

CAPÍTULO 1

1. LA METALOGRAFÍA DE CAMPO COMO METODOLOGÍA EN PROGRAMAS DE INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA

Las relaciones existentes entre microestructura-tratamiento térmico, microestructura-propiedades mecánicas, microestructura-resistencia a la corrosión hacen que el estudio de la micro estructura de los metales y las aleaciones constituya una herramienta valiosa ya sea en la investigación científico-tecnológica como en el control de los materiales.

Al ser el análisis metalográfico un ensayo destructivo, creaba una seria limitación en el caso de análisis metalográfico de control o análisis de fallas en servicio. La posibilidad de proceder a un pulido local sin necesidad de destrucción de la pieza, para extracción de la muestra, fue resuelta por Pierd A. Jacquet en el año 1957.

La metalografía no destructiva al dar información sobre el estado micro estructural de los componentes que trabajan a presión y temperatura por Ej: Una caldera posibilita verificar la existencia de alteraciones que dan indicación sobre comportamiento futuro de dichos elementos.

Durante la operación y mantenimiento de calderas es importante poder evaluar la integridad de sus componentes. Los ensayos de medición de

espesor de estos elementos pueden dar indicaciones sobre ciertos mecanismos de falla (Corrosión-Erosión, etc), pero no pueden dar información sobre mecanismos de degradación micro estructural (origen térmico) del componente en donde no existe disminución de espesores.

La técnica de metalografía no destructiva (Réplica metalográfica) aplicada a problemas de este tipo puede ser de una gran ayuda, pero siempre hay que tener en cuenta que NO EXISTE una sola técnica para la evaluación de un problema. Las técnicas de ensayos no destructivos, son complementarias y cada una tiene alcances y limitaciones.

1.1 La Metalografía de Campo

Durante la operación y mantenimiento de componentes, particularmente de aquellos que trabajan en condiciones seleccionadas, es importante poder evaluar su integridad y estimar su **vida residual**.



Figura 1.1 INSTALACIONES EN MONTAJE – CONTROL INICIAL

Las técnicas de metalografía no destructiva aplicadas a esta clase de problemas son de una gran ayuda pues, como es sabido, se puede establecer una relación directa entre: evolución microestructural y la variación de propiedades mecánicas, en el caso de componentes en servicio pero lo ideal es evaluar el punto de partida es decir como se encuentra la microestructura de o los componentes luego del montaje antes de comenzar su operación, con un **“Control Inicial”**.

Aplicaciones industriales y tecnológicas:

Las causas más frecuentes de rotura de elementos de caldera o componentes que soportan presión y temperatura, pueden ser clasificadas en tres categorías según sea su origen:

Mecánico: Relacionadas con defectos ligados a la fabricación del componente, por ejemplo: pliegues durante el proceso de laminación, que producen una disminución de la resistencia mecánica, errores en el diseño, etc.



Figura 1.2 PROCESO DE LAMINACIÓN EN CALIENTE

Químico: Asociadas a problemas de corrosión, pudiéndose detectar por medio de las réplicas si el mecanismo de degradación del material es provocado por: corrosión bajo tensión, corrosión intergranular, corrosión fatiga o corrosión por alta temperatura.

Térmico: Producen una elevación anormal de la temperatura de trabajo del componente. La más importante es la presencia de películas no conductoras en el interior de las piezas o la localización de zonas calientes no previstas, de diversos orígenes, las cuales provocan alteraciones micro estructurales localizadas.

Debido a la poca difusión que posee hasta el presente, esta técnica metalográfica, el ensayo de elementos de componentes que trabajan en condiciones críticas, altas temperaturas, altas presiones, medios corrosivos o con hidrógeno ha sido, fundamentalmente, la medición de espesores de pared mediante técnicas de ultrasonido.

Como esta técnica no destructiva apunta a este tipo de fallas, la observación metalográfica suministra información valiosa sobre fallas de origen térmico, ya que la metalografía tradicional ha demostrado que es posible determinar el daño sufrido por el material sometido a alta temperatura y en cierta medida prever sobre su comportamiento futuro.

De todas formas, la metalografía en campo es una herramienta más, que ayuda en la gestión de control de vida remanente de una instalación industrial en general, lo que la constituye en una de las mejores opciones para alargar la vida útil de dicha instalación.

1.2 Réplicas Metalográficas

Con el nombre genérico de réplica se denomina a toda película, tanto delgada como masiva, constituida generalmente por un material amorfo, que contiene los rasgos topográficos de una superficie dada. El contraste de la imagen, obtenida en un microscopio electrónico de transmisión o en un microscopio de reflexión, está por lo tanto directamente relacionado con la topografía de la muestra original.

1.2.1 Tipos de réplicas

Se tienen 2 tipos diferentes de réplicas para analizar componentes en campo:

- Réplicas Topográficas
- Réplicas Micro estructurales

Replicas Topográficas

Este tipo de réplicas se utiliza generalmente para obtener topografías (a nivel macro) de fracturas, daños en superficies metálicas, superficies porosas, ideal para examinar valles de roscas de engranajes, interiores de tubos menores a 1 pulgada de diámetro, etc.

Replicas Micro estructurales

El concepto de copiado en este tipo de réplicas es como su nombre lo indica, a nivel micro estructural, es decir copian la topografía generada en el revelado de la micro estructura.

Con este tipo de replicas es posible llegar a observar detalles de hasta 150´.

1.2.2 Tipos de materiales utilizados para réplicas

Para las réplicas topográficas, se tienen las de goma siliconada, como la que se observa en la figura:



Figura 1.3 RÉPLICAS DE GOMA, SE MEZCLAN DOS COMPONENTES Y SE OBTIENE UNA PASTA.

Similar a los monómeros utilizados donde deben mezclarse una parte de A con una de B en este caso se mezclan partes iguales y el material permite manipularlo por un lapso de 5 minutos luego fragua y debe extraerse de la zona donde se desea copiar alguna característica de la superficie y se prepara para su posterior observación, como vemos en la siguiente figura:



Figura 1.4 RÉPLICAS DE RANURAS REALIZADAS EN EL INTERIOR DE UN TUBO.

Los materiales utilizados para la obtención de **réplicas micro estructurales** deben dar como resultado una fiel reproducción de la micro estructura del elemento analizado y debe garantizar una muy buena resolución. En el mercado existen distintos tipos de materiales usados para este tipo de réplicas:

- **Hojas de acetato de celulosa con soporte de aluminio reflectante (TRANSCOPY),** fabricado por Struers.

Puede analizar una superficie de 6 cm².

La técnica operatoria consiste en humedecer la réplica con solvente, dejar un tiempo (5 minutos) y luego pegar, presionando, sobre la superficie del componente. No se necesita el metalizado de la réplica.



Figura 1.5 EQUIPO PARA REPLICAS FABRICADO POR STRUERS, INCLUYE EL SOLVENTE Y EL KIT CON 50 REPLICAS

- **Hojas de acetato de celulosa sin soporte**

Tienen un espesor de 50 μ m. Este material da como resultado réplicas de buena resolución y reproducción. Cubre áreas grandes. Se pueden obtener macrografías.



Figura 1.6 HOJAS DE ACETATO DE 50 μ m, SEPARADAS CON PAPEL PARA SU TRANSPORTE

- **Barniz Nitrocelulósico**

Este material presenta excelente reproducción y resolución. Puede llegar a cubrir grandes superficies (macrografías).

En Argentina, el CNEA (Centro Nacional de Energía Atómica), distribuye este tipo de material, tiene desarrollada una fórmula especial en sus laboratorios.

1.2.3 Técnicas de preparación de réplicas

Normalmente se utilizan dos métodos para obtener réplicas de una superficie:

1. El **método de una etapa**, que permite la obtención de réplicas directas de alta resolución.
2. El **método de dos etapas**, que implica la obtención de una réplica intermedia.

En el primer caso la resolución máxima obtenible es de unos 20-30 μ , mientras que en el segundo se pueden llegar a observar detalles de unos 150 μ .

Réplicas de una etapa

El método de una sola etapa permite obtener réplicas fieles de una muestra dada. El depósito directo de carbono sobre la superficie reproduce su topografía con mayor fidelidad que cualquier otro, obteniéndose de esta manera réplicas de máxima resolución. El único inconveniente de la réplica de una etapa es el

deterioro de la superficie replicada durante la separación de la película de carbono de la muestra.

La secuencia de operaciones para la obtención de una réplica es la siguiente:

1. La superficie debe estar convenientemente preparada. En el caso de superficies rugosas, debe removerse todo resto de óxidos y contaminación. En el caso de metalografías, es claro que la superficie debe atacarse con los reactivos adecuados previamente a la deposición de carbono, para producir el relieve que luego se evidenciará en la réplica.
2. La muestra se coloca en la cámara de evaporación. Se sombrea primero evaporando un metal pesado bajo un cierto ángulo, y se deposita luego carbono en forma perpendicular a la superficie a replicar.

Más adelante se detallara el procedimiento de evaporado para el caso particular de una metalizadora de laboratorio, aunque la secuencia de operaciones es válida para todo equipo de evaporación en vacío.
3. La superficie de la muestra, con la capa de carbono adherida se raya con una cuchilla afilada de modo que se forma un reticulado de unos 2mm x 2mm. Las líneas de este reticulado

dejan el metal expuesto a la acción del reactivo que se utilizará luego para remover la película de carbono.

4. La remoción de las láminas de carbono de la superficie del metal puede hacerse mediante un ataque químico o electrolítico. El reactivo depende de cada material, utilizándose generalmente las mismas soluciones que se usan para el ataque metalográfico.

Este tipo de preparado para replicas tiene el inconveniente de que la superficie a replicar es dañada, y el tratamiento y almacenamiento de las replicas es un tanto complejo, por lo que se hará énfasis en las replicas de dos etapas, que es la que se usara en el desarrollo de las presente tesis.

Réplicas de dos etapas

Este método no deteriora la superficie estudiada y es el más utilizado en los casos de obtención de réplicas in-situ de componentes industriales.

Las rugosidades de la superficie se replican primero mediante una capa intermedia de barniz o plástico, o de acetato, dependiendo del material a utilizar.

La secuencia de operaciones para la obtención de una réplica es la siguiente:

1. Como en la técnica anterior la superficie debe estar completamente preparada, con los ataques correspondientes para su revelado micro estructural.
2. En el caso del barniz nitro celulósico, este se aplica directamente sobre la superficie a replicar con la ayuda de un vástago **de vidrio se**. El espesor de la película debe ser del orden de 0,1 a 0,2 mm. La operación debe llevarse a cabo con cuidado de manera de no introducir burbujas de aire durante la misma. La presencia de estas conspira contra la calidad de la réplica y su facilidad de extracción.

Luego de colocado el barniz, el tiempo de secado del mismo (eliminación del solvente por evaporación) es de alrededor de una hora. Durante este tiempo se debe tratar de proteger el barniz del polvo atmosférico. Una vez que el barniz está totalmente seco, se encuadra con una hoja de afeitar la zona a desprender.

La extracción de la réplica se facilita, colocando sobre la misma un algodón embebido en agua durante algunos minutos. Luego de esta operación, la réplica se extrae con una pinza del tipo de depilación. Posteriormente, se pega la réplica extraída sobre un portaobjetos que tiene sobre en su

superficie una cinta adhesiva transparente doble faz. La réplica, en estas condiciones, puede ser observada por transparencia mediante un microscopio biológico o por reflexión mediante un microscopio metalográfico, colocando para este último caso un espejo debajo del portaobjetos. Se obtienen mejores condiciones de observación por reflexión, si se metaliza el conjunto réplica-portaobjetos por evaporación en vacío.

3. En el caso de las hojas de acetato, la técnica operatoria consiste en humedecer la superficie con solvente, para luego, por tensión superficial, adherir la película de acetato. Se espera 5 minutos y se procede a su extracción con una pinza.
4. Se fija la réplica sobre un vidrio portaobjeto en cual fue adherida una cinta adhesiva doble faz. Tener cuidado de colocar hacia arriba la superficie de la réplica que contiene la impresión topográfica de la superficie atacada.
5. El **metalizado** de las réplicas a estudiar es por medio del sublimado de Aluminio, Oro o Plata, en una campana de vacío donde con una resistencia eléctrica (alambre de Tungsteno) se calienta hasta fusión un trozo de alambre generalmente Aluminio (por su bajo valor) el cual se volatiliza en todo el volumen de esta campana, depositando sobre la superficie de

la réplica una delgada y uniforme capa de dicho metal del orden de 200 \AA , con lo cual se obtiene una superficie reflectante, favorable para la observación en el microscopio metalográfico.

El proceso de replicado de dos etapas se observa en la siguiente figura:

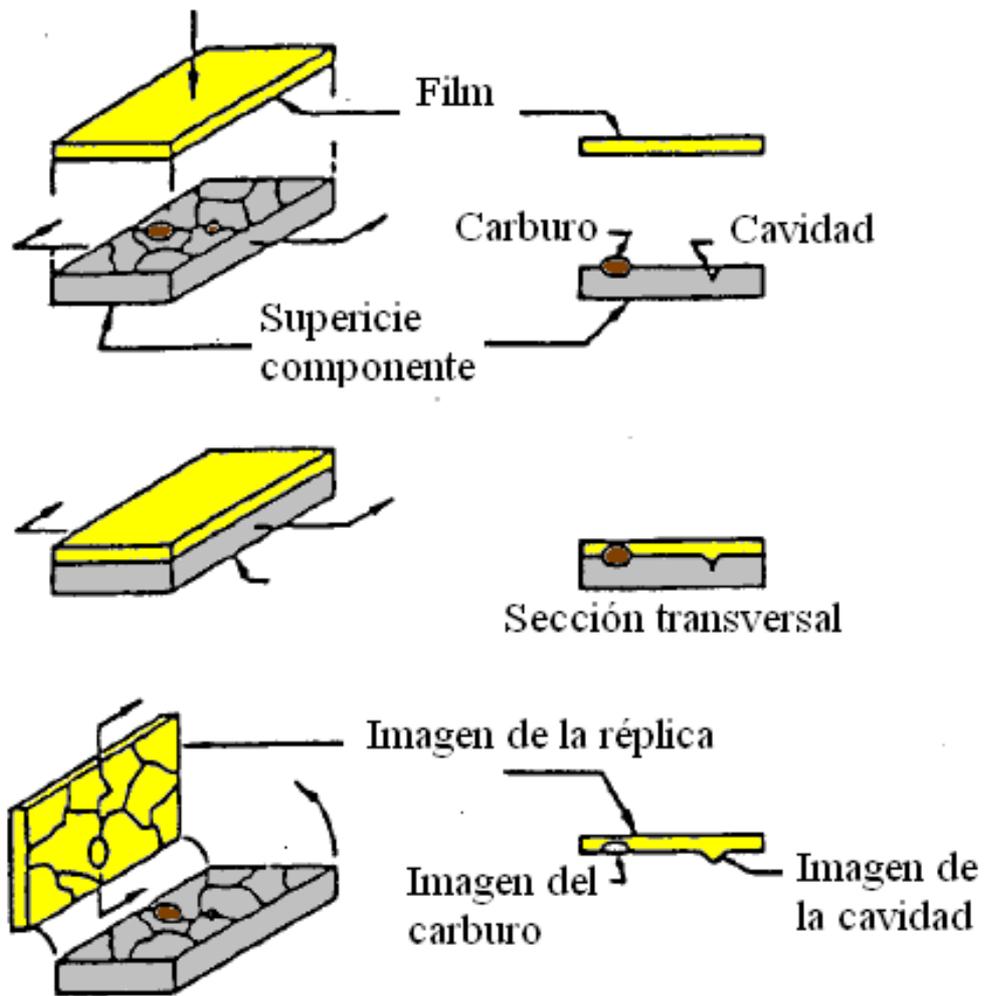


Figura 1.7 ESQUEMA DE UN PROCESO TÍPICO DE REPLICACIÓN DE DOS ETAPAS

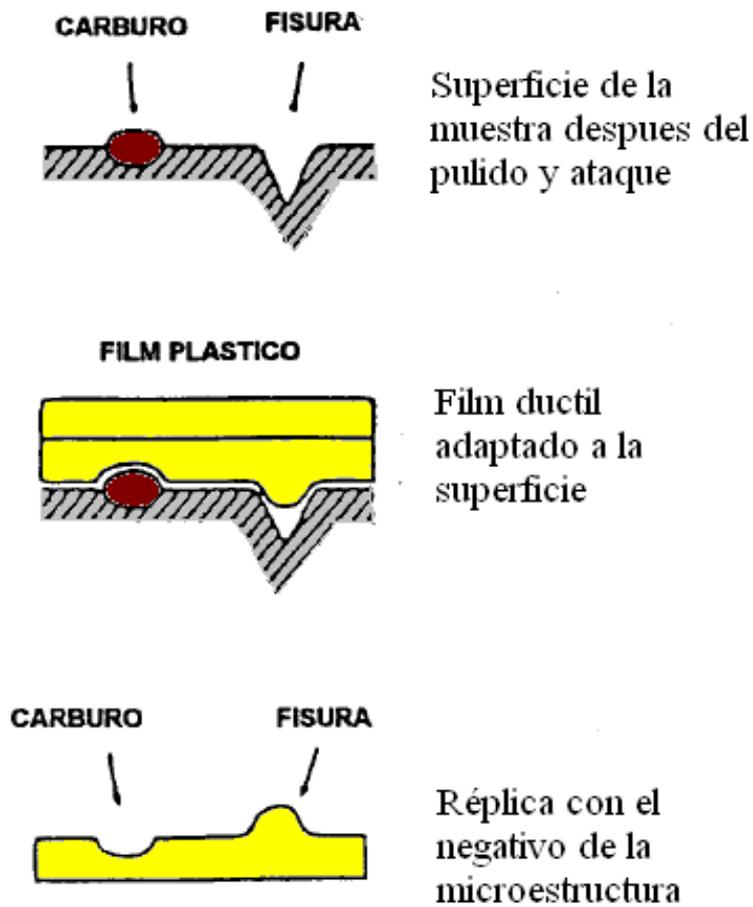


Figura 1.8 ESQUEMA DE REPLICACIÓN CARBURO-FISURA

Ahora que se conoce más a fondo los materiales y las técnicas de preparación de las replicas metalográficas, se detalla las ventajas y desventajas (**Tabla 1**) de cada una al momento de trabajar en campo.

TABLA 1.1

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS DIFERENTES MATERIALES PARA REPLICAS METALGRÁFICAS

Tipo de réplica	Ventajas	Desventajas
-----------------	----------	-------------

<p style="text-align: center;">Acetato</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Muy buena resolución (8/10 puntos). - Colocación y extracción en 3 min. - Ideal para estudiar fisuras. 	<ul style="list-style-type: none"> - Si el operador no tiene experiencia las burbujas pueden perjudicar las zonas de interés. - Difícil aplicación en áreas irregulares como ángulos vivos, valles de engranajes, etc.
<p style="text-align: center;">Acetato con respaldo (Tipo Struers)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Buena resolución (7/10 puntos) - No necesita metalizado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Aplicación para áreas pequeñas. - Solo superficies planas (se deforma el soporte metálico)
<p style="text-align: center;">Barniz</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Excelente resolución (9/10 puntos) 	<ul style="list-style-type: none"> - Burbujas y adhesión de partículas. - Fraguado demora más de 30 min.
<p style="text-align: center;">Goma siliconada</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Fácil remoción 	<ul style="list-style-type: none"> - Mala resolución.

1.2.4 Análisis Micro estructural

Para poder analizar la factibilidad entre la técnica de Replicas Metalográficas y del Microscopio Portátil, al momento de analizar la vida residual de un componente en campo, es necesario tener claro las características de los tipos de daños micro estructurales que sufren los metales a lo largo de su vida operativa.

A continuación se explican los diferentes tipos de fallas, y su morfología para discernir entre las dos técnicas, y ver cual tiene mayor alcance al momento de realizar este tipo de análisis.

Daños Micro estructurales

Un examen por partículas magnéticas permite una definición grosera del tipo de Fisuras, mientras que un análisis micro estructural permite una definición precisa de la misma.

La **Figura 1.9** muestra ejemplos de distintos tipos de fisuras que pueden ser puestas en evidencia por las réplicas micro estructurales en un material base hierro.

El empleo de la réplica permite el análisis de la micro estructura del componente y de esta forma conocer el posible daño sufrido por éste durante el servicio.

Como ejemplos típicos de cambios micro estructurales en aleaciones base hierro se puede citar:

- La esferoidización de la perlita de un acero, de estructura ferrítico-perlítica, que trabaja a alta temperatura.
- La precipitación de carburos de cromo (sensibilización) en un acero inoxidable sometido a un calentamiento en el rango de los 450 °C a los 750 °C (soldadura, servicio, tratamiento térmico).

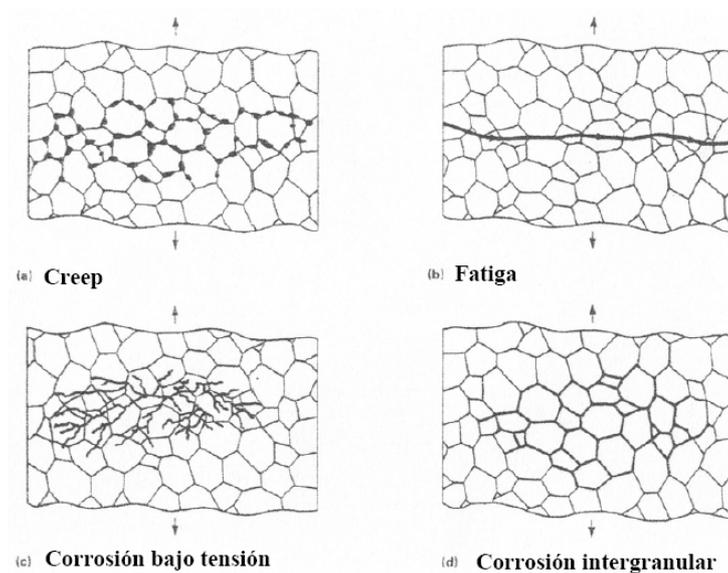


Figura 1.9 ESQUEMA DE LOS DISTINTOS TIPOS DE FISURAS QUE PUEDEN SER PUESTOS EN EVIDENCIA POR UNA RÉPLICA MICRO ESTRUCTURAL EN UN MATERIAL DE BASE HIERRO

Este mecanismo es característico de los aceros en general y algunas aleaciones de aluminio y cobre, pero no todos los materiales se comportan de la misma forma y poseen un patrón similar.

Pero no siempre es tan fácil identificar el problema, existen fallas en componentes donde se encuentran mecanismos combinados, por ejemplo, comienza por un mecanismo de corrosión picado y las tensiones generadas en el fondo del hoyuelo favorecen el avance de un mecanismo de fatiga mecánica.

Daño por termofluencia (Creep)

Las tensiones impuestas a un componente (ej: presión de trabajo) que trabaja a altas temperaturas produce una deformación continua del material. Por definición, el creep es la dependencia de la deformación con el tiempo de un material sometido a una determinada tensión. Luego de un determinado período de tiempo el creep puede terminar en la rotura del material (creep-ruptura). De lo anterior, es evidente que el creep es función del tiempo, la temperatura y la tensión.

Por lo tanto, este método No destructivo ha sido especialmente una herramienta importante en la estimación de vida remanente en muchos componentes como tubos de calderas (pared de agua zona del hogar), línea de vapor y componentes de turbinas (carcasas, ejes y alabes). El método de réplicas consiste en detectar pequeños orificios (hoyuelos) generados por este mecanismo, ubicados en los límites de grano o segunda fase.

Resultados de la literatura indican que existen dos tipos distintos de daño por creep en aceros ferríticos, que conducen a una continua reducción de la resistencia al creep del material:

- Degradación de la microestructura (ej. esferoidización de la perlita, envejecimiento, etc.)
- Cavidades por creep asociadas a los límites de granos.

Determinación de la vida remanente mediante evolución de las cavidades

La mayor parte de las fallas por creep en servicio, ocurrieron en los cordones de soldadura a partir de la nucleación y crecimiento de cavidades. Este proceso se desarrolla en los antiguos límites de granos austeníticos y están orientadas normalmente la máxima tensión principal. Estas cavidades coalescen y se producen fisuras finalizando en la rotura del componente. Para evaluar la vida remanente de un componente, a partir de la evolución de las cavidades, existen dos métodos uno cualitativo y otro cuantitativo de reciente desarrollo.

Método cualitativo

El método cualitativo fue desarrollado por Neubauer (1981)¹, el que establece cinco (primero fueron cuatro) estados del daño por creep a partir de la observación de las micro estructuras.

¹ José Ovejero García. Réplicas sus Aplicaciones (Maestría en Ciencia y Tecnología de Materiales, Universidad Nacional de General San Martín, Argentina, 2008)

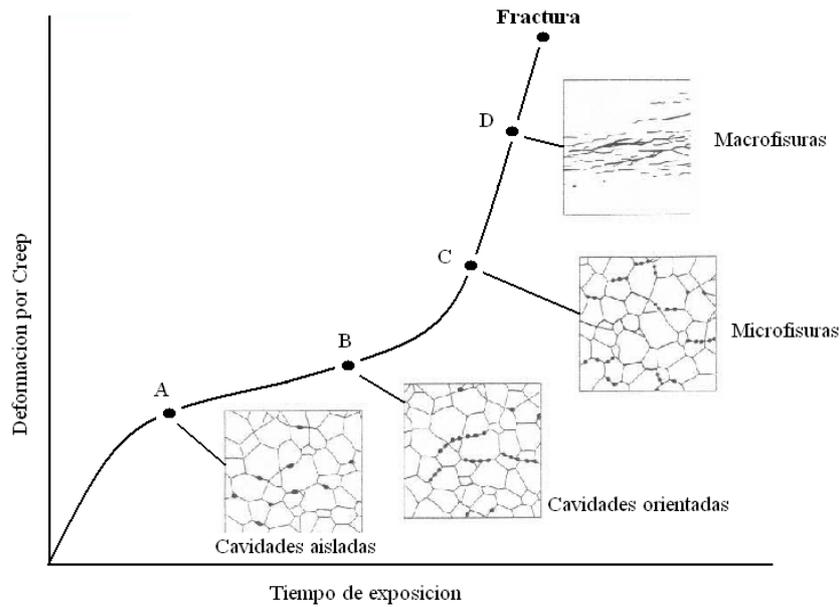


FIGURA 1.10 DISTRIBUCIÓN DE LA VIDA POR CREEP BASADA EN LA CLASIFICACIÓN DE CAVIDADES

En la siguiente tabla se verá el criterio aplicable con este tipo de modalidad de inspección preventiva.

TABLA 1.2

CRITERIOS APLICABLES A LA DEGRADACIÓN POR CAVIDADES

Clase	Estado	Accionar
0	No presenta defectos de Creep	Controlar cada dos años, según ASME VIII
1	Pequeña cantidad de cavidades	Reinspección después de 20.000 horas de servicio
2	Coalescencia de cavidades	Reinspección después de 15.000 horas de servicio
3	Microfisuras generadas por Creep	Reinspección después de 10.000 horas de servicio
4	Macrofisuras generadas por Creep	Inmediatamente informar y

Otra forma de evaluar el daño por Creep es utilizando el Estadio de degradación Micro estructura se observa en la siguiente curva

Ver Figura 1.11

Donde ubicándose dentro del Estado I de degradación, el daño por Creep es mínimo, a medida que se avanza en el daño se llega al Estado II donde los hoyuelos por Creep comienzan a generar degradación y disminución de las propiedades mecánicas del componente.

Llegando al Estado III donde las microfisuras crecen para generar microfisuras y se corre riesgo de rotura del componente.

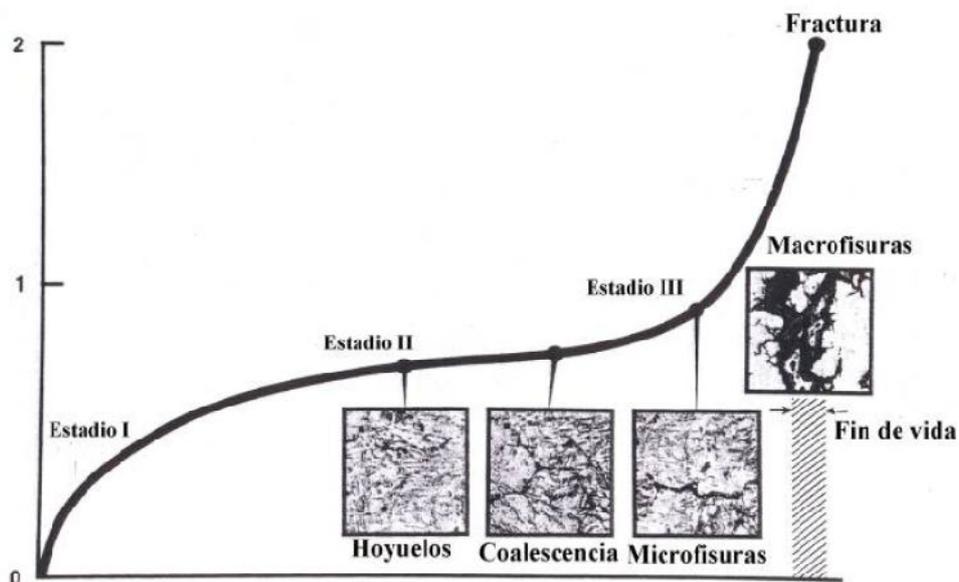


Figura 1.11 CURVA DE PROGRESIÓN DEL DAÑO POR CREEP.

Evaluación de la Vida Remanente a Partir del Grado de Esferoidización de la Perlita

Una de las fallas mas comunes en materiales que trabajan a alta temperatura es la esferoidización de los carburos laminares de la perlita que se produce como consecuencia de la disminución de la energía libre del sistema que acompaña la disminución de superficie de la interfase cementita-ferrita al pasar de la forma laminar a la forma esférica.

Los métodos utilizados para evaluar la vida residual de un componente a partir del grado de esferoidización de la perlita son cualitativos y dan una idea del tiempo de vida remanente, por creep, del componente analizado. Las correlaciones existentes entre fracción de vida de creep y micro estructura surgen de experiencias en servicio y estudios experimentales de laboratorio (ensayos acelerados de creep)

La clasificación más utilizada es la siguiente:

**CLASIFICACIÓN DE LA DEGRADACION
MICROESTRUCTURAL**



Figura 1.12 CLASIFICACIÓN DEL DAÑO POR CREEP A PARTIR DE LA EVOLUCIÓN DE LA MICRO ESTRUCTURA

A continuación se verán ejemplos de los 6 Estados de degradación anteriores al Creep I, los mismos se los identifica desde la letra A hasta la F.

Estado A: En un acero al carbono sobre una matriz ferrítica las colonias de perlita poseen las láminas en forma laminar.

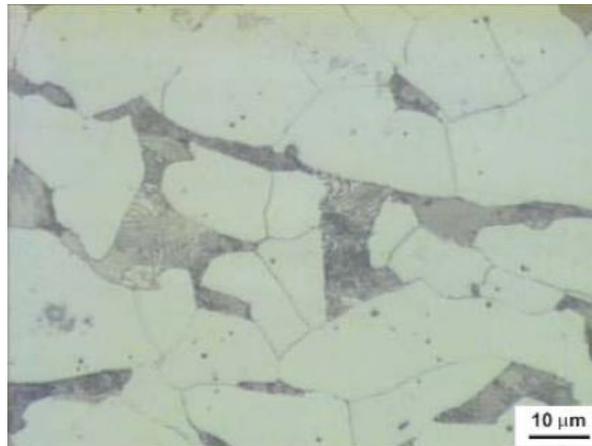


Figura 1.13 ESTADO DE DEGRADACIÓN MICRO ESTRUCTURAL A

Estado B: En un acero al carbono sobre una matriz ferrítica las colonias de perlita poseen las láminas en forma laminar y comienza parcialmente la globulización.

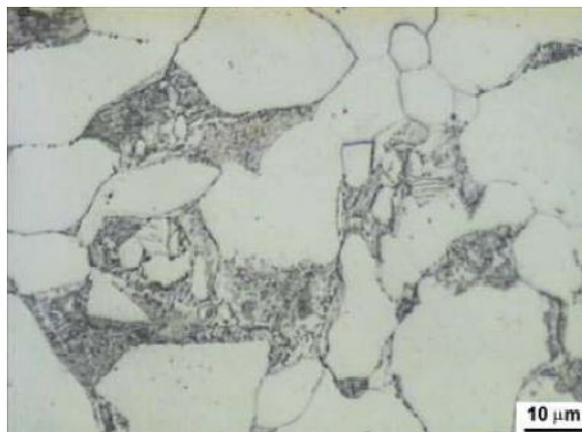


Figura 1.14 ESTADO DE DEGRADACIÓN MICRO ESTRUCTURAL B

Estado C: En un acero al carbono sobre una matriz ferrítica las colonias de perlita poseen las láminas totalmente globulizadas.

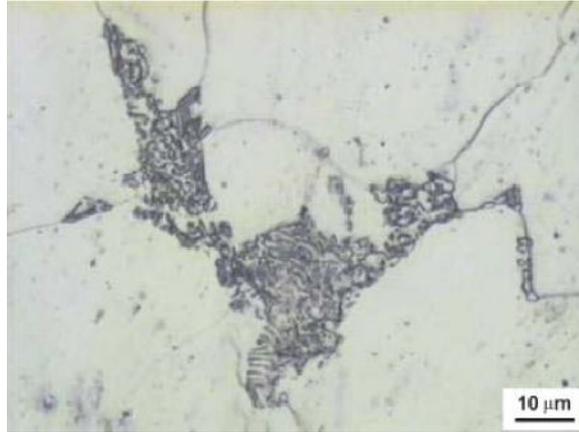


Figura 1.15 ESTADO DE DEGRADACIÓN MICRO ESTRUCTURAL C

La perlita se encuentra casi totalmente globulizada conservando la morfología de colonia.

Estado D: En un acero al carbono sobre una matriz ferrítica las colonias de perlita poseen las láminas totalmente globulizadas. Comienza la precipitación en límite de grano.

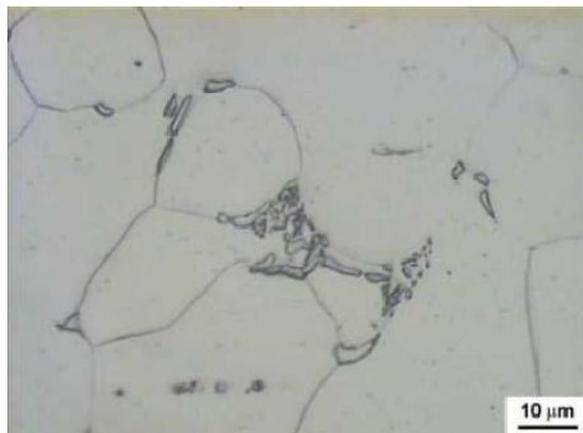


Figura 1.16 ESTADO DE DEGRADACIÓN MICRO ESTRUCTURAL D

Esferoidización completa, pero los carburos siguen agrupados en sus colonias perlíticas originales. Comienza la precipitación en los límites de grano.

Estado E: Carburos homogéneamente dispersos (No existen trazas de la micro estructura ferrítico-perlítica anterior)

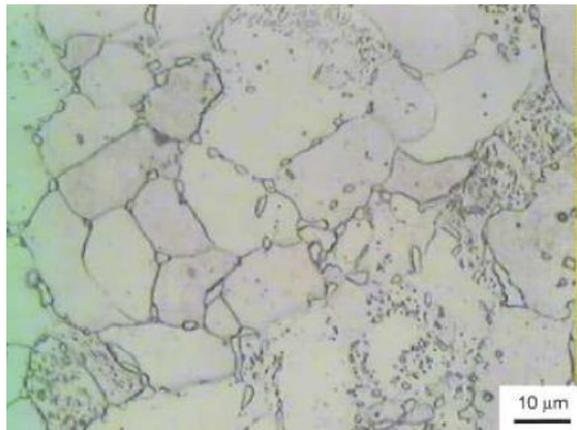


Figura 1.17 ESTADO DE DEGRADACIÓN MICRO ESTRUCTURAL E

Estado F: Carburos igualmente dispersos, pero una gran cantidad de los mismos son gruesos, algunos coalescen en forma continua con otros.

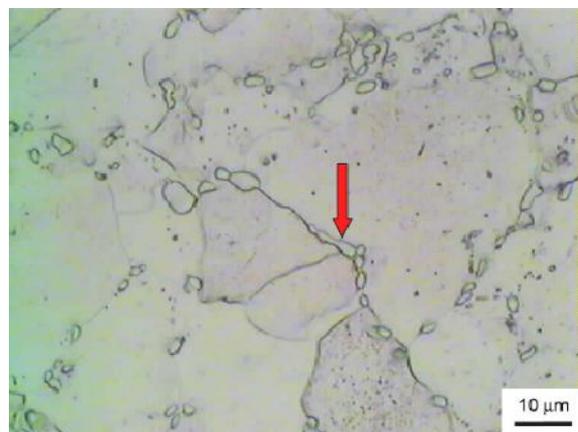


Figura 1.18 ESTADO DE DEGRADACIÓN MICRO ESTRUCTURAL F

Método cuantitativo

Para estimar la vida residual es necesario contar con un parámetro micro estructural que esté ligado al grado del daño y poder correlacionarlo con la fracción de vida remanente del componente. Tal parámetro deberá reunir las siguientes condiciones:

- No deberá estar influenciado por el procedimiento de toma de las réplicas.
- No deberá depender de las dimensiones de las cavidades.
- Deberá ser de simple aplicación.

De todos los parámetros posibles el que más se adapta a estos requerimientos es el denominado "Parámetro A" definido como:

A: Bordes de granos con cavidades / Bordes total de granos

La forma de realizar esta medición se observa en la **Figura 1.19**. Un mínimo de 400 granos deben ser contados para tener un valor confiable y preciso.

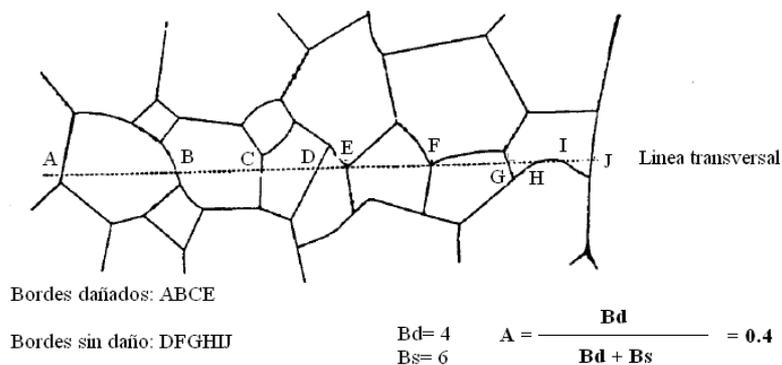


Figura 1.19 ESQUEMA PARA LA DETERMINACIÓN DEL PARÁMETRO MICRO ESTRUCTURAL A LIGADO AL GRADO DEL DAÑO, PARA DETERMINAR LA VIDA REMANENTE DEL COMPONENTE.

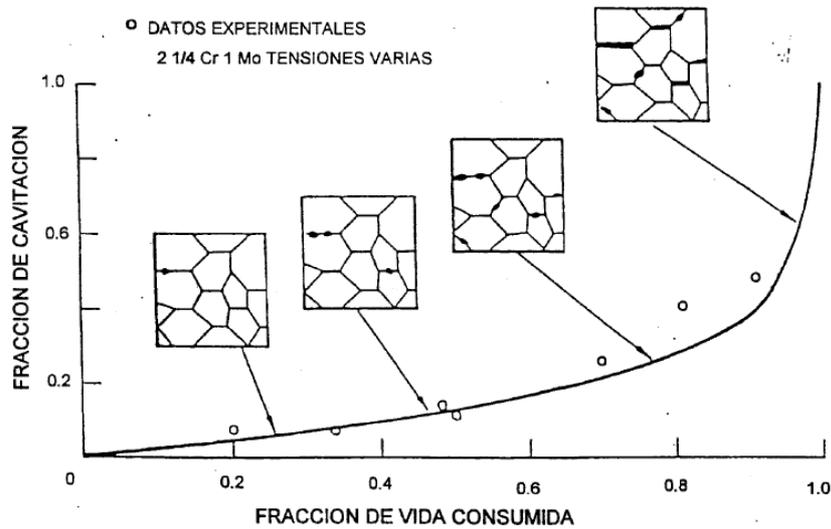


Figura 1.20 CURVA DE CREEP, ESPECÍFICA DEL MATERIAL ANALIZADO, PARA DETERMINAR LA VIDA REMANENTE DEL COMPONENTE (MÉTODO CUANTITATIVO)

1.2.5 Alcance de la técnica

Existen en la industria infinidad de componentes que trabajan a presión y temperatura como sería el caso de calderas de potencia. Generalmente son inspeccionados por esta técnica:

- Domos
- Sobrecalentadores del sistema primario y secundario
- Colectores y el hogar de la misma

Hogar de una Caldera

En este sector de la caldera los tubos son especificados por la norma A 192 (acero al carbono) o A 335 (acero al carbono aleados), deben soportar el calor de los quemadores (no la llama directa, de ser así se degradarían rápidamente), en condiciones normales deben ser inspeccionados cada 5 años para realizar el seguimiento de su degradación micro estructural. Pero existen condiciones especiales en las cuales la degradación puede ser acelerada.

Domos de la Caldera

Al momento de inspeccionar Domos se pueden tener dos, identificándolos como superior e inferior, existiendo mayor degradación micro estructural en el Domo superior, ya que las mayores temperaturas de vapor las encontramos allí.

Los defectos posibles a detectar en este tipo de componentes, además de los fenómenos corrosivos son los problemas de origen térmico, constructivos o reparaciones incorrectas.

Sobrecalentadores

Dependiendo la zona de la caldera se tienen sobrecalentadores secundarios que son la entrada del vapor saturado de material de P11 y los sobrecalentadores primarios que es la zona caliente o

salida del vapor sobrecalentado de material P22, ambos especificados en la norma ASTM A 335.

El mecanismo de falla en este sector de las calderas es el Creep, pero también en menor medida se puede encontrar disminución de espesor por corrosión-erosión, oxidación a alta temperatura con formación de una capa de óxido dura, poco conductora que actúa como refractario generando una elevación de temperatura en forma local.

En la siguiente figura se muestra la rotura de un tubo de un sobrecalentador en servicio.



Figura 1.21 TUBO DE SOBRECALENTADOR FISURADO, CON CORROSIÓN-EROSIÓN EN LA PARED EXTERIOR.

Realizando un corte transversal al tubo, se observa la disminución de espesor en la zona de ruptura **Figura 1.22**, a continuación se tiene el análisis metalográfico tomadas de dos zonas diferentes para su comparación **Figura 1.23**.



Figura 1.22 DISMINUCIÓN DE ESPESOR EN ZONA FISURADA

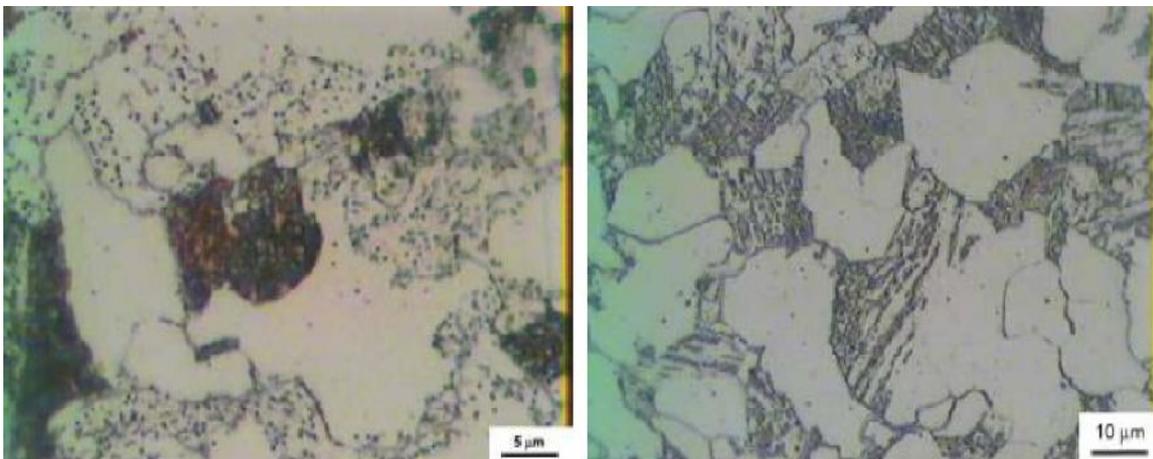


Figura 1.23 A LA IZQUIERDA LA MICROESTRUCTURA TOMADA EN LA ZONA DE FRACTURA, NÓTESE LA GLOBULIZACIÓN DE LA PERLITA. A LA DERECHA LA MICROESTRUCTURA TOMADA A 180°, NO PRESENTA DEGRADACIÓN.

Colectores de vapor

Este tipo de componentes generalmente son de materiales resistentes a las altas temperaturas tipo 2 ¼ Cr - 1 Mo y existen

como fenómenos que pueden alterar su buen funcionamiento el Creep, y la Fatiga térmica.

Posibles daños en aceros inoxidables

Cuando los aceros inoxidables son calentados en el rango de 450-800°C se produce la precipitación de carburos de cromo en los límites de grano.

Esta precipitación puede ocurrir durante las distintas etapas de fabricación de una pieza tales como:

- Soldadura (Zona térmicamente afectada).
- Trabajado en caliente.
- Hipertemplado a causa de un enfriamiento lento.

La precipitación de carburos de cromo produce una serie de efectos no deseables en el material tales como:

- Sensibilización a la corrosión intergranular.
- Mayor probabilidad de corrosión bajo tensión.
- Disminución de las propiedades mecánicas, especialmente resistencia a la fatiga.

Inspección en cordones de soldadura

Además de intentar detectar en las uniones soldadas debido a las tensiones residuales el mecanismo de Termofluencia (Creep) en componentes que trabajan a presión y temperatura, el estudio de

uniones soldadas puede entregar los siguientes datos importantes:

- Presencia de fases frágiles tales como martensita en la zona afectada térmicamente (ZAT), cuya dureza puede favorecer mecanismos de fisuración.
- En los aceros inoxidable la presencia de Ferrita delta(δ) es normal pero si posee más de 3% de esta fase el material no es apto para medios criogénicos y si posee por encima de 15% existen medios en los cuales se ve favorecida la corrosión interdendrítica en los cordones. Siendo lo ideal un porcentaje entre 3-9.
- Otra fase frágil que se puede detectar con esta técnica es la denominada fase Sigma (σ), la cual se forma de la transformación de parte de la ferrita δ , la cual además de fragilizar en la interfase provoca decromización y por consiguiente pierde el acero su resistencia a la corrosión.
- Precipitación de carburos en la ZAT, los cuales favorecen la corrosión intergranular.

Inspección en turbinas de vapor

En este tipo de componentes se tienen los siguientes mecanismos de falla:

- Termofluencia (Creep)
- Fatiga térmica
- Corrosión bajo tensión
- Corrosión – erosión

Siendo las zonas críticas donde se puede encontrar estos mecanismos de falla:

- Carcasa de alta presión de vapor (HP Casing).
- Carcasa de baja presión de vapor (LPCasing).
- Alabes estatóricos.
- Rotor de alta y baja presión.
- Alabes rotóricos.(Blades).
- Línea de vapor (Steam pipe)
- Excitatriz. (acero antimagnético).

Otras aplicaciones

El rango de acción de la técnica de réplicas metalográficas no solo se limita a los diferentes aceros o a inspeccionar equipos que trabajen a presión y temperatura. Se puede utilizarla por ejemplo, en la caracterización micro estructural de todas las aleaciones de aluminio, cobre, cinc, plomo, obteniendo información de fases presentes, tamaño de grano y cualquier otro tipo de defectología en los mismos.

1.3 Microscopia de Campo

Al querer obtener la micro estructura de un material que pertenece a un componente en campo, y por ende, no se puede realizar un ensayo destructivo, se recurre a las Replicas Metalográficas, estudiadas anteriormente, o se puede recurrir a la utilización del *Microscopio Portátil*.

Este Microscopio Portátil debe cumplir características propias para su uso fuera del laboratorio.

A continuación se estudiará sobre el Principio de Funcionamiento de un Microscopio Metalográfico, para luego aplicarlo en el Microscopio Portátil.

1.3.1 Microscopio Metalográfico

Las imágenes de las características micro estructurales pueden ser obtenidas de microscopios metalográfico, que pueden ser de transmisión o reflexión de luz o electrones. La elección del tipo de microscopio depende de ciertos factores, tales como el tipo de material y la calidad de la imagen.

En nuestro caso, se utilizara el *Microscopio de Reflexión de Luz*, ya que se analizarán estructuras metálicas.

Principio del Microscopio de Reflexión de Luz

Los principios de iluminación del Microscopio Metalográfico difieren del comúnmente conocido Microscopio Biológico en la forma de iluminar la muestra. Como una muestra metalográfica es opaca a la luz, la misma debe ser iluminada por luz reflejada, como se ve en la **Figura 1.24** donde un haz de luz del iluminador es reflejado en un espejo y desviado hacia un objetivo el cual se encuentra muy cercano a la superficie de la muestra. Un poco de esta luz incidente reflejada desde la superficie de la muestra se amplificará al pasar a través del sistema inferior de lentes, el objetivo y continuará hacia el reflector de vidrio, amplificando el haz llegando al sistema superior de lentes de los oculares.

Como la luz emitida es reflejada por la superficie, los haces de luz que incidan en los límites de grano, se desvían y se ven como líneas oscuras **Figura 1.25**.

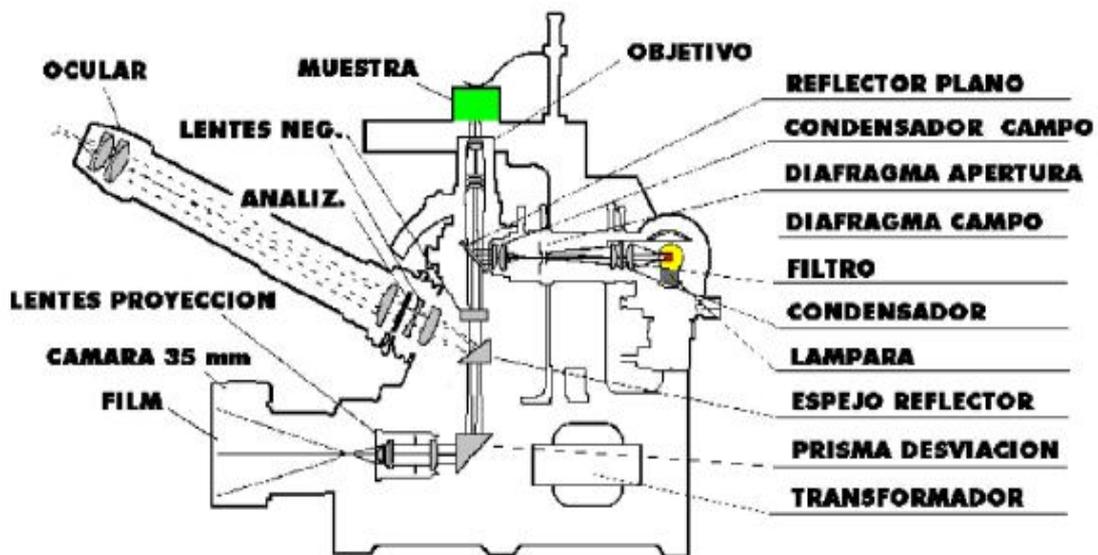


Figura 1.24 CORTE TRANSVERSAL DE UN MICROSCOPIO METALGRÁFICO-CAMINO DE LA LUZ.

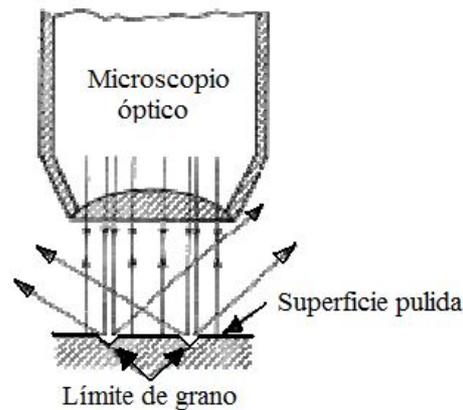


Figura 1.25 ILUSTRACIÓN DEL ASPECTO MICROSCÓPICO DE LOS LÍMITES DE GRANO QUE APARECEN COMO LÍNEAS OSCURAS. REFLEXIÓN DEL HAZ DE LUZ.

El poder de amplificación será el producto del valor de ocular (Ej: 10x) por el valor del objetivo (Ej: 20x) con un valor de magnificación igual a 200 veces. Donde la amplificación máxima obtenida por medio de microscopia óptica no supera los 2000 aumentos.

La amplificación máxima obtenida se ve limitada principalmente por la longitud de onda de la luz visible, la cual limita la resolución de los detalles finos de la muestra metalográfica. La amplificación puede ser aumentada en cierta medida con el uso de radiación de longitud de onda menor, tal como radiación ultravioleta, pero la técnica para preparar y observar la muestra es complicada, y es necesaria una fuente de iluminación poco convencional por lo que no es conveniente para trabajos en campo.

1.3.2 Microscopio Metalográfico Portátil

Cuando la micro estructura de un componente no puede ser obtenida y examinada en un laboratorio, es necesario el uso de un equipo diseñado para poder llevarlo hasta donde sea requerido, en este caso el Microscopio Metalografico Portátil, y puede ser utilizado como complemento de las Réplicas Metalográficas.

El principio de funcionamiento de estos microscopios portátiles es el mismo de los Microscopios de Banco (Luz reflejada), pero por su uso fuera del laboratorio, debe cumplir las siguientes características:

- **Liviano** (fácil transporte)

- **Independiente** (Fuente de energía propia para la luz a reflejar)
- **Fuerte** (Debe ser fabricado con materiales resistentes)
- **Fácil uso** (por las incomodidades en el lugar de inspección)
- **Materiales resistentes a polvos y partículas** (por el medio donde va a ser utilizado)

Obviamente el cuidado del microscopio portátil a la hora de su uso es muy importante, como no golpearlo excesivamente o cuidarlo de las partículas de polvo presentes en el lugar de trabajo. Si bien es cierto que el microscopio es diseñado para trabajo en campo, no hay que olvidar que es de óptica fina y que posee materiales frágiles en su interior, lo que lo hace costoso.

En este caso, solo se hablará del Microscopio Portátil por Luz Reflejada, ya que para campo no hay un Microscopio de Electrones (Scanning Electron Microscope, SEM), por su complejidad de fabricación y alto costo. Estos tipos de microscopios no serán tratados en la presente tesis.

Digitalizado de la Micro estructura

Cuando se hace uso del Microscopio Portátil, en muchos casos es necesario tener un **respaldo** digitalizado de la micro estructura, por lo que es necesario un equipo que haga posible realizarlo.

Existen en el mercado una amplia gama de dispositivos (cámaras) que permiten la digitalización de la micro estructura, los cuales vienen con una interface para conectarlos a una PC mediante un cable USB, y el programa para la realización de la misma, los cuales son de fácil uso.

La cámara se coloca en el lugar donde va el Ocular en el microscopio, y la imagen se observa directamente en el monitor del computador. Por lo general, la cámara viene con un Ocular de 10X, por lo que hay que variar los Objetivos del microscopio para tener las magnificaciones deseadas.

1.4 Metodología para la Obtención de Metalografía de Componentes Estructurales

Los pasos a seguir, para obtener la metalografía de un componente estructural en campo, difiere enormemente de la manera de cómo se lo haría en el laboratorio. Se toma como referencia la norma ASTM E-1351- 2002 donde se recomiendan los pasos a seguir para la obtención de una superficie del metal a estudiar libre de deformaciones (rayado, deformación plástica, etc), o cualquier tipo de alteración de la superficie a estudiar que pueda perjudicar el examen de la micro estructura a observar, e interpretar erróneamente alteraciones o cambios micro estructurales no existentes. Se debe destacar que es exigencia fundamental que el operador que extrae la réplica debe ser un Metalógrafo y poseer basta experiencia en el campo.

A continuación se detallarán las diferentes etapas del proceso de obtención de una Metalografía.

1.4.1 Inspección visual

La selección de las zonas críticas y representativas de posibles daños de tipo termomecánicos, químicos, etc es muy importante para la detección de degradación micro estructural. El conocer las zonas críticas del componente a estudiar es muy importante, en caso de no conocerlo se debe estudiar por medio de un plano las posibles zonas críticas las cuales serán verificadas “in situ” con la inspección visual buscando daños tales como: Oxidación excesiva, deformación plástica, zonas erosionadas, uniones soldadas fisuradas.

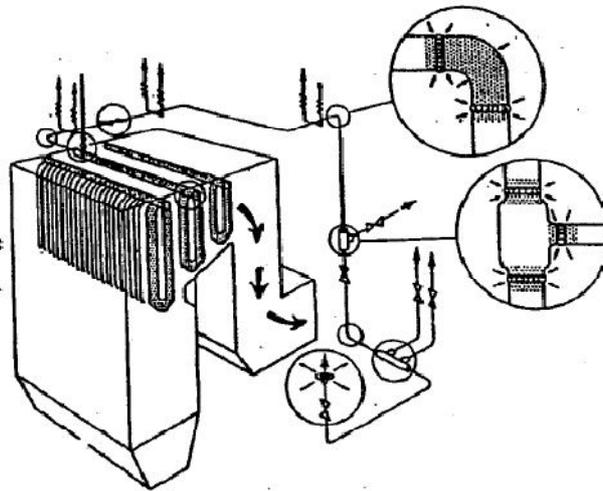


Figura 1.26 ESQUEMA DE LAS ZONAS CRÍTICAS DE OBTENCIÓN DE METALOGRAFÍAS DE UN COMPONENTE EN CAMPO

1.4.2 Desbaste

Una vez seleccionadas las zonas críticas se comienza con la preparación de la superficie a estudiar, a continuación se detallarán los pasos a seguir:

Desbastado de la superficie

Cuando la atmósfera de trabajo del componente genera oxidación, decarburación, o cualquier proceso químico que deje depósitos de sales es necesario utilizar una *amoladora portátil* **Figura 1.27** para eliminar estas capas de metal degradado que no permiten observar la micro estructura real del componente.



Figura 1.27 DESBASTE GRUESO CON EL USO DE UNA AMOLADORA PORTÁTIL

Una vez concluida esta etapa donde además se debió tener cuidado de no “quemar” la superficie desbastada, ya que podría generar una micro estructura errónea.

En esta etapa de desbaste realizado con la amoladora, la profundidad de metal y depósitos de la superficie eliminados

oscila entre 0,1-1,0 mm aproximadamente, dependiendo del espesor de estos depósitos, dureza, etc.

Pulido grueso

Una vez concluida la etapa de desbaste grosero (amolado), se elimina la deformación plástica generada en esta etapa con papeles abrasivos de carburo de silicio de malla desde #120, 220, 320, 400 y 600.

A continuación se tiene la representación de la superficie al comienzo del pulido grueso.

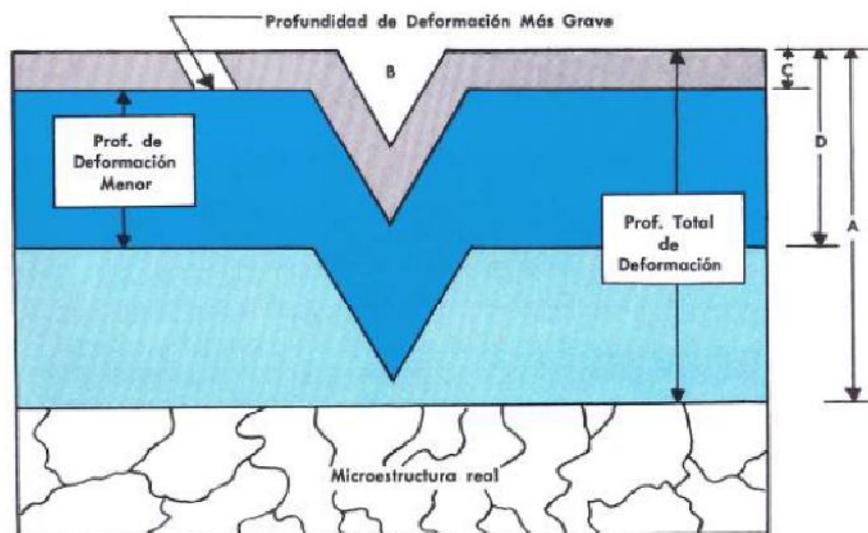


Figura 1.28 REPRESENTACIÓN DE LA SUPERFICIE AL COMIENZO DEL PULIDO GRUESO

Nótese la profundidad total de deformación (A), a eliminar para poner al descubierto la micro estructura real. Donde (B) indica la raíz en "V" de una raya producida en el esmerilado, por un grano

abrasivo. “C” representa la capa de deformación más grave, y “D” señala el límite de un estrato de deformación menor. La deformación causada por una raya se proyectará en forma de rayos, desde el contorno en “V” de la raya. En el pulimento grueso debe extraerse toda esta deformación.

La etapa de pulido grueso debe durar el tiempo suficiente para extraer toda la deformación abrasiva. En la práctica con 1 minuto de pulido bastaría para asegurarse la eliminación de la deformación del papel anterior, pero eso dependerá de la habilidad del operador.

1.4.3 Técnicas de pulido

Esta etapa de pulido se realizará en función de lo que se quiere observar en la superficie metálica preparada.

Existen dos alternativas posibles para el pulido “in situ”:

- Pulido fino mecánico
- Pulido electrolítico

Pulido fino mecánico

Se utilizará este tipo de pulido cuando se necesite observar inclusiones u óxidos, densidad de poros, medir densidad de hoyuelos generados por Creep, medir ancho y largo de fisuras, o

el material no admita pulido electroquímico tal es el caso de las fundiciones de acero (Ej: Gris, blanca, nodular, etc) generalmente en rodillos de laminación, los aceros antimagnéticos al manganeso utilizados en la excitatriz de turbinas generadoras de energía eléctrica, en algunas aleaciones de Aluminio como el Aluminio 6061 donde se tienen fases frágiles con manganeso y silicio, también Aluminio con cobre el mismo se deposita en el cátodo generando manchado de la muestra a pulir y en cerámicos donde se puede observar densidad de poros y fases. También en componentes donde se encuentra prohibido el contacto con cualquier tipo de ácido nocivo al sistema.



Figura 1.29 PULIDO MECÁNICO “IN SITU” CON ABRASIVOS Y FELPAS CON PASTA DIAMANTADA.

Los elementos utilizados para el pulido “in situ” generalmente son los indicados en la siguiente figura.



Figura 1.30 ELEMENTOS UTILIZADOS PARA PREPARAR SUPERFICIES METÁLICAS CON PULIDO MECÁNICO

Las etapas de pulido mecánico son las siguientes:

Una vez concluida la etapa de desbaste y pulido grueso se utiliza una goma abrasiva de granulometría similar a un papel #800, finalizada esta etapa se comienza con el pulido fino con felpas embebidas en pasta diamantada de 6 y 1 μm respectivamente, lubricadas con una solución 50% alcohol etílico/ etilenglicol. El tiempo en promedio para cada etapa es de aproximadamente 5 minutos, entre cada pasta se debe eliminar los restos del pulido anterior para no contaminar el paño siguiente, a su vez concluido el pulido con pasta de 6 μm se verifica haber eliminado todo tipo de raya e imperfección de las etapas anteriores.

En el siguiente gráfico se ve claramente cual es la idea final de este pulido:

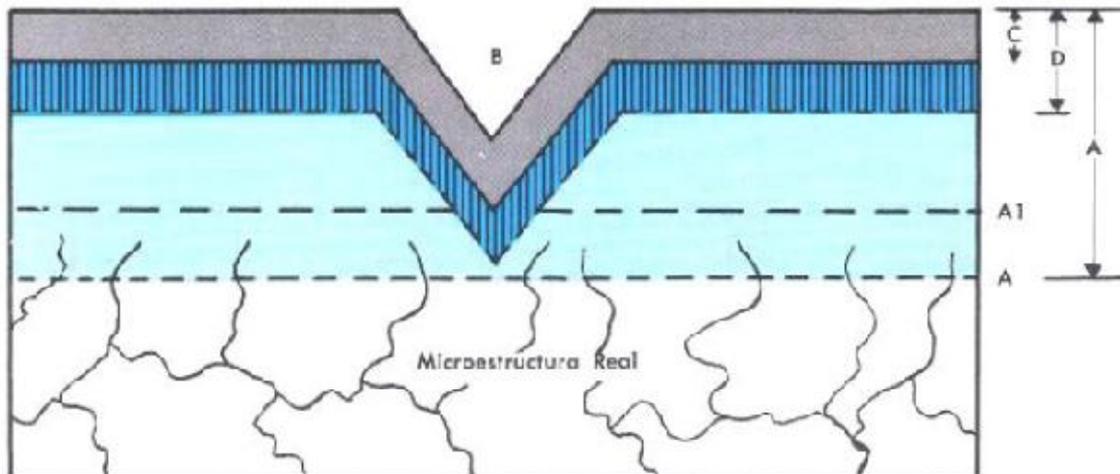


Figura 1.31 ETAPAS QUE DEBEN ELIMINARSE EN EL PULIDO FINO

Es de vital importancia realizar muy bien esta etapa para no generar distorsiones de la micro estructura, rayado o deformación siendo la línea A1 la que representa estas condiciones. Iguales o mayores imperfecciones pueden aparecer si los pasos anteriores no han sido correctos. Donde la línea imaginaria A representa la zona donde se tiene la micro estructura real del material en estudio.

Pulido electrolítico

El electropulido (o pulido electroquímico, o pulido electrolítico) funciona básicamente debido a que, al disolverse el metal bajo la circulación de corriente, se forma una capa viscosa de productos de la disolución, la cual se va difundiendo lentamente en el baño electrolítico.

El espesor de esta capa no es constante, siendo mayor en los valles; y como su resistencia eléctrica es superior a la de la solución de electropulido, conduce a una disolución preferencial de los picos, y a una nivelación de la superficie.

En la **Figura 1.32(a)** se puede apreciar el esquema de un corte transversal (a escala microscópica) de la superficie al comienzo del procedimiento, y en la **Figura 1.32(b)** cómo después de un tiempo de tratamiento la superficie se ha disuelto y comienza a "nivelarse".

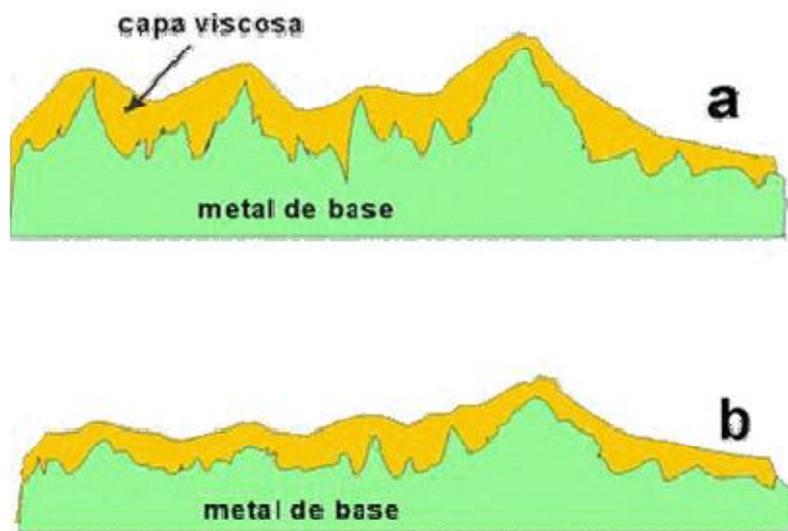


Figura 1.32 ESQUEMA DE NIVELACIÓN DE LA SUPERFICIE EN EL PULIDO ELECTROLÍTICO

En este proceso no se forma una capa superficial como en el caso del pulido mecánico, ya que lo que se disuelve es el metal base. El espesor de material disuelto varía entre 10 y 25 micrones, de

acuerdo con la intensidad de corriente utilizada y el tiempo de exposición.

Esta etapa de pulido final, realizada por medio electrolítico, tiene por objeto, mediante la disolución anódica del material en el baño, la eliminación completa de las rayas y la zona distorsionada por la preparación previa. En la siguiente curva se verán las zonas generadas de las variaciones del voltaje en función de la densidad de corriente.

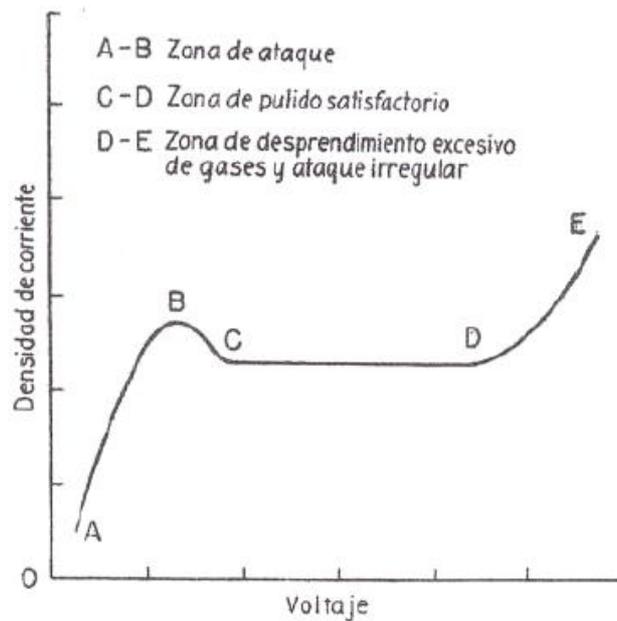


Figura 1.33 CURVA DENSIDAD DE CORRIENTE / VOLTAJE

En la región AB de la curva la densidad de corriente aumenta proporcionalmente al voltaje. Esta proporcionalidad corresponde a la formación de una película inestable en la superficie de la probeta, cuya película se deshace por difusión en el electrolito restante a mayor velocidad que la de su formación. En esta región

el metal se disuelve sin preferencias por los salientes o los entrantes. La probeta queda color mate y atacada, debido principalmente a la reacción química entre la probeta y el electrolito.

Al aumentar más el voltaje, se alcanza una densidad de corriente (punto C), a la cual se establece un estado de equilibrio, en el que la velocidad de formación de la capa es igual a su velocidad de difusión en el resto del electrolito. En la región CD, es en la que se consigue el pulido satisfactorio con la mayoría de los electrolitos.

Cuando el voltaje sobrepasa el valor límite correspondiente a la región de pulido satisfactorio, se produce abundante desprendimiento gaseoso en la superficie de la probeta (usualmente se desprende oxígeno), que rompe la continuidad de la capa límite tan pronto como se forma. Por esta razón, en la región DE de la curva vuelve la densidad de corriente a incrementar proporcionalmente el voltaje. El desprendimiento de gases y la acumulación de burbujas gaseosas en la superficie de la probeta causan un pulido irregular y una ondulación muy marcada de la superficie.

El pulido electroquímico para obtener réplicas "in situ" se realiza con la técnica denominada TAMPÓN. Este método consiste en

reemplazar la celda electrolítica por un menisco de reactivo ubicado entre la pieza a pulir (ánodo) y un cátodo (tampón). El tampón esta formado por una varilla metálica que termina en una cabeza cilíndrica semiesférica cubierta por un material absorbente no conductor (felpa de billar).

Se utiliza como procedimiento la norma ASTM E1558 (Standard Guide for Electrolytic Polishing of Metallographic Specimens)

Se muestra la imagen de una fuente de corriente continua utilizada para el pulido electroquímico tipo tampón.



Figura 1.34 FUENTE DE CORRIENTE CONTINUA PARA PULIDO ELECTROQUÍMICO.

La parte eléctrica es muy económica y consiste en un transformador que alimenta un rectificador **Figura 1.34** de

corriente de hasta 2 Ampere. El tampón es conectado al cátodo (-) de la fuente de tensión continua y la muestra a pulir al ánodo (+), la tensión a usar se fija en vacío (circuito abierto) y se mide por medio de un voltímetro. No es necesario la presencia de un amperímetro, toda vez que la densidad de corriente queda automáticamente fijada. Sin embargo su existencia en el sistema es conveniente para detectar calentamientos anormales que se reduce en un rápido aumento de la densidad de corriente generando en la superficie que se está puliendo, picado y arrancamientos no deseados.

Una vez fija la tensión de trabajo, se moja el tampón en el electrolito correspondiente al metal o aleación a pulir y se comienza la operación.

A continuación se tiene una tabla con algunos electrolitos utilizados para pulir aleaciones y metales puros.

TABLA 1.3

ELECTROLITOS Y VOLTAJE PARA PULIDO CON TAMPÓN

Electrolitos	Materiales	Tension (Volt)
10 ml de ácido perclórico 90 ml Butil cellosolve	-Aceros al C e inoxidables -Aluminio y aleaciones base aluminio.	30 - 35 25 - 30
10 ml ácido perclórico 45 ml ácido acético glacial 45 ml Butil cellosolve	-Aceros al C e inoxidables -Aleaciones base Cromo -Níquel y sus aleaciones	30 - 35 32 - 35 30 - 40
54 ml de ácido fosfórico 85% 22 ml alcohol etílico 3 ml agua destilada 21 ml Butil cellosolve	-Cobre y sus aleaciones	4 - 6

1.4.4 Revelado de la micro estructura

Utilizando como referencia la norma ASTM E-407 (Standard Practice for Microetching Metals and Alloys) en la cual se detallan los pasos a seguir para el microataque de metales y aleaciones, se utilizan según las fases que se quiera observar, diferentes reactivos de ataque.

Se tienen dos clases de ataque "in situ" para obtener metalografías:

- Inmersión (arrojando reactivo sobre la superficie pulida), o
- en forma electroquímica.

Básicamente el mecanismo de ataque químico selectivo de la micro estructura funciona de la siguiente forma:

En la mayoría de la aleaciones metálicas existen fases más y menos resistentes a la corrosión, el revelado de la micro estructura utiliza este fenómeno (Distintas velocidades de disolución selectiva) para provocar picos y valles es decir la fase menos resistente al ataque corrosivo será más atacada con lo cual generara una depresión a nivel atómico de la superficie. En el caso de metales puros o monofásicos los límites de granos son las zonas menos resistentes pues se alojan todas las impurezas por lo cual serán atacadas mucho más que la matriz.

Mecanismo de ataque químico

El mecanismo de ataque de las aleaciones polifásicas es, esencialmente, de naturaleza electroquímica, consecuencia de las diferencias de potencial que se produce en los diferentes constituyentes, cuando se pone la probeta en contacto con el reactivo.

Las fases de potencial más elevado se comportan anódicamente, y tienden a disolverse más fácilmente en un ataque normal. Las fases electronegativas, catódicas, con un potencial más bajo, no se alteran apreciablemente durante un ataque normal o que dure un tiempo más corto que el que se necesitaría para producir un cambio en el orden relativo del potencial de las fases. La diferencia de potencial entre los constituyentes anódicos y catódicos es, en general, lo suficientemente grande para que la fase más electropositiva se disuelva con relativa rapidez en los reactivos ordinarios y es preciso un control cuidadoso para evitar un sobreataque. Por causa de esta diferencia de potencial, las aleaciones polifásicas se atacan más rápidamente que las aleaciones monofásicas o los metales puros.

Como consecuencia de la disolución preferente de la fase anódica durante el ataque, tales constituyentes, en las aleaciones polifásicas quedan más rugosos y más profundos, con relación al plano de la superficie pulida, por lo menos en las interfases ánodo-cátodo, y aparecen, microscópicamente, como más oscuras. Por el contrario, los constituyentes catódicos, no alterados por el ataque, quedan en relieve y aparecen en el microscopio de una manera mas brillante.

Mecanismo de ataque electrolítico

El ataque por métodos electrolíticos es de particular utilidad para poner de manifiesto la estructura en materiales tales como las aleaciones fuertemente deformadas en frío, aleaciones resistentes a la corrosión y al calor y aleaciones que presentan pasividad superficial durante los ataques usuales. El ataque electrolítico consiste en hacer pasar una corriente continua, que varía desde una fracción de Ampere a varios Amperes de intensidad, a través de una celda electrolítica que contiene un electrólito apropiado y en la que la probeta es el ánodo, siendo el cátodo el tampón.

La elección del electrólito depende del metal o aleación que ha de atacarse y de los constituyentes de estructura que el ataque haya de poner de manifiesto.

Con este concepto claro, el copiado de la micro estructura por medio de una Réplica Metalográfica será básicamente la copia de la topografía de la superficie irregular realizada con el ataque químico.