



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

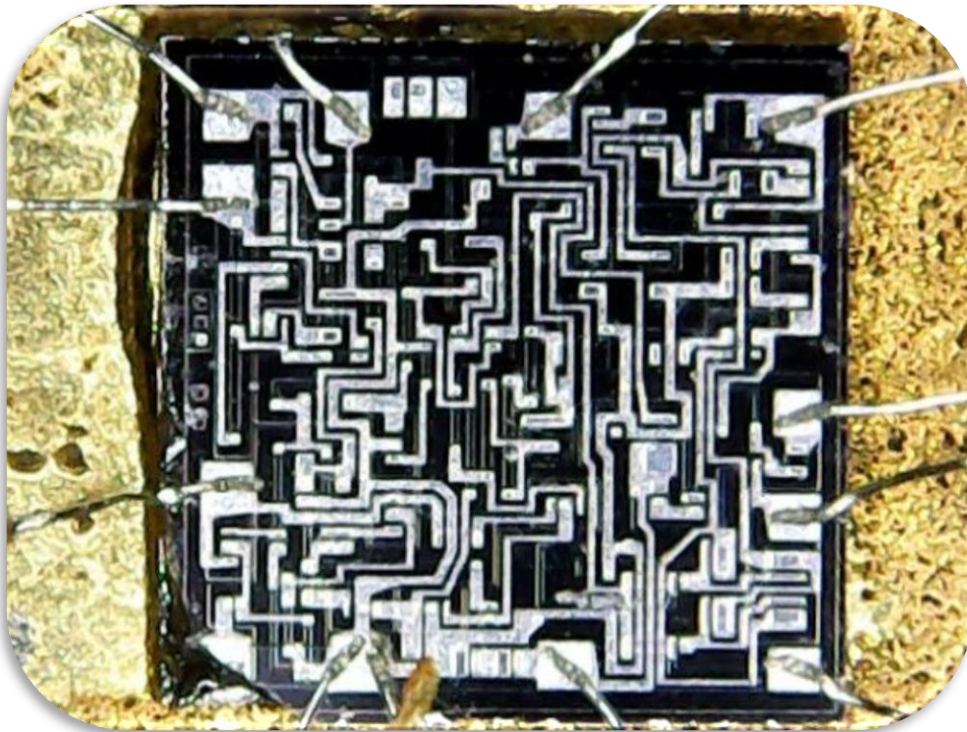


Ingeniería Mecánica Eléctrica e Ingeniería Industrial

LABORATORIO DE TECNOLOGÍA DE MATERIALES

METALOGRAFÍA Y LO QUE FALTABA.....

V0.5



Recopiló:

Mtro. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MÉXICO

SEMESTRE 2020-1

ÍNDICE

Pág.

CAPITULO 1 METALOGRAFÍA

1.1. Metalografía	6
1.2. Preparación de muestras metalográficas.....	6
1.3. Macroanálisis.....	13

CAPITULO 2. EL MICROSCOPIO

2.1. El microscopio metalográfico.....	15
2.2. El microscopio electrónico.....	17
2.2.1. Partes del microscopio electrónico.....	20
2.2.2. Microscopio electrónico de transmisión (MET o TEM).....	22
2.2.3. Microscopio electrónico de barrido (MEB o SEM).....	24
2.2.4. Microscopio electrónico de la reflexión (REM o MER).....	25
2.3. Tamaño de grano.....	25
2.3.1. Métodos.....	27
2.4. Tamaños de grano.....	33
2.4.1. Métodos	34
2.5. Inclusiones no metálicas	44

CAPITULO 3 ALEACIONES

3.1. Aleaciones ferrosas.....	47
3.1.1. Hierro con 0.05% C.....	47
3.1.2. Hierro pudelado.....	48
3.1.3. Hierros fundidos, colados o fundiciones de hierro.....	50
3.2. Fases presentes en las aleaciones ferrosas.....	52
3.3. Ferroaleaciones nobles.....	52

CAPITULO 4 ALEACIONES NO FERROSAS

4.1. Titanio.....	64
4.2. Aluminio.....	65
4.3. Magnesio.....	67
4.4. Cobre.....	68
4.5. Zinc.....	70

CAPITULO 5 ALGUNOS DIAGRAMAS DE FASE.....

CAPITULO 6 DIFRACTOGRAMAS

6.1. Aluminio.....	83
6.2. Cobalto (temp. Ambiente)	84

6.3. Cobalto (T<450°C)	85
6.4. Cobre.....	86
6.5. Cromo	87
6.6. Hierro (α)	88
6.7. Hierro (γ)	89
6.8. Fe ₃ C	90
6.9. Martensita	91
6.10. Magnesio	92
6.11. Manganeseo	93
6.12. Molibdeno	94
6.13. Plomo	95
6.14. Titanio (α)	96
6.15. Titanio (β)	97
6.16. Vanadio	98
6.17. Zinc	99
6.18. Tungsteno	100
6.19. Carburo de tungsteno (WC)	101

CAPITULO 7 FALLAS MECÁNICAS

7.1. Falla por desgaste.....	102
7.2. Deformación plástica excesiva.....	105
7.3. Falla por fatiga.....	106
7.4. Fractura por exceder la resistencia máxima del material	108

CAPITULO 8 MICROESTRUCTURAS.....109

BIBLIOGRAFÍA198



Ingeniería Mecánica Eléctrica



El Zócalo



Turbina Francis, Nuevo Necaxa, Puebla.

CAPITULO 1

METALOGRAFÍA

1.1. Metalografía

La **metalografía** es la disciplina que estudia microscópicamente las características estructurales de un metal o de una aleación, buscando microestructura, inclusiones, tratamientos térmicos a los que haya sido sometido, microrechupes, con el fin de determinar si dicho material cumple con los requisitos para los cuales ha sido diseñado; además se pueden hallar la presencia de material fundido, forjado y laminado. Se pueden visualizar la distribución de fases que componen la aleación y las inclusiones no metálicas, así como la presencia de segregaciones y otras irregularidades.

El microscopio es la herramienta más importante del metalurgista tanto desde el punto de vista científico como desde el técnico. Es posible determinar el tamaño de grano, forma y distribución de varias fases e inclusiones que tienen gran efecto sobre las propiedades mecánicas del metal. La microestructura revelará el tratamiento mecánico y térmico del metal y, bajo un conjunto de condiciones dadas, se podrá predecirse su comportamiento esperado.

1.2. Preparación de muestras metalográficas.

Los cinco pasos que casi siempre se requieren para hacer una muestra metalográfica son:

1. Corte
2. Montaje. Si la muestra es muy pequeña (lámina o alambre)
3. Desbaste
4. Pulido
5. Ataque, con el reactivo químico adecuado

Corte.

En general, se deben cortar uno o varios trozos pequeños del objeto que se va a examinar. La ubicación de estas muestras y la forma en que se corten afectarán los resultados y su interpretación. Por ejemplo, una varilla de acero estirada en frío puede cortarse en tal forma que quede expuesta una sección transversal o longitudinal, y ambas secciones variarían notablemente en su aspecto. En el caso del acero (y de algunas otras aleaciones), es necesario evitar el calentamiento de la muestra al hacer el corte ya que esto puede alterar el estado de la superficie, que más tarde deberá pulirse y atacarse con el reactivo adecuado. Casi siempre es conveniente realizar los cortes, utilizando un medio refrigerante o hacerlo lentamente, a fin de que el calor generado en la pieza no altere su estructura.



Figura 1.1. Cortadora de disco abrasivo

Montaje.

Si la probeta que va a examinarse es lo suficientemente grande para que pueda sujetarse bien con la mano, no es necesario montarla. No obstante, la mayoría de las veces la probeta es demasiado pequeña para que pueda sostenerse en forma (por ejemplo, un tramo de varilla, alambre o lámina) mientras se lija o pule, por lo que será necesario montarla en algún material plástico.

Desbaste.

Este proceso se efectúa usando lijas de grano cada vez más fino. La lija se sostiene sobre una superficie plana y dura, que puede ser acero o vidrio y la muestra se lija sin seguir un movimiento oscilatorio, sobre la lija. Cuando se termina de lijar, en cada etapa, las marcas deben estar todas en la misma dirección, como se muestra en la figura 1. Antes de continuar con la siguiente lija más fina, deben lavarse y secarse con cuidado las manos y la muestra. Ahora, la probeta debe desplazarse en tal forma que las rayas hechas por las distintas lijas formen ángulos rectos con las del inmediatamente anterior. Así puede verse con claridad si se han eliminado las rayas más gruesas que se hicieron en la operación anterior, como se ve en la figura 1.

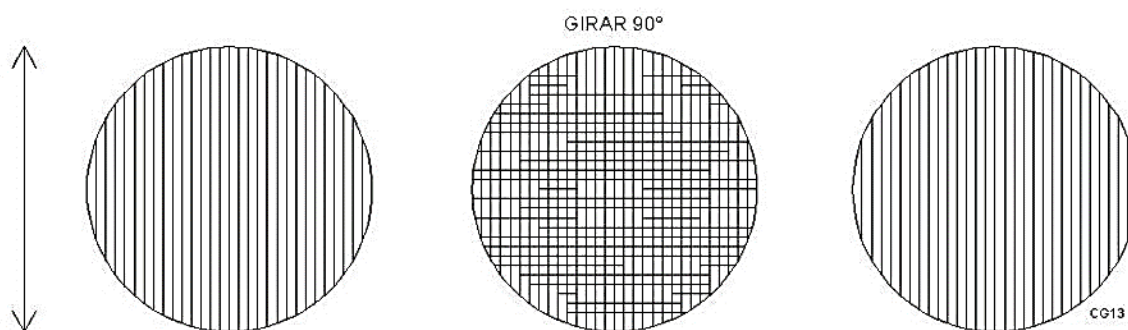


Figura 1.2.- Desbaste a 90° en diferentes pasos.

Pulido.

Este procedimiento se basa en el uso de una rueda cubierta con un paño, cargado con una suspensión de alúmina. Periódicamente se debe aplicar agua, para mejorar la acción pulidora y la limpieza. Al principio, la muestra se sostiene en una posición sobre la rueda, sin hacerla girar, hasta que se hayan eliminado la mayoría de las marcas anteriores. Luego puede girarse con lentitud en sentido contrario al de rotación de la rueda hasta que solo puedan verse las marcas dejadas por la alúmina. La rotación de la muestra reduce a un mínimo el peligro de formación de ranuras, por las que se extraen del metal partículas precipitadas.

Se procede a hacer el pulido final después de lavar las manos y la muestra, a fin de evitar cualquier contaminación de la rueda de pulido. A esta rueda cubierta de tela se le aplica una suspensión de alúmina. La muestra se hace girar con lentitud en sentido contrario al de la rotación de la rueda y se pule hasta que desaparecen las marcas dejadas por la alúmina anterior. Los resultados del pulido pueden mejorar si la última etapa de pulido se efectúa en una rueda de baja velocidad.



Figura 1.3. Pulidora doble

Ataque Químico

Después del pulido, la superficie plana de una muestra metalográfica, observada al microscopio, se presenta especular y sin contrastes apreciables. En tales condiciones pocas cosas, aunque sean importantes, pueden ser observadas: eventuales micronaturalezas, principios de corrosión, inclusiones no metálicas.

En definitiva, además de las discontinuidades (roturas), puede ser individualizado y reconocido todo lo que presenta una coloración propia, distinta del resto de la masa metálica cuya estructura no puede ser observada si no se ha previsto atacar la superficie mediante los oportunos reactivos químicos.

Por tanto, el objeto del ataque químico, es evidenciar la estructura, o bien permitir, a través de un proceso de corrosión selectiva, la diferenciación de los distintos componentes cristalinos de la aleación, ó por la diversa intensidad de la corrosión de los mismos ó por la diversa coloración de los productos de la reacción.

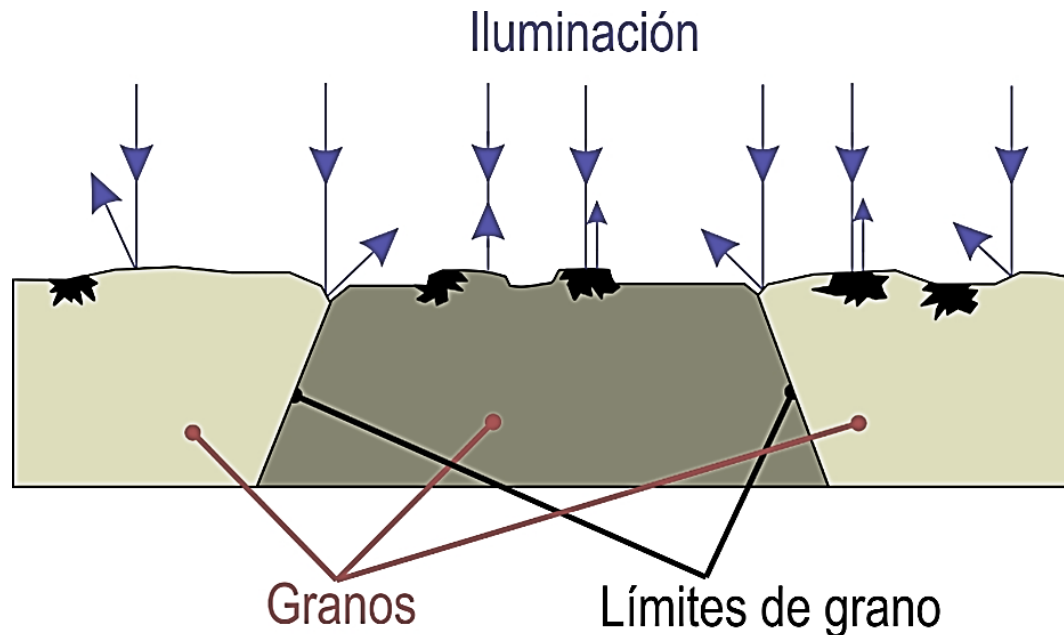


Figura 1.4. Superficie de la probeta después del ataque químico.

Es obvio, por lo tanto que poniendo en contacto de la superficie pulida el reactivo químico, tanto la velocidad de la reacción (disolución) como el producto de la misma dependen de la naturaleza de los componentes, los cuales, a igual tiempo, serán atacados más ó menos.

Se vienen así a crear, respecto a la superficie originariamente plana, diferencias de nivel y de coloración, así como de la orientación de la microsuperficie, observable mediante microscopio.

En la figura 1.5 se muestran algunos reactivos de ataque y sus principales usos:

ALEACION	REACTIVO	CONDICIONES	CARACTERISTICAS
ACEROS	100 ml Alcohol etílico 96% 1-10 ml Ácido nítrico NITAL	Segundos a minutos	Utilizable para aceros al carbono, aceros aleados y fundición gris. Las segregaciones pueden producir un ataque irregular.
	100 ml Alcohol etílico 96% 2-4 g Ácido pícrico PICRAL	Segundos a minutos PRECAUCIÓN	Reactivo para todo tipo de aceros, con o sin tratamiento térmico.
	100 ml Alcohol etílico 96% 20 ml Ácido clorhídrico	5 a 10 minutos	Distinguir entre martensita cúbica y tetragonal. Aceros al Ni.
	45 ml Glicerol 15 ml Ácido nítrico 30 ml Ácido clorhídrico VILELLA	Segundos a minutos PRECAUCIÓN	Aceros inoxidables con alto contenido en Cr. Aceros moldeados al Cr-Ni.
COBRE	100-200 ml Alcohol etílico 20-50 ml Ácido clorhídrico 5-10 g Cloruro férrico	Segundos a minutos	Cobre y todos los tipos de cuproaleaciones. Contrasta el grano.
	80 ml Agua destilada 5 ml Acido sulfúrico 10 g Dicromato potásico	3 a 30 segundos Inmediatamente antes de su uso añadir dos gotas de ácido clorhídrico	Cobre y todos los tipos de cuproaleaciones. Se puede usar después del reactivo anterior.
TITANIO	92 ml agua destilada + 6 ml HF/ + 2 ml HNO ₃ Reactivo de Krolls		Aleaciones de titanio
ALUMINIO	190 ml Agua destilada 5-10 ml Ácido nítrico 3-6 ml Ácido clorhídrico 2-4 ml Ácido fluorhídrico	10 a 30 segundos Usar recién hecho	Para la mayoría de las aleaciones de aluminio. Excepto las que tengan alto contenido de silicio.
	100 ml Agua destilada 1-2 g Hidróxido sódico	5 a 10 segundos a 50 °C	Aluminio puro y Cu-Al, Mg-Si-Al, Mg-Al y Zn-Al.
ZINC	100 ml Agua destilada 20 ml Oxido de cromo (VI) 1.5 g Sulfato sódico	2 a 3 minutos	Uso general en aleaciones de zinc.
NIQUEL	20-100 ml Agua destilada 2-25 ml Ácido clorhídrico 5-8 g Cloruro férrico	5 a 6 segundos	Aleaciones Ni-Fe, Ni-Cu y Ni-Ag. Superaleaciones base Ni-Monel

CADMIO	98 ml Alcohol etílico 96% 2 ml Ácido nítrico	Segundos a minutos	Uso general en aleaciones de cadmio.
MAGNESIO	100 ml Alcohol etílico 96% 1-8 ml Ácido nítrico	Segundos a minutos	Uso general en aleaciones de magnesio.

Figura 1.5. Reactivos de ataque para diferentes aleaciones.

Otro método de ataque muy utilizado en aleaciones no ferrosas y que actualmente se está introduciendo en el campo de las ferrosas, especialmente en los aceros inoxidable es el ataque electrolítico. Se hace generalmente a continuación del pulido electrolítico, pero con un voltaje mucho menor. La diferencia con el pulido es que en el pulido la disolución anódica es no diferenciada y ahora es selectiva.

El ataque electrolítico requiere una pieza de conductividad homogénea. El pulido inicial necesario de la superficie puede realizarse mediante un esmerilado y pulido mecánico para obtener una superficie más lisa, aunque con deformaciones y/o arañazos. El pulido electrolítico produce menos deformaciones con redondeo de bordes y un posible lavado de fases.

El principio del ataque electrolítico es el mismo que el del ataque químico, excepto que la muestra se coloca como un ánodo en la célula galvánica, lo que resulta en la eliminación de material de la superficie de la muestra. En investigaciones especiales de materiales con base de aluminio se puede aplicar un ataque electrolítico que forme una capa anodizada en la superficie de la muestra bien pulida y analizar bajo una luz polarizada (ataque Barker).

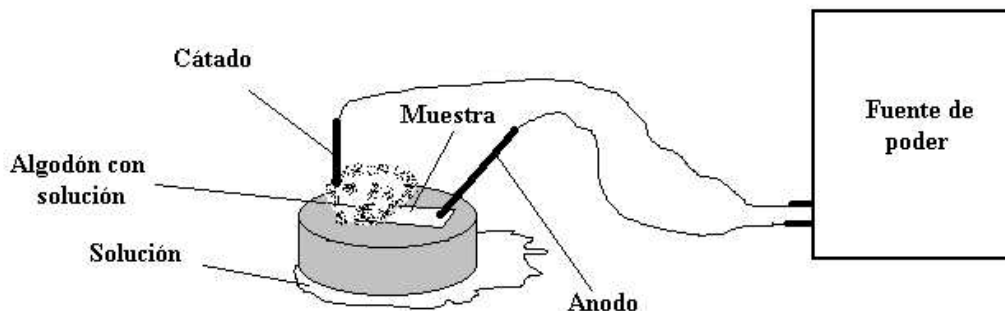


Figura 1.6. Ataque electrolítico

1.3. Macroanálisis

El estudio de los metales y aleaciones a simple vista o a pocos aumentos (no más de 15x) se conoce como macroanálisis y la estructura observada se llama macroestructura.

El macroanálisis es el procedimiento mediante el cual el espécimen es atacado y evaluado macroestructuralmente a pocos aumentos (hasta 15X), y se utiliza frecuentemente para evaluar productos de acero, como lupias, planchas, barras, y forjas.

Durante el análisis hay varios procedimientos para calificar un elemento de acero usando una serie de fotografías que muestran la incidencia de ciertas condiciones y se aplica tanto a los aceros al carbono y aleados.

El macroanálisis se realiza con los objetivos siguientes:

1. Para revelar tamaño, forma y configuración de cristales (dendritas) en metales fundidos (as cast)
2. Para revelar tamaño, forma y fibras en metales deformados.
3. Para verificar el método de manufactura (forja, soldadura, fundición, etc.).
4. Para checar cavidades debido a gases y porosidad durante la contracción de solidificación.
5. Para encontrar no homogeneidad química durante la solidificación.
6. Visualizar inclusiones no metálicas
7. En el estudio de fallas mecánicas.

Además, algunos defectos en la muestra pueden evaluarse por conformidad con las especificaciones del reactivo de ataque. Escoria, porosidad, falta de penetración de la soldadura, falta de fusión lateral y mala soldadura de perfil son principalmente los objetivos que se alcanzan con éste análisis. Es normal la búsqueda de tales defectos a simple vista o aumentos de hasta 50X. Es también rutinario fotografiar la sección para tener una imagen permanente, esto se conoce como macrofotografía.

Diversos reactivos de ataque se pueden utilizar dependiendo del tipo de macroanálisis que se realizará. Los aceros reaccionan de manera distinta a los reactivos como consecuencia de la variación de composición química, método de manufactura tratamiento térmico y muchas otras variables.

El macroanálisis también puede realizarse en materiales soldados y también pulirse atacarse la sección transversal de un material soldado. Durante el macroanálisis, diversas características pueden ser determinadas incluyendo la secuencia de aplicación de soldadura, muy importante para evaluar a soldadores.

Tabla 1.1. Reactivos utilizados para el macroanálisis

- (quantities of the components are in weight parts)
- For steels
 - Crystal structure: Iodine 10 parts, Potassium Iodide 20 parts, Water 100 parts
 - Flow lines, cracks, porosity: Hydrochloric acid 50 parts, Water 50 parts, Boiling for 5-15 min.
 - Dendritic structure: Copper ammonium chloride 9 parts, Water 91 parts, Immersion for 0.5-4 hours.
- For stainless and austenitic steels: Hydrochloric acid 15 parts, Nitric acid 5 parts, Water 100 parts.
- For aluminum alloys: Hydrochloric acid 10 parts, Nitric acid 1 part, Water 200 parts.
- For copper alloys (dendritic structure): Ferric chloride 25 parts, Hydrochloric acid 25 parts, Water 100 parts.

CAPITULO 2

EL MICROSCOPIO

2.1. El microscopio metalográfico

Todas las operaciones descritas en la preparación metalográfica tienen por objeto revelar, en una superficie metálica plana, sus constituyentes estructurales para ser observadas al microscopio metalográfico, el cual es un instrumento que permite observar la luz reflejada por la superficie previamente preparada de un metal. Existen dos tipos de él, a saber:

- Microscopio vertical, figura 2.1a)
- Microscopio invertido (arreglo de Le Chatelier), figura 2.1b)



a)



b)

Figura 2.1. a) Microscopio vertical con fuente externa b) Microscopio invertido

Básicamente, el microscopio está constituido por un dispositivo de iluminación, un vidrio plano o prisma de reflexión, el ocular y el objetivo. El haz de luz atraviesa el objetivo y al ser reflejado por la muestra vuelve a pasar por éste para dar una imagen

en el ocular de observación y/o en la cámara fotográfica. El aumento de la imagen observada viene dado por el producto de los aumentos del objetivo por los del ocular.

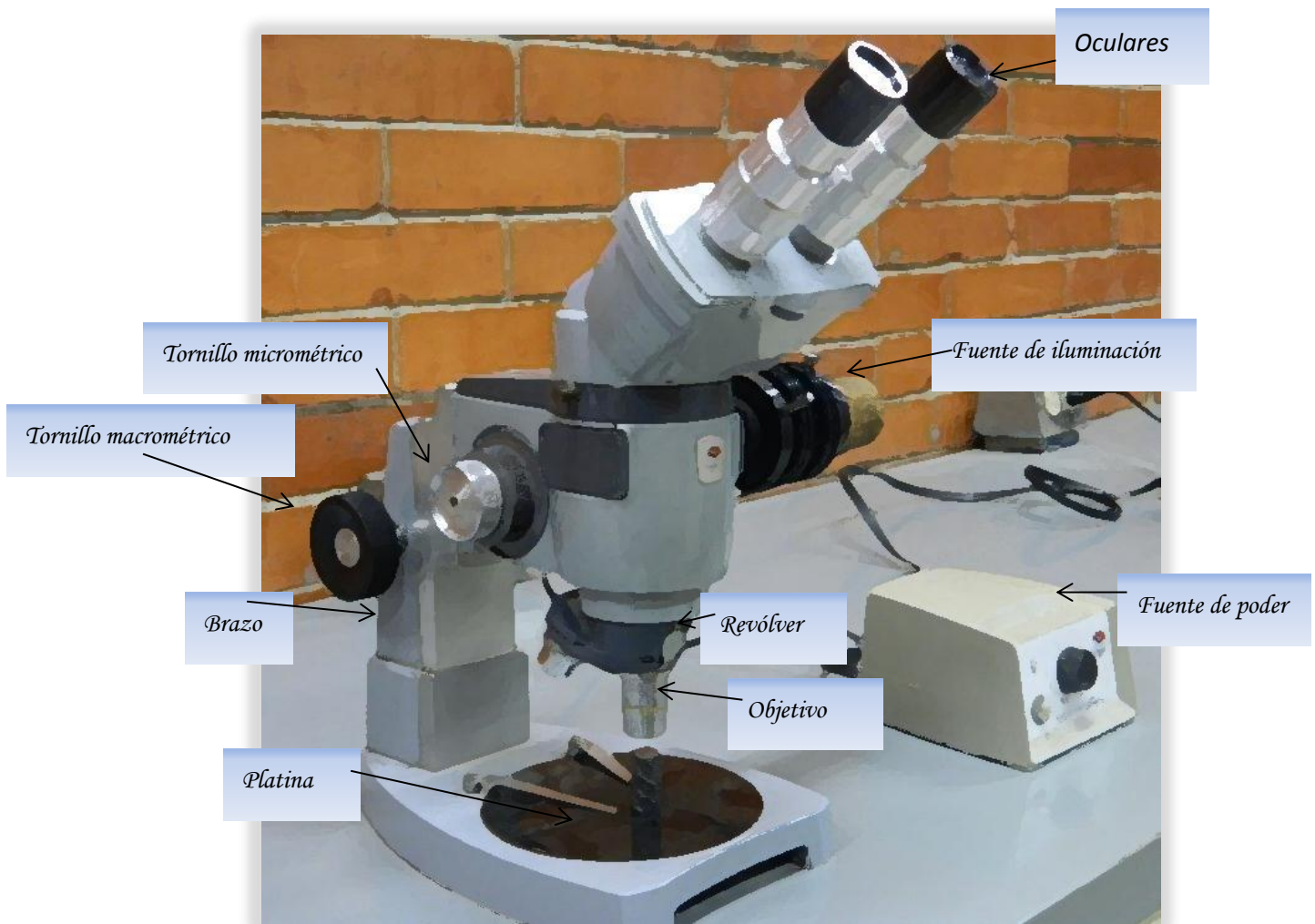


Figura 2.2. Microscopio vertical con fuente externa

La máxima ampliación que se consigue con los microscopios metalográficos es, aproximadamente, de 1500 aumentos (1500X). Con el empleo de lentes bañadas en aceite puede mejorarse este límite, hasta unos 2000 X. No obstante, esta es la mayor magnificación que se puede conseguir con microscopía óptica, debido al tamaño de la longitud de onda de la luz visible (aprox. 4000 Å). Para aumentar la magnificación, se tienen que emplear electrones ($\lambda=0.5 \text{ \AA}$) en vez de fotones para "iluminar" la muestra, lo que lleva a emplear microscopios electrónicos.

2.2. El microscopio electrónico <https://www.mundomicroscopio.com/microscopio-electronico/>

El microscopio electrónico es un instrumento de gran utilidad en la investigación científica gracias a su gran poder de aumento. Mediante este tipo de microscopio es posible aumentar imágenes de muestras hasta niveles muy superiores a los del microscopio óptico.

Historia del microscopio electrónico

El microscopio electrónico es un invento del siglo XX que fue posible gracias a los avances en el campo de la física de las partículas. Uno de los avances importantes fue el descubrimiento de la naturaleza ondulatoria del electrón por parte de Louis-Victor de Broglie. Esto le valió el premio Nobel en 1929.

Los ingenieros alemanes **Ernst Ruska** y **Max Knoll** se dieron cuenta de que estos conocimientos justificaban la viabilidad del microscopio electrónico. En seguida se pusieron a construir el primer **prototipo** con la intención de alcanzar aumentos a un nivel sin precedentes. En 1931 presentaron su primer prototipo funcional. Esto demostró que era posible construir un microscopio electrónico. No obstante, el aumento obtenido con este primer prototipo estaba lejos del que se podía obtener con un microscopio convencional. Mientras que un microscopio óptico puede alcanzar aumentos cerca de 1500X, este primer prototipo solo alcanzaba los **400X**.



a)

b)

Figura 2.3 a) Max Knoll

b) Ernst August Friedrich Ruska

<https://www.curiosfera.com/wp-content/uploads/2018/12/quien-invento-el-microscopio-electr%C3%B3nico.jpg>



Figura 2.4. Primer microscopio electrónico

Los resultados fueron, sin embargo, muy prometedores y solo dos años más tarde fueron capaces de construir un microscopio electrónico con mayor aumento que el de un microscopio óptico. En 1938 Siemens empezó a comercializar el primer microscopio electrónico.

Los microscopios electrónicos contruidos por Ernst Ruska eran microscopios electrónicos de transmisión. Esto significa que los electrones atraviesan la muestra y a continuación impactan contra un detector que reconstruye la imagen. Este principio es el mismo que se utiliza en los microscopios electrónicos de transmisión actuales, llegando a alcanzar aumentos de 2000000X.

A finales de los años treinta, Manfred von Ardenne empezó a desarrollar un nuevo tipo de microscopio electrónico: el microscopio electrónico de barrido. En este microscopio los electrones no atraviesan la muestra sino que son parcialmente reflejados. Con los procedimientos adecuados resulta posible también reconstruir la imagen de la muestra.

El microscopio electrónico resultó ser de gran utilidad una vez alcanzó la madurez tecnológica. Ernst Ruska recibió en 1989 el premio Nobel de física por sus aportaciones en este campo.

En el año 2010, el centro de investigación Jülich de Alemania empezó a construir el microscopio electrónico más potente del mundo. Su construcción costó 15 millones de euros y duró dos años. Este microscopio, conocido con el nombre PICO, puede alcanzar una resolución de 50 picómetros.

Para entender cómo funciona un microscopio electrónico es necesario definir algunos conceptos físicos. Uno de estos conceptos es la longitud de onda.

Dada una onda periódica, la longitud de onda es la distancia entre dos ciclos consecutivos. En el caso de la luz visible, cada onda de un determinado color tiene una longitud de onda específica. Este concepto es importante en el campo de la microscopía óptica porque está relacionado con el máximo aumento que puede

alcanzarse. El máximo aumento de un microscopio es proporcional a la longitud de onda del medio con el que se observa. A menores longitudes de onda, mayor resolución puede obtenerse. Por este motivo, el máximo aumento que se puede obtener con un microscopio óptico difícilmente supera los 1500 aumentos.

El principio de funcionamiento de un microscopio electrónico se basa en utilizar electrones en lugar de luz visible. La longitud de onda con la que se mueve un electrón es inversamente proporcional a su velocidad. Esto significa que si los electrones son acelerados a altas velocidades pueden obtenerse longitudes de onda muy cortas.

Un microscopio electrónico utiliza esta idea para observar las muestras. A un nivel muy básico consiste en una fuente de electrones que son acelerados a gran velocidad. Estos electrones impactan con la muestra de modo equivalente a como la luz podría iluminarla. Algunos de estos electrones son reflejados por la muestra y otros la atraviesan. Mediante la detección estos electrones es posible reconstruir una imagen de la muestra.

A continuación, se presentan los elementos principales de este tipo de microscopio. También presentamos brevemente la historia de este invento y una explicación en detalle de los distintos tipos de microscopio electrónico.

2.2.1. Partes del microscopio electrónico

Las **partes principales** de un microscopio electrónico incluyen aquellos elementos utilizados para generar electrones y dirigirlos hacia la muestra. Esto incluye:

Fuente de electrones

Es equivalente a la fuente de luz en un microscopio óptico. En este caso es necesario disponer de un emisor de electrones. En general se utiliza un filamento de tungsteno. Este filamento es calentado de modo que la energía de sus átomos y electrones aumenta. A partir de un cierto nivel energético los electrones poseen suficiente energía para escapar de sus átomos. Estos electrones libres son a continuación dirigidos hacia la muestra.

Lentes electromagnéticas

Los microscopios ópticos utilizan lentes convergentes y divergentes para desviar los rayos de luz y aumentar así la imagen de la muestra. Este mismo procedimiento no puede ser aplicado para desviar la trayectoria de los electrones. En lugar de utilizar lentes de vidrio, los microscopios electrónicos utilizan lentes electromagnéticas. Estas lentes generan campos eléctricos y magnéticos de modo que su interacción con los electrones hace que sus trayectorias diverjan o converjan en un punto.

Cámara de vacío

El procedimiento expuesto anteriormente debe llevarse a cabo dentro de una cámara de vacío. De lo contrario, los electrones interactuarían con las moléculas del aire y no sería posible determinar sus trayectorias adecuadamente. La muestra que se observa debe colocarse también dentro de la cámara de vacío. Este es uno de los motivos por el cual no es posible observar muestras vivas con un microscopio electrónico.

Detector (Pantalla fluorescente)

Una vez los electrones han impactado contra la muestra es necesario medir algún tipo de información para poder reconstruir la imagen de la muestra. Una opción consiste en utilizar una pantalla fluorescente. Esta pantalla reacciona de modo distinto según cual sea el número de electrones que impactan en ella. De este modo es posible detectar las zonas donde impactan más o menos electrones y deducir así la imagen de la muestra. Existen alternativas a las pantallas fluorescentes, por ejemplo, sensores CCD.

A continuación, la información capturada por la pantalla fluorescente es transmitida a un ordenador que puede asignar colores artificiales a la imagen obtenida. En los microscopios ópticos estos componentes no son necesarios porque la luz proveniente de la muestra es directamente observada con el ojo humano. Dado que nuestros ojos no están preparados para detectar electrones debemos incorporar este elemento detector en un microscopio electrónico.

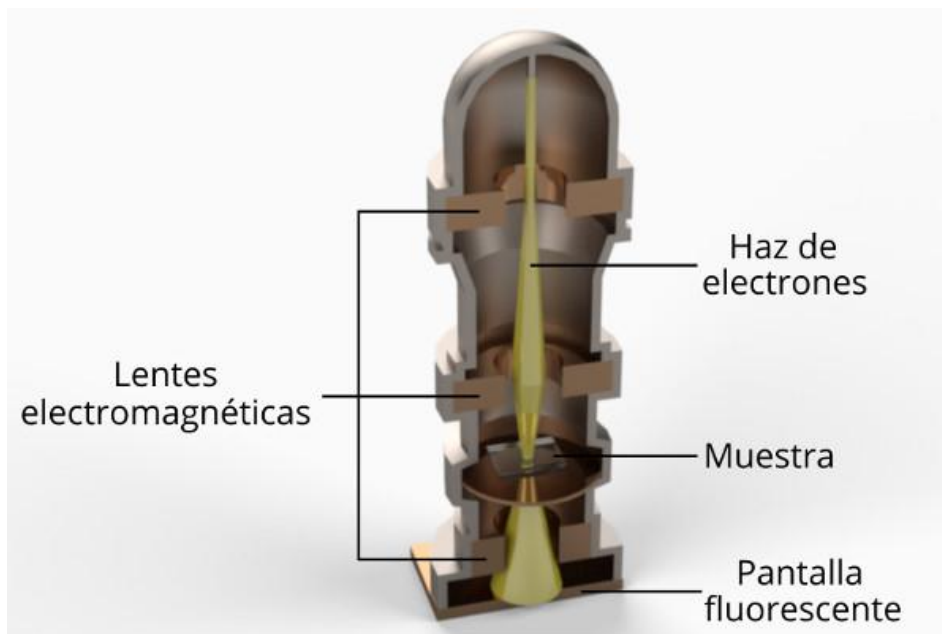


Figura 2.5. Partes del microscopio electrónico

2.2.2. Microscopio electrónico de transmisión (MET o TEM)

El microscopio electrónico de transmisión es el tipo original de microscopio electrónico, que ordena un haz electrónico de alto voltaje hacia el espécimen para iluminarlo y para crear una imagen magnificada de la muestra.

La principal característica del microscopio electrónico de transmisión es que se utilizan los electrones que atraviesan la muestra.

En primer lugar, los electrones son conducidos hacia la muestra mediante las lentes electromagnéticas. Cuando los electrones impactan contra la muestra, algunos de ellos consiguen atravesarla y otros son dispersados. Los electrones que pueden pasar al otro lado de la muestra son capturados por un detector dando lugar así a una imagen.

La cantidad de electrones que atraviesa la muestra sin desviarse varía en función de las características internas de la muestra. Dicho de otro modo, hay partes de la muestra que presentan más transparencia a los electrones que otras. Esto da lugar a zonas más oscuras (menos electrones atraviesan la muestra y llegan al detector) y zonas más claras (más electrones atraviesan la muestra y llegan al detector).

Para utilizar esta técnica es necesario preparar la muestra para que sea muy delgada (espesor inferior a 2000 ángstroms). De lo contrario, demasiado espesor impide que los electrones puedan atravesarla.

Esta técnica de microscopía es muy útil para visualizar los detalles internos de una muestra, por ejemplo, estructuras cristalinas. A nivel conceptual esta técnica es similar a realizar una radiografía de la muestra.

La principal limitación que tiene esta técnica es que no permite extraer información de la superficie de la muestra. Es decir, no permite observar detalles como la forma o rugosidad de la muestra que se observa. Para observar este tipo de características es necesario utilizar la microscopía electrónica de barrido.

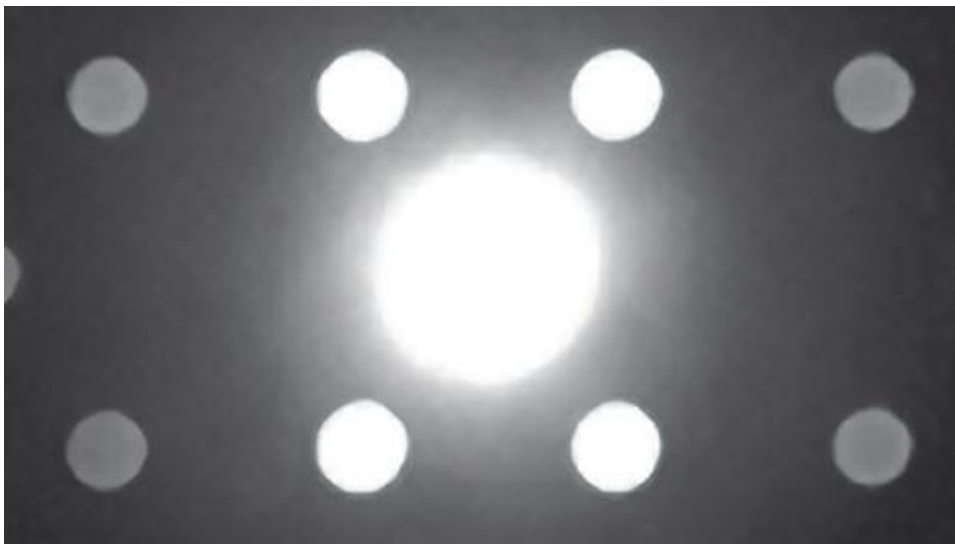


Figura 2.6. La imagen formada muestra variaciones en la dispersión de los electrones por la muestra en relación con la masa de los átomos, el grosor de la muestra o la orientación de la muestra (si es cristalina).

2.2.3. Microscopio electrónico de barrido (MEB o SEM)

En el microscopio electrónico de barrido también es necesario que los electrones impacten contra la muestra. En este caso, los electrones no iluminan toda la muestra simultáneamente, sino que se hace un escaneado recorriendo los distintos puntos de la muestra.

Cuando los electrones impactan con la muestra estos pierden parte de su energía debido a distintas interacciones. Parte de su energía inicial se transforma en calor o en emisiones de rayos X. Además, se produce también la emisión de electrones que se desprenden de la superficie de la muestra. Estos electrones se conocen como electrones secundarios.

El principio de funcionamiento de los microscopios electrónicos de barrido se basa en medir alguna de estas propiedades para extraer información de la muestra observada. Generalmente, esto consiste en medir la cantidad de electrones secundarios que emite la superficie cuando es bombardeada con electrones.

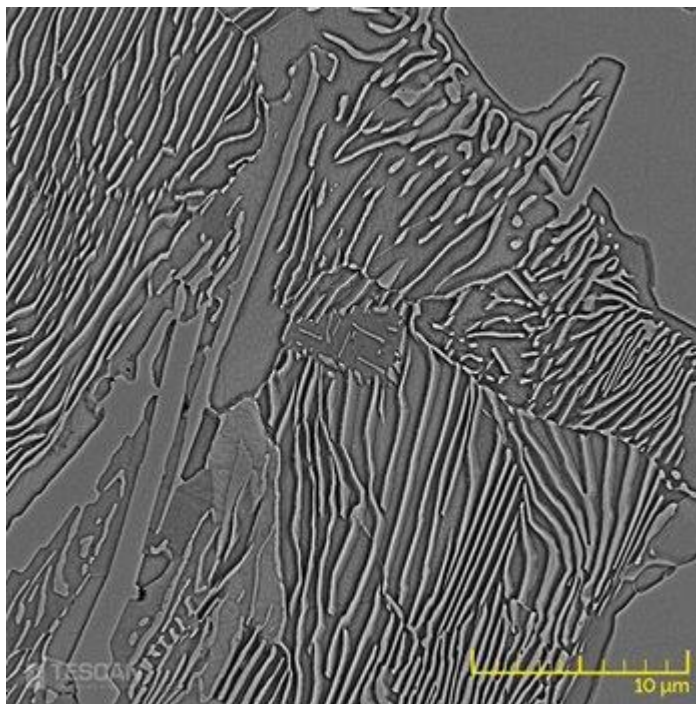


Figura 2.7. Perlita observada con ayuda de un microscopio MEB

(<https://www.tescan.com/getattachment/content/Gallery/applications/MS/Steels-and-Metal-Alloys/m-steels-04-v.jpg.aspx?width=1100>)

Esta técnica de microscopía es muy útil para observar los detalles de la superficie de microorganismos. Es habitual realizar una preparación de la muestra depositando primero una capa de metal sobre la muestra. De esta forma, existen más electrones secundarios que pueden desprenderse cuando se aplica el haz principal de electrones.

Este proceso de preparación es en general más sencillo que el que se debe realizar para la microscopía electrónica de transmisión.

El aumento que alcanzan este tipo de microscopios es menor que el que se puede obtener con un microscopio electrónico de transmisión. Sin embargo, la información tridimensional que proporciona esta técnica lo convierte en un instrumento muy útil para determinados tipos de muestras.

2.2.4. Microscopio electrónico de la reflexión (REM o MER)

En **microscopio electrónico de reflexión** (REM) como en el TEM, un haz de electrones es incidente sobre una superficie pero en lugar de utilizar la transmisión (TEM) o electrones secundarios (SEM), el rayo reflejado de electrones dispersados elásticamente se detecta. Esta técnica es típicamente junto con difracción de electrones de alta energía de reflexión (RHEED) y *Espectroscopia de alta energía pérdida de reflexión (RHELS)*. Otra variación es (microscopía electrónica de bajo consumo de energía spin-polarizado SPLEEM), que se utiliza para mirar la microestructura de dominios magnéticos.

2.3. Difracción de rayos x http://www.linan-ipicyt.mx/XRD_Bruker_D8_Advance.html

Los rayos X son producidos mediante la aceleración de electrones desde un cátodo hacia un blanco metálico (ánodo), por medio de alto voltaje. Los electrones acelerados chocan con los átomos del metal utilizado como blanco, removiendo electrones de niveles internos y ocasionando que electrones de niveles superiores cubran los lugares vacantes, emitiendo así, fotones de rayos X. Debido a que los rayos X tienen una frecuencia correspondiente a la diferencia de energía entre esos dos niveles, también son llamados radiación característica. Los rayos X que se generan de esta forma, se utilizan para bombardear muestras cristalinas y así obtener su patrón de difracción de rayos X.

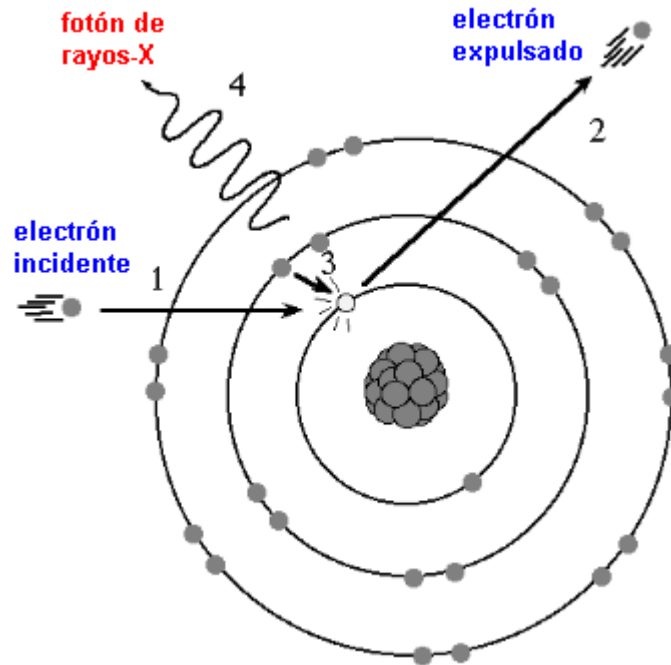


Figura 2.8. Generación de los rayos X

Tubo de rayos X

Un tubo de rayos X es una válvula de vacío utilizada para la producción de rayos X, emitidos mediante la colisión de los electrones producidos en el cátodo, o polo negativo, contra los átomos del ánodo, o polo positivo.

En el tubo de rayos X se va a producir una corriente de electrones (mA) que durante un tiempo determinado (s) van a circular desde el cátodo hacia el ánodo gracias a que se establece una diferencia de potencial (kV) entre ambos polos, figura 2.9.

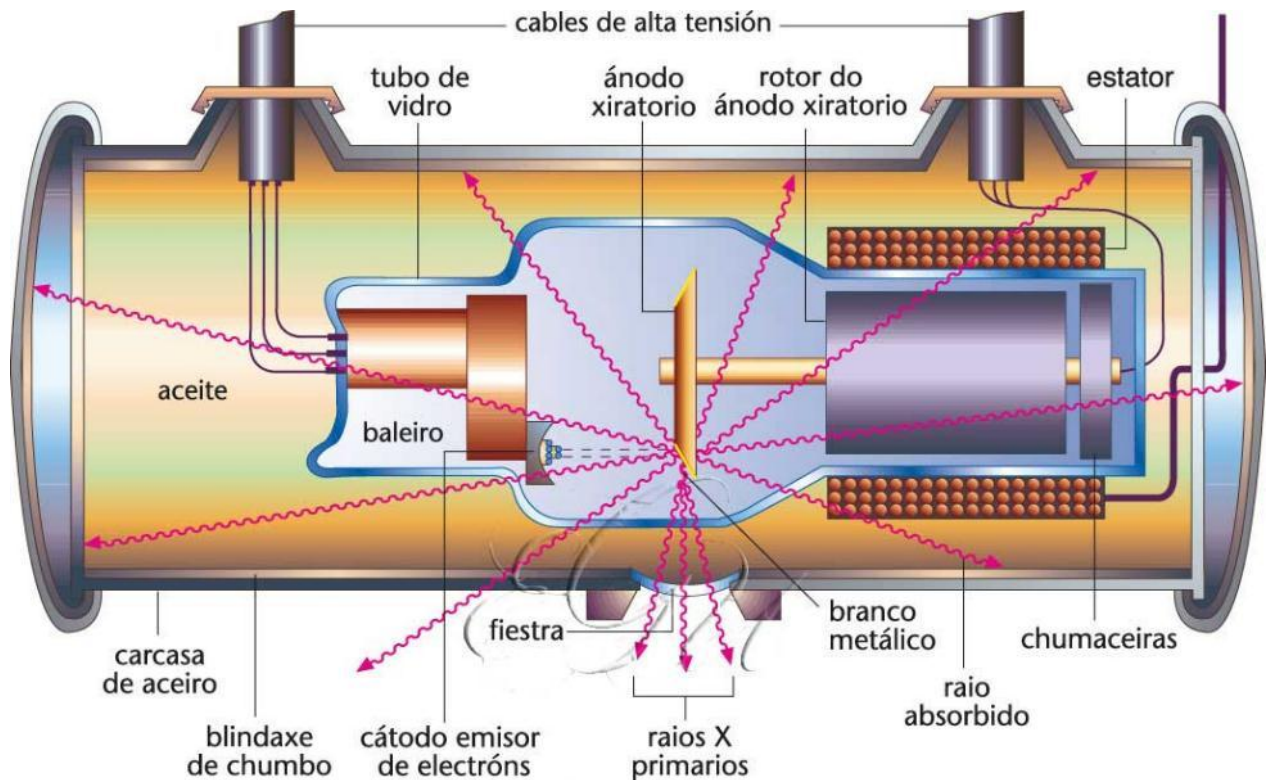


Figura 2.9. Tubo de rayos X <https://2.bp.blogspot.com/-TfwfJfctdQ/WZeZtUrGN4I/AAAAAAAAA5c/qEcKfVqKOQ5H4DX5g2Fc16G1aS4n1tXACLcBGAs/s1600/tubo.jpg>

fJfctdQ/WZeZtUrGN4I/AAAAAAAAA5c/qEcKfVqKOQ5H4DX5g2Fc16G1aS4n1tXACLcBGAs/s1600/tubo.jpg

El cátodo tiene dos partes principales:

- **El filamento:** Un filamento de rayos X emite electrones cuando se calienta. Si la corriente que atraviesa el filamento posee intensidad suficiente, de aproximadamente 4 Amperes o más, los electrones de la capa externa de los átomos del filamento entra en ebullición y son expulsados del filamento (emisión termoiónica). Es muy importante no confundir la corriente del filamento con la corriente del tubo. El circuito eléctrico del filamento es diferente del circuito del tubo.
- **La copa de enfoque:** La copa de enfoque tiene una potente carga negativa que supera a la repulsión que se establece entre los electrones, de forma que condensa el haz de electrones en un área pequeña de ánodo. Casi todos los tubos de rayos X de diagnóstico tienen dos puntos de focales, uno grande y otro pequeño.

El ánodo es el lado positivo del tubo de rayos X. Existen dos tipos:

- **Estacionarios**, que se utilizan en aparatos que no requieren intensidad ni potencia altas en el tubo.
- **Rotatorios**, que son capaces de producir haces de rayos X de alta intensidad en un tiempo breve. Ambos tipos poseen una estructura de soporte y un blanco.

El blanco es el área del ánodo con la que colisionan los electrones procedentes del cátodo. En los tubos de ánodo estacionario, el blanco consta de un metal de aleación de wolframio integrado en el ánodo de cobre. En los ánodos de tubo rotatorio, el blanco es todo el disco giratorio. El área de impacto de los electrones en los ánodos rotatorios es una pista circular que, gracias a la rotación, presenta un área de blanco que no es siempre la misma en cada instante, con lo que el calor se disipa en un área mucho más grande que en uno estacionario. Gracias a estas características, es posible obtener mayores corrientes del tubo y tiempos de exposición más cortos con el ánodo rotatorio.

La energía con que se aceleran los electrones desde el cátodo al ánodo dará lugar a radiaciones de diferentes frecuencias, más elevadas cuanto mayor sea la velocidad alcanzada por estos electrones.

En una muestra cristalina, los átomos se encuentran agrupados de forma periódica y ordenada, por lo que al recibir esta radiación, son dispersados en todas direcciones, produciendo fenómenos de interferencia, tanto constructiva como destructiva. La mayor parte de las dispersiones son del tipo destructivo, cancelándose entre sí, pero en determinadas ocasiones, debido a la periodicidad de los átomos, puede ocurrir que las ondas dispersadas se encuentren en fase y se refuercen, dando origen al fenómeno de difracción. Esto se cumple cuando los rayos X difractados por planos paralelos separados por una distancia "d", presentan una diferencia de camino recorrido igual a un entero de la longitud de onda del haz incidente. Lo cual se traduce matemáticamente como la ley de Bragg:

$$n\lambda = 2d\text{sen}\theta. \dots\dots\dots(2.1)$$

La probabilidad de que la interferencia sea constructiva sería muy pequeña, si no existiera el hecho de que los átomos de los cristales están ordenados de forma regular y repetitiva.

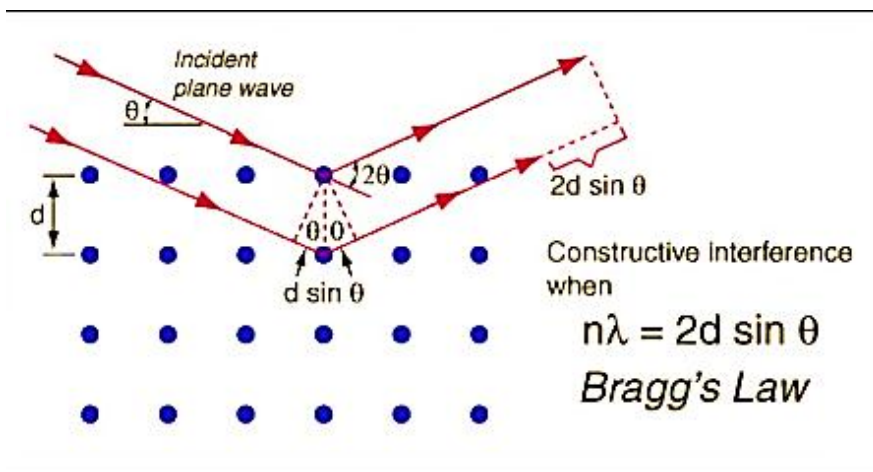


Figura 2.10. Ley de Bragg

A partir de la difracción de rayos X es posible identificar el sistema cristalino de la muestra analizada y obtener información tridimensional acerca de la estructura interna del cristal. Esta técnica es ideal para muestras en polvo policristalinas, es decir, aquellas que presentan varios cristales diminutos con orientaciones completamente aleatorias

La difracción de rayos X en muestras policristalinas permite abordar la identificación de fases cristalinas (puesto que todos los sólidos cristalinos poseen su difractograma característico) tanto en su aspecto cualitativo como cuantitativo. Los estudios de polimorfismo, transiciones de fase y soluciones sólidas, medida del tamaño de partícula, determinación de diagramas de fase, etc., se realizan habitualmente por difracción de rayos X.

La *difracción en polvo* es un método que permite identificar los cualquier material cristalino por su estructura cristalina. La utilidad de este método ha crecido y su campo se ha extendido con la introducción del difractómetro de rayos X.

Lo anterior es posible gracias a que los metales, cerámicos y minerales son cristalinos y la distribución regular en el espacio de sus componentes se describe por medio de

las redes cristalinas, que manifiestan la repetición periódica de la celda del mineral. Una celda es una unidad en forma de paralelepípedo que, repetida idénticamente, llena todo el espacio del cristal. La descripción de la celda proporciona toda la información sobre la estructura cristalina del mineral.

Existen dos niveles de descripción de la celda:

- Los parámetros del paralelepípedo. Tres aristas (a , b , c) y tres ángulos (α , β , γ)
- Disposición de átomos en la celda.

La difracción de polvo cristalino informa sobre estos dos niveles, por lo que permite distinguir minerales con redes similares.



Figura 2.11. Difractómetro de rayos X.

El método de polvo cristalino permite obtener una lista de espaciados e intensidades (datos de difracción) de una forma rápida y sencilla. La muestra de mineral o de roca para análisis difractométrico se prepara reduciéndola a polvo fino, y se extiende sobre un portamuestras, usando una pequeña cantidad de aglomerante adhesivo. El resultado de la pulverización es la obtención de un número muy elevado de pequeños cristallitos, los cuales pueden reflejar los rayos X.

El instrumento para la medida del difractorama es el difractómetro en polvo. Está formado por una fuente de rayos X, un portamuestras montado sobre un goniómetro giratorio y un detector. El portamuestras, situado en posición, gira según la trayectoria de un haz colimado de rayos X, mientras que un detector de estos rayos, que se encuentra montado en un brazo, gira alrededor para captar las señales difractadas de los mismos.

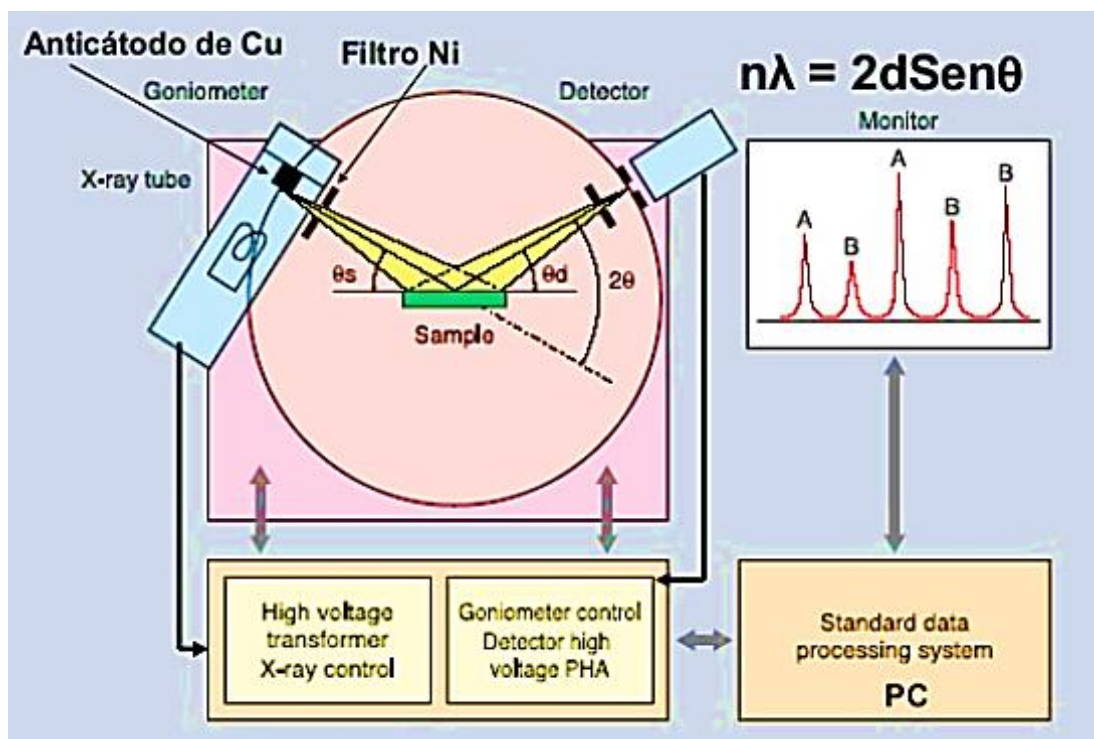


Figura 2.12. Difracción de rayos X

Una vez que se obtiene el difractograma, el cual es un gráfico que en abscisas indica el ángulo de difracción y en ordenadas la intensidad correspondiente, y los datos de la muestra analizada, la identificación consiste en hallar en la base de datos el mineral cuyo difractograma corresponde. Como la base de datos de difracción en polvo contiene miles de entradas, es necesario utilizar un método sistemático. Actualmente, la mayoría de los laboratorios utilizan la identificación automática mediante software, que son proporcionados por los mismos proveedores de equipos de difracción.

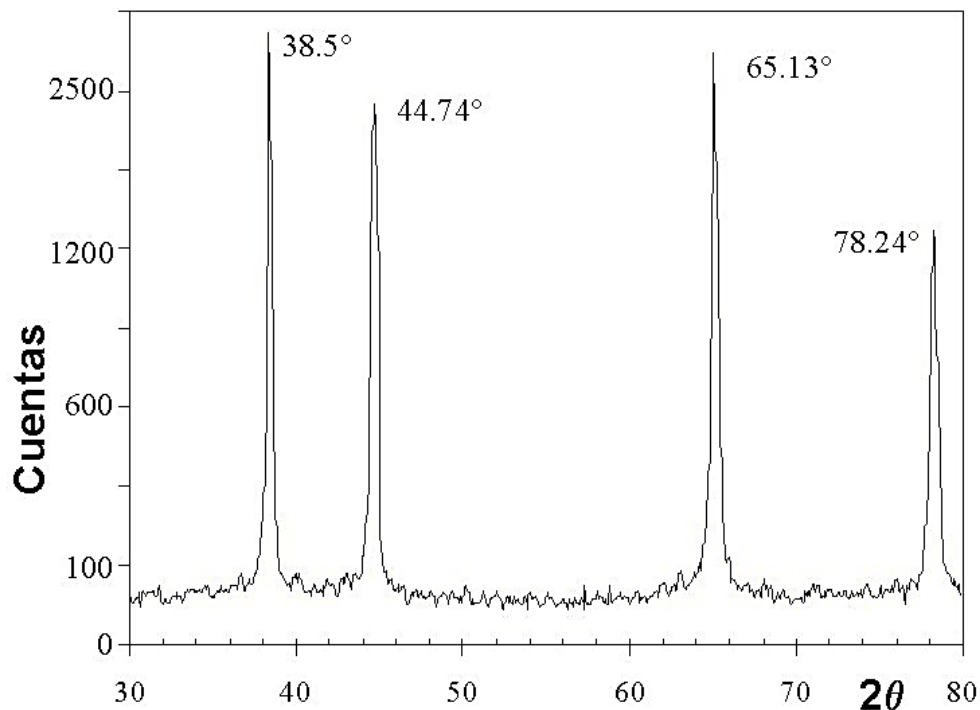


Figura 2.13. Difractograma del aluminio

En otras palabras, el difractograma de rayos-X es la huella digital del compuesto y se deben verificar tanto la posición de los picos como sus intensidades. Por esto, es una técnica muy poderosa para la identificación de compuestos e incluso de mezclas. Para ellos, se compara el difractograma con los almacenados en la base de datos PDF "Powder Diffraction File" donde hay más de 200,000 difractogramas diferentes. Por ejemplo, grabando el difractograma de un gis, se puede determinar que está compuesto de yeso $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, comparando el difractograma de una tiza con el de la base de datos.

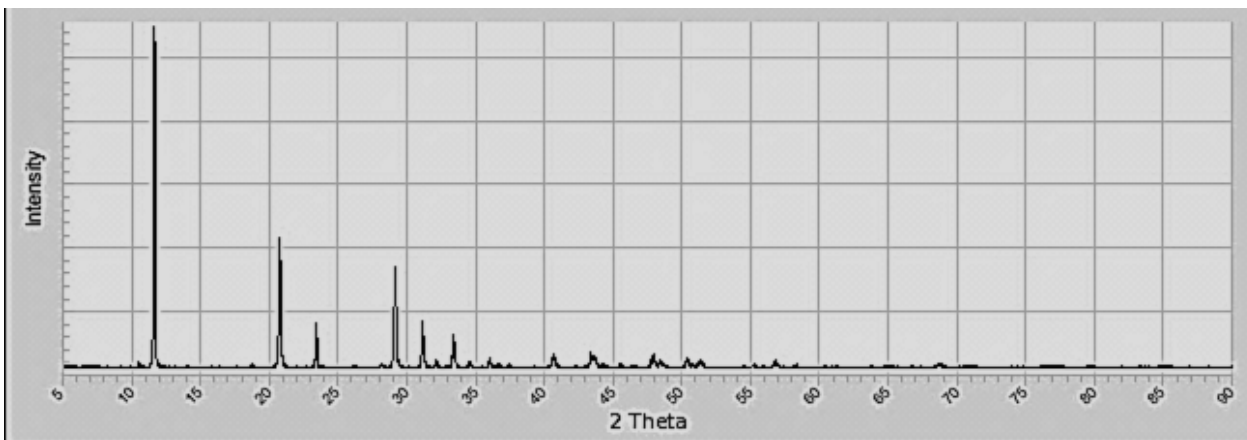


Figura 2.14. Diffractograma típico del yeso (gypsum)

2.4. Tamaño de grano

Una de las mediciones microestructurales cuantitativas más comunes es aquella del tamaño de grano de metales y aleaciones.

En metales, por lo general, es preferible un tamaño de grano pequeño que uno grande. Los metales de grano pequeño tienen mayor resistencia a la tracción, mayor dureza y se distorsionan menos durante el temple, así como también son menos susceptibles al agrietamiento. El grano fino es mejor para herramientas y dados. Todos los metales experimentan crecimiento de grano a altas temperaturas. Sin embargo, existen algunos aceros que pueden alcanzar temperaturas relativamente altas (alrededor de 1800°F o 982 °C) con muy poco crecimiento de grano, pero conforme aumenta la temperatura, existe un rápido crecimiento de grano. Estos aceros se conocen como aceros de grano fino. En un mismo acero puede producirse una gama amplia de tamaños de grano

En todos los métodos para expresar el tamaño de grano es preciso proyectar la imagen de la estructura sobre la pantalla de un equipo metalográfico y obtener una fotomicrografía, numerosos procedimientos han sido desarrollados para estimar el tamaño de grano, estos procedimientos están sintetizados en detalle en la norma ASTM-E112. los métodos más conocidos y utilizados son:

- Método ASTM para aleaciones ferrosas.
- Método de Graff- Snyder

- Método de Hilliard
- Método comparativo ASTM para aleaciones no ferrosas
- Método planimétrico de Jeffries
- Método de Heyn

Algunos tipos de tamaño de grano son medidos, tamaño de grano de la ferrita, tamaño de grano de la austenita y tamaño de grano de la austenita previa. Cada tipo presenta problemas particulares asociados con la revelación de estos bordes de manera que puede obtenerse un rango exacto.

2.4.1. Métodos

Método ASTM para aleaciones ferrosas

El método establecido por ASTM consiste en lo siguiente:

- Se obtiene una imagen de la microestructura de granos equiaxiales a 100X
- Se compara con una serie de gráficas correspondientes a los distintos tamaños de grano de la norma ASTM E112
- El número de gráfico más parecido al aspecto de la probeta expresa el tamaño de grano
- Cuando la muestra tiene granos de varios tamaños, el resultado se expresa con dos números de tamaños de grano, indicando el porcentaje correspondiente.
- Si en la observación a 100X se encuentra un tamaño de grano mayores que el número 1 o menores que el número 8, entonces, los granos mayores que los del número 1, se proyectan a 50X en lugar de 100 X y si son comparables al número 2 se designan como del número 0, y si son comparables al gráfico número 1 con tamaño 00.
- Cuando los granos a 100X aparecen más finos que los del gráfico número 8 se proyectan a 200X y se designan como número 9 y 10, si en estas condiciones son comparables a los gráficos número 7 y 8 respectivamente.

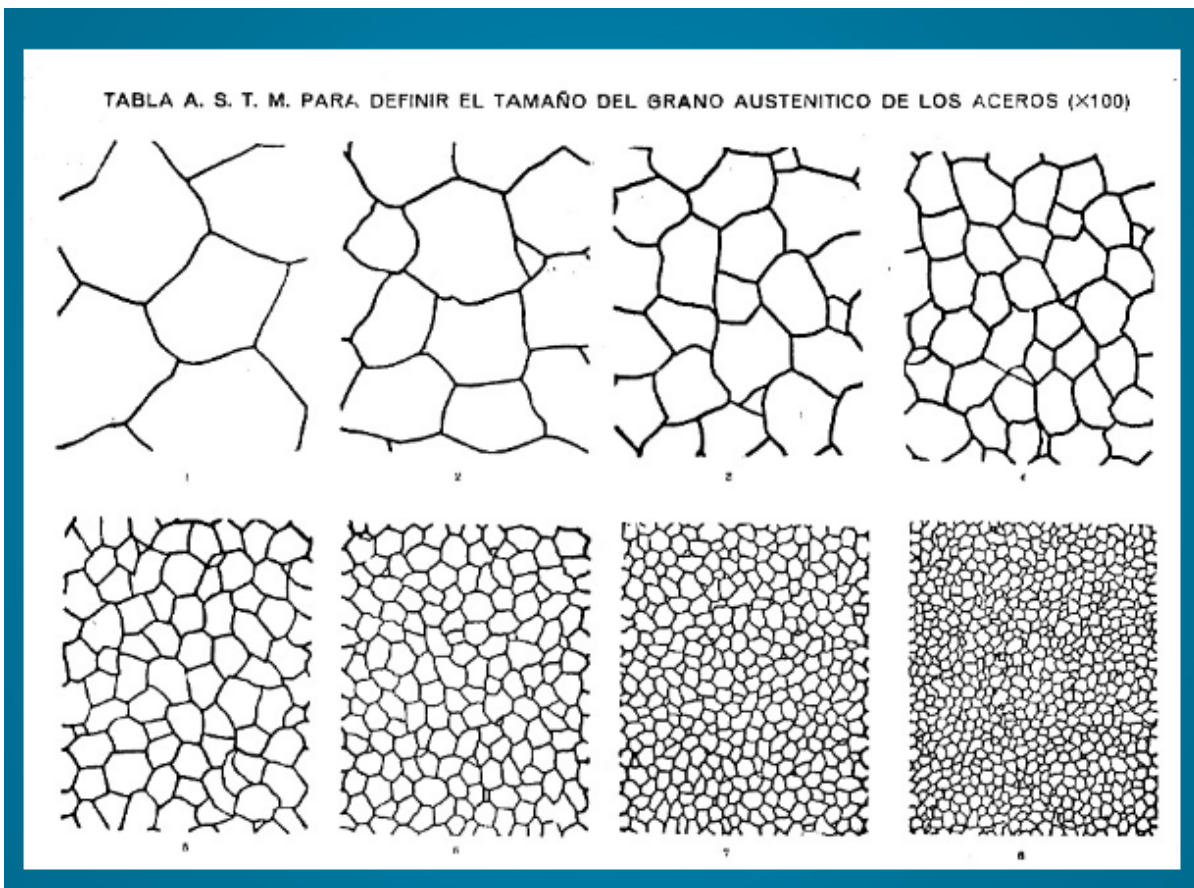


Figura 2.15. Tabla ASTM para definir el tamaño de grano austenítico de los aceros (100 X)

Método planimétrico de Jeffries

El más antiguo procedimiento para medir el tamaño de grano de los metales es el método planimétrico. Un círculo (o rectángulo) de tamaño conocido con un diámetro de 79.8mm (5000 mm²) es extendido sobre una microfotografía o usado como un patrón sobre una pantalla de proyección. El número de aumentos se ajusta para proporcionar al menos 50 granos dentro del área de medición, luego se cuenta el número de granos enteros dentro del área considerada n_1 y el número de granos interceptados por el perímetro de prueba, n_2 . La suma de $n_1 + n_2/2$ se multiplica por el factor de Jeffries f que depende del número aumentos utilizados M obteniéndose un estimado del número de granos por mm² a $1X$, esto es:

$$N_A = \left(n_1 + \frac{n_2}{2} \right) f \dots \dots \dots (2.2)$$

Donde:

N_A es el número de granos por mm^2 a 1X

El valor de f para cualquier número de aumentos M puede calcularse con ayuda de la expresión siguiente:

$$f = \frac{M^2}{A} \dots \dots \dots (2.3)$$

Donde:

M = es el número de aumentos a la que se tomó la fotomicrografía

A = es el área del círculo o rectángulo analizado, normalmente, igual a 5000mm^2

El tamaño de grano ASTM designado con la letra G puede obtenerse con cualquiera de las expresiones siguientes:

$$G = \frac{\log N_A}{[\log 2]} - 2.95 \dots \dots \dots (2.4)$$

O

$$G = [3.322 \log N_A] - 2.95 \dots \dots \dots (2.5)$$

Y el diámetro medio del grano se obtiene con ayuda de la expresión siguiente:

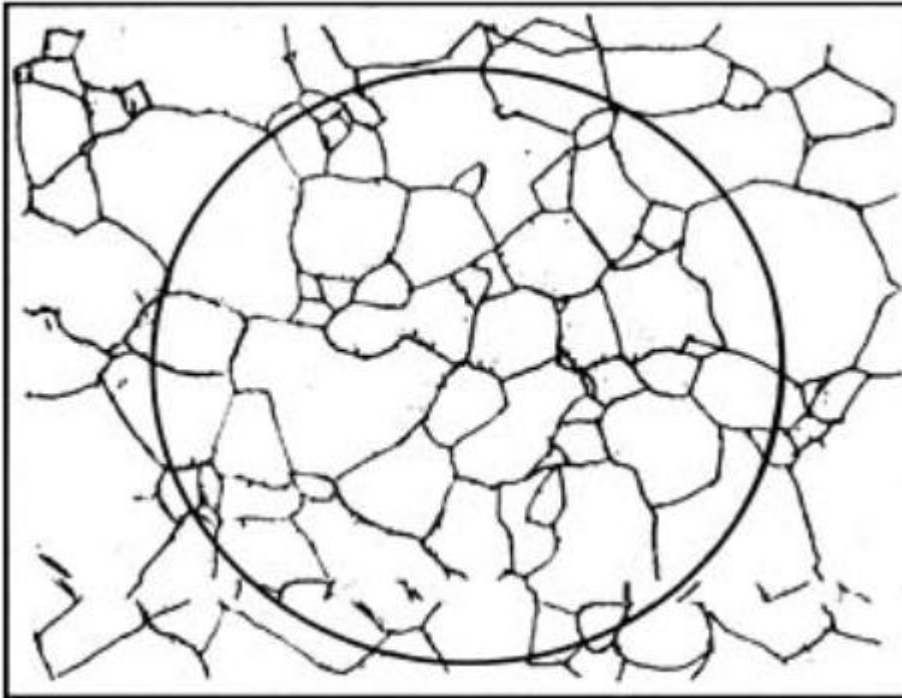
$$\bar{d} \text{ mm} = (\bar{A})^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{(N_A)^{1/2}} \dots \dots \dots (2.6)$$

Nota: Al utilizar rectángulos se recomienda usar las dimensiones mostradas en la tabla 2.2:

Tabla 2.2. Dimensiones recomendadas para áreas rectangulares

x[mm]	y[mm]
70.7	70.7
65.0	77.0
60.0	83.3
55.0	91.0
50	100.0
77	101

Las figuras 2.16, 2.17 y 2.18 ilustran el método planimétrico.



Granos enteros= 44
 Medios granos = 25
 Granos totales= $44+25/2=56.5$
 $A=5000 \text{ mm}^2$
 $M=100X$

$$f = \frac{100^2}{5000} = 2$$

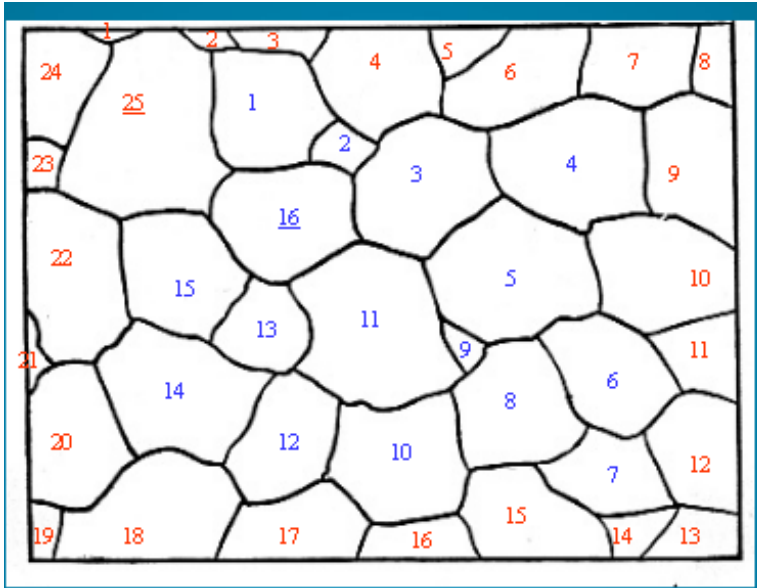
$$N_A = \left(44 + \frac{25}{2}\right) 2$$

$$N_A = 113 \frac{\text{granos}}{\text{mm}^2}$$

$$G = \frac{\log N_A}{[\log 2]} - 2.95$$

$$G = \frac{\log 113}{[\log 2]} - 2.95 = 3.87 \approx 4$$

Figura 2.16. Ejemplo de la medición del tamaño de grano por el método planimétrico (Jeffries). El círculo tiene un diámetro de 79.8 mm para un área de 5000 mm²



Granos enteros= 16
 Medios granos = 25
 Granos totales=16+25/2=28.5
 $A=77 \times 101 = 7777 \text{ mm}^2$
 $M=100X$

$$f = \frac{100^2}{77 \times 101} = 1.29$$

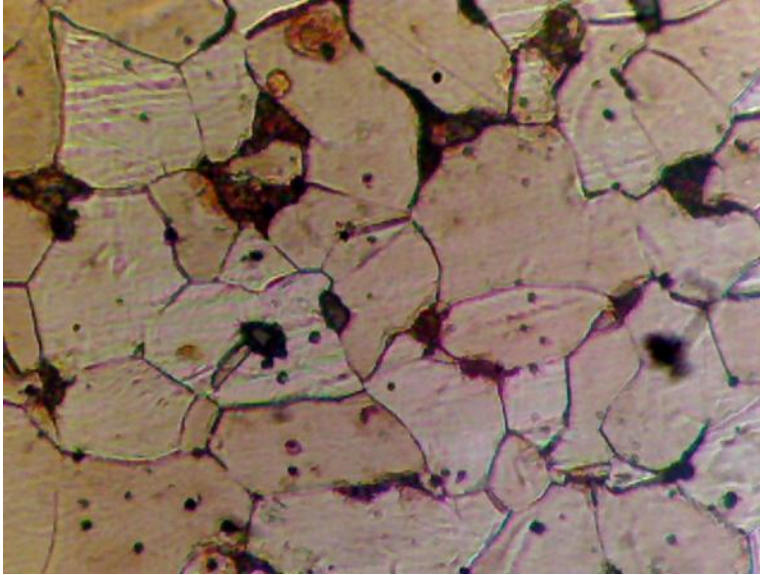
$$N_A = \left(16 + \frac{25}{2}\right) 1.29$$

$$N_A = 36.8 \frac{\text{granos}}{\text{mm}^2}$$

$$G = \frac{\log N_A}{[\log 2]} - 2.95$$

$$G = \frac{\log 36.8}{[\log 2]} - 2.95 = 2.25 \approx 2$$

Figura 2.17. Otro ejemplo de la medición del tamaño de grano por el método planimétrico (Jeffries).



Granos enteros= 26

Medios granos = 21

Granos totales=26+21/2=36.5

A= 77x101 =7777 mm²

M= 500X

Acero bajo carbono

$$f = \frac{500^2}{77 \times 101} = 32.14$$

$$N_A = \left(26 + \frac{21}{2}\right) 32.14$$

$$N_A = 1173.11 \frac{\text{granos}}{\text{mm}^2}$$

$$G = \frac{\log N_A}{[\log 2]} - 2.95$$

$$G = \frac{\log 1173.11}{[\log 2]} - 2.95 = 7.24 \approx 7$$

Figura 2.18. Otro ejemplo de la medición del tamaño de grano por el método planimétrico (Jeffries).

Los resultados anteriores se pueden verificar con ayuda de la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Tabla ASTM de patrones de tamaño de grano.

Número de tamaño de grano ASTM	Número de granos por pulgada cuadrada a 100 aumentos		Diámetro calculado de un grano esférico equivalente en mm. Sin aumento	Sección media calculada de los granos en mm ² Sin aumentos	Número de granos por milímetro cuadrado. Sin aumento		longitud media método Heyn
	Medio	limites			Medio	Limites	
00			0.5640	0.2500	4	3-6	0.4440
0			0.3990	0.1250	8	6-12	0.3130
1	1	0.75-1.5	0.2870	0.0625	16	12-24	0.2220
2	2	1.5-3.0	0.2030	0.0312	32	24-48	0.1560
3	4	3-6	0.1440	0.0156	64	48-96	0.1110
4	8	6-12	0.1010	0.0078	128	96-192	0.0784
5	16	12-24	0.0718	0.0039	256	192-384	0.0543
6	32	24-48	0.0507	0.0019	512	384-768	0.0391
7	64	48-96	0.0359	0.0009	1024	768-1536	0.0271
8	128	96-192	0.0254	0.0004	2048	1536-3072	0.0198
9			0.0176	0.0002	4096	3072-6144	0.0135
10			0.0125	0.0001	8192	6144-12288	0.0099

Métodos de intercepción

El método de intercepción es más rápido que el método planimétrico debido a que la microfotografía o patrón no requiere marcas para obtener un conteo exacto. La ASTM E112 recomienda el uso de un patrón consistente en 3 círculos concéntricos longitud total de la línea de 500 mm (patrón disponible de la ASTM).

La figura 2.19 ilustra el método de intercepción para una aleación de una sola fase

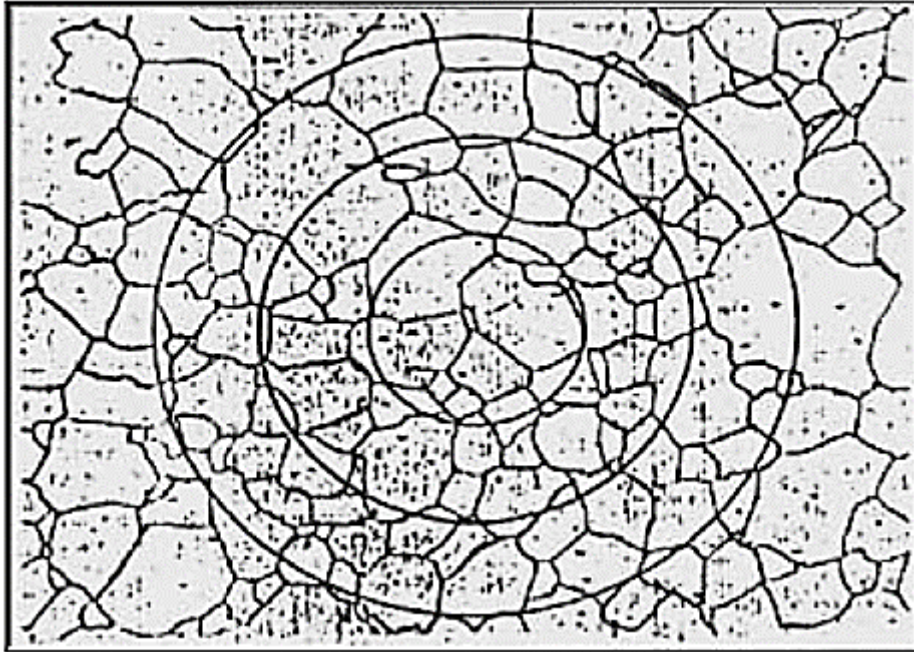


Figura 2.19. Ejemplo de la medición de tamaño de grano usando el método de intersección de Heyn. Los tres círculos concéntricos tienen diámetros de 79.5, 47.8 y 31.8 mm para una línea de longitud total de 500 mm. La ampliación de esta micrografía es de 500 X, por lo tanto, la real es de 1 mm. Un conteo del número de intersecciones de contornos de grano (límite de grano) revela 60 intersecciones de contornos de grano y 7 intersecciones de uniones triples, luego $=7(1.5)+60 = 70.5$ y $PL=70.5/1\text{mm}$, por consiguiente: $L-3=1/PL=0.0142$ mm. El número de tamaño de grano ASTM puede ser calculado así: $G=(-6.6557\log 0.0142)-3.298=8.98$, esto es, más o menos igual a 9.

El método de Hilliard es un método rápido y útil para determinar un equivalente al tamaño de grano ASTM de aceros con la cuenta PL, para ello, se selecciona uno de los círculos y un aumento hasta obtener más de 6 intersecciones por aplicación del círculo.

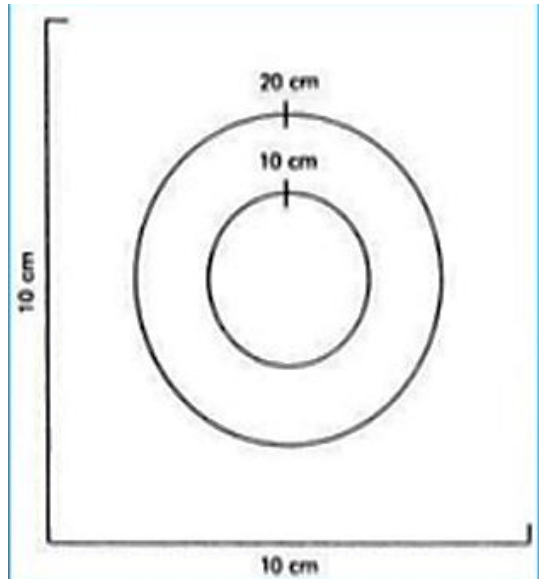


Figura 2.20.

$$G = -10,00 - 6,64 \log L_3$$

$$L_3 = \frac{L_T}{PM}$$

Para granos equiaxiales de tamaño uniforme, el círculo se aplica a la microestructura hasta obtener alrededor de 35 intersecciones.

Figure 72. Nomograph for grain size. Estimation based on Hilliard's method.

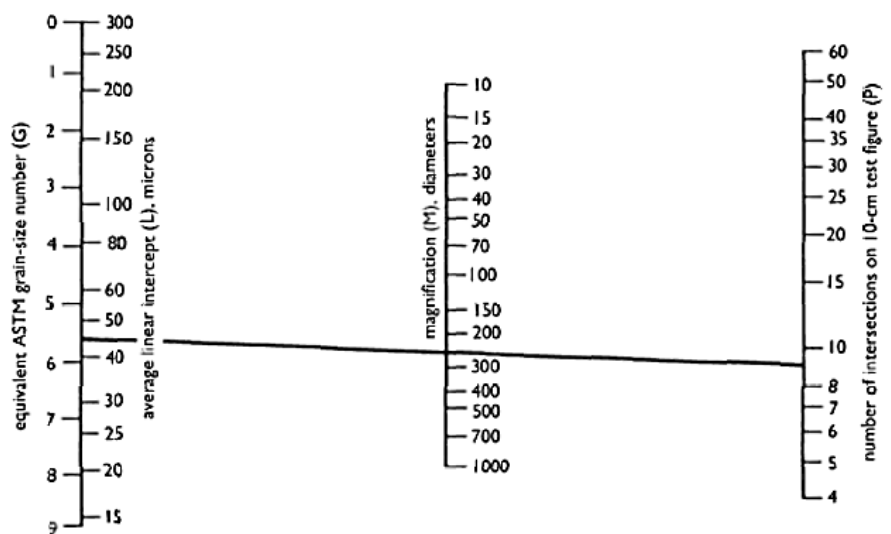


Figura 2.21. Nomograma para estimar tamaño de grano, de acuerdo al método de Hiliard

Método ASTM para aleaciones no ferrosas

Se realiza comparando la microestructura de las probetas desconocidas a 75X con una serie de patrones, los cuales se encuentran en la norma ASTM E112 y consisten en una serie de 10 fotomicrografías de latón de cartuchería a 75X., cada una de ellas se le designa por el diámetro real medio (sin aumento) de los granos y corresponden a valores desde 0.200mm a 0.010 mm

Estructura de grano de 2 fases

El tamaño de grano de una fase particular en una estructura de 2 fases requiere la determinación de la fracción volumen de la fase de interés, es decir por el conteo de puntos. La fase menor (segunda fase) es de puntos contados y la fracción volumen de la fase mayor (fase matriz) se determina por diferencia.

A continuación se aplica sin predisposición una rejilla de prueba circular a la micro estructura, se cuenta el número de granos de la fase de interés interceptada por la línea de prueba N_a . La longitud de intercepción media lineal de los granos alfa L_{3a} se determina por:

$$L_{3a} = (VV) (L/M) / N_a \dots\dots\dots (2.11)$$

Donde:

L es la longitud de la línea y

M es la amplificación.

El tamaño de grano ASTM puede ser determinado de las tablas en ASTM E o por el uso de la ecuación (17) de la norma ASTM.

El método se ilustra en la figura 3.



Figura 2.22. Ejemplo de la determinación de tamaño de grano en una aleación de 2 fases usando el conteo de puntos y el de intercepciones.

2.5. Inclusiones no metálicas

El acero contiene inclusiones no metálicas debido a la naturaleza del proceso de elaboración en el estado líquido, figuras 2.7 y 2.8. Estas inclusiones pueden ser **óxidos, sulfuros, nitruros, carburos**, etc.. La población de inclusiones del tipo óxidos en un semielaborado de acero producido por colada continua se divide generalmente en un gran número de microinclusiones, generadas durante el proceso de desoxidación del acero, con un tamaño en el orden de los micrones, y un pequeño número de macroinclusiones, generadas durante la operación de colado, con un tamaño en el orden de los centenares de micrones. La composición y las propiedades de las microinclusiones son decisivas desde el punto de vista de la colabilidad del acero líquido, de su procesamiento en el estado sólido y de sus propiedades en el uso final.

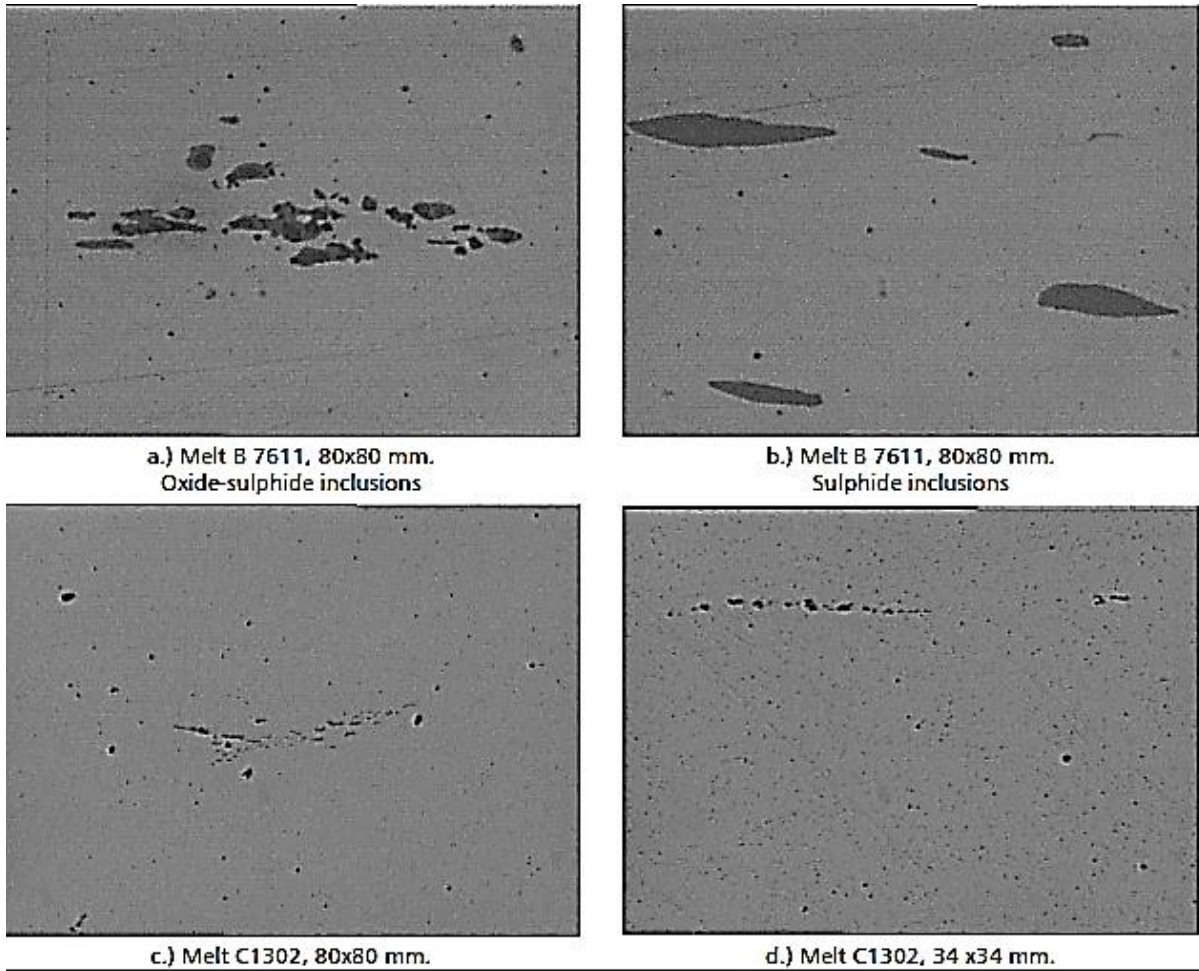
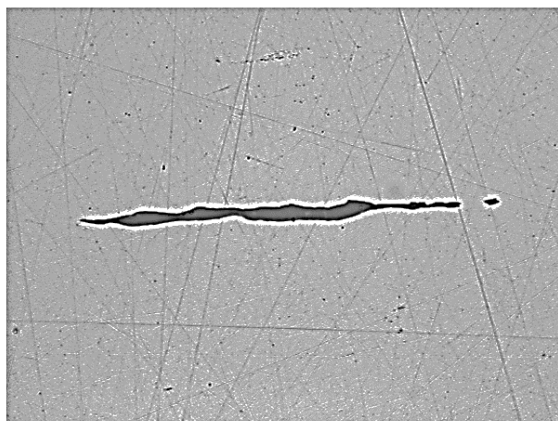
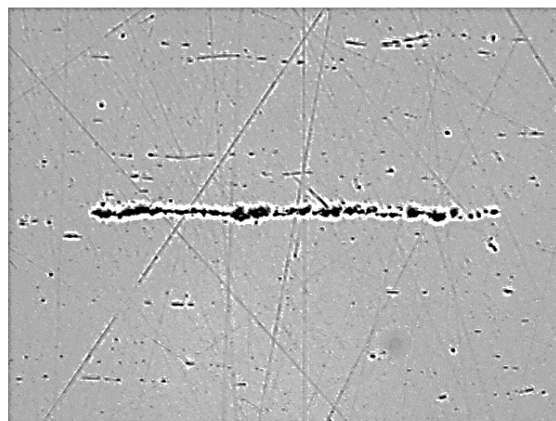


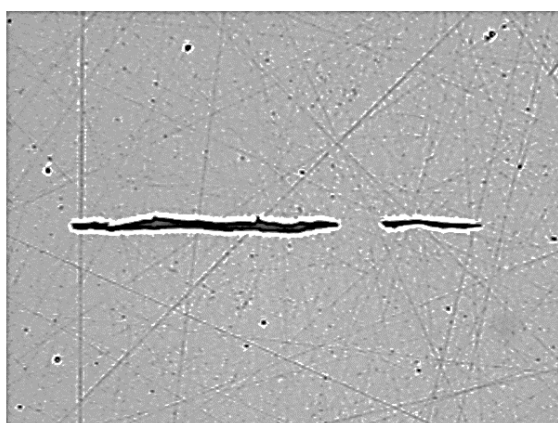
Figura 2.23. Algunas inclusiones en los aceros. (A. Gigovi]-Geki] Et Al.: Analyse And Research Of Nonmetallic Inclusions For Steel 100cr6)



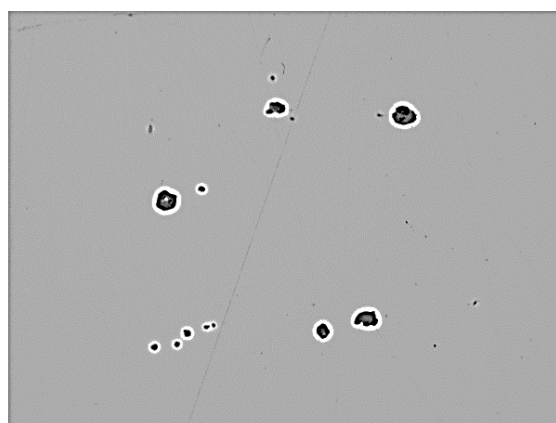
A) Sulfide



B) Alumina



C) Silicate



D) Globular Oxide

Figura 2.24. Inclusiones en los aceros

El problema de la mala colabilidad es el que se genera cuando el acero líquido atraviesa conductos refractarios de pequeño diámetro como la válvula de cuchara y la buza del repartidor de colada continua. En ese momento, si las inclusiones están en estado sólido o tienen alta viscosidad, son propensas a adherirse a la superficie del refractario, debido a que en la capa límite la velocidad del líquido tiende a cero, formando depósitos que impiden el paso del acero. Esto tiene consecuencias sobre la calidad del acero, el rendimiento metálico y la productividad de la planta

CAPITULO 3

ALEACIONES

Aleación

Una aleación se puede definir como un material con propiedades metálicas constituídas por dos o más elementos, de los cuales, al menos uno tiene que ser un metal.

3.1. Aleaciones ferrosas

Los metales ferrosos son el hierro y sus aleaciones, el hierro dulce o forjado, el acero y la fundición. Son los más utilizados debido a su bajo coste de extracción y obtención.

El hierro es el elemento químico (Fe) que constituye el 5% de la corteza terrestre (2º metal más abundante). No está presente en estado puro sino en combinación con otros elementos en minerales: magnetita, siderita, hematita,...

El hierro tiene alta temperatura de fusión, más de 1,500°C. Este es el motivo por lo que su metalurgia fue tardía, posterior al cobre y al bronce. Suponen a 3ª Edad de los Metales, la Edad de Hierro (700 a.C.).

El dominio de la metalurgia del hierro y sus aplicaciones fueron cruciales para el avance de la agricultura, de la ganadería, guerras, ...

3.1.1. Hierro con 0.05% C

El bajo contenido en carbono de este acero hace que comúnmente ni siquiera sea denominado acero, sino que se le conozca como hierro dulce. Observado a pocos aumentos, muestra una estructura de granos equiaxiales de ferrita α (como la ferrita δ no se presenta, generalmente, a temperatura ambiente, a la ferrita α se le suele denominar simplemente ferrita). A mayores aumentos, se aprecia otro constituyente situado en los límites de grano de la ferrita. Siguiendo el proceso de enfriamiento de este material desde la región austenítica, hasta temperatura ambiente, puede deducirse la naturaleza de dicho constituyente. Este acero, tiene una composición tal que hará que el material sufra la transformación eutectoide que,

como puede apreciarse en el diagrama Fe-C, se extiende desde el 0.022 al 6.67% de carbono. Además, como su contenido en C es inferior a la composición eutectoide (0.8% C), se encuadra entre los denominados hipoeutectoides. El enfriamiento del acero entre las temperaturas A_3 y A_1 produce la transformación de γ en α (a esta última se le denomina ferrita preeutectoide, por formarse con anterioridad a la transformación eutectoide). El remanente de fase γ que queda cuando el material se encuentra a una temperatura un infinitésimo por encima de A_1 es el que sufre la transformación eutectoide ($\gamma \leftrightarrow \alpha + Fe_3C$), dando lugar al constituyente denominado perlita. La perlita es un agregado de las fases α y cementita (Fe_3C), que se disponen en forma de láminas alternas. Aplicando la regla de la palanca se puede calcular que la cantidad de γ en esta situación es muy pequeña ($\approx 3.7\%$) y, por tanto, también lo será la cantidad de perlita formada. Debido a esto, la perlita tiende a disgregarse, de modo que la ferrita se incorpora a los granos de ferrita preeutectoide, y la cementita se segrega a los límites de grano de dicha ferrita preeutectoide.

3.1.2. Hierro pudelado

Se trata de un acero con contenido en carbono similar al de la muestra anterior (0.05% C) pero de aproximadamente un siglo de antigüedad. Su microestructura está formada por una matriz de granos equiaxiales de ferrita (en color claro) y unas "fibras" de color oscuro que se corresponden con impurezas cerámicas propias de un afino aún poco desarrollado. A este antiguo método de afino se le denominaba pudelado. Fue creado por Henry Cort hacia el año 1780, y entre sus principales características cabe decir que permitía reducir notablemente la cantidad de carbono del material, obteniéndose un acero muy maleable, pero con el inconveniente de presentar restos de escoria.

El posterior proceso de laminación del acero produce la orientación de las escorias en la dirección de deformación. El carácter cerámico de las escorias conlleva que la temperatura a la que se ha realizado la deformación en caliente no sea suficiente para hacerlas recrystalizar, como sí lo hacen los granos de ferrita. La disposición de las impurezas en forma de fibras hace que este acero sea bastante tenaz. Actualmente, muchos materiales híbridos se fabrican según esta estructura de matriz dúctil reforzada por fibras de otro material resistente.

Tabla 3.1. Características principales de las aleaciones ferrosas.

Material	Característica	Propiedades	Aplicaciones
Hierro forjado, pudelado o "dulce"	Contenido de Carbono inferior al 0.03% y escoria atrapada.	<ul style="list-style-type: none"> • De color plateada. • Se oxida con facilidad y se agrieta internamente. • Blando, cuanto más puro. • Muy dúctil y maleable. • Buen conductor de la electricidad. • Admite la forja para moldearlo. • Difícil soldadura. 	Este hierro muestra una gran resistencia a la corrosión, es muy dúctil y se emplea en la fabricación de tuberías, remaches, placas, etc. También se le suele denominar hierro dulce, forjado o suave.
Aceros	Contenido de Carbono entre 0.03% - 2.0%	<ul style="list-style-type: none"> • Excelentes propiedades mecánicas: dureza, tenacidad, resistente a esfuerzos • Más duros cuanto más carbono. • Bajo coste de obtención. • Se oxidan con facilidad. • Permiten buena soldadura. • Admiten la forja y el mecanizado. 	<p>a) Aceros al carbono, simples o comunes: son los constituidos solo por hierro y carbono. Se emplea en herramientas, clavos, tornillos, relojes, vehículos ferroviarios, automóviles, embarcaciones, perfiles de vigas, piezas...</p> <p>b) Aceros aleados o especiales: pasan por un afino para añadir otros metales o no metales y mejorar sus propiedades físicas y mecánicas. Se emplean en maquinaria, corte, equipos quirúrgicos, vehículos espaciales, reactores nucleares. Los aceros inoxidable o INOX están aleados con cromo y níquel.</p>
Fundiciones	Contenido de Carbono entre 2%-6.7%	<ul style="list-style-type: none"> • Menos dúctiles y menos tenaces que los aceros. • Mala soldadura. • Más duros que los aceros ya que el carbono le da dureza, pero aumenta la fragilidad. • Más fáciles de mecanizar que los aceros. • Funden fácilmente, la menor temperatura que los aceros y el hierro puro (400°C menos). • Permiten la obtención de piezas de diferente complejidad y tamaño empleando moldes. 	<p>Mobiliario urbano: farolas, bancos, fuentes, tapas de alcantarilla.</p> <p>Bancadas o bloques de motores, de maquinaria, calderas, ...</p> <p>Lingotes</p>

3.1.3. Hierros fundidos, colados o fundiciones de hierro

El hierro fundido se utiliza cuando las necesidades de economía, facilidad de fabricación o diversidad de piezas que se puedan fabricar, priman sobre las demás necesidades de un material. Trabajar con fundiciones de hierro requiere un alto conocimiento de los principios de conformación y técnicas apropiadas. Esto se debe a las características microestructurales y la menor densidad de las fundiciones de hierro.

Una de sus principales aplicaciones está en la industria automovilística donde se encuentran engranajes, volantes, discos de frenos, bloques de motores, entre otros. Las fundiciones son bastante utilizadas gracias a su buena resistencia a la compresión y a la fatiga.

Tipos de fundiciones de hierro

Las fundiciones de hierro están compuestas por una matriz de hierro con un alto contenido de carbono. El porcentaje más bajo de carbono de una fundición puede ser de 2.08%. Las fundiciones más conocidas comercialmente llegan hasta un 4.5% pero se conocen casos que superan esta cantidad.

Existen tres tipos de fundiciones de hierro que son los más conocidos a nivel industrial.

Fundición blanca: presenta carbono y silicio en su composición. Estas fundiciones son conocidas como insoldables. Esto se debe a que en su estructura el carbono cristaliza combinado con el hierro formando la cementita. Esta fase es bastante dura y frágil, con alta tendencia a la fisuración.

Las fundiciones blancas son bastante utilizadas por su alta dureza. Aunque se han conocido casos exitosos de reparaciones sobre ellas, no se recomienda este tipo de procedimiento.

Fundición gris: en la fundición gris el carbono está en forma de laminillas, figura 3.1, lo que hace que esta fundición sea soldable. Tiene buena resistencia a la compresión. Sus propiedades mecánicas son adecuadas para un gran número de

actividades. Es un material satisfactorio para maquinarias. Aunque sus propiedades son superadas por la fundición nodular, la fundición gris sigue siendo ampliamente utilizada.

Las aplicaciones típicas del hierro gris incluyen: pedestales para máquinas, herramientas, herramientas de arado, bloques de motores de automóvil, piezas que necesiten un maquinado final, entre otros.

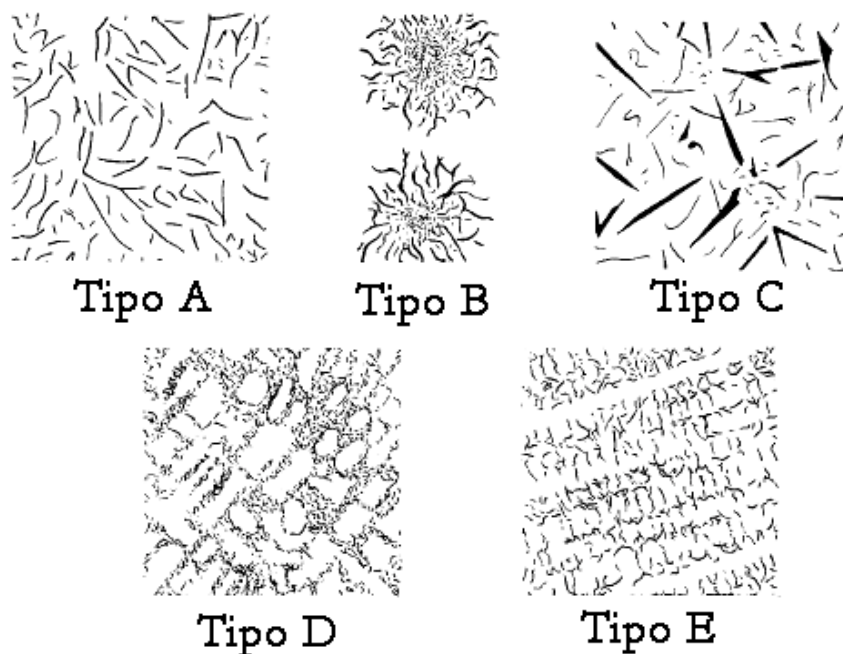


Figura 3.1. Morfología de hojuelas de grafito presentes en hierro gris de acuerdo a la norma estandarizada ASTM Standar A-247

Fundición nodular: a diferencia de la gris y la blanca, la fundición nodular contiene magnesio o cerio en su composición química. Este elemento hace que el carbono se cristalice en forma de nódulos. Ha sido bastante aceptada debido a sus buenas propiedades mecánicas, similares a las de un acero al carbono. Se conoce como fundición nodular o dúctil y es relativamente fácil de producir.

3.2. Fases presentes en las aleaciones ferrosas

Ferrita

Es una solución sólida intersticial de carbono en una red cúbica centrada en el cuerpo de hierro (BCC). Admite hasta un 0.021 % C en solución a la temperatura eutectoide. Es el constituyente más blando del acero. Su resistencia es de 28 kg/mm² (2.7 MPa). Es ferromagnético siendo su temperatura de Curie de 768°C. A partir de esta temperatura hasta los 910°C su comportamiento es paramagnético, por lo que antigua y equivocadamente se le creyó otra fase denominándosele hierro beta.

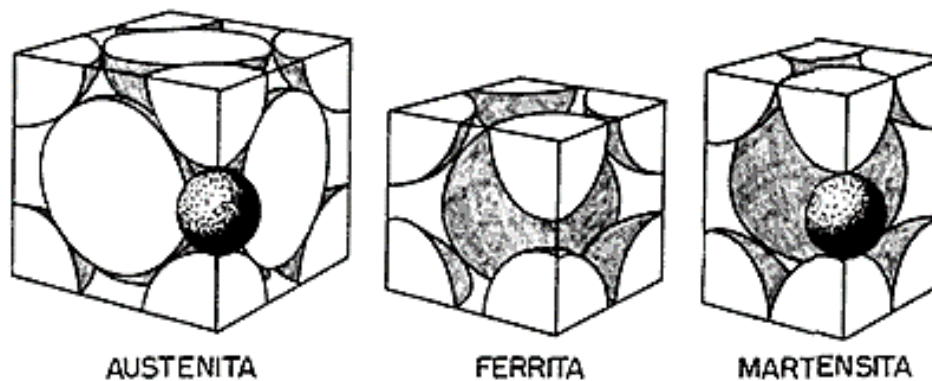


Figura 3.2. Estructuras en el acero

Austenita

Solución sólida intersticial de carbono en hierro con estructura cúbica centrada en las caras (FCC).

Es la fase con mayor capacidad para disolver carbono, pudiendo incorporar hasta un 2.0% cuando se encuentra a 1148°C.

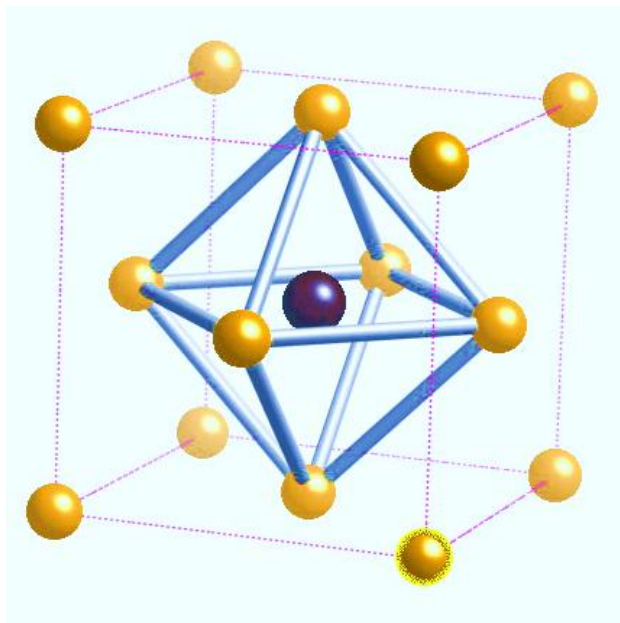


Figura 3.3 . El átomo de C en la austenita (posición $\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}$)

Se denomina de este modo en reconocimiento al metalurgista británico Roberts-Austen (1843–1902), entre cuyas contribuciones destacan el haber publicado el primer diagrama Fe-C en 1897, y ser el primero en realizar medidas cuantitativas de la difusión en estado sólido, después de que A. Fick estableciese sus leyes

Cementita

Es el carburo de hierro Fe_3C con un contenido fijo de carbono del 6.67%. Es el constituyente más duro del acero alcanzando una dureza de 68 HRC. También la morfología de la cementita es muy variada siendo destacables algunas estructuras típicas. Se consideran las siguientes en los aceros:

- Cementita secundaria
- Cementita eutectoide
- Cementita terciaria

En los aceros, la cementita libre, no asociada con otras fases suele aparecer en los aceros hipereutectoides, como cementita secundaria, formando una red continua enmarcando una estructura granular formada por colonias de perlita. También,

aparece como consecuencia de una precipitación en estado sólido en aceros con muy poco carbono, como consecuencia de la disminución de la solubilidad del mismo por debajo de la temperatura de transformación eutécticoide. Se conoce como cementita terciaria.

La cementita no libre, únicamente aparece asociada a la ferrita, como láminas finas alternadas de una y otra, cuyo agregado se conoce como perlita. Son también destacables las formas que la cementita adopta como la esferoidita.

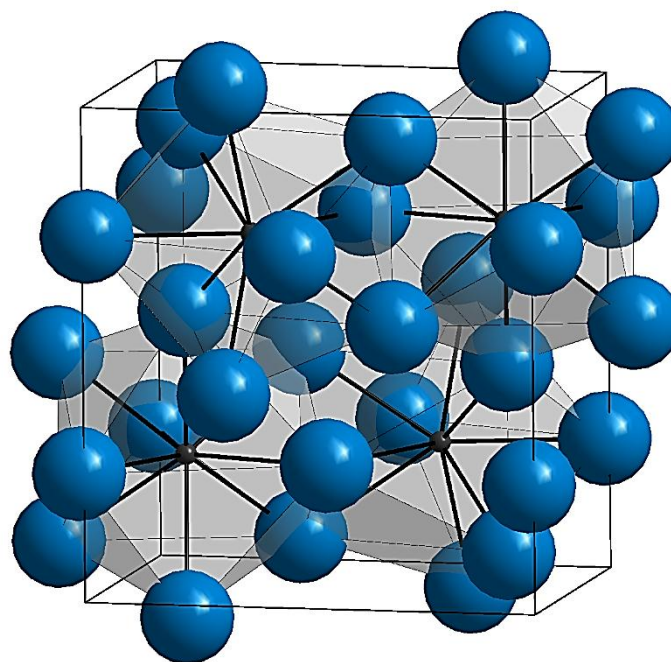


Figura 3.4. Estructura ortorrómbica de la cementita

Perlita

Es un microconstituyente bifásico. Está formado por granos alargados (considerando las tres direcciones son láminas) de cementita en una matriz ferrítica (figura 3.5). Cuando esta estructura laminar es muy fina (las láminas son muy delgadas) la perlita se ve al microscopio óptico como negra. Sin embargo ambas fases, ferrita y cementita, en condiciones normales de ataque son blancas. El color oscuro o negro lo producen el gran número de límites de grano existentes entre la matriz ferrítica y las láminas de cementita. Se comprende que cuanto más anchas sean las láminas (se habla entonces de perlita abierta o basta) la tonalidad se irá aclarando hasta poder

distinguirse las distintas láminas, no por ello la perlita pierde su carácter de microconstituyente.

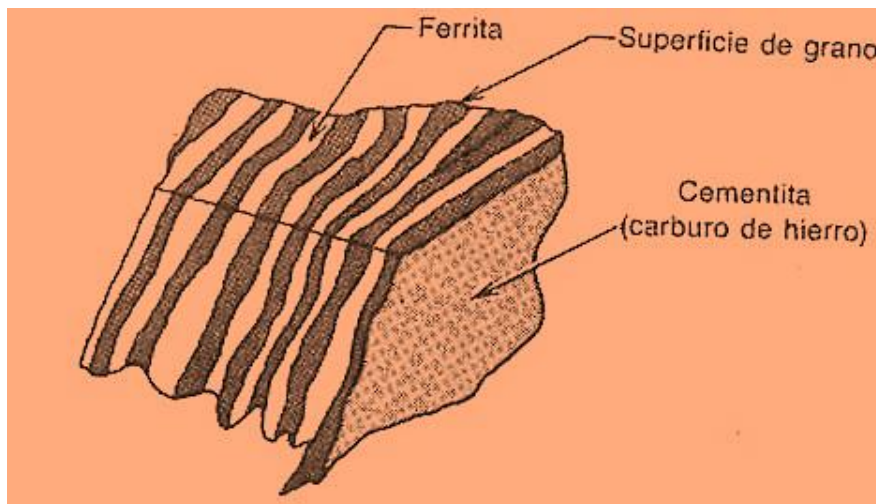


Figura 3.5. Grano de perlita

Ledeburita

Está constituida por por austenita y cementita, por generarse a partir de una transformación eutéctica, debería aparecer en forma de láminas alternas de austenita y cementita. No obstante, como la transformación sucede a elevada temperatura, mas que por láminas, este microconstituyente aparece formado por dendritas alternas de austenita y cementita. La micrografía de la figura 3.4 se corresponde con una aleación del 2.5% C a temperatura ambiente. A dicha temperatura, la de la ledeburita, gracias a la transformación eutectoide, se ha transformado en perlita. En la micrografía se observan las dendritas de austenita transformada (perlita), en una matriz blanca de cementita.

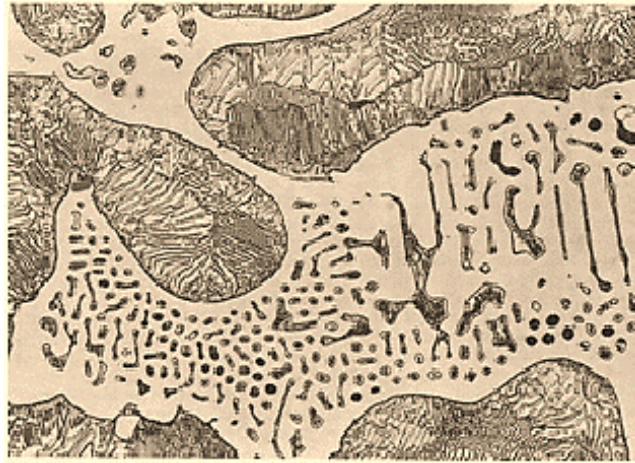


Figura 3.6. Ledeburita.

Se denomina ledeburita como agradecimiento a las aportaciones de Adolf Ledebur a la investigación metalúrgica.

Martensita

Es una fase metaestable de estructura tetragonal, obtenida por un enfriamiento brusco de una solución sólida intersticial y que se forma mediante un movimiento de cizalladura en la red. Osmod (1902) la describía así: "(al observar al microscopio)... pueden verse agujas o fibras rectilíneas aún más finas orientadas en direcciones paralelas y separadas o no por una matriz de apariencia granular o vermicular". Debe añadirse que dichas agujas aparecen sólo claramente cuando el porcentaje de carbono es alto siendo en otro caso la apariencia más parecida a hebras de paja amontonada. Su dureza depende del porcentaje de carbono que tenga en solución y está comprendida entre 25 y 67 HRC, aproximadamente.

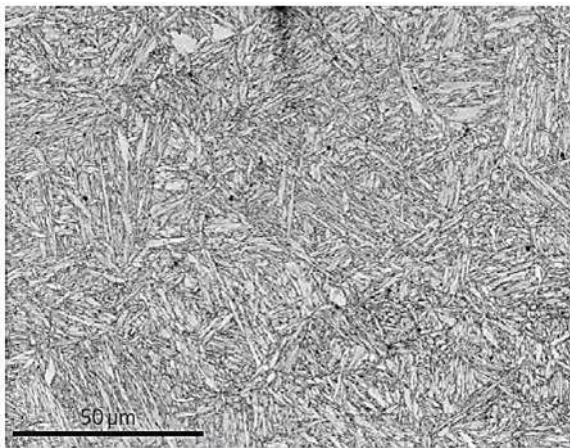


Figura 3.7. Martensita

Bainita

La historia de la bainita se remonta a finales de los años 1920, en el transcurso de unos estudios pioneros para la época sobre la transformación isoterma de la Austenita a temperaturas superiores a la Martensita, fueron la base para que Davenport y Bain años después se percataran de una micro estructura de forma acicular oscura que era muy diferente a la Perlita o Martensita observadas en el mismo acero. En un principio la llamaron microestructura Martensita \pm Troostita, ya que consideraron que tenía una forma martensítica pero templable, esta estructura fue objeto de numerosos estudios debido a sus interesantes propiedades y los estudios fueron publicados por Bain en 1939 pero también es destacable la contribución de Lewis (1929) y Robertson (1929) que fueron los primeros en publicar los resultados de la transformación isoterma de la Austenita, los experimentos de Bain y Davenport fueron realizados con hilos de acero y mostraron el carácter progresivo de la transformación isotérmica de la Austenita sus experimentos tuvieron éxito debido al uso de muestras muy delgadas y al método de representar los datos en forma de tiempo-temperatura-transformación los resultados fueron tan elegante que se siguieron usando este tipo de curvas (diagramas TTT). En 1934, el personal de investigación del laboratorio decidió llamar a la microestructura obtenida por los experimentos Bainita en honor de su colega CE Bain, que había inspirado a los estudios. El nombre de Bainita no se utilizó inmediatamente y fue usado más bien en un documento relativo a la nomenclatura de productos de transformación en los aceros.

Los aceros bainíticos son más duros y resistentes que los perlíticos porque tienen una estructura más fina a base de partículas diminutas de cementita en una matriz ferrítica por este motivo exhiben una interesante combinación de resistencia y ductilidad. En la industria no fueron muy explotados a pesar del optimismo inicial sobre el potencial de los aceros bainíticos. El desarrollo comercial tardó muchos años en establecerse porque los aceros no eran mejores que los martensíticos revenidos, en parte debido a la gruesa Cementita y partículas asociadas con Bainita y a que las técnicas de enfriamiento utilizadas en aquella época no permitían la obtención de aceros bainíticos. No fue hasta 1958 que Irving y Pickering plantearon la producción continua de aceros bainíticos utilizando tratamientos térmicos. El auge del uso de este tipo de aceros y el perfeccionamiento de su obtención es de los últimos 25 años con el uso de aceros con Cr y Mo. En la transformación bainítica y de acuerdo con Bhadeshia, la nucleación tiene lugar con difusión de carbono en condiciones de paraequilibrio. Al igual que en la martensita, el cambio de forma hace que el mecanismo de crecimiento de la ferrita bainítica sea adifusional. La bainita crece en forma de placas delgadas con el fin de minimizar la deformación asociada a los desplazamientos.

Clasificación

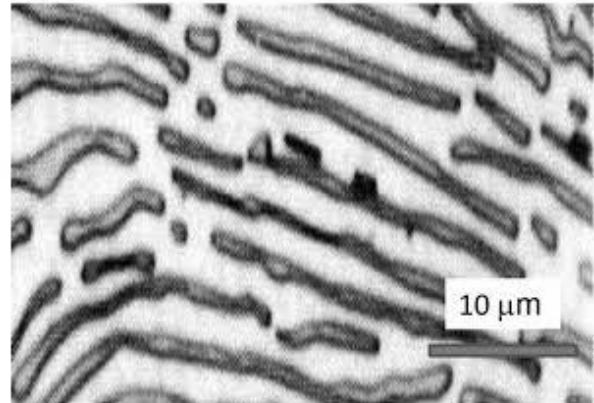
La bainita formada entre 350 y 550°C, se llama bainita superior o plumosa, en ella la cementita está en forma de barras y no en placas. Estudios han mostrado que la ferrita y la Cementita nuclean independientemente y que el elemento que controla el crecimiento de la Bainita superior es la difusión del carbono en la Austenita. El crecimiento de la ferrita y de la Cementita es cooperativo, la primera rechaza el carbono que es recibido por la segunda. Sin embargo esta estructura es demasiado fina para ser resoluble en el microscopio óptico; además, al atacarse químicamente se observa como material claro.

La bainita formada por transformación isotérmica entre 250 y 350°C se conoce como Bainita inferior. Debido a que la difusión del carbono es baja a esta temperatura, la Cementita precipita internamente en las placas de ferrita. A diferencia de lo que sucede en la Martensita en la cual los carburos precipitan en dos o más direcciones, en la Bainita inferior la precipitación de carburos tiene una orientación predominante

en la cual la plaquillas de Fe_3C forman 55° con el eje longitudinal de la aguja de ferrita. En la formación de Bainita inferior, la ferrita se produce a partir de la Austenita por desplazamiento de corte y luego precipita la Cementita al interior de la ferrita. Se observa al microscopio óptico en forma de placas oscuras.

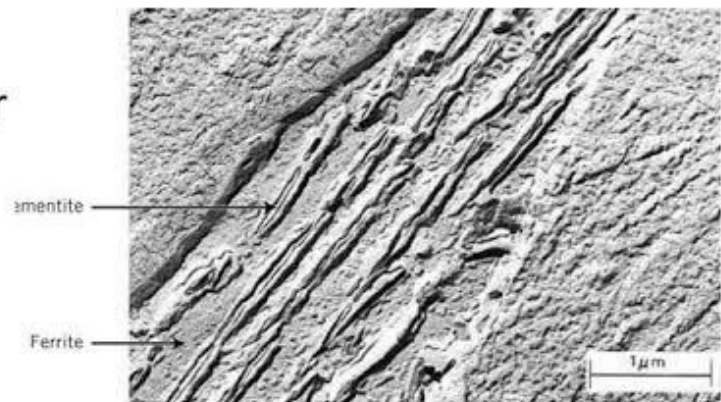
Perlita

La separación y grosor de las láminas de cementita tiene una magnitud de varios micrones



Bainita

La separación y grosor de las láminas de cementita está en el orden del micrón
Transformación Intermedia




Laboratorio de Materiales 

Figura 3.8. Diferencias entre la perlita y la bainita

La dureza en la Bainita aumenta linealmente con la concentración de carbono, aproximadamente $190 \text{ HV}^*(\%C)$ (Irvine y Pickering, 1965) Este comportamiento explica porque la Perlita crece de carbono enriquecido y Austenita, por lo tanto contiene una fracción mucho mayor de Cementita que la Bainita. La bainita tiene una dureza variable de 40 a 60 Rc comprendida entre las correspondientes a la perlita y a la martensita

Resistencia a la tracción: aunque hay pruebas de que la Bainita conserva un exceso de concentración de carbono, incluso después de recocido (Bhadeshia y Waugh, 1981)

y esto podría ser determinante para su resistencia, existen ensayos de densidad de dislocación y el número de densidad de partículas de carburo que se basa en una descripción macroscópica del rendimiento en que una dislocación de borde genera un gran estrés y una concentración suficiente para estimular una dislocación en una fuente de grano adyacentes, con lo que se transmite a través de los granos. El límite de elasticidad varía a la inversa del tamaño de grano esto nos indica que los carburos no contribuyen mucho a la fuerza de la Bainita es una conclusión del análisis empírico.

3.3. Ferroaleaciones nobles

Estas son aleaciones en forma de lingotes, bloques, barras o formas similares, así como en forma de gránulos o polvos, aglomerados o no, comúnmente utilizado en la industria del acero, como aleación, desoxidante, desulfurizantes o agentes acondicionadores.

Ferroniobio

Descripción: Aleación de hierro con un contenido de niobio de al menos 63 % en masa. Se presenta en forma de piedra color plata brillante, en un intervalo de tamaños de 2 a 13 mm (0.079 in a 0.51 in).

Usos: Se emplea en la industria siderúrgica puesto que incrementa la resistencia y tenacidad, así como genera una reducción del peso, debido al refinamiento del grano en aceros al carbono y aceros HSLA (*High-strength low-alloy*). También se añade al acero inoxidable para detener la fragilización después de la soldadura.



Figura 3.9. Ferroniobio

Ferromolibdeno

Descripción: Aleación de hierro con un contenido de molibdeno de al menos 60 % en masa. Se presenta en forma de piedra color gris brillante, en un intervalo de tamaños de 2 a 10 mm (0.079 in a 0.394 in).

Usos: Se emplea en la industria siderúrgica y de fundición como agente reductor (desoxidante) y aleante para mejorar la resistencia mecánica de hierro fundido y aceros



Figura 3.10. Ferromolibdeno

Ferrovandio 80 10-50 mm

Descripción: Aleación de hierro con un contenido de vanadio de al menos 80 % en masa. Se presenta en forma de piedra color plata brillante, en un intervalo de tamaños de 10 a 50 mm (0.39 in a 1.97 in).

Usos: Se emplea en la industria siderúrgica y de fundición puesto que incrementa la resistencia y tenacidad.



Figura 3.11. Ferrovandio

Ferrotungsteno

El Ferro-tungsteno es una aleación de hierro y tungsteno. Donde el tungsteno determina la calidad del producto final. Se utiliza como aditivo en la Industria Siderúrgica, teniendo un uso importante en herramientas de corte a alta velocidad, para la fabricación de bujías automotrices y en la rama de la soldadura.



Figura 3.12. Ferrotungsteno

CAPITULO 4

ALEACIONES NO FERROSAS

Las aleaciones ferrosas son las más empleadas por: facilidad de obtención, bajo costo de las materias primas y gran resistencia mecánica. Los inconvenientes de los metales ferrosos son la oxidación, dificultad de mecanizado, elevado punto de fusión y baja conductividad eléctrica y térmica respecto a otros metales. Por esto son necesarios los metales no ferrosos.

Tipos de Metales no ferrosos

Pesados (más de 5,000 kg/m³) cobre, cinc, estaño, cromo, níquel, mercurio, tungsteno, tantalio...

Ligeros (entre 2,000-5,000 kg/m³) aluminio, titanio, litio

Ultraligeros (menos de 2,000 kg/m³) magnesio

4.1. Titanio

De símbolo **Ti**. Número atómico **22**. Densidad **4.45 kg/dm³**. Punto de fusión **1800°C**. Resistencia a la tracción **100 kg/mm²**. Alargamiento **5%**. Resistividad eléctrica **0.8 Ω m²/m**.

Obtención.

Estado Natural. No se encuentra puro en la naturaleza. Constituye los minerales **ilmenita** (FeTiO₃), **rutilo** (TiO₂) y **esfena** (CaO • TiO₂ • SiO₂).

Para obtener el óxido de titanio se tritura el mineral y se mezcla con carbonato de potasio y ácido fluorhídrico produciendo fluorotitanato de potasio (K₂TiF₆). Éste se destila con agua caliente y se descompone con amoníaco. Así se obtiene óxido hidratado amoniacal, que se inflama en un recipiente de platino produciendo dióxido de titanio. Se trata el óxido con cloro, obteniéndose tetracloruro de titanio; que se reduce con magnesio para producir titanio metálico, que se funde y moldea en lingotes.

Aplicaciones

Es muy **maleable y dúctil en caliente**, debido a su resistencia y su densidad, el titanio se usa en aleaciones ligeras, aleado con aluminio y vanadio, se utiliza en **aeronáutica** para fabricar las puertas de incendios, el fuselaje, los componentes del tren de aterrizaje. Los cuadros de las bicicletas de carreras. Los álabes del compresor y los revestimientos de los motores a reacción.

- Se usa ampliamente en misiles y cápsulas espaciales; las cápsulas Mercurio, Gemini y Apolo fueron construidas casi totalmente con titanio
- Es eficaz como sustituto de los huesos y cartílagos en cirugía.
- Se usa en los intercambiadores de calor de las plantas de desalinización debido a su capacidad para soportar la corrosión del agua salada

4.2. Aluminio

De símbolo **Al**, es el elemento metálico más abundante en la corteza terrestre. Número atómico **13**. Densidad **2,69kg/dm³**. Punto de fusión **660°C**. Resistencia a la tracción **10 kg/mm²**. Alargamiento **50%**. Resistividad **0.026 Ω mm²/m**.

Obtención.

Se obtiene de la **bauxita**, mineral que puede encontrarse en minas a cielo abierto, se tritura y se lava para eliminar otros materiales y sustancias orgánicas.

Posteriormente, se refina para obtener la alúmina, lo que ya es un material comercial de aluminio con el que se pueden obtener lingotes por fundición.

También se produce por el método Bayer, que consiste en:

- La bauxita pulverizada se carga en un digestor que contiene una solución acuosa de sosa cáustica a alta presión y a alta temperatura.
- Se forma aluminato de sodio que es soluble en el licor generado.
- Los sólidos insolubles que contiene el licor, como hierro, silicio, titanio y otras impurezas son filtrados y el producto resultante se bombea a depósitos llamados precipitadores.

- En éstos se agregan finos cristales de hidróxido de aluminio, que sirven de simientes, y en torno a ellos van creciendo en las tres dimensiones los cristales de hidróxido de aluminio.
- El hidróxido de aluminio adherido a los cristales se calcina en hornos a 1200°C. El producto obtenido se refrigera hasta temperatura ambiente, con lo que se obtiene la alúmina para la fusión y obtención de aluminio de buena calidad.
- La alúmina obtenida se procesa en cubas electrolíticas, que funcionan con un baño de crolita (fluoruro de aluminio sódico), el ánodo es un electrodo de carbón y el cátodo es la propia cuba. Tras este proceso se obtiene el aluminio metálico, que es moldeado y procesado en hornos de concentración para la obtención de aluminio de alta calidad.

Para obtener 1 kg de aluminio se requiere 2 kg de alúmina, los que son producto de 4 kg de bauxita y 8 kWh de energía eléctrica.

Aplicaciones

- Debido a su **baja densidad** es muy útil para construir aviones, vagones ferroviarios y automóviles, y para las aplicaciones en las que es importante la movilidad y la conservación de energía.
- Por su **elevada conductividad térmica**, el aluminio se emplea en utensilios de cocina y en pistones de motores de combustión.
- Es **fácilmente moldeable** por lo que se usa en carpintería de aluminio.
- Dada su escasa absorción de neutrones, se utiliza en reactores nucleares.
- Es muy **maleable** por lo que se obtiene papel de aluminio de 0,002 mm de espesor, utilizado para proteger alimentos y otros productos perecederos, por su compatibilidad con comidas y bebidas se usa en envases, envoltorios flexibles, botellas y latas de fácil apertura. El reciclado de estos recipientes supone un gran ahorro de energía.
- La **resistencia a la corrosión** por agua del mar, lo hace útil para fabricar cascos de barco y elementos que estén en contacto con el agua.
- Debida a su **resistividad eléctrica** es el material de elección para sustituir al cobre como conductor eléctrico.

Tabla 4.1. Fases comunes en aleaciones de aluminio

ALEACIONES –FUNDIDAS	CONSTITUYENTES DE FASES	ESTADO – TRATAMIENTO TERMICO
1xx.x (Al > 99.00%), 7xxx(Zn)	Si, β -AlFeSi, α -Al(FeSi)	...
2xx.x (Cu), Al-Cu-Mg, Al-Cu-Mn, Al-Cu-Si-Mg, Al-Cu-Mn-Mg-Ni, Al-Cu-Mg-Ni, Al-Cu-Si	Si, Al ₂ Cu, Al ₂ CuMg, Al ₇ Cu ₂ Fe, Al ₅ Cu ₂ Mg ₈ Si ₆ , β -AlFeSi, α -Al(FeMnSi), AlCuFeNi, Al ₆ Cu ₃ Ni	Al ₂ Cu, Al ₂ CuMg, Al ₂₀ Cu ₂ Mn ₃ , Al ₇ Cu ₂ Fe, AlCuFeNi, Al ₆ Cu ₃ Ni, Al ₃ Ni
3xx.x (Si + Cu/Mg), Al-Cu-Si, Al-Si-Cu-Mg-Ni, Al-Si-Cu-Mg, Al-Si-Mg, Al-Si-Mg-Fe, Al-Si-Mg-Ti, Al-Si-Mn-Mg-Cu	Si, Al ₂ Cu, Al ₂ CuMg, Al ₇ Cu ₂ Fe, Al ₅ Cu ₂ Mg ₈ Si ₆ , β -AlFeSi, α -Al(FeMnSi), AlCuFeNi, Al ₆ Cu ₃ Ni, Mg ₂ Si, Al ₃ Ni, Al ₉ NiFe, Al ₈ Mg ₃ FeSi ₂	Si, Al ₂ Cu, Al ₂ CuMg, Al ₇ Cu ₂ Fe, AlCuFeNi, Al ₆ Cu ₃ Ni, Al ₃ Ni, Al ₂₀ Cu ₂ Mn ₃ , Al ₈ Mg ₃ FeSi ₂ , Al ₅ Cu ₂ Mg ₈ Si ₆ , β -AlFeSi, α -Al(FeMnSi)
4xx.x (Si), Al-Si, Al-Si-Cu, Al-Si-Fe	Si, Al ₂ Cu, β -AlFeSi, α -Al(FeMnSi)	Si, Al ₂ Cu, β -AlFeSi, α -Al(FeMnSi)
5xx.x (Mg), Al-Mg	Mg ₂ Si, Al ₆ (FeMn), Al ₃ Mg ₂ , Al ₁₈ Mg ₃ Cr ₂	Mg ₂ Si, Al ₆ (FeMn), Al ₃ Mg ₂ , Al ₁₈ Mg ₃ Cr ₂
7xx.x (Zn)	Al ₁₈ Mg ₃ Cr ₂ , Al ₃ Fe, Al ₇ FeCr, MgZn ₂	...
8xx.x (Sn)	Si, Sn, Cu ₆ Sn ₅ , Al ₃ Ni	Si, Sn, Cu ₆ Sn ₅ , Al ₃ Ni, Al ₆ Cu ₃ Ni

4.3. Magnesio

De símbolo **Mg**. Número atómico **12**. Densidad **1,74 kg/dm³**. Punto de fusión **650°C**. Resistencia a la tracción **18 kg/mm²**. Resistividad eléctrica **0.8 Ω m²/m**.

Aplicaciones

El magnesio aleado con aluminio se usa para piezas de aeronáutica; en miembros artificiales, aspiradoras, esquís, carretillas, cortadoras de césped, muebles de exterior e instrumentos ópticos

Como desoxidante en la fundición de metales.

El magnesio puro se utiliza en flashes fotográficos, bombas incendiarias y señales luminosas y pólvora para fuegos artificiales, porque su combustión da una luz blanca muy intensa.

Formando distintos compuestos químicos tiene diferentes utilidades es diverso.

- El carbonato de magnesio (MgCO₃), se usa como material refractario y aislante.

- El cloruro de magnesio ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), se emplea como material de relleno en los tejidos de algodón y lana, en la fabricación de papel y de cementos y cerámicas.
- El citrato de magnesio ($\text{Mg}_3(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), se usa en medicina y en bebidas efervescentes;
- El hidróxido de magnesio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), se utiliza en medicina como laxante, "leche de magnesia", y para refinar azúcar

4.4. Cobre

El cobre puro tiene la mejor conductividad eléctrica y térmica de cualquier metal comercial. En la actualidad, más de la mitad del cobre producido se utiliza en aplicaciones eléctricas y electrónicas, y el cobre forma aleaciones con mayor facilidad que la mayoría de los metales.

El cobre (Cu) es, después del hierro y el aluminio, de los metales más consumidos en el mundo, fundamentalmente en los sectores de la construcción (tuberías de cobre para agua y gas) que representa el 40% del destino de la producción de cobre y el sector eléctrico (cables) que representa otro 27%.

Encuadrado en la parte central del sistema periódico como elemento de transición, en el grupo 11 junto con la plata y el oro, es un metal de color rojizo, inerte y muy resistente a la corrosión, lo que explica que sea uno de los metales que puede tenerse en estado más puro.

El cobre es un metal blando, con un índice de dureza 3 en la escala de Mohs (50 en la escala de Vickers), es resistente al desgaste, y posee una muy alta conductividad térmica y eléctrica. De hecho es un excelente conductor de la electricidad (la plata, el cobre y el oro, en este orden son los metales mejores conductores) que unido a su buena ductilidad y maleabilidad lo hacen el metal más empleado para la fabricación de cables eléctricos.

Para mejorar sus propiedades mecánicas de resistencia el cobre puro se suele mezclar con otros elementos, formando aleaciones que mejoran sus prestaciones resistentes, aunque sea a costa de perder algo de su buena conductividad original.

Hay más de 400 aleaciones de cobre, cada una con una combinación única de propiedades para adaptarse a muchas aplicaciones, procesos de fabricación y entornos. Las aleaciones se crean al hacer un material sólido a partir de dos o más metales diferentes.

Algunos ejemplos de aleaciones de cobre se describen a continuación:

Latón : es el término genérico para una gama de aleaciones de cobre y zinc con diferentes combinaciones de propiedades que incluyen resistencia, maquinabilidad, ductilidad, resistencia al desgaste, dureza, color, conductividad eléctrica y térmica y resistencia a la corrosión.

Bronce: Las aleaciones de bronce están hechas de cobre y estaño y fueron las primeras en desarrollarse hace unos 4.000 años durante la Edad del Bronce.

Cobre y Níquel: estas aleaciones tienen una excelente resistencia a la corrosión marina y al bio-encrustamiento. La adición de níquel al cobre mejora la resistencia a la corrosión sin cambiar su ductilidad.

Cobre-Níquel-Plata: Las aleaciones de níquel-plata están hechas de cobre, níquel y zinc, y algunas veces se consideran como brasieres especiales. Tienen una atractiva apariencia plateada en lugar del típico color cobrizo. Las aplicaciones típicas incluyen monedas y objetos ornamentales.

Cobre-Berilio: estas aleaciones de cobre berilio se utilizan por su alta resistencia y buenas conductividades eléctricas y térmicas. Es similar en propiedades mecánicas al acero de aleación de alta resistencia. Sin embargo, tiene una mejor resistencia a la corrosión que el acero. Hay dos grupos de aleaciones de berilio-cobre: aleaciones de alta resistencia y aleaciones de alta conductividad.

4.5. Zinc

El zinc es un elemento natural que se extrae del mineral de blenda. Un proceso metalúrgico, que incluye la tostación de la blenda, la reducción del óxido de zinc obtenido y el refinado por electrólisis, permite obtener el zinc que se emplea en la construcción. Las láminas, las bobinas y los rollos destinados a la fabricación de productos habituales proceden del laminado en caliente y en frío. Todas nuestras bobinas se acaban con un laminado en frío.

Composición química

Los productos se fabrican a partir de zinc de alta calidad Z1 (zinc puro al 99,995%) definido por la norma EN/ DIN 1179 con el añadido de:

- titanio: mín. 0.06% - máx. 0.2%,
- cobre: min. 0.08% - máx. 1.0%,

El añadido de cobre aporta dureza a la aleación y aumenta su resistencia mecánica, lo que le confiere una pátina natural y un aspecto más gris (la pátina era más blanca con las antiguas aleaciones).

El añadido de titanio aumenta la resistencia a la deformación del material (especialmente bajo el efecto de esfuerzos térmicos alternados).

Zamak

La denominación Zamak, industrialmente extendida, proviene del nombre comercial dado por la New Jersey Zinc Corporation, que puso a punto, hacia 1930, un procedimiento de fabricación de Zn de pureza 99,99%, que permite la fabricación de aleaciones insensibles a la corrosión intercrystalina, dado que estas aleaciones tienen una cierta propensión a la corrosión intercrystalina. El interés práctico de la adición de aluminio al Zn proviene de que el Al afina el grano del Zn, lo que trae como consecuencia una sensible mejora de las características mecánicas del Zn. El Al dificulta también la gran facilidad a la corrosión que experimenta el Zn en contacto con el Fe, por ejemplo, en los moldes de acero o en los moldes de fundición empleadas

como coquilla para esta fundición inyectada. Por otra parte también el Al mejora la colabilidad del Zn.

El Zamak es una aleación metálica compuesta por 4 elementos, también responsables por la origen de su nombre: **zinc, aluminio, magnesio y cobre.**

Las aleaciones clásicas de los Zamak son:

Zamak-3, cuyos contenidos en Al oscilan entre 4.3 y 3.9; contenido en Mg comprendidos entre 0.06 y 0.03 y el resto Zn;

Zamak-5, es otro tipo de Zamak con Al como en el caso anterior, Mg como en el caso anterior y, además, Cu comprendido entre 1,25 y 0,75. El tercer tipo de Zamak es el que recibe el nombre de

Zamak-2, cuyo contenido en Al oscila entre 4.3 y 3,9, igual que en los dos casos anteriores; Mg también como en los casos anteriores; y Cu, superior al de Zamak-5, concretamente Cu comprendido entre 3,5 y 2,5. Para aluminio superior a 4,5% la resiliencia entonces de las piezas moldeadas es sensiblemente baja. Y como quiera que la colabilidad es máxima para tantos por ciento de Al de 4,0 a 4,5%, por tratarse de la eutéctica, por esta razón, quedan en parte justificadas las composiciones de Al en los Zamak. Una dificultad de estas aleaciones es, como decíamos, su propensión a la corrosión intercrystalina sobre todo en atmósfera húmeda. En este caso el óxido y el carbonato de zinc formados provocan tal aumento de volumen que las piezas coladas se deforman excesivamente, y pueden incluso fragmentarse.

Dependiendo de los porcentuales de estos elementos adicionados al zinc y del uso final, se obtienen las principales y mas utilizadas aleaciones de zamac, a saber, 3, 5 e 8.

Tabla 4.2. Composición química de los principales tipos de Zamak

Aleaciones Zamak	Zamak 3		Zamak 5		Zamak 8	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Cobre (Cu)	0,0	0,10	1,1	0,7	2,6	3,1
Magnésio (Mg)	0,03	0,06	0,03	0,06	0,45	0,065
Aluminio (Al)	3,9	4,3	3,9	4,3	3,5	4,2
Zinco (Zn)	Restante	Restante	Restante	Restante	Restante	Restant

Zinalco

Es una aleación de Zinc (80%), Aluminio (18%) y Cobre (2%). Tiene una densidad intermedia entre el aluminio y el acero, además de una resistencia mecánica similar a la del acero estructural. Algunas de sus aplicaciones son: llaves para cerraduras, contactos eléctricos de baja fricción; y dispositivos de entrada o maquinarias. Es patente mexicana, pero proviene de investigación alemana en la segunda guerra mundial.

Tiene una gran ventaja frente a otras aleaciones base zinc, con el tratamiento térmico adecuado, puede deformarse plásticamente ya sea en frío o en caliente, además con un tamaño de grano de aproximadamente 10 μ m puede ser un material superplástico.

Tabla 4.3. Propiedades físicas del Zinalco.

PROPIEDAD	VALOR NUMERICO
Temperatura de fusión	421°C-481°C
Densidad	5.41g/cm ³
Modulo elástico	110-130Gpa
Conductividad eléctrica	37% de Cu
Conductividad térmica	37% de Cu
Coefficiente de expansión térmica	25 micrómetros/mm ⁰ K
Color	Blanco grisáceo

Tabla 4.4. Propiedades mecánicas del Zinalco

PROPIEDAD	FUNDICION EN ARENA	INYECCION	EXTRUSIÓN	LAMINADO
Resistencia a la tensión (MPa)	290-300	310-320	380-410	270-290
Esfuerzo de cedencia (MPa)	280-300	290-310	280-320	300-310
Deformación máxima (%)	3-5	8-10	30-35	80-100
Dureza RB	50-55	60-65	40-55	25-30

Tabla 4.5. Resumen de Propiedades de las aleaciones no ferrosas.

Metal	Símbolo	Número atómico	Densidad kg/dm ³	Punto de fusión °C	Resistencia a la tracción kg/mm ²	Resistividad Ω mm ² /m	Alargamiento %
Aluminio	Al	13	2,69	660	10	0,026	50
Cobalto	Co	27	8,9	1495			
Cobre	Cu	29	8,9	1083	18	0.017	20
Cromo	Cr	24	7,1	1857			
Estaño	Sn	50	7,28	231	5	0,115	40
Magnesio	Mg	12	1,74	650	18	0,8	
Plomo	Pb	82	11,34	327	2	0,22	50
Titanio	Ti	22	4,45	180	100	0,8	5
Zinc	Zn	30	7,13	419	Aleado-3 Forjado-20	0,057	20

CAPITULO 5

DIAGRAMAS DE FASE

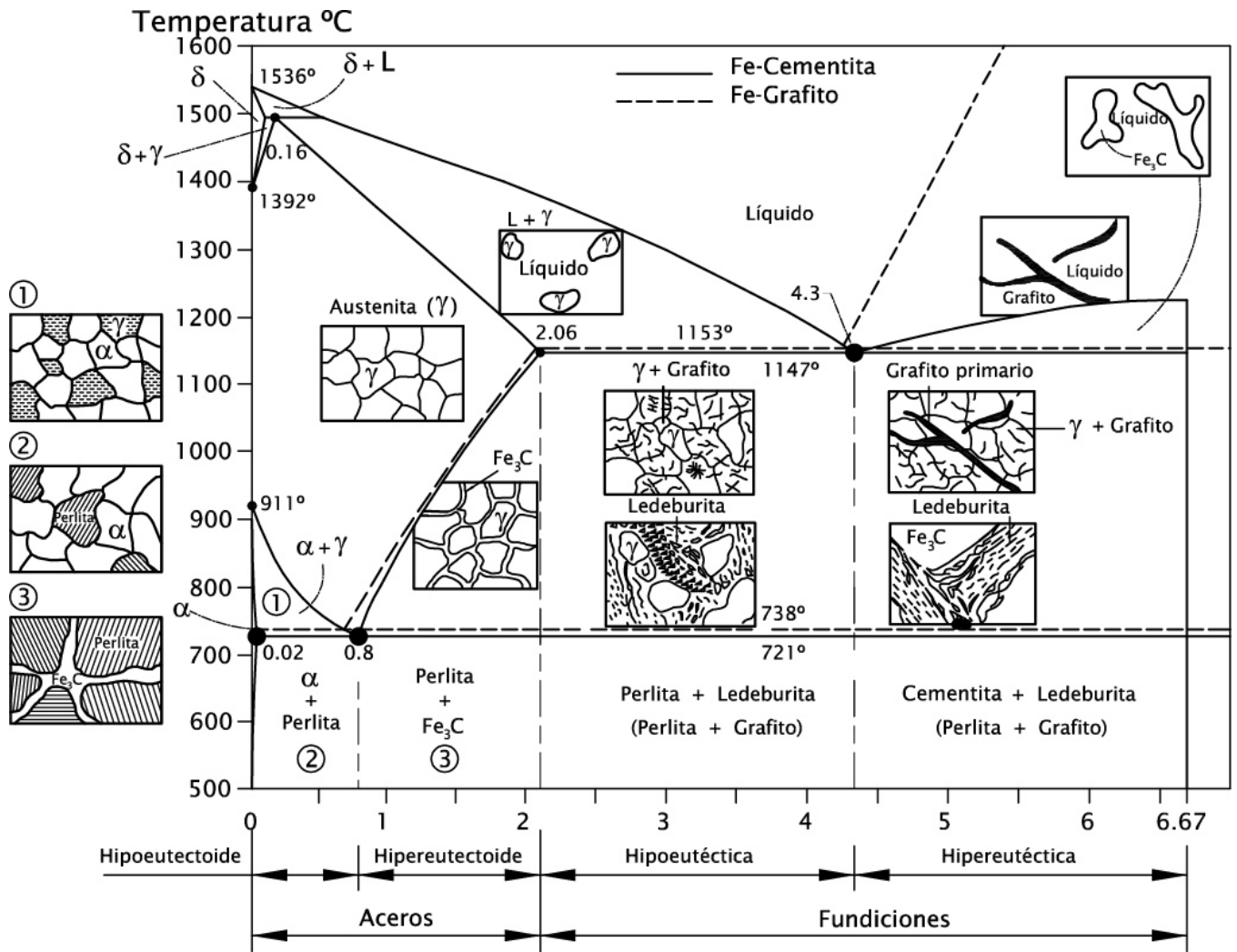
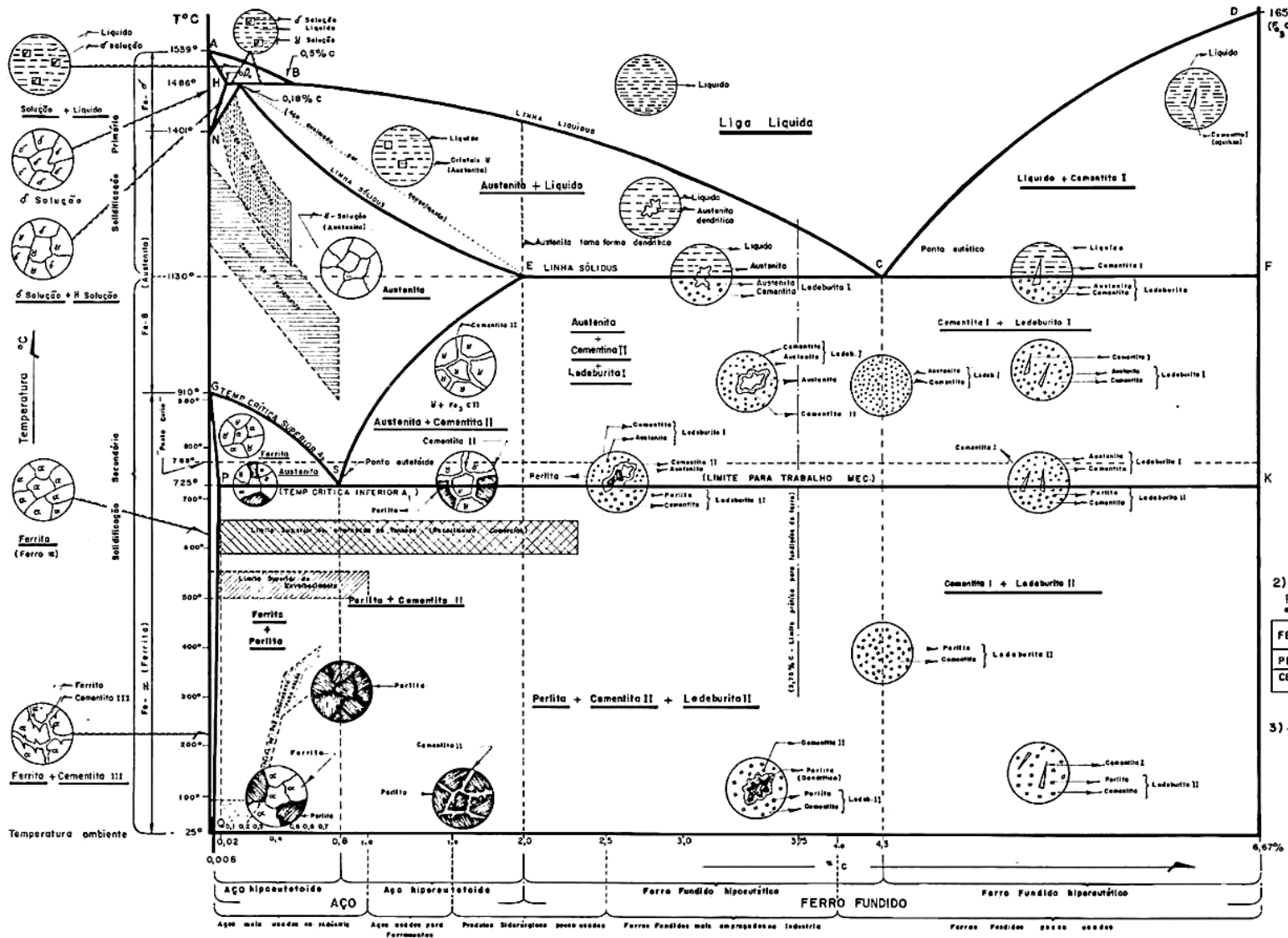


Figura 5.1. Diagrama de fases Fe-Fe₃C



NOTAS

- 1) - Redes Atômicas
 - Diagrama de rede cúbica centrada no corpo (C.C.C.) para Fe-δ: $a = 2,93 \text{ \AA}$
 - Diagrama de rede cúbica centrada no corpo (C.F.C.) para Fe-γ: $a = 3,64 \text{ \AA}$
 - Diagrama de rede cúbica simples (C.C.) para Fe-α: $a = 2,86 \text{ \AA}$

2) **Propriedades Mecânicas**

FERRITA	DUREZA (HV)	ELONGAÇÃO	ALONGAM.
FERRITA	80	30 kgf/mm ²	40%
PERLITA	200	85 "	10%
CEMENTITA	800	100 "	0%

3) - A dureza de MARTENSITA varia com o % de carbono.



Figura 5.2. Diagrama de fases Fe-Fe₃C

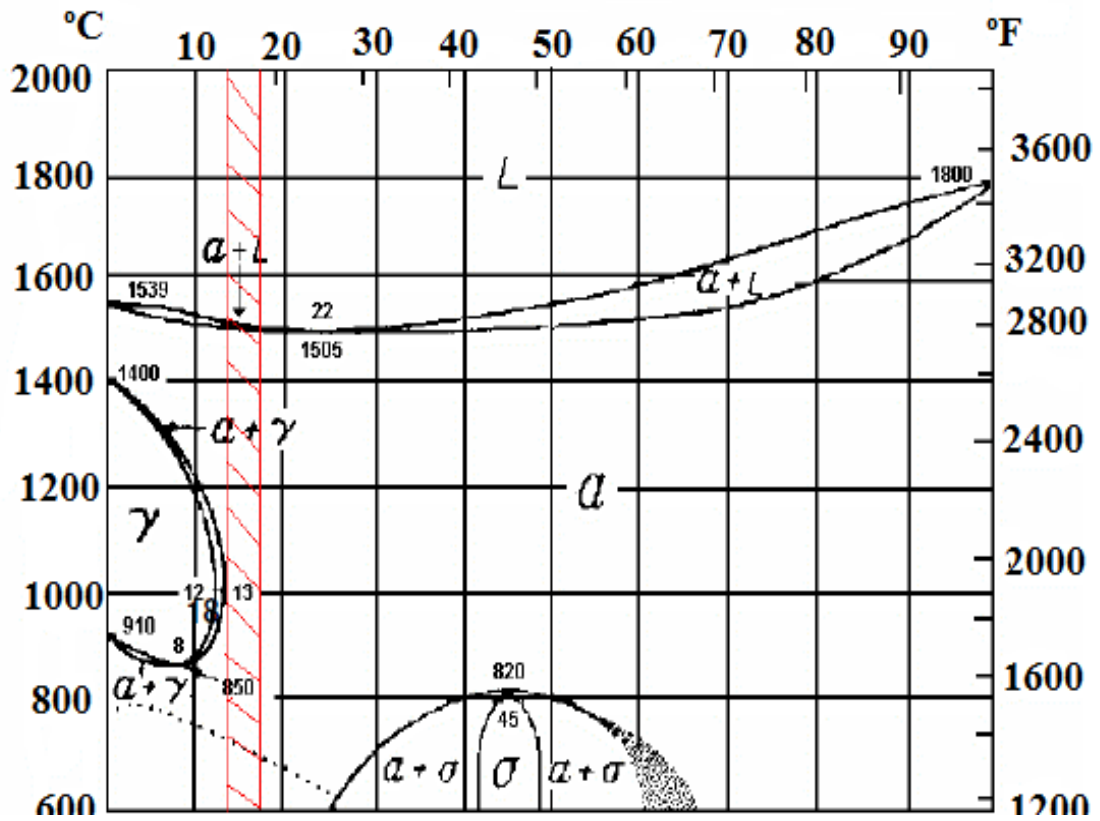


Figura 5.3. Diagrama de fases Fe-Cr

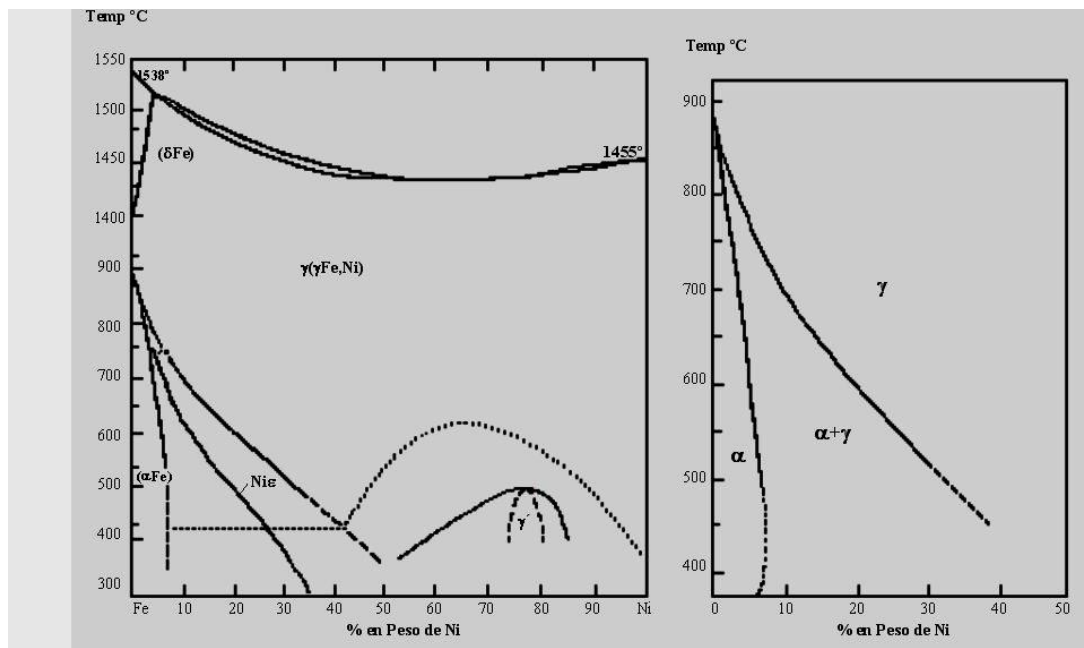


Figura 5.1-5. (a) Diagrama de fases hierro-niquel; (b) Ampliación del lado rico en hierro.

Figura 5.4. Diagrama de fases Fe-Ni

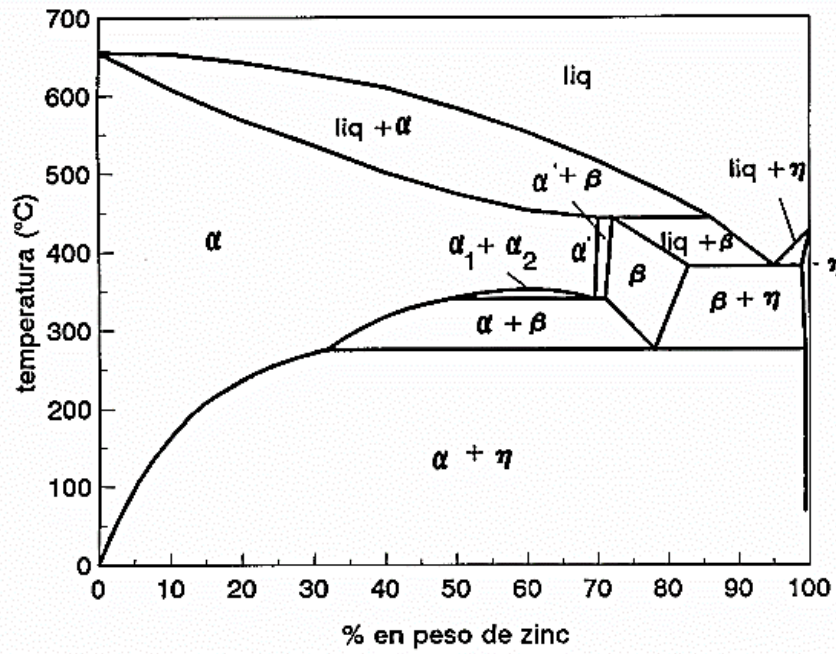


Figura 5.5. Diagrama de fases Al-Zn

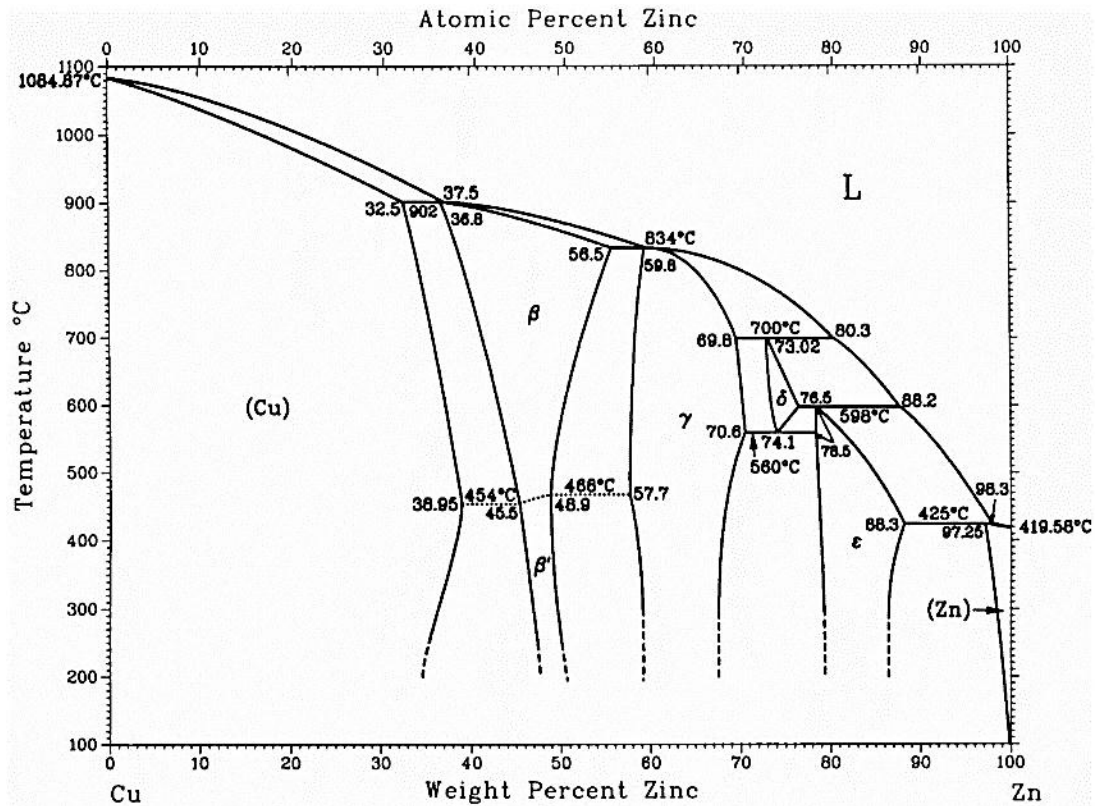


Figura 5.6. Diagrama de fases Cu-Zn

Al-Si

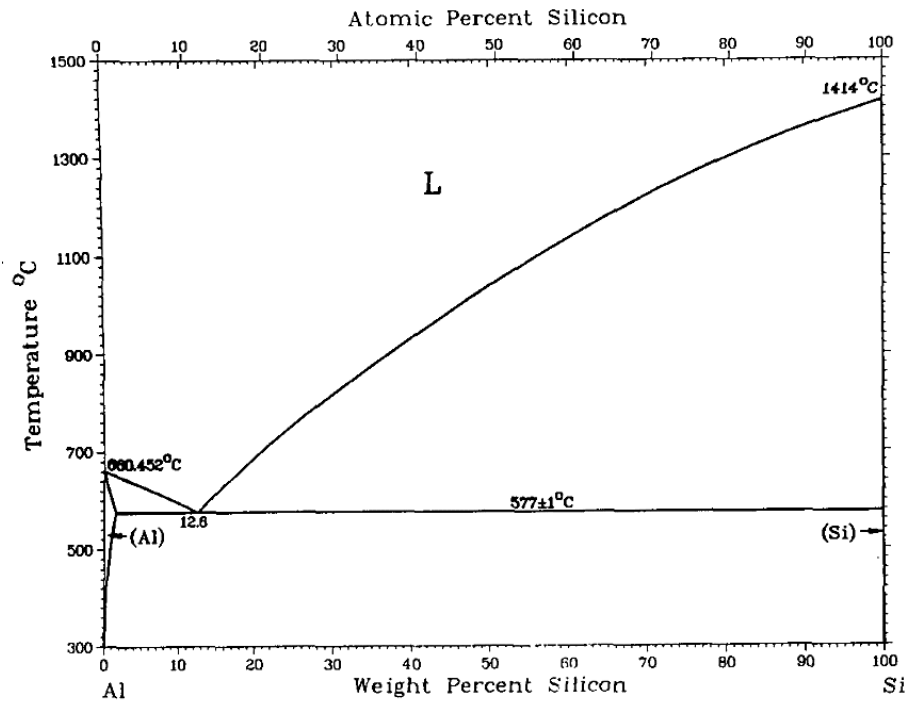


Figura 5.7. Diagrama de fases Al-Si

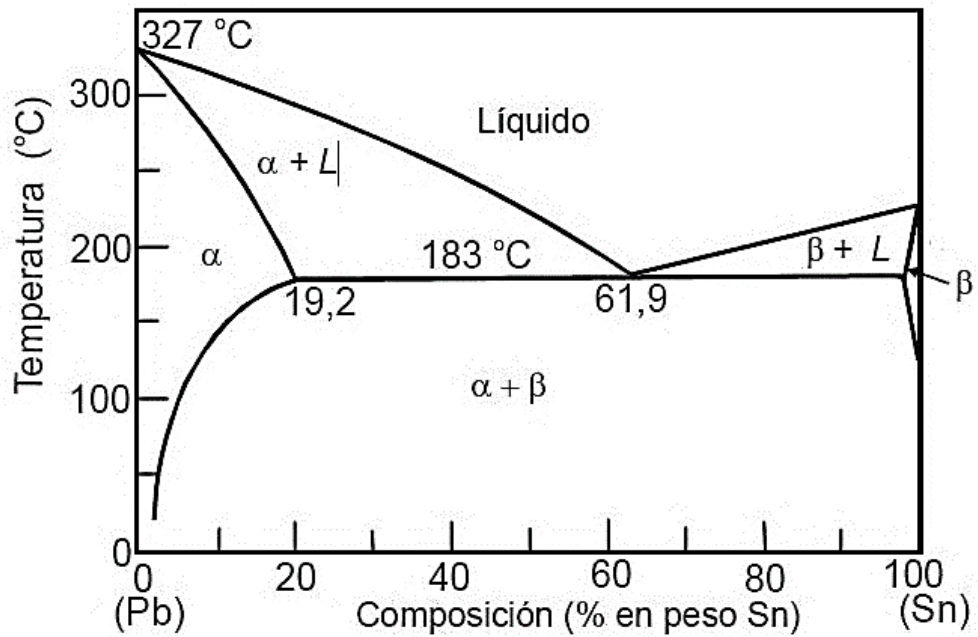


Figura 5.8. Diagrama de fases Pb-Sn

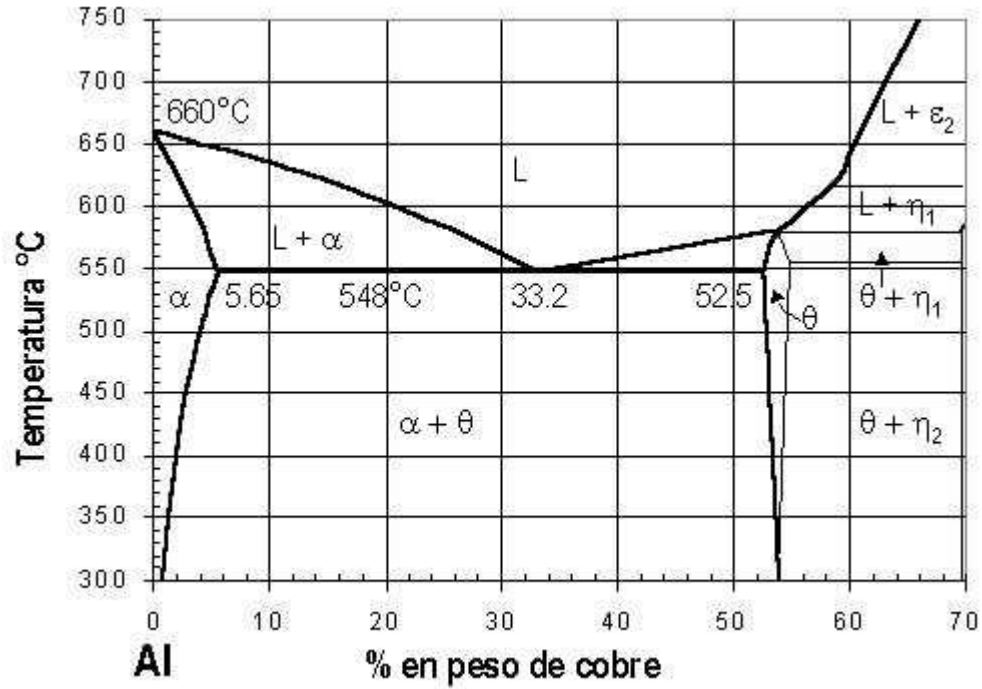


Figura 5.9. Diagrama de fases Al-Cu

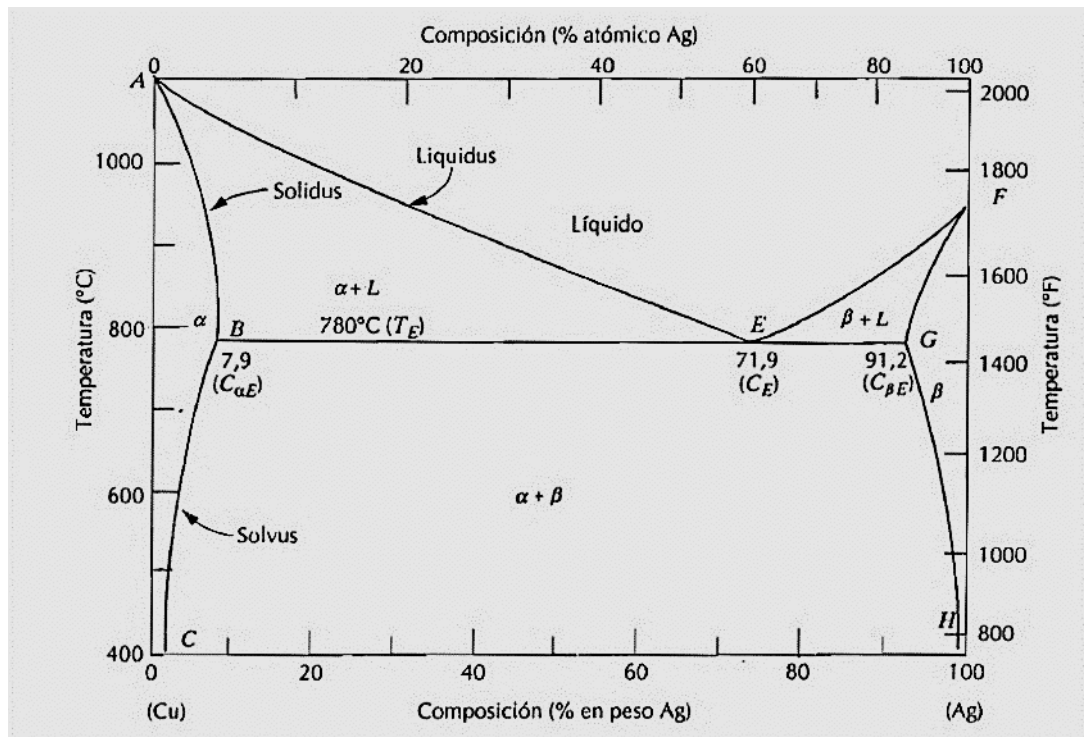


Figura 5.10. Diagrama de fases Cu-Ag

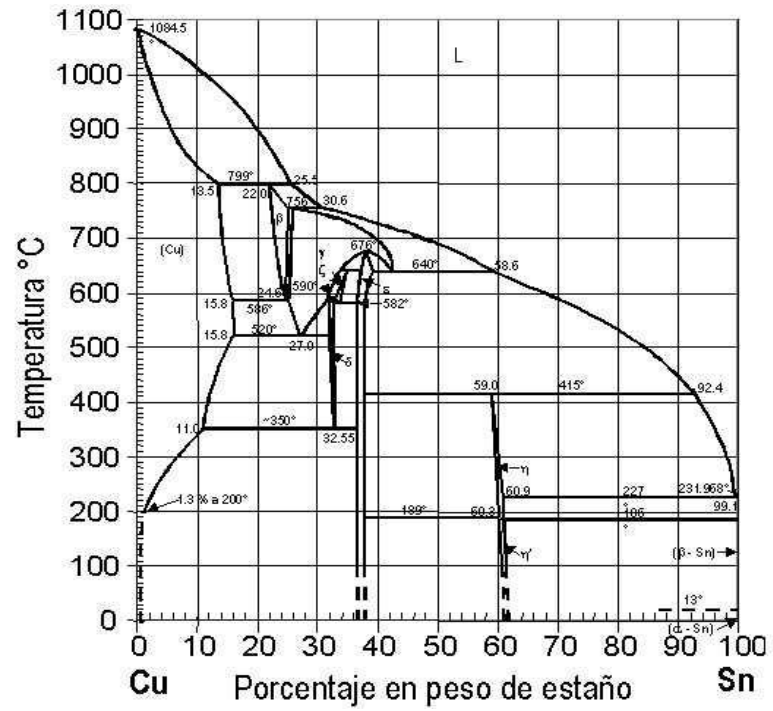


Figura 5.11. Diagrama de fases Cu-Sn

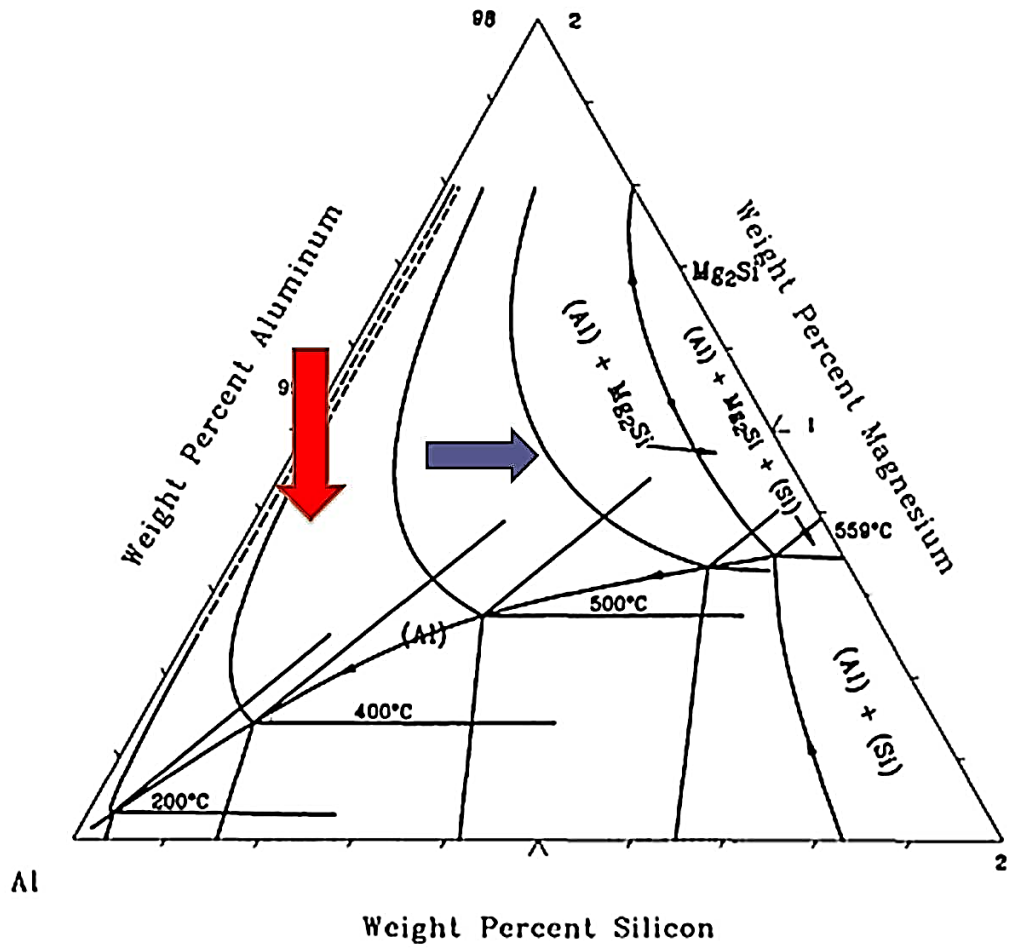


Figura 5.12. Diagrama de fases ternario Al-Si-Mg

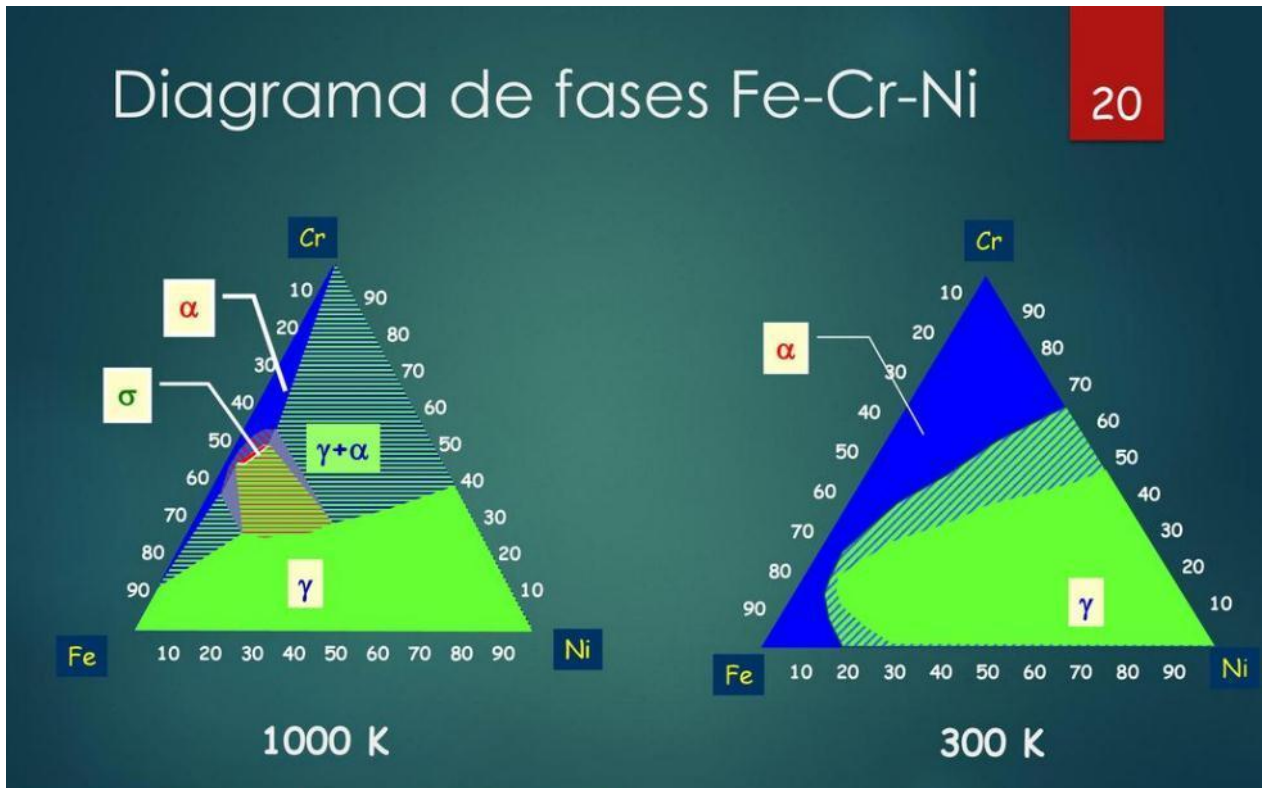


Figura 5.13. Diagrama de fases ternario Fe-Cr-Ni

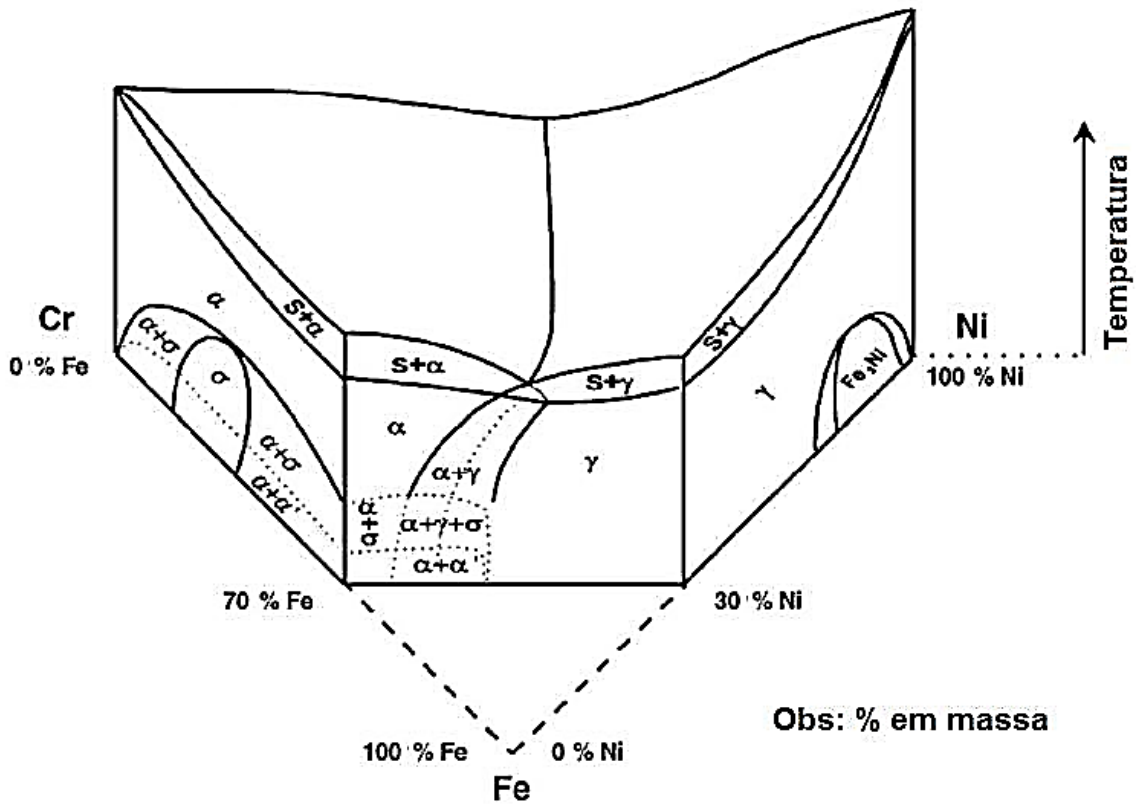
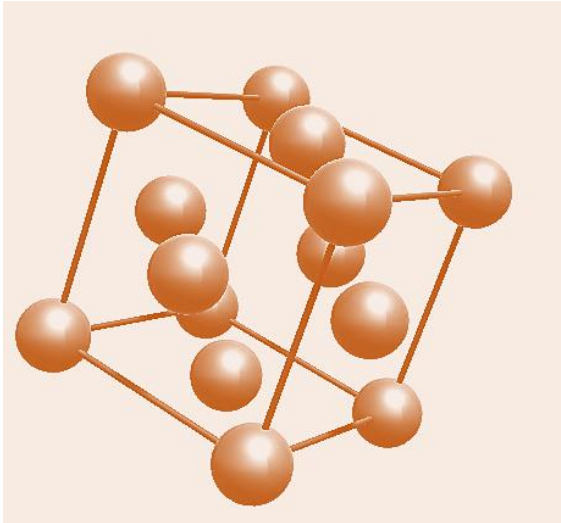


Figura 5.14. Diagrama de fases ternario Fe-Cr-Ni

CAPITULO 6

DIFRACTOGRAMAS

6.1. Aluminio



```

a      : 4.04958 Angstroms
b      : 4.04958 Angstroms
c      : 4.04958 Angstroms
alpha  : 90 degrees
beta   : 90 degrees
gamma  : 90 degrees
Bravais Lattice : 1
  
```

Lattice vectors:

```

a: 4.04958  0  0
b: 0  4.04958  0
c: 0.00000  0.00000  4.04958
  
```

Cartesian Coordinates:

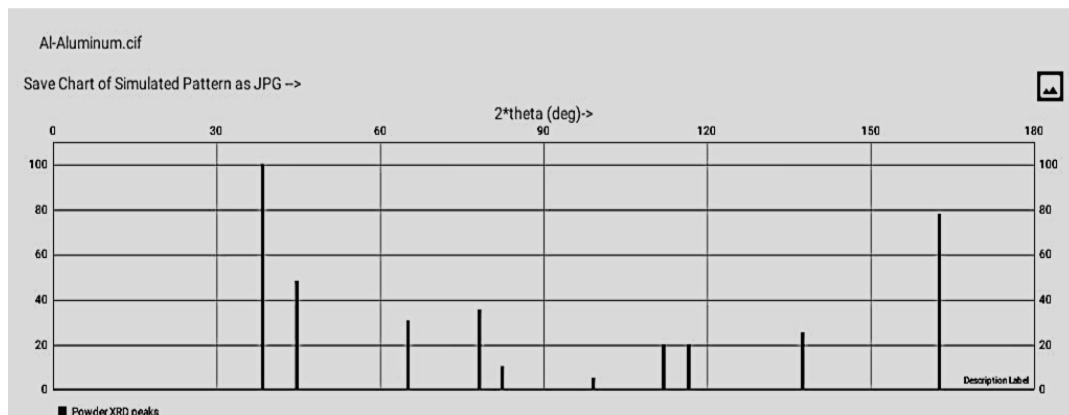
```

Al 0 0 0
Al 0 2.02479 2.02479
Al 2.02479 0 2.02479
Al 2.02479 2.02479 0
  
```

Crystal Coordinates:

```

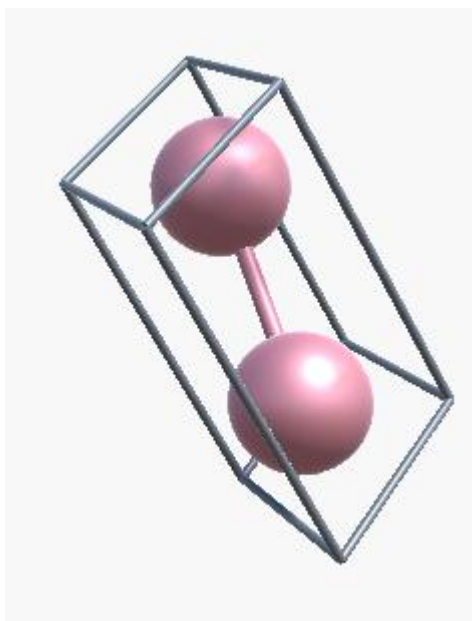
Al 0 0 0
Al 0 0.5 0.5
Al 0.5 0 0.5
  
```



h	k	l	2theta	d_hkl	F ^2	Intensity
5.0	1.0	1.0	162.6732	0.7793	303.163	77.9928
4.0	2.0	2.0	137.5139	0.8266	349.7347	25.4923
4.0	2.0	0.0	116.607	0.9055	428.0657	20.0794
4.0	0.0	0.0	99.1079	1.0124	530.9785	5.3822
3.0	3.0	1.0	112.0536	0.929	451.1854	19.9069
3.0	1.0	1.0	78.2482	1.221	709.2252	35.5375
2.0	2.0	2.0	82.4565	1.169	667.9684	10.3036
2.0	2.0	0.0	65.1116	1.4317	856.5808	30.6967
2.0	0.0	0.0	44.7304	2.0248	1158.4965	48.3696
1.0	1.0	1.0	38.4805	2.338	1283.2631	100.0

Difractogramas obtenidos con ayuda del programa Chrysx-3D Crystallographic Analysis y considerando radiación característica de cobre con $\lambda=1.54$ Angstroms

6.2. Cobalto (temperatura ambiente)



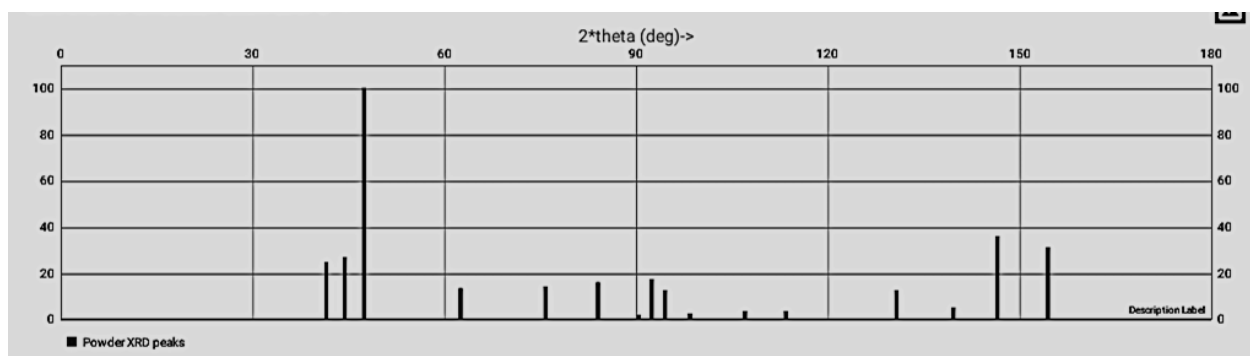
```
E:\CIF files\elements\Co-Cobalt.cif
Space Group: P 63/m m c
a      : 2.5071 Angstroms
b      : 2.5071 Angstroms
c      : 4.0886 Angstroms
alpha  : 90 degrees
beta   : 90 degrees
gamma  : 120 degrees
Bravais Lattice : 2
```

Lattice vectors:

```
a: 2.5071  0  0
b: -1.25355  2.17121228982797  0
c: 0.00000  0.00000  4.08860
```

Cartesian Coordinates:

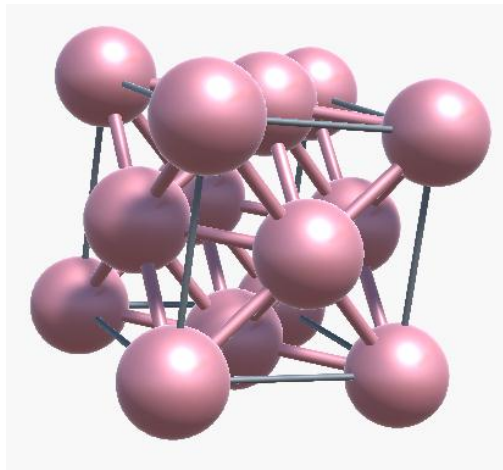
```
Co -1.25354999999105E-05  1.447482091
Co  1.25355  0.723751904691254  3.0514
```



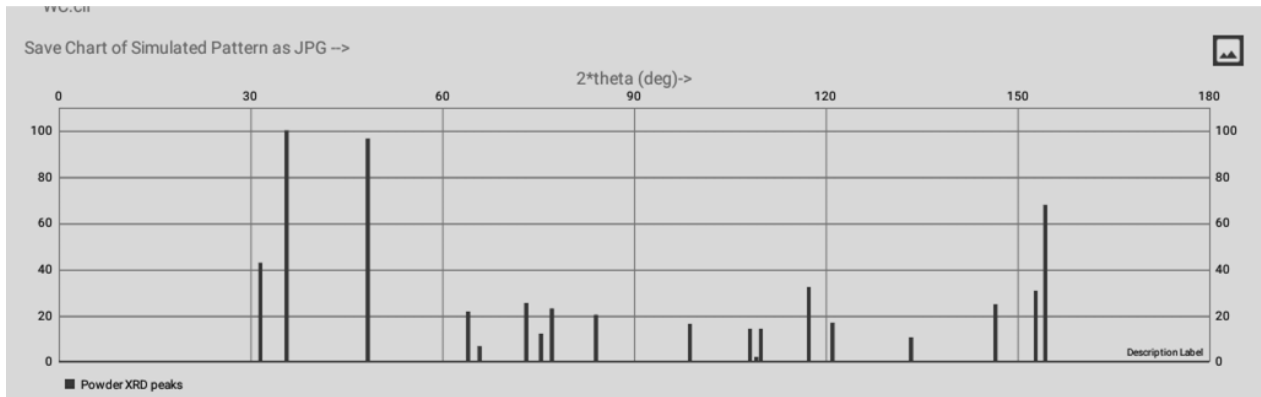
h	k	l	2theta	d_hkl
3.0	-1.0	1.0	146.5696	0.8044
3.0	-1.0	0.0	139.715	0.8206
2.0	0.0	3.0	130.753	0.8475
2.0	0.0	2.0	107.1101	0.9578
2.0	0.0	1.0	94.5342	1.0489
2.0	0.0	0.0	90.4203	1.0856
2.0	-1.0	4.0	154.5542	0.7898
2.0	-1.0	2.0	92.4286	1.0672
2.0	-1.0	0.0	75.8478	1.2536
1.0	0.0	4.0	113.5359	0.9211

2.0	-1.0	0.0	75.8478	1.2536
1.0	0.0	4.0	113.5359	0.9211
1.0	0.0	3.0	84.1052	1.1502
1.0	0.0	2.0	62.5294	1.4845
1.0	0.0	1.0	47.4333	1.9155
1.0	0.0	0.0	41.5682	2.1712
0.0	0.0	4.0	98.4815	1.0172
0.0	0.0	2.0	44.51	2.0343

6.3. Cobalto (T>427°C)



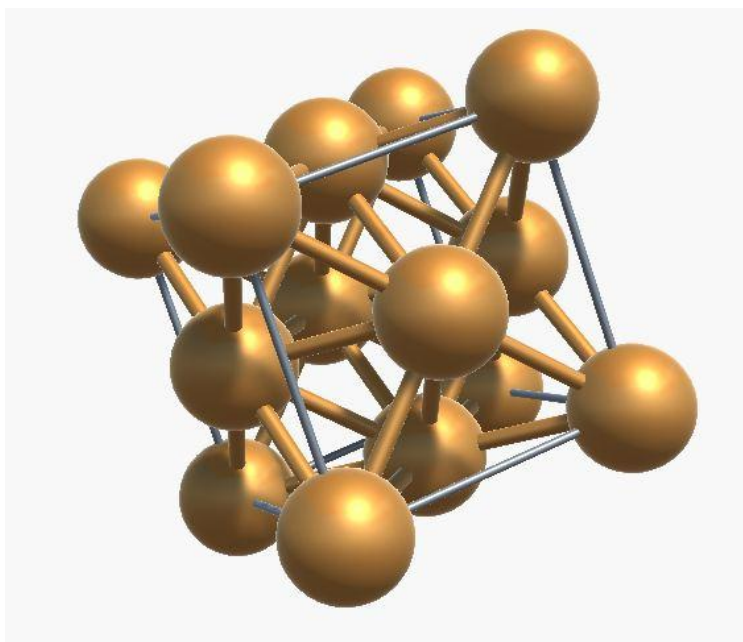
Space Group: F m 3 m	
a	: 3.548 Angstrom
b	: 3.548 Angstrom
c	: 3.548 Angstrom
alpha	: 90 degrees
beta	: 90 degrees
gamma	: 90 degrees
Bravais Lattice : 1	
Lattice vectors:	
a:	3.548 0 0
b:	0 3.548 0
c:	0.00000 0.00000 3.54800
Cartesian Coordinates:	
Co	0 0 0
Co	0 1.774 1.774
Co	1.774 0 1.774
Co	1.774 1.774 0



h	k	l	2theta	d_hkl
3.0	0.0	1.0	146.5056	0.8046
3.0	0.0	0.0	133.3455	0.839
3.0	-1.0	2.0	154.3982	0.7901
3.0	-1.0	1.0	117.3346	0.902
3.0	-1.0	0.0	108.1582	0.9514
2.0	0.0	2.0	109.8578	0.9414
2.0	0.0	1.0	84.0911	1.1504
2.0	0.0	0.0	75.4934	1.2586
2.0	-1.0	3.0	152.8772	0.7925
2.0	-1.0	2.0	98.7608	1.015

2.0	-1.0	2.0	98.7608	1.015
2.0	-1.0	1.0	73.1227	1.2934
2.0	-1.0	0.0	64.0321	1.4533
1.0	0.0	3.0	121.016	0.8851
1.0	0.0	2.0	77.1473	1.2356
1.0	0.0	1.0	48.3117	1.8827
1.0	0.0	0.0	35.647	2.5171
0.0	0.0	3.0	109.1413	0.9455
0.0	0.0	2.0	65.8063	1.4183
0.0	0.0	1.0	31.5202	2.8366

6.4. Cobre



```

a      : 3.61496 Angstroms
b      : 3.61496 Angstroms
c      : 3.61496 Angstroms
alpha  : 90 degrees
beta   : 90 degrees
gamma  : 90 degrees
Bravais Lattice : 1

```

Lattice vectors:

```

a: 3.61496 0 0
b: 0 3.61496 0
c: 0.00000 0.00000 3.61496

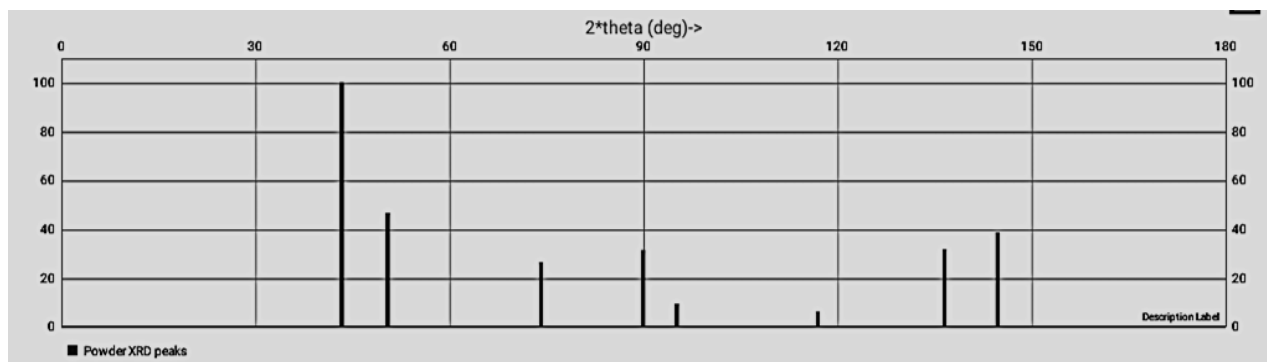
```

Cartesian Coordinates:

```

Cu 0 0 0
Cu 0 1.80748 1.80748
Cu 1.80748 0 1.80748
Cu 1.80748 1.80748 0

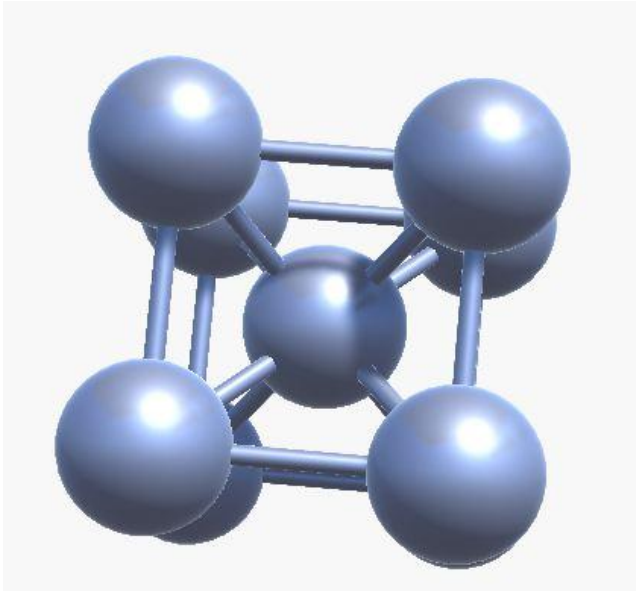
```



Export data to excel

h	k	l	2theta	d_hkl
4.0	1.0	1.0	162.666	0.7793
4.0	0.0	0.0	137.5111	0.8266
3.0	2.0	1.0	121.3478	0.8837
3.0	1.0	0.0	94.9266	1.0456
2.0	2.0	2.0	107.6413	0.9545
2.0	2.0	0.0	82.4555	1.169
2.0	1.0	1.0	69.6061	1.3499
2.0	0.0	0.0	55.5527	1.6533
1.0	1.0	0.0	38.4801	2.338

6.5. Cromo



```

a      : 2.8839 Angstroms
b      : 2.8839 Angstroms
c      : 2.8839 Angstroms
alpha  : 90 degrees
beta   : 90 degrees
gamma  : 90 degrees
Bravais Lattice : 1

```

Lattice vectors:

```

a: 2.8839  0  0
b: 0  2.8839  0
c: 0.00000  0.00000  2.88390

```

Cartesian Coordinates:

```

Cr 0 0 0
Cr 1.44195  1.44195  1.44195

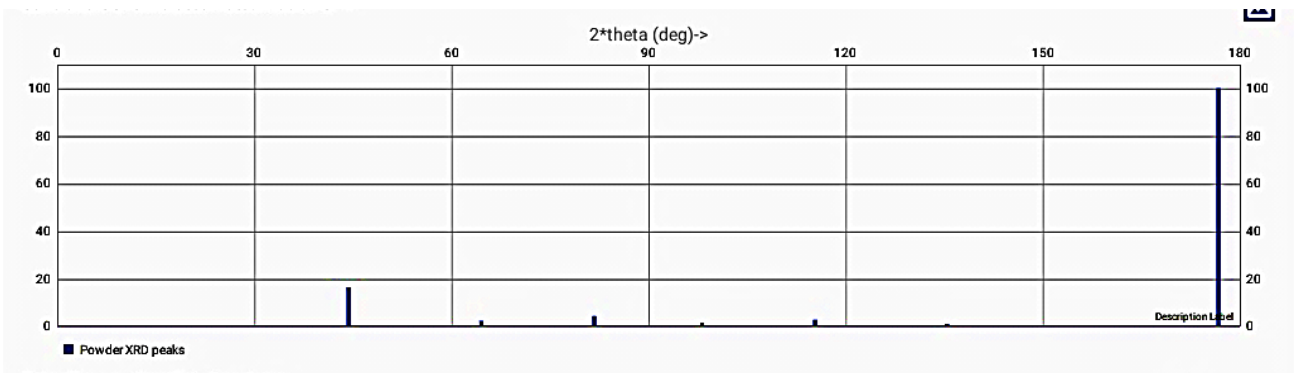
```

Crystal Coordinates:

```

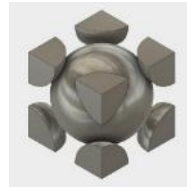
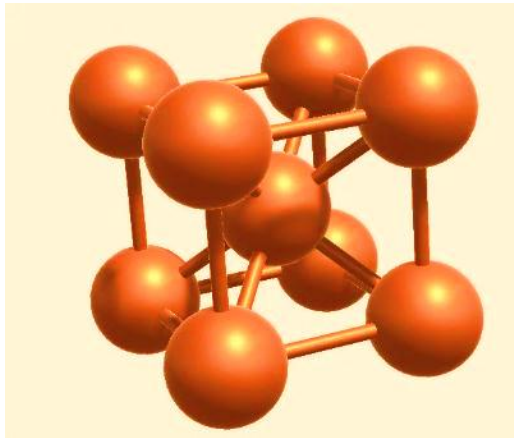
Cr 0 0 0
Cr 0.5 0.5 0.5

```



h	k	l	2theta	d_hkl
3.0	2.0	1.0	176.7778	0.7708
3.0	1.0	0.0	115.3053	0.912
2.0	2.0	2.0	135.4739	0.8325
2.0	2.0	0.0	98.1609	1.0196
2.0	1.0	1.0	81.7476	1.1773
2.0	0.0	0.0	64.5944	1.442
1.0	1.0	0.0	44.3968	2.0392

6.6. Fe (α)

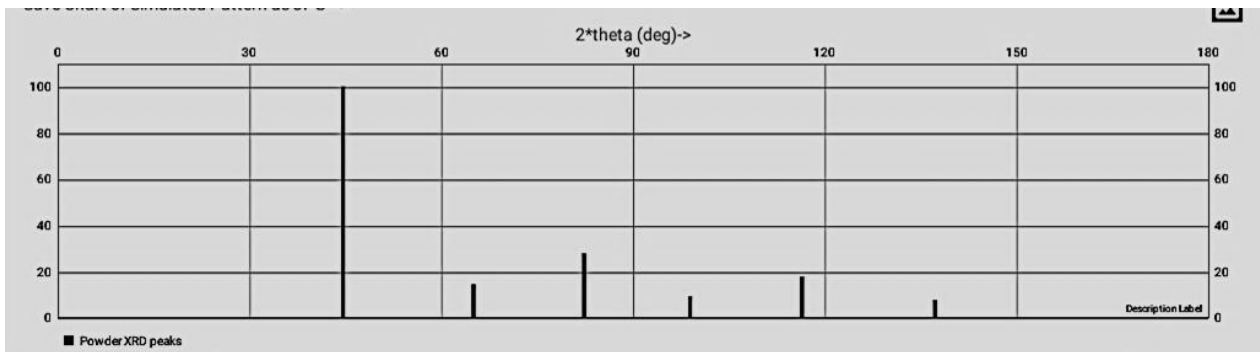


```

a      : 2.8665 Angstr
b      : 2.8665 Angstr
c      : 2.8665 Angstr
alpha  : 90 degrees
beta   : 90 degrees
gamma  : 90 degrees
Bravais Lattice : 1

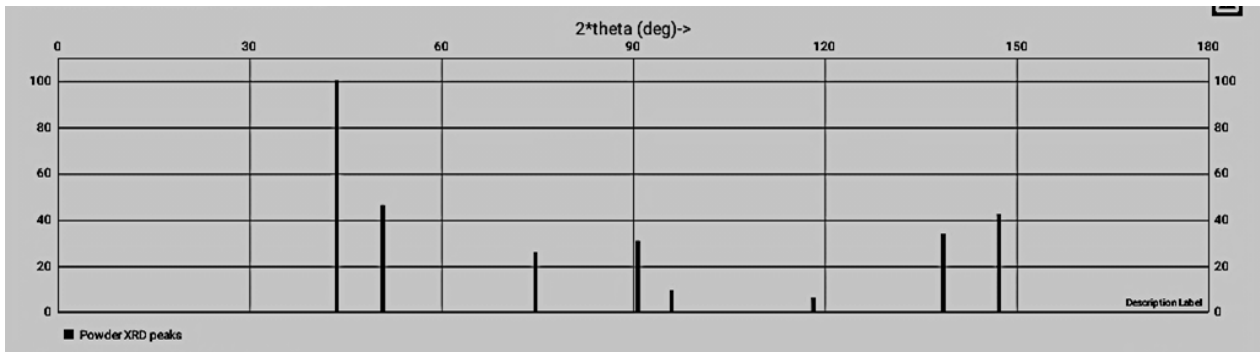
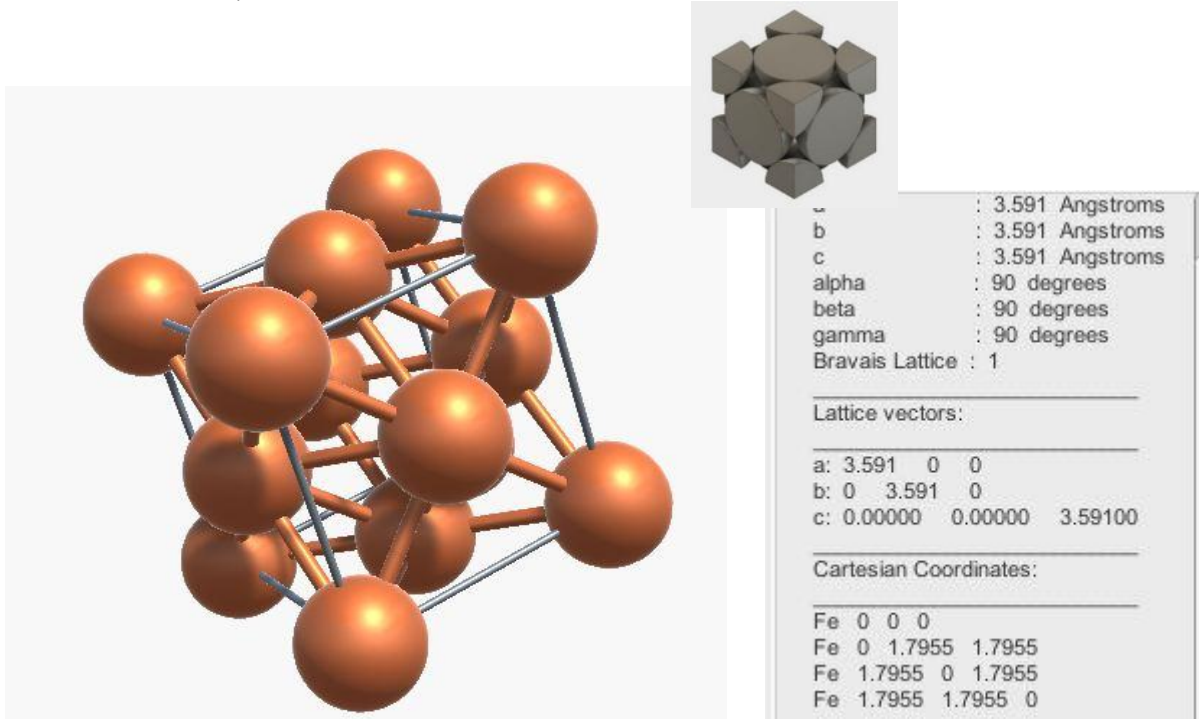
Lattice vectors:
a: 2.8665  0  0
b: 0  2.8665  0
c: 0.00000  0.00000  2.86650

Cartesian Coordinates:
Fe 0 0 0
Fe 1.43325  1.43325  1.43325
    
```



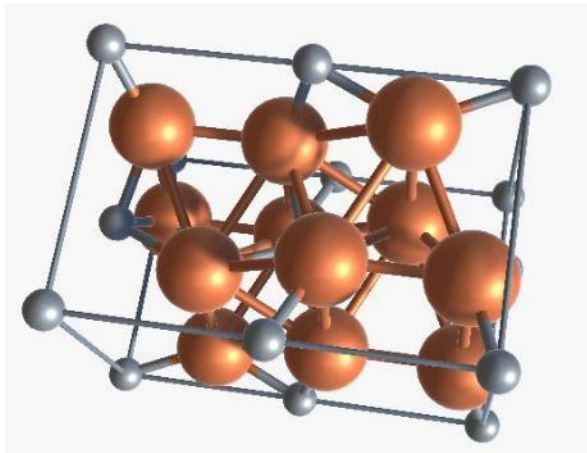
h	k	l	2theta	d_hkl
3.0	1.0	0.0	116.4121	0.9065
2.0	2.0	2.0	137.205	0.8275
2.0	2.0	0.0	98.9666	1.0135
2.0	1.0	1.0	82.3509	1.1702
2.0	0.0	0.0	65.0346	1.4333
1.0	1.0	0.0	44.6808	2.0269

6.7. Fe (fase γ)

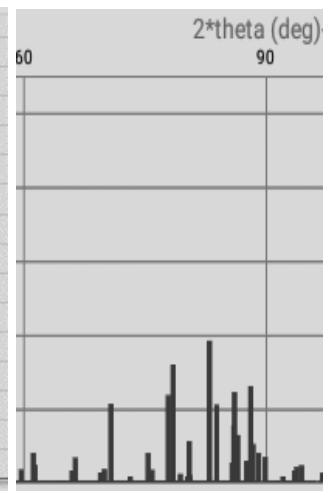
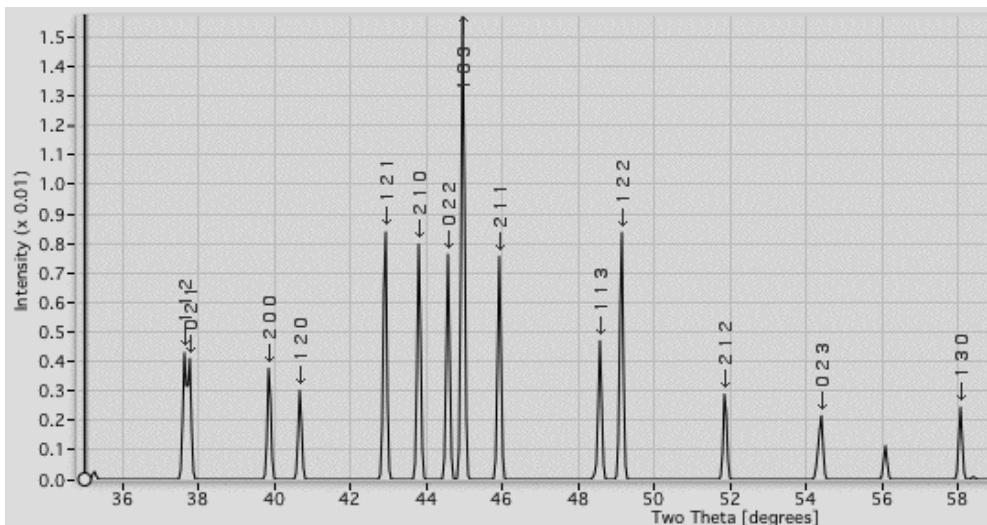


h	k	l	2theta	d_hkl
4.0	2.0	0.0	147.2748	0.803
4.0	0.0	0.0	118.2304	0.8978
3.0	3.0	1.0	138.5219	0.8238
3.0	1.0	1.0	90.7277	1.0827
2.0	2.0	2.0	96.0135	1.0366
2.0	2.0	0.0	74.7227	1.2696
2.0	0.0	0.0	50.821	1.7955
1.0	1.0	1.0	43.6301	2.0733

6.8 Carburo de hierro (Fe₃C)

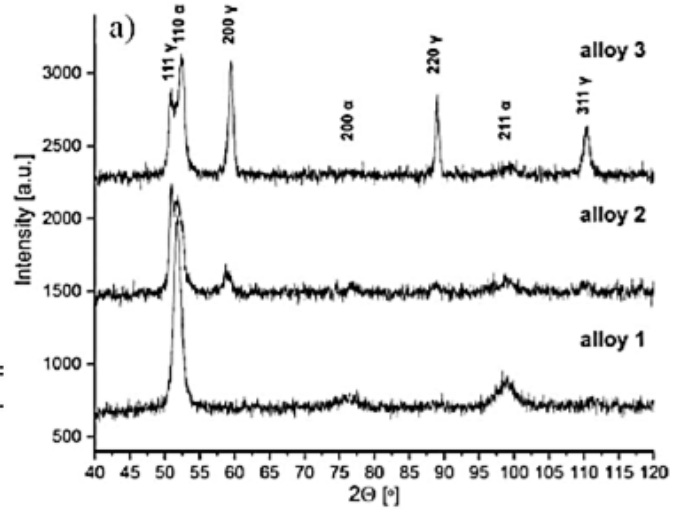
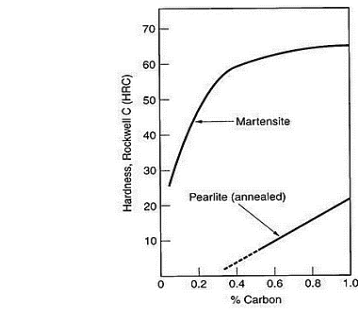
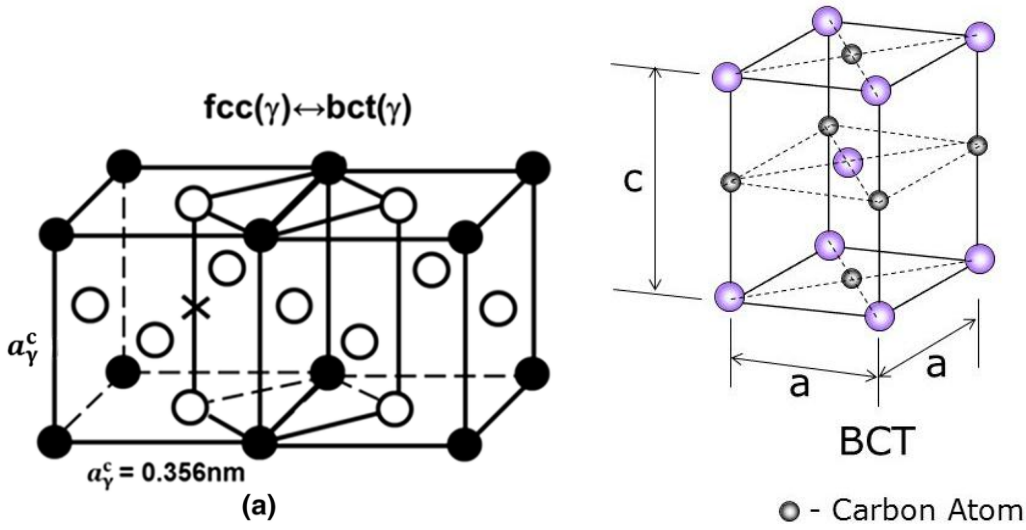


a	4.657 Å	α	90.000°
b	5.047 Å	β	90.000°
c	7.041 Å	γ	90.000°
Volume		165.514 Å ³	



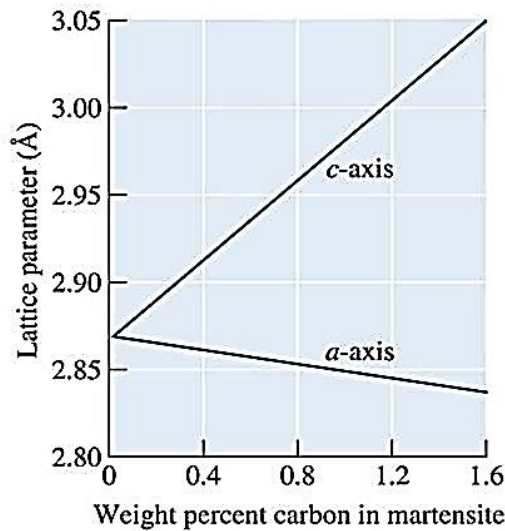
h	k	l	2theta	d_hkl
4.0	0.0	0.0	77.0012	1.2376
3.0	3.0	1.0	85.4342	1.1357
3.0	1.0	1.0	62.1512	1.4926
2.0	2.0	2.0	65.2476	1.4291
2.0	2.0	0.0	52.232	1.7503
2.0	0.0	0.0	36.2705	2.4753
1.0	1.0	1.0	31.2762	2.8582

6.9. Martensita



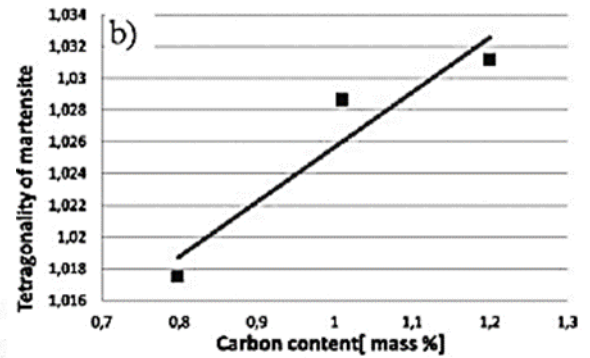
Chemical composition of investigated alloys [mass %].

Sample	Fe	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	V
alloy 1	Bal.	0.80	0.35	0.22	0.007	0.016	1.47	0.35	0.11
alloy 2	Bal.	0.99	0.35	0.70	0.003	0.021	1.72	0.30	0.09
alloy 3	Bal.	1.20	0.32	1.22	0.011	0.010	2.01	0.30	0.08

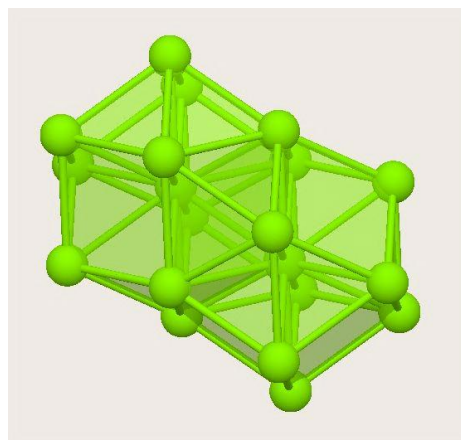


Austenite to Martensite \rightarrow 4.3 % volume increase

20% contraction of *c*-axis
12% expansion of *a*-axis



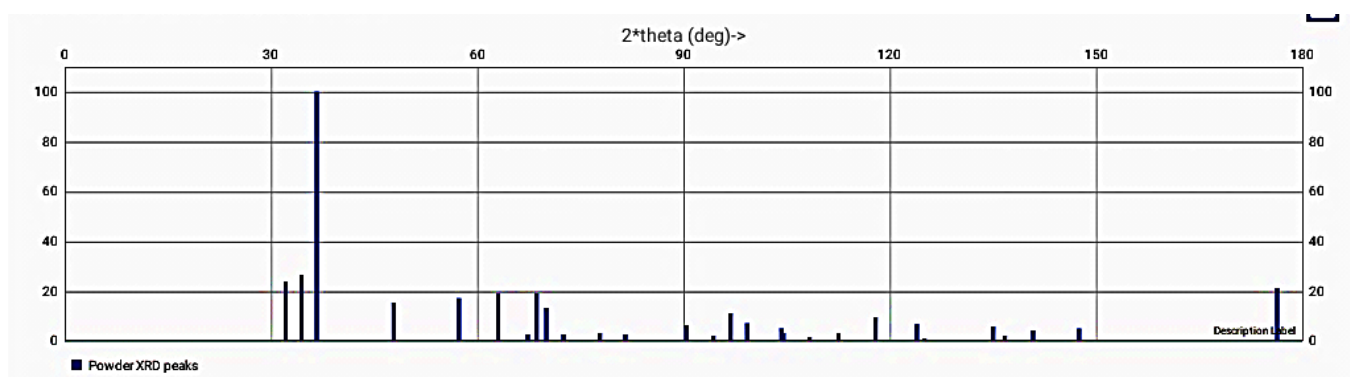
6.10. Magnesio



```

a      : 3.20927 Angstroms
b      : 3.20927 Angstroms
c      : 5.21033 Angstroms
alpha  : 90 degrees
beta   : 90 degrees
gamma  : 120 degrees
Bravais Lattice : 2

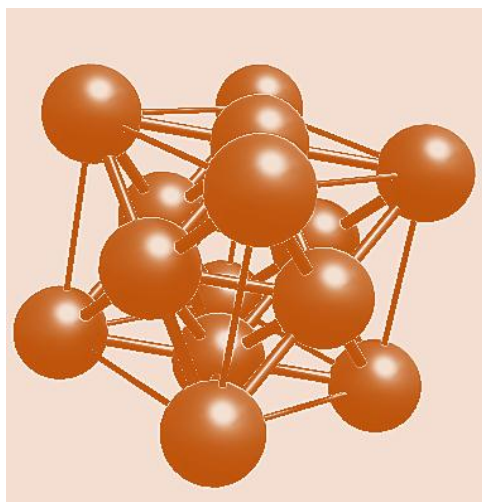
-----
Lattice vectors:
-----
a: 3.20927  0  0
b: -1.604635  2.77930934760329
c: 0.00000  0.00000  5.21033
    
```



h	k	l	2theta	d_hkl
4.0	-1.0	0.0	176.3466	0.7708
4.0	-2.0	0.0	147.5947	0.8023
3.0	0.0	2.0	123.9267	0.8729
3.0	0.0	0.0	112.5326	0.9264
3.0	-1.0	4.0	140.8525	0.8177
3.0	-1.0	3.0	117.9958	0.8989
3.0	-1.0	2.0	104.522	0.9743
3.0	-1.0	1.0	96.8667	1.0298
3.0	-1.0	0.0	94.3488	1.0505
2.0	0.0	5.0	135.075	0.8337

1.0	0.0	4.0	81.5691	1.1795
1.0	0.0	3.0	63.0809	1.4729
1.0	0.0	2.0	47.8258	1.9007
1.0	0.0	1.0	36.6229	2.4522
1.0	0.0	0.0	32.1874	2.7793
0.0	0.0	6.0	125.0515	0.8684
0.0	0.0	4.0	72.524	1.3026
0.0	0.0	2.0	34.4038	2.6052

6.11. Manganeso



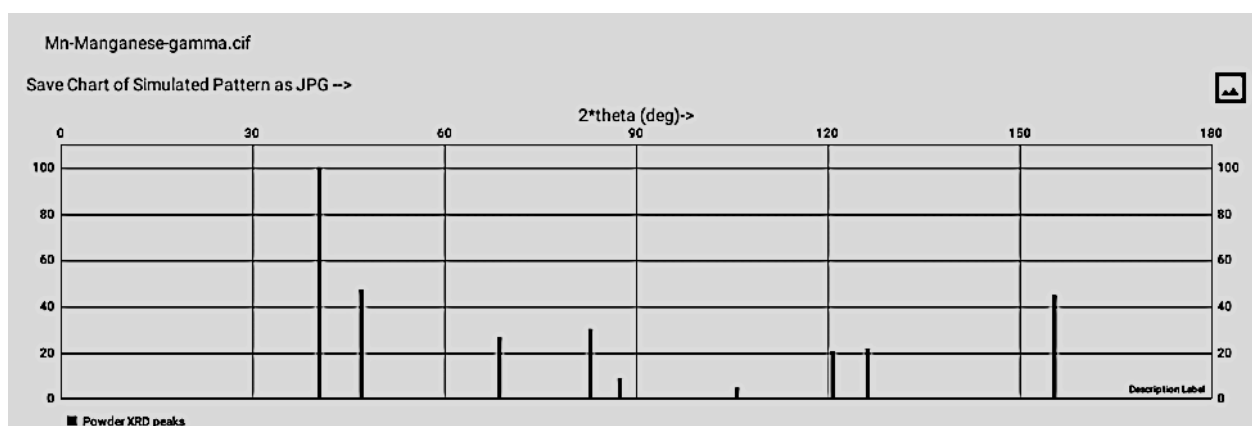
Space Group: F m -3 m
 a : 3.863 Angstroms
 b : 3.863 Angstroms
 c : 3.863 Angstroms
 alpha : 90 degrees
 beta : 90 degrees
 gamma : 90 degrees
 Bravais Lattice: 1

Lattice vectors:

a: 3.863 0.0 0.0
 b: 0.0 3.863 0.0
 c: 0.0 0.0 3.863

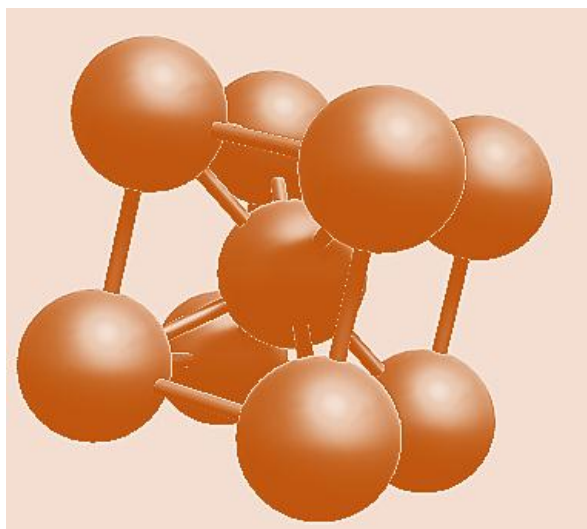
Cartesian Coordinates:

Mn 0.0 0.0 0.0
 Mn 0.0 1.9315 1.9315
 Mn 1.9315 0.0 1.9315
 Mn 1.9315 1.9315 0.0



h	k	l	2theta	d_hkl
4.0	2.0	2.0	155.4128	0.7885
4.0	2.0	0.0	126.2356	0.8638
4.0	0.0	0.0	105.8361	0.9658
3.0	3.0	1.0	120.7673	0.8862
3.0	1.0	1.0	82.8255	1.1647
2.0	2.0	2.0	87.4016	1.1152
2.0	2.0	0.0	68.6812	1.3658
2.0	0.0	0.0	47.0172	1.9315
1.0	1.0	1.0	40.4181	2.2303

6.12. Molibdeno



```

a      : 3.1473 Angstroms
b      : 3.1473 Angstroms
c      : 3.1473 Angstroms
alpha  : 90 degrees
beta   : 90 degrees
gamma  : 90 degrees
Bravais Lattice : 1

```

Lattice vectors:

```

a: 3.1473  0  0
b: 0  3.1473  0
c: 0.00000  0.00000  3.14730

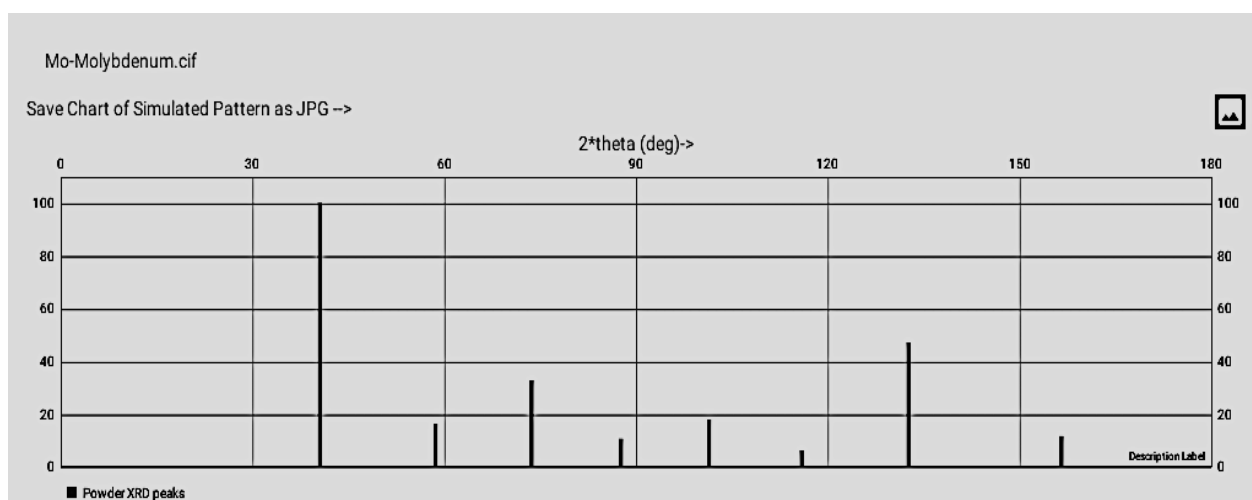
```

Cartesian Coordinates:

```

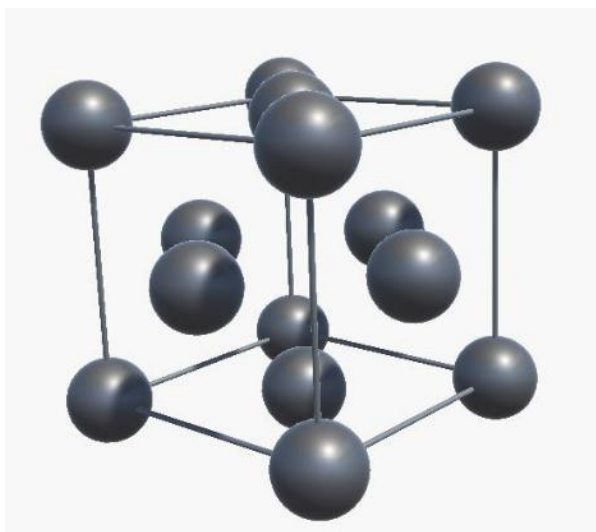
Mo 0 0 0
Mo 1.57365  1.57365  1.57365

```



h	k	l	2theta	d_hkl
4.0	0.0	0.0	156.5806	0.7868
3.0	2.0	1.0	132.6811	0.8412
3.0	1.0	0.0	101.45	0.9953
2.0	2.0	2.0	115.9901	0.9085
2.0	2.0	0.0	87.6393	1.1127
2.0	1.0	1.0	73.6865	1.2849
2.0	0.0	0.0	58.6278	1.5737
1.0	1.0	0.0	40.5096	2.2255

6.13. Plomo



```

a      : 4.9505 Angstroms
b      : 4.9505 Angstroms
c      : 4.9505 Angstroms
alpha  : 90 degrees
beta   : 90 degrees
gamma  : 90 degrees
Bravais Lattice : 1

```

Lattice vectors:

```

a: 4.9505  0  0
b: 0  4.9505  0
c: 0.00000  0.00000  4.95050

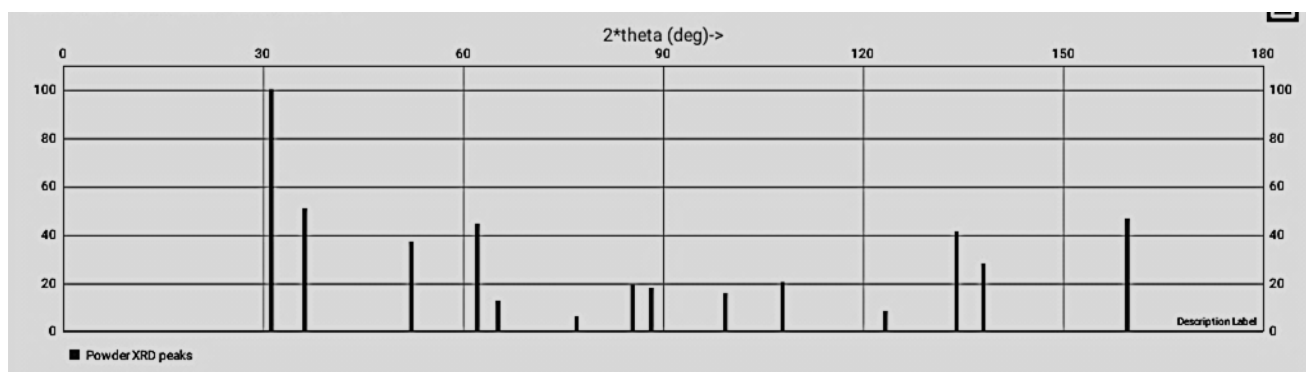
```

Cartesian Coordinates:

```

Pb 0 0 0
Pb 0 2.47525 2.47525
Pb 2.47525 0 2.47525
Pb 2.47525 2.47525 0

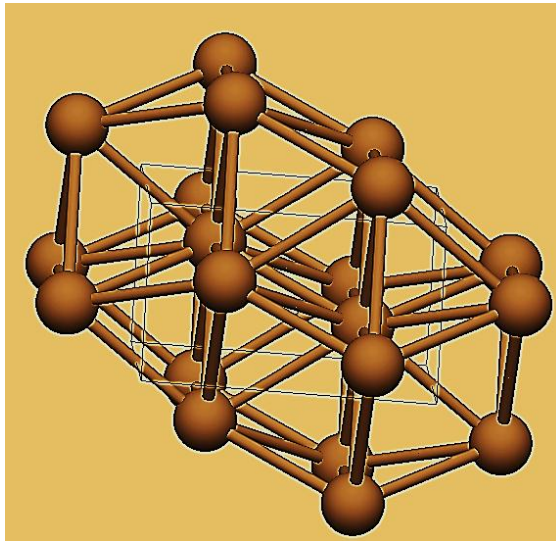
```



h	k	l	2theta	d_hkl
6.0	2.0	0.0	159.6646	0.7827
6.0	0.0	0.0	138.0653	0.8251
5.0	3.0	1.0	134.0643	0.8368
5.0	1.0	1.0	107.9345	0.9527
4.0	4.0	0.0	123.3766	0.8751
4.0	2.0	2.0	99.3581	1.0105
4.0	2.0	0.0	88.2142	1.107
4.0	0.0	0.0	77.0012	1.2376
3.0	3.0	1.0	85.4342	1.1357
3.0	1.0	1.0	62.1512	1.4926

4.0	2.0	0.0	88.2142	1.107
4.0	0.0	0.0	77.0012	1.2376
3.0	3.0	1.0	85.4342	1.1357
3.0	1.0	1.0	62.1512	1.4926
2.0	2.0	2.0	65.2476	1.4291
2.0	2.0	0.0	52.232	1.7503
2.0	0.0	0.0	36.2705	2.4753
1.0	1.0	1.0	31.2762	2.8582

6.14. Titanio (α)



```

a      : 2.95 Angstroms
b      : 2.95 Angstroms
c      : 4.686 Angstroms
alpha  : 90 degrees
beta   : 90 degrees
gamma  : 120 degrees
Bravais Lattice : 2

Lattice vectors:

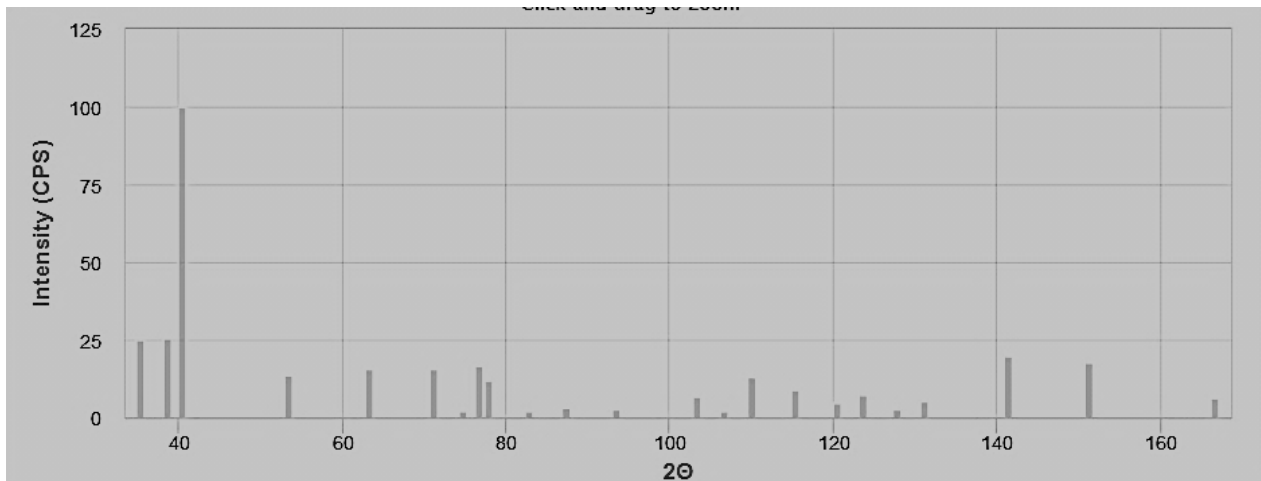
a: 2.95  0  0
b: -1.475  2.55477494116409  0
c: 0.00000  0.00000  4.68600

Cartesian Coordinates:

Ti -1.47499999999523E-05  1.703191
Ti 1.475  0.851608678887639  3.514

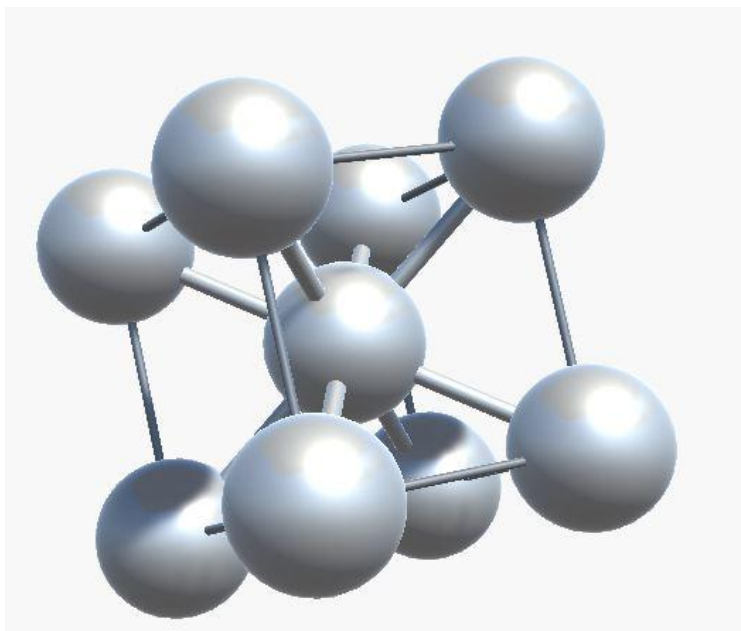
Crystal Coordinates:

Ti 0.33333  0.66667  0.25
Ti 0.66667  0.33334  0.75
    
```



h	k	l	2theta	d_hkl
3.0	0.0	2.0	148.571	0.8004
3.0	0.0	0.0	129.5706	0.8516
3.0	-1.0	3.0	139.4489	0.8213
3.0	-1.0	2.0	119.3079	0.8928
3.0	-1.0	1.0	109.1055	0.9457
3.0	-1.0	0.0	105.8574	0.9656
2.0	0.0	4.0	126.342	0.8634
2.0	0.0	3.0	102.3657	0.9888
2.0	0.0	2.0	86.7798	1.1215
2.0	0.0	1.0	77.3869	1.2324

2.0	0.0	0.0	74.191	1.2774
2.0	-1.0	4.0	114.2496	0.9174
2.0	-1.0	2.0	76.2276	1.2482
2.0	-1.0	0.0	62.9786	1.475
1.0	0.0	5.0	122.243	0.8799
1.0	0.0	4.0	92.6898	1.0649
1.0	0.0	3.0	70.6386	1.3327
1.0	0.0	2.0	52.9976	1.7268
1.0	0.0	1.0	40.1781	2.2431
1.0	0.0	0.0	35.1042	2.5548
0.0	0.0	6.0	161.1436	0.781
0.0	0.0	4.0	82.2435	1.1715
0.0	0.0	2.0	38.3956	2.343

6.15. Titanio (β)

```

a      : 3.3065 Angstroms
b      : 3.3065 Angstroms
c      : 3.3065 Angstroms
alpha  : 90 degrees
beta   : 90 degrees
gamma  : 90 degrees
Bravais Lattice : 1

```

Lattice vectors:

```

a: 3.3065  0  0
b: 0  3.3065  0
c: 0.00000  0.00000  3.30650

```

Cartesian Coordinates:

```

Ti 0 0 0
Ti 1.65325  1.65325  1.65325

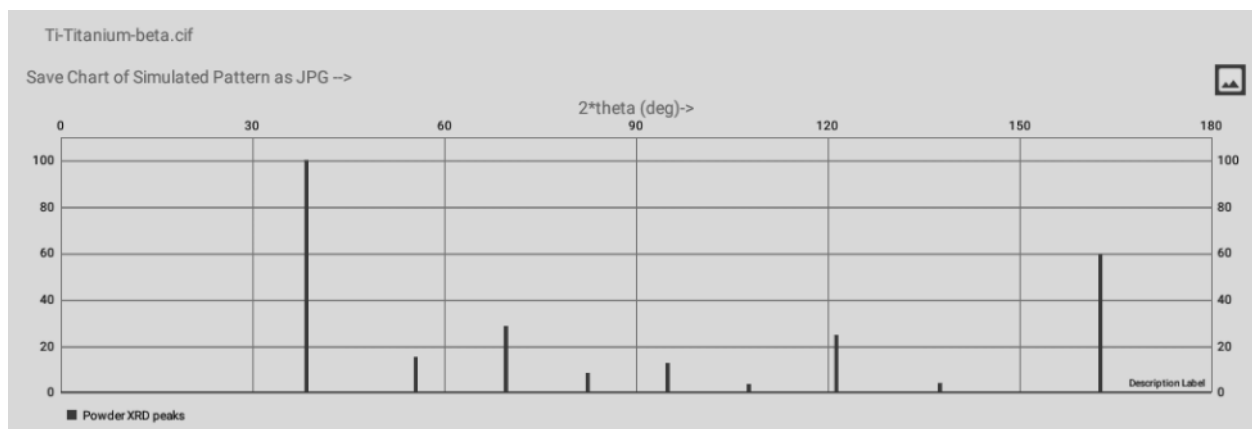
```

Crystal Coordinates:

```

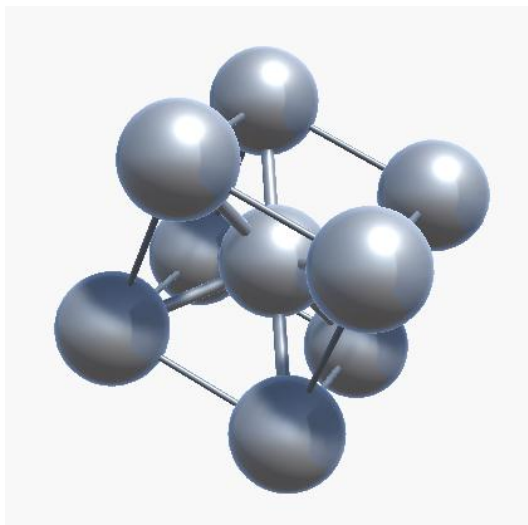
Ti 0 0 0
Ti 0.5 0.5 0.5

```



h	k	l	2theta	d_hkl
4.0	1.0	1.0	162.666	0.7793
4.0	0.0	0.0	137.5111	0.8266
3.0	2.0	1.0	121.3478	0.8837
3.0	1.0	0.0	94.9266	1.0456
2.0	2.0	2.0	107.6413	0.9545
2.0	2.0	0.0	82.4555	1.169
2.0	1.0	1.0	69.6061	1.3499
2.0	0.0	0.0	55.5527	1.6533
1.0	1.0	0.0	38.4801	2.338

6.16. Vanadio



Space Group: $I\bar{m}-3m$
 a : 3.024 Angstroms
 b : 3.024 Angstroms
 c : 3.024 Angstroms
 alpha : 90 degrees
 beta : 90 degrees
 gamma : 90 degrees
 Bravais Lattice : 1

Lattice vectors:

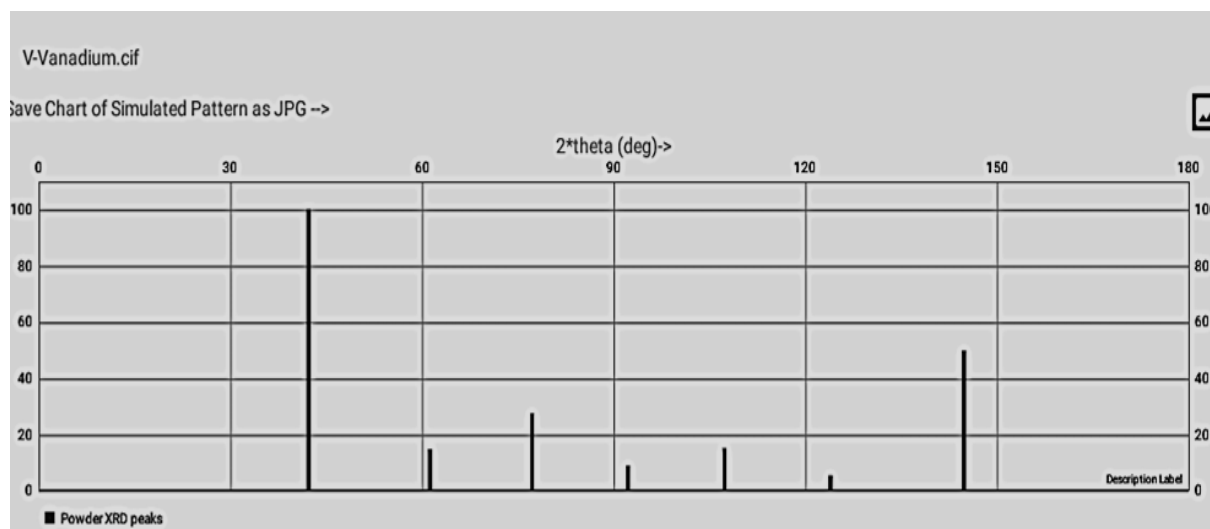
a: 3.024 0 0
 b: 0 3.024 0
 c: 0.00000 0.00000 3.02400

Cartesian Coordinates:

V 0 0 0
 V 1.512 1.512 1.512

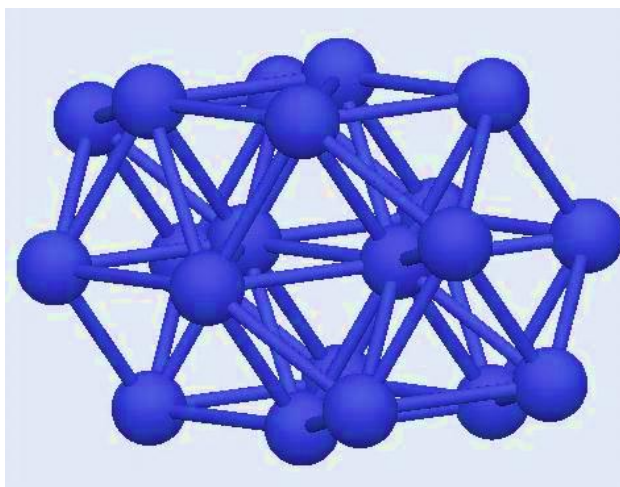
Crystal Coordinates:

V 0 0 0
 V 0.5 0.5 0.5



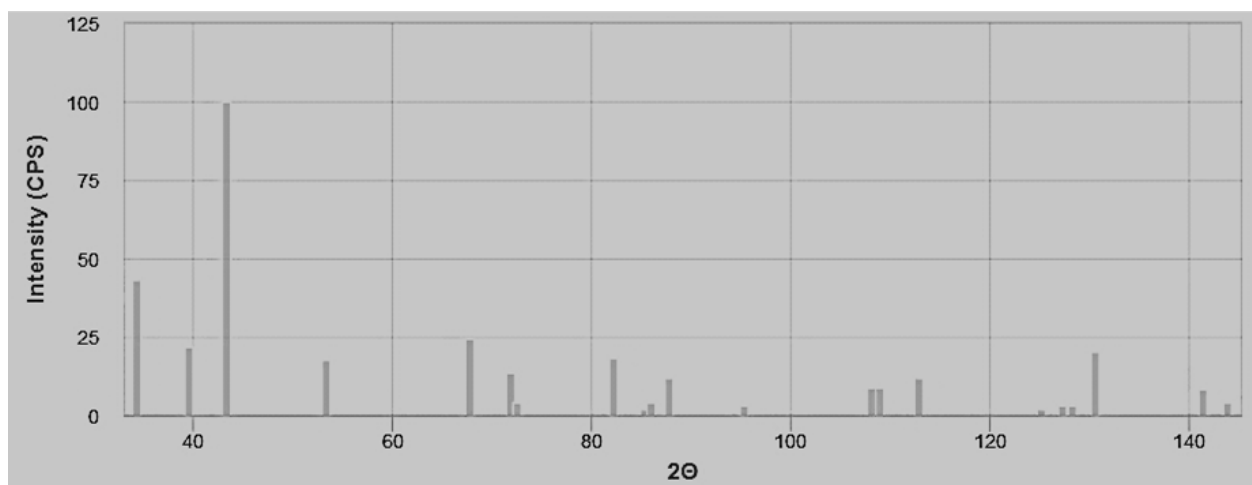
h	k	l	2theta	d_hkl	F ^2	Intensity	Multiplicity
3.0	2.0	1.0	144.839	0.8082	267.5936	49.9839	48.0
3.0	1.0	0.0	107.352	0.9563	347.2877	15.113	24.0
2.0	2.0	2.0	123.91	0.873	300.6113	5.5127	8.0
2.0	2.0	0.0	92.2118	1.0691	416.0353	8.891	12.0
2.0	1.0	1.0	77.229	1.2345	522.1174	27.6514	24.0
2.0	0.0	0.0	61.2686	1.512	696.5726	14.745	6.0
1.0	1.0	0.0	42.2386	2.1383	1018.1831	100.0	12.0

6.17. Zinc



Lattice Parameters

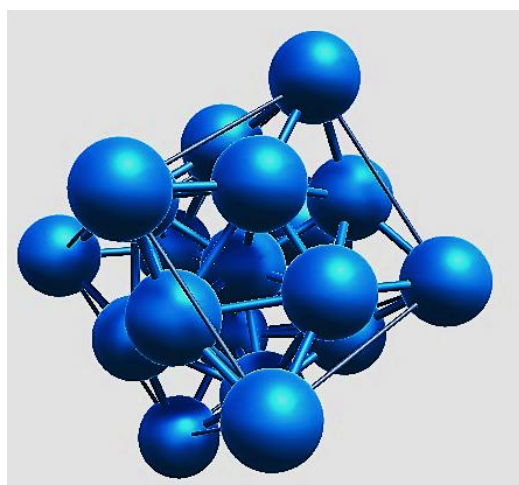
a 2.627 Å α 90.000°
b 2.627 Å β 90.000°
c 5.207 Å γ 120.000°
Volume **31.115 Å³**



h	k	l	2theta	d_hkl
3.0	-1.0	3.0	175.5702	0.771
3.0	-1.0	2.0	138.9757	0.8226
3.0	-1.0	1.0	127.5087	0.859
3.0	-1.0	0.0	124.0811	0.8723
2.0	0.0	4.0	131.9051	0.8437
2.0	0.0	3.0	109.1647	0.9454
2.0	0.0	2.0	94.9164	1.0457
2.0	0.0	1.0	86.569	1.1237
2.0	0.0	0.0	83.7791	1.1539
2.0	-1.0	4.0	116.4226	0.9064

2.0	-1.0	2.0	82.1138	1.173
2.0	-1.0	0.0	70.654	1.3324
1.0	0.0	6.0	165.812	0.7764
1.0	0.0	5.0	115.8373	0.9093
1.0	0.0	4.0	89.9525	1.09
1.0	0.0	3.0	70.0961	1.3416
1.0	0.0	2.0	54.3364	1.6873
1.0	0.0	1.0	43.233	2.0914
1.0	0.0	0.0	39.005	2.3078
0.0	0.0	6.0	138.2956	0.8245
0.0	0.0	4.0	77.0713	1.2367
0.0	0.0	2.0	36.2994	2.4734

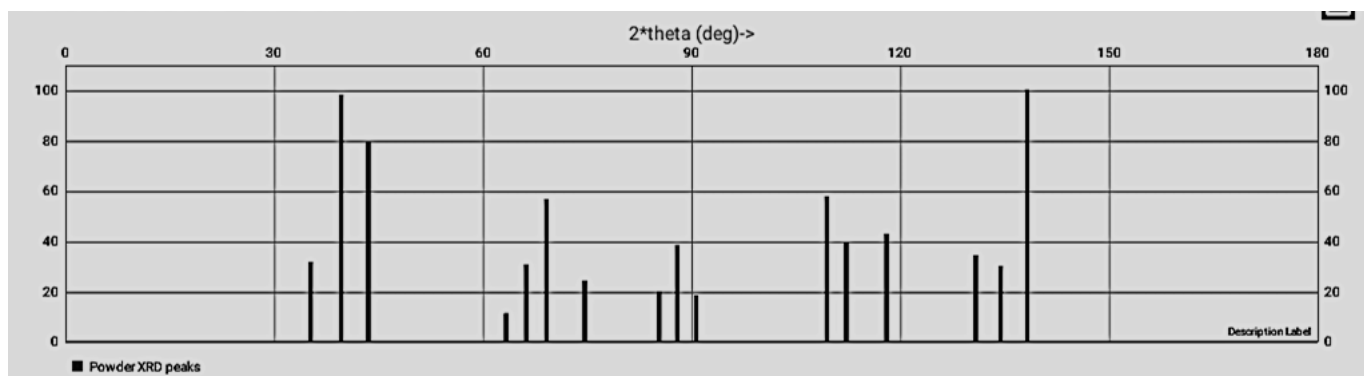
6.18. Tungsteno



Space Group: P m -3 n
 a : 5.083 Angstroms
 b : 5.083 Angstroms
 c : 5.083 Angstroms
 alpha : 90 degrees
 beta : 90 degrees
 gamma : 90 degrees
 Bravais Lattice: 1

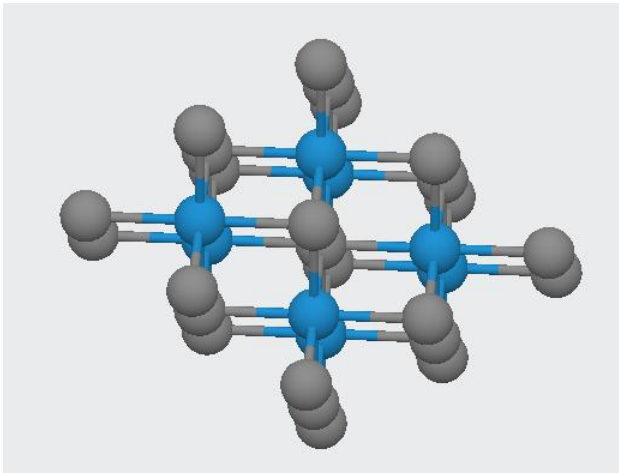
Lattice vectors:

a: 5.083 0.0 0.0
 b: 0.0 5.083 0.0
 c: 0.0 0.0 5.083



h	k	l	2theta	d_hkl
6.0	1.0	1.0	138.2513	0.8246
6.0	1.0	0.0	134.4369	0.8356
6.0	0.0	0.0	130.857	0.8472
5.0	2.0	1.0	112.2395	0.928
5.0	2.0	0.0	109.4224	0.9439
4.0	4.0	0.0	118.0588	0.8986
4.0	2.0	1.0	87.9905	1.1092
4.0	2.0	0.0	85.3531	1.1366
4.0	0.0	0.0	74.6442	1.2708
3.0	3.0	2.0	90.6236	1.0837
3.0	2.0	1.0	69.1017	1.3585
3.0	2.0	0.0	66.2555	1.4098
2.0	2.0	2.0	63.3455	1.4673
2.0	1.0	1.0	43.589	2.0751
2.0	1.0	0.0	39.6233	2.2732
2.0	0.0	0.0	35.2935	2.5415

6.19. Carburo de tungsteno (WC)



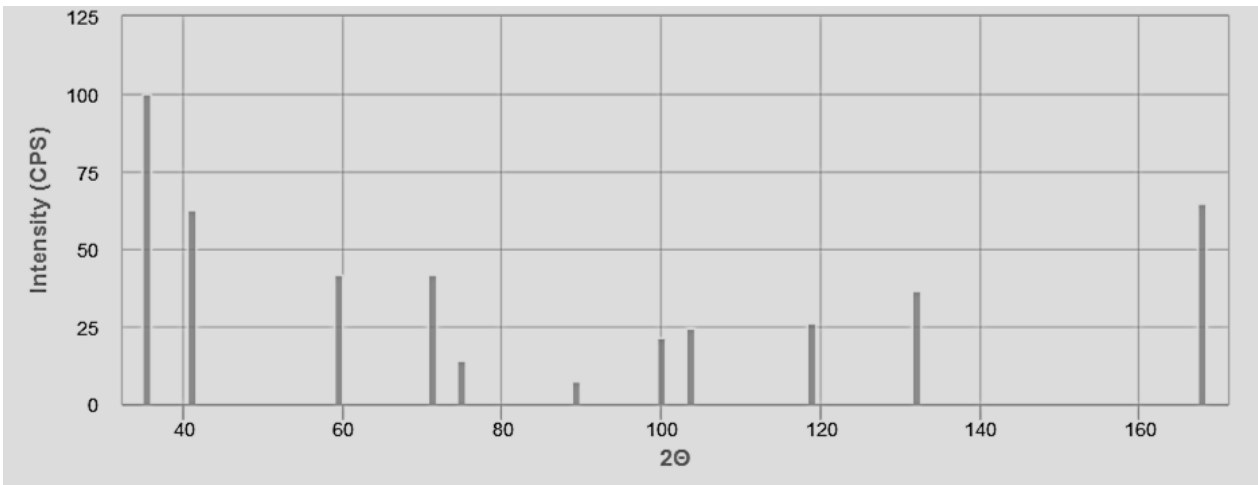
Lattice Parameters

a 3.101 Å α 60.000°

b 3.101 Å β 60.000°

c 3.101 Å γ 60.000°

Volume **21.084 Å³**



h	k	l	2theta	d_hkl
3.0	0.0	1.0	146.5056	0.8046
3.0	0.0	0.0	133.3455	0.839
3.0	-1.0	2.0	154.3982	0.7901
3.0	-1.0	1.0	117.3346	0.902
3.0	-1.0	0.0	108.1582	0.9514
2.0	0.0	2.0	109.8578	0.9414
2.0	0.0	1.0	84.0911	1.1504
2.0	0.0	0.0	75.4934	1.2586
2.0	-1.0	3.0	152.8772	0.7925
2.0	-1.0	2.0	98.7608	1.015

2.0	-1.0	3.0	152.8772	0.7925
2.0	-1.0	2.0	98.7608	1.015
2.0	-1.0	1.0	73.1227	1.2934
2.0	-1.0	0.0	64.0321	1.4533
1.0	0.0	3.0	121.016	0.8851
1.0	0.0	2.0	77.1473	1.2356
1.0	0.0	1.0	48.3117	1.8827
1.0	0.0	0.0	35.647	2.5171
0.0	0.0	3.0	109.1413	0.9455
0.0	0.0	2.0	65.8063	1.4183
0.0	0.0	1.0	31.5202	2.8366

CAPITULO 7

FALLAS MECÁNICAS

Se dice que falla un elemento mecánico cuando ya no puede cumplir de manera adecuada con la función para la cual fue creado, y se puede deber a cualquiera de las tres razones siguientes:

- a) Porque se ha desgastado
- b) Deformación plástica excesiva
- c) Se ha fracturado, lo cual se puede deber a dos causas principales, fatiga, o exceder la resistencia máxima del material.

La falla de un material puede traer consigo altos costos, en términos económicos, de producción o incluso vidas humanas, por esta razón hacer un análisis en el que se pueda establecer porque falló el material es de suma importancia, ya que a partir de este análisis se pueden identificar los errores que se cometieron en el diseño y/o el manejo que se le dio a dicho componente.

7.1. Falla por desgaste

El desgaste puede ser definido como el daño superficial sufrido por los materiales después de determinadas condiciones de trabajo a los que son sometidos. Este fenómeno se manifiesta por lo general en las superficies de los materiales, llegando a afectar la sub-superficie. El resultado del desgaste, es la pérdida de material y la subsiguiente disminución de las dimensiones y por tanto la pérdida de tolerancias. Los mecanismos de daño en los materiales se deben principalmente a deformación plástica, formación y propagación de grietas, corrosión y/o desgaste

Desde que el desgaste comenzó a ser un tópico importante y que necesitaba estudiado y entendido, comenzaron a aparecer en los libros de diseño y en la mente de los diseñadores, ideas sencillas de cómo prevenirlo o combatirlo, entre esas ideas se tienen:

1. Mantener baja la presión de contacto
2. Mantener baja la velocidad de deslizamiento
3. Mantener lisas las superficies de rodamientos
4. Usar materiales duros
5. Asegurar bajos coeficientes de fricción
6. Usar lubricantes

Los principales tipos de fallas por desgaste son la siguientes (<http://blog.utp.edu.co/metalografia/11-analisis-de-falla-de-materiales/#11.3.3.%20Fallas%20por%20desgaste>):

- **Desgaste abrasivo:** Se presenta debido a la fricción generada en el movimiento de dos elementos, con diferente dureza, de un mecanismo, lo cual produce pérdida de material y ralladuras de los elementos.

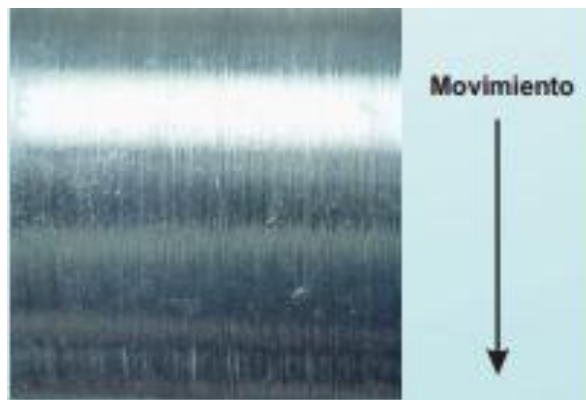


Figura 7.1. Desgaste abrasivo.

- **Fatiga superficial:** Se presenta cuando los elementos que están en contacto presentan pequeñas imperfecciones, las cuales originan esfuerzos repetitivos que a su vez causan pequeñas picaduras en el material.



Figura 7.2. Picaduras a causa de fatiga superficial.

- **Ludimiento:** Es un tipo de desgaste debido a desajustes de dos elementos que se encuentran en contacto uno con otro y sometidos a presión, produce pérdida del material y deformación superficial.



Figura 7.3. Ludimiento.

- **Erosión:** El desgaste por erosión se presenta cuando un elemento de un mecanismo está en contacto con un fluido en movimiento, este tipo de desgaste suele ser lento y produce pérdida de material de manera progresiva, el material

desgastado puede tener apariencia pulida si se trata de un fluido líquido o gaseoso, o granular si se trata de flujo de un sólido abrasivo.

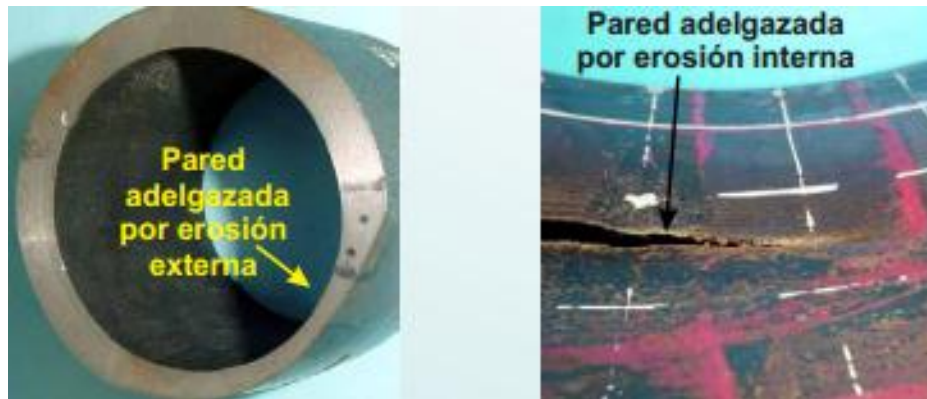


Figura 7.4. Erosión de aspecto pulido (izquierda) y erosión de aspecto granular (derecha).

7.2 Deformación plástica excesiva

La excesiva deformación plástica constituye sin duda el modo de falla mejor comprendido en un componente estructural, y es la base del diseño clásico de componentes estructurales. En efecto, dicho diseño tiene como objetivo fundamental establecer las dimensiones de las secciones resistentes necesarias para asegurar un comportamiento elástico de las mismas. Esto significa en teoría que en ningún punto de una sección resistente se alcance una condición de fluencia, es decir de deformación plástica.

Sin embargo, en las estructuras reales, y muy particularmente en las estructuras soldadas, la presencia de concentradores de tensión más o menos severos es inevitable y por lo tanto también lo es la existencia de zonas plastificadas en el vértice de tales concentradores.

De todos modos, en la medida que el tamaño de tales zonas plásticas sea pequeño en relación con las dimensiones características de la sección resistente, puede considerarse que la sección se comportará, al menos desde un punto de vista ingenieril, de manera elástica. En cambio, si por un incremento en las cargas las zonas plásticas se propagan hasta alcanzar una fracción significativa de la sección, nos encontramos ante una falla por excesiva deformación plástica. En el caso extremo,

la sección completa puede llegar a plastificarse y en tal caso hablamos de una condición de fluencia generalizada.

7.3. Falla por fatiga

El fenómeno de fatiga es considerado responsable aproximadamente de más del 90% de las fallas por rotura de uniones soldadas y precede muchas veces a la fractura rápida. Una discontinuidad que actúa como concentrador de tensiones puede iniciar bajo cargas cíclicas una fisura por fatiga que puede propagarse lentamente hasta alcanzar un tamaño crítico a partir del cual crece de manera rápida pudiendo conducir al colapso casi instantáneo de la estructura afectada.

En presencia de cargas fluctuantes, en el vértice de discontinuidades geométricas más o menos agudas se produce un fenómeno de deformación elasto-plástica cíclica a partir del cual se produce la iniciación de la fisura por fatiga. La condición superficial y la naturaleza del medio cumplen un rol importante sobre la resistencia a la fatiga, esto es sobre el número de ciclos necesarios para que aparezca la fisura.

Desde un punto de vista ingenieril, cuando la fisura adquiere una longitud de aproximadamente 0.25 mm se acepta habitualmente que se ha completado la etapa de iniciación.

A partir de ahí se considera que se está en la etapa de extensión o de crecimiento estable que eventualmente culmina en la rotura repentina de la sección remanente.

Fractura.

- inicio
- crecimiento (marcas de playa)
- rotura final

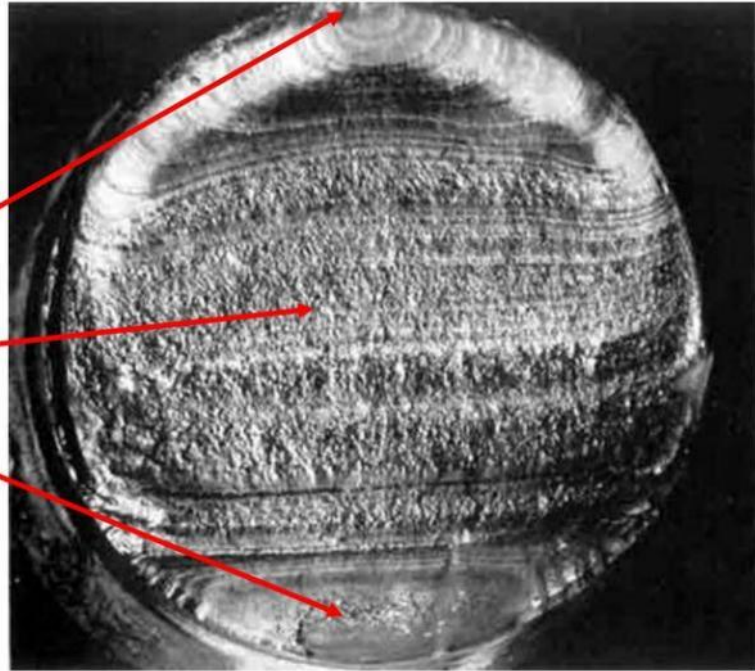


Figura 7.5. Aspectos macroscópicos de la superficie de fractura

7.4. Fractura por exceder la resistencia máxima del material

Es el resultado final de un proceso de deformación plástica excesiva al cual es sometido un material. Dependiendo del material y factores ajenos a este como la temperatura, la carga y el tiempo durante el cual es sometido el material, este puede llegar a una fractura, que se pueden clasificar principalmente como súbita (también llamada frágil) o dúctil, además, cada tipo de fractura presenta diferentes características en su aspecto, así como también en su microestructura.

Fractura súbita. En este tipo de fractura el material presenta un corte limpio, a 90° , sin aparente deformación plástica, originado por un esfuerzo normal.

Fractura dúctil. Se origina ante esfuerzos cortantes que dejan como evidencia una deformación plástica observable, produce en los planos de corte la forma copa-cono, por consiguiente forma un ángulo de 45° respecto a la carga, donde a lo largo de la superficie inclinada se evidencia una zona de desgarre y en el tope de esta una zona fibrosa. En la figura se muestran los principales tipos de falla en elementos sometidos a tensión.

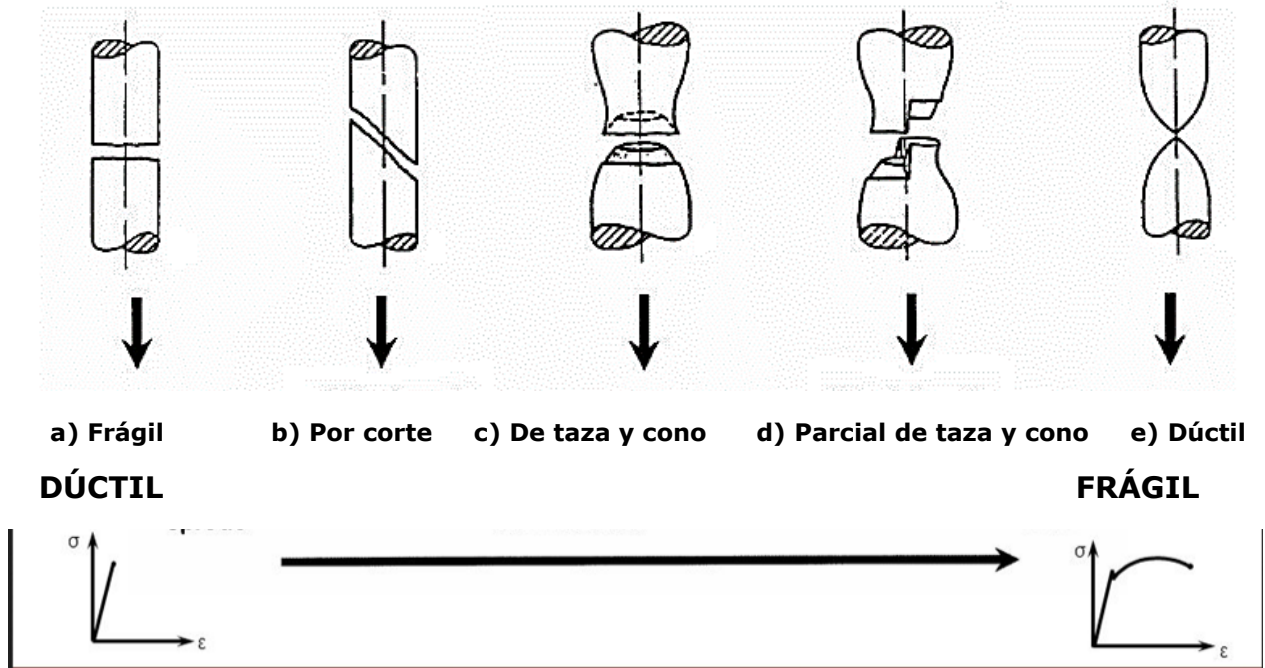


Figura 7.6. Tipos de fallas en elementos sometidos a tensión.

CAPITULO 8

MICROESTRUCTURAS

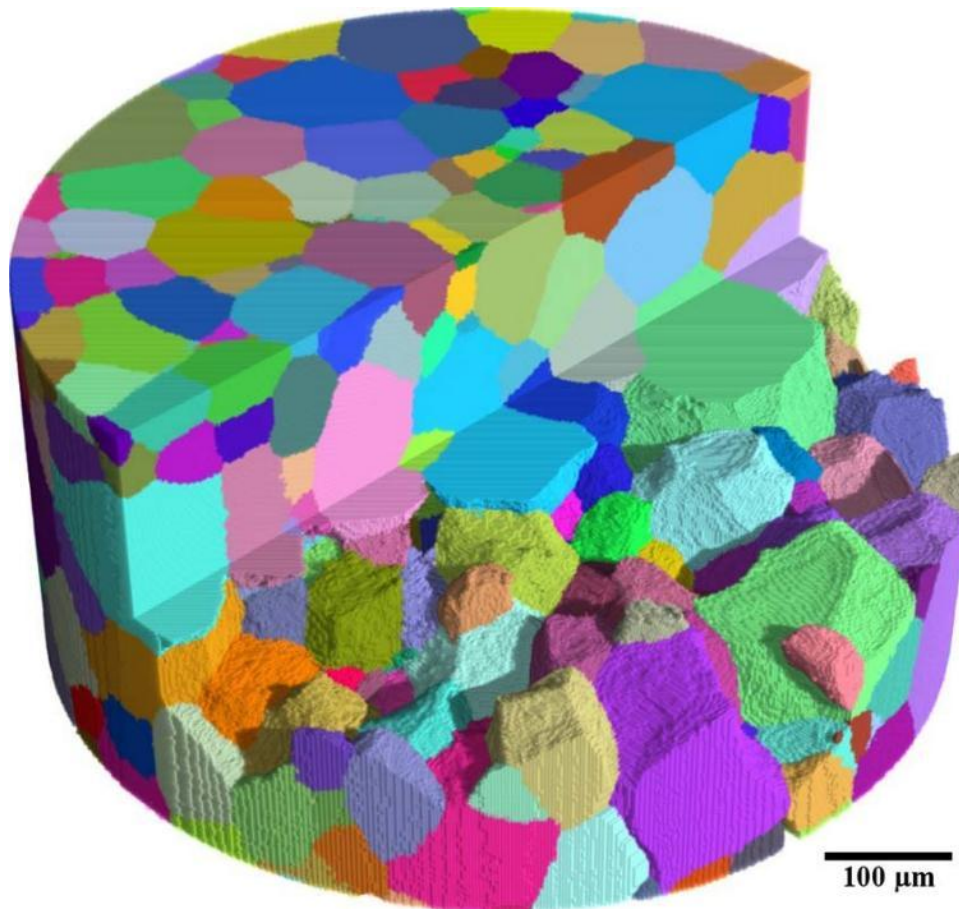


Figura 8.1. Representación de la estructura de grano en 3D en una muestra cilíndrica de Ti beta que contiene 1008 granos, Tal y como se obtiene por la ruta de procesamiento DCT(Discrete Cosine Transform)

Ludwig, Wolfgang & Reischig, P & King, Andrew & Herbig, Michael & Lauridsen, Erik & Johnson, Greg & Marrow, Thomas & Buffiere, Jean-yves. (2009). Three-dimensional grain mapping by X-ray diffraction contrast tomography and the use of Friedel pairs in diffraction data analysis.. *The Review of scientific instruments*. 80. 033905. 10.1063/1.3100200.

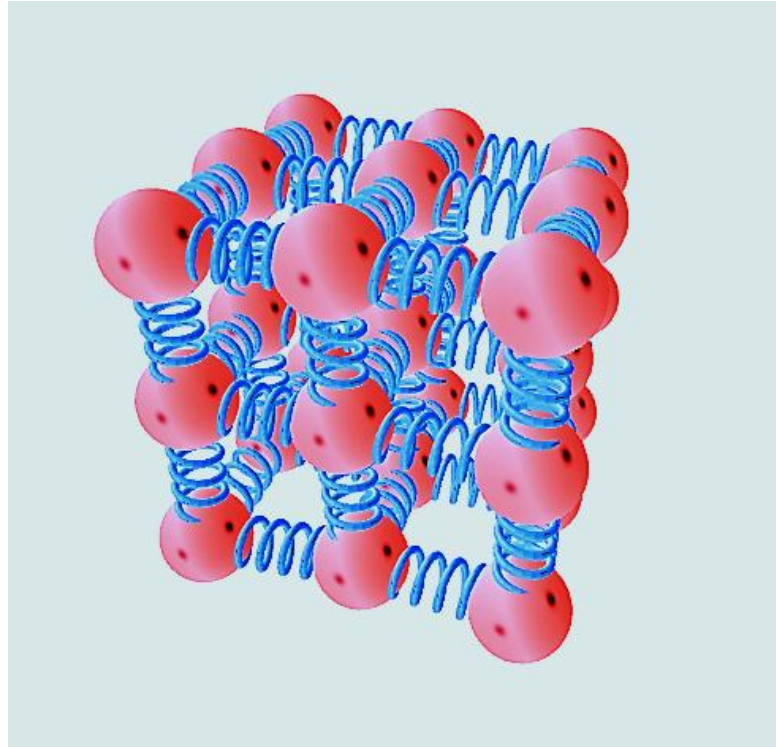


Figura 8.2. Modelo de un sólido representado como átomos conectados por enlaces interatómicos



Figura 8.3. Solidificación de un metal (sin mostrar la estructura cristalina)
Simulación obtenida con el programa Vision of chaos.

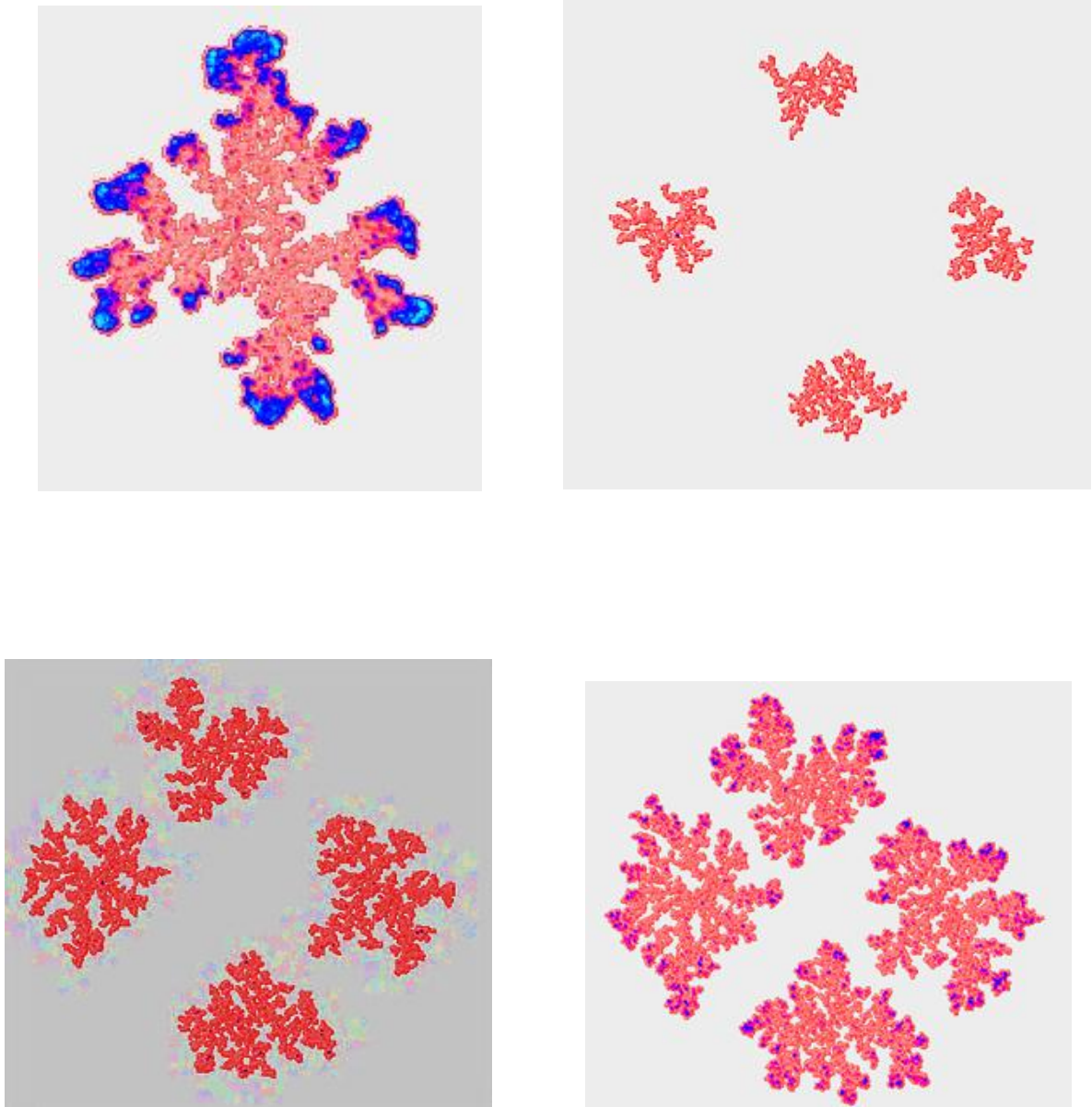


Figura 8.4. Formación de una estructura dendrítica Simulación obtenida con el programa *Vision of caos*.

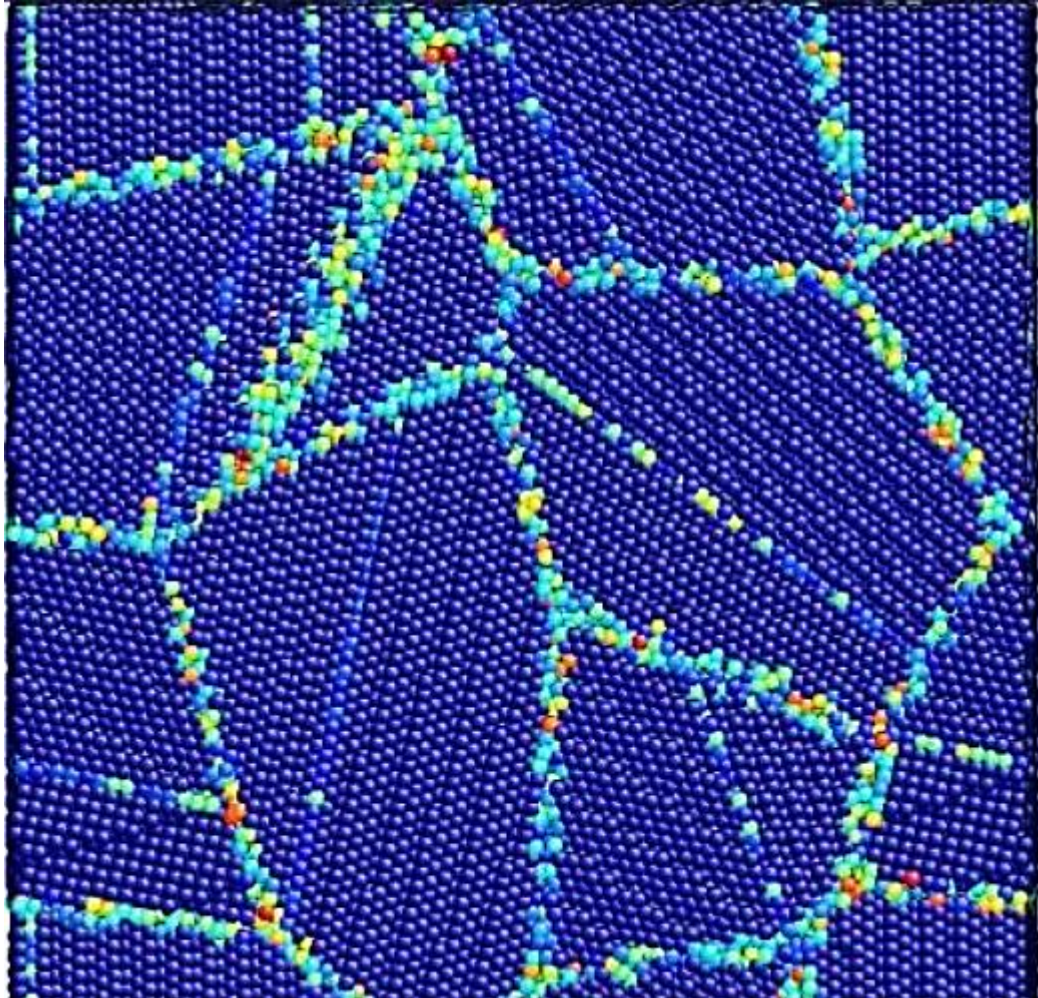


Figura 8.5. Acomodamiento atómico en el límite de grano. (de la página del software AtomsK)

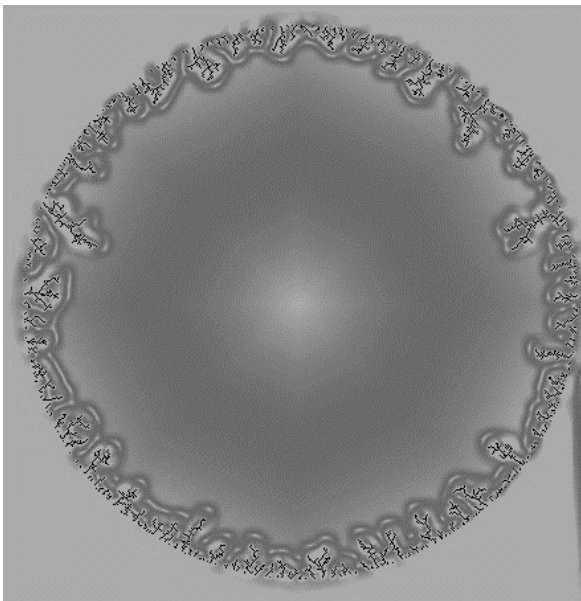
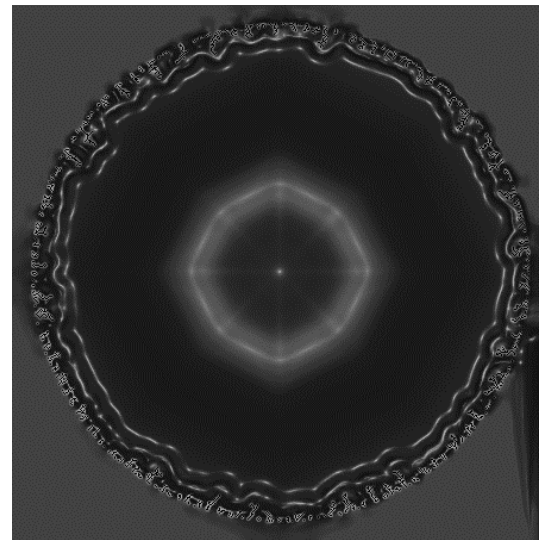
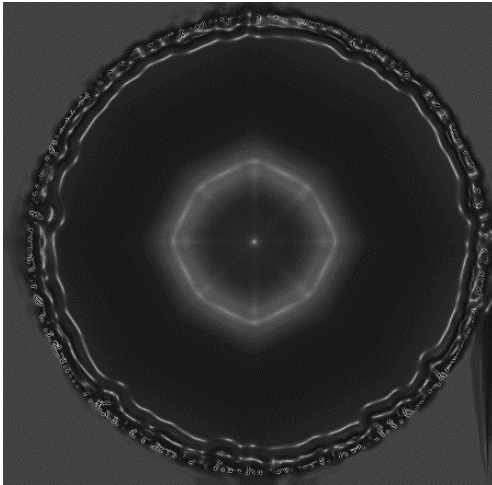


Figura 8.6. . Simulación del proceso de difusión en una barra de sección circular (en función del tiempo) Simulación obtenida con el programa Vision of caos.



Figura 8.7. Hierro forjado, pudelado o "dulce", en donde se puede apreciar escoria alargada en una matriz ferrítica. (<https://www.ucm.es/atlasmetalografico/x29-hierro-pudelado>, Universidad Complutense de Madrid)

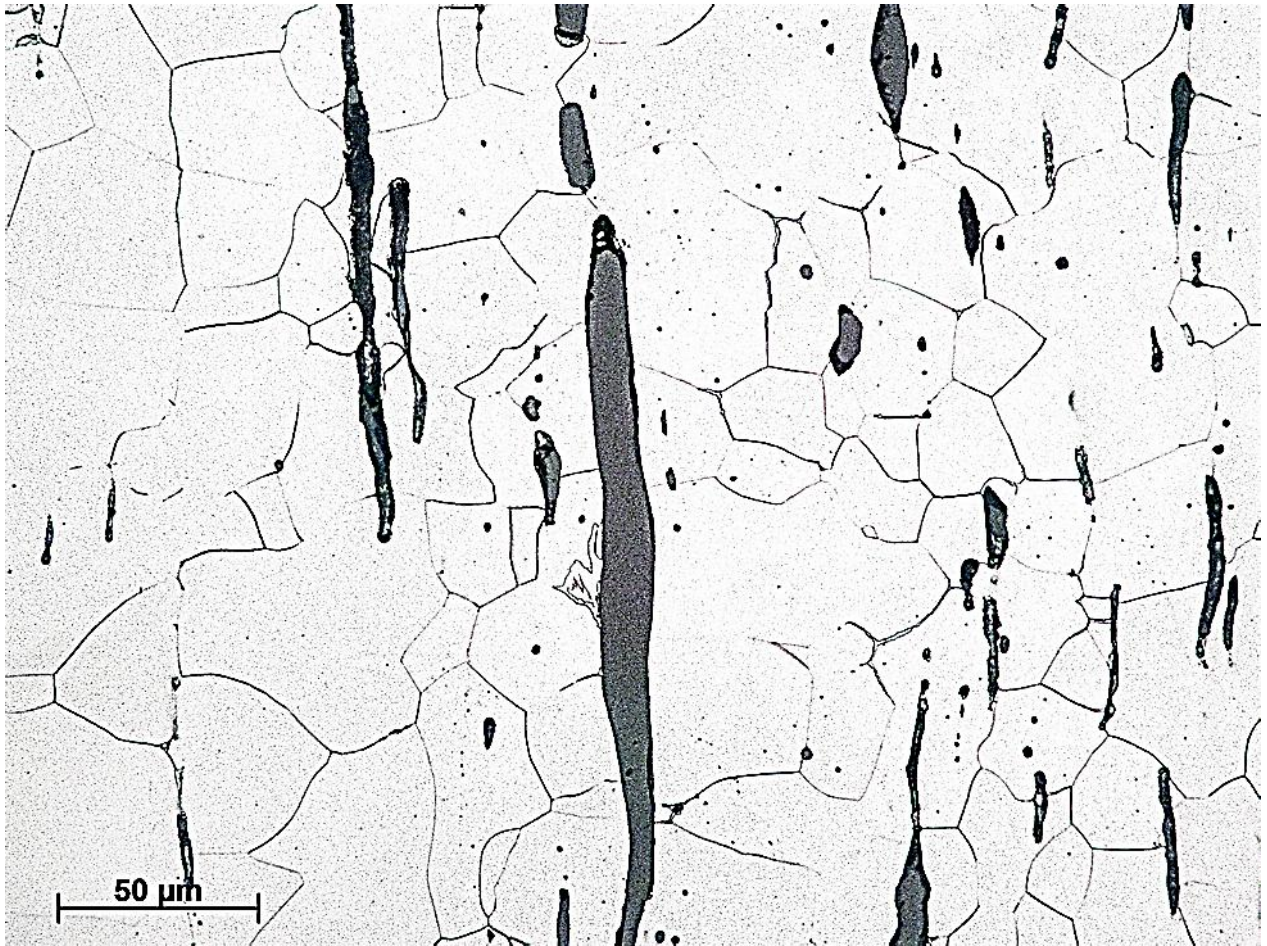


Figura 8.8. Hierro forjado, pudelado o "dulce", en donde se puede apreciar escoria alargada en una matriz ferrítica. (<https://www.ucm.es/atlasmetalografico/x29-hierro-pudelado>, Universidad Complutense de Madrid)

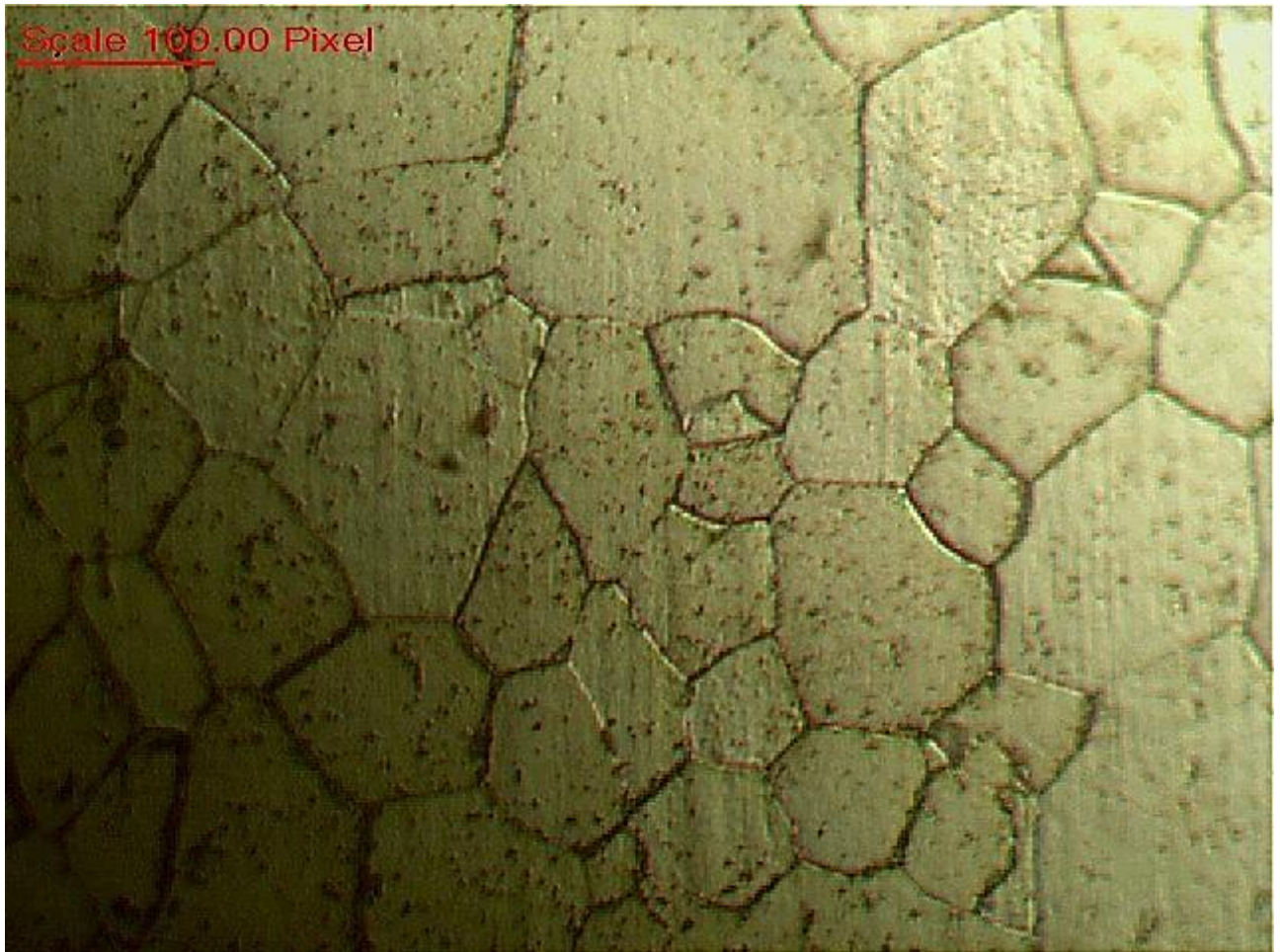


Figura 8.9. Alambre de acero recocido de muy bajo carbono (400X)

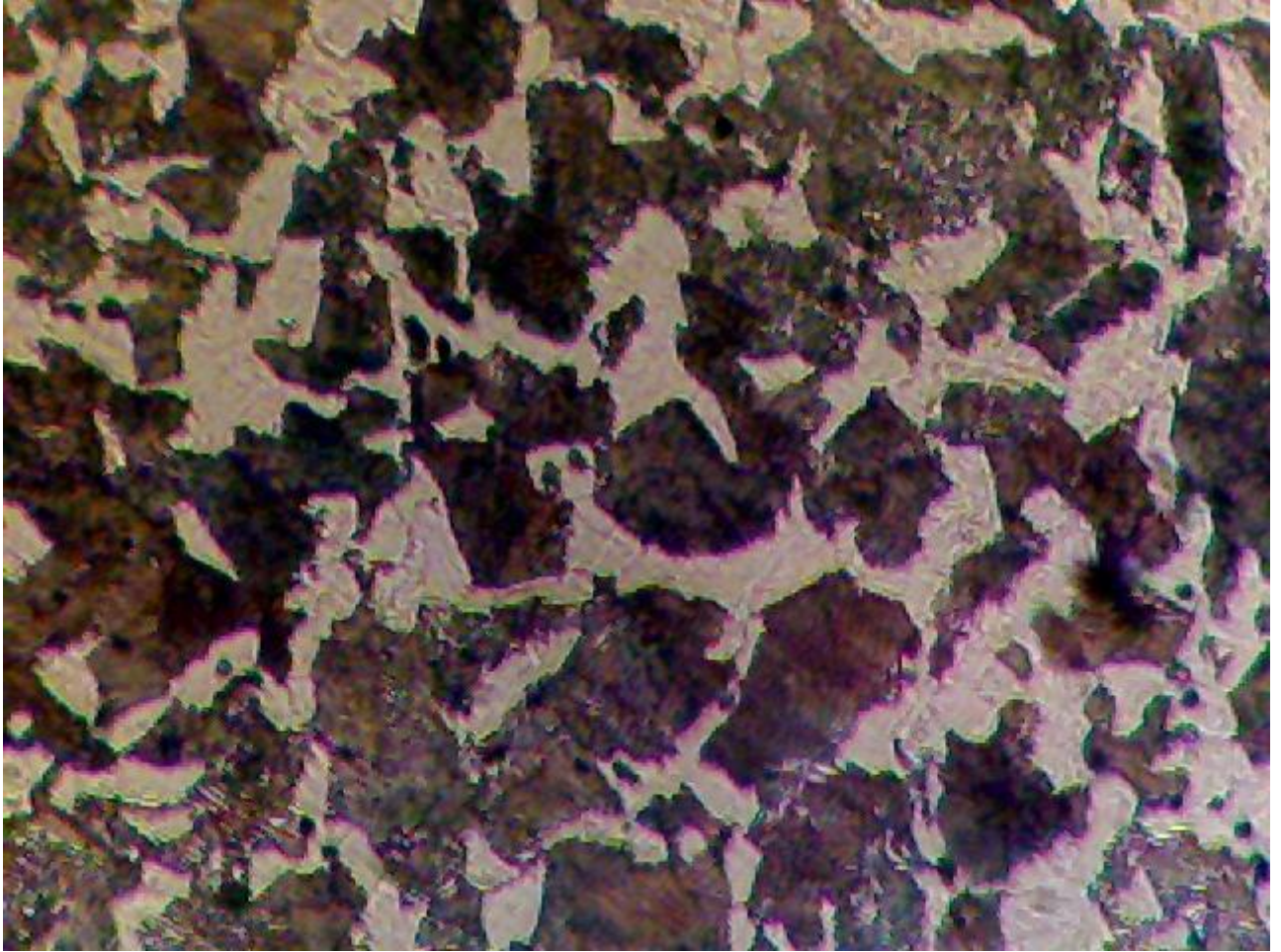


Figura 8.10. Acero 1045 100X

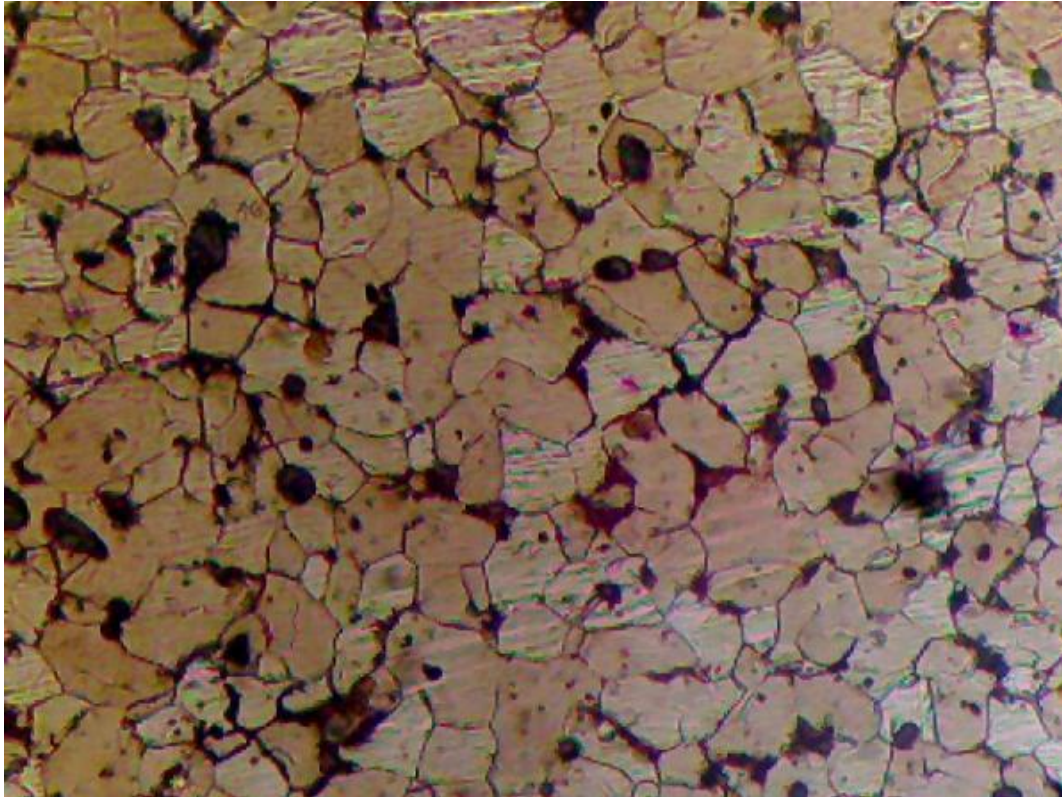


Figura 8.11. Acero bajo carbono. Ataque con nital al 2% 200 X

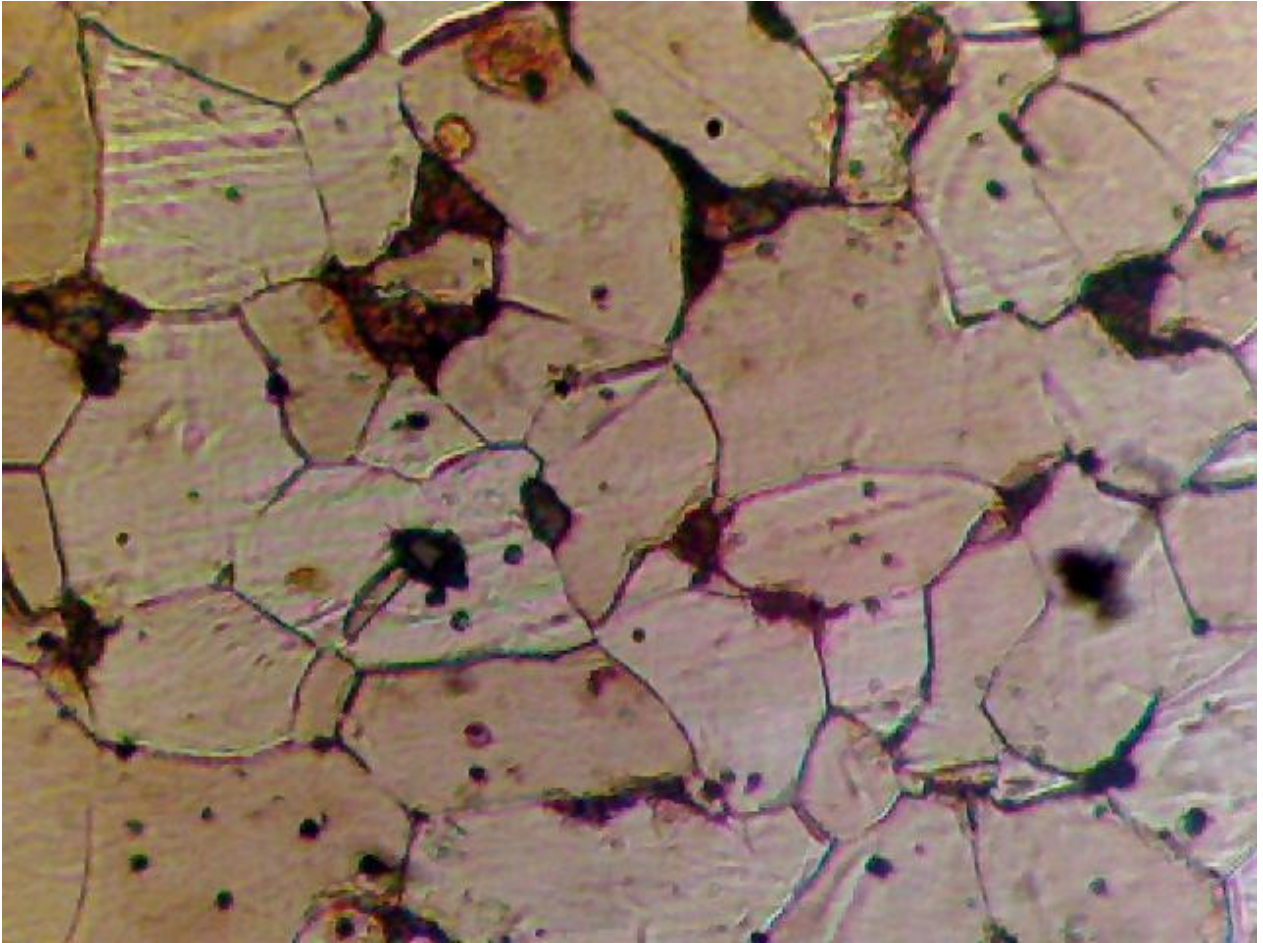


Figura 8.12. Acero de bajo carbono. (500X)

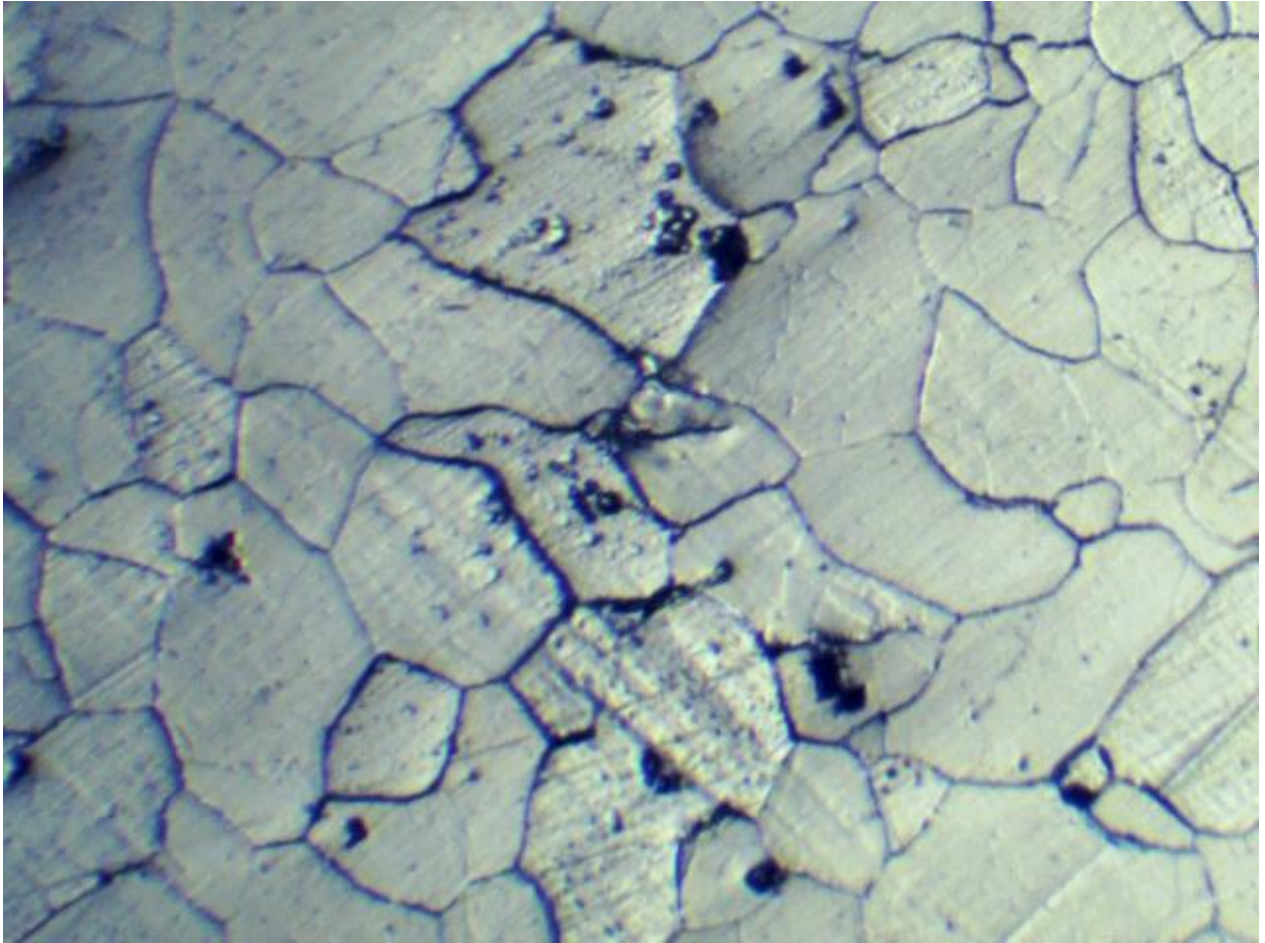


Figura 8.13. Clavo antiguo observado a 65X

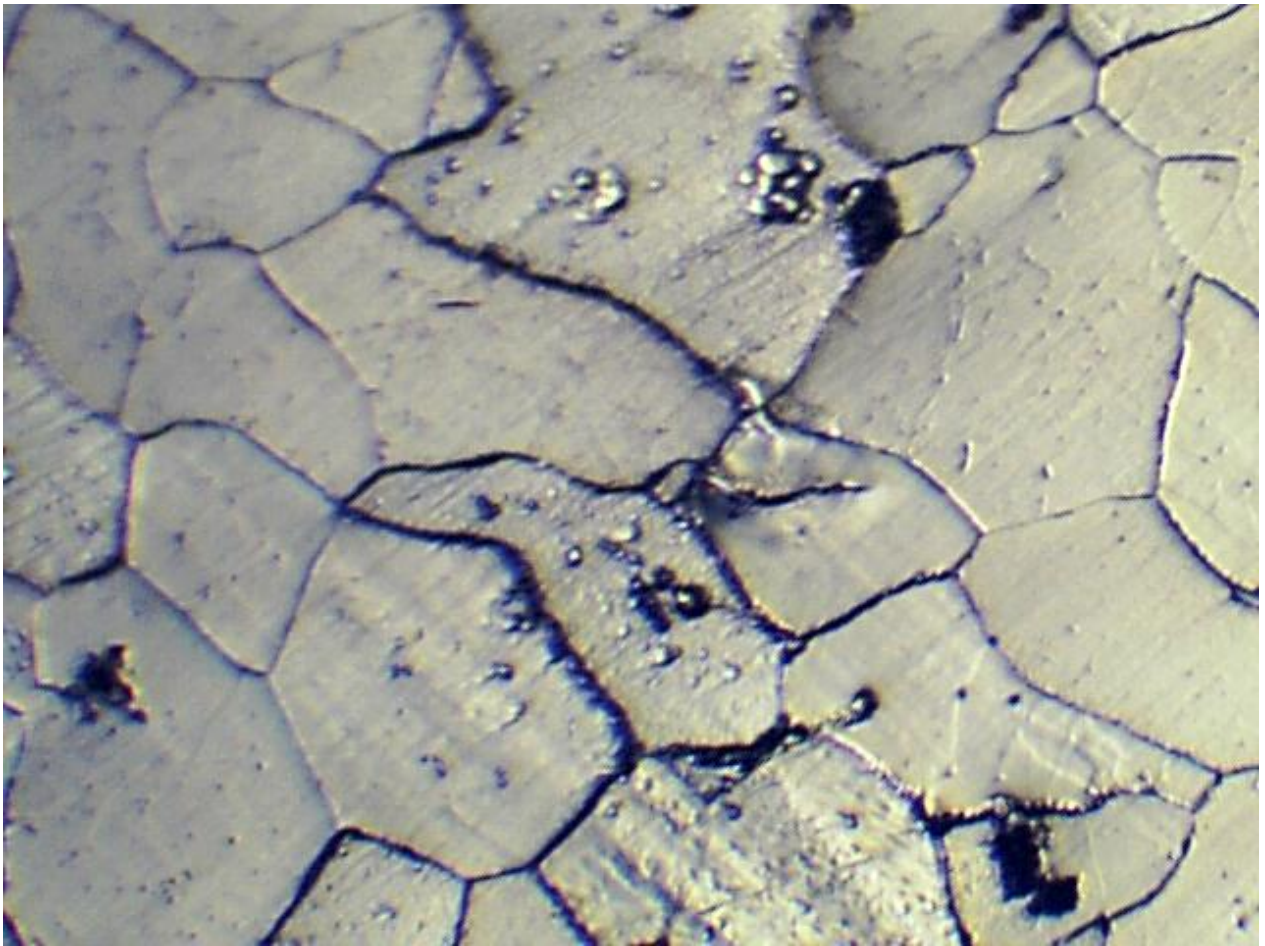


Figura 8.14. Clavo antiguo observado a 100X

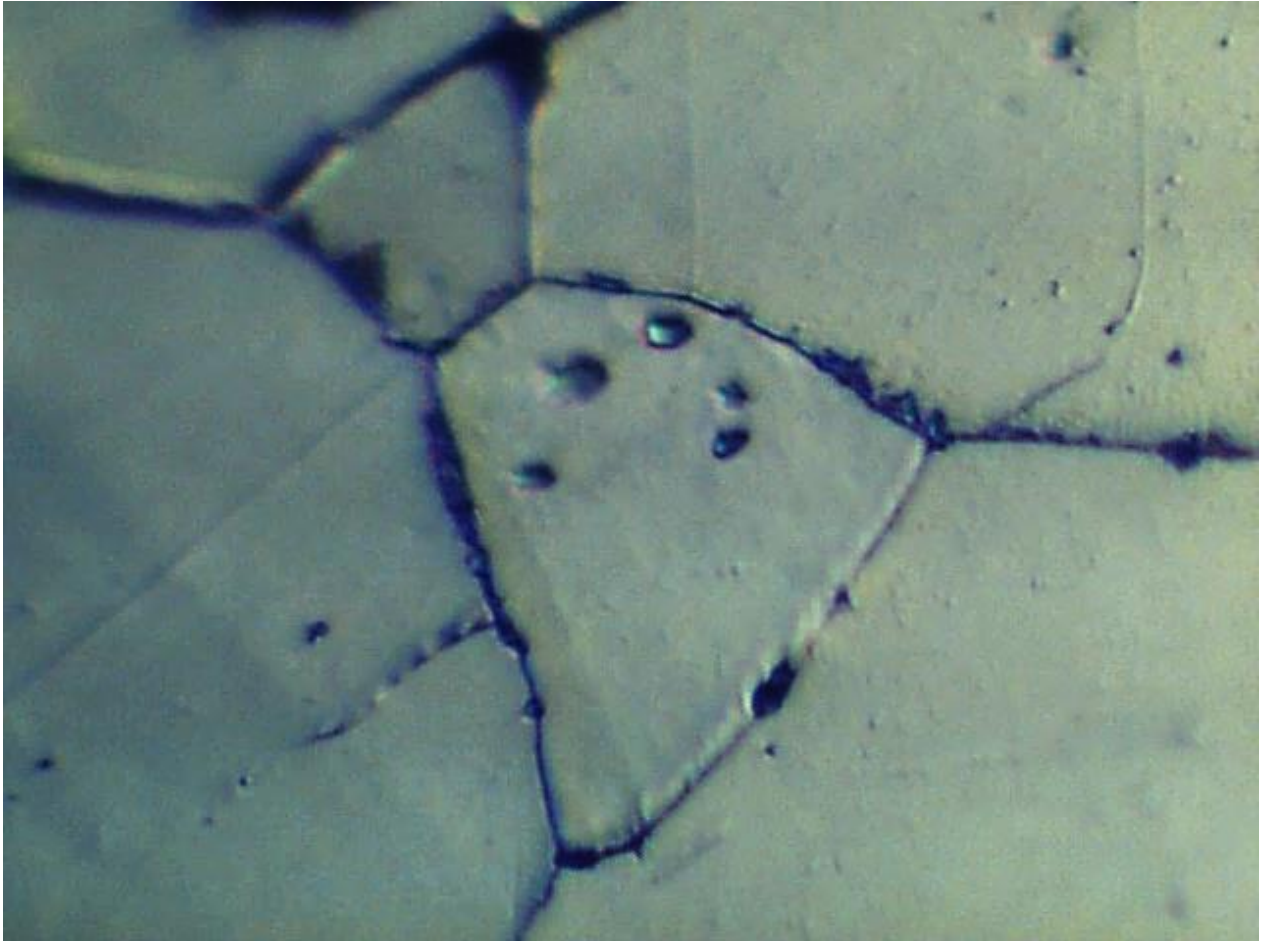


Figura 8.15. Clavo antiguo observado a 400X

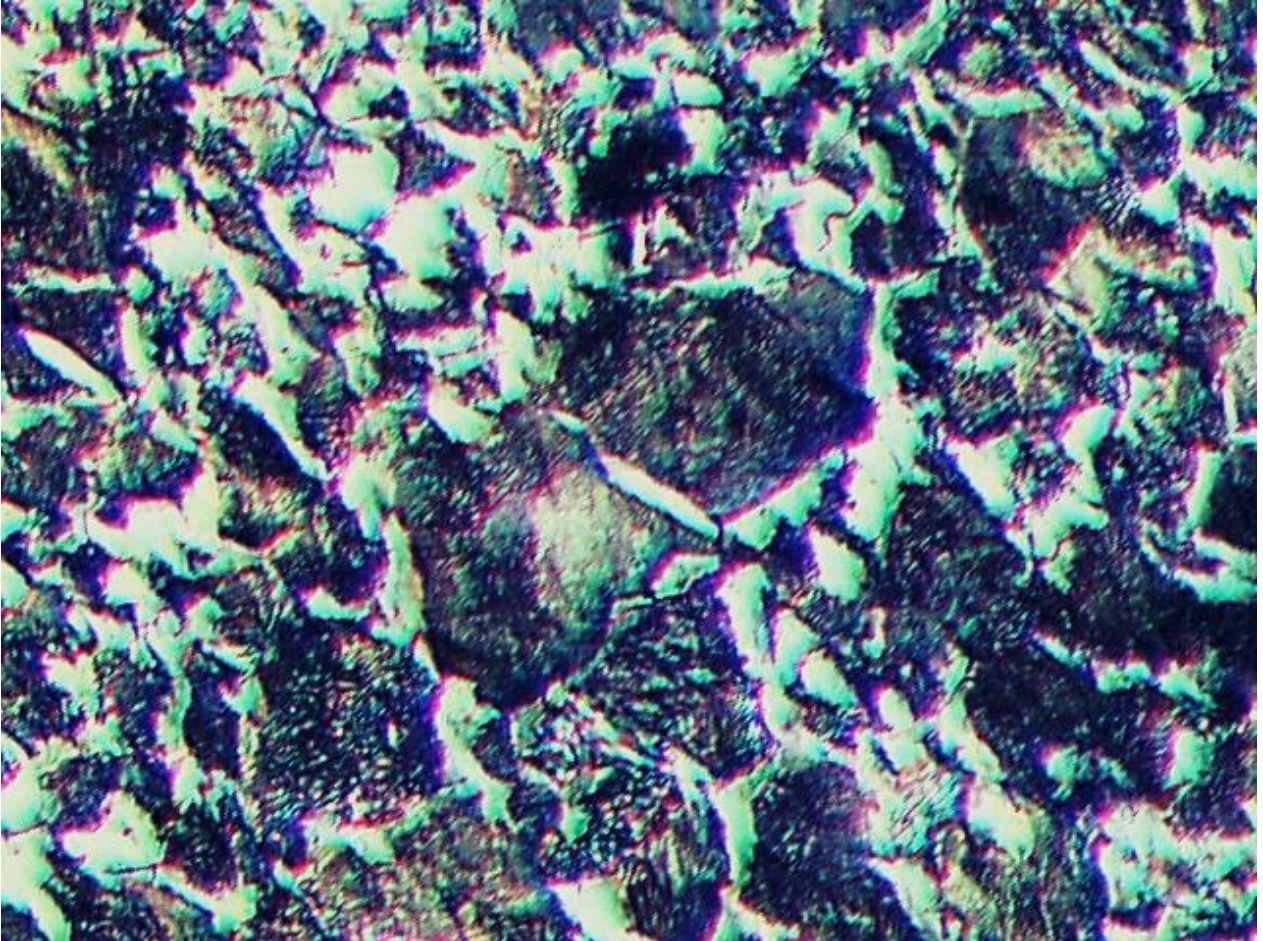


Figura 8.16. Acero NOM-1060 normalizado observado a 200X

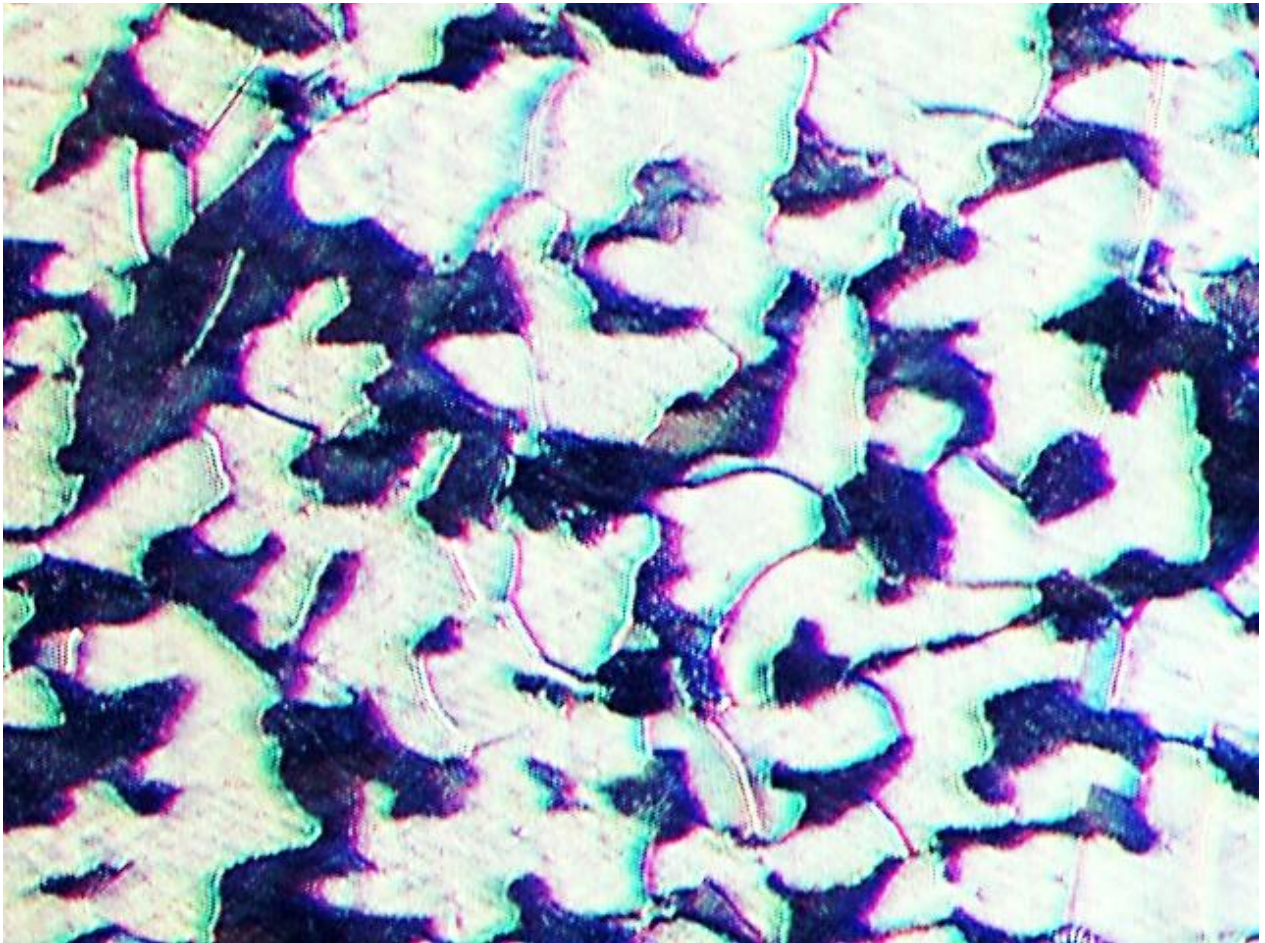


Figura 8.17. Acero NOM-1018 normalizado, observado a 200X

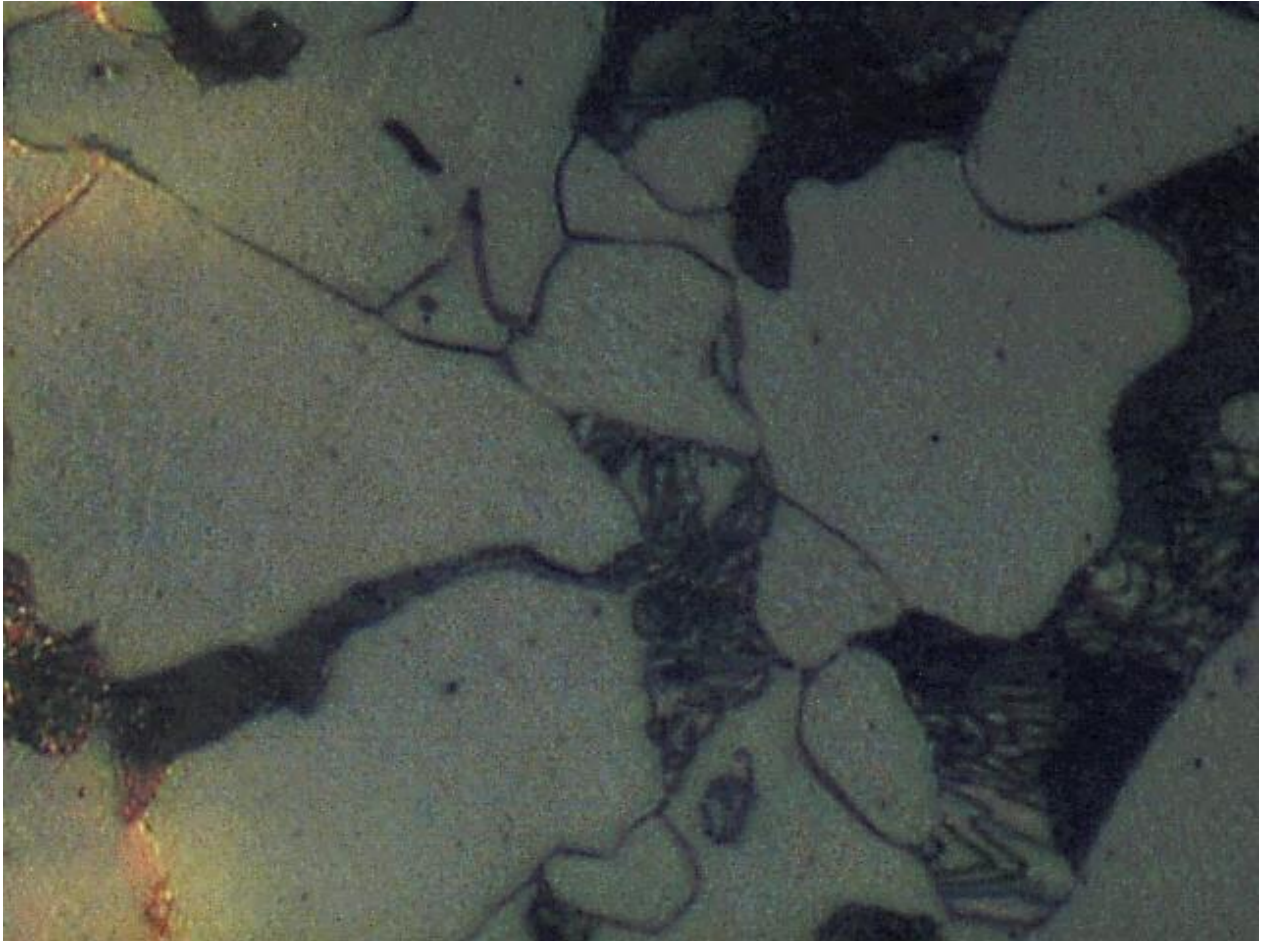


Figura 8.18. Acero NOM-1018 normalizado, observado a 500X

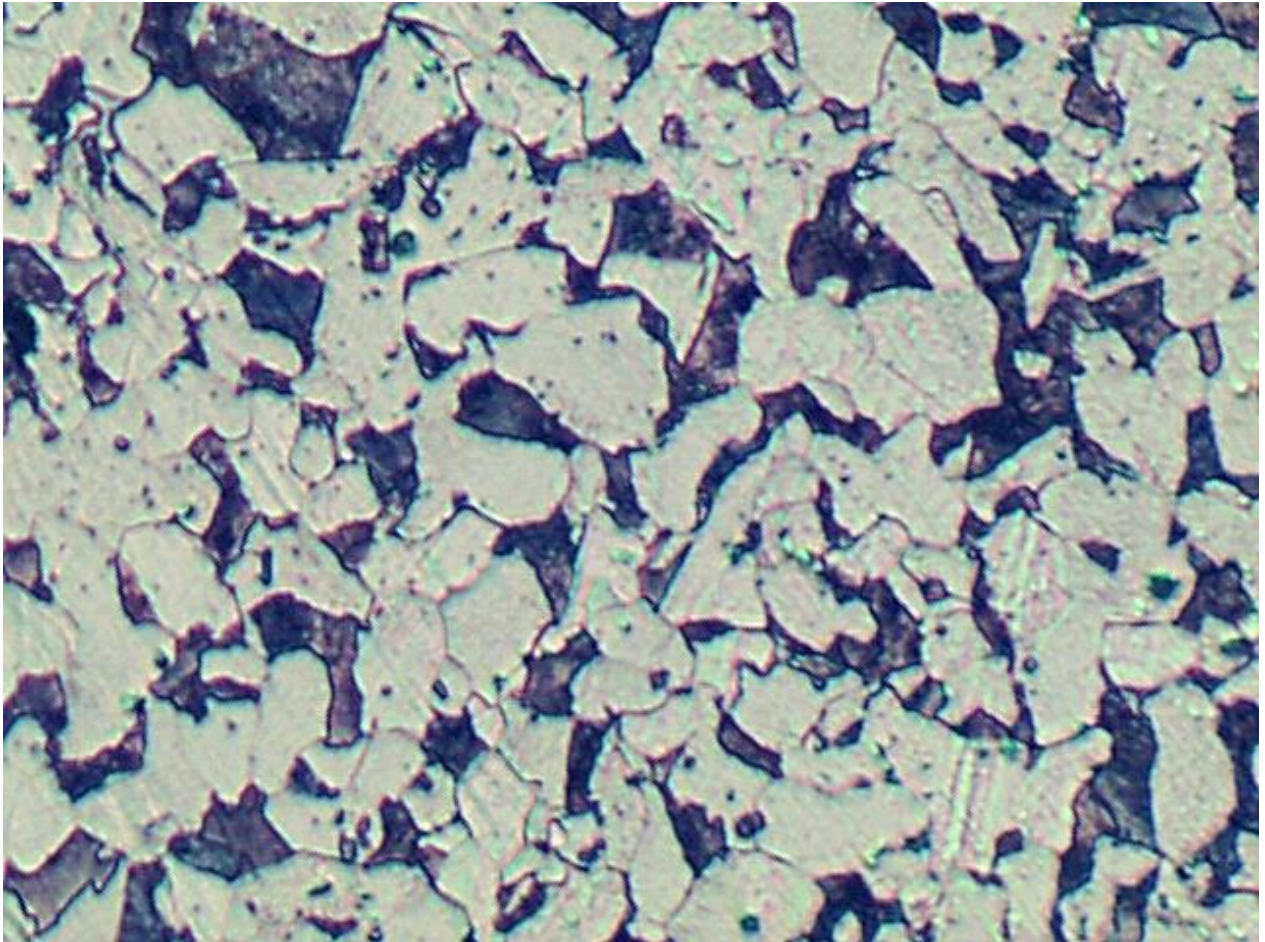


Figura 8.19. Varilla roscada de 1/2" observada a 200X

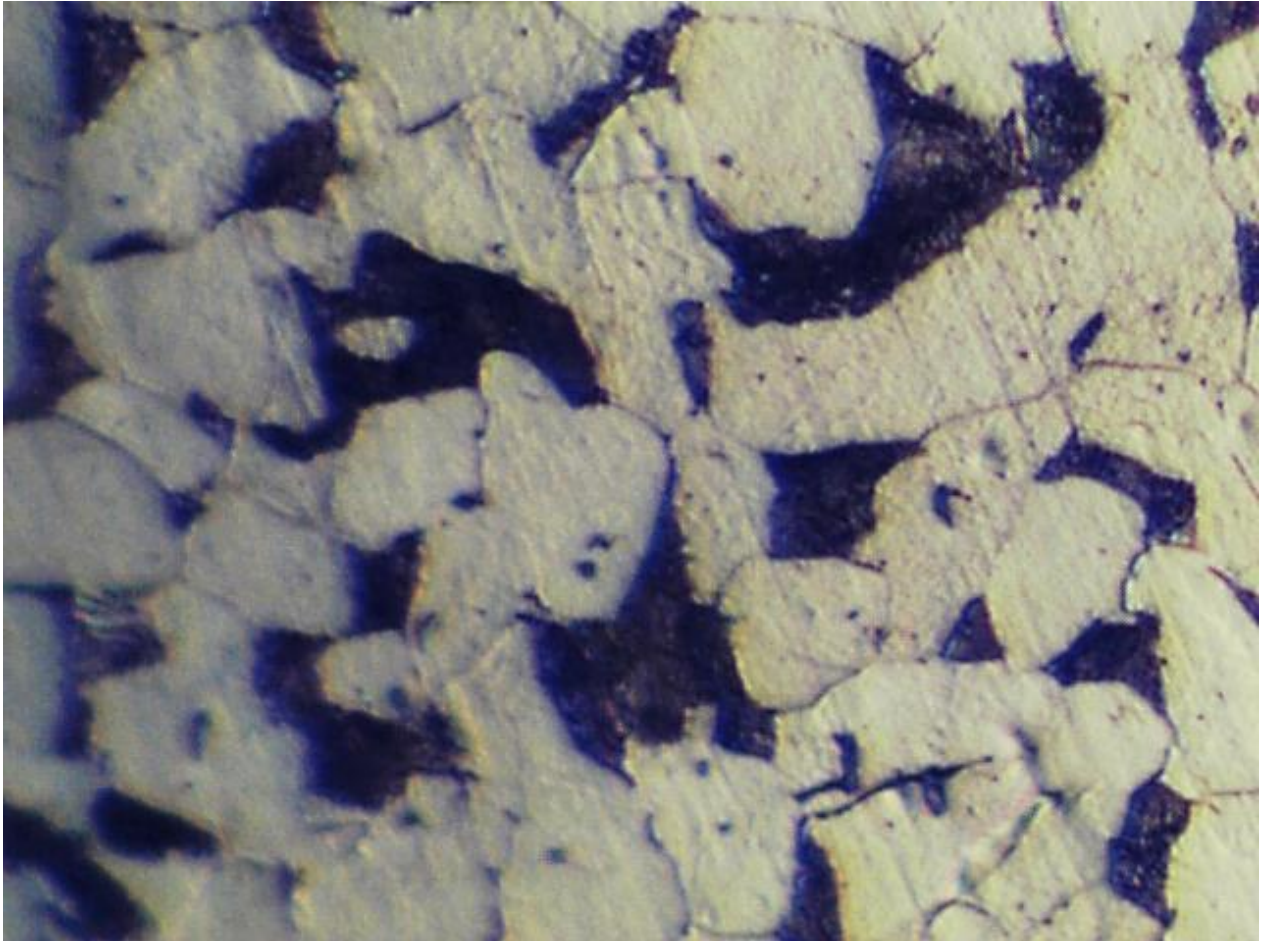


Figura 8.20. Varilla roscada de acero de 1/2" observada a 400X

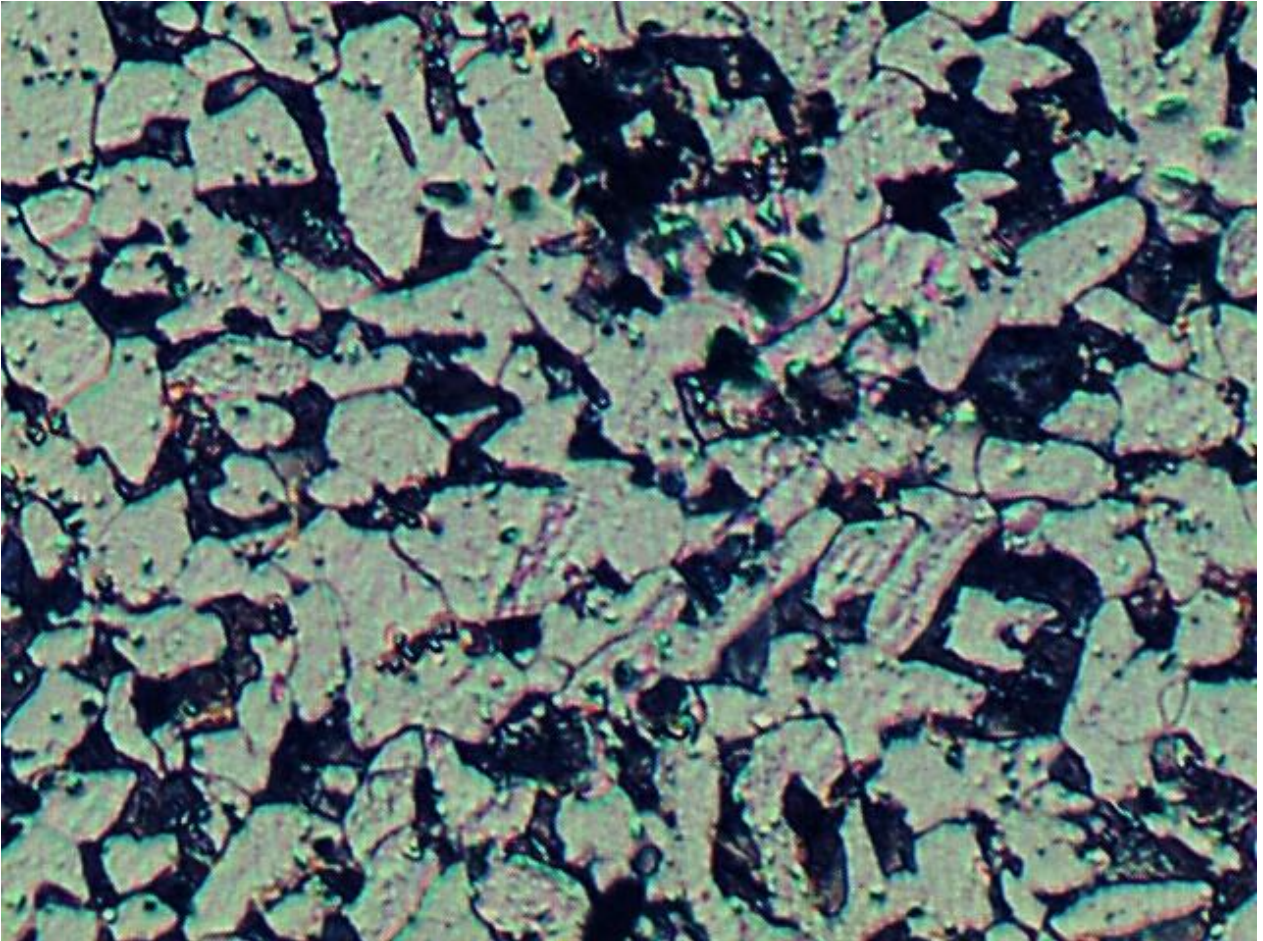


Figura 8.21. Cuadrado de acero de 1/2" observada a 200X

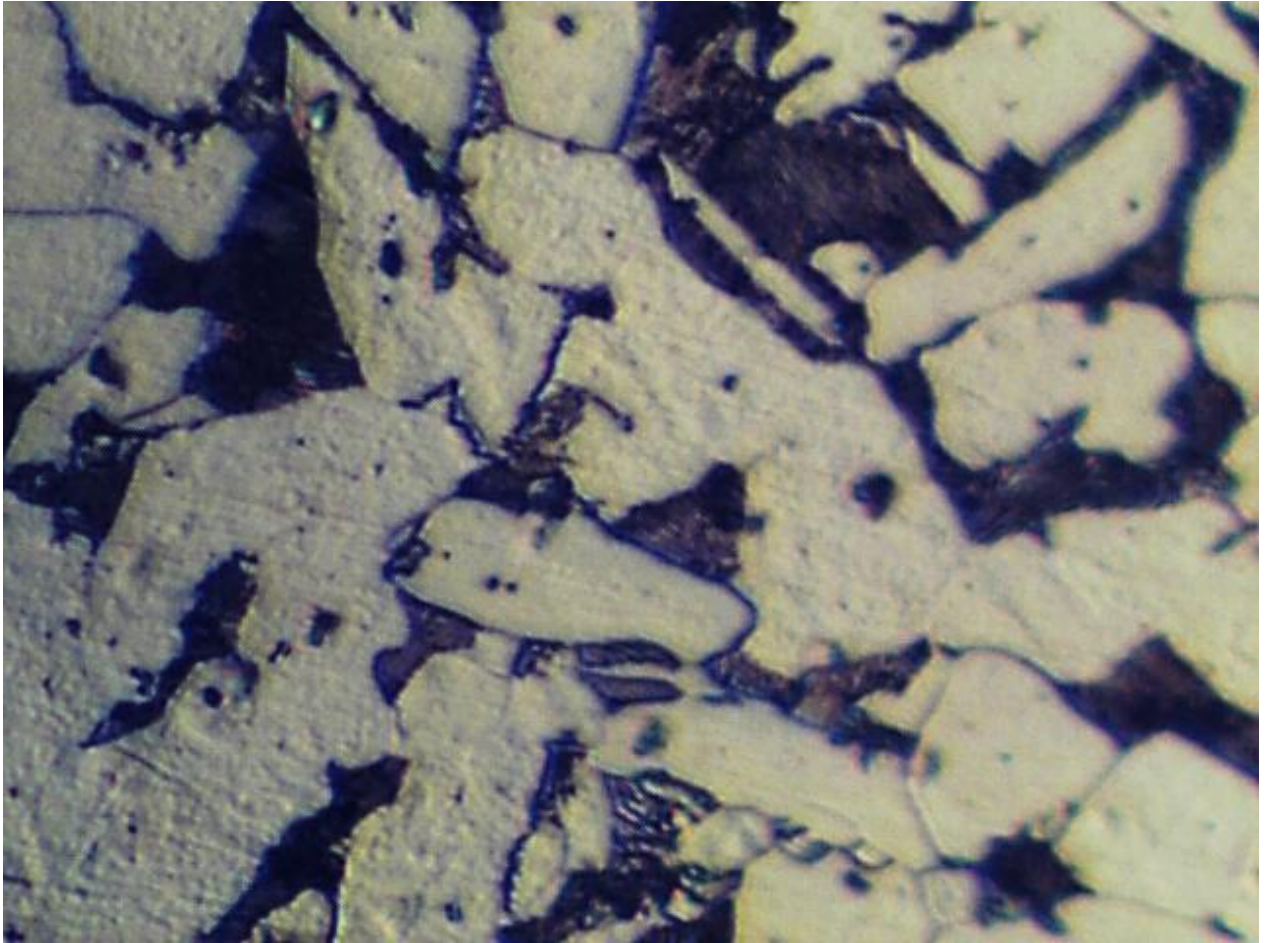


Figura 8.22. Cuadrado de acero de 1/2" observada a 400X

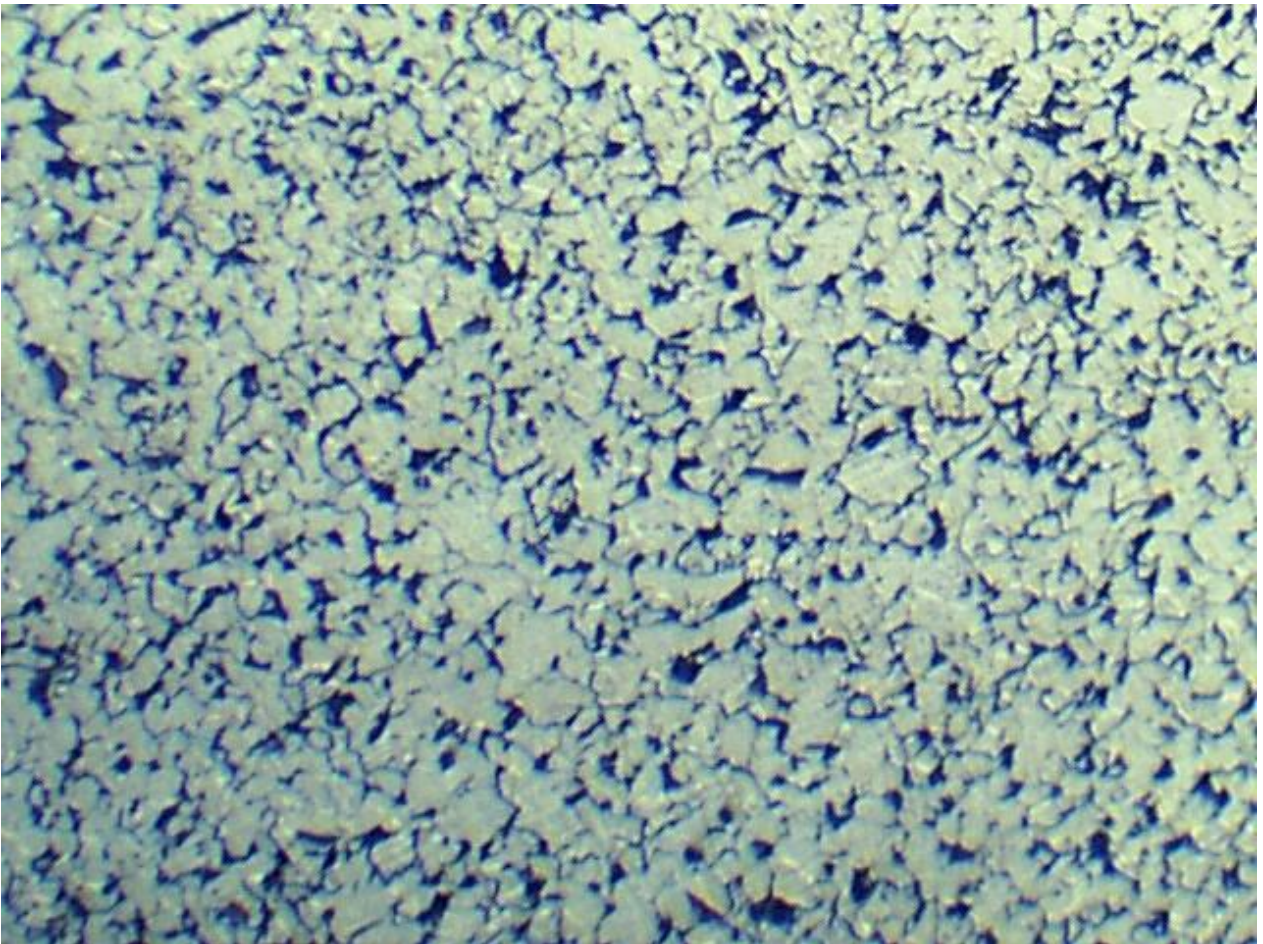


Figura 8.23. Acero NOM-1010, observado a 200X

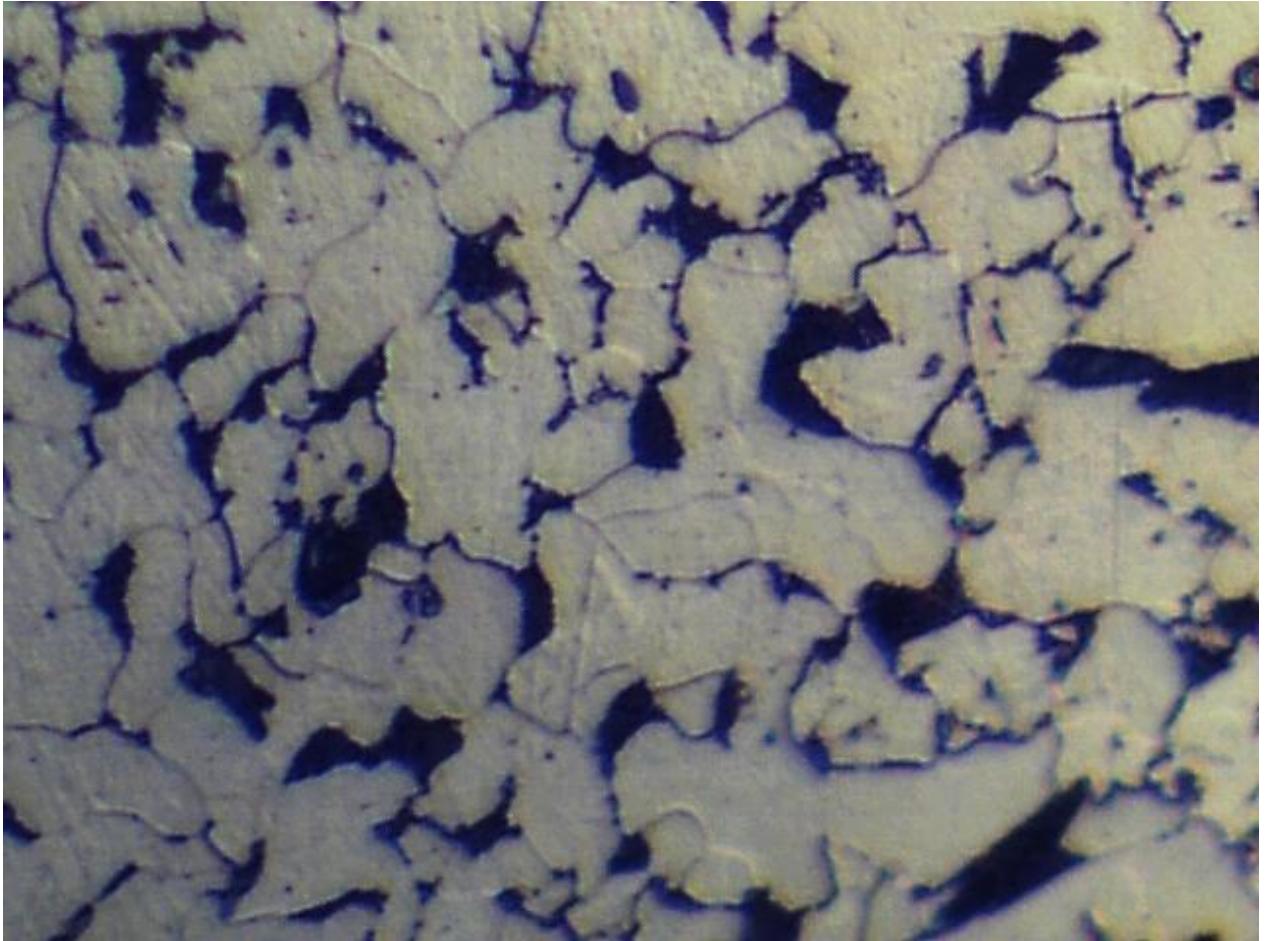


Figura 8.24. Acero NOM-1010, observado a 500X

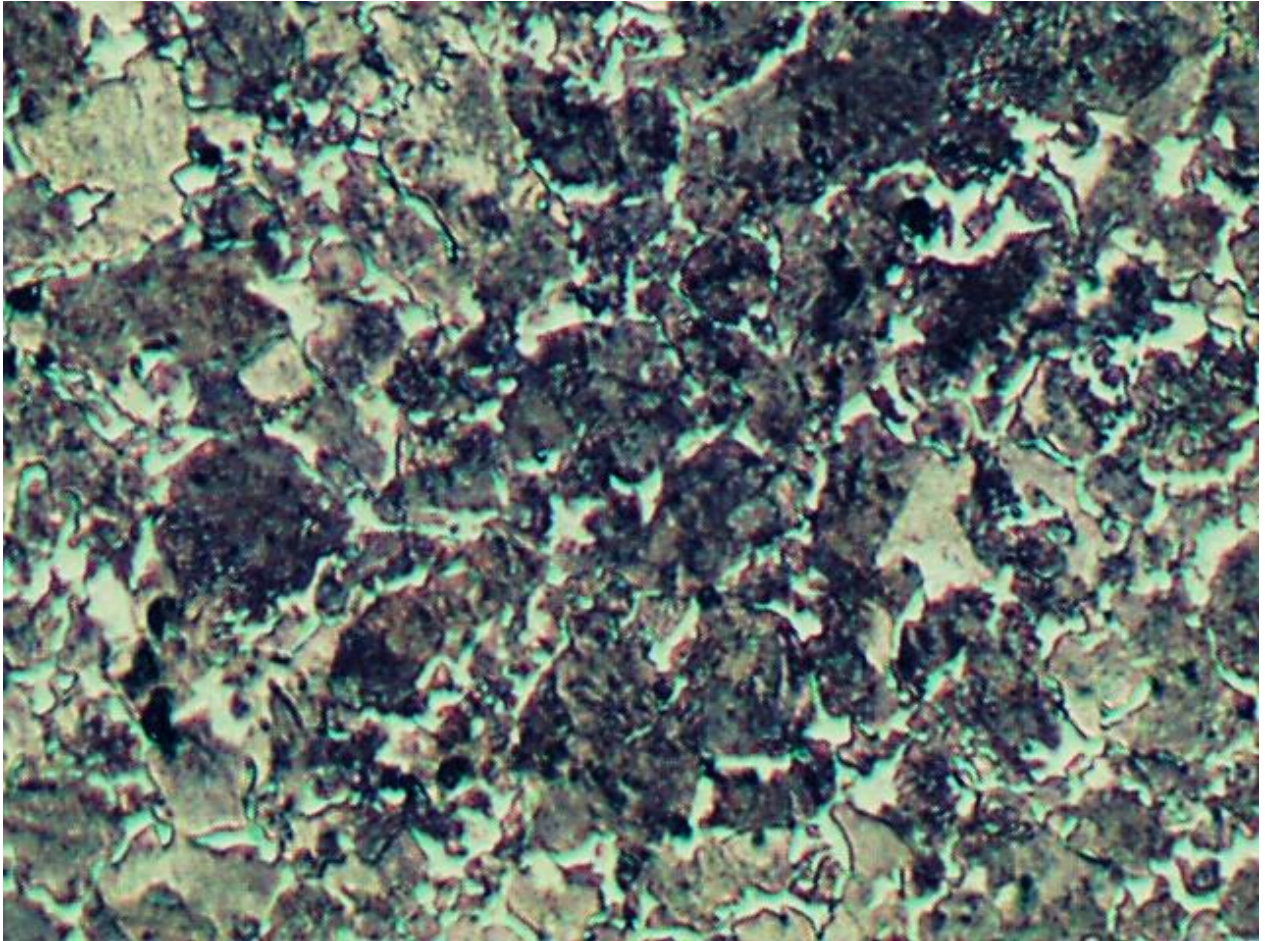


Figura 8.25. Acero hipoeutectoide (varilla para construcción) observada a 200X

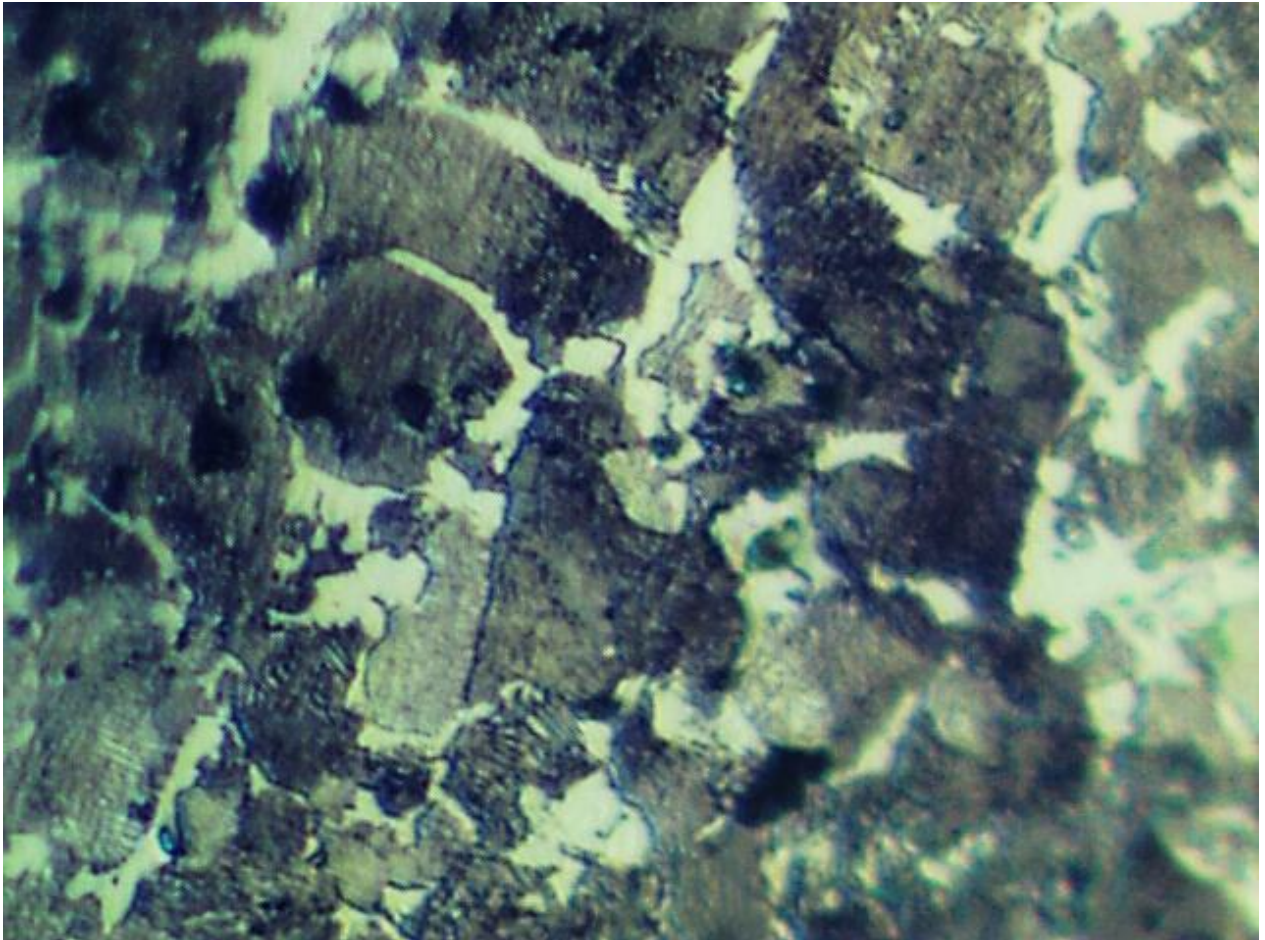


Figura 8.26. Acero hipoeutectoide (varilla para construcción) observada a 400X

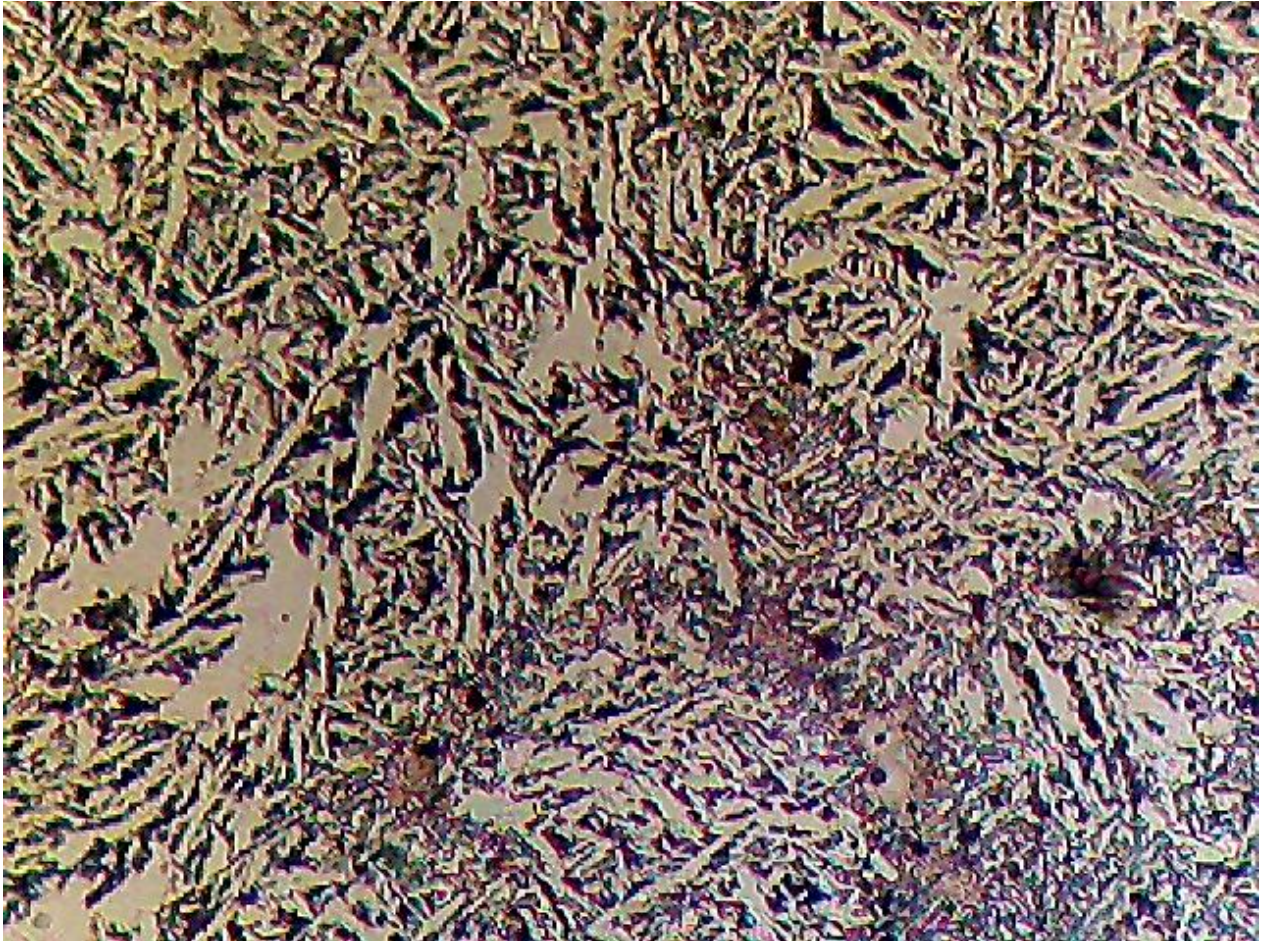


Figura 8.27. Estructura de tipo Widmanstätten en un acero de bajo carbono fundido (200x)

Nota: En la estructura de Widmanstätten un enfriamiento rápido desde altas temperaturas obliga a un crecimiento de la ferrita según ciertas direcciones preferenciales, resultando granos alargados en dichas direcciones del grano de austenita previo.

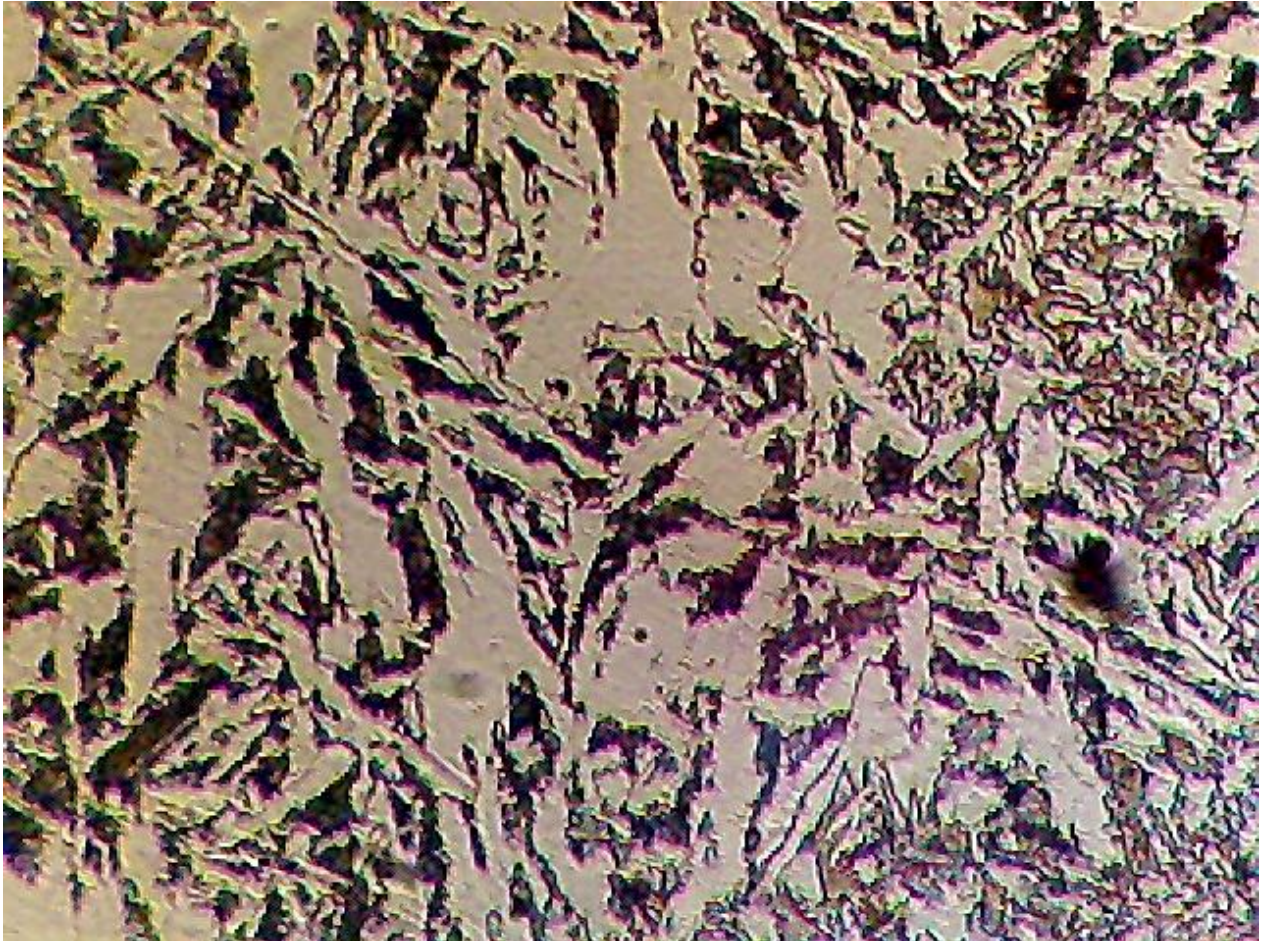


Figura 8.28. Estructura de tipo Widmanstätten en un acero de bajo carbono fundido (500X)

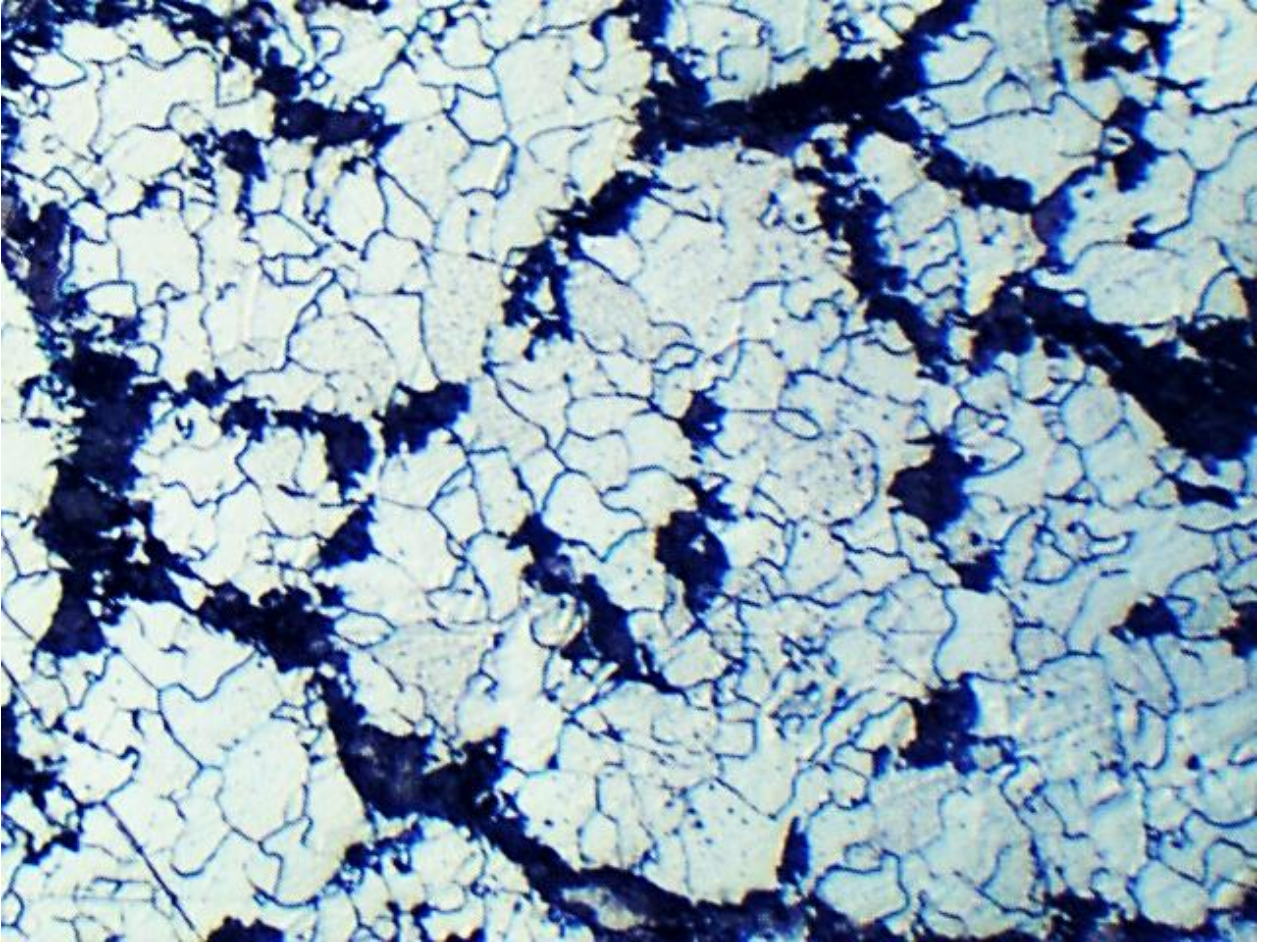


Figura 8.29. Mismo acero de las figuras 8.25 y 8.26 pero recocido a 870°C, 100X

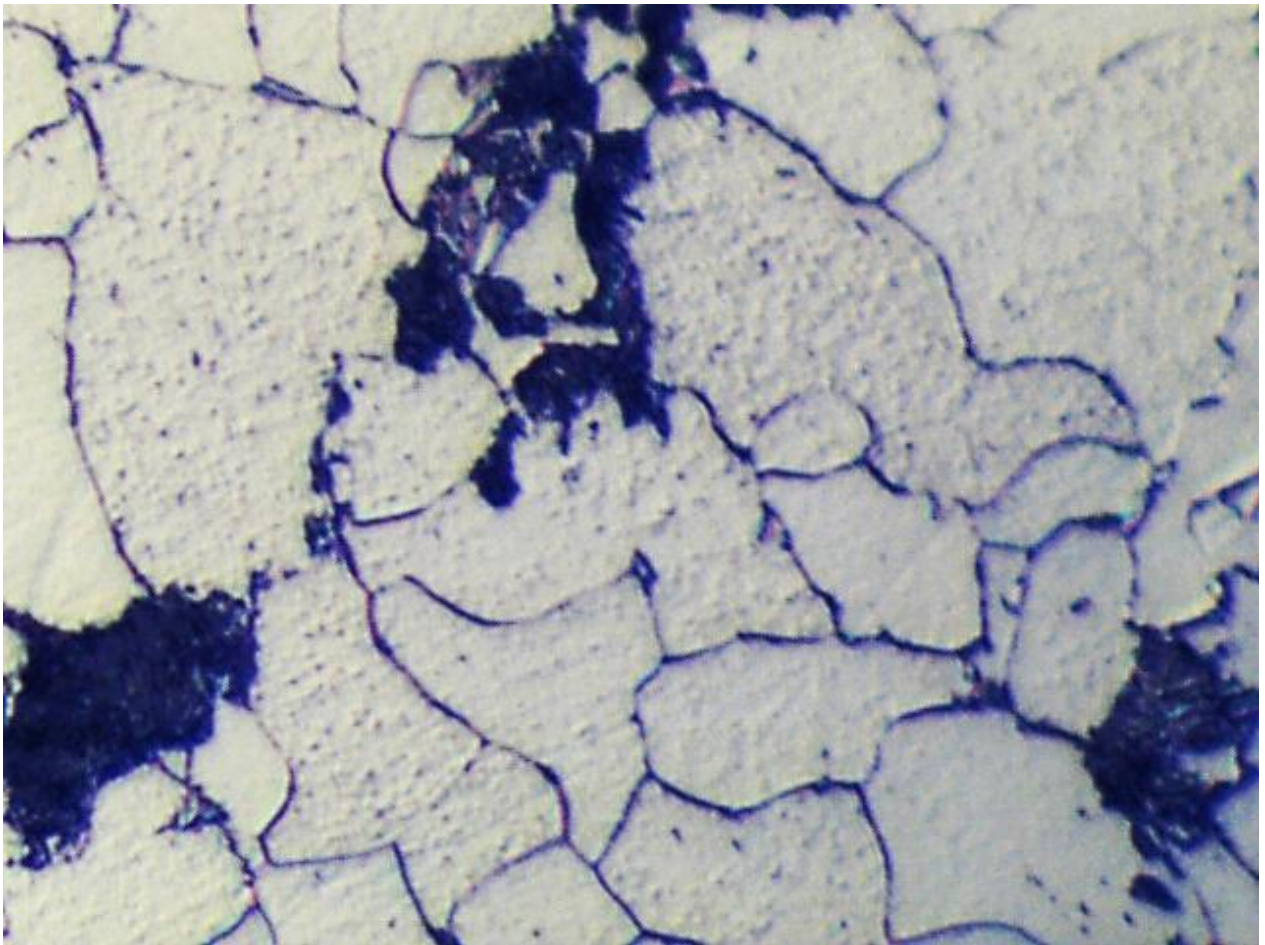


Figura 8.30. Mismo acero de las figuras 8.25 y 8.26 pero recocido a 870°C, 400X

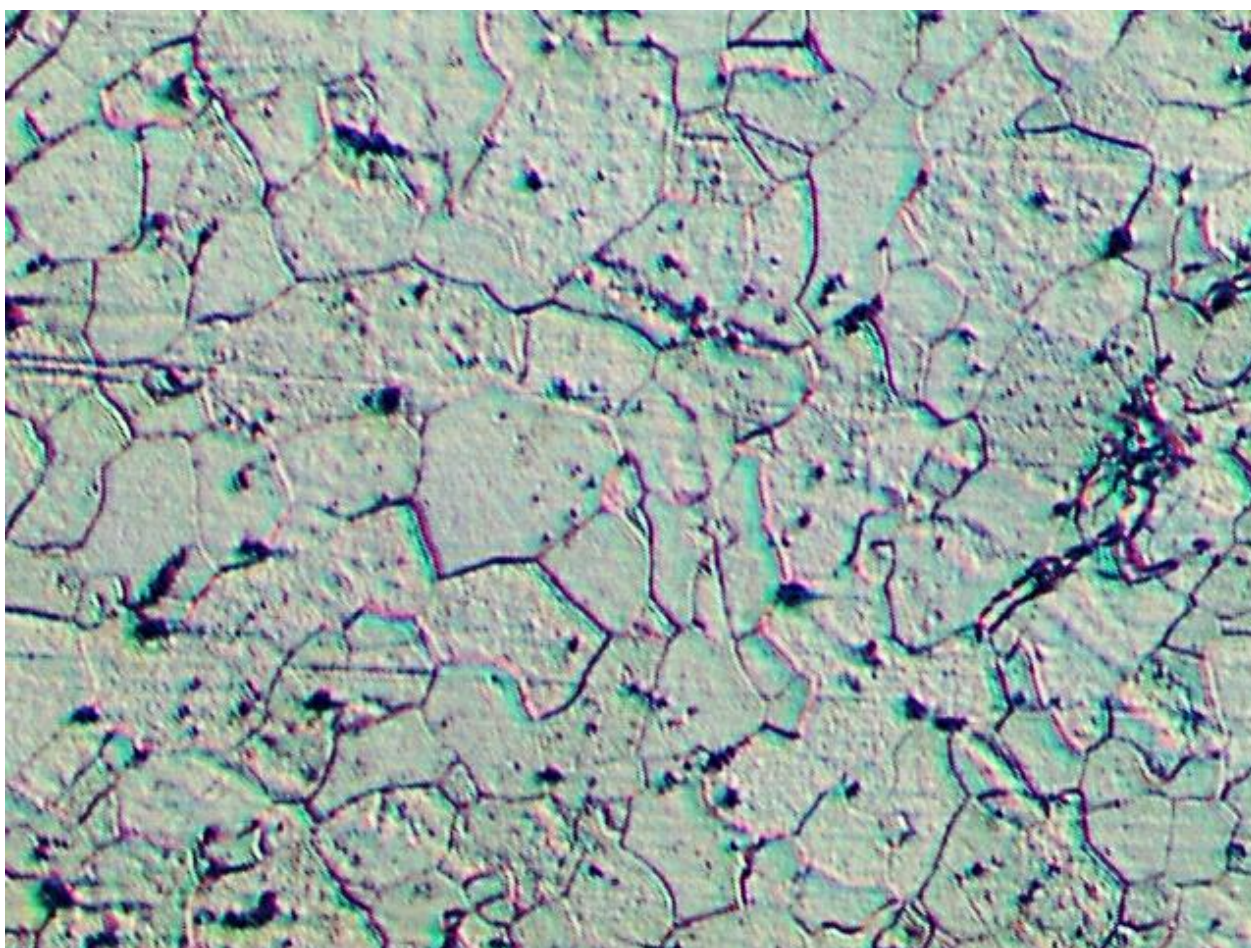


Figura 8.31. Lámina de acero NOM-1005 observada a 200X

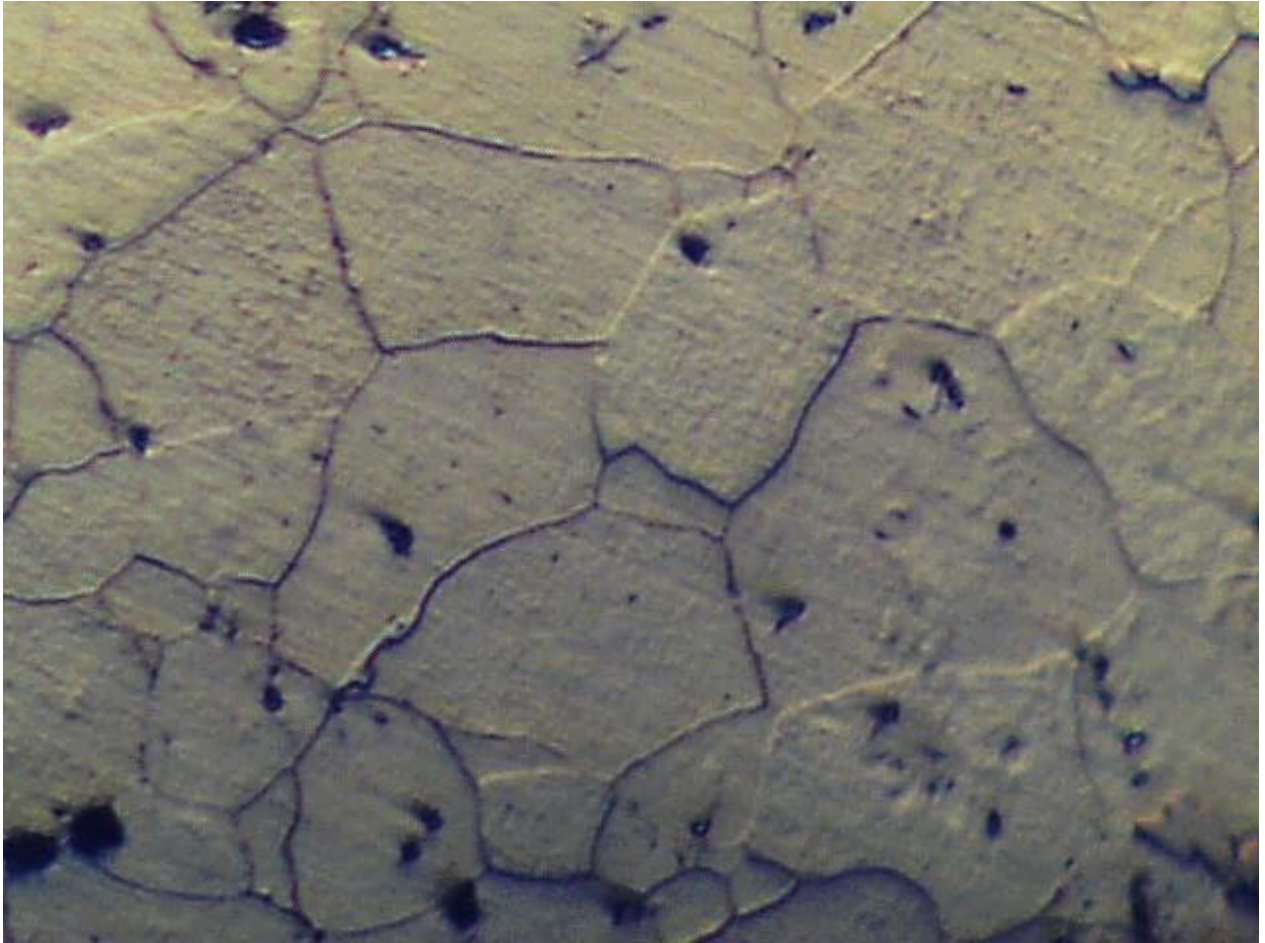


Figura 8.32. Lámina de acero NOM-1005 a 400X

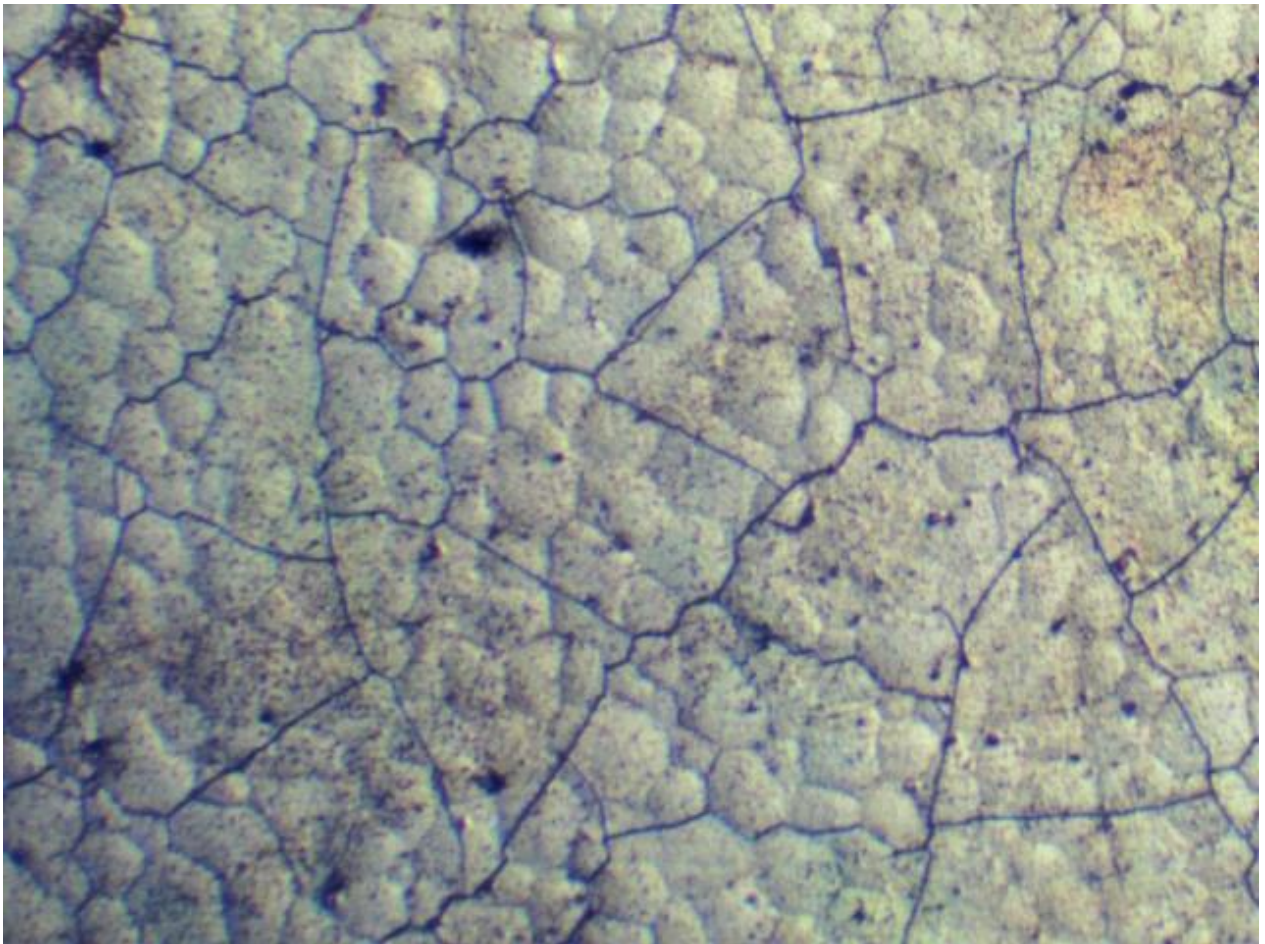


Figura 8.33. Esparrago de acero de 5/8" observado a 100X

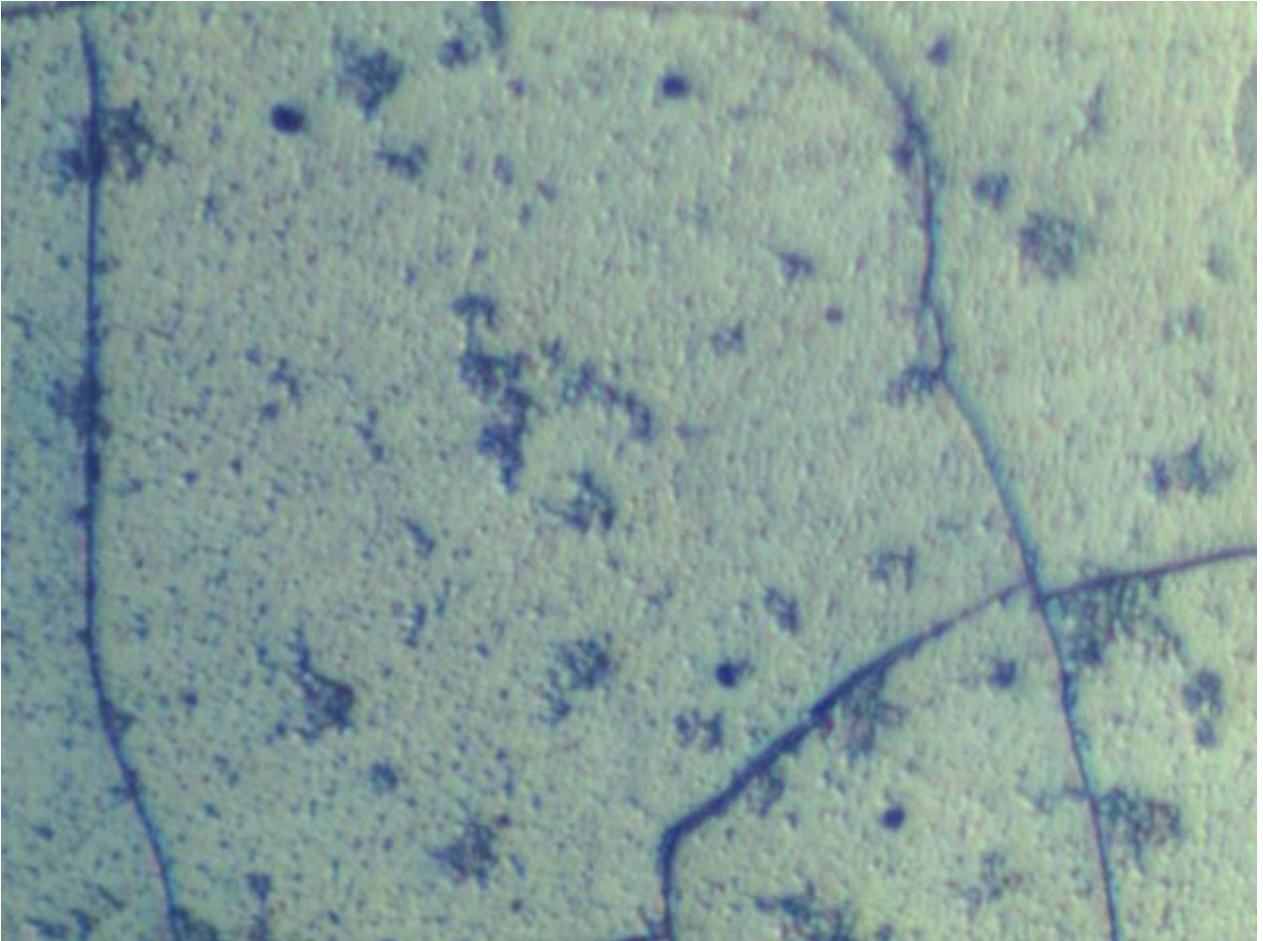


Figura 8.34. Esparrago de acero observado a 400X

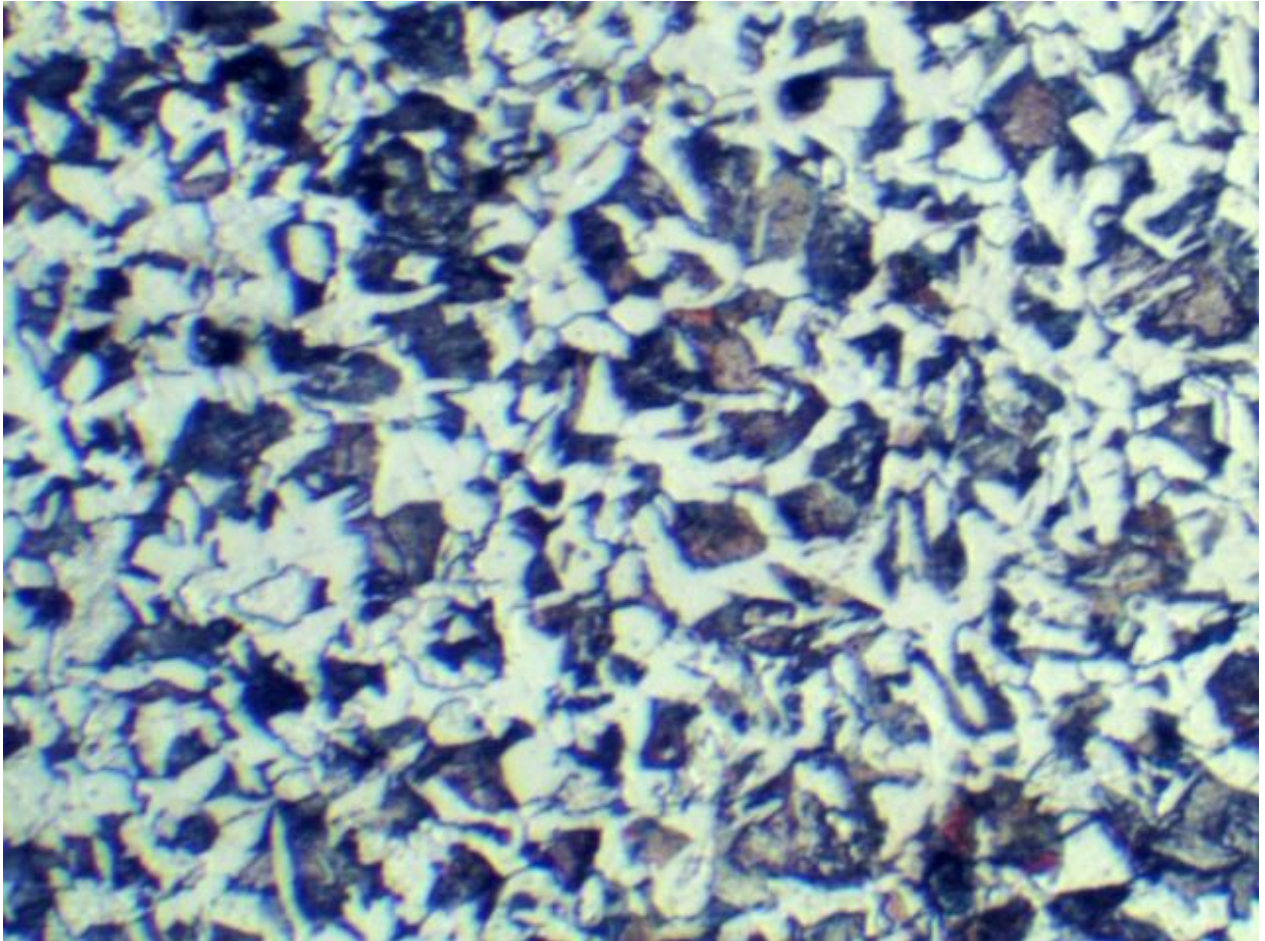


Figura 8.35. Acero 1020 normalizado observado a 100X

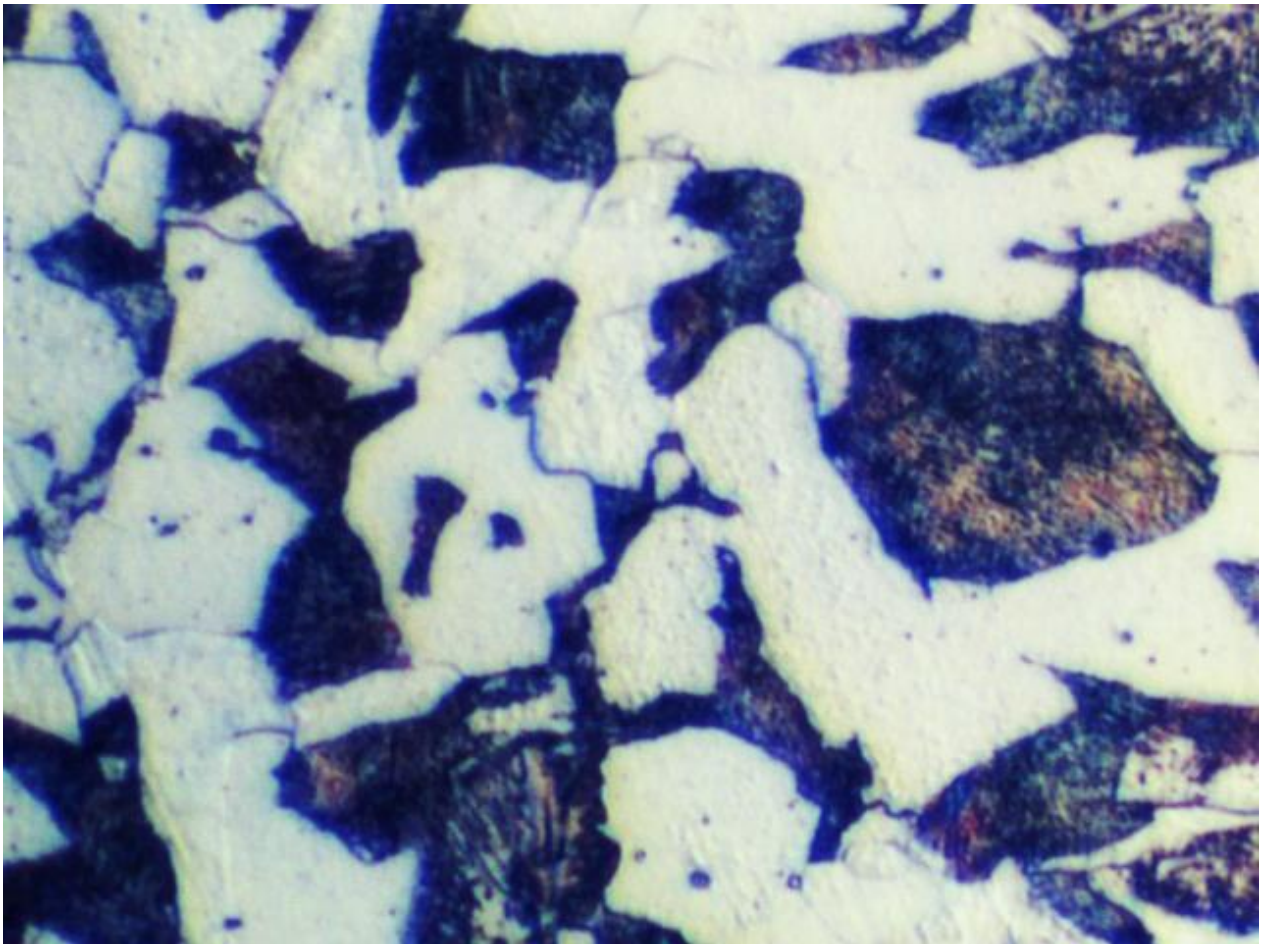


Figura 8.36. Acero 1020 normalizado observado a 400X

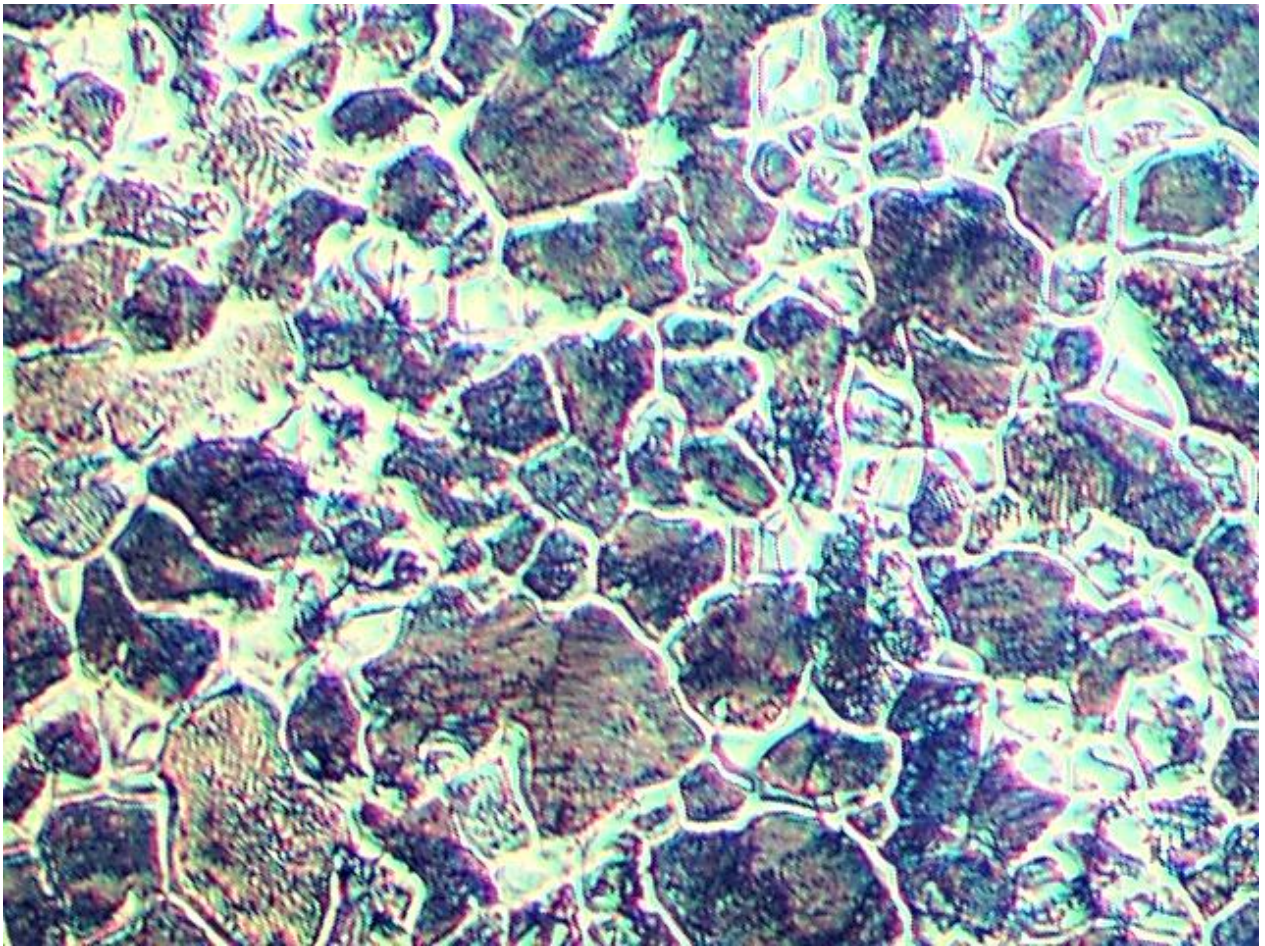


Figura 8.37. Acero hipereutectoide normalizado a 200X

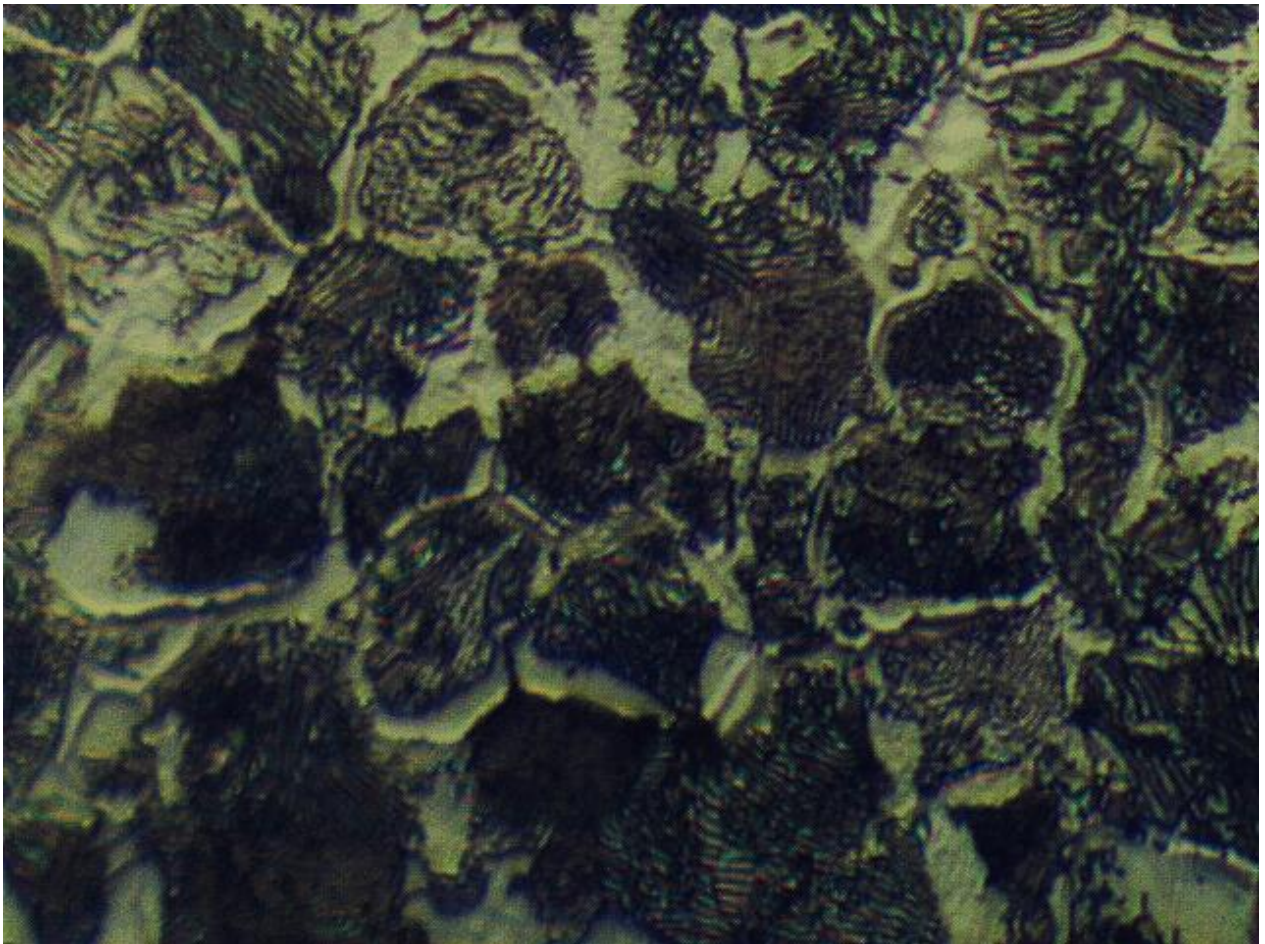


Figura 8.38. Acero hipereutectoide normalizado a 400X

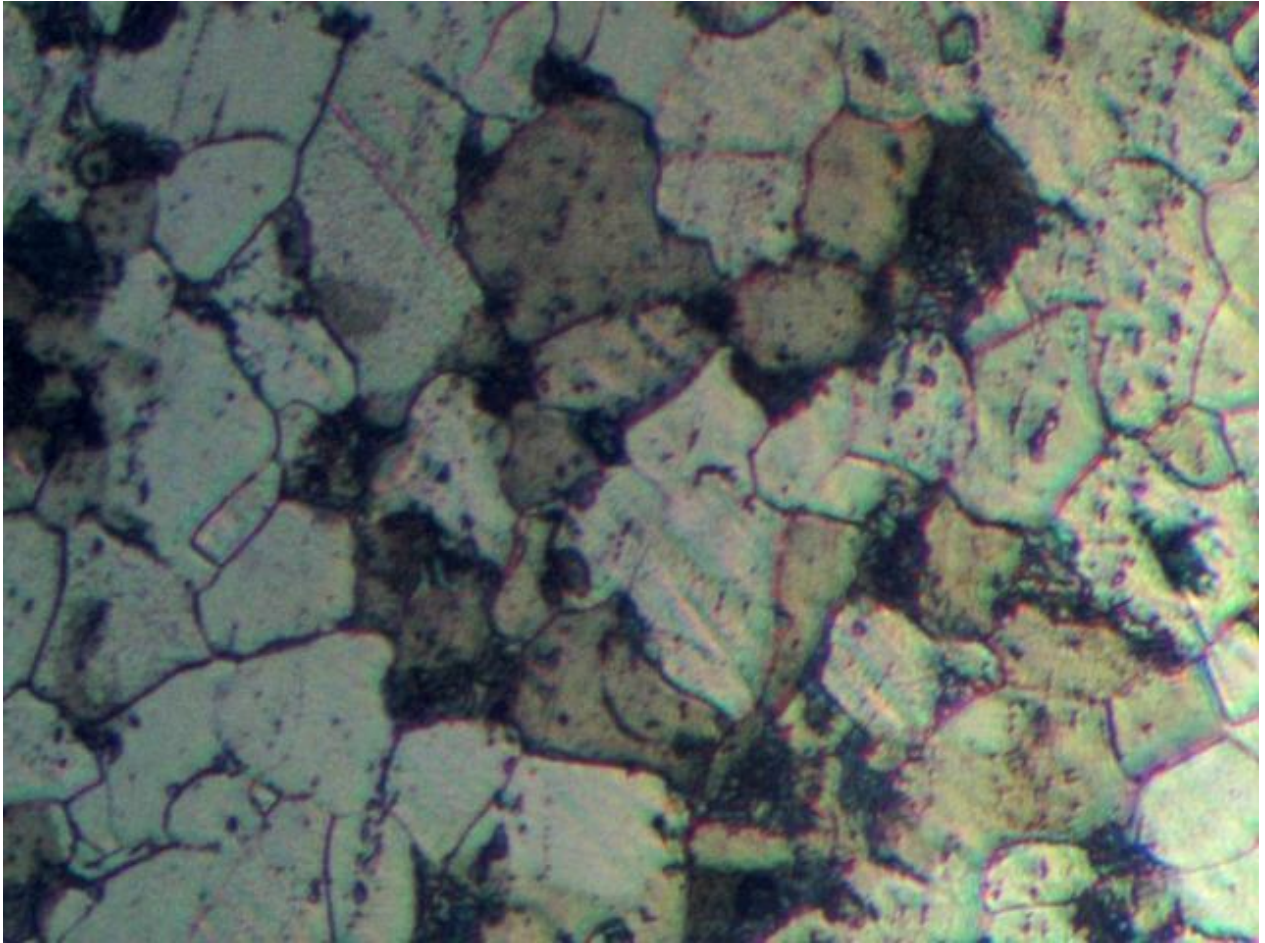


Figura 8.39. Alambre de acero de bajo carbono (clip) a 200X

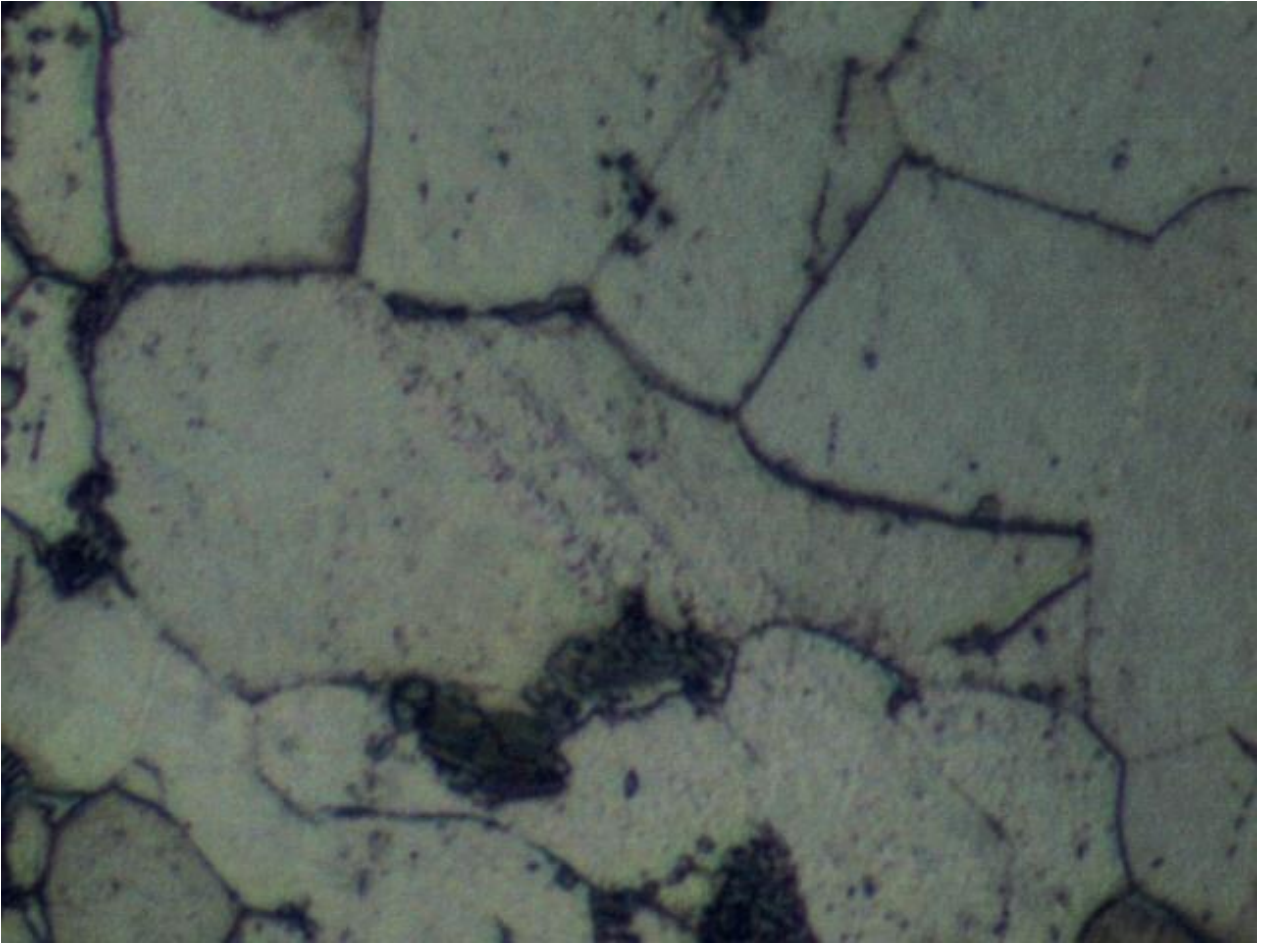


Figura 8.40. Alambre de acero de bajo carbono (clip) observado a 500X

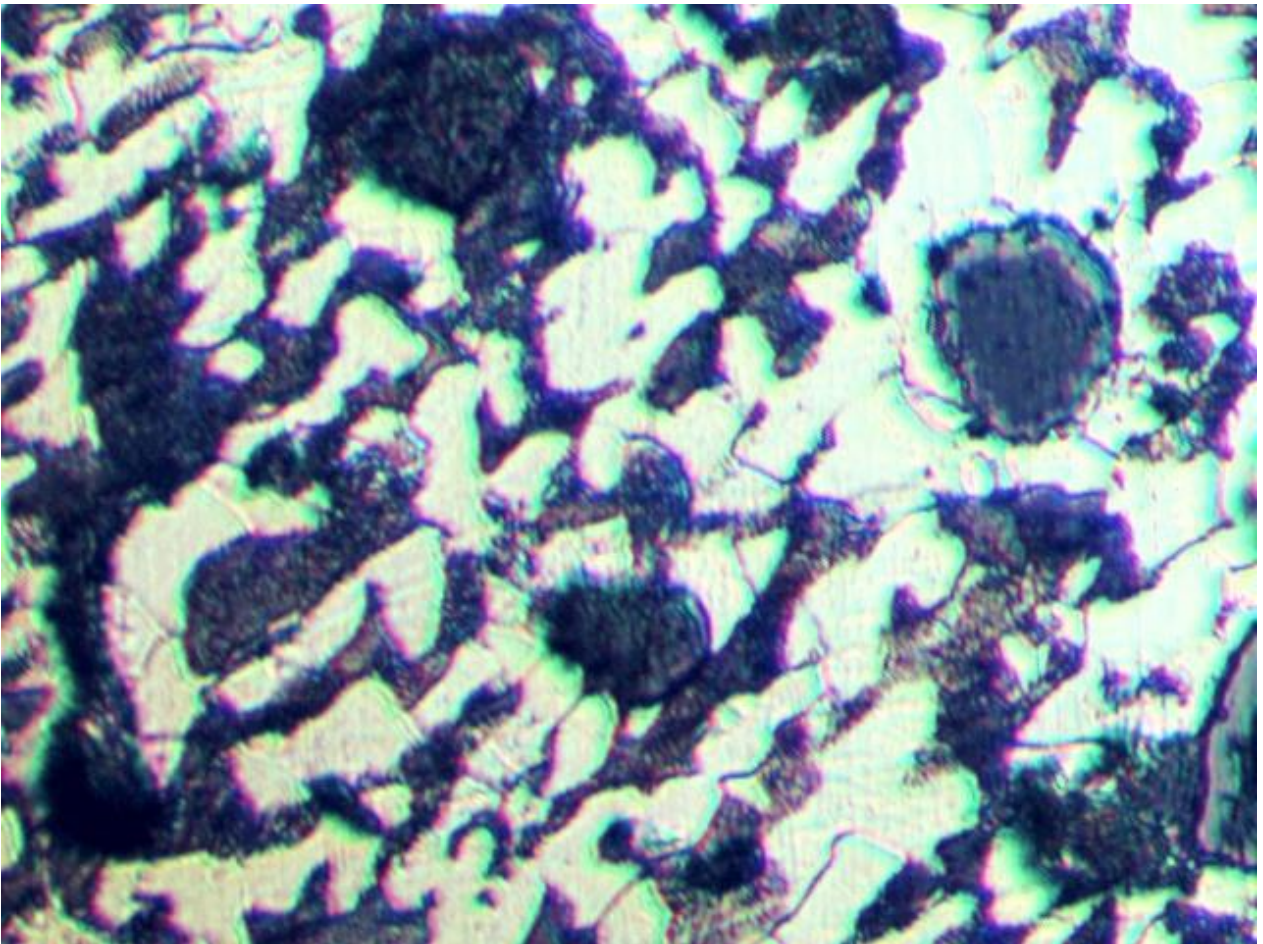


Figura 8.41. Varilla de acero de 3/8" de diámetro normalizada a 200X

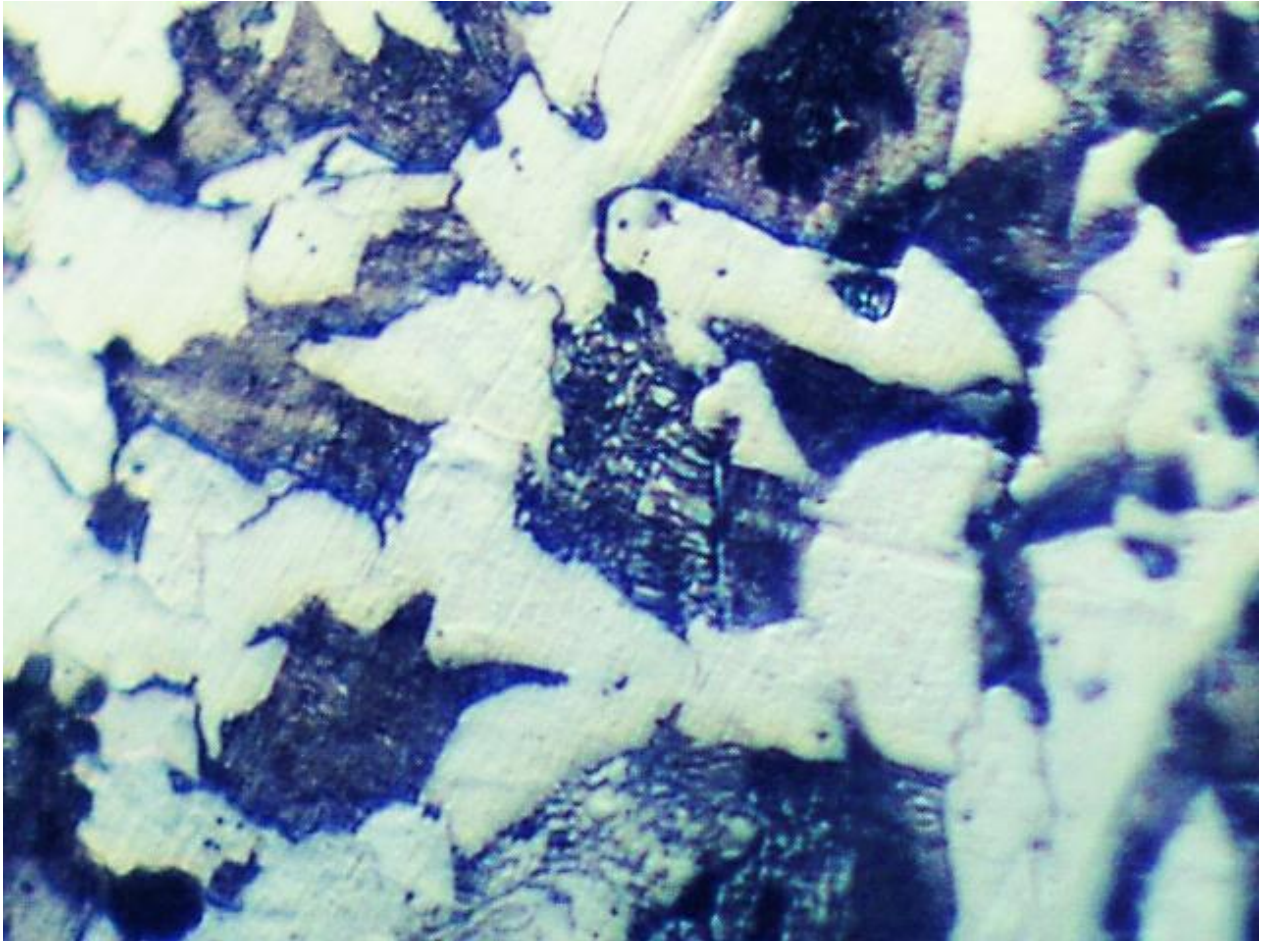


Figura 8.42. Varilla de acero de 3/8" de diámetro normalizada (400X)

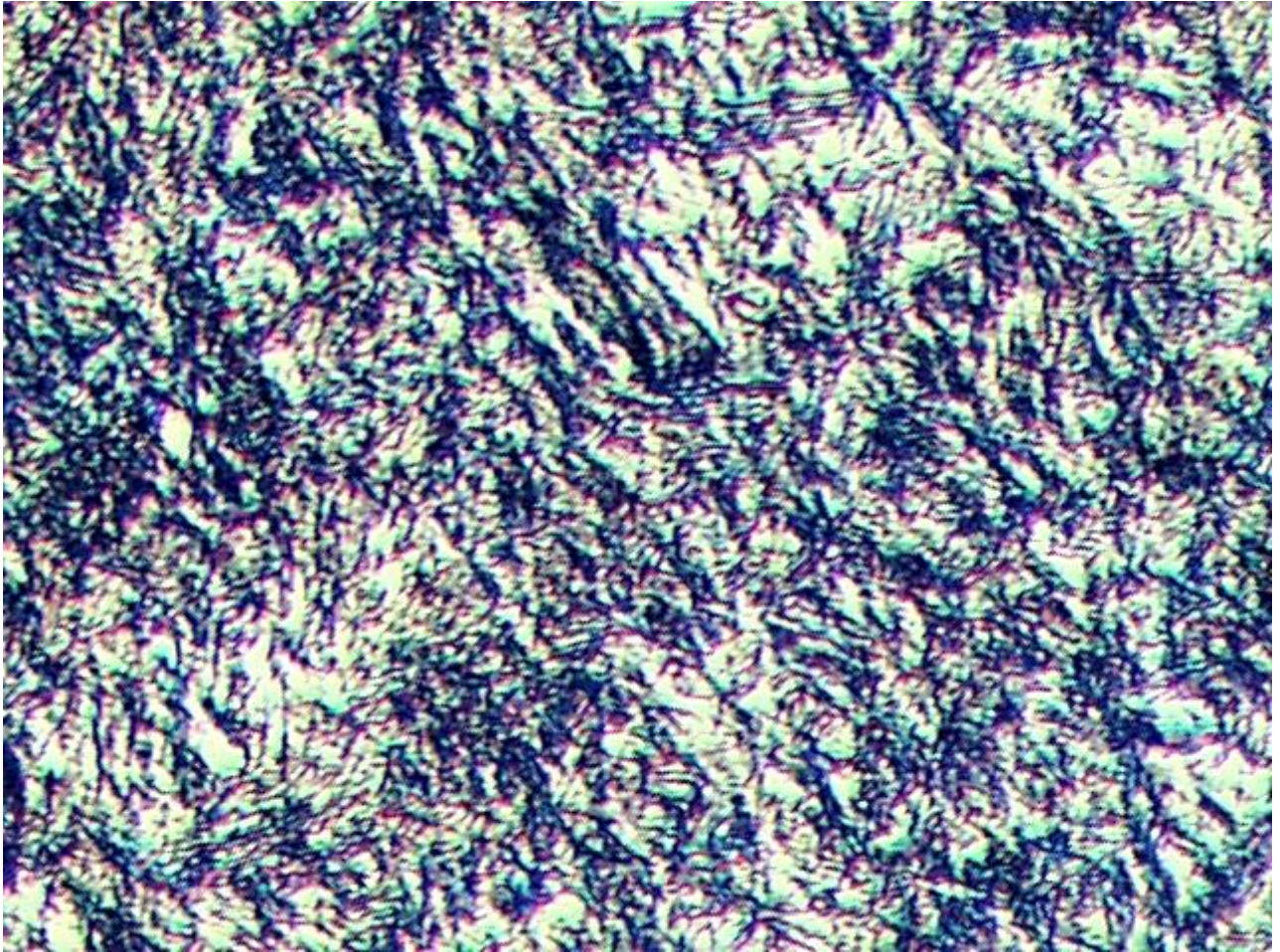


Figura 8.43. Varilla templada en agua, (400 X)

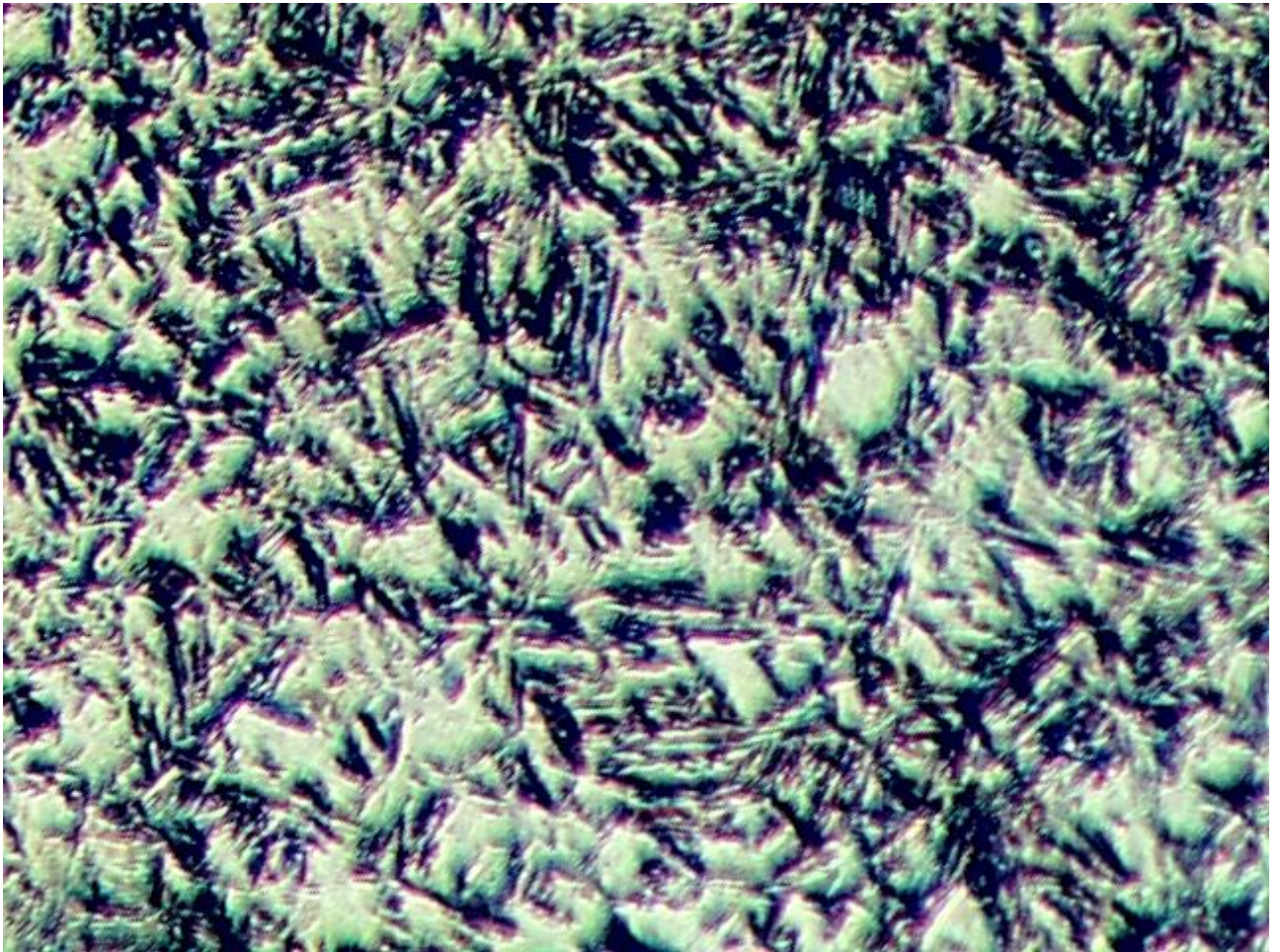


Figura 8.44. Acero 1045 Templado en agua, (400X)

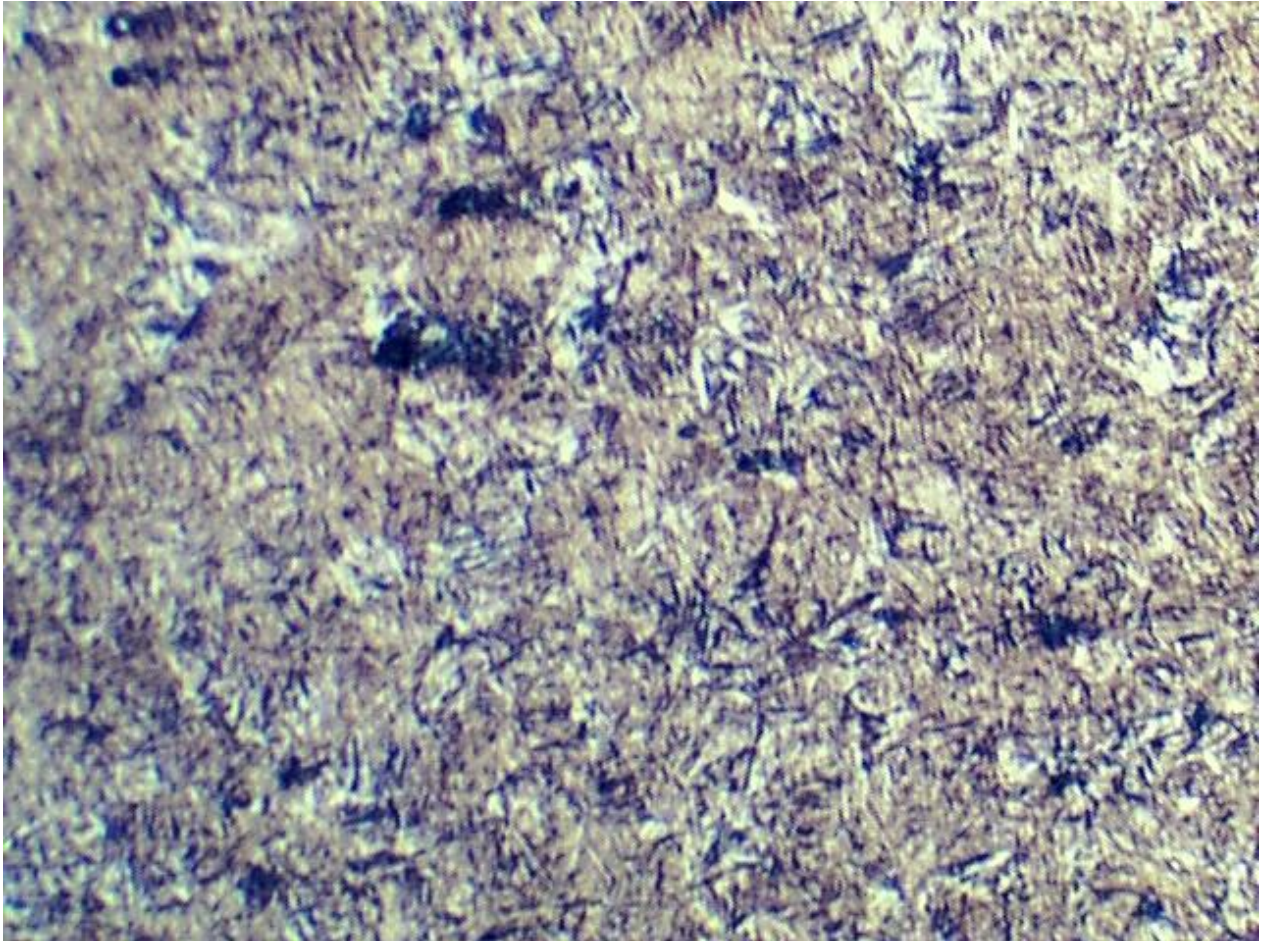


Figura 845. Acero medio carbono templado en agua observado a 100X

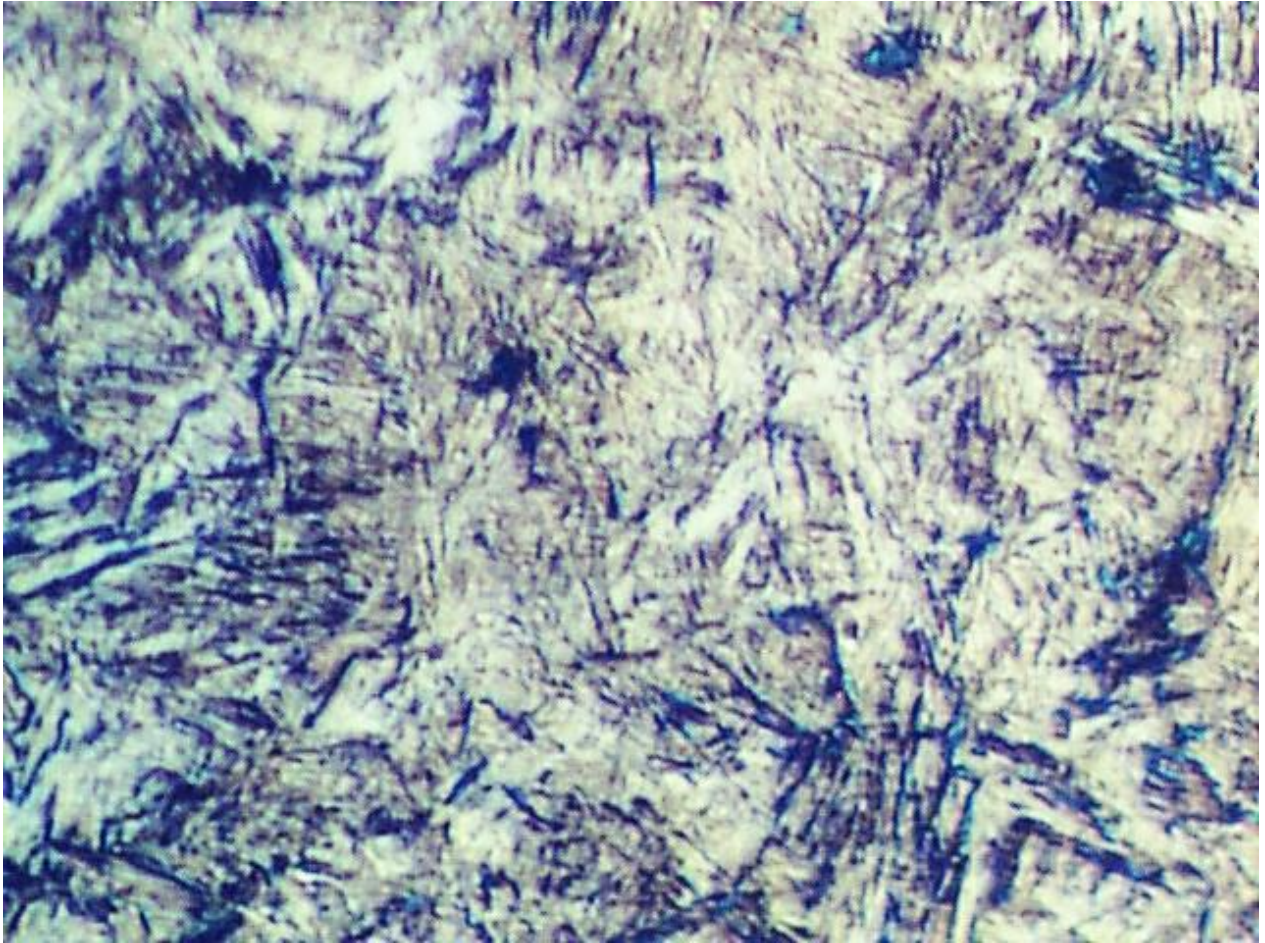


Figura 8.46. Acero medio carbono templado en agua observado a 400X

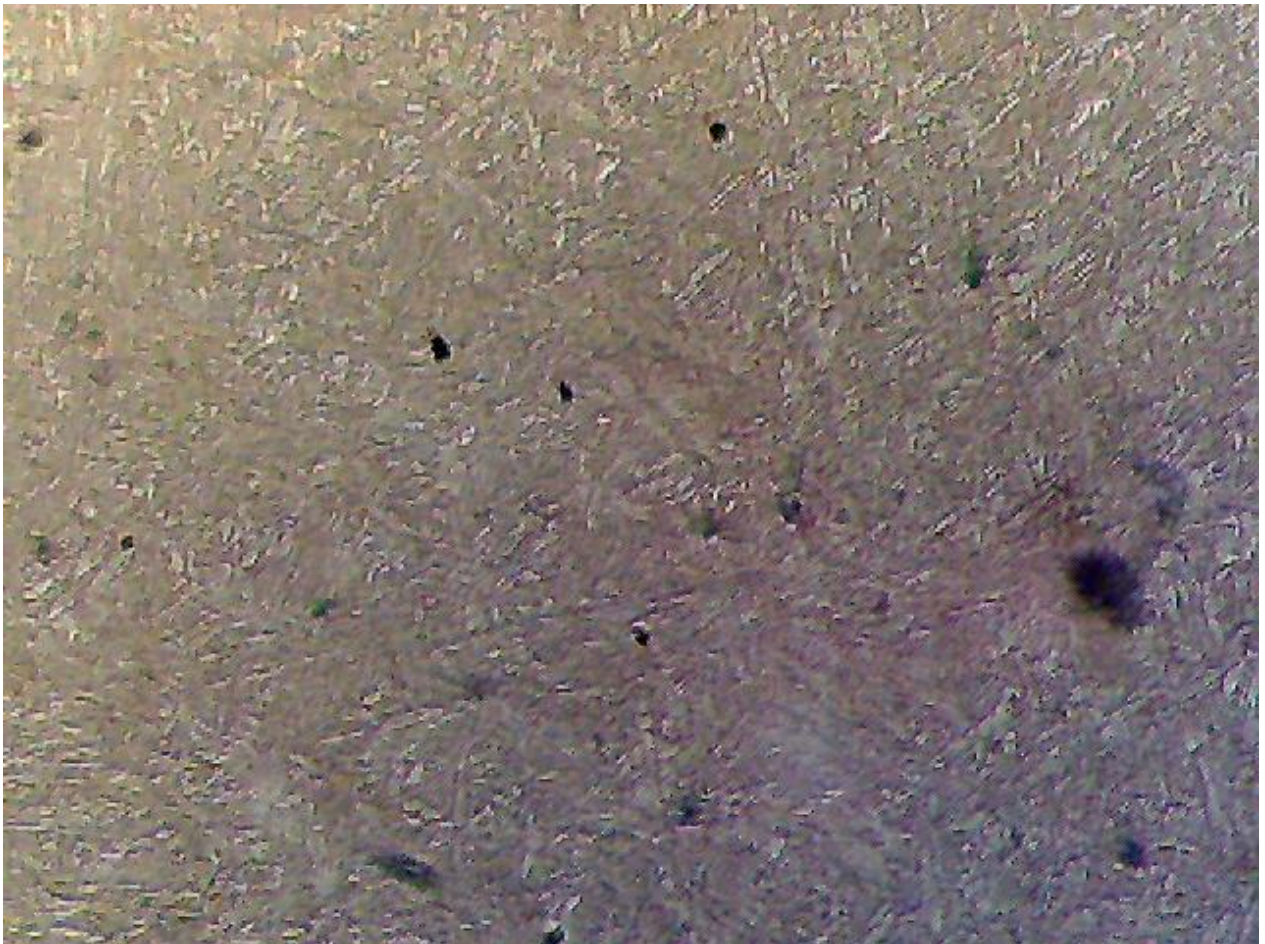


Figura 8.47. Martensita revenida, 40 RC 200X

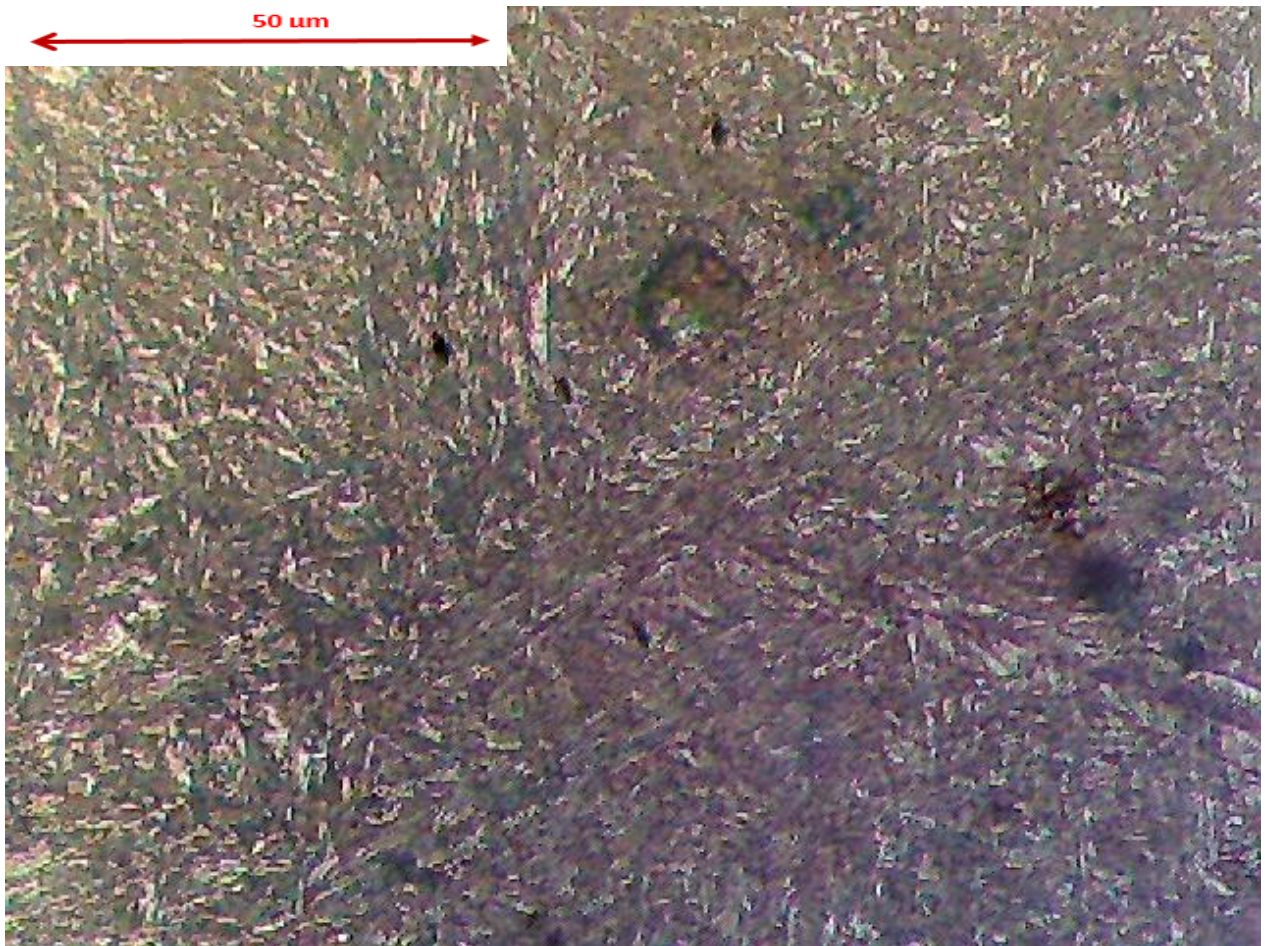


Figura 8.48. Martensita revenida, 40 RC 500X

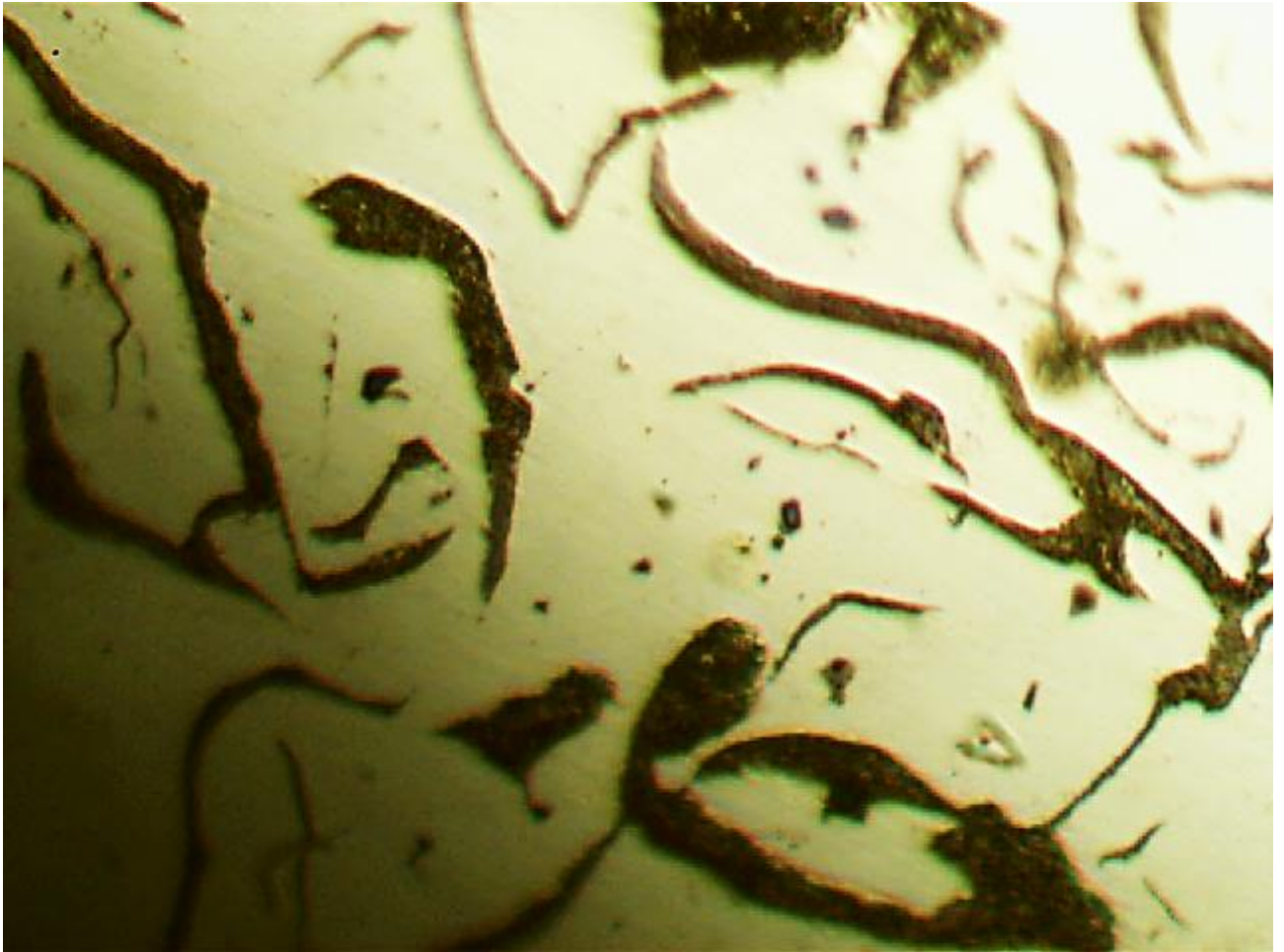


Figura 8.49. Hojuelas de grafito en hierro fundido gris (sin ataque químico)

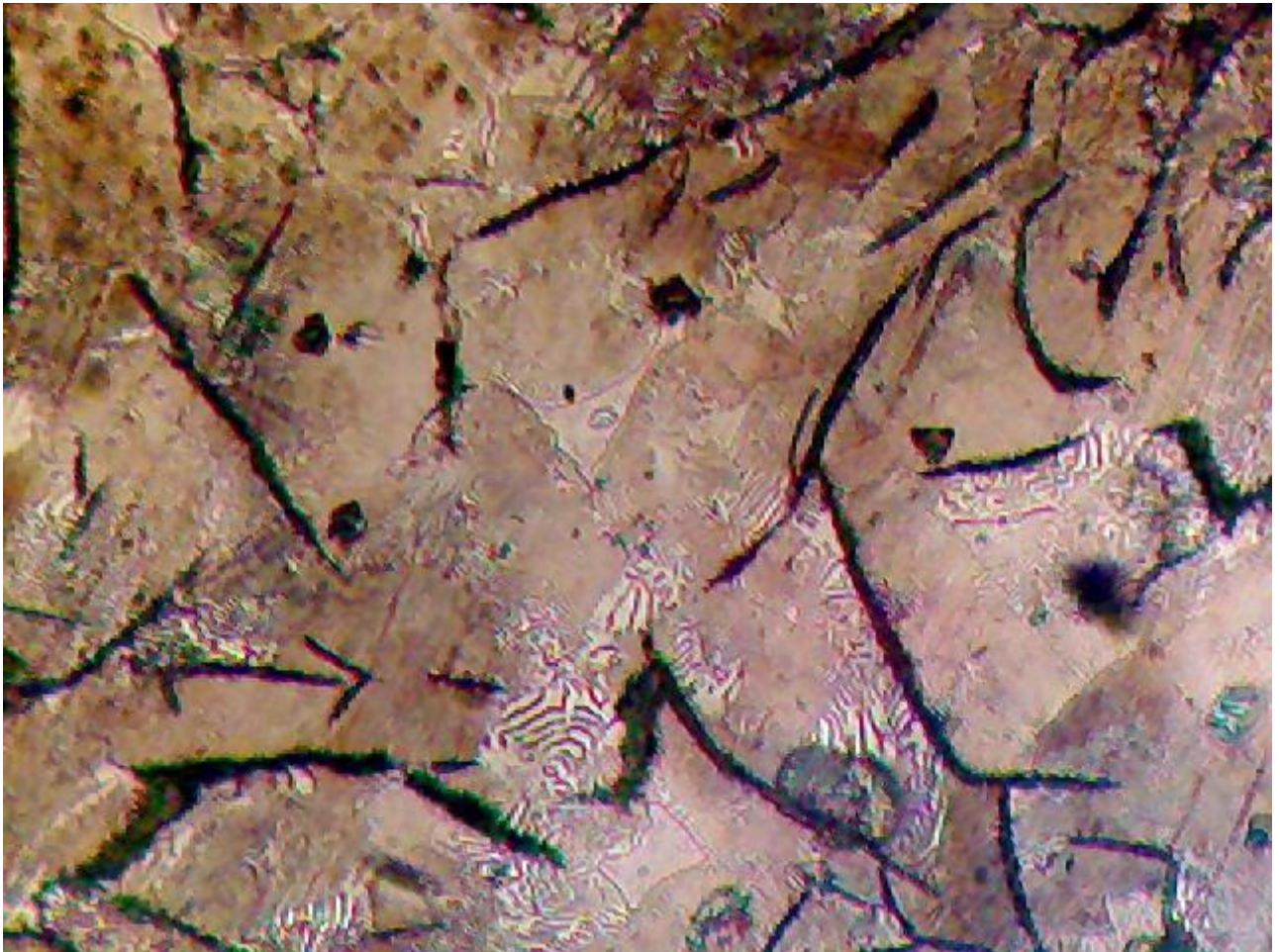


Figura 8.50. Hierro fundido gris, matriz perlítica, atacado con nital al 2%(200x)

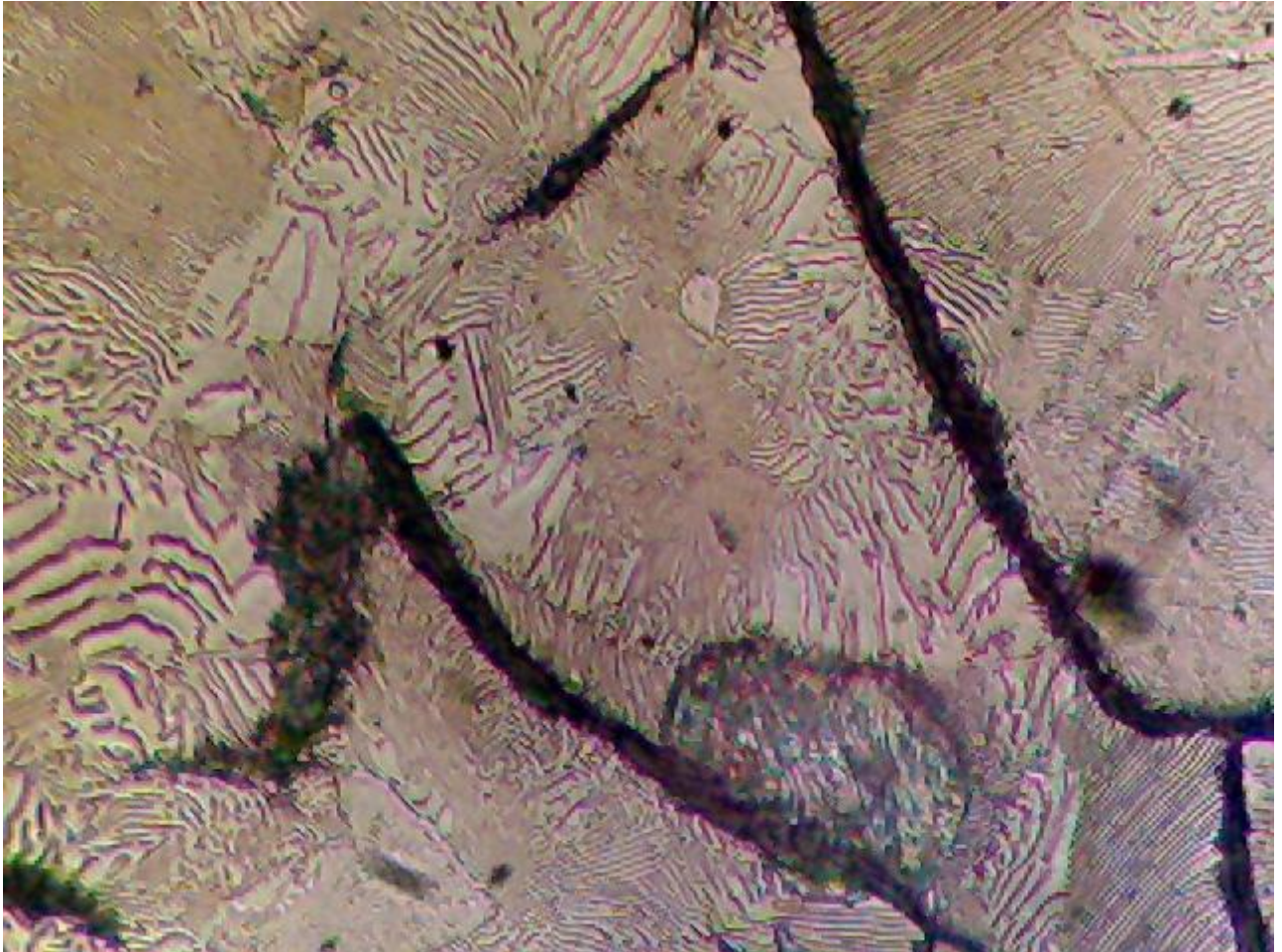


Figura 8.51. Hierro fundido gris, matriz perlítica, atacado con nital al 2%(500x)

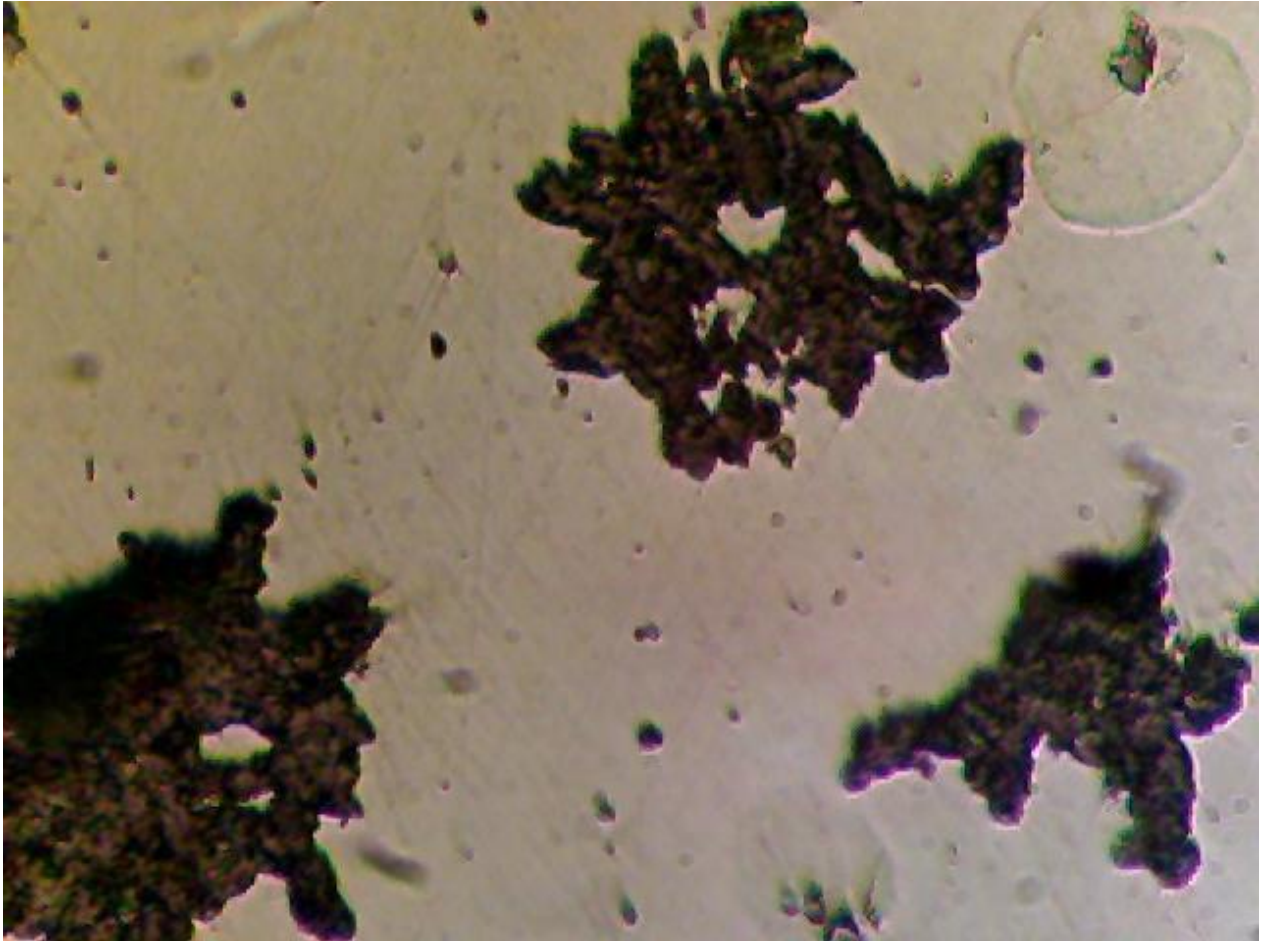


Figura 8.52. Hierro fundido maleable, sin ataque químico. 500X

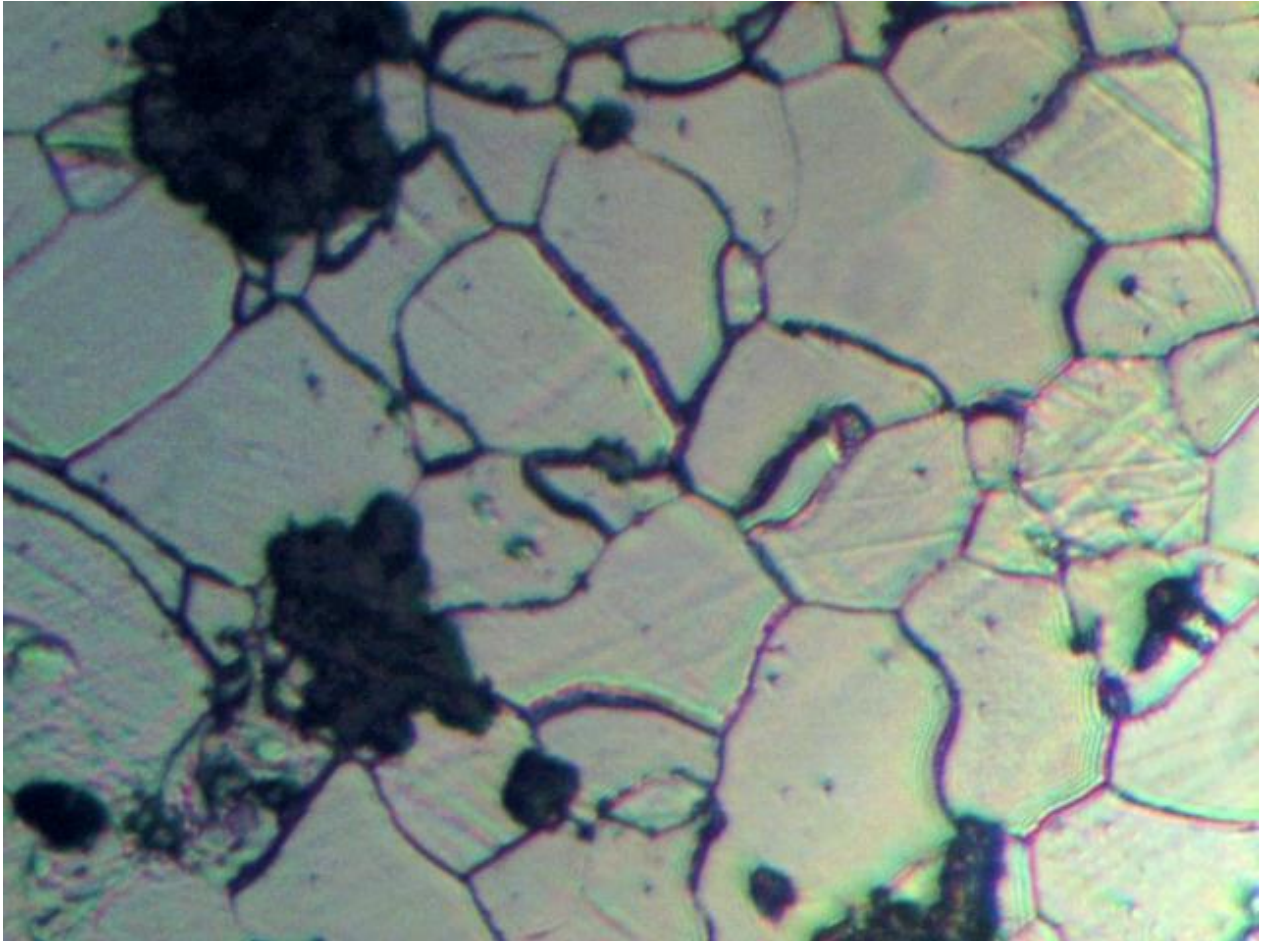


Figura 8.53. Hierro fundido maleable, matriz ferrítica observado a 200X

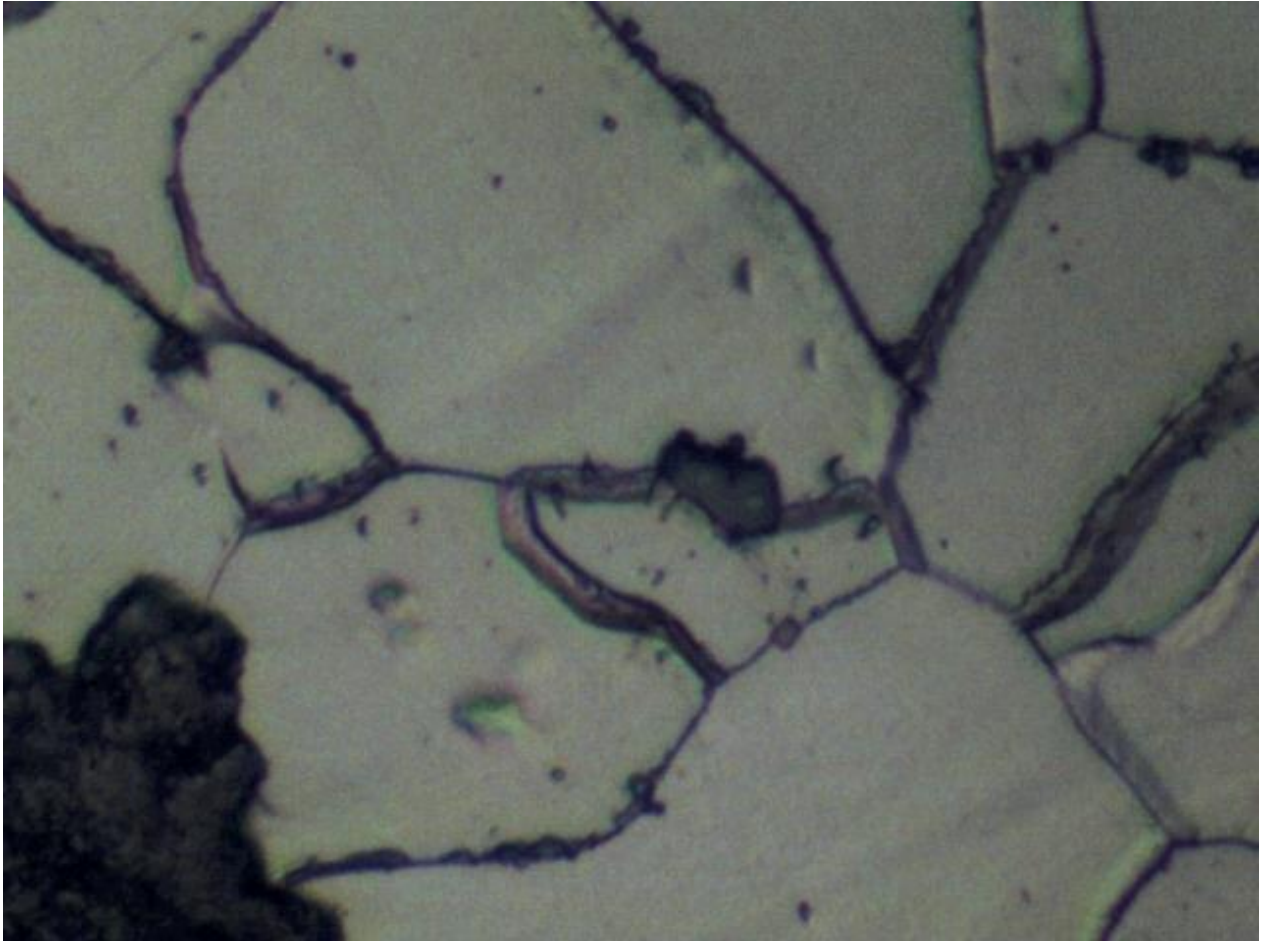


Figura 8.54. Hierro fundido maleable, matriz ferrítica observado a 500X

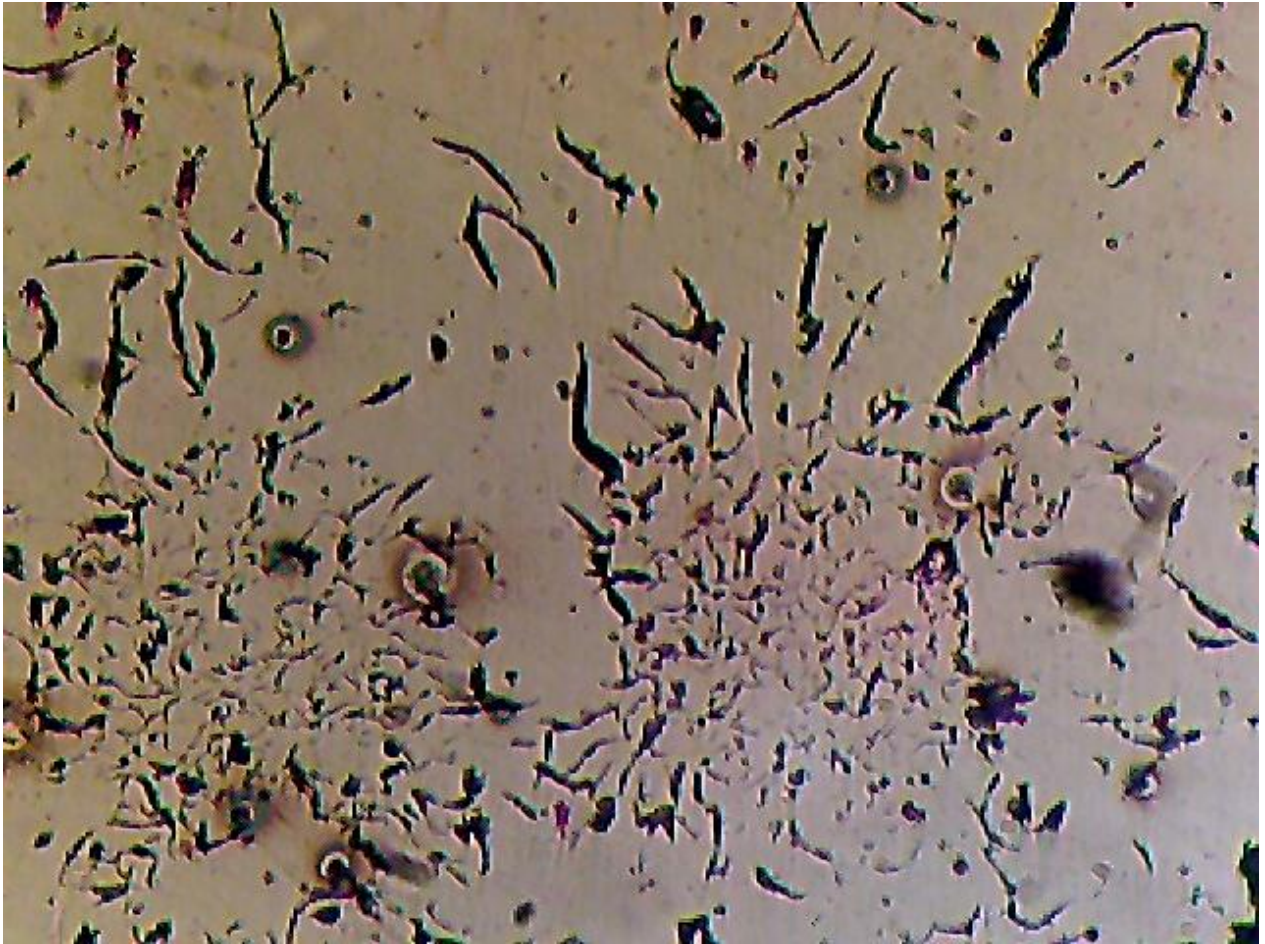


Figura 8.55. Hierro fundido gris, sin ataque químico, hojuelas tipo B 200X

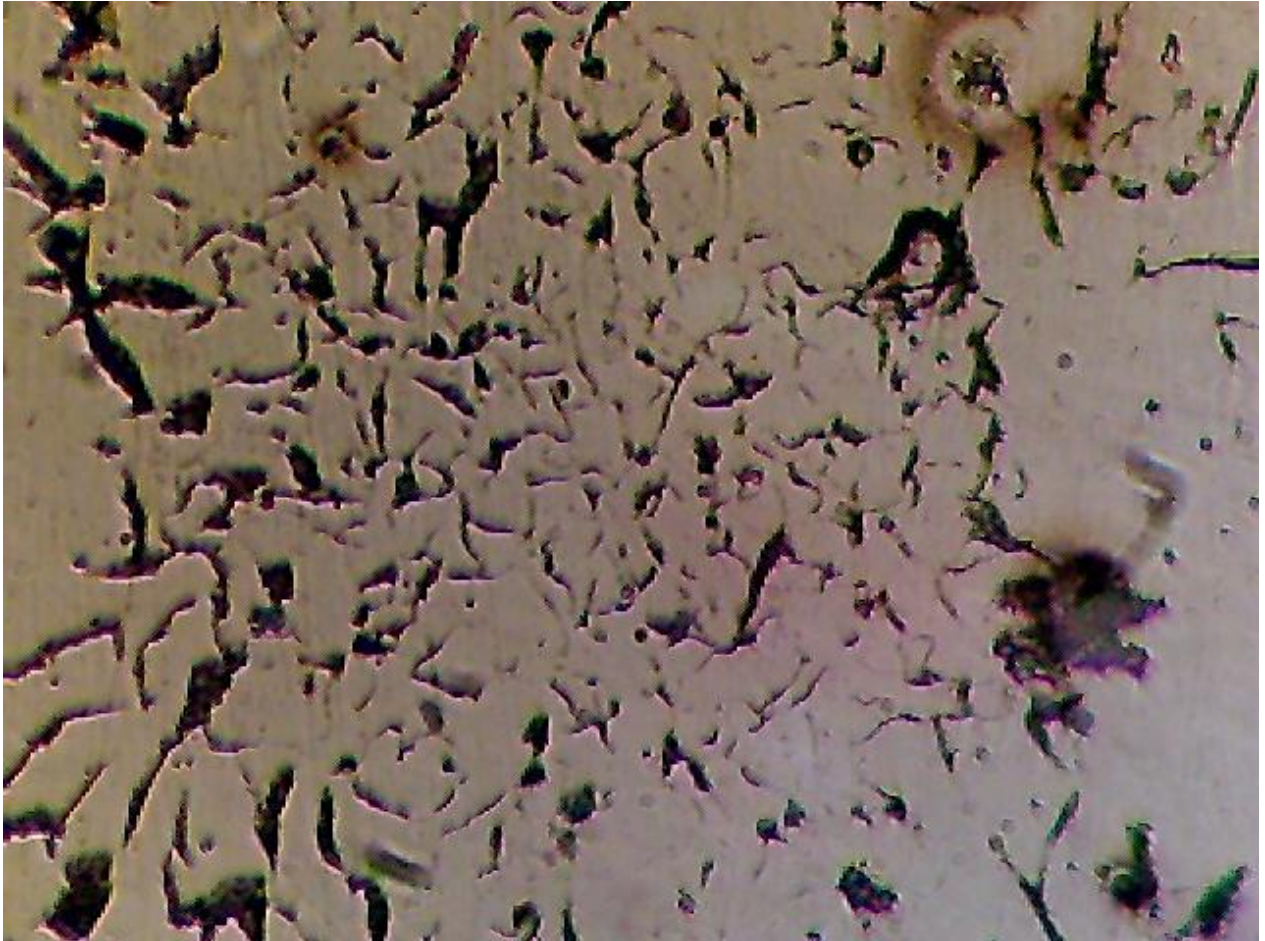


Figura 8.56. Hierro fundido gris, sin ataque químico, hojuelas tipo B (500X)

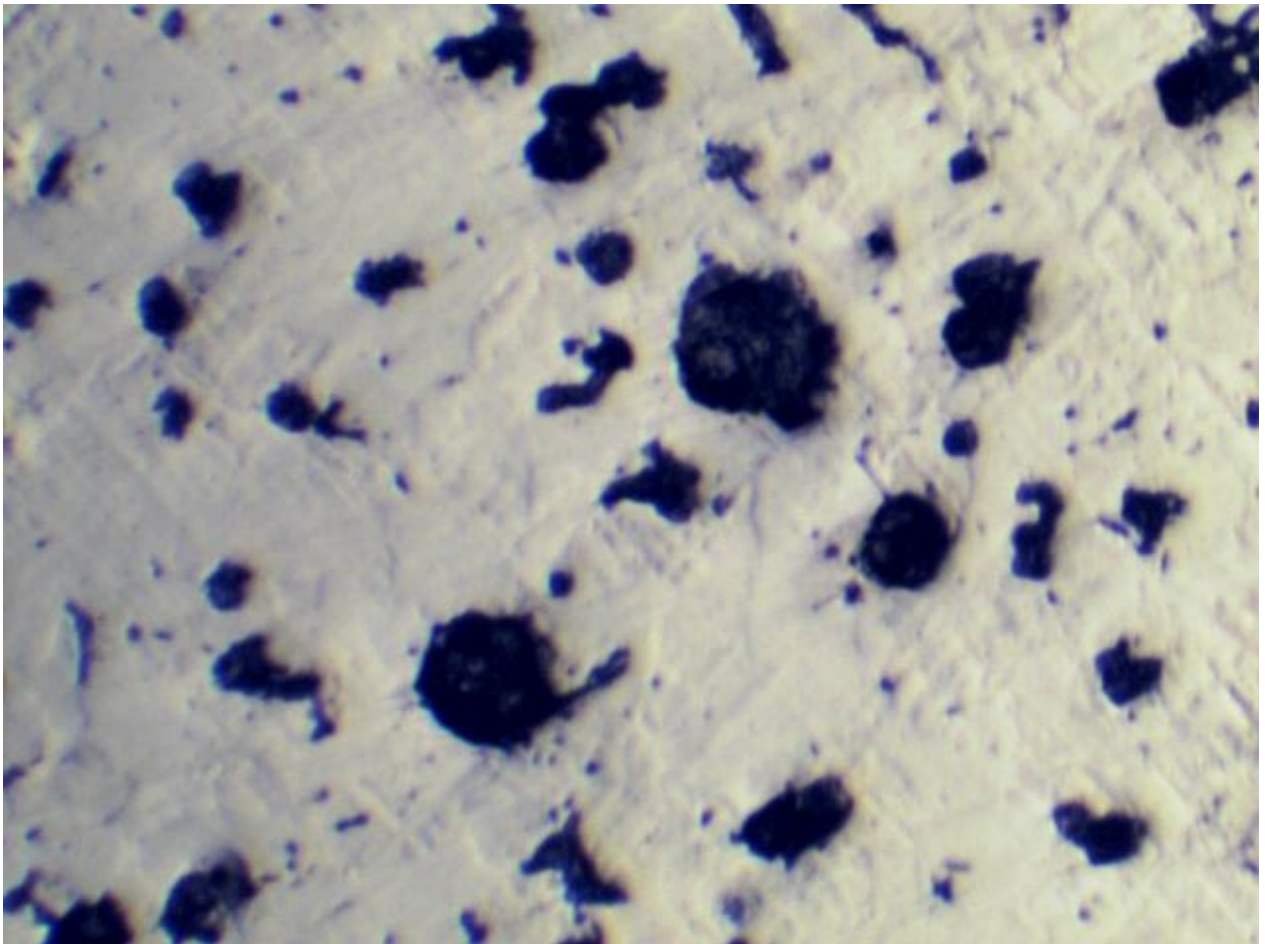


Figura 8.57. Hierro fundido nodular (prensa marca Trupper) sin ataque químico observada a 100 X

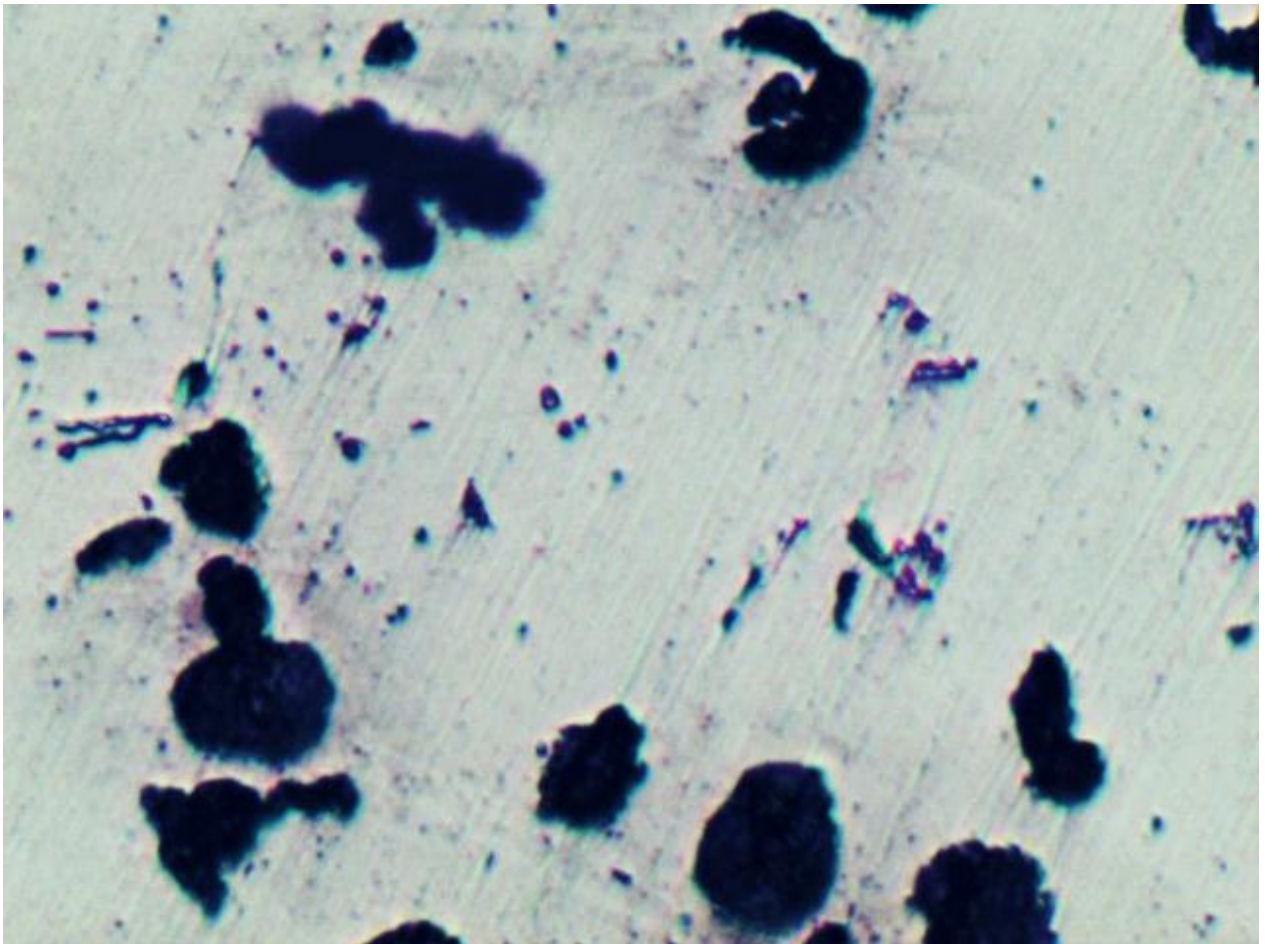


Figura 8.58. Hierro fundido nodular (prensa marca Trupper) sin ataque químico observada a 200 X

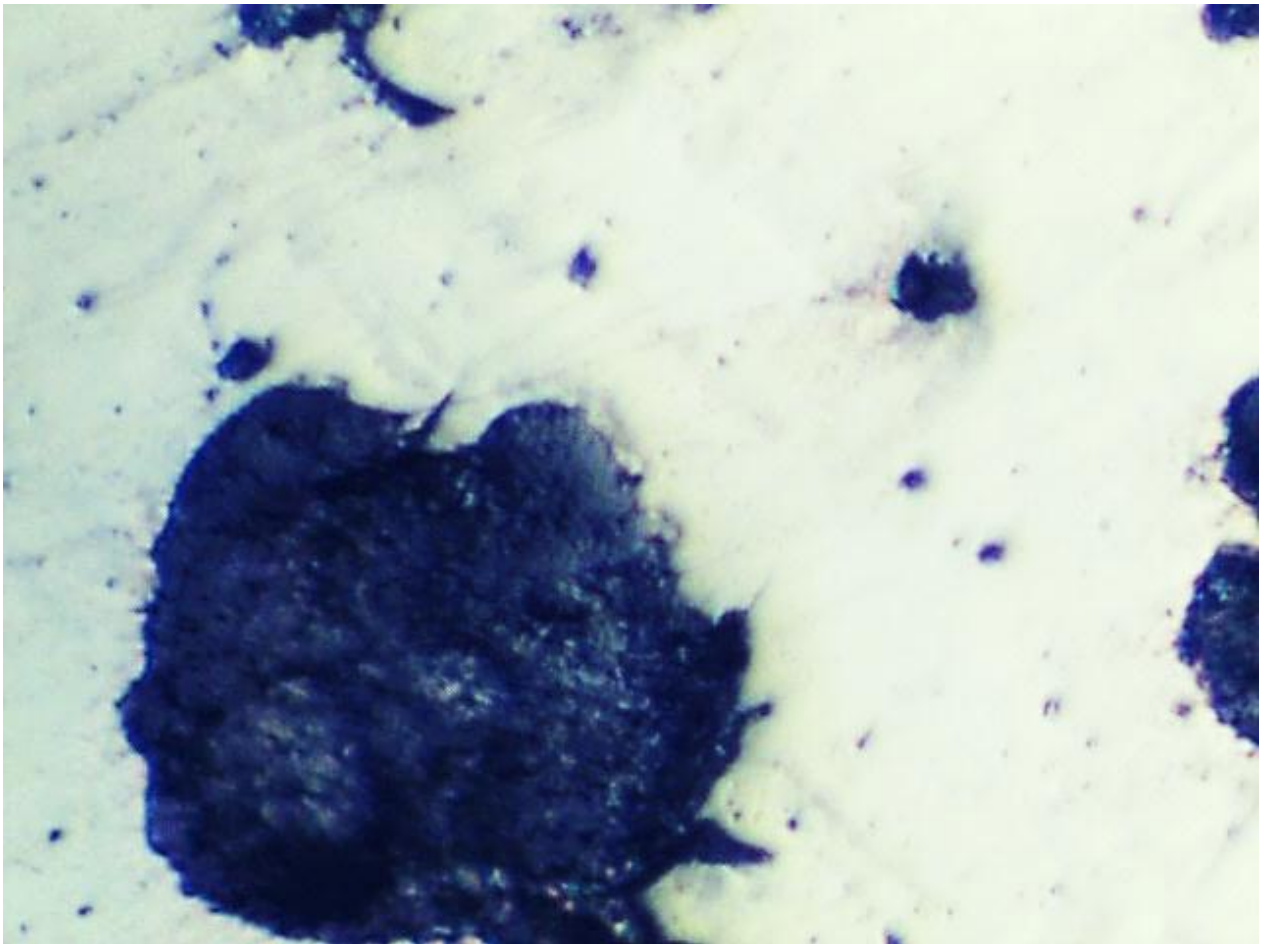


Figura 8.59 . Hierro fundido nodular (prensa marca Trupper) sin ataque químico observada a 400 X

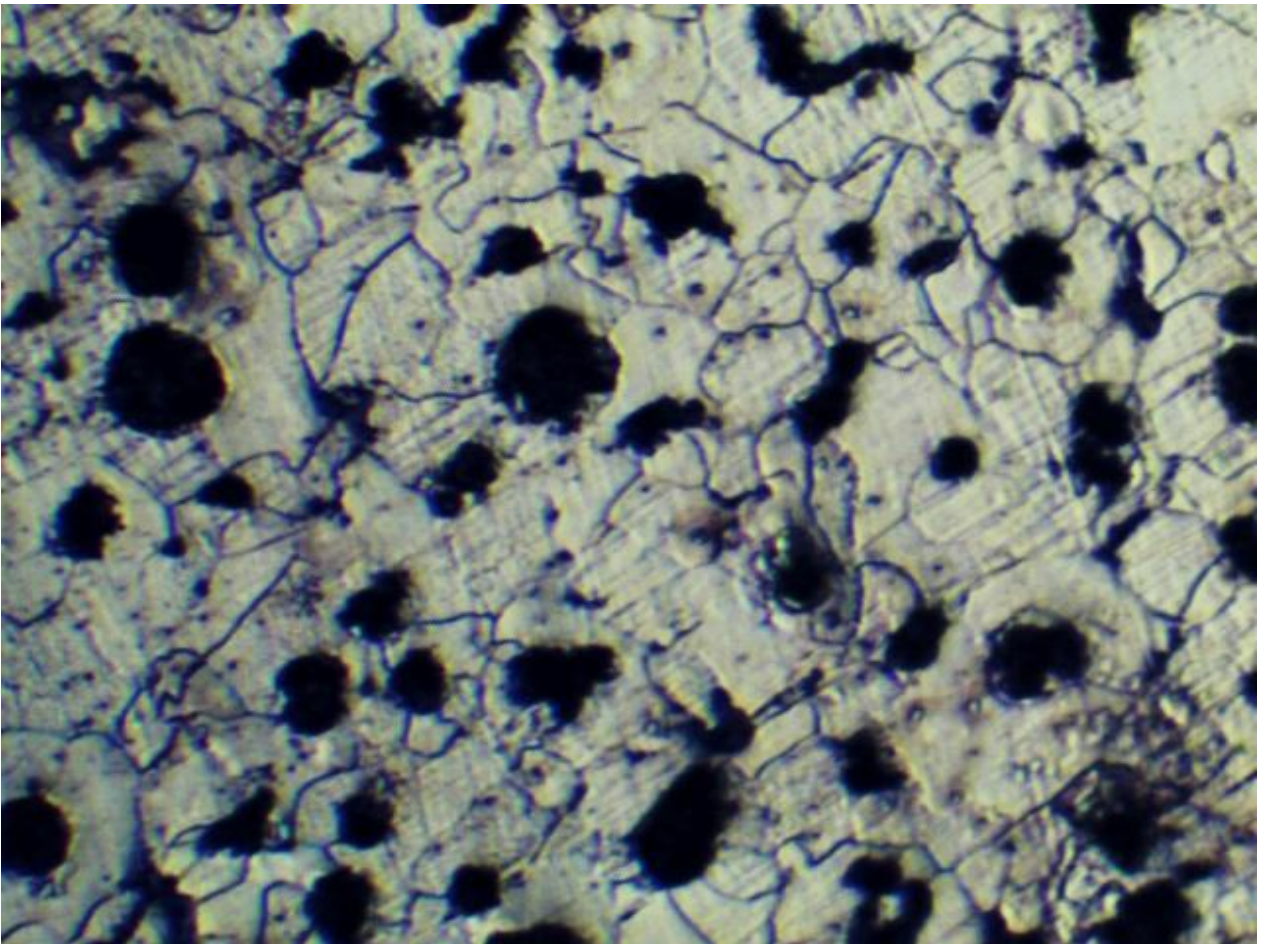


Figura 8.60 . Hierro fundido nodular (prensa marca Trupper) atacada químicamente observada a 100 X

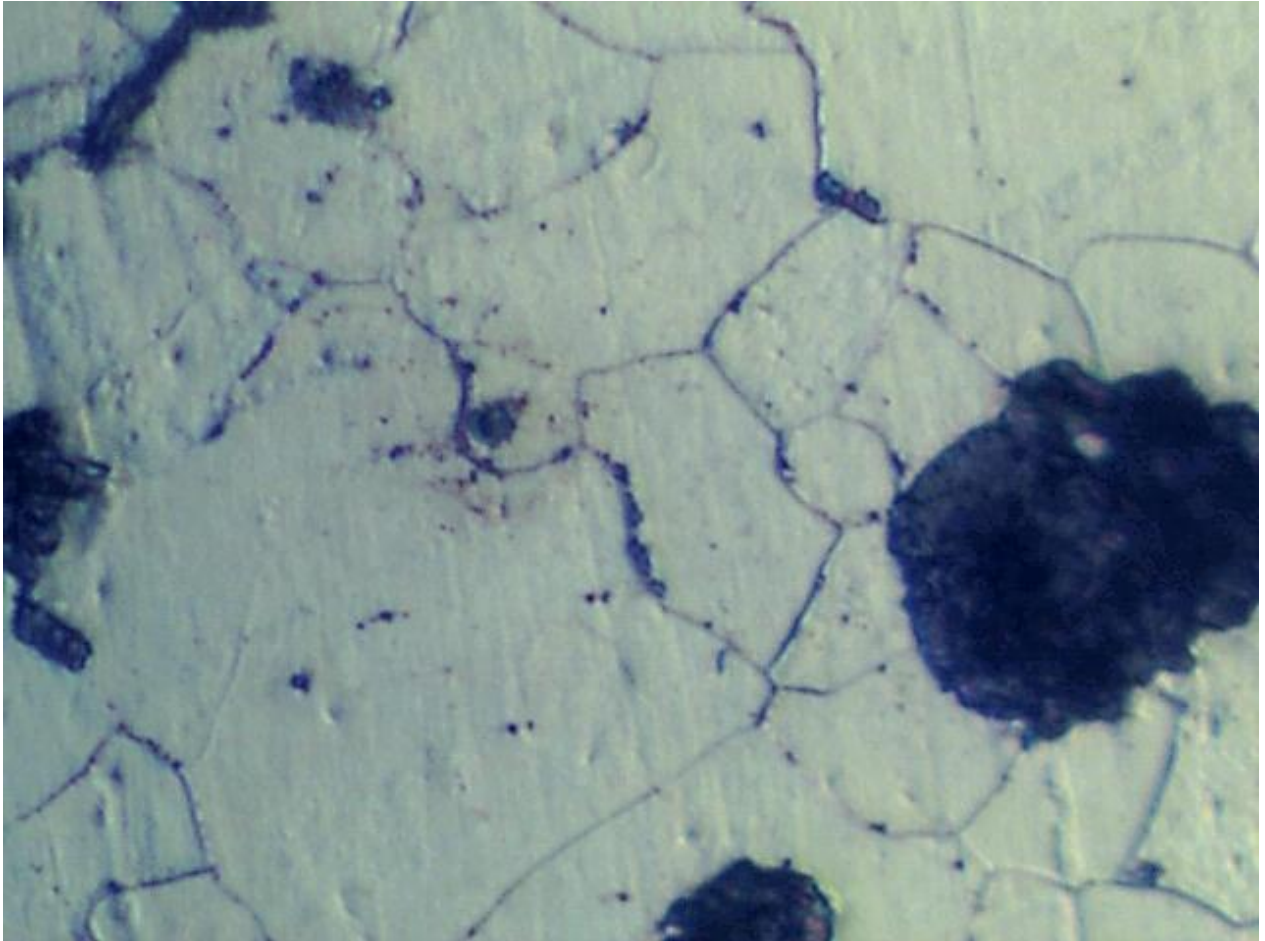


Figura 8.61 . Hierro fundido nodular (prensa marca Trupper) atacada químicamente observada a 400 X

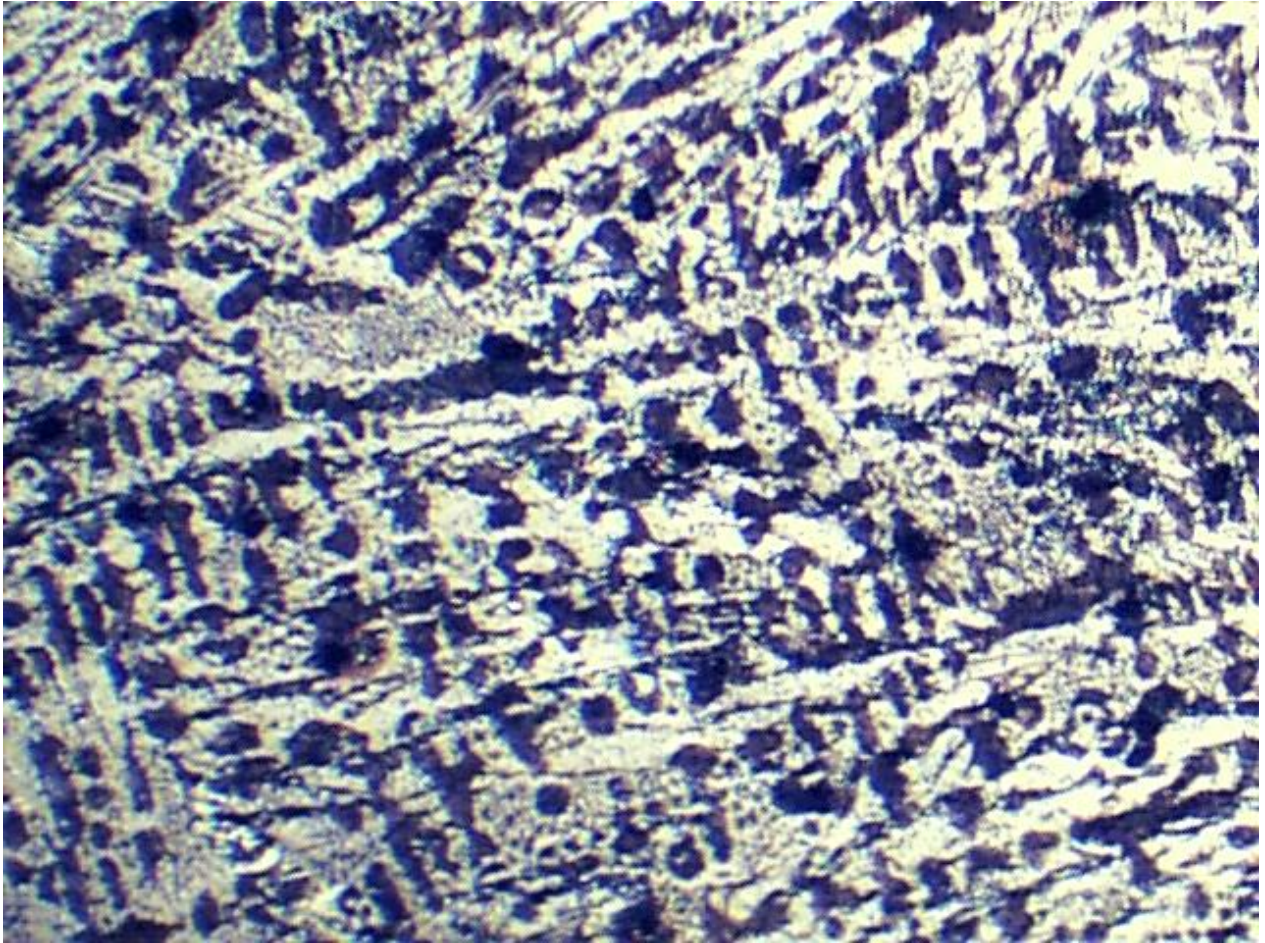


Figura 8.62. Hierro fundido gris enfriado rápidamente observado a 100X

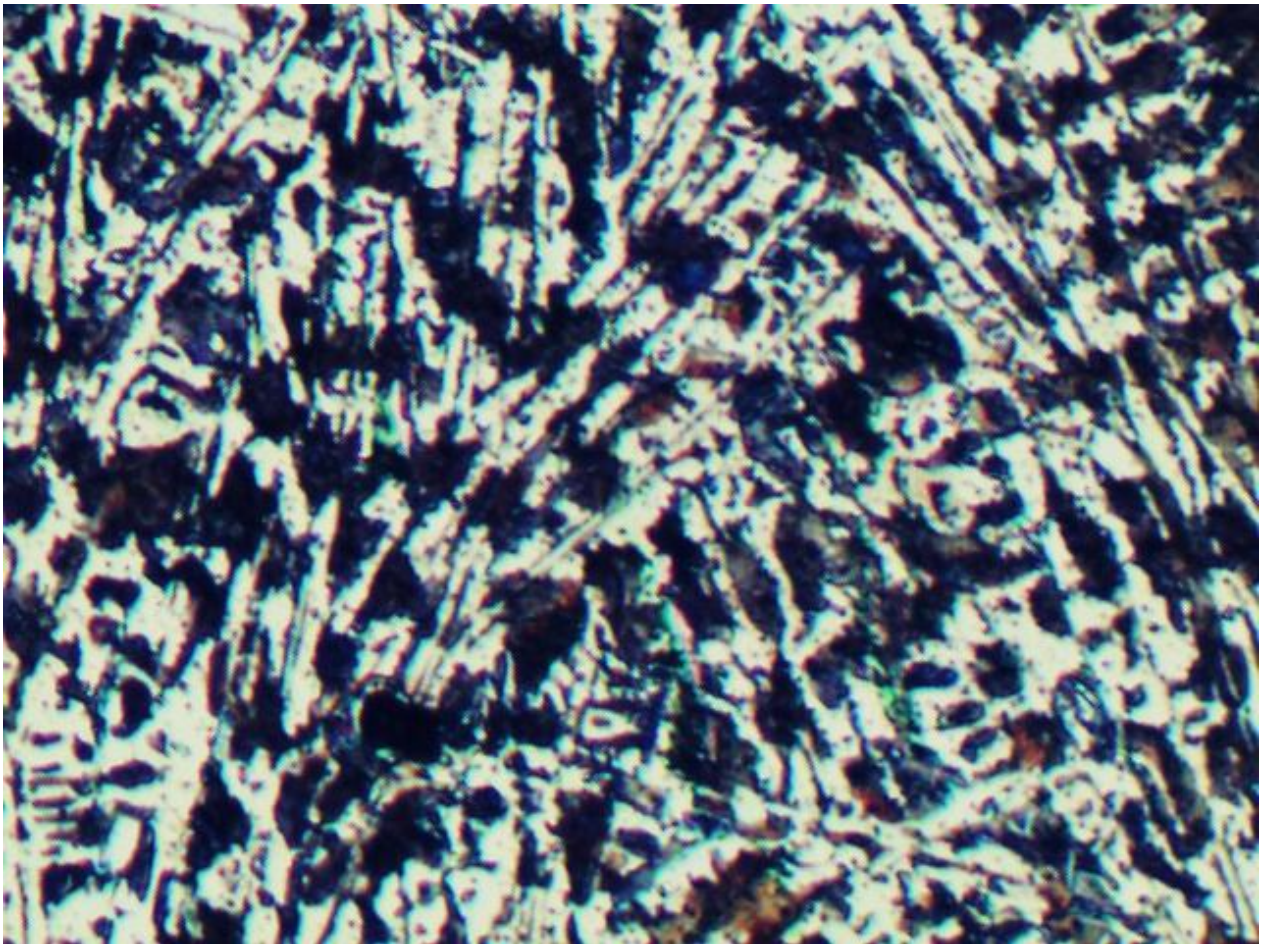


Figura 8.63. Hierro fundido gris enfriado rápidamente observado a 200X

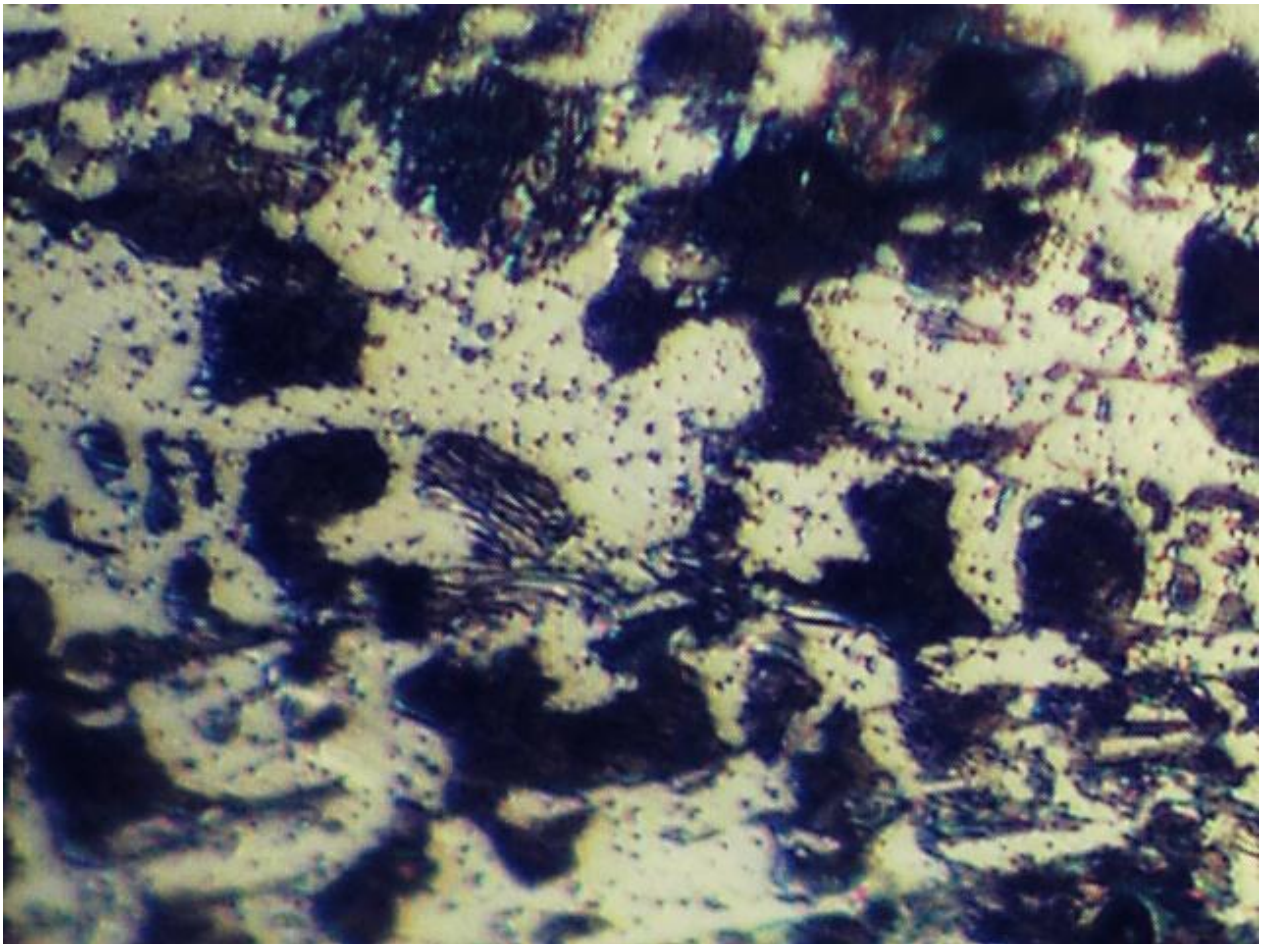


Figura 8.64. Hierro fundido gris enfriado rápidamente observado a 400X

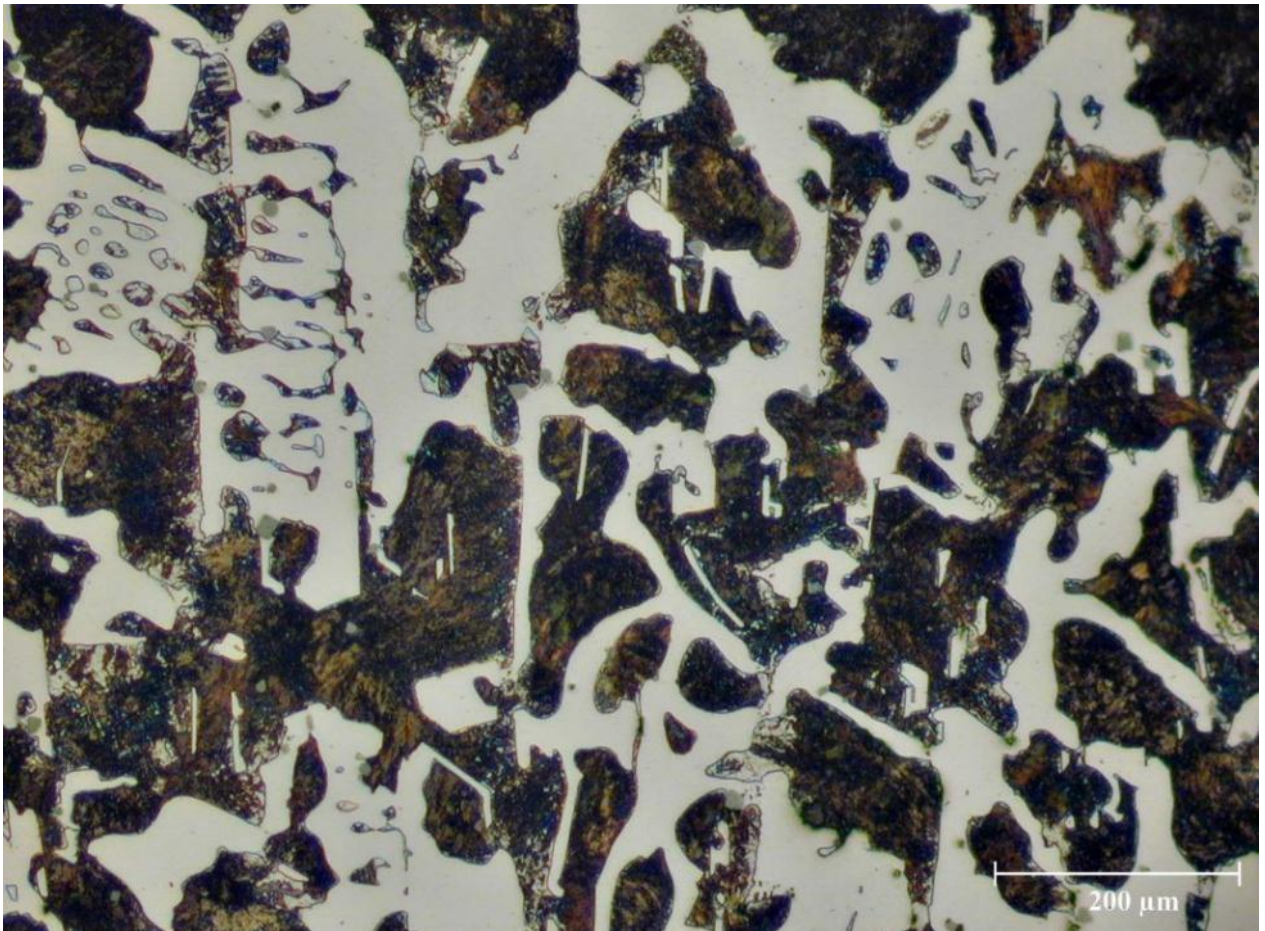


Figura 8.65. Ledeburita, dendritas de austenita transformada (perlita), en una matriz blanca de cementita.a 200X (<http://www.derematerialia.com/practicas-metalograficas/ledeburita/>)

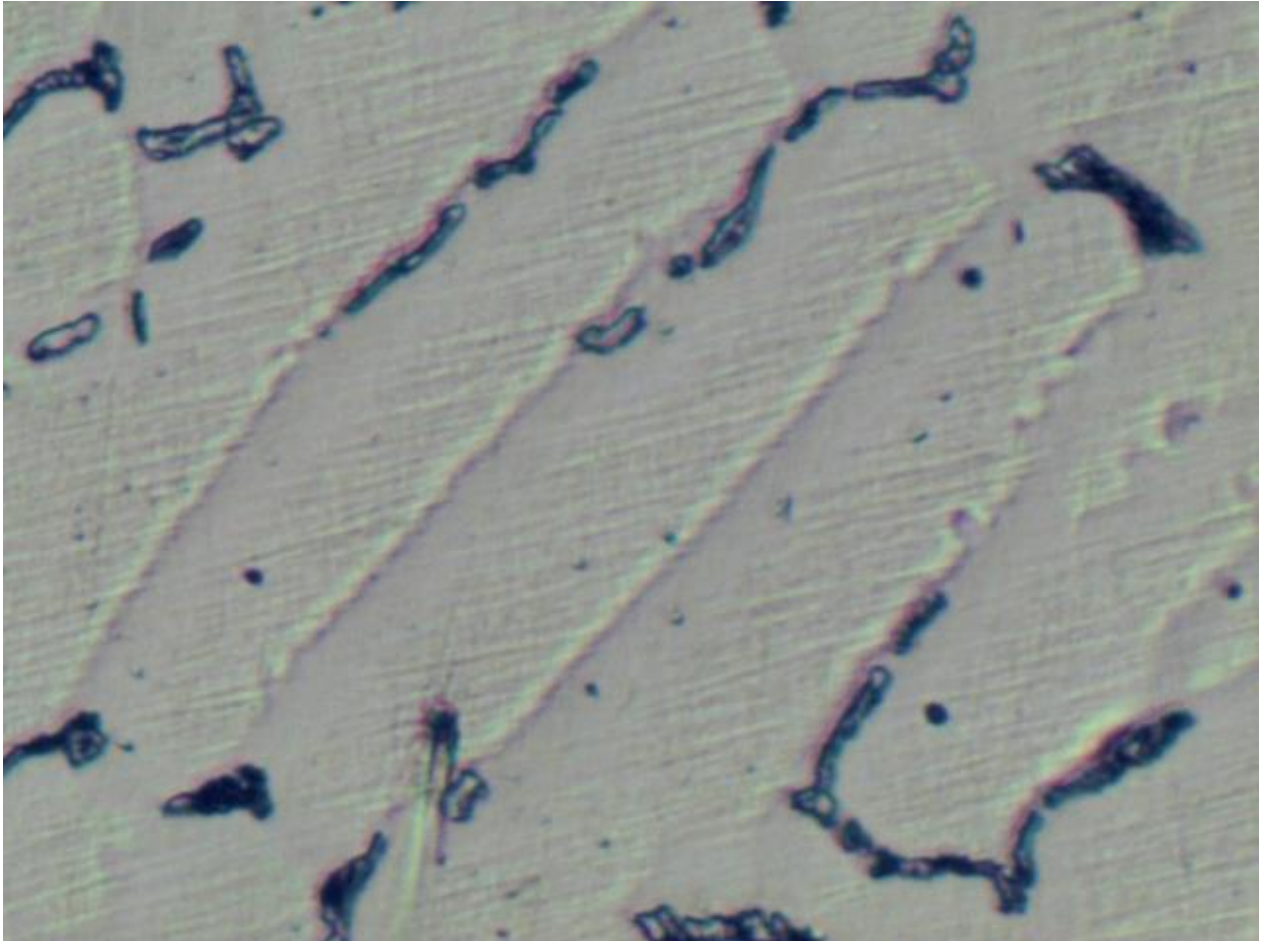


Figura 8.66. Acero inoxidable fundido HK40 , sin ataque químico (100x)

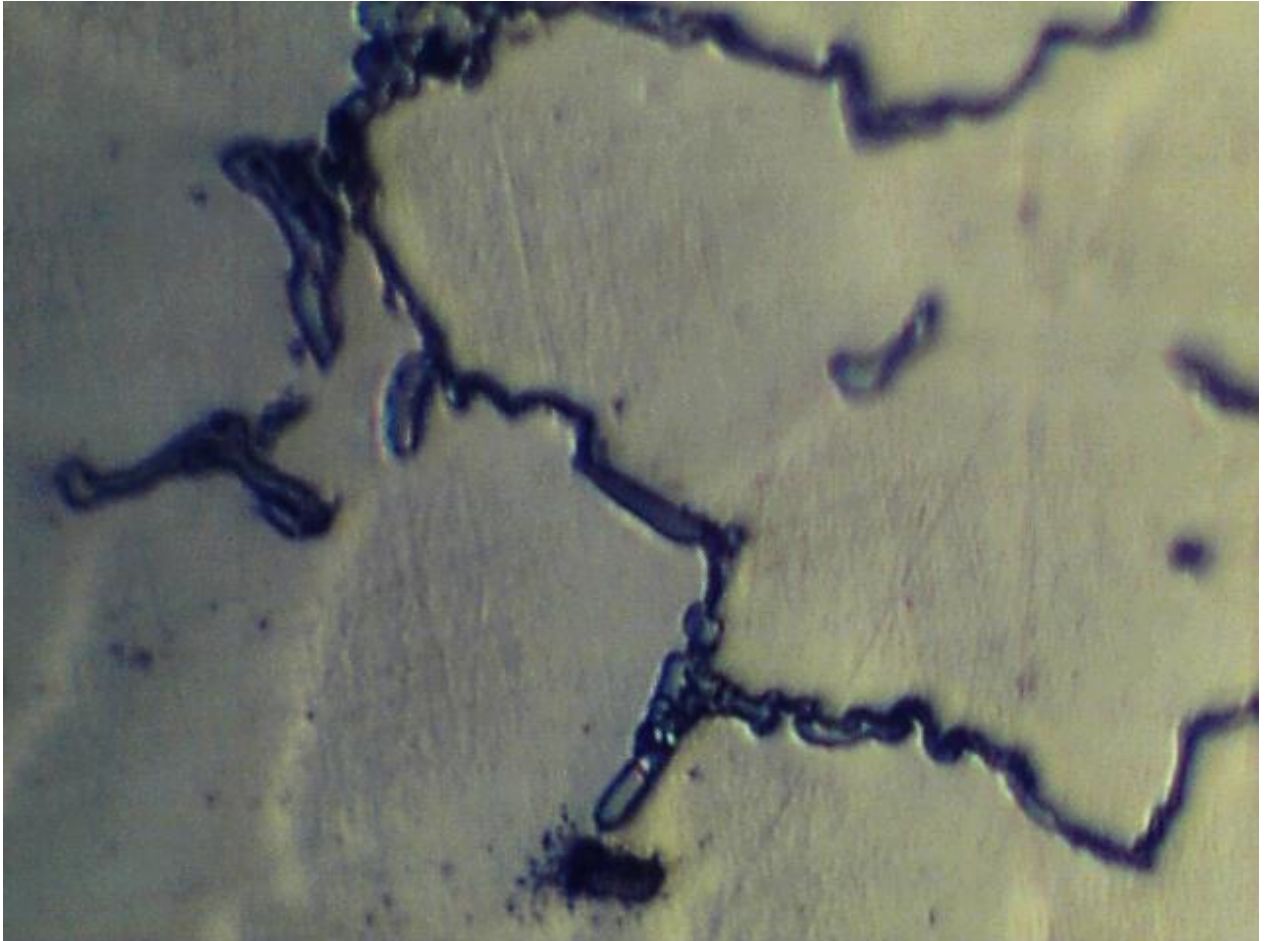


Figura 8.67. Acero inoxidable fundido HK40 , sin ataque químico (400x)

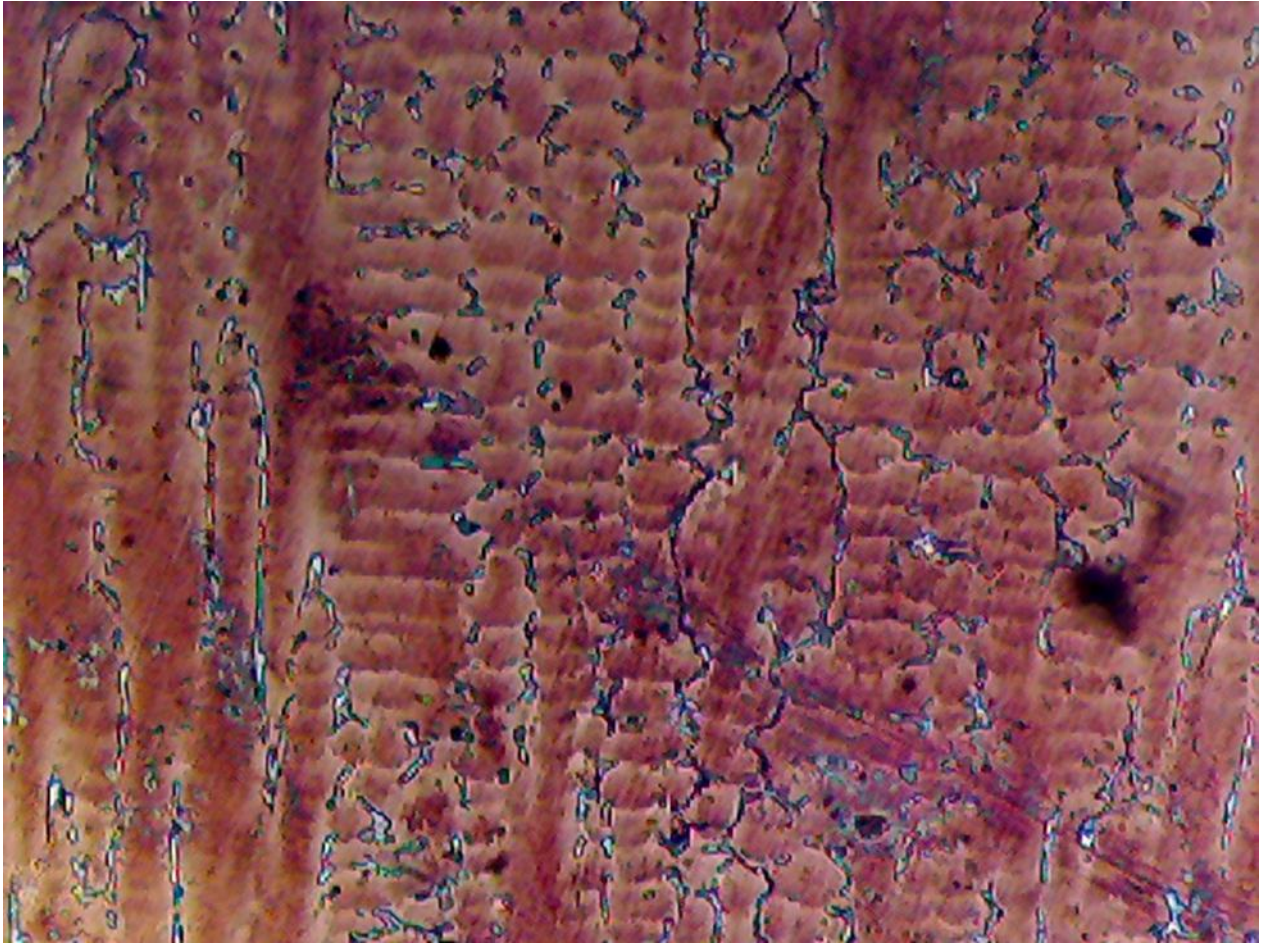


Figura 8.68. Acero inoxidable fundido HK40 , atacado con reactivo de Vilella y teñido con calor (100x)

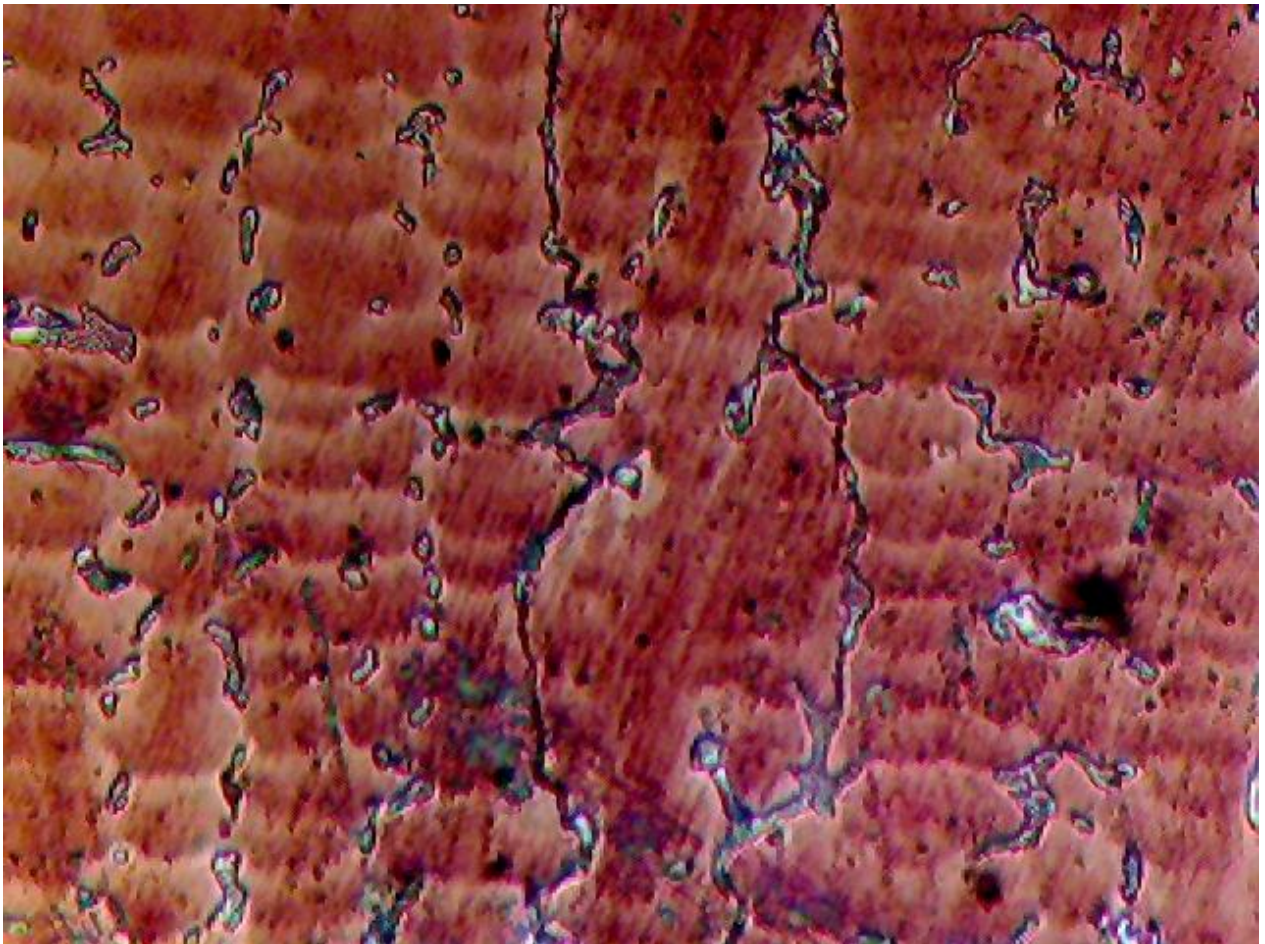


Figura 8.69. Acero inoxidable fundido, atacado con reactivo de Vilella y teñido con calor (200x)

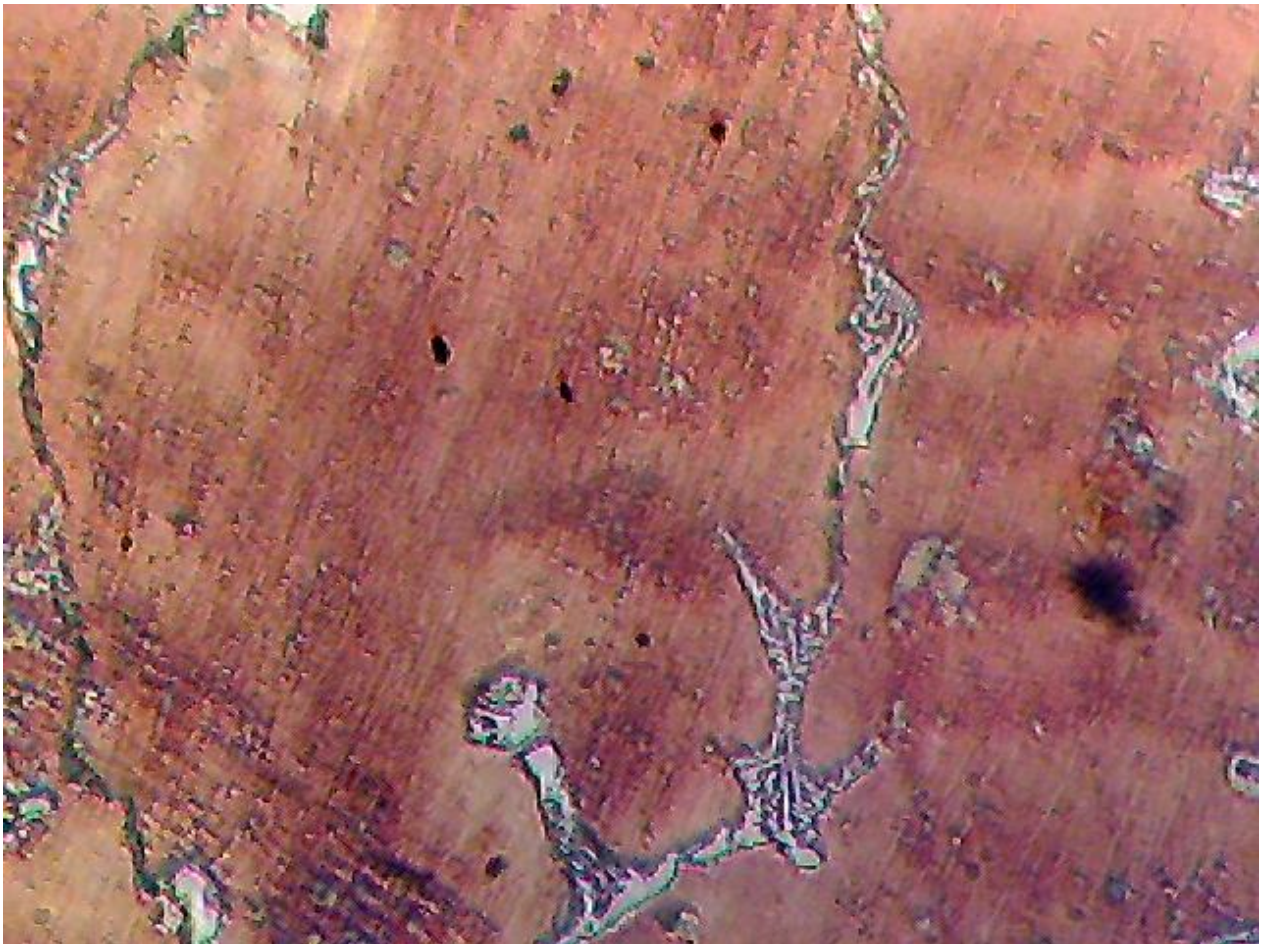


Figura 8.70. Acero inoxidable fundido, atacado con reactivo de Vilella y teñido con calor (500X)

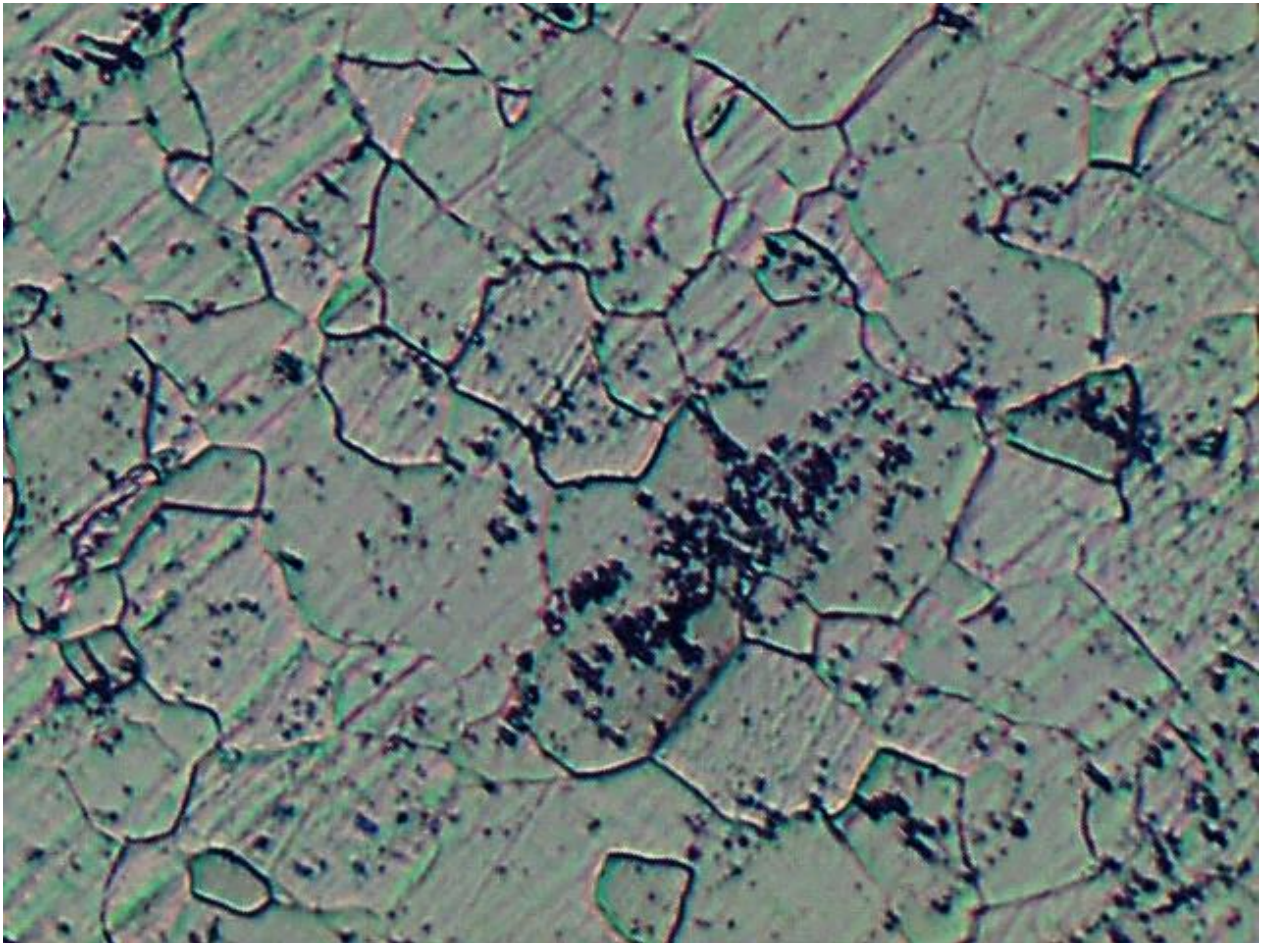


Figura 8.71. Acero inoxidable ferrítico (moneda de \$1.00, de 1988) observado a 200X

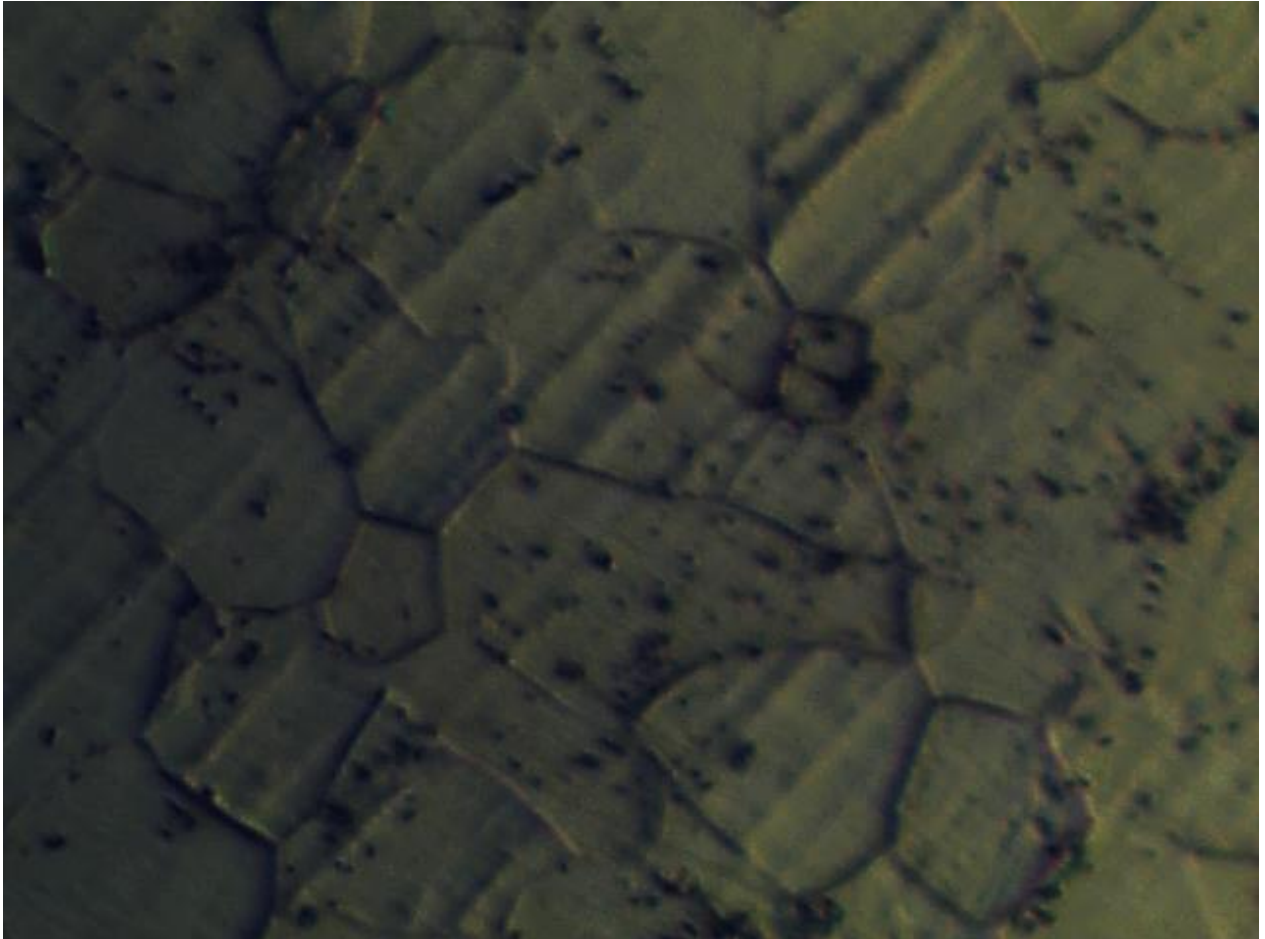


Figura 8.72. Acero inoxidable ferrítico (moneda de \$1.00, de 1988) observado a 500X

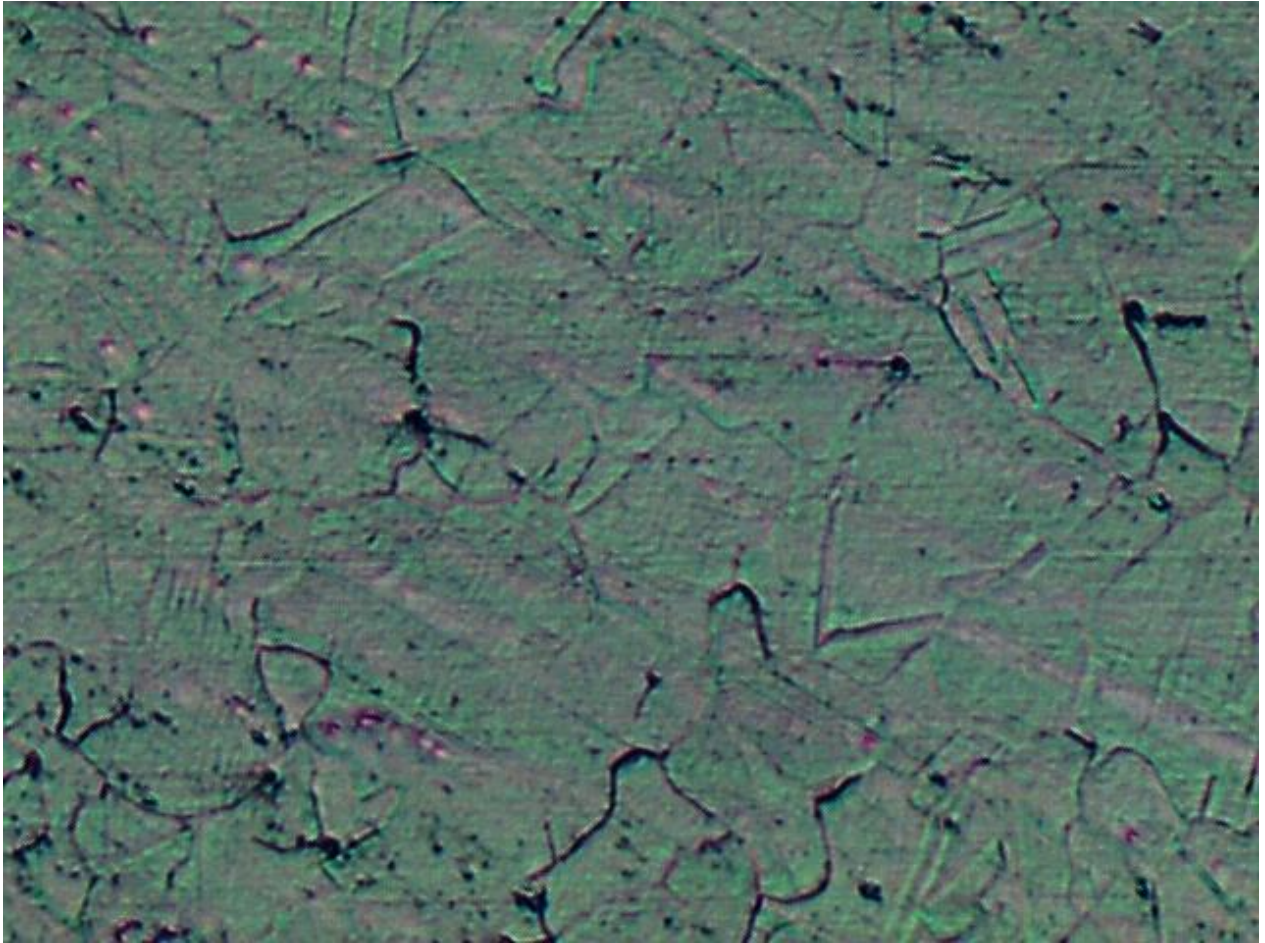


Figura 8.73. Acero inoxidable tipo 304 observado a 200X

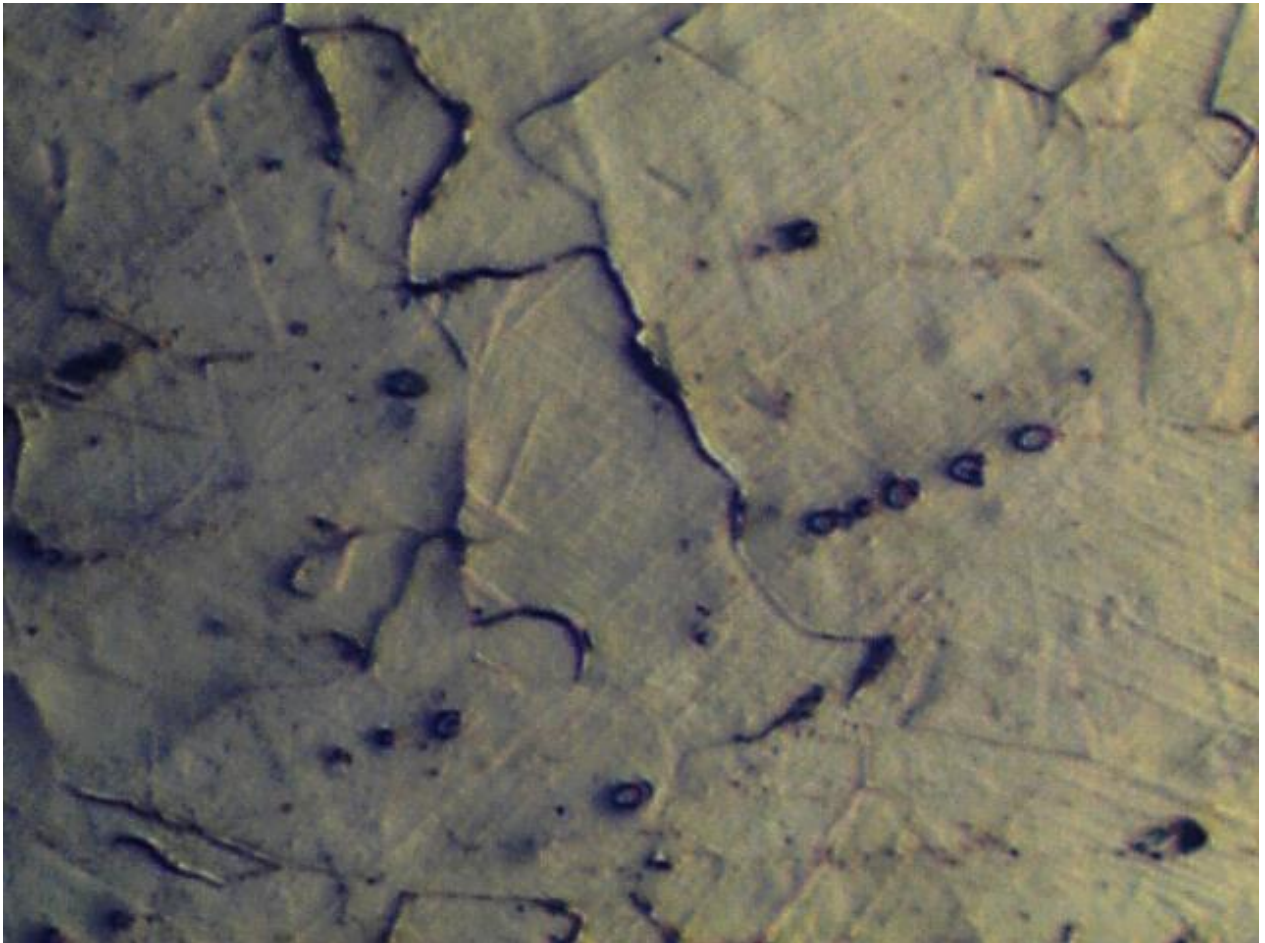


Figura 8.74. Acero inoxidable tipo 304 observado a 400X

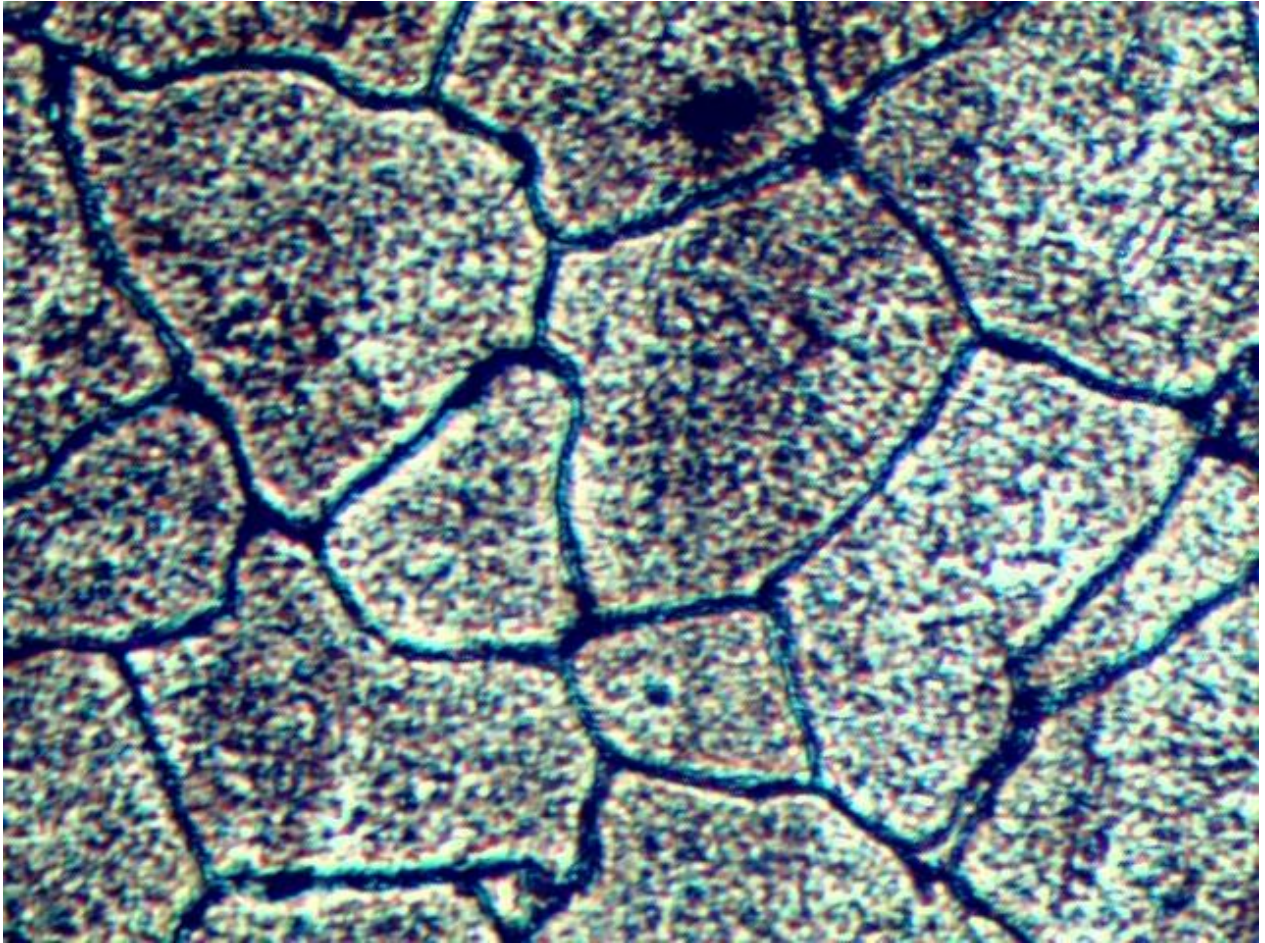


Figura 8.75. Aluminio 6006-T6 (500X)

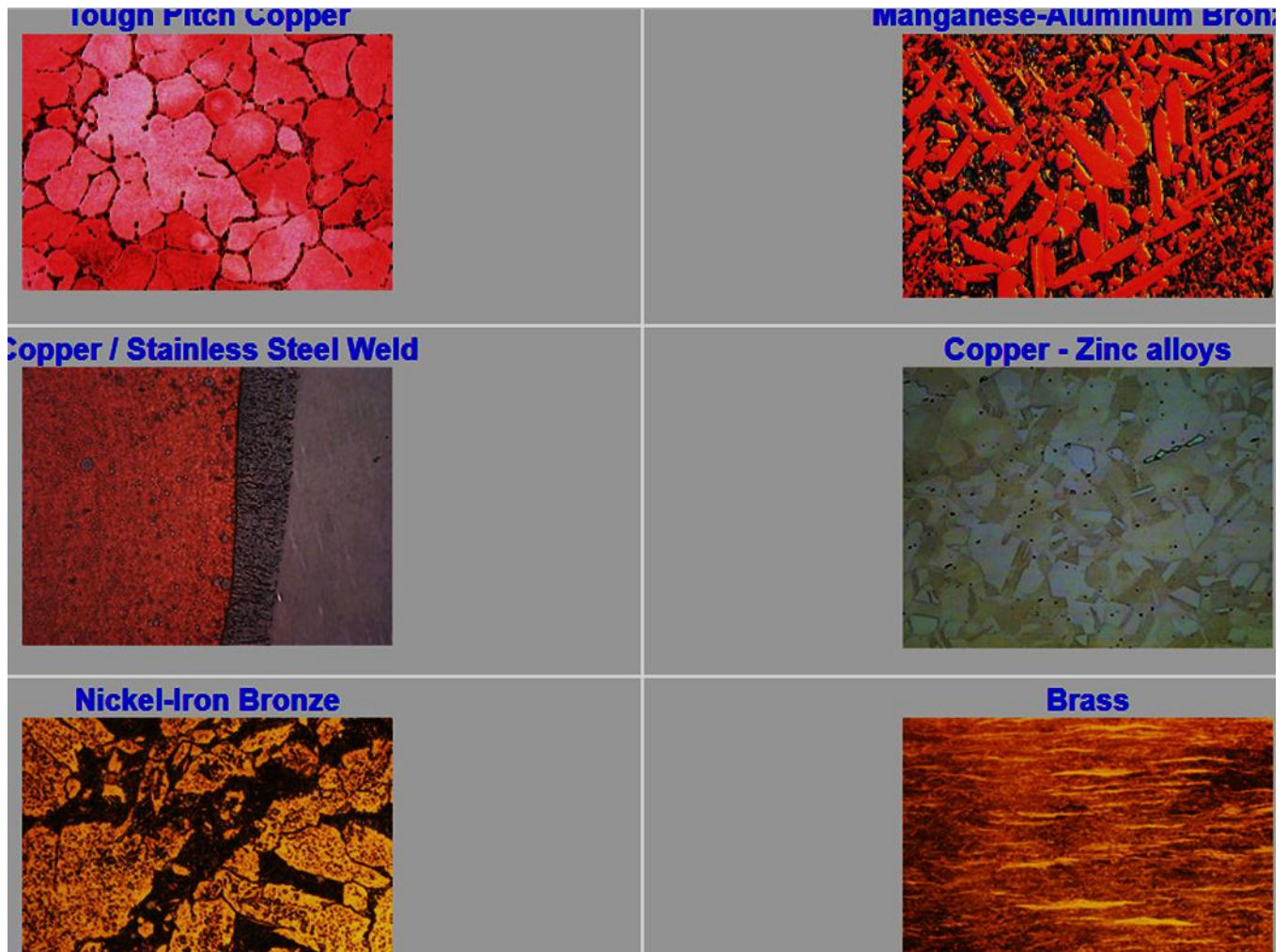


Figura 8.76. Microestructuras en diferentes aleaciones de cobre (Mientras)

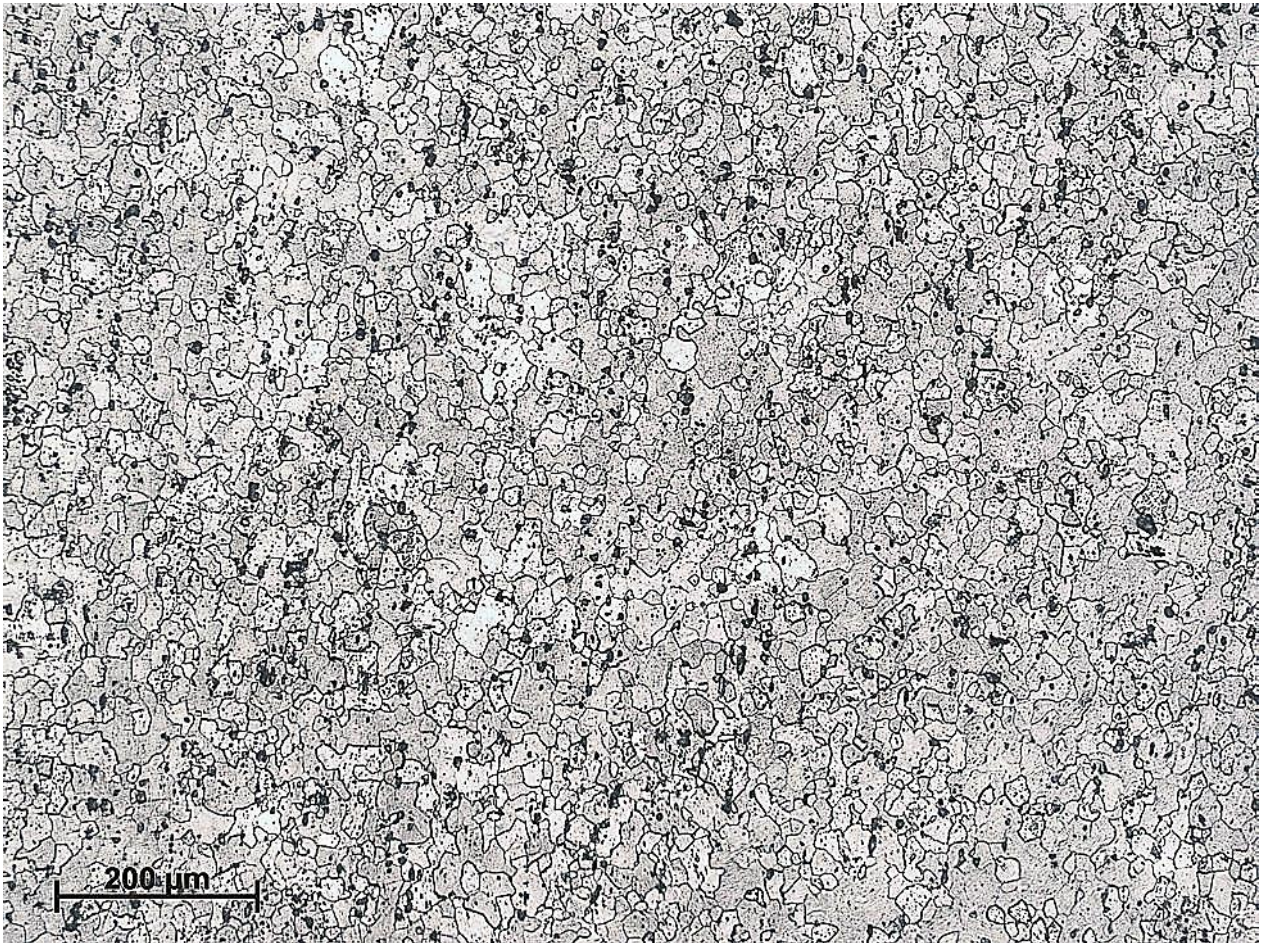


Figura 8.77. Aluminio 2024 T4 (aluminio-cobre) Ataque: Inmersión durante 30-120s en mezcla de ácidos (HCl+HF+HNO₃).

La aleación 2024-T3 que se muestra en las micrografías presenta una microestructura de granos equiaxiales, formada por una matriz de α -Al y varios tipos de compuestos intermetálicos de dimensiones y morfología variable que se distinguen más fácilmente en la muestra pulida sin ataque;

<https://www.ucm.es/data/cont/docs/1292-2016-10-21-naranja%20con%20mas%20ataque%20web78.jpg>

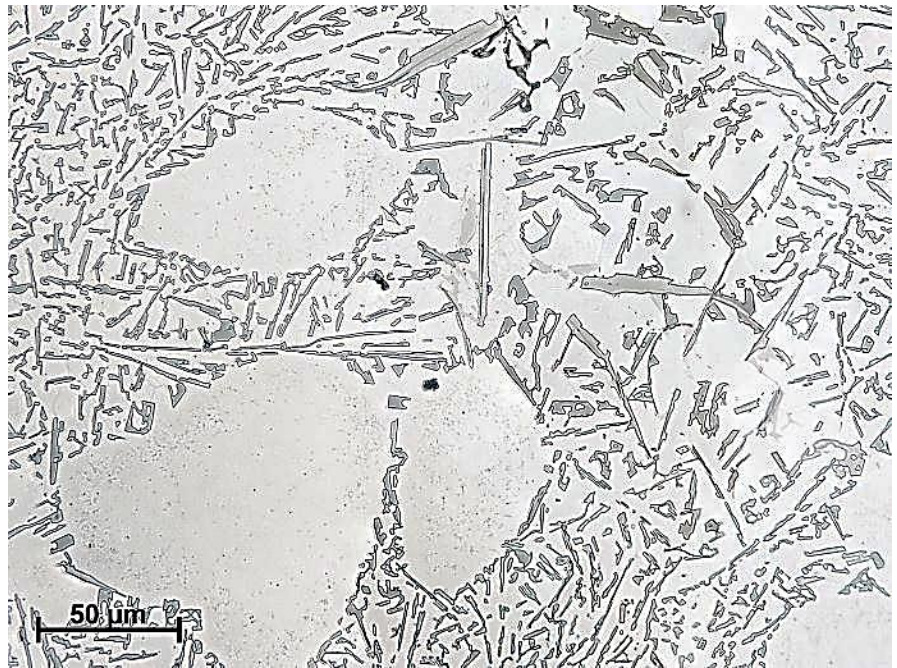
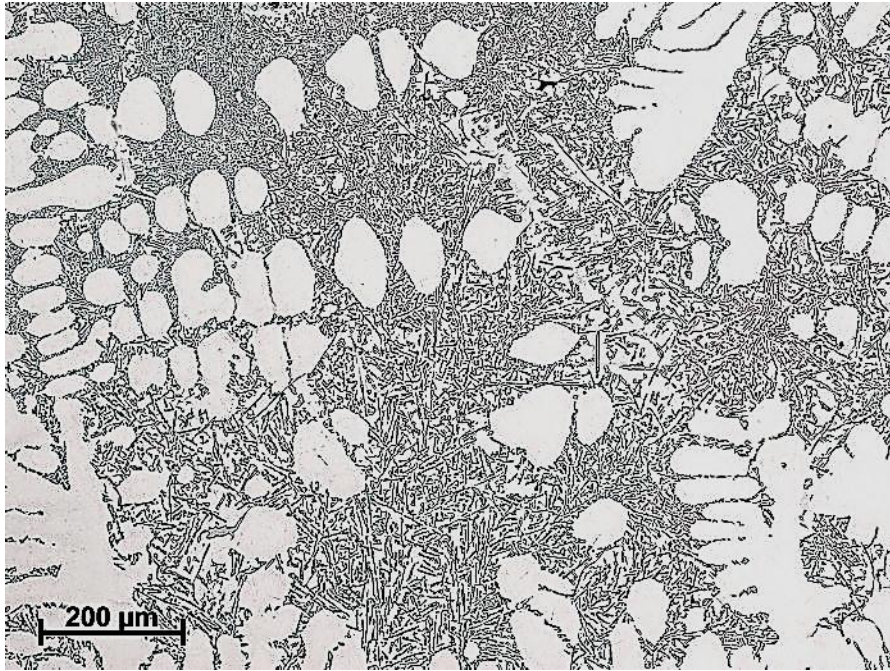


Figura 8.78. Aleación A361, Aleación Al-Si Moldeada a presión. Procesado: Moldeo a presión (Pressure die casting). Ataque: Inmersión durante 10-45s en una disolución de HF al 0,5%. Microestructura dendrítica característica de las aleaciones de moldeo donde se observan dendritas primarias de fase α -Al y un eutéctico Al-Si situado en los espacios interdendríticos. En la micrografía a mayores aumentos se observa la morfología acicular del Si eutéctico, así como la presencia de un compuesto intermetálico en forma de gruesas agujas identificado como β -AlFeSi. Éste se forma como consecuencia de la presencia de impurezas de Fe y resulta perjudicial tanto desde el punto de vista de la resistencia mecánica, ya que puede actuar como elevadores de tensiones, como a la corrosión, debido a su comportamiento catódico.

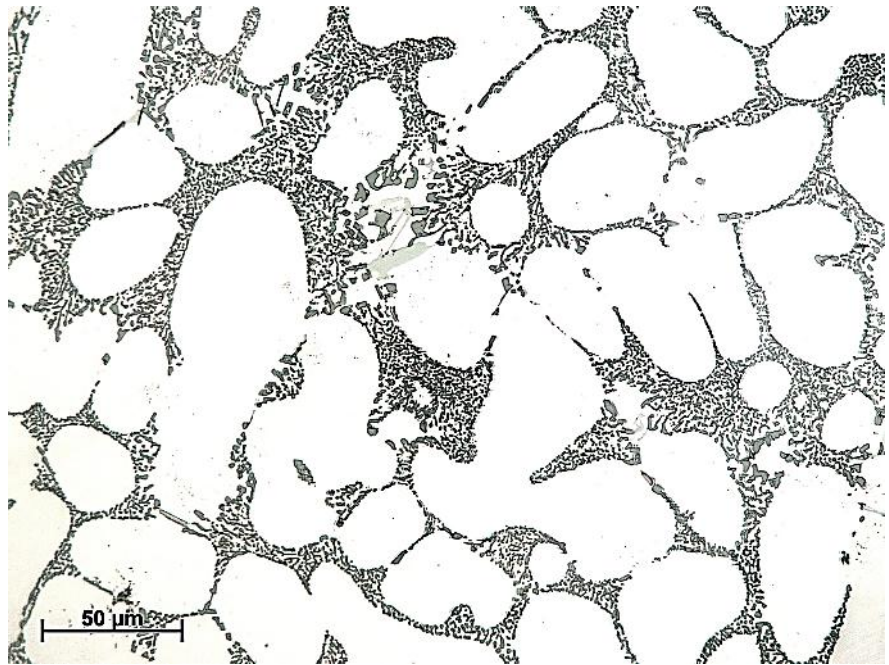
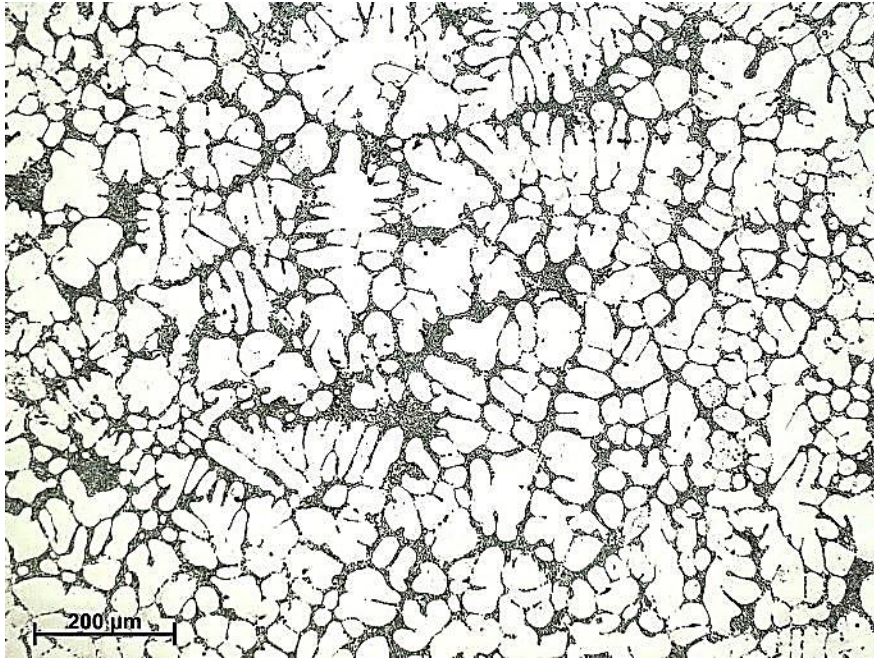


Figura 8.79. Aleación A356-M, Aleación Al-Si Moldeada en molde metálico. Ataque: Inmersión durante 10-45s en una disolución de HF al 0,5%. Se trata de una aleación Al-Si hipoeutéctica fabricada por moldeo y que presenta dendritas de fase primaria (α -Al) y un eutéctico (Al-Si) situado en los espacios interdendríticos. El Si que forma parte del eutéctico aparece en forma de pequeñas agujas o escamas debido al efecto modificador del Sr. Esta aleación presenta, además, tres tipos de compuestos intermetálicos, todos ellos localizados en la región interdendrítica:

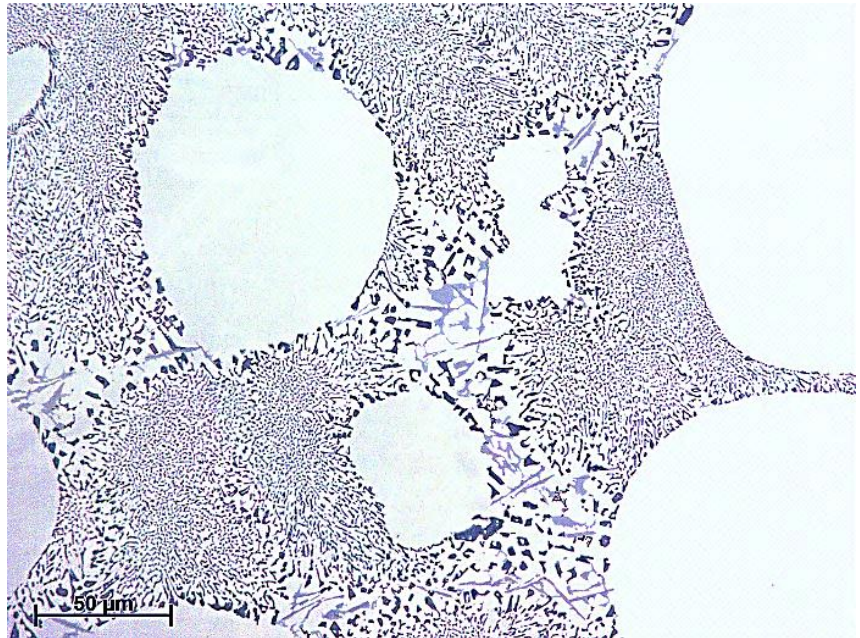
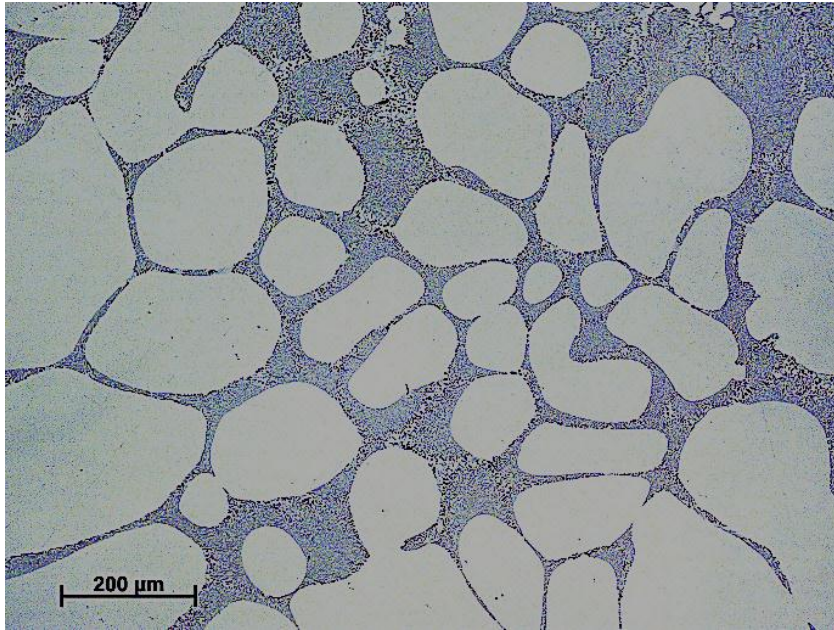


Figura 8.80. Aleación A356-RC. Aleación Al-Si Moldeada por vía semisólida. Ataque: Inmersión durante 10-15s en una disolución de HF al 0,5%. Microestructura globular formada como consecuencia de la agitación durante el procesado, lo que provoca la ruptura de las dendritas y el refinamiento microestructural. Se identifican glóbulos de α -Al y un eutéctico refinado Al-Si, presentándose el Si en forma de finas fibras. También se identifican compuestos intermetálicos ricos en Fe, el β -AlFeSi en forma de aguja, y el η -AlFeSiMg con morfología de escritura china, éste último en mayor proporción. Al comparar esta aleación con la A361, se observa claramente la influencia del método de procesado en la microestructura; el procesado en estado semisólido modifica la fase primaria de dendritas a glóbulos, y el Si eutéctico de agujas a finas fibras, lo que resulta en microestructuras más homogéneas y con mejores propiedades.

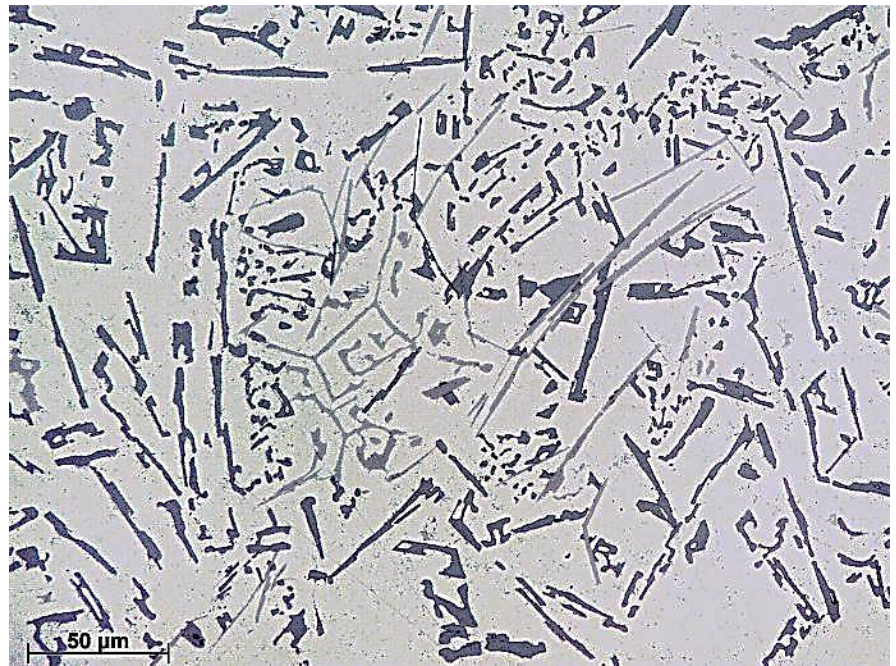


Figura 8.81. Aleación Al-14 Si hipereutética. compuesta por gruesas agujas o placas de Si cristalino primario dispersas en una matriz eutética Al/Sieut. La interfase entre el Si primario y la matriz es incoherente, lo que resulta en zonas susceptibles a la formación y propagación de fisuras.

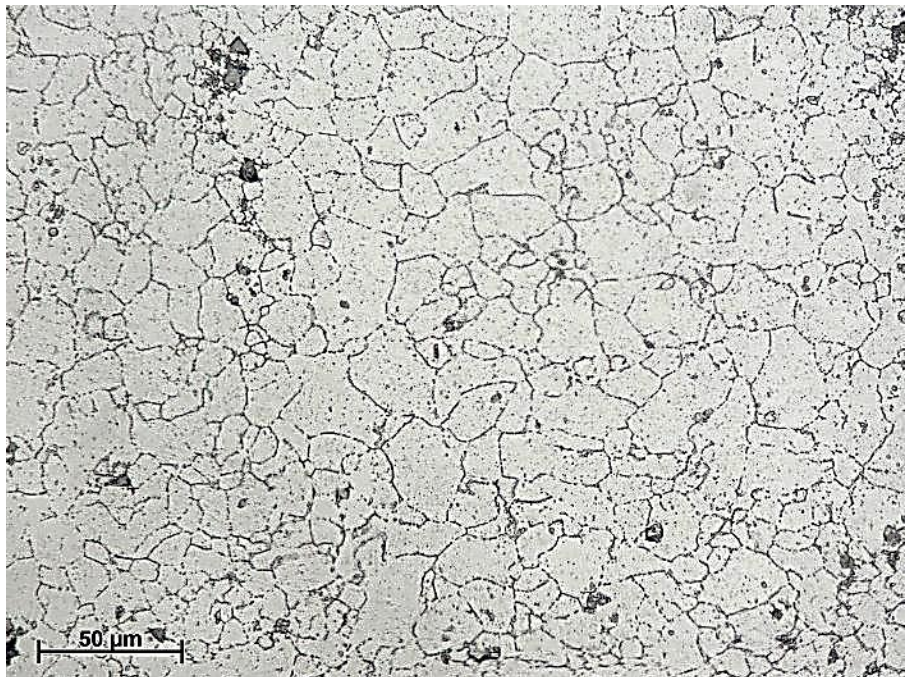
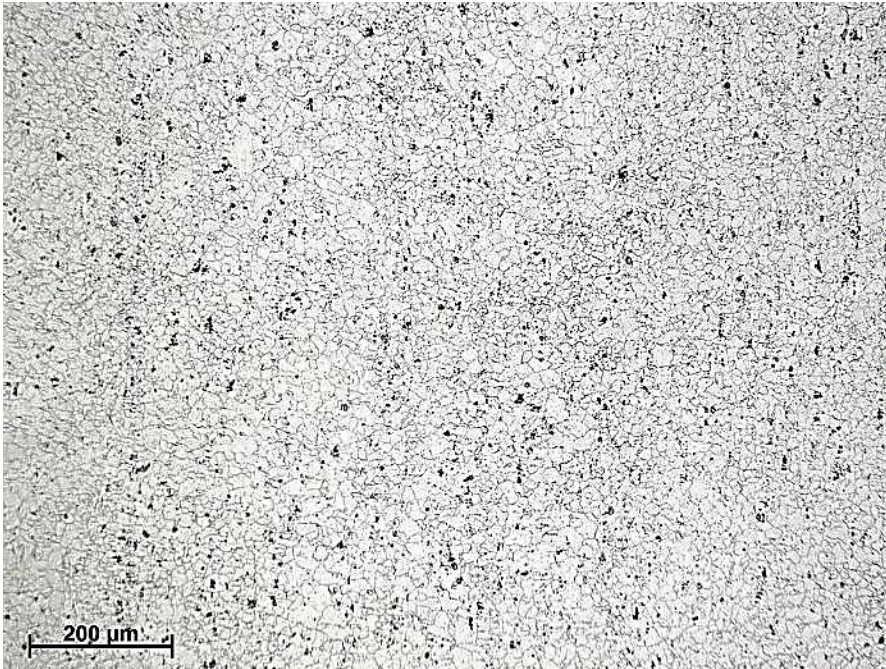


Figura 8.82. Aleación 5086-SE, Al-Mg solubilizada y envejecida. Procesado: Forja, laminación, solubilización (430°C - 8 h), temple en agua y sobrevejecimiento (150 °C - 11 días). Ataque: Inmersión durante 30-120 s en mezcla de ácidos (HCl+HF+HNO₃).

Al igual que en la aleación 5086-ST, la microestructura se caracteriza por una matriz α -Al y compuestos intermetálicos Al_3Fe (color grisáceo) y Mg_2Si (color oscuro). Por su contenido en Mn y Cr, es posible que esta aleación muestre también dispersoides con Cr y/o Mn. (ej. $Al_6(Cr,Mn)$, $Al_{18}Mg_3Cr_2$). Debido al tratamiento de sobrevejecimiento, y según el diagrama de equilibrio, se produce la precipitación de fase Al_3Mg_2 en límites de grano, lo que permite revelar claramente la forma equiaxial de los granos de fase α -Al.

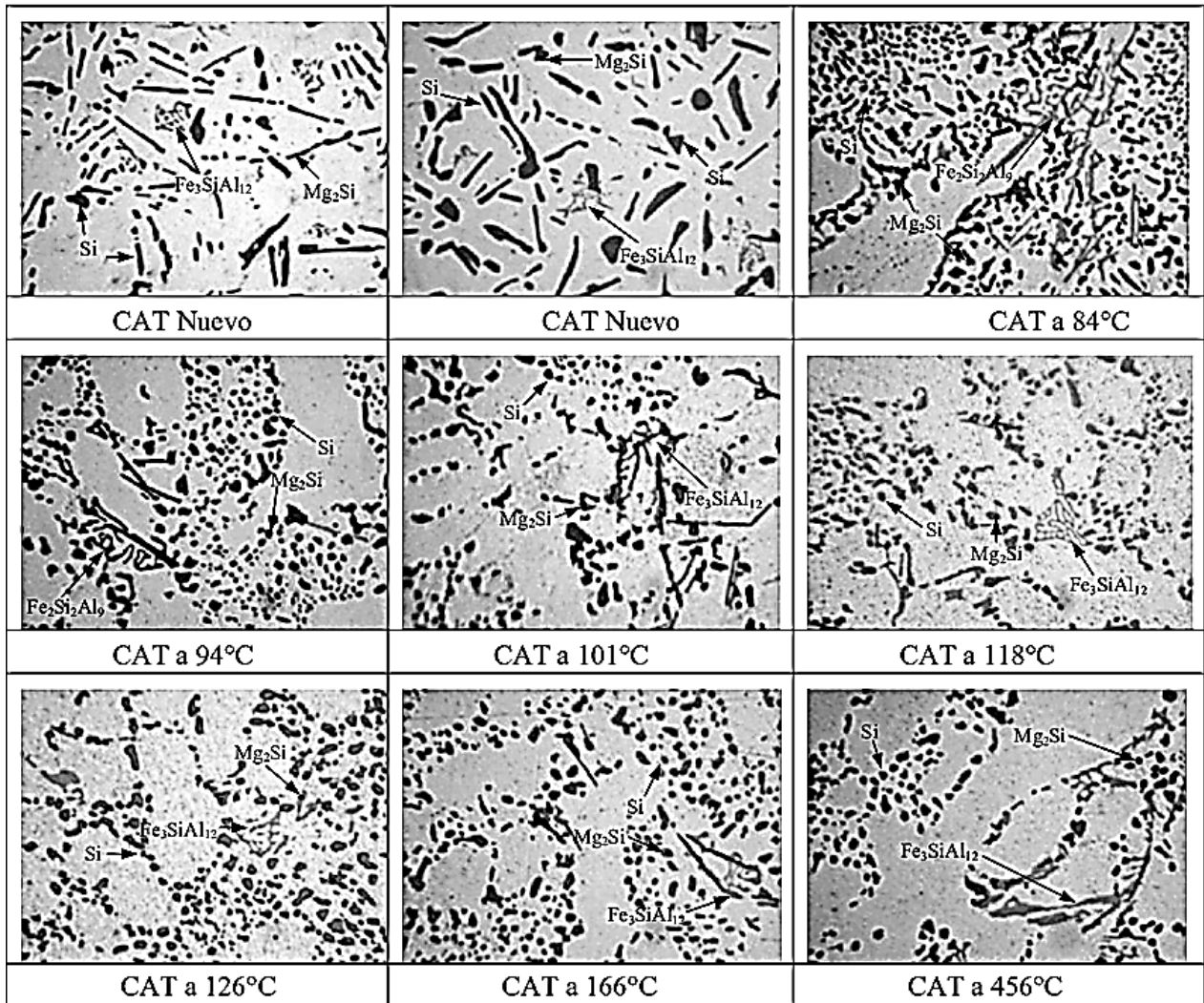


Figura 8.83. Secuencia de microestructuras de la aleación A356-T6 a 500X para cada condición de temperatura

(https://www.researchgate.net/publication/262519661_Microstructural_analysis_of_A356-T6_aluminum_alloy_on_high_tension_connectors)



Figura 8.84. Diente de un engrane, paso diametral 20, ángulo de presión 14.5°

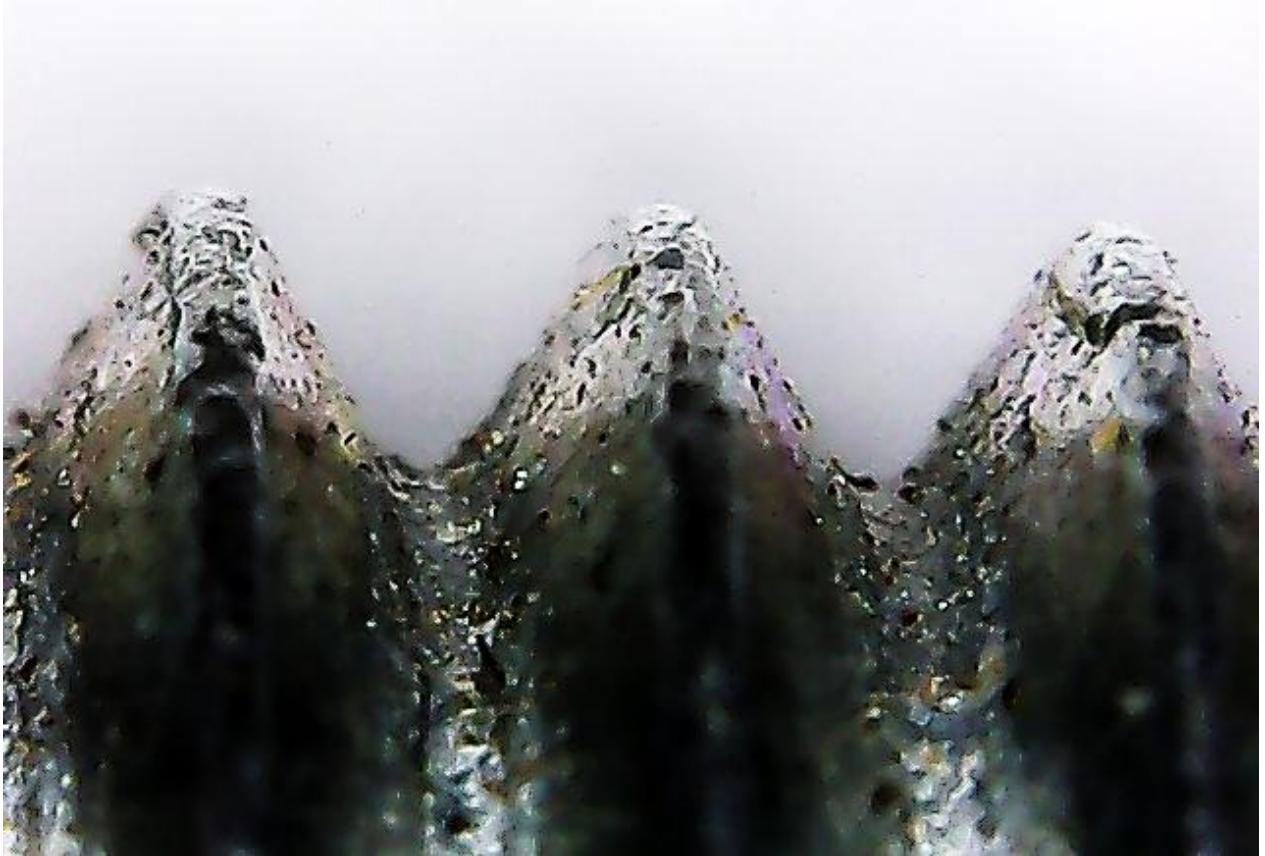


Figura 8.86. Rosca Americana estándar, diámetro de 3/16"

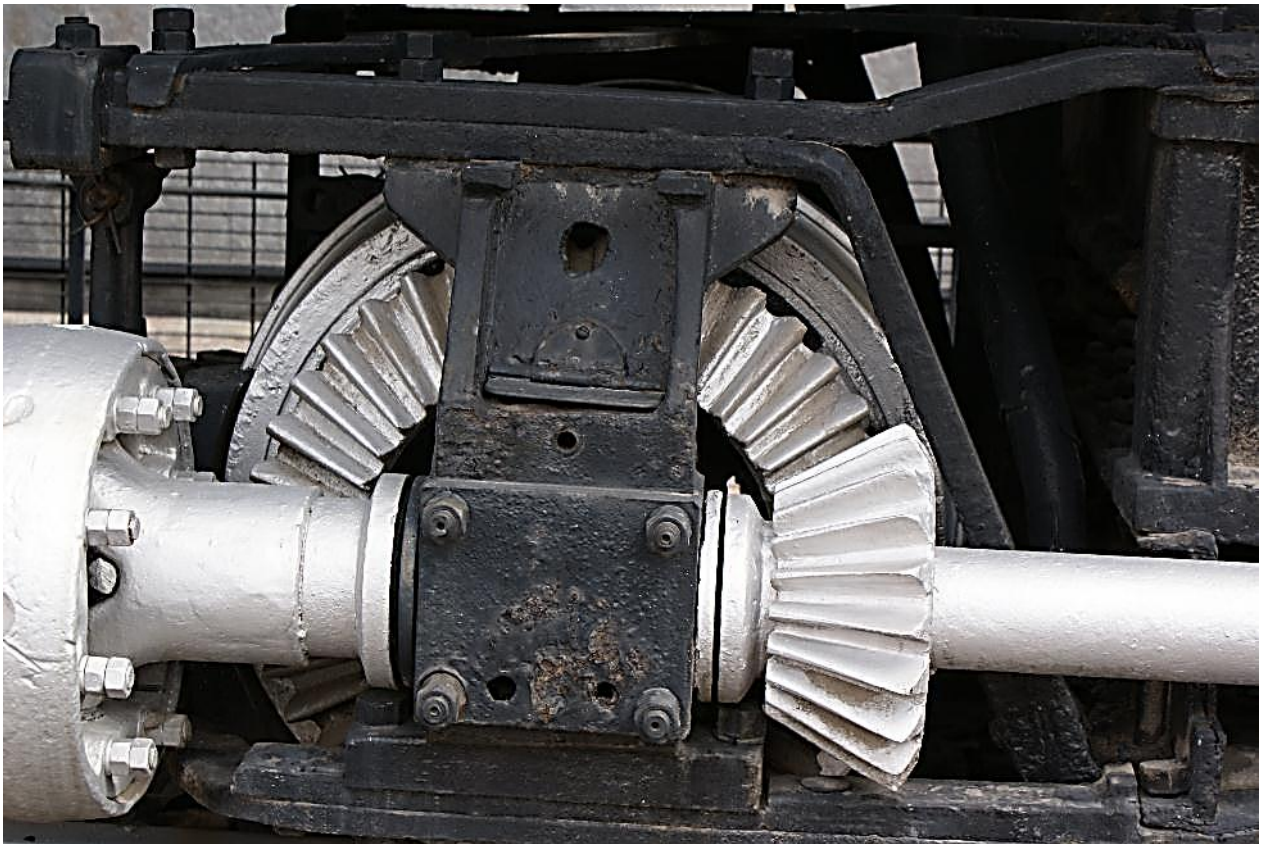
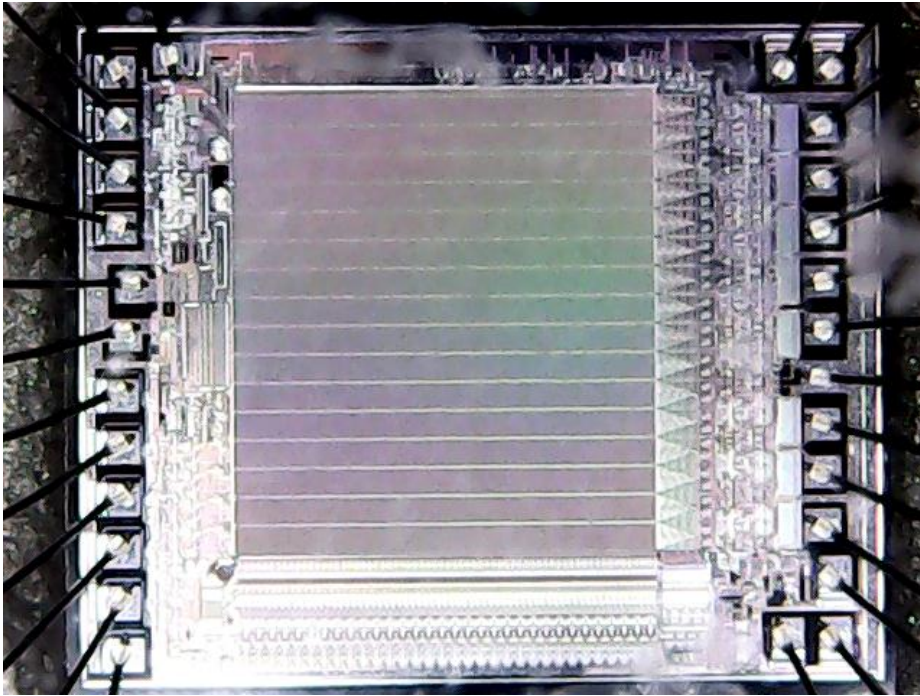


Figura 8.87. Engranés cónicos



88831S
M2764AFI
PGM 12.5V

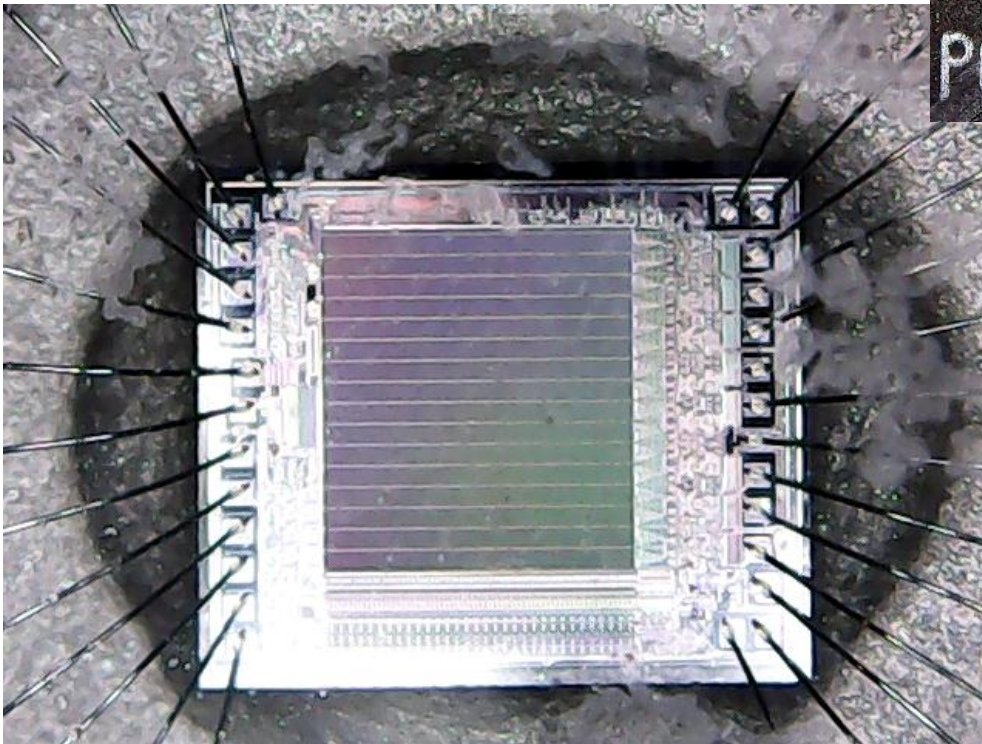


Figura 8.88. Memoria programable EEPROM (hace 50 años)



Figura 8.89. El peso mexicano antes de perder tres ceros.



Figura 8.90. Pirita



Figura 8.91. Mineral de plomo

BIBLIOGRAFÍA

1. <http://www.derematerialia.com/practicas-metalograficas/hierro-0-05-c/>
2. https://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=10&ved=2ahUKEwjgneK9tqHIAhUIRK0KHd2BBakQFjAJegQIABAC&url=https%3A%2F%2Fwww.interempresas.net%2FFeriaVirtual%2FCatalogos_y_documentos%2F9373%2FAMPreparacionesMetalograficas.pdf&usg=AOvVaw2jahTfJD38lo2cLApf6mzF
3. <https://www.ucm.es/atlasmetalografico/>
4. https://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwiY4vOyqbPIAhUCeawKHTsjBZsQFjAAegQIAxAC&url=http%3A%2F%2Fmaterias.fi.uba.ar%2F6716%2FModos%2520de%2520falla%2520en%2520componentes%2520estructurales_1.pdf&usg=AOvVaw33pUUK8ucPE8R0XX5DEcd8
5. https://copro.com.ar/Microscopio_electronico.html
6. http://www.tppinfo.com/metallurgical_lab/grain_size.html
7. https://www.researchgate.net/figure/Color-online-Rendition-of-the-3D-grain-structure-in-a-cylindrical-beta-Ti-specimen_fig10_24247006
8. In Situ Study of Phase Transformations during Non-Isothermal Tempering of Bainitic and Martensitic Microstructures
S. Hesamodin Talebi 1, , Hadi Ghasemi-Nanesa 1, Mohammad Jahazi 1, and Haikouhi Melkonyan

