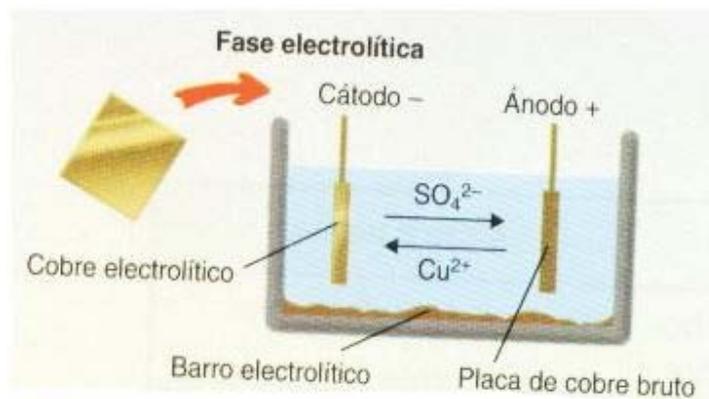
Ésta se realiza en dos fases:

1. Disolución, con ácido sulfúrico o sulfato férrico, de los minerales oxidados o de las cenizas producidas por la tostación de las piritas en la fabricación del ácido sulfúrico, hasta obtener sulfato de cobre ($\text{SO}_4 \text{Cu}$).
2. Precipitación de la solución obtenida, pobre en cobre (un gramo aproximadamente por litro), por medio del hierro, formándose sulfato de

hierro ($\text{SO}_4 \text{ Fe}$) y precipitándose el cobre. Se obtiene un producto muy impuro, con alrededor del 80 por ciento de cobre.

Para obtener un metal más puro se recurre a la precipitación electrolítica, utilizando como ánodo plomo o grafito.

Figura 18. Metalurgia del cobre por vía húmeda



Fuente: www.iesvillalbahervastecnologia.wordpress.com

3.4.2 Definiciones del cobre

Las nociones sobre la metalurgia del cobre que hemos expuesto son necesarias para comprender las clases de cobre que ordinariamente se encuentran en el mercado y que textualmente el Instituto Nacional de Racionalización del Trabajo, en su norma **UNE 37101**, define así:

3.4.2.1 Cobre

Con la denominación del cobre se designa el elemento químico de este nombre, así como los productos metalúrgicos de los que, solamente con el carácter de impurezas, pueden formar parte otros elementos.

3.4.2.2 Cobre metal

Con esta denominación se designa al cobre como elemento químico, se presenta en forma cristalina de cubos centrados en las caras, con un parámetro de red de $36153 \cdot 10^{-8}$ centímetros, a 20° C.

3.4.2.3 Cobre «Blister»

Es el cobre obtenido industrialmente de los minerales mediante la fusión por mata en hornos y ulterior tratamiento de ella en el convertidor.

3.4.2.4 Cáscara de cobre o cobre de cementación

Es el cobre obtenido industrialmente por vía húmeda, de disoluciones acuosas de sales cupríferas, en las que el hierro sustituye al cobre con precipitación de éste.

3.4.2.5 Cobre de afino térmico

Es el obtenido industrialmente por vía seca y en el que se han eliminado las impurezas, en cantidad y calidad, hasta un límite tal que puede considerarse prácticamente puro.

3.4.2.6 Cobre electrolítico

Es el obtenido por electrólisis acuosa y que a un elevado grado de pureza une la condición de una conductividad eléctrica muy alta.

Tabla IV. Cualidades del cobre sin alear (UNE 37 103)

NOMBRE Entre paréntesis, designación gráfica-oral	contenido mínimo de cobre	Calidad	Conductividad mínima referida al patrón internacional %	R Kgl/mm ²	A %	HR
Cáscara de cobre o cobre de cementación (Cuc)...	50					
Cobre «blister» (Cub)...	98,5					
Cobre electrolítico (Cub).	99,9					
Cobre de afino térmico: De 99.85 % (Cu 99.85)...	99,85					
De 99.75 % (Cu 99.75)...	99,75					
De 99.50 % (Cu 99.50)...	99,5					
Cobre eléctrico (Cuel)...	Determinado por la conductividad eléctrica	Recocido Semiduro Duro	98 97 97	20 30 37	30 4 2	F 40 B 48 B 57
Cobre desoxidado con Fósforo (Cu P).....	99,8 P de 0.08 a 0.015			20	35	

Fuente: Dr. Ing. José M. Lasheras Esteban, Prof. José M. Sanchez-Marin Pizarro.

Tecnología de los Materiales Industriales. Pág. 640

3.4.2.7 Cobre OFHC

El cobre denominado OFHC (*Oxygen free high conductivity*) es un cobre libre de oxígeno y de alta conductividad eléctrica. Se obtiene refundiendo los cátodos

de cobre electrolítico, en hornos eléctricos de inducción en atmósfera inerte **(CO, N₂)**.

El cobre OFHC, por su bajo contenido de oxígeno, inferior a 0.010 por ciento, es muy dúctil, pero, en cambio, es metalúrgicamente más impuro, pues contiene impurezas que en el cobre electrolítico quedan oxidadas y no afectan a la red cristalina. Por eso el nombre OFHC es de conductividad ligeramente inferior a la del cobre electrolítico.

3.4.3 Propiedades del cobre

El cobre es un metal de color rojo más o menos oscuro, pero siempre de agradable aspecto, que lo hace útil para aplicaciones artísticas. Su peso específico es de 8.96. Funde a 1809°. Su temperatura de ebullición es 2595°. Es, después de la plata, el mejor conductor de calor y de la electricidad. Por eso se utiliza mucho para la construcción de aparatos y útiles de intercambio de calor y, sobre todo, para la construcción de líneas eléctricas.

Tabla V. Constantes del cobre

Símbolo	Cu
Número atómico	29
Peso atómico	63.54
Cristaliza en la red cúbica centrada en las caras	$a = 36153 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$
Peso específico	8.96
Conductividad eléctrica a 20°	59 m/Ohm./mm ²
Resistividad eléctrica a 20°	$1.673 \cdot 10^{-6} \text{ Ohm. cm}^2/\text{cm.}$
Conductividad calorífica a 0°	0.941 cal/cm ² . cm. S °C
Coefficiente de dilatación lineal de 20 a 100°	$16.5 \cdot 10^{-6} \cdot \text{°C}$
Punto de fusión	1083 ± 1 °C
Calor latente de fusión	50.6 calorías/gr.
Calor específico medio	0.092 cal/g. °C
Punto de ebullición	2595 °C
Equivalente electroquímico	1.186 gr./Amp.
Módulo de elasticidad	12700Kg./mm ²
Resistencia a la tracción, fundido	15 - 20 Kg./mm ²
Resistencia a la tracción, recocido	23 Kg./mm ²
Resistencia a la tracción, laminado	39 Kg./mm ²
Dureza fundido	40 HB
Dureza recocido	40 HB
Dureza laminado	190 HB
Alargamiento fundido	20%
Alargamiento recocido	35%
Alargamiento laminado	10%
Recocido	50%
Contracción en la solidificación	4.10%

Fuente: Dr. Ing. José M. Lasheras Esteban, Prof. José M. Sanchez-Marin Pizarro.

Tecnología de los Materiales Industriales. Pág. 643.

3.4.3.1 Propiedades mecánicas

El cobre es un metal muy dúctil y maleable, pues llega a tener un alargamiento del 50 por ciento antes de romperse; pero adquiere gran acritud cuando se deforma en frío, duplicando, como luego veremos, su resistencia mecánica y dureza, y reduciéndose su alargamiento. Este aumento de resistencia que produce la deformación del frío, se utiliza para muchas aplicaciones del cobre; pero, en cambio, tiene el inconveniente que obliga a recocerlo frecuentemente cuando se lamina o se estira.

El cobre tiene otro inconveniente, y es que embota las limas y desprende con dificultad la viruta en el mecanizado.

3.4.3.2 Propiedades químicas

El agua pura no ataca al cobre a ninguna temperatura, lo que se utiliza para la fabricación de calderas de cobre.

Los agentes atmosféricos forman en su superficie una película verde grisácea compuesta de sulfato de cobre básico, y en las regiones marinas, de cloruro de cobre y, a veces, carbonato, que reduce el progreso de la oxidación a 0.5 a 1 milésima de milímetro por año.

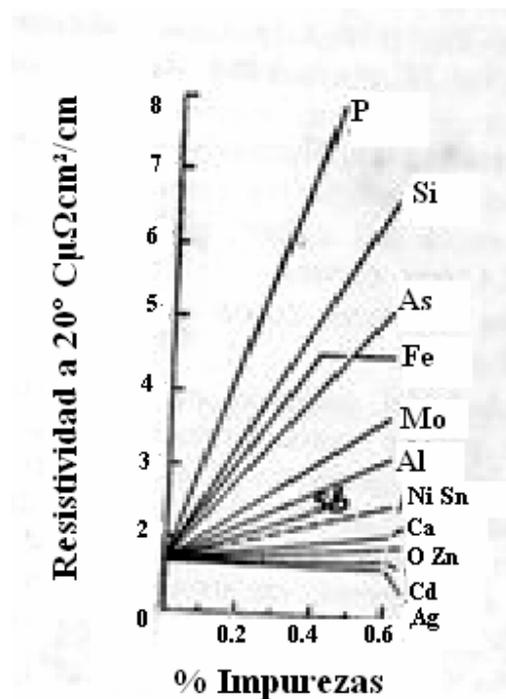
Al calentar el cobre se forma, a los 120°, una película rojiza de **Cu₂O**, que más tarde se convierte en negruzca al formarse **Cu₂O**. A partir de los 500°, el cobre se oxida rápidamente en toda su masa.

El cobre se alea fácilmente con el oro, plata, estaño, cinc y níquel, pero difícilmente con el plomo y hierro.

3.4.4 Influencia de las impurezas sobre las propiedades del cobre

Las impurezas en general disminuyen la conductividad eléctrica del cobre (figura 19).

Figura 19. Influencia de las impurezas de la resistividad del cobre



Fuente: Dr. Ing. José M. Lasheras Esteban, Prof. José M. Sanchez-Marin Pizarro.

Tecnología de los Materiales Industriales. Pág. 640

Sobre las propiedades mecánicas, la influencia de las impurezas varía según el elemento y la proporción en que se encuentre:

- **El antimonio**, hace al cobre quebradizo en caliente. No debe exceder del 0.05 por ciento.
- **El arsénico**, hasta un 0.12 por ciento, neutraliza el efecto perjudicial de las demás impurezas. El cobre para cajas de fuego contiene hasta el 0.45 por ciento de arsénico.
- **El azufre**, hasta un 0.1 por ciento, no perjudica sensiblemente las propiedades mecánicas del cobre. En mayores proporciones lo hace frágil en caliente.
- **El bismuto**, es insoluble en el cobre y se concentra, por tanto, en los bordes de los granos. A partir del 0.01 por ciento, hace al cobre quebradizo en caliente. Y a partir del 0.05 por ciento, en frío. No debe exceder su contenido en el cobre de 0.006 por ciento.
- **El cadmio**, eleva la resistencia mecánica del cobre estirado en frío, pudiendo contener sin inconveniente del 0.08 al 0.1 por ciento.
- **El cromo**, mejora las propiedades mecánicas del cobre y se adiciona voluntariamente hasta el 0.5 por ciento.
- **El estaño**, disminuye la ductibilidad del cobre en frío, y en pequeñas cantidades, hasta el 0.2 por ciento, facilita el laminado en caliente.
- **El fósforo**, se adiciona al cobre en forma de cuprofósforo al 15 por ciento, de **P**, para desoxidarlo. Con porcentajes de 0.02 a 0.04 por ciento de fósforo, el cobre queda totalmente desoxidado, con la consiguiente mejora de sus propiedades mecánicas. Pero por porcentajes mayores

disminuyen mucho la conductividad eléctrica, la tenacidad y la ductibilidad del cobre.

- **El hidrógeno**, al reconocer el cobre en atmósfera reductora, y por tanto en presencia de hidrógeno, gas de alumbrado o vapor de agua, reacciona el hidrógeno con el óxido de cobre y quedan bolsas de vapor de agua aprisionadas en la masa del cobre.



Al seguir elevado la temperatura, se eleva también la presión del vapor de agua, hasta que producen grietas por donde expansionarse.

Este fenómeno se ha denominado «enfermedad del hidrógeno» y se evita controlando el carácter de la llama que calienta al cobre, que no debe de ser reductora; o no exponiendo el material a la acción directa de la llama. En cualquier caso, se reducirá mucho la posibilidad de este defecto no rebasando la temperatura de 500°.

- **El hierro**, actúa como desoxidante, elevando la resistencia a la tracción y disminuyendo el alargamiento.
- **El níquel**, eleva la resistencia del cobre, pero disminuye su ductilidad, por lo que no debe pasar al 0.4 por ciento.
- **El silicio**, que se emplea a veces como desoxidante, disminuye mucho la conductividad eléctrica del cobre.
- **El oxígeno**, la solubilidad del oxígeno, en el cobre no llega al 0.997 por ciento a 300°, por lo que puede considerarse prácticamente como insoluble. Generalmente se encuentra el oxígeno en el cobre formando el óxido de cobre (**Cu₂O**), que es insoluble en el cobre y queda en las

juntas intergranulares o en la masa del cobre, formando oclusiones, lo que disminuye su ductilidad en caliente. Sin embargo, el oxígeno, en una proporción del 0.02 al 0.08 por ciento, no sólo no perjudica, sino que mejora algo las propiedades del cobre al disminuir, por oxidación de las demás impurezas, la influencia perjudicial de éstas.

- **El plomo**, es prácticamente insoluble en el cobre a la temperatura ambiente, y queda emulsionado en la masa del metal. Hasta el 0.2 por ciento, su acción es favorable para algunas aplicaciones del cobre, como para la fabricación de chapas finas, para estampación en frío. Pero a partir de porcentajes de plomo de 0.2 por ciento, el cobre se vuelve frágil a temperaturas superiores de 327°, que son las de fusión del plomo.

3.4.5 Tratamientos del cobre

El cobre puede ser sometido a tratamientos mecánicos y a recocidos de estabilización y contra acritud.

3.4.5.1 Tratamientos mecánicos

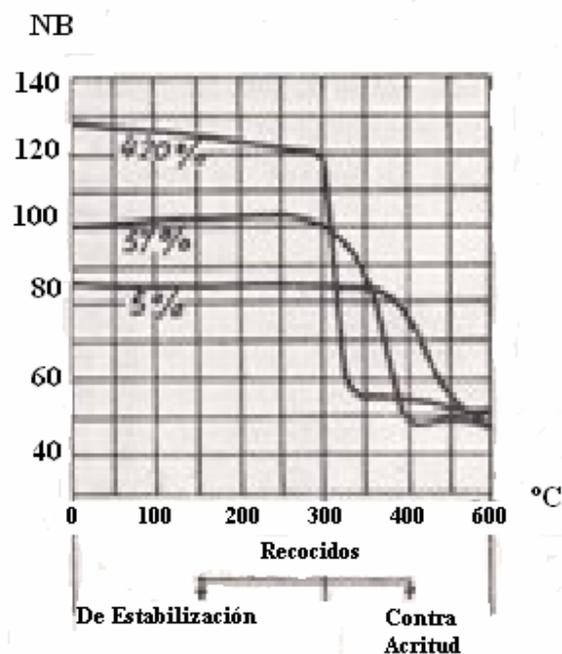
El cobre forjado, laminado o trefilado en frío adquiere una gran acritud que eleva su resistencia mecánica y su dureza y disminuye su alargamiento.

Para una misma reducción de sección, el endurecimiento es mayor trefilado que laminado, llegando a obtener resistencias a la tracción de 60 kg/mm², en hilos de 0.1 mm.

3.4.5.2 Recocido de estabilización

Tiene por objeto eliminar tensiones residuales producidas en el mecanizado, deformación en frío o en el moldeo de piezas complicadas, sin afectar sus características mecánicas. Se realiza de 150° a 325°, durante una a dos horas, enfriando después al aire (figura 20), obsérvese que el recocido de estabilización apenas influye en la dureza, pues su objeto no es ablandar el material, si no eliminar tensiones residuales.

Figura 20. Variación de la dureza del cobre con distintos grados de deformación en frío, según las temperaturas de los recocidos de estabilización y contra acritud.



Fuente: Dr. Ing. José M. Lasheras Esteban, Prof. José M. Sanchez-Marin Pizarro.

Tecnología de los Materiales Industriales. Pág. 644

3.4.5.3 Recocido contra acritud

Tiene por objeto ablandar el cobre con acritud que ha sido endurecido por trabajos mecánicos en frío (forja, laminado o trefilado).

Se realiza de 352° a 650°, debiendo permanecer el material a la temperatura de recocido, de una a dos horas (figura 20).

Se recomienda no rebasar los 650°, pues a partir de esa temperatura aumenta el tamaño del grano, lo que, si bien no influye mucho en la resistencia mecánica, disminuye bastante la ductibilidad del metal.

3.4.6 Aplicaciones del cobre

El cobre tiene una amplia gama de aplicaciones debido a su elevada conductividad eléctrica y calorífica, su resistencia a la corrosión, su ductibilidad y su color.

Por su conductividad eléctrica, se utiliza mucho para la fabricación de conductores, consumiéndose en esta aplicación más de la mitad de su producción mundial.

Por su conductividad calorífica, se utiliza para la construcción de serpentines de refrigeración, cajas de fuego para locomotoras, hornos de baño, etc.

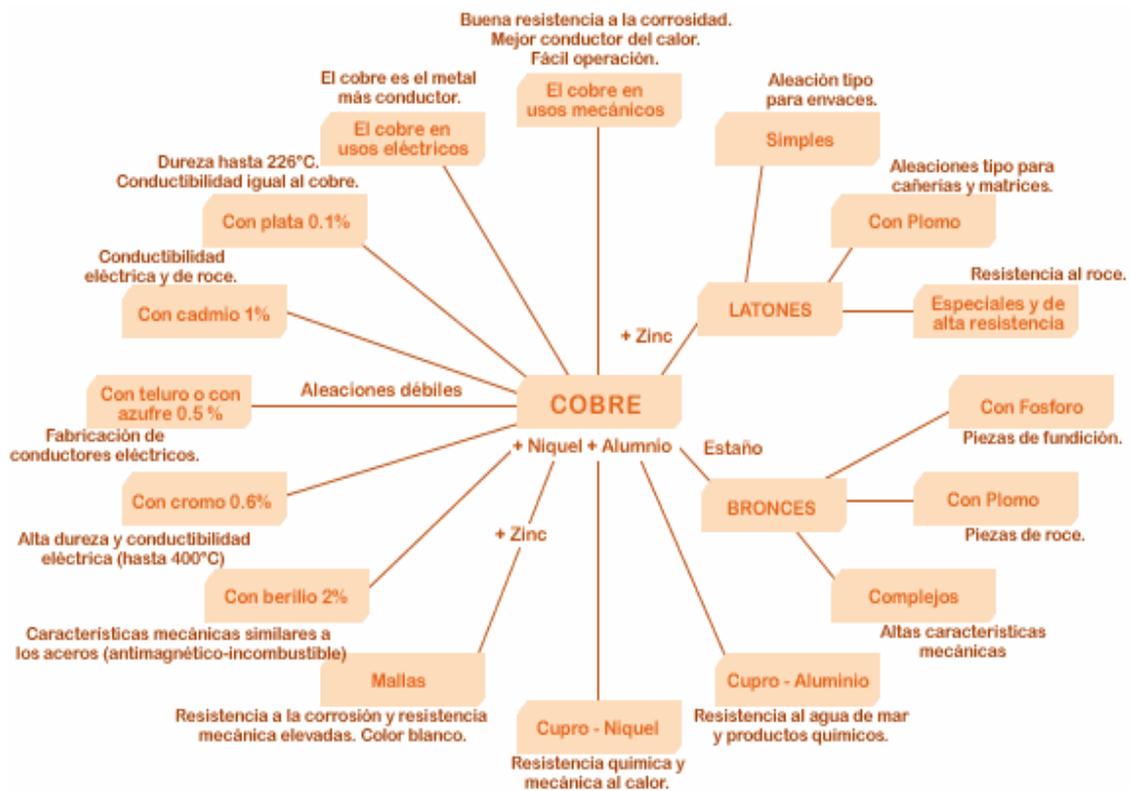
Por su resistencia a la corrosión, se emplea mucho en la construcción de recipientes y tuberías para industria química.

Por su ductilidad y su color, se emplea para trabajos artísticos. Además, el cobre se emplea para el cobreado electrolítico de numerosos artículos.

3.4.7 Aleaciones de cobre

El cobre puro es blando por eso se alea con el aluminio (bronce de aluminio), el cinc (latones), el estaño (bronces) y con otros metales para mejorar su dureza y resistencia a la tracción.

Figura 21. El cobre y sus aleaciones



Fuente: www.iesvillabahervastecnologia.wordpress.com

3.4.7.1 Bronce de aluminio

Está compuesto por un 90 por ciento de cobre y un 10 por ciento de aluminio. Aumenta sensiblemente la dureza del cobre y es mucho más resistente a la corrosión que cualquiera de los metales por separado.

Por su resistencia frente a los agresivos químicos, se utiliza en la industria para la fabricación de equipos que están expuestos a líquidos corrosivos.

3.4.7.2 Latones

Se denominan así las aleaciones de cobre con cinc y son conocidas desde la antigüedad.

El latón es menos resistente a los agentes atmosféricos que el cobre, pero soporta mejor el agua y el vapor. En la actualidad se emplea mucho para fabricar casquillos de ajuste de piezas mecánicas.

Las aleaciones cobre – cinc están normalizadas y se añaden nuevos metales, como el estaño, el aluminio y el plomo, que mejoran sus propiedades mecánicas.

Si se aumenta el porcentaje de cobre, mejora la moldeabilidad de la pieza.

Añadiendo a la aleación pequeñas cantidades de estaño y aluminio, se consigue mejorar su resistencia a la corrosión marina.

Si se añade algo de plomo, mejora su capacidad de mecanizado.

Tabla VI. Color de los latones según su composición

16 a 19 %	de cobre	84 a 81 %	de cinc.....	gris oscuro
19 a 26 %	"	81 a 74 %	"	gris ceniciento
26 a 27 %	"	74 a 73 %	"	gris sucio
27 a 28 %	"	73 a 72 %	"	gris
28 a 30 %	"	72 a 70 %	"	gris claro
30 a 32 %	"	70 a 68 %	"	blanco plateado
32 a 50 %	"	68 a 50 %	"	amarillo oscuro
50 a 66 %	"	50 a 34 %	"	amarillo fuerte
66 a 75 %	"	44 a 25 %	"	amarillo pálido
75 a 86 %	"	25 a 14 %	"	amarillo rojizo
86 a 98 %	"	14 a 2 %	"	rojo amarillento

Fuente: Dr. Ing. José M. Lasheras Esteban, Prof. José M. Sanchez-Marin Pizarro.

Tecnología de los Materiales Industriales. Pág. 647.

3.4.7.3 Bronces

Se denominan así las aleaciones de cobre con estaño o con cualquier otro metal, excepto el cinc. Son conocidas desde la prehistoria.

Los bronce, en general, son aleaciones de elevada resistencia mecánica y buena resistencia a la corrosión, superior a la de los latones.

Dependiendo de la presencia de otros metales en la aleación, se distinguen los bronce para forjar y los bronce para fundir.

O los bronce para forjar poseen porcentajes muy bajos de otros metales. Tienen gran resistencia a la tracción y al desgaste, y se emplean para fabricar chapas, flejes alambres y engranajes.

Los bronce para fundir tienen magníficas cualidades para el deslizamiento. Si se añade plomo a la aleación, ésta adquiere cualidades autolubrificantes y se emplea para la fabricación de cojinetes.

Tabla VII. **Color de los bronce según su composición**

% de cobre	% de estaño	color
99	1	rojo pálido
95	5	rosado
92	8	amarillo rojizo
90	10	amarillo anaranjado
86	14	amarillo
84	16	amarillo rojo
80	20	dorado pálido
75	25	rojo azulado
73	27	gris oscuro
70	30	blanco
67	33	blanco grisáceo
65	35	blanco azulado
50	50	gris claro
40	60	blanco mate
30	70	blanquecino
20	80	blanco vivo
10	90	blanco de estaño

Fuente: Dr. Ing. José M. Lasheras Esteban, Prof. José M. Sanchez-Marin Pizarro.

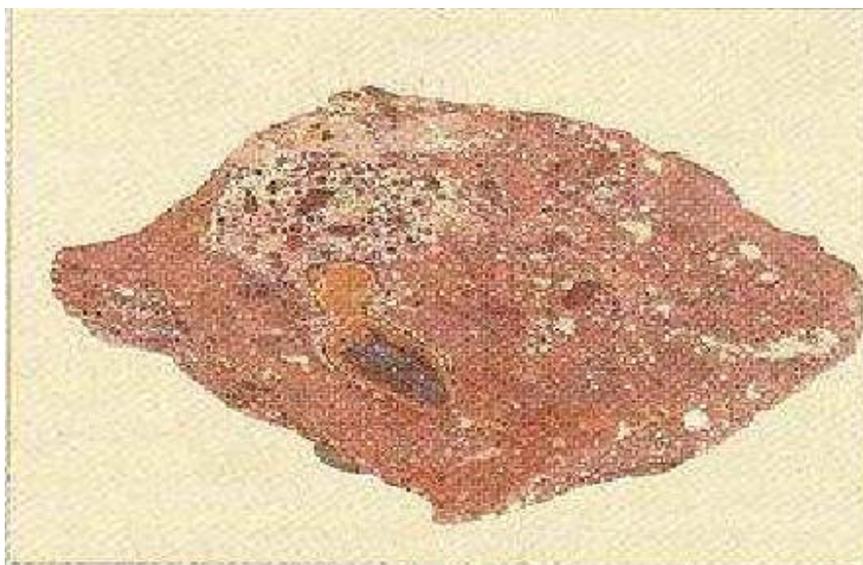
Tecnología de los Materiales Industriales. Pág. 660.

3.5El aluminio

El aluminio es uno de los principales componentes de la corteza terrestre conocida, de la que forma parte en una proporción del 8.13 por ciento, superior a la del hierro, que se supone que es de un 5 por ciento, y solamente superada por el silicio (26.5 por ciento).

El aluminio no se encuentra puro en la naturaleza, si no formando parte de los minerales, de los cuales los más importantes son las bauxitas, que están formadas por 62 a 65 por ciento, de alúmina ($\text{Al}_2 \text{O}_3$), hasta un 28 por ciento de óxido de hierro ($\text{Fe}_2 \text{O}_3$), 12 a 30 por ciento de agua de hidratación (H_2O) y hasta un 8 por ciento de sílice (Si O_2).

Figura 22. Bauxita



Fuente: www.iestiemposmodernos.com/depart/dtec/Recursos/metalesnoferrosos.pdf

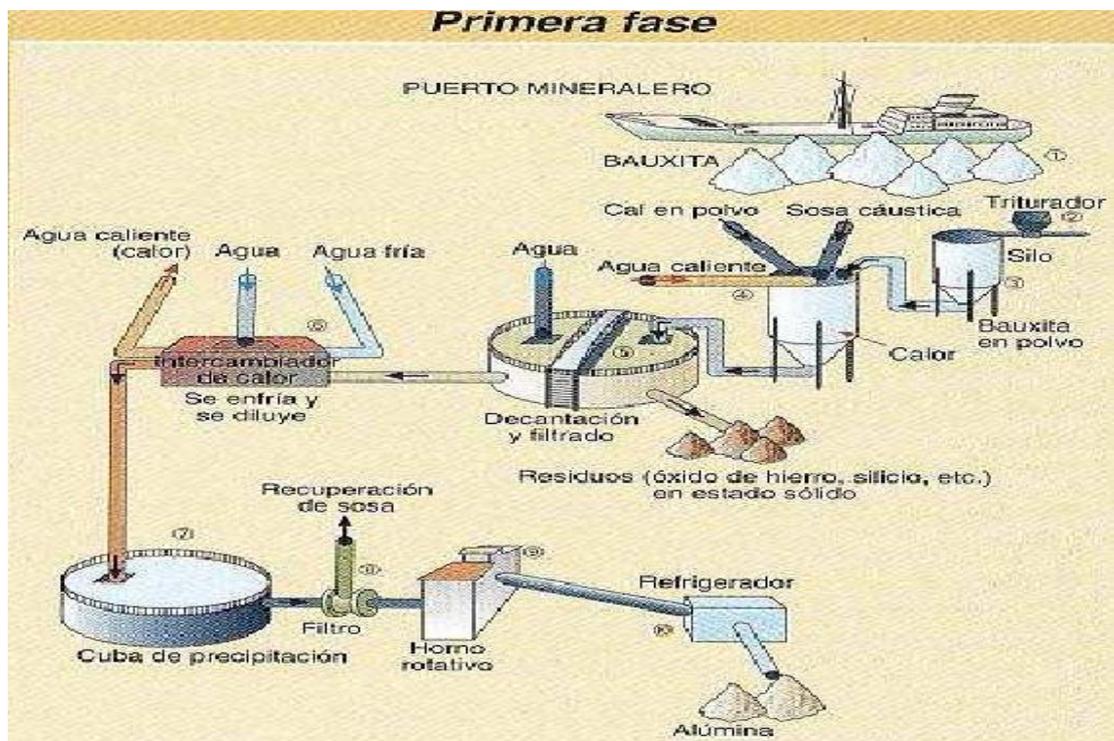
3.5.1 Proceso de obtención

La obtención de aluminio se realiza en dos fases:

3.5.1.1 Separación de la alúmina

La separación de la alúmina (Al_2O_3) de las bauxitas por el procedimiento Mayer, que comprende las siguientes operaciones: se calientan las bauxitas para deshidratarlas, una vez molidas; se atacan a continuación con lejía de sosa en caliente y a presión para formar aluminato sódico ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), que se separa del resto de los componentes de la bauxita; después, bajo la influencia de una pequeña cantidad de alúmina que inicia la reacción, se hidroliza el aluminato de sodio, quedando alúmina hidratada a 1200° , con lo que queda preparada para la fase siguiente.

Figura 23. Separación de la alúmina



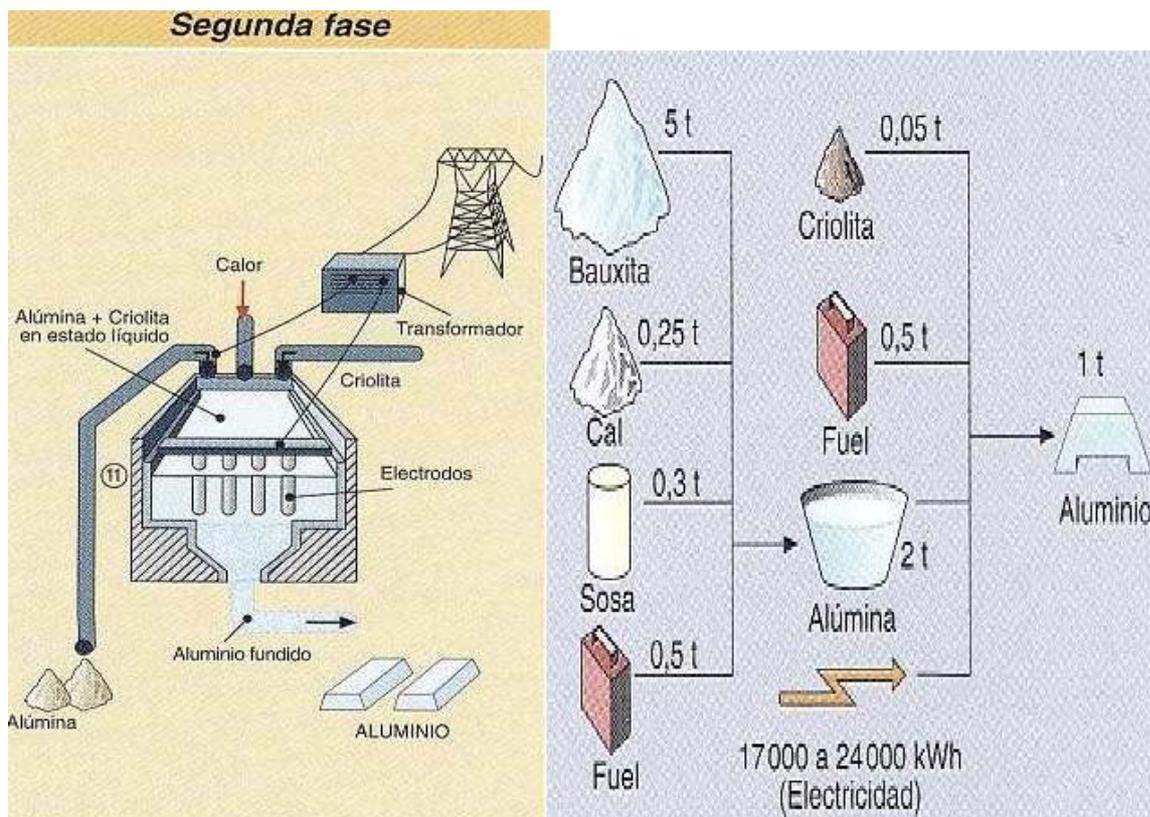
Fuente: www.iestiemposmodernos.com/depart/dtec/Recursos/metalesnoferrosos.pdf

3.5.1.2 Reducción de la alúmina

La reducción de la alúmina disuelta en un baño de criolita (**Fna. $F_3 Al$**), y con cierta cantidad de fundente, por electrolisis con electrodos de carbón.

Para obtener una tonelada de aluminio son necesarias 4 toneladas de bauxita, 80 kg de criolita, 600 kg de electrodos de carbón y 22000 Kw-hora. La metalurgia de aluminio es, por tanto, esencialmente electrolítica.

Figura 24. Reducción de la alúmina



Fuente: www.iestiemposmodernos.com/depart/dtec/Recursos/metalesnoferrosos.pdf

3.5.2 Propiedades del aluminio

El aluminio es un metal blanco brillante, que pulido semeja a la plata. Cristaliza en la red cúbica centrada en las caras. Su peso específico es igual a 2699, es decir, casi 1/3 del hierro (7.87).

El único metal industrial más ligero que el aluminio es el magnesio, de peso específico 1.74. Su conductividad eléctrica es un 60 por ciento que la del cobre y 3.5 veces mayor que la del hierro. Su punto de fusión es de 660° y el de ebullición 2450°. Este punto de fusión relativamente bajo. Unido a su punto de ebullición bastante alto facilita su fusión y moldeo.

Tabla VIII. Constantes del aluminio

Símbolo	Al
Número atómico	13
Peso atómico	26,98
Cristaliza en la red cúbica centrada en las caras	$a = 4.04 \cdot 10^{-8}$ cm
Peso específico	2,699
Conductividad eléctrica a 20°	34.6 m/Ohm./mm ² 2.655*10 ⁻⁶ Ohm.
Resistividad eléctrica a 20°	cm ² /cm.
Conductividad calorífica a 0°	0.53 cal/cm.*S. °C
Coefficiente de dilatación lineal de 20 a 100°	23.6*10 ⁻⁶ * °C
Punto de fusión	660
Calor latente de fusión	94.5 calorías/gr.
Calor específico medio	0.215 cal/g. °C
Punto de ebullición	2450 °C
Calor de combustión	380.8 K cal/mol.
Equivalente electroquímico	0.3354 gr./Amp. Hora
Módulo de elasticidad	7200 Kg./mm ²
Resistencia a la tracción, fundido	9 - 12 Kg./mm ²
Resistencia a la tracción, recocido (blando)	7 - 11 Kg./mm ²
Resistencia a la tracción, laminado (duro)	18 - 28 Kg./mm ²
Dureza fundido	24 - 32 HB
Dureza Recocido	15 - 25 %
Dureza laminado duro	45 - 60 HB
Alargamiento fundido	18 - 25 %
Alargamiento laminado duro	3 - 5 %
Recocido	30 - 45 %
Contracción en la solidificación fundido en arena	1,6%
Contracción en la solidificación fundido en coquilla	1,83%

Fuente: Dr. Ing. José M. Lasheras Esteban, Prof. José M. Sanchez-Marin Pizarro.

Tecnología de los Materiales Industriales. Pág. 610.

3.5.2.1 Propiedades químicas

Las propiedades químicas más destacada del aluminio es su gran afinidad con el oxígeno, por lo que se emplea, entre otras cosas, para la desoxidación de los baños de acero, para la soldadura aluminotérmica ($\text{Al} + \text{Fe O}_3$), para la fabricación de explosivos, etc.

A pesar de esto y aunque parezca un contrasentido, el aluminio es completamente inalterable en el aire, pues se recubre de una delgada capa de óxido, de algunas centésimas de micra, que protege el resto de la masa de la oxidación.

Debido a esta película protectora, resiste también la acción del vapor de agua, el ataque del ácido nítrico concentrado y muchos otros compuestos químicos. En cambio, es atacado por el ácido sulfúrico, el clorhídrico, el nítrico diluido y por las soluciones salinas.

Tabla IX. Calidades de aluminio de primera función (UNE 38 111)

DESIGNACIÓN	SÍMBOLO	IMPUREZAS ADMISIBLES %			
		Si + Fe	Ti	Cu + Zn	TOTALES
Aluminio L-111 (99.7)					
UNE 38-111 ...	L-111 (99.7)	< 0.3	< 0.03	< 0.03	0.3 máx
Aluminio L-111 (99.5)					
UNE 38-111 ...	L-111 (99.5)	< 0.5	< 0.03	< 0.05	0.5 máx
Aluminio L-111 (99)					
UNE 38-111 ...	L-111 (99)	< 1.0	< 0.03	< 0.1	1.0 máx
Aluminio L-111 (98)					
UNE 38-111 ...	L-111 (98)	< 2.0	< 0.05	< 0.2	2.0 máx
Aluminio L-111 (99.5E)			Ti + Cr + V		
UNE 38-111 ...	L-111 (99.5E)	< 0.5	< 0.03	< 0.05	0.5 máx
Aluminio L-111 (93)					
UNE 38-111 ...	L-111 (99.3)	< 7.0	0.7 máx

Fuente: Dr. Ing. José M. Lasheras Esteban, Prof. José M. Sanchez-Marin Pizarro. **Tecnología de los Materiales Industriales**. Pág. 609.

3.5.2.2 Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas del aluminio más interesantes son su débil resistencia mecánica y su gran ductilidad y maleabilidad, que permite forjarlo, trefilarlo en hilos delgadísimos y laminarlo en láminas o panes tan finos como los del oro, hasta de un espesor de 0.0004 mm. (0.4 micras). A la temperatura de 500° se vuelve frágil y se puede pulverizar fácilmente.

3.5.3 Aplicaciones del aluminio

El aluminio tiene multitud de aplicaciones: Su bajo peso específico lo hace útil para la fabricación de aleaciones ligeras, extensamente empleadas en construcciones aeronáuticas y en general cada vez más en los vehículos de transporte. (Automotores, automóviles, etc.).

Su elevada conductividad eléctrica lo hace útil para la fabricación de conductores eléctricos de aluminio técnicamente puro o en forma de cables armados con acero galvanizado.

Su elevada conductividad calorífica e inalterabilidad lo hacen útil para la fabricación de utensilios de cocina y, en general, para aparatos de intercambio de calor.

Su maleabilidad lo hace útil para la fabricación de papel de aluminio, en lo que se emplea actualmente un 10 por ciento de su producción total.

Su resistencia a la corrosión lo hace útil para la fabricación de depósitos para ácido acético, cerveza, etc. También se emplea en forma de chapas para cubiertas de edificios. Y reducido a polvo para la fabricación de purpurinas y pinturas resistentes a la corrosión atmosférica.

Sus propiedades reductoras lo hacen útil para la desoxidación del hierro y otros metales y para las soldaduras aluminio – térmicas.

3.5.4 Aleaciones de aluminio

Los principales metales empleados para su aleación con aluminio son los siguientes: Cobre (Cu), silicio (Si), cinc (Zn), magnesio (Mg) y manganeso (Mn).

Y los metales que pudiéramos considerar como secundarios, son los siguientes: Níquel (Ni), titanio (Ti), hierro (Fe), cromo (Cr) y cobalto (Co).

Sólo en casos especiales se adicionan: Plomo (Pb), cadmio (Cd), antimonio (Sb) y bismuto (Bi).

3.5.5 Tratamientos anticorrosivos, mecánicos y térmicos del aluminio y sus aleaciones

El aluminio y sus aleaciones pueden someterse a los siguientes tratamientos:

3.5.5.1 Tratamientos anticorrosivos

Se realizan para dar mayor resistencia a la corrosión del aluminio. El más empleado es la oxidación anódica, que consiste esencialmente en aumentar el espesor de la película superficial de óxido que se produce naturalmente en el aluminio, mejorando a veces su aspecto dándole un acabado brillante o tiñéndola en diversos colores.

3.5.5.2 Tratamientos mecánicos

Los trabajos de forja, laminación, trefilado, etcétera, realizados en frío aumenta la resistencia mecánica y dureza del aluminio y de las aleaciones forjables, a consecuencia del aumento de acritud adquirido por el material en su deformación. Esto se aprovecha ampliamente en las aleaciones ligeras para mejorar sus características mecánicas.

3.5.5.3 Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos que pueden aplicarse al aluminio y sus aleaciones son: el recocido de estabilización, el recocido contra acritud, el recocido de homogeneización, el temple de precipitación y la maduración artificial.

3.5.6 Recocido del aluminio y sus aleaciones

Los recocidos son operaciones de calentamiento y enfriamiento lento para conseguir la constitución y estructura más estable a la temperatura ambiente y destruir, por tanto, cualquier anomalía en que se encuentre el material producida por tratamientos mecánicos o térmicos. La intensidad de los recocidos depende, sobre todo, de la temperatura máxima a que se llega en el calentamiento. Según sea ésta y clasificados con arreglo a la temperatura y de menor a mayor, se practican con el aluminio los siguientes recocidos:

3.5.6.1 Recocidos de estabilización

Tiene por objeto eliminar tensiones residuales que pueden producirse en el mecanizado o en la conformación en frío o en caliente. La operación se realiza calentando el material a temperaturas inferiores a la de recristalización para que no se modifique su estructura micrográfica. Estas temperaturas varían según las aleaciones. Por ejemplo, las del aluminio de 99.97 oscilan entre 180° y 210°. El tiempo de permanencia a estas temperaturas es de unas cuatro horas, exceptuando el tiempo de elevación de la temperatura y el de enfriamiento, que debe ser, sobre todo éste, muy lento para evitar la aparición de nuevas tensiones.

3.5.6.2 Recocido contra acritud

Tiene por objeto eliminar la acritud adquirida por el material al deformarse en frío o a temperaturas inferiores a la recristalización. Con este tratamiento no sólo recobran los granos deformados su forma poliédrica, sino que también, si la deformación ha sido muy intensa, se rompen los granos y constituyéndose los fragmentos en núcleos de recristalización se produce una nueva estructura granular más fina. A este fenómeno se conoce con el nombre de germinación. Si la deformación sólo fue moderada, no se produce germinación y el material queda con grano poliédrico, pero grueso.

Las temperaturas de recocido contra acritud dependen de la aleación, oscilando en general entre 300° y 400°, ya que la temperatura de recristalización a la que debe superarse oscila entre 200° y 300°. Es

conveniente pasar con rapidez esa zona de temperaturas de recristalización, sobre todo si las piezas no han sido muy deformadas, para evitar un excesivo crecimiento del grano. De todas maneras, si las piezas no han sido muy deformadas, no deben someterse al recocido contra acritud, porque aumentará siempre el tamaño del grano.

El tiempo de permanencia a la temperatura máxima debe ser lo más breve posible y oscilará entre dos y ocho horas, según la aleación, no debiendo sobrepasarse el tiempo máximo señalado de permanencia a la temperatura de recocido, para evitar también el crecimiento del grano. Por esto mismo se aconseja introducir las piezas en el horno, una vez que esté a la temperatura del recocido, para abreviar la duración de la elevación de la temperatura en la pieza.

3.5.6.3 Recocido de homogeneización y regeneración

Tiene por objeto uniformar la composición química y el grano de las aleaciones de aluminio que son propensas a heterogeneidad química y estructural; el recocido se realiza a temperaturas comprendidas entre 450° y 550° durante un tiempo comprendido entre quince y sesenta minutos. A estas temperaturas se facilita la difusión de los elementos y la solución de otros como el silicio.

Con este tratamiento se consigue también la regeneración de las aleaciones endurecidas por el temple, anulando los efectos de éste y volviéndolas a su estado natural.

El enfriamiento debe ser lo más lento posible para evitar una constitución anormal por un enfriamiento demasiado rápido que dé lugar luego, por maduración natural, a un endurecimiento indeseable de la aleación, como ocurre con el duro-aluminio.

3.5.7 Aplicaciones de las aleaciones de aluminio

Las aleaciones de aluminio tienen cada día una mayor aplicación, utilizándose extensamente para la fabricación de piezas que deben ser resistentes y al mismo tiempo ligeras para las construcciones aeronáuticas, vagones de ferrocarril de trenes articulados modernos, etc. También se emplean para la fabricación de culatas, cárters y émbolos de motores de explosión.

En la edificación se emplean las aleaciones de aluminio para la construcción de puertas y ventanas, molduras, etc.

En las construcciones navales se emplean ampliamente determinadas aleaciones de aluminio por su resistencia a la corrosión marina.

4. OPERACIONES A SEGUIR PARA PREPARAR UNA MUESTRA METALOGRÁFICA

4.1 Corte

El tamaño de la muestra siempre que se pueda debe ser tal que su manejo no encierre dificultad en la operación.

4.1.1 Corte por sierra

Produce severas condiciones de trabajo en frío y no es ventajoso. El corte mediante este método ocasiona superficies irregulares con valles excesivamente altos, dando como efecto más tiempo de aplicación de las técnicas de preparación de las muestras. Generalmente este tipo de corte es utilizado para extraer probetas de piezas muy grandes, para poder luego proceder con el corte abrasivo y adecuar la probeta a los requerimientos necesarios.

Figura 25. Arco de sierra

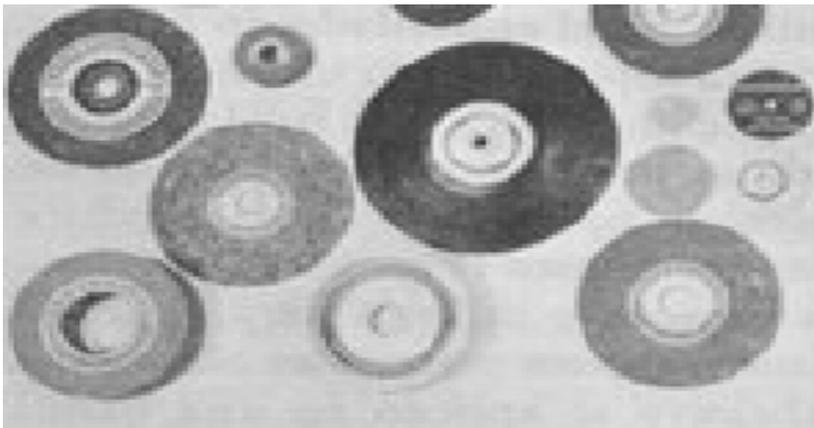


Fuente: Dr. Eduardo J. Dubox, **Prácticas de Metalografía**. Pág. 9.

4.1.2 Corte por disco abrasivo

Este tipo de corte es el más utilizado, ya que la superficie resultante es suave, y el corte se realiza rápidamente. Los discos para los cortes abrasivos, están formados por granos abrasivos (tales como óxido de aluminio o carburo de silicio), aglutinados con goma u otros materiales. Los discos con aglutinantes de goma son los más usados para corte húmedo; los de resina son para corte en seco.

Figura 26. Discos abrasivos

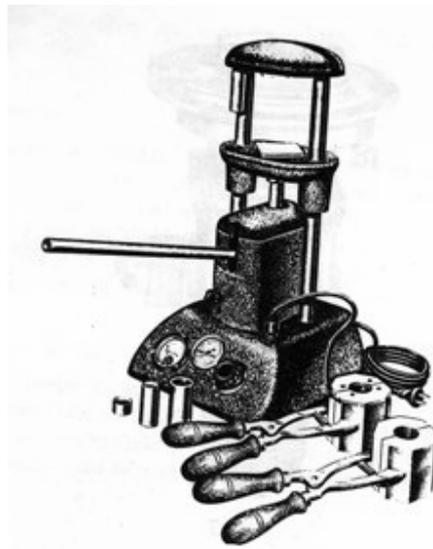


Fuente: H.C. Kazanas, Glenn E. Baker, Thomas G. Gregor. **Procesos básicos de manufactura**. Pág. 220.

4.2 Montaje de muestra

Con frecuencia, la muestra a preparar, por sus dimensiones o por su forma, no permite ser pulida directamente, sino que es preciso montarla o embutirla en una pastilla. El material del que se componen estas puede ser Lucita (resina termoplástica) o Bakelita (resina termoendurecible). Los instrumentos a utilizar se ven en la siguiente figura.

Figura 27. Prensa para oprimir plástico



Fuente: Dr. Eduardo J. Dubox, **Prácticas de Metalografía**. Pág. 11.

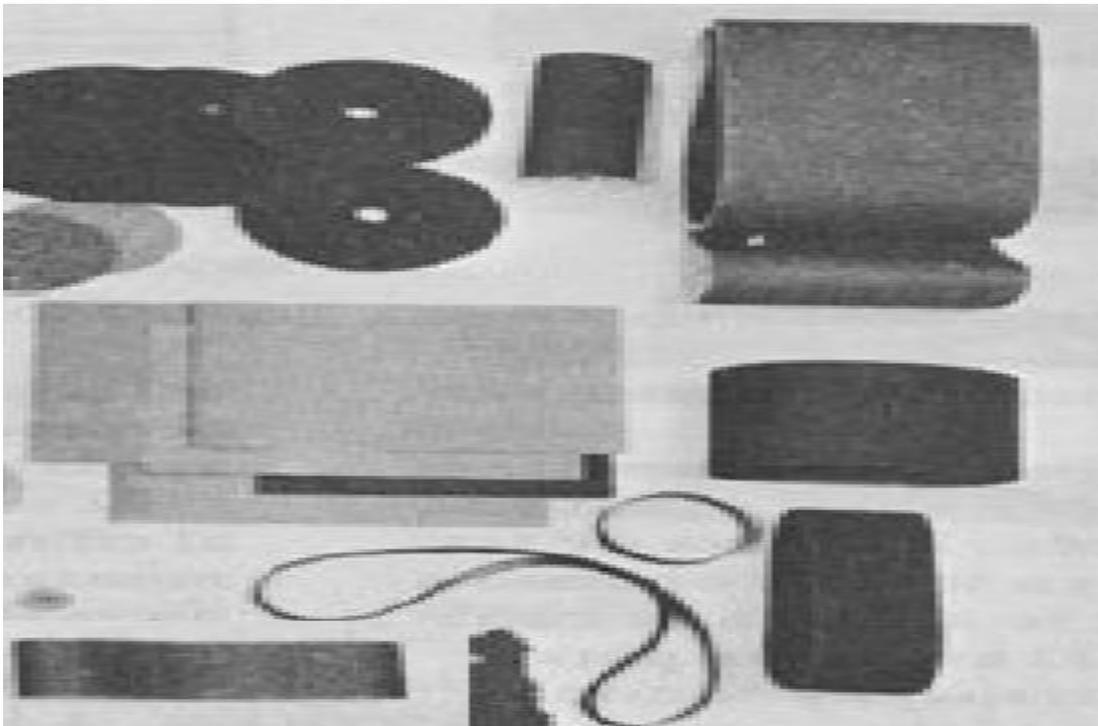
4.3 Desbaste

Después de montada la probeta, se inicia el proceso de desbaste sobre una serie de hojas de esmeril o lija con abrasivos más finos, sucesivamente. El proceso de desbaste se divide en 3 fases:

- Desbaste grosero
- Desbaste intermedio
- Desbaste final

Cada etapa de preparación de probetas metalográficas debe realizarse muy cuidadosamente para obtener al final una superficie exenta de rayas.

Figura 28. Hojas de esmeril o lijas



Fuente: H.C. Kazanas, Glenn E. Baker, Thomas G. Gregor. **Procesos básicos de manufactura**. Pág. 220.

4.3.1 Desbaste grosero

Es el desbaste inicial, que tiene como objetivo planear la probeta, lo cual puede hacerse a mano y aun mejor con ayuda de una lijadora de banda. El papel de lija utilizado es de carburo de silicio con granos de 240 o papel de esmeril número 1. En cualquier caso, la presión de la probeta sobre la lija o papel de esmeril debe ser suave, para evitar la distorsión y rayado excesivo del metal.

4.3.2 Desbaste intermedio

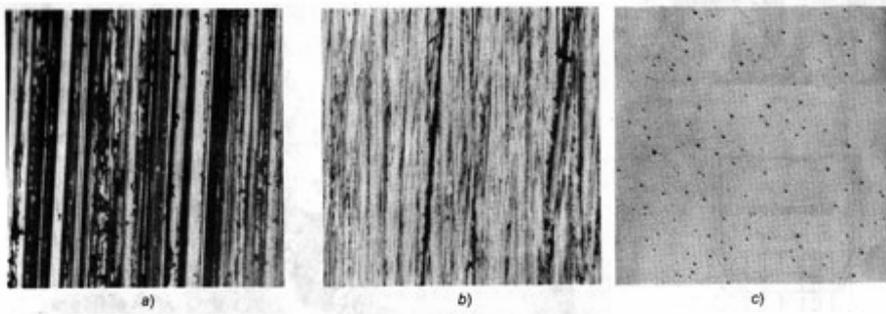
Se realiza apoyando la probeta sobre el papel de lija o de esmeril, colocado sobre una mesa plana o esmeriladora de banda fija. En esta fase se utilizan los papeles de lija número 320/340 y 400 o de esmeril número 1/0 y 2/0.

4.3.3 Desbaste final

Se realiza de la misma forma que los anteriores, con papel de lija número 600 ó de esmeril número 3/0. En todo caso, en cada fase del desbaste debe tomarse siempre en cuenta el sistema refrigerante. Cada vez que se cambie de papel, debe girarse 90 grados, en dirección perpendicular a la que se seguía con el papel de lija anterior, hasta que las rayas desaparezcan por completo. Se avanza y se facilita mucho las operaciones descritas utilizando una pulidora de discos, a las que se fija los papeles de lija adecuado en cada fase de la

operación. Las velocidades empleadas varían de 150 a 250 rpm. En otro caso se puede utilizar devastadoras fijas o de bandas giratorias.

Figura 29. Diferentes tipos de desbaste



Fuente: Sydney H. Avner. **Introducción a la Metalurgia Física**. Pág. 31

4.4 Pulido

4.4.1 Pulido fino

La última aproximación a una superficie plana libre de ralladuras se obtiene mediante una rueda giratoria húmeda cubierta con un paño cargado con partículas abrasivas seleccionadas en su tamaño, en éste sentido, existen muchos abrasivos, prefiriendo a gamma del óxido de aluminio para pulir metales ferrosos, los basados en cobre u óxido de cerio para pulir aluminio, magnesio y sus aleaciones. Otros abrasivos son la pasta de diamante, óxido de cromo y óxido de magnesio. La selección del paño para pulir depende del material que se va a pulir y el propósito del estudio metalográfico.

4.4.2 Pulido electrolítico

Es una alternativa de mejorar al pulido total pudiendo reemplazar al fino pero muy difícilmente al pulido intermedio. Se realiza colocando la muestra sobre el orificio de la superficie de un tanque que contiene la solución electrolítica previamente seleccionada, haciendo las veces de ánodo. Como cátodo se emplea un material inerte como platino, níquel, cromo, etc. Dentro del tanque hay unas aspas que contienen en constante agitación al líquido para que circule permanentemente por la superficie atacándola y puliéndola a la vez.

Deben controlarse el tiempo, el amperaje, el voltaje y la velocidad de rotación del electrolito para obtener un pulido satisfactorio. Muchas veces después de terminado este pulido la muestra queda con el ataque químico deseado para la observación en el microscopio.

4.5Ataque

Permite poner en evidencia la estructura del metal o aleación. Existen diversos métodos de ataque pero el más utilizado es el ataque químico.

El ataque químico puede hacerse sumergiendo la muestra con cara pulida hacia arriba en un reactivo adecuado, o pasar sobre la cara pulida un algodón embebido en dicho reactivo. Luego se lava la probeta con agua, se enjuaga con alcohol o éter y se seca en corriente de aire. El fundamento se basa en que el constituyente metalográfico de mayor velocidad de reacción se ataca más rápido y se verá más oscuro al microscopio, y el menos atacable permanecerá más brillante, reflejará más luz y se verá más brillante en el microscopio.

5. PRÁCTICAS DE METALOGRAFÍA

5.1 Práctica 1: Obtención de la probeta metalográfica y de la superficie durante el desbaste

El corte tiene por objeto separar una muestra representativa del total de la pieza. Es necesario efectuarlo con refrigeración para evitar calentamientos que puedan alterar la estructura de la superficie generada por el corte.

El desbaste de esa superficie se efectúa con papeles abrasivos. Estos están constituidos por un soporte de papel o tela sobre el que están pegados los granos de abrasión mediante una sustancia adherente adecuada.

Todo papel abrasivo se caracteriza principalmente por la composición y tamaño de sus granos, su porosidad o estructura, y por el grado de adherencia de los granos sobre el soporte.

Durante el desbaste de un metal mediante una tela o papel abrasivo se producen el desgaste de la superficie metálica y el arranque de algunos granos abrasivos. La eliminación de los granos desprendidos se favorece mediante corriente de agua. Además, en algunos tipos de aleación como las de aluminio, la corriente de agua evita el ennegrecimiento de la superficie. Por ello toda vez que en el desarrollo de estas prácticas haya que desbastar aluminio y sus aleaciones, deberá hacerse bajo corriente de agua o tener la precaución de

mojar los últimos papeles con una solución al 5 por ciento de parafina en *kerosene*.

5.1.1 Elementos de trabajo

- a) Plancha de vidrio de 20 X 40 cm aproximadamente. (véase figura 37 de los anexos)
- b) Papeles abrasivos “*HERMES*” o similar números (180, 400 y 600). (véase figura 37 de los anexos)
- c) Repasador, algodón y alcohol.
- d) Cortadora de metales o sierra, provistas de refrigeración.
- e) Microscopio metalográfico provisto de ocular 10x y objetivo 10x. (véase figura 39 de los anexos)
- f) Probeta de aluminio y cobre. (véase figura 35 de los anexos)

5.1.2 Técnica operatoria

Apoyar sobre la mesa de trabajo la plancha de vidrio y sobre ésta el papel abrasivo de grano más grueso. Tomar firmemente la probeta y apoyar la cara elegida sobre la superficie de papel abrasivo. Frotarla sobre éste arrastrándola longitudinalmente en un solo sentido, ejerciendo una presión suficiente como

para eliminar las marcas originales, cuidando de conservar la cara devastada, enjuagar ésta con alcohol y secarla con algodón.

Observar en el microscopio a 100x y dibujar en un papel el campo observado.

Repetir en el papel siguiendo la operación de desbaste ya descrita, con la probeta girada a 90° respecto de la dirección anterior mente usada. Lavar y secar como se dijo en la primera etapa. Las pasadas sobre el papel deberán seguirse hasta la descripción completa de las rayas dejadas por el papel anterior.

Observar a 100x y dibujar el campo observado.

Repetir esta sucesión de operaciones, siempre girando la probeta 90° respecto de la dirección anterior, en cada uno de los papeles hasta llegar al más fino.

Finalmente, comparar los diversos campos dibujados.

5.2 Práctica 2: Pulido mecánico de una probeta destinada a la observación microscópica

El pulido mecánico tiene por objeto eliminar las rayas e irregularidades producidas en el desbaste.

La forma de realizar el pulido es apoyando la cara desbastada de la probeta sobre un paño embebido con una suspensión de abrasivo y fijando a un disco que gira accionado por un motor.

Puede emplearse como paños, el paño de billar, el raso de seda natural, el terciopelo, etcétera.

Como abrasivo puede usarse una suspensión acuosa de alúmina, de óxido de cromo, de óxido de hierro, de óxido de magnesio, etc., o también, para materiales muy duros, una suspensión de polvo de diamante en aceite mineral. El tamaño de la partícula abrasiva en suspensión puede regularse mediante sedimentaciones y decantaciones adecuadas. En general, oscila entre poco más de 100μ y algunas décimas de micrón. Los discos pueden ser hechos de bronce, aluminio o acero inoxidable, con la cara superior perfectamente pulida. La velocidad de giro del disco oscila entre 250 y 500 r.p.m.

La presión a aplicar sobre la probeta depende de la dureza de la aleación y debe disminuirse a medida que avanza el pulido.

La combinación adecuada de todas estas variables permitirá alcanzar un grado de pulido óptimo, aunque difícilmente se logre evitar algo de distorsión. Para eliminar esta última no queda otro recurso que el de ataque y pulido alternados.

5.2.1 Elementos de trabajo

- a) Papeles abrasivos “*HERMES*” o similar números (180, 400 y 600).
- b) Máquina pulidora de velocidades de giro variables con discos inoxidables recubiertos con paño de billar.
- c) Suspensión acuosa de alúmina de 2 horas.
- d) Repasador, algodón y alcohol.

e) Microscopio metalográfico provisto de ocular de 10x y objetivo de 10x.

f) Probeta de aluminio y cobre.

5.2.2 Técnica operatoria

Cubrir el paño del disco con la suspensión de abrasivo y poner en marcha la pulidora.

Tomar finalmente la probeta y apoyar la cara ya desbastada sobre el paño, cuidando de que la cara a pulir esté perfectamente paralela al disco, con el objeto de evitar que la probeta se escape de la mano o que los bordes se redondeen.

La presión deberá ser tal que se logre hacer desaparecer en unos pocos minutos las rayas del último papel, cuidando de no excederse en la presión por el peligro de desgarramiento del paño.

Durante la operación de pulido la probeta deberá desplazarse en la dirección del radio, desde el borde hasta el centro del disco. La presión ejercida deberá ser ligeramente inferior aplicada durante la operación de desbaste.

Lavar la probeta en un chorro de agua caliente, secarla con la ayuda de un repasador sin tocar la cara pulida, enjuagar ésta con alcohol, secarla en corriente de aire seco o caliente, terminando el secado con algodón. Observar en el microscopio a 100x (se observa a esta distancia para poder visualizar si la cara de la probeta aun contiene rayas). Si persisten las rayas provenientes del desbaste en el último papel, continuar con el pulido de la forma ya descrita todo el tiempo que sea necesario para que éstas desaparezcan.

Las rayas más finas producidas por el paño durante el pulido y que se caracterizan porque su dirección está desplazada 90° respecto de las rayas provenientes del desbaste, así como también las “colas de cometa” generadas por las inclusiones dispersas en la matriz, deberán ser eliminadas prolongando pulido tanto como sea necesario, controlándolo microscópicamente.

5.3 Práctica 3: Pulido químico

El pulido químico es un procedimiento utilizado en laboratorios y fábricas para nivelar y abrillantar superficies de metales, especialmente aluminio, cobre y sus aleaciones.

El mecanismo de este procedimiento, realizado sin aplicación de potencial eléctrico, parece ser semejante al desarrollado en el procedimiento electrolítico.

Durante la aplicación del reactivo químico apropiado se forma sobre la superficie del metal una capa viscosa responsable de la nivelación de las crestas y valles producidos por los esmeriles.

El método para la realización de este procedimiento en un laboratorio se caracteriza por su simplicidad y economía, ya que sólo se necesita recipientes adecuados que contengan los reactivos, un dispositivo de calentamiento y termómetro.

El tiempo necesario para llegar al pulimento brillante dependerá del grado de terminación obtenido en el desbaste y puede oscilar entre pocos segundos a algunos minutos.

5.3.1 Elementos de trabajo

- a) Plancha de vidrio de 20 X 40 cm aproximadamente.
- b) Papeles abrasivos “*HERMES*” o similar números (180, 400 y 600).
- c) Vaso de precipitación de 300 ml.
- d) Fuente calórica.
- e) Termómetro de -10 a 200°C. (véase figura 38 en anexos).
- f) Reactivos (véase tabla X).
- g) Pinza con puntera de acero inoxidable.
- h) Probeta
 - Aluminio colado en coquilla. (véase figura 35 de los anexos).
 - Aluminio colado en arena. (véase figura 36 de los anexos).
 - Cobre colado en coquilla. (véase figura 35 de los anexos).
 - Bronce colado en arena. (véase figura 36 de los anexos).

5.3.2 Técnica operatoria

Desbastada, lavada y secada la muestra debe sumergirse en el baño a la temperatura indicada por el tiempo indicado. Extraer del recipiente la muestra, lavarla con abundante agua y secarla.

Tabla X. Reactivos para pulido químico

Metal	Composición del reactivo	Condiciones operativas
Aluminio	70 % ácido ortofosfórico (d:1.5) 15 % ácido acético 15 % agua.	Temperatura: 100 - 120°C. Tiempo: 2 - 6 min.
	70 - 90 % ácido ortofosfórico (d: 1.71). 25 - 5 % ácido sulfúrico (d: 1.84) 3 - 8 % ácido nítrico (d:1.50)	Temperatura: 85 - 110°C de acuerdo con la composición.
Cobre	55 % ácido ortofosfórico (d: 1.75) 25 % ácido acético. 25 % ácido nítrico (d:1.40)	Temperatura: 55 - 80°C Desbaste fino. Pocos segundos de ataque.

Fuente: Dr. Eduardo J. Dubox, **Prácticas de Metalografía**. Pág. 38.

5.4 Práctica 4: Ataque químico de probetas metalográficas

Mediante la observación microscópica de la probeta previamente pulida se permite reconocer la integridad y la presencia de inclusiones no metálicas dentro de la estructura cristalina macroscópica de la misma.

La estructura metalográfica completa sólo puede desarrollarse después de un ataque mediante un agente químico o electrolítico con un reactivo adecuado.

Mediante el ataque es posible poner de manifiesto la forma, el tamaño y el claroscuro o la coloración de cada uno de los constituyentes metalográficos contenidos en la estructura cristalina macroscópica observada.

El grado de ataque para una probeta dada es función de la composición y temperatura del reactivo y del tiempo de ataque.

5.4.1 Elementos de trabajo

- a) Plancha de vidrio de 20 X 40 cm aproximadamente.
- b) Papeles abrasivos “*HERMES*” o similar números (180, 400 y 600).
- c) Cristalizador, *beacker* de 100 ml y pinza de acero inoxidable.
- d) Reactivo: Solución alcohólica de ácido nítrico al 2 % en volumen (*Nital*).
- e) Microscopio metalográfico provisto de ocular 10x.
- f) Probeta de aluminio y cobre.

5.4.2 Técnica operatoria

Desengrasar con alcohol la cara a atacar de la probeta previamente pulida y secarla. Tomar la probeta con la pinza y sumergirla, con la superficie pulida hacia arriba, en el reactivo de ataque contenido en el cristalizador. Mantener la probeta durante un segundo sumergida, extraerla, lavarla con alcohol, secarla y observar al microscopio. Registrar el campo observado a distintos aumentos.

Repulir y repetir la operación descrita anteriormente manteniendo sucesivamente la probeta sumergida 2, 5, 10, 20, 40, y 80 segundos registrando el campo observado después de cada ataque. Establecer el tiempo óptimo de ataque.

5.5 Práctica 5: Observación microscópica de estructuras de metales puros

Los metales puros presentan una estructura monofásica que puede ser poliédrica, columnar, dentrada o celular, observándose frecuentemente algunas inclusiones dispersas en la matriz metálica.

El tamaño y forma de los granos de la matriz metálica como así también la composición, el grado de fraccionamiento y la distribución de las inclusiones no metálicas dependen de las condiciones originales de afino y colada del metal y del proceso posterior a la solidificación.

5.5.1 Elementos de trabajo

- a) Elementos para desbaste (véase práctica 1).
- b) Elementos para pulido mecánico (véase práctica 2).
- c) Reactivos:
 - 2 ml ácido nítrico y 100 ml de alcohol. (véase figura 38 de los anexos).

- 10 ml de amoníaco, 5 ml de agua oxigenada y 85 ml de agua (para Cu). (véase figura 38 de los anexos).
- 0.5 ml de ácido fluorhídrico y 99.5 ml de agua (para Al). (véase figura 38 de los anexos).

d) Microscopio metalográfico provisto de oculares 5x, 10x, 20x, 40x y 100x.

e) Probetas:

- Aluminio colado en coquilla.
- Aluminio colado en arena.
- Cobre colado en coquilla.
- Cobre colado en arena.

5.5.2 Técnica operatoria

Desbastar, pulir y atacar las probetas. Observar microscópicamente a diversos aumentos y registrar los campos examinados.

5.6 Práctica 6: Toma y proceso de una fotomicrografía

La fotomicrografía es la fotografía de un campo microscópico. Consiste en efectuar la toma mediante una cámara fotográfica acoplada al ocular del

microscopio, previa sustitución del ocular de visión directa por un ocular de proyección.

Impresionada la placa o película sensible con una exposición adecuada se revela para desarrollar la imagen latente, se fija, se lava y se seca. De este negativo se obtiene la copia positiva, la que a su vez debe someterse al mismo proceso para hacer visible y conservar la imagen.

5.6.1 Elementos de trabajo

- a) Placas fotográficas o película plana, ortocromáticas.
- b) Papel fotográfico para contacto, de alto contraste.
- c) Cuarto oscuro provisto de: luz roja, verde y amarilla; mesa de trabajo; copiadora; abrillantadora; guillotina; secador de placas; cubetas para baños; probetas de 500 ml; trípode, tela metálica y mechero; vasos de vidrio Pirex de 100 ml; termómetro de 0° a 100°C.
- d) Filtro verde para el microscopio.
- e) Baño revelador de negativos: Kodak D-61^a.

Agua a 50°C	500 ml
Metol	3.1 g
Sulfito de sodio	90 g
Bisulfito de sodio	2.11 g
Hidroquinona	5.9 g
Carbonato de sodio anhidro	11.5 g

Bromuro de potasio	1.7 g
Agua fría hasta	1000 ml

f) Baño revelador de papeles: Kodak D-76

Metol	8 g
Sulfito de sodio anhidro	400 g
Hidroquinona	20 g
Bórax	8 g
Agua fría hasta	1000 ml

g) Baño fijador: Kodak F-5

Agua a 50°C	600 cc
Tiosulfato de sodio	240 g
Sulfito de sodio anhidro	15 g
Ácido acético al 28 %	48 cc
Ácido bórico cristalizado	7.5 g
Alumbre de potasio	15 g
Agua fría hasta	1000 ml

h) Microscopio metalográfico provisto de ocular de proyección 10x, objetivos 10x, 40x, 100x y cámara fotográfica.

i) Probetas de aluminio y bronce debidamente desbastada, pulida y atacada.

5.6.2 Técnica operatoria

Ubicar la probeta pulida y atacada sobre la platina del microscopio y fijarla con la pinza de sujeción. Colocar en posición y ajustar convenientemente los diafragmas.

Enfocar la zona elegida de la probeta mediante el ocular auxiliar o directamente sobre vidrio despulido, con la lupa adecuada. Sustituir el vidrio despulido por el chasis cargado, evitando todo movimiento.

a) Obtención del negativo

Descubrir 1/5 de la placa a impresionar corriendo la tapa del chasis. Abrir el obturador durante 20 segundos y cerrarlo. Descubrir otro quinto de la placa a impresionar corriendo otro poco la tapa del chasis. Abrir nuevamente el obturador e impresionar otros 20 segundos. En esta forma el primer quinto de la placa habrá sido expuesto 40 segundos y el siguiente sólo 20 segundos.

Continuar el proceso hasta impresionar el último quinto de la placa.

Así pues tendremos 5 bandas de exposición decreciente (100, 80, 60, 40 y 20 segundos). Cerrar perfectamente el chasis, retirarlo de la cámara, llevarlo al cuarto oscuro, abrirlo a la luz roja y revelar la placa.

Sumergir ésta en la cubeta con agua con la superficie impresionada hacia arriba y agitarla hasta mojar completamente la gelatina. Pasarla en seguida a la cubeta que contiene el baño revelador a 18°C y mantenerla en este último durante 10 minutos y agitarlo cada minuto. Al cabo del tiempo indicado pasar a la cubeta con agua y

enjuagarla durante 10 segundos. Acto seguido introducirla en el baño fijador y dejarla durante 15 minutos. Extraer la placa y lavarla abundantemente con agua corriente durante 15 minutos.

Colocarla en el secador de placas al abrigo del polvo atmosférico.

En el caso de requerirse un secado más rápido puede enjuagarse con alcohol bajo un chorro de éste y secarse en las mismas condiciones.

De la observación de la placa por transparencia deducir la exposición óptima y obtener el negativo completo en esas condiciones, tomando en cuenta todas las precauciones indicadas más arriba.

b) Obtención de la copia

Colocar la placa en la copiadora con la gelatina hacia arriba y marginar.

Colocar sobre la placa una tira de papel de 6 X 3 cm. Aproximadamente, con la superficie sensible hacia abajo, cerrar la tapa cuidando de no mover el papel e impresionar durante 1 segundo. Sacar el papel de la copiadora y sumergirlo en el baño revelador de papeles a 18°C, durante el tiempo necesario para que se desarrolle la imagen latente (unos 90 segundos). Enjuagar en agua y pasar la copia al baño fijador. Repetir el copiado con nuevas tiras en cada caso dando los siguientes tiempos de exposición: 2, 4, 12, 18, y 30 segundos, revelándolas separadamente durante unos 90 segundos cada vez. Luego de reveladas las tiras pasarlas al baño fijador. Al cabo de unos 15 minutos encender la luz ambiente del cuarto oscuro y observando las tiras fijadas elegir el tiempo óptimo de impresión de la copia.

Obtener en esas condiciones la copia final y lavar esta última en abundante agua corriente durante no menos de 20 minutos.

Colocar la cara sensible de la copia escurrida sobre la placa de la abrillantadora perfectamente limpia y desengrasada.

Colocar un papel absorbente sobre la fotografía y con la ayuda de un rodillo de goma eliminar el agua excedente. Retirar el papel y calentar la placa cromada en la abrillantadora hasta que se desprenda la copia.

Una vez seca ésta, recortar los bordes con la guillotina.

6. COMPLEMENTOS

6.1 Complemento de la práctica 1

Ya que el examen metalográfico se hace sobre una muestra constituida por un trozo pequeño de metal (probeta), fácil resulta comprender la necesidad de que la muestra obtenida sea un fiel representante de la pieza, lo que significa decir que tenga las mismas discontinuidades físicas, los mismos constituyentes, en la misma concentración e igualmente distribuidos.

Las causas de la heterogeneidad del material son fundamentalmente las siguientes:

- a) Segregaciones al estado líquido debidas a diferencia de densidades de los componentes de la aleación.
- b) Segregaciones en el momento de la solidificación debidas al empobrecimiento de los cristales mixtos en el componente que baja el punto de fusión de la aleación.
- c) Modificaciones estructurales debidas a las velocidades locales distintas de enfriamiento.
- d) Modificaciones superficiales debidas a tratamientos térmicos aplicados con fines determinados o debidas a acciones fortuitas.

Cuando el examen tiene por objeto estudiar una partida de piezas que aún no han entrado en servicio, debe asegurarse que previamente que el lote de piezas corresponda a una misma colada y con iguales tratamientos térmicos. Asegurada esta condición conviene extraer probetas de las zonas extremas y medias de la pieza. Si las piezas tienen forma complicada conviene extraer probetas de las partes gruesas y finas. Si el material ha sido trabajado deben obtenerse probetas que permitan observaciones transversales y longitudinales.

En los materiales que han soportado tratamientos térmicos debe disponerse de probetas de la parte central y periférica para evidenciar si ha habido cambios superficiales, como por ejemplo descarburización de los aceros o pérdida de Zn de los latones. A veces conviene sacar probetas seriadas. Debe recordarse la estrecha relación que existe entre la estructura adquirida en un enfriamiento y el diseño de la pieza.

Cuando se persigue el estudio de segregaciones deberán extraerse probetas de distintas partes de una sección transversal, o mejor aún una probeta obtenida de un corte total de la sección. Algunos elementos son muy segregables, por lo que resulta muy irregular la distribución de ciertos constituyentes. Análogamente, las inclusiones no metálicas no siempre se distribuyen homogéneamente.

Cuando el examen metalográfico tiene por finalidad establecer la causa de una falla deben obtenerse probetas de la zona de rotura y de las zonas alejadas para poder comparar las estructuras.

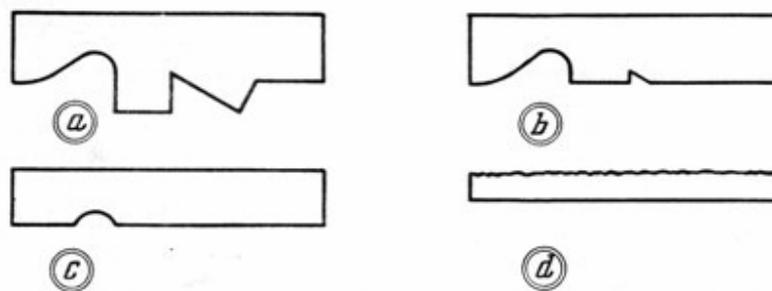
A veces una observación macroscópica previa enseña de dónde deben extraerse las probetas destinadas al examen microscópico.

Las observaciones de soldaduras exigen tomar muestras seccionadas que incluyen toda la soldadura y las zonas vecinas.

En todos los casos, de las mismas zonas de donde se extrajeron probetas para el examen metalográfico, deben extraerse muestras para el análisis químico, y debe adoptarse como norma no iniciar ningún examen metalográfico sin el previo conocimiento de la composición química real. Obtenida la muestra debe iniciarse el desbaste.

La acción del desbaste se explica admitiendo que los granos de abrasivo rayan el metal, comenzando el rayado en las partes elevadas de la superficie a desbastar. Como podremos observar en la figura siguiente.

Figura 30. Sucesivos estados del desbaste



Fuente: Dr. Eduardo J. Dubox, **Prácticas de Metalografía**. Pág. 158.

El uso de un nuevo papel abrasivo de menor tamaño de grano inicia la acción sobre las pequeñas crestas del estado (d).

La profundidad h de la raya dejada por un grano de abrasivo depende del diámetro de d del grano, de la dureza H de la probeta de la fuerza F con que el grano actúa sobre la superficie a pulir.

$$h = f(d.H.F)$$

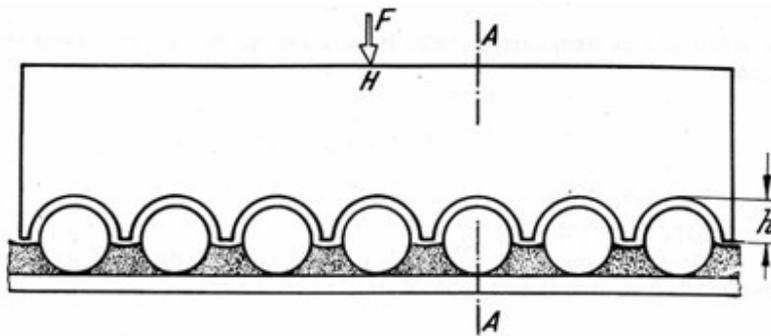
De la observación de esta expresión se comprende fácilmente que al comienzo de la operación F y d deben ser grandes para lograr un plano con rapidez y luego deben reducirse para disminuir el valor de h .

La figura 31 muestra esquemáticamente la acción abrasiva de los granos.

La intensidad de la acción abrasiva A queda medida por el volumen de materia que puede eliminar un grano al barrer una vez la probeta metálica. Este valor está dado por el volumen del segmento de cilindro grabado en el metal por el grano, y puesto que éste es igual al segmento de círculo seccional S por la longitud l de la raya resulta:

$$A = V = S \cdot l$$

Figura 31. Acción abrasiva de los granos



Fuente: Dr. Eduardo J. Dubox, **Prácticas de Metalografía**. Pág. 159.

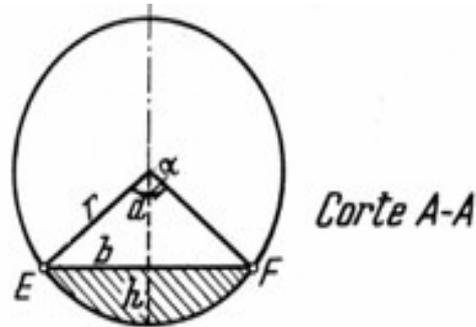
Por otra parte el segmento circular es igual a la superficie del sector correspondiente menos la superficie de triángulo cerrado por los radios y la cuerda del segmento, lo que significa decir:

$$A = \left(\frac{\pi r^2 \alpha}{360} - \frac{b \cdot a}{2} \right) l$$

La figura 32 nos permite deducir b y a

$$A = \left[\frac{\pi r^2 \alpha}{360} - \frac{\overline{EF}(r-h)}{2} \right] \cdot l$$

Figura 32. Deducción de b y a



Fuente: Dr. Eduardo J. Dubox, **Prácticas de Metalografía**. Pág. 159.

Si la acción de un grano se multiplica por el número de granos alineados que barren la probeta transversalmente (ya que los alineados longitudinalmente actúan sobre una misma raya), se tiene la acción de la superficie abrasiva sobre la probeta en una pasada:

$$N.A = N. \left[\frac{\pi r^2 \alpha}{360} - \frac{\overline{EF}(r-h)}{2} \right] . l$$

O mejor aún la sumatoria de todas las acciones, ya que no son exactamente iguales

$$\sum_{i=x}^{n=1} A = \sum_{i=x}^{n=1} \left[\frac{\pi r^2 \alpha}{360} - \frac{\overline{EF}(r-h)}{2} \right] . l$$

Si la acción abrasiva se multiplica por la densidad D del metal, se tiene la pérdida de peso experimentada por el metal en una pasada.

$$G = D \sum_{i=x}^{n=1} A = D \sum_{i=x}^{n=1} \left[\frac{\pi r^2 \alpha}{360} - \frac{\overline{EF}(r-h)}{2} \right] . l$$

En las sucesivas pasadas la acción abrasiva disminuye gradualmente, como lo prueba el hecho de que al cabo de un tiempo debe renovarse la superficie abrasiva.

Evidentemente, la acción abrasiva es una función decreciente continua respecto del número de pasadas, o sea del camino e recorrido por los granos. Por supuesto, no conocemos la forma de la función, pero, de cualquier modo ha de ser susceptible de derivarse respecto del camino barrido por los granos, luego:

$$A = f(e)$$

$$\frac{dA}{de} = \frac{df(e)}{de}$$

$$dA = f(e) \cdot de$$

O sea

$$A = \int_{e=0}^{e=x} f(e) \cdot de$$

Lo que significa decir que la acción abrasiva total de una superficie en función del uso viene dada por la integral definida entre los límites $e=0$ y $e=x$ de la función derivada de la función $f(e)$.

Las fotomicrografías de la práctica se muestran en las figuras 40, 41, 42, 43, 44, 45 de los anexos.

6.2 Complemento de la práctica 2

Cuando se realiza el pulido mecánico con paño humedecido en la suspensión de abrasivo, debe recordarse que el giro del disco en una misma dirección, orienta los defectos provenientes del arrastre, como son las colas de cometas dejadas por las inclusiones no metálicas. Esto se elimina rotando sobre sí misma la probeta.

El pulido debe prolongarse hasta que se han eliminado estas colas de cometa y las rayas dejadas en la matriz metálica por los papeles anteriores.

También conviene tener presente que mucho abrasivo húmedo en el paño puede producir depósito sobre algunos constituyentes no metálicos, alternando grandemente su imagen. En algunos casos se muestran inclusiones que durante el pulido han sido cubiertas por el abrasivo del paño, parcial y totalmente. También se puede presentar una inclusión limpia, que es la consecuencia de un pulido correcto. Por otra parte, conviene recordad que un paño muy seco raya la superficie pulida.

Si el lecho del paño es relativamente blando, como sucede cuando se usan un doble o triple paño, se puede lograr en algunas estructuras el pulido en relieve y en otras la conservación de fases fácilmente arrancables.

Las fotomicrografías de la práctica se muestran en las figuras 46, 47, 48, 49, 50, 51 de los anexos.

6.3 Complemento de la práctica 3 y 4

El ataque es un fenómeno selectivo consecuente de las diferencias en la reactividad química que presentan los distintos constituyentes de una estructura química específica respecto a los reactivos utilizados.

También se observa diferencia en la reactividad dentro de una misma matriz metálica, ya que se observa el ataque comienza en los límites de grano. La explicación de este hecho se encuentra en la cristalización de los metales. Debe recordarse que el crecimiento de los granos se hace radialmente y termina en los granos adyacentes (con sus vecinos). Como consecuencia de esto los últimos átomos que entran en el enlace metálico de un grano son los periféricos y por tanto sus posiciones finales están perturbadas por las posiciones de los átomos periféricos de sus granos vecinos. Esto trae apareada una distorsión del arreglo cristalográfico en las zonas limítrofes, que se traduce en una alteración de las distancias críticas interatómicas. Estas variaciones en los parámetros cristalinos, se ponen de manifiesto por un incremento de la energía en las zonas limítrofes, y es este aumento de energía, el que aumenta la reactividad frente al reactivo químico. El resultado de esta reactividad es la aparición de líneas oscuras rodeando los granos.

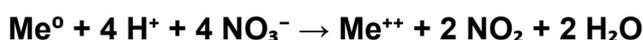
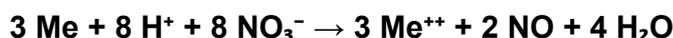
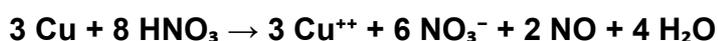
Cuando el ataque se prolonga suelen producirse en los metales puros o en las soluciones sólidas, huecos de formas geométricas definidas. Son las llamadas figuras de corrosión y ellas responden a la forma del retículo y a la orientación del grano respecto del plano de pulido.

Se ha dicho que el ataque químico sobre los diversos constituyentes es selectivo. Por esta razón unas fases reaccionan con unos reactivos y otras con otros.

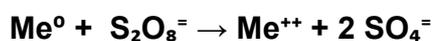
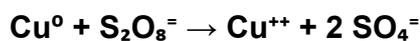
En general, los metales libres o en solución (como solventes o solutos) o formando parte de fases, son atacados por ácidos no oxidantes u oxidantes, cediendo electrones y pasando al estado iónico.

A continuación se darán algunos pocos ejemplos con el objeto de entender mejor lo que pasa cuando un reactivo actúa sobre un metal:

La acción del ácido nítrico sobre el cobre se hace en dos formas, según el ácido sea diluido o concentrado, obteniéndose las siguientes reacciones químicas del ataque al metal en medio ácido:



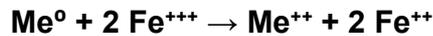
El reactivo persulfato sobre el cobre genera sulfato férrico:



Por su parte, la mezcla amoníaco-agua oxigenada da:



Cuando el cobre se ataca con cloruro férrico se genera:



Las fotomicrografías de la práctica se muestran en las figuras 52, 53, 54, 55, 56, 57 de los anexos.

6.4 Complemento de la práctica 5

La solidificación de un metal se inicia cuando se forma el primer embrión. En general estos embriones tienen forma esquelética llamada dendrita. En la etapa posterior se produce el crecimiento del embrión o sea de la dendrita inicial.

Durante el crecimiento el eje central de la dendrita y sus ramas laterales se alargan y se engrosan reduciéndose los espacios comprendidos entre dichas ramas. Finalmente estos espacios también solidifican siguiendo la geometría de la dendrita. Si el metal es realmente puro las últimas porciones solidificadas en estos espacios tienen la misma composición que la dendrita inicial, y por lo tanto la misma reactividad química ante el reactivo usado en el ataque, lo cual significa decir que el grano final se presentará como un polígono homogéneo al microscopio. Pero, si el metal tiene algunas impurezas, éstas, cumpliendo con las condiciones de equilibrio de la solidificación, se concentrarán en las últimas porciones líquidas que son los espacios comprendidos entre las ramas de una misma dendrita y entre dendritas distintas; esta diferencia en la composición está aparejada con una reactividad distinta frente al reactivo químico de ataque y en consecuencia el grano final visto al microscopio muestra heterogeneidad entre las dendritas y los espacios interdendríticos. Así pues, la visualización de

la dendrita mediante el reactivo de ataque es una consecuencia de la heterogeneidad química, en tanto que la visualización del límite de grano es una consecuencia de la heterogeneidad física.

En la práctica la obtención de metales realmente puros es difícil, por lo cual casi siempre se produce enriquecimientos interdendríticos que terminan visualizando las dendritas.

No siempre los embriones tienen forma dendrítica, pueden ser no dendríticos y en tal caso crece mediante superficies de interface continuas y suaves. Para que el crecimiento del núcleo se realice en forma dendrítica se requiere la existencia de un sobre enfriamiento parece ser que no hay formación de dendritas.

La dirección de crecimiento está relacionada con las características cristalográficas.

Además, sólo una parte del metal líquido solidifica dendríticamente; el resto lo hace radialmente.

A veces los granos de algunos metales crecen en forma tal que la superficie de avance (interface generada en la decantación) muestra una estructura celular. Para determinar gradientes de sobre enfriamiento se ha podido observar también una estructura que reúne las características de las células y de las dendritas y recibe el nombre de estructura celular dendrítica.

Las fotomicrografías de la práctica se muestran en las figuras 58, 59, 60, 61 de los anexos.

6.5 Complemento de la práctica 6

Todo lo visto en el microscopio puede registrarse mediante la fotomicrografía. Esta es el registro de un campo microscópico. La fotomicrografía metalográfica no es más que un caso particular de la fotomicrografía general, y puesto que ésta, a su vez, no es más que un caso particular de la fotografía, conviene tratar el tema con la amplitud inherente al proceso fotográfico.

El proceso fotográfico se inicia con la elección de un material sensible a la radiación a usar, capaz de grabar la imagen de un objeto. Elegido el material sensible, sólo basta ponerlo frente al objeto iluminado, donde pueda recibir las radiaciones reflejadas o refractadas, operación denominada “Toma de la Fotografía”. La toma de la fotografía se hace mediante cajas especiales llamadas “Cámaras Fotográficas”. Con una exposición adecuada que depende de varios factores (radiación iluminante, pulimento o transparencia del objeto, sensibilidad del material sensible, etc.), se obtiene sobre el material sensible una imagen invisible del objeto, conocida con el nombre de “Imagen Latente”. Esta imagen se visualiza mediante un proceso denominado “Revelado” obteniéndose una imagen invertida respecto del clarooscuro del objeto, llamada “Negativo”. Después de revelado el negativo es sometido a un nuevo proceso destinado a conservar la imagen en el curso del tiempo; este tratamiento recibe el nombre de “Fijado”. Una vez fijado el negativo se lava y seca y luego debe ser transformado en “Positivo” o “Diapositivo” para que esté de acuerdo con el clarooscuro del objeto. El diapositivo se diferencia del positivo en que debe ser observado por transparencia. Si el positivo o diapositivo obtenido es de igual tamaño que el negativo se llama “Copia”; si es de mayor superficie se llama “Ampliación” y si es de mayor tamaño se llama “Microfotografía”. Los positivos o

diapositivos se obtienen impresionando por contacto en una caja iluminada llamada "Copiadora". Las ampliaciones se obtienen con instalaciones denominadas "Amplificadoras". Análogamente al caso de los negativos, los positivos o diapositivos deben revelarse, fijarse y lavarse. Cuando el objeto a fotografiar es un campo microscópico, como sucede en microscopía de metales, la fotografía obtenida recibe el nombre de "fotomicrografía".

La acción fotoquímica **A** sobre un material sensible es proporcional al flujo ϕ luminosos y al tiempo **t** que dura la exposición:

$$A = K \phi t \qquad \phi \cdot t = E \text{ (exposición)}$$

K es la acción producida por la unidad de flujo y en la unidad de tiempo.

El tiempo **t** que debe exponerse una placa o película para una muestra metálica dada, depende de la intensidad de luz, de la longitud de onda de la radiación, del aumento total usado y de la sensibilidad del material fotográfico.

La intensidad del flujo para una misma fuente luminosa está medida por el diámetro **d** del diafragma y la experiencia prueba que los tiempos de exposición son inversamente proporcionales a los cuadrados de los diámetros de los diafragmas:

$$t \cdot d^2 = t' \cdot d'^2$$

El tiempo es una función inversa de la frecuencia **v** de la onda luminosa.

$$t = f \left(\frac{1}{v} \right)$$

Los tiempos usados son directamente proporcionales a los cuadrados de los aumentos empleados

$$\frac{t}{t'} = \frac{G^2}{G'^2}$$

Los materiales fotográficos usados suelen ser placas, filmes planos o película en carretes, orto o pancromáticas, de sensibilidad no inferior a 27° *Sheiner*, de grano fino o extrafino y capaz de resolver más de 35 líneas/cm. El contraste se evalúa por la pendiente y de la curva característica. Para entender este concepto conviene empezar diciendo que el ennegrecimiento de un material sensible expuesto a una dada radiación se mide haciendo incidir sobre la placa, previamente ennegrecida, un haz de luz de intensidad l_i .

Cada capa de grano de la emulsión ennegrecido por la acción de la luz deja pasar $\frac{1}{a}$ de la luz incidente l_i . Luego la luz emergente le será:

$$l_e = l_i \frac{1}{a}$$

Si n es el número de capas de la emulsión será:

$$l_e = l_i \frac{1}{a^n} = \frac{l_i}{a^n}$$

De donde:

$$a^n = \frac{l_i}{l_e}$$

Esta relación se llama opacidad. Aplicando logaritmos:

$$n \cdot \log a = \log \frac{l_i}{l_e}$$

Como a es muy pequeño puede hacerse:

$$n = \log \frac{l_i}{l_e} = D$$

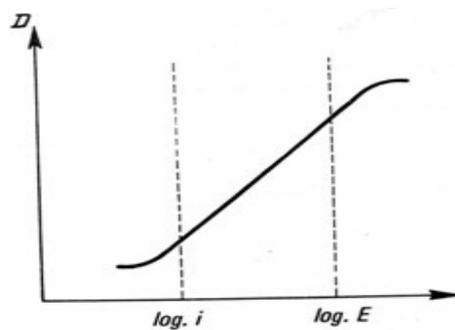
Este logaritmo se la opacidad se llama densidad (D).

Puesto que la relación $\frac{K}{I_e}$ es una función de la negrura de la capa de bromuro y la negrura de la capa depende de la exposición, resulta:

$$D = f(E)$$

La curva de la densidad trazada en función del tiempo de exposición es del tipo de la mostrada en la figura siguiente.

Figura 33. Curva de la densidad trazada en función del tiempo de exposición



Fuente: Dr. Eduardo J. Dubox, **Prácticas de Metalografía**. Pág. 183.

En la parte recta de la curva

$$D = (\log E - \log i) \gamma$$

Donde γ es la pendiente de la curva, o sea es el factor de ennegrecimiento por unidad de exposición; i es una constante que mide la exposición mínima para la cual D empieza a ser función lineal de E .

El $\log i$ es una medida de la sensibilidad de la emulsión. La conclusión que debe extraerse de estas consideraciones es que, para tener proporcionalidad entre la densidad y la exposición, debe trabajarse en la parte recta de la curva.

La imagen latente obtenida sobre la placa está constituida por bromuro de plata activado que es descompuesto por el revelador **R** dando plata y un derivado bromado del revelador, que luego sufre un óxido-reducción:

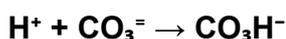


Como revelador pueden servir muchas sustancias reductoras; las sustancias orgánicas de fórmula:



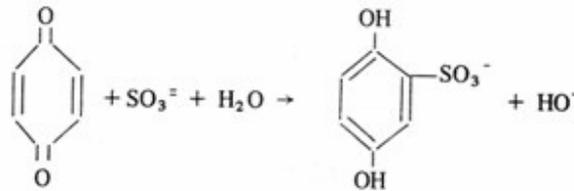
Son todas reveladoras. El corchete indica dobles ligaduras, **n** es el número de dobles ligaduras y **X y X'** son radicales, los que pueden estar en posición orto o para. Estos radicales son **-OH** o **-NH₂** con hidrógenos sustituidos parcial o totalmente por **-CH₃**, **-C₂H₅** o **-CH₂-COOH**.

El *p*-metilaminobenceno (metol o elón) y el *p*-hidroxibenceno (hidroquinona) son los reveladores más usados en la práctica. Toda solución reveladora incluye además del reductor un álcali (carbonato sódico o tetraborato sódico) destinado a neutralizar la acidez generada durante el revelado, manteniendo aproximadamente constante a la concentración hidrogeniónica. También tiene un estabilizador (sulfito o bisulfito sódico) destinado a neutralizar la acción del revelado oxidado dando derivados sulfonados. La acción del carbonato sódico puede representarse así:



Y la acción del sulfito en la siguiente forma como se representa en la figura Siguiente.

Figura 34. Acción del sulfito



Fuente: Dr. Eduardo J. Dubox, **Prácticas de Metalografía**. Pág. 184.

Finalmente todo baño revelador lleva algo de bromuro de potasio con el objetivo de retardar la aparición del velo y aumentar el contraste, ya que activa la revelación en las zonas más expuestas a la luz y la retarda en las menos expuestas.

El fijado de la placa consiste en disolver el halogenuro de plata no expuesto a la luz, pues de lo contrario se ennegrecería en el ambiente. El fijador más comúnmente usado es el Tiosulfato sódico y su acción puede representarse así:



Si la solución es poco concentrada y no se agita bien pueden producirse manchas sobre los negativos debido a la formación del complejo amarillo más pobre en ion Tiosulfato $\text{S}_2\text{O}_3\text{Ag}_2 \cdot 2 \text{S}_2\text{O}_3^{2-}$.

La composición de los baños reveladores y fijadores así como también la temperatura de trabajo y el tiempo de procesado deben ser los indicados por los fabricantes de los materiales sensibles.

CONCLUSIONES

1. Con la ayuda de esta guía de prácticas de laboratorio, el estudiante podrá comprender mejor las técnicas y los procedimientos de cómo se ataca una probeta metalográfica.
2. Con este estudio, el estudiante tendrá una visión clara para observar las estructuras del aluminio y el cobre por medio de una probeta, tomando en cuenta que para que una probeta se pueda observar bien en el microscopio debe estar bien pulida.
3. Al utilizar el microscopio óptico, el estudiante podrá observar de una mejor forma todas las estructuras que se presentan por medio de sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, como también de las estructuras que se forman debido a un tratamiento térmico.
4. La presente guía de prácticas de laboratorio, ayudará al estudiante a diferenciar una fotografía tomada a través de un microscopio que se llama fotomicrografía, términos que no deben confundirse con microfotografía, que se refiere a la reproducción de documentos en película de pequeño formato.

RECOMENDACIONES

1. Para realizar una buena observación microscópica de la probeta es muy importante la correcta preparación de esta, ya que de no hacerse correctamente, no se podrá observar bien la estructura de la probeta a ensayar.
2. Cuando use la máquina pulidora, mantenga la probeta firmemente, ya que si no lo hace podría ocurrir: que la probeta se golpearía y llegaría a estropearse, al tratar de atrapar la probeta que ha soltado, arruinaría el paño de la pulidora.
3. No se debe olvidar nunca usar guantes, mascarilla y pinzas cuando se esté trabajando en las prácticas de pulido y ataque químico así retirar la probeta del reactivo con toda confianza.
4. Cuando se realice el ataque y pulido químico de la probeta, es muy importante no exponerla demasiado tiempo al reactivo, ya que este puede provocar que la cara pulida se quemara u opaque demasiado, y de esta forma no se observe la estructura.

BIBLIOGRAFÍA

1. Avne, Sydney H. **Introducción a la Metalurgia Física.** (2ª Edición, 1988).
2. Donald R Askeland. **La ciencia e ingeniería de los materiales.** (3ª Edición, México: Editorial International Thomson, 1998).
3. Dubox, Eduardo J. **Prácticas de Metalografía.** (1ª Edición, Argentina: Ediciones Marymar, 1974).
4. Guy, Albert G. **Metalurgia Física para Ingenieros.** (única edición, 1965).
5. Hilly, C. Chaussin. **Metalurgia, Elaboración de los Metales.** (7ma. Edición, España: Editorial Urmo, 1975).
6. Kazanas H.C, Baker, Glenn E. Gregor, Thomas G. **Procesos básicos de manufactura.** (1ª Edición, México: Editorial McGraw-Hill, 1983).
7. Keyser, Carl A. **Técnicas de laboratorio para pruebas de materiales.** (México: Editorial Limusa, 1972).
8. Lasheras Esteban, José M. Sanchez-Marin Pizarro José M. **Tecnología de los Materiales Industriales.** (4ª Edición, España: Editorial Cedel, 1974).
9. Pinner S. Wernick. **Acabados y tratamientos superficiales del aluminio y sus aleaciones.** (España: Editorial River, 1966).

10. web.fi.uba.ar/~jmoya/Metalografia..., enero 2009.
11. www.mailxmail.com/b/metalografia%2Dde%2Dmetales%2Dno%2Dferrosos, enero 2009.
12. www.mty.itesm.mx/dia/deptos/im/m0..., marzo 2009.

ANEXOS

Figura 35. Probetas de Al y Cu colado en coquilla



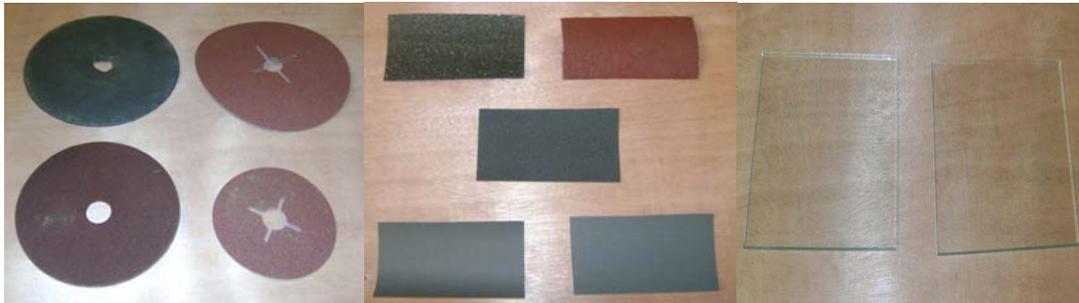
Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 36. Probetas de Al y Cu colado en arena



Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 37. Discos abrasivos, papeles abrasivos y planchas de vidrio



Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 38. Reactivos químicos, pinzas y termómetro de 400 °C



Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Tabla XI. Reactivos para desarrollo de estructuras

Material	Reactivo
Aluminio	Ácido Fluorhídrico
Cobre	Persulfato Amónico
Bronce	Cloruro Ferrico

Fuente. Dr. Eduardo J. Dubox, **Prácticas de Metalografía**. Pág. 242

Figura 39. Microscopio Óptico



Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Tabla XII. Temperaturas aproximadas de recristalización para varios metales y aleaciones

Material	Temperatura de Recristalización, °F
Cobre (99.999%)	250
Cobre, 5% de Zinc	600
Cobre, 5% de Aluminio	550
Cobre, 2% de Berilio	700
Aluminio (99.999%)	175
Aluminio (99.0%+)	550
Aleaciones al Aluminio	600

Fuente. Sydney H. Avner. **Introducción a la Metalurgia Física**. Pág. 142.

Tabla XIII. Reactivos de ataque para examen microscópico

Material	Reactivo
Aluminio	Ácido Hidrofluórico
Cobre	Hidróxido de Amonio Peróxido de hidrógeno

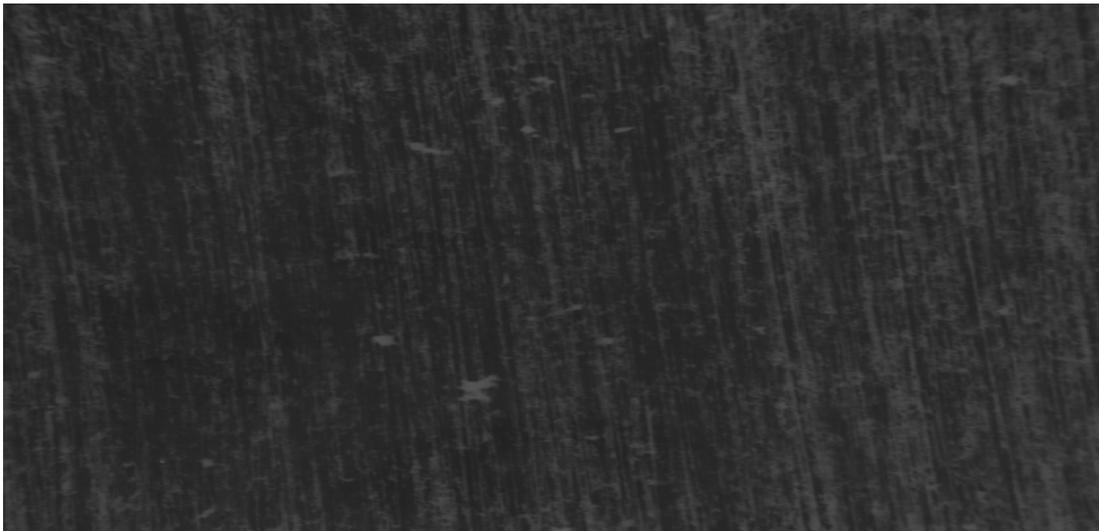
Fuente. Sydney H. Avner. **Introducción a la Metalurgia Física**. Pág. 34 – 35.

Figura 40. Fotomicrografía de probeta de Al con abrasivo # 180 pulido manual



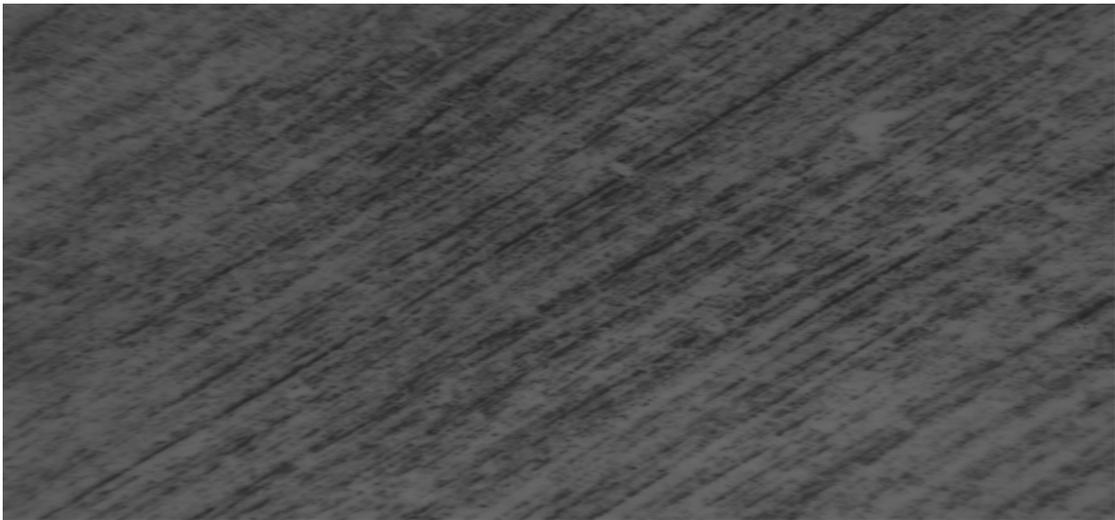
Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 41. Fotomicrografía de probeta de Al con abrasivo # 400 pulido manual



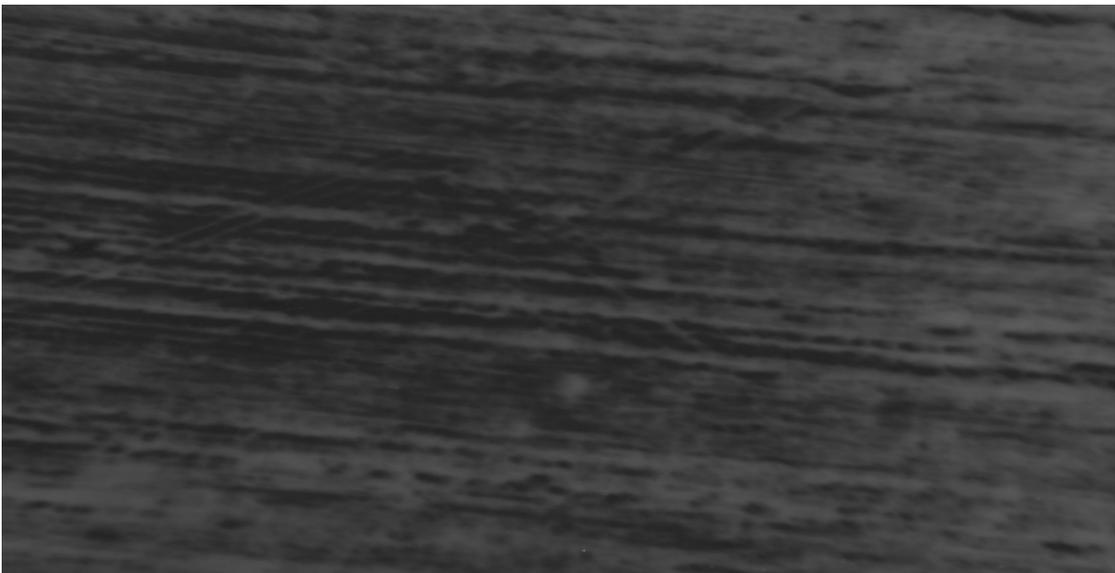
Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 42. Fotomicrografía de probeta de Al con abrasivo # 600 pulido manual



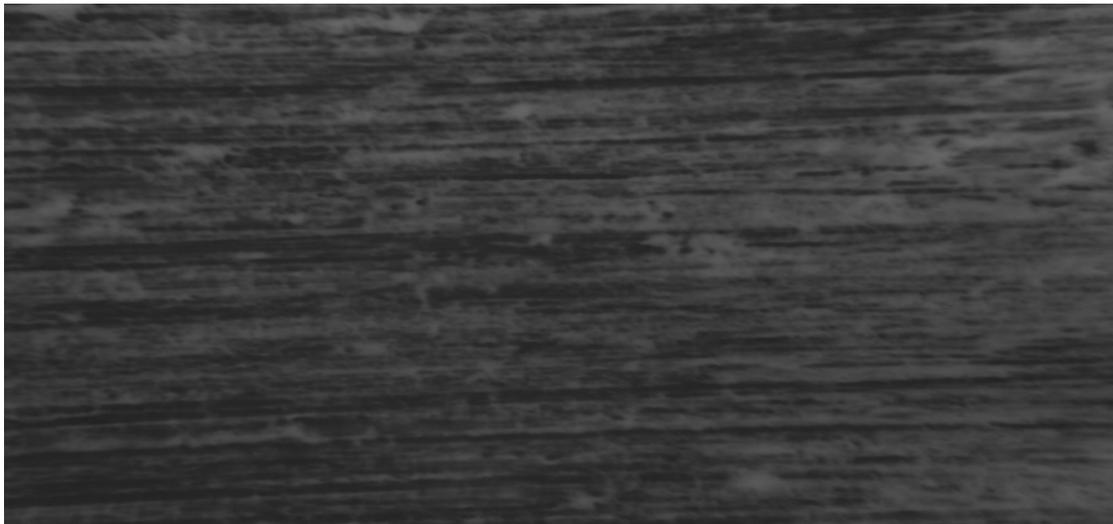
Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 43. Fotomicrografía de probeta de Cu con abrasivo # 180 pulido manual



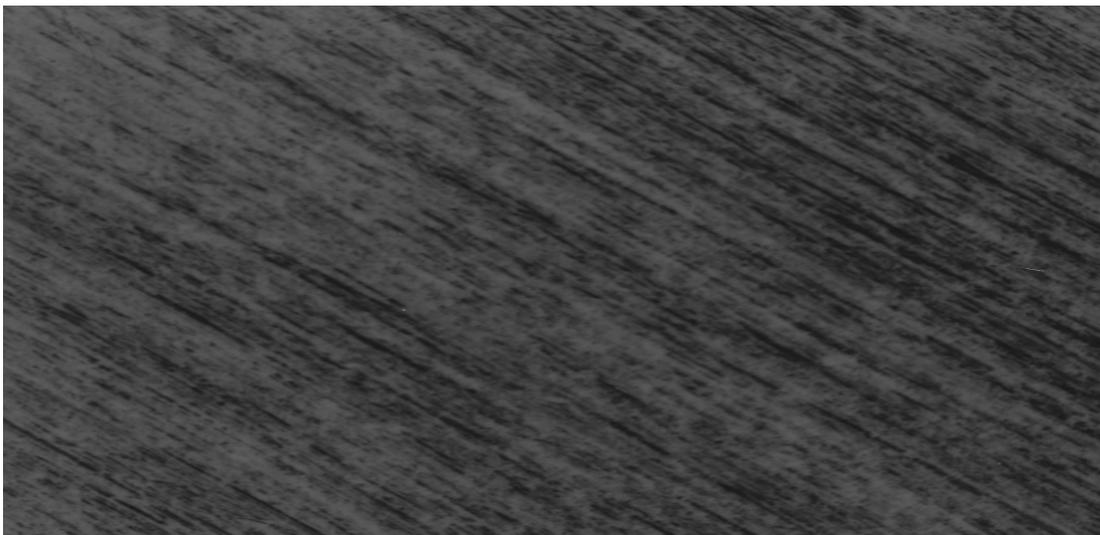
Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 44. Fotomicrografía de probeta de Cu con abrasivo # 400 pulido manual



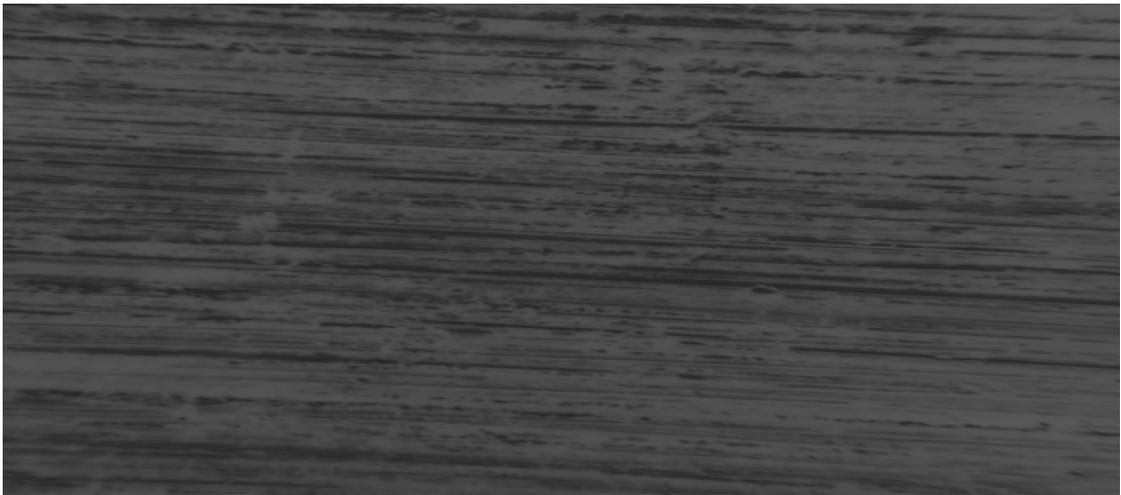
Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 45. Fotomicrografía de probeta de Cu con abrasivo # 600 pulido manual



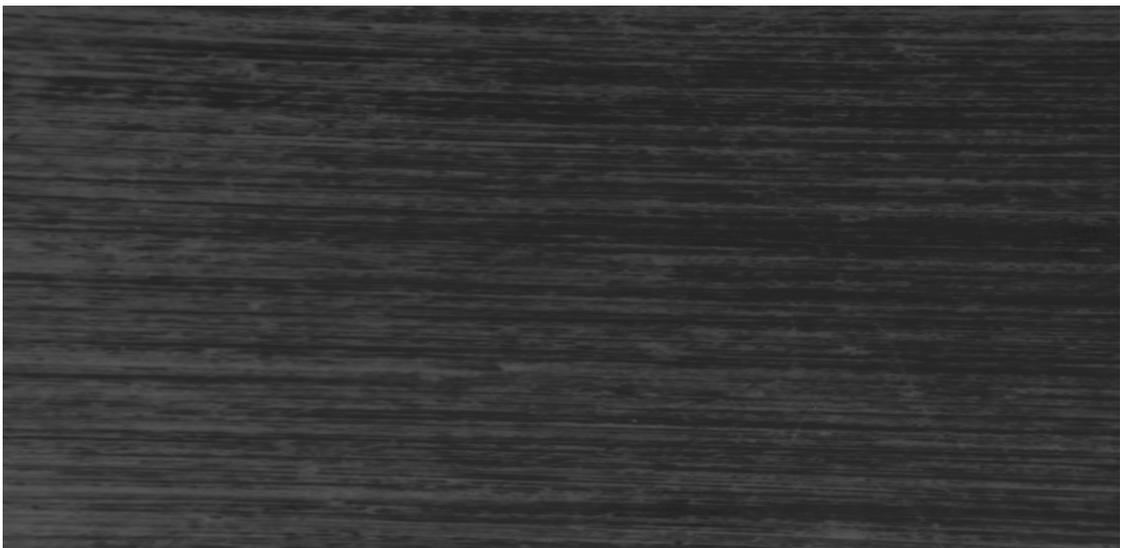
Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 46. Fotomicrografía de probeta de Al con abrasivo # 180 pulido mecánico



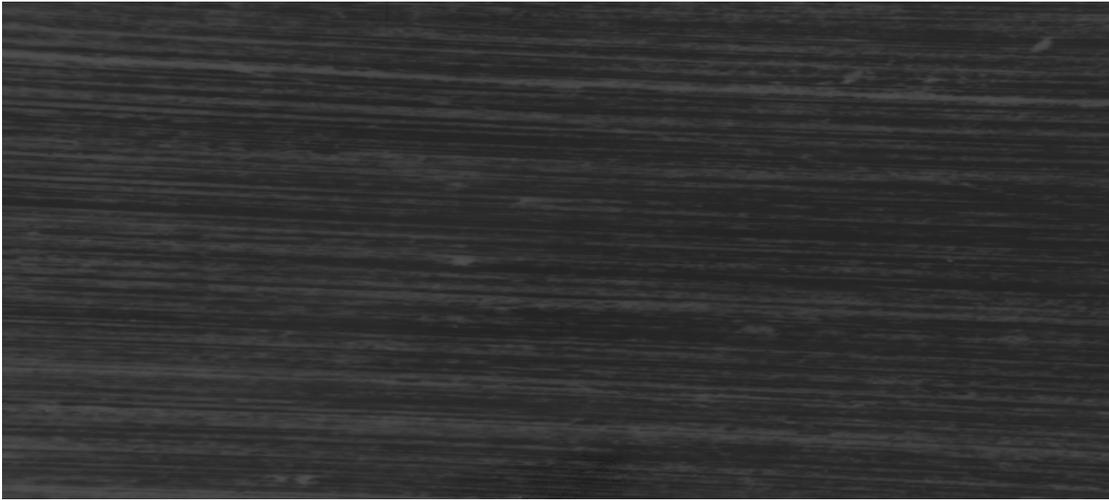
Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 47. Fotomicrografía de probeta de Al con abrasivo # 400 pulido mecánico



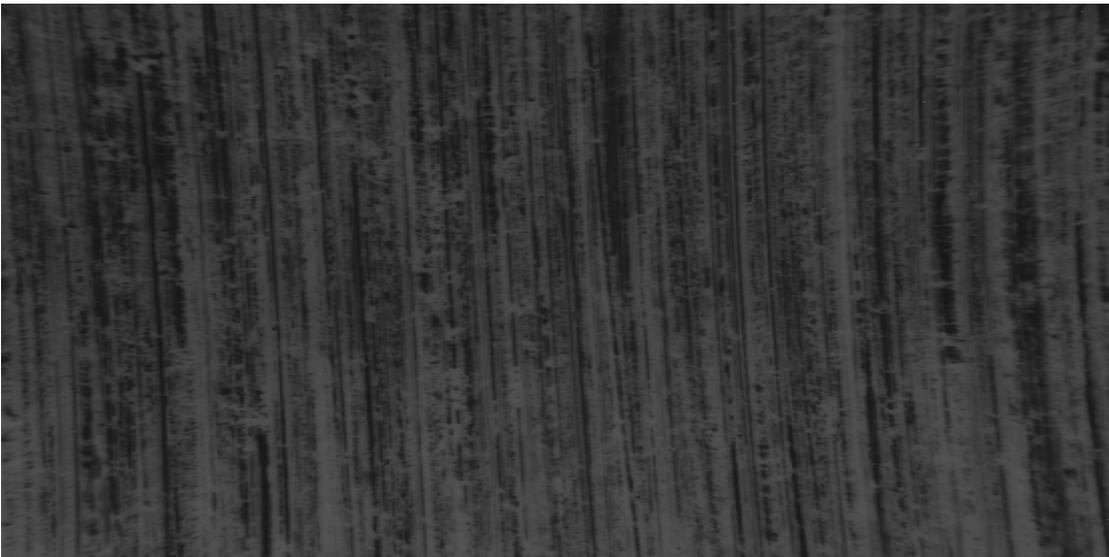
Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 48. Fotomicrografía de probeta de Al con abrasivo # 600 pulido mecánico



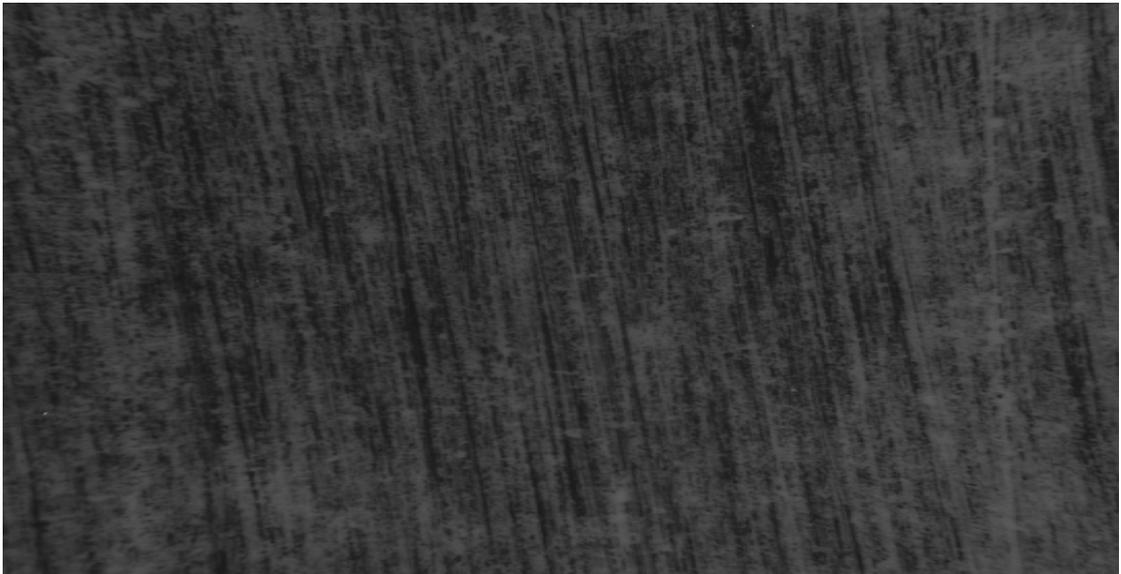
Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 49. Fotomicrografía de probeta de Cu con abrasivo # 180 pulido mecánico



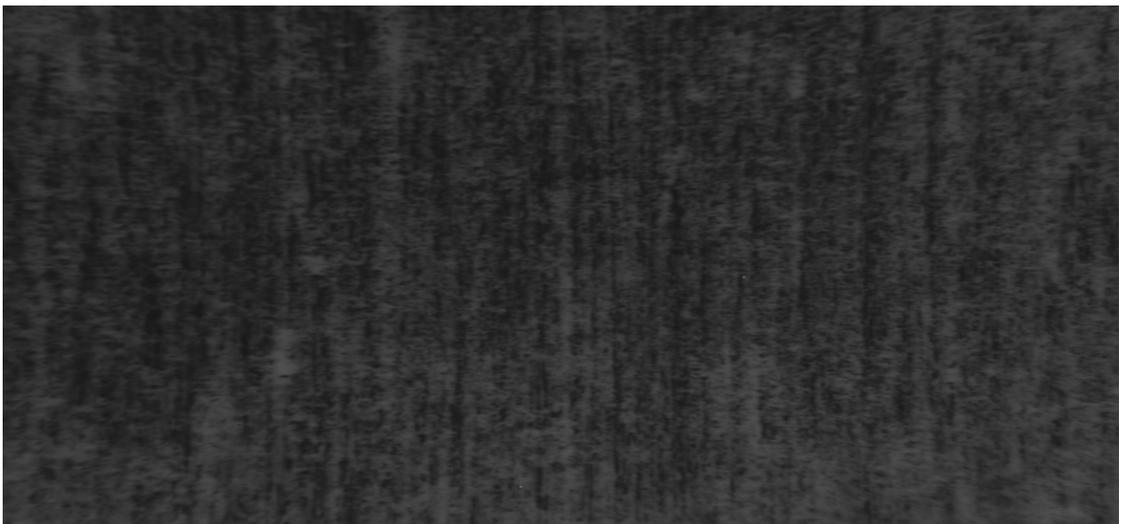
Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 50. Fotomicrografía de probeta de Cu con abrasivo # 400 pulido mecánico



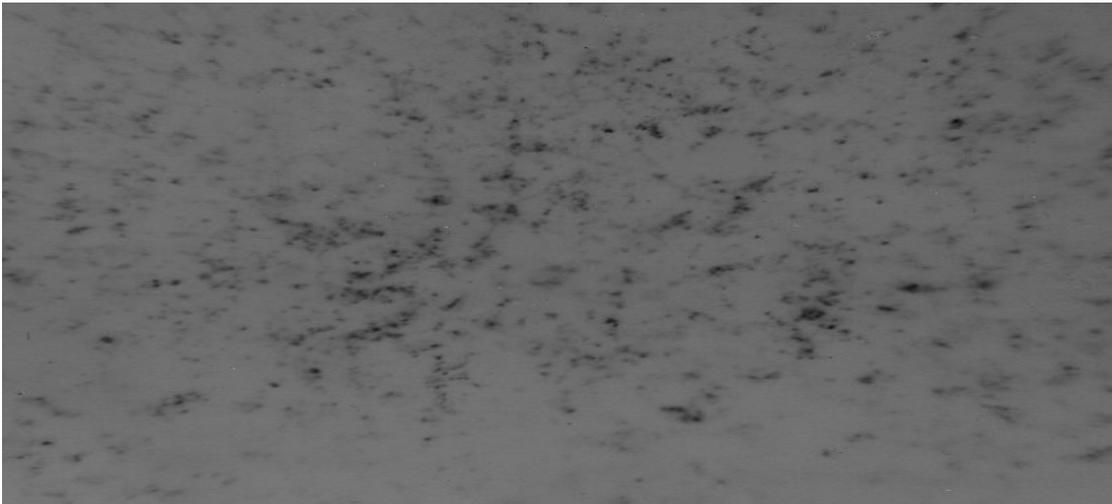
Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 51. Fotomicrografía de probeta de Cu con abrasivo # 600 pulido mecánico



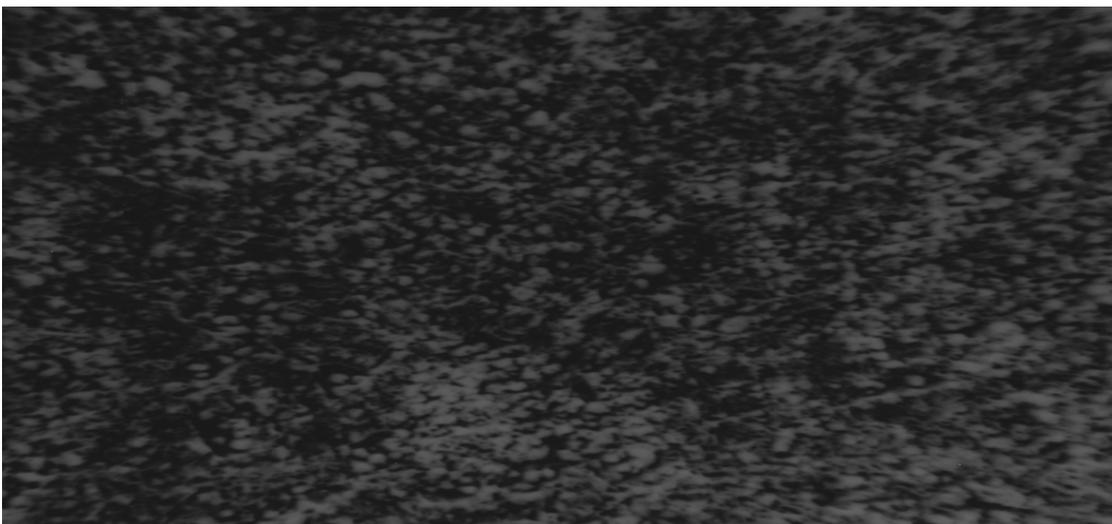
Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 52. Fotomicrografía de probeta de Al pulido químico colado en coquilla



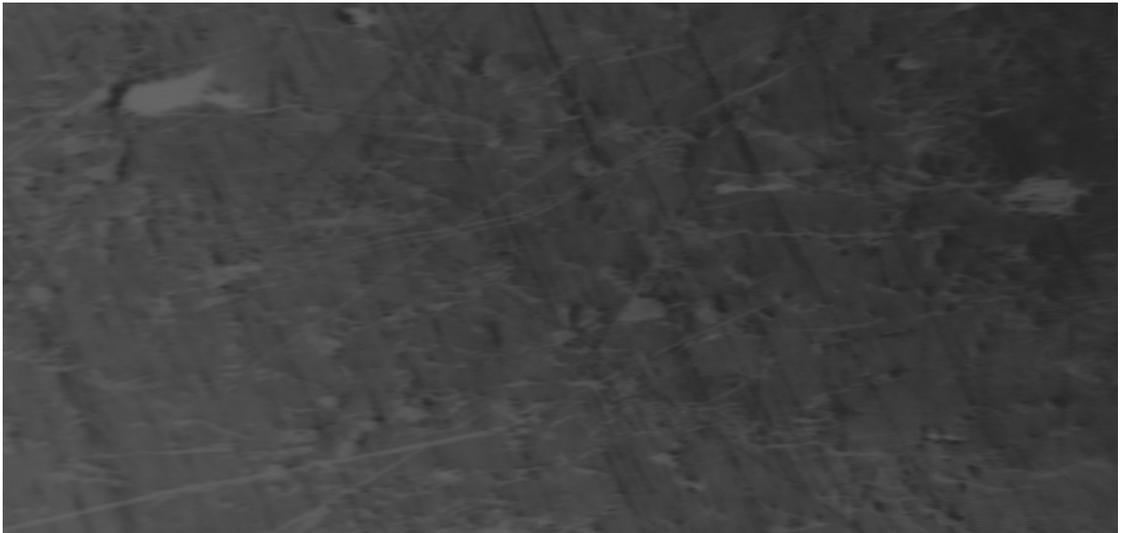
Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 53. Fotomicrografía de probeta de Cu pulido químico colado en coquilla



Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 54. Fotomicrografía de probeta de Al pulido químico, colada en arena



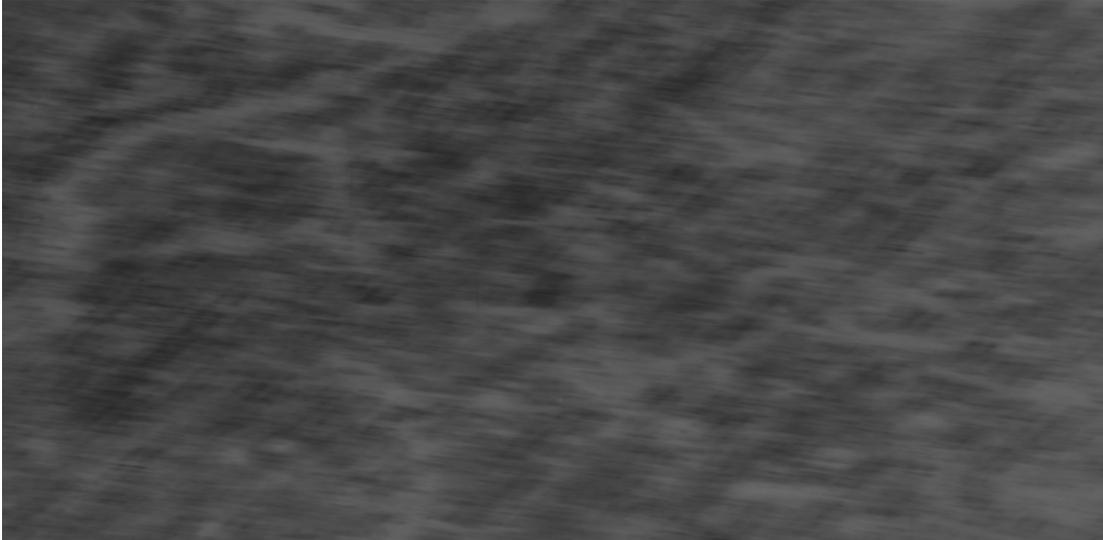
Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 55. Fotomicrografía de probeta de Cu pulido químico, colada en arena



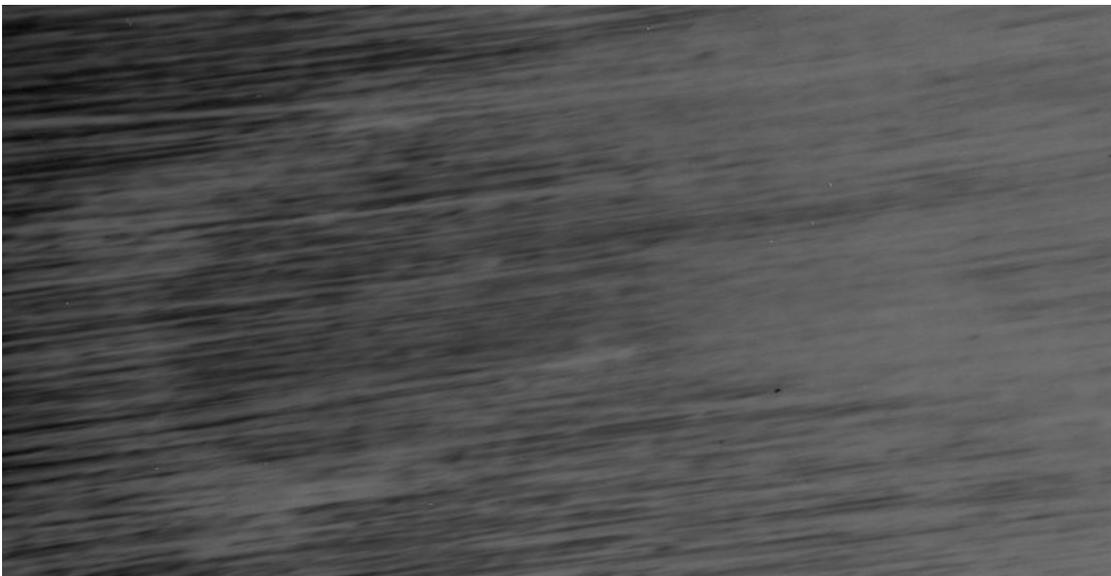
Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 56. Fotomicrografía de probeta de Al ataque químico



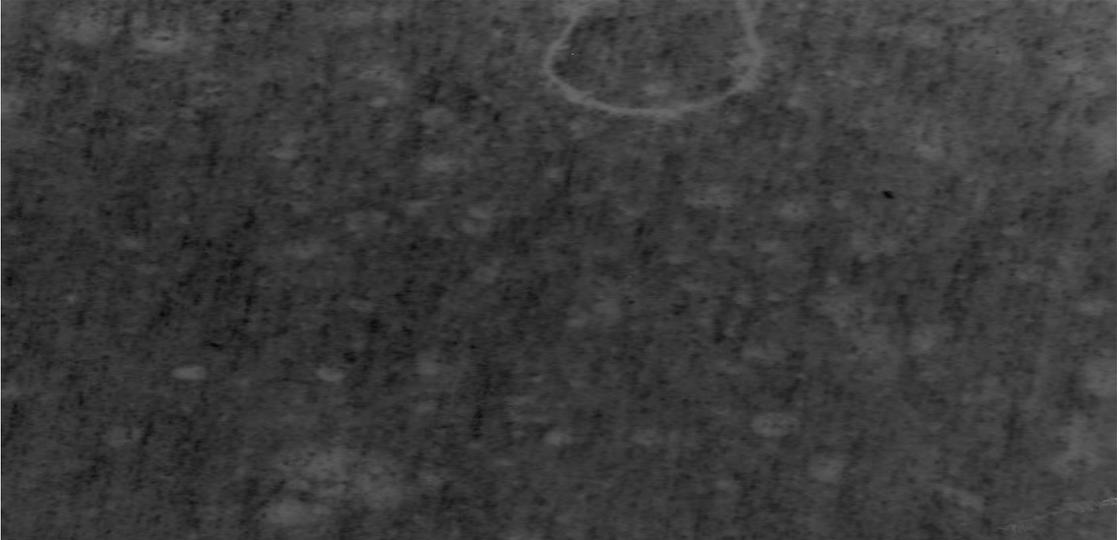
Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 57. Fotomicrografía de probeta de Cu ataque químico



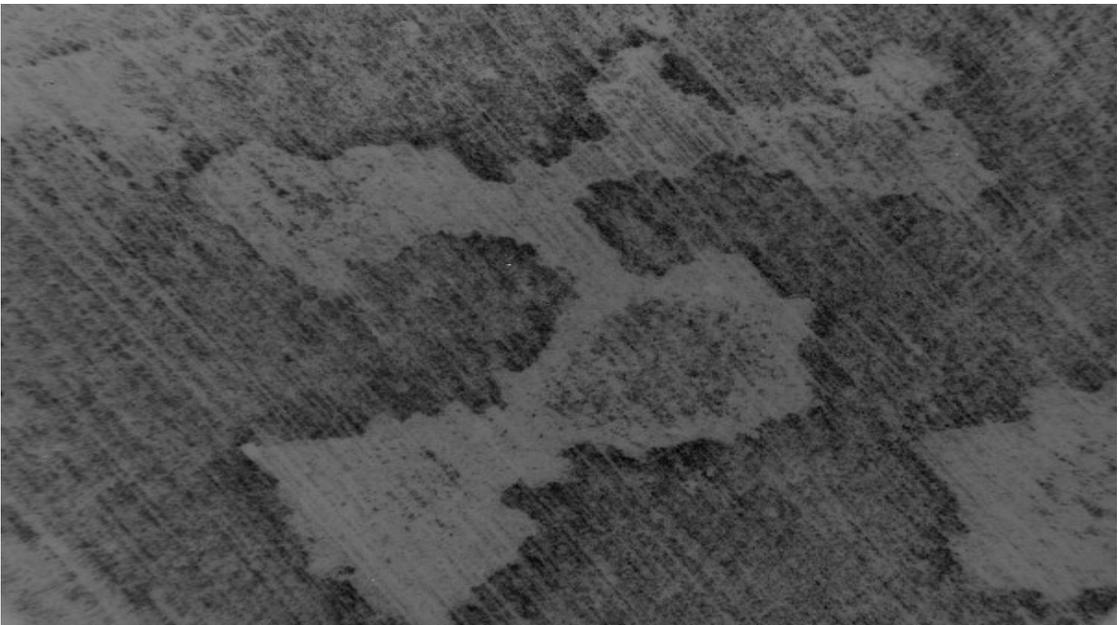
Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 58. Fotomicrografía de la estructura del Al colado en coquilla



Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 59. Fotomicrografía de la estructura del Cu colado en coquilla



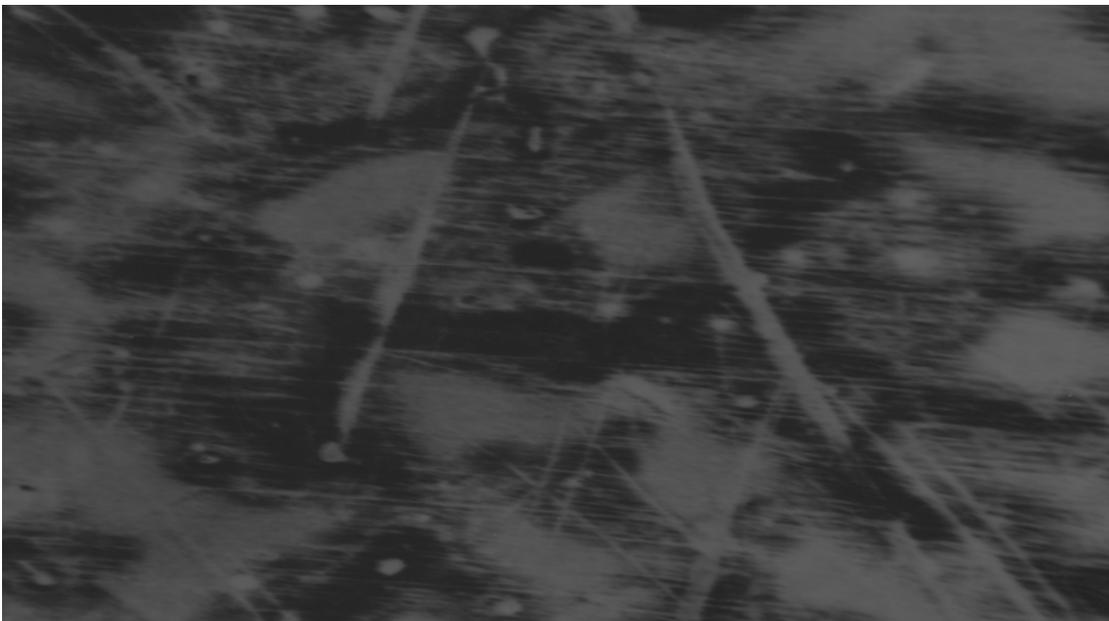
Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 60. Fotomicrografía de la estructura del Al colado en arena



Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 61. Fotomicrografía de la estructura del Cu colado en arena



Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 62. Reacción de la probeta de aluminio en la solución utilizada para el proceso de pulido químico



Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 63. Reacción de la probeta de cobre en la solución utilizada para el pulido químico



Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 64. Desprendimiento de oxido de nitrógeno de la reacción entre la probeta de cobre y la solución de pulido químico



Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 65. Solución producto del pulido químico de la probeta de cobre, de color verde por la presencia de iones níquel; en medio ácido



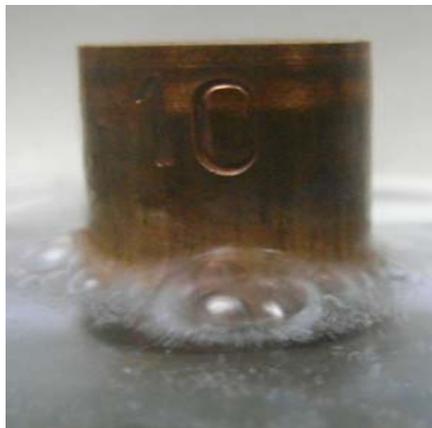
Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 66. Probeta de cobre después de ser sometida al proceso de pulido químico



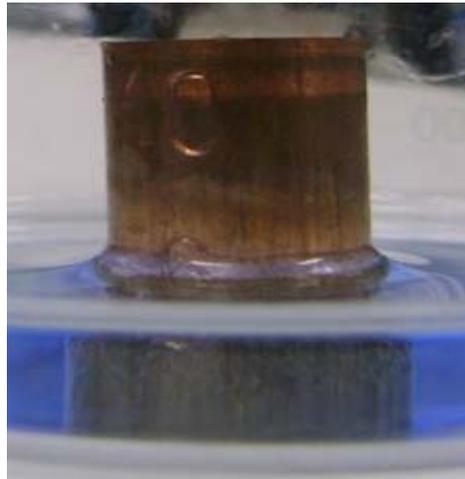
Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 67. Probeta de cobre al momento de ser sometida al proceso de pulido químico en una solución de amoníaco



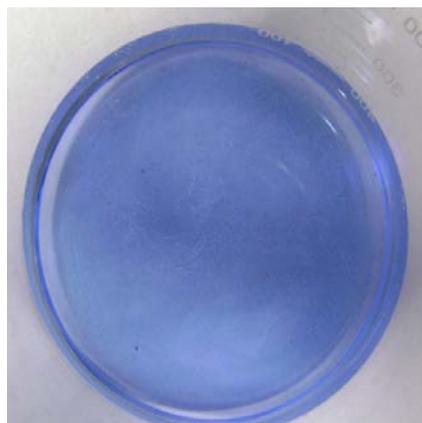
Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 68. Coloración de la solución de pulido químico utilizada en la probeta de cobre, de color azul por la presencia de iones cobre en medio básico



Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 69. Solución obtenida del proceso de pulido químico utilizada en la probeta de cobre, de color azul por la presencia de iones cobre, solución de amoníaco



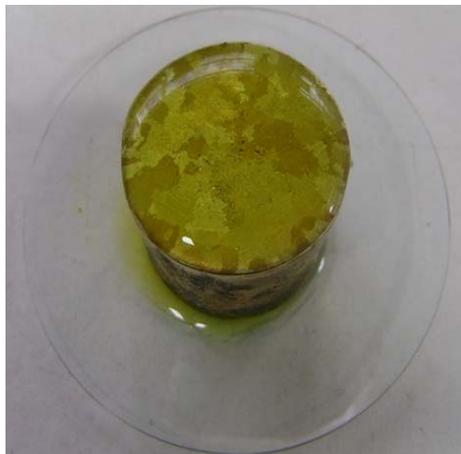
Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 70. Probeta de aluminio colado en arena al momento de ser sometida al proceso de ataque químico



Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 71. Probeta de bronce colado en arena al momento de ser sometida al proceso de ataque químico con cloruro férrico



Fuente: Herbert Figueroa, **Laboratorio de Metalografía**. Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala.