

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

“Estudio De Factibilidad En Técnicas No Destructivas Para Realizar  
Metalografía En Campo De Componentes Estructurales:  
Réplicas Metalográficas Y Microscopio Portátil”

**TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Presentada por:

William Vidal Salazar Rodríguez

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2010

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por cada día,  
a mis padres, mi familia,  
amistades y al Ing. Julián Peña,  
por su apoyo incondicional en la  
realización de esta Tesis.

## DEDICATORIA

A mi madre, por ella soy lo que soy, a mi padre, siempre preocupado por mi bienestar.

Para los dos, este gran momento de mi vida y un pequeño paso para mis propósitos..... Los amo

## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

---

Ing. Francisco Andrade S.  
DECANO DE LA FIMCP

---

Ing. Julián Peña E.  
DIRECTOR DE TESIS

---

Ing. Omar Serrano V.  
VOCAL

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

---

William Vidal Salazar Rodríguez

## RESUMEN

El presente trabajo trata sobre el Estudio de Factibilidad acerca de dos técnicas para obtener la metalografía de un componente en campo, análisis que difiere en gran manera del que se realiza en un laboratorio.

Se aprovechó el análisis de un componente estructural, un Horno Catalítico, para llevar a cabo el estudio de dos técnicas para obtener una metalografía en campo, tales como son: Las Réplicas Metalográficas y el uso del Microscopio Portátil.

En el primer capítulo, se mencionan las consideraciones generales, junto con los aspectos teóricos en lo que a Metalografía No destructiva se refiere. Se explica sobre las Réplicas Metalográficas y la Microscopía en campo.

En el segundo capítulo, se detalla el Plan de Trabajo que se utiliza para la inspección de un componente mediante las técnicas no destructivas en cuestión.

Se trata sobre la experiencia que se adquirió al inspeccionar un componente estructural en campo, las dificultades que se presentaron dependiendo de su configuración, y las áreas a analizar, momento en el cual se crea el dilema sobre que técnica no destructiva es más conveniente utilizar.

En el tercer capítulo, se analiza la factibilidad de cada método, luego de ponerlos a prueba en el análisis de un componente estructural. Se detallan las ventajas y desventajas de cada uno.

En el cuarto capítulo se dan las conclusiones y recomendaciones con respecto a la utilización de cada método.

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	I
ÍNDICE GENERAL.....	III
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	
1. LA METALOGRAFÍA DE CAMPO COMO METODOLOGÍA EN PROGRAMAS DE INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA.....	3
1.1 La Metalografía de Campo.....	4
1.2 Replicas Metalográficas.....	8
1.2.1 Tipos de réplicas.....	8
1.2.2 Tipos de materiales utilizados para réplicas.....	9
1.2.3 Técnicas de preparación de replicas.....	14
1.2.4 Análisis Micro estructural.....	24
1.2.5 Alcance de la técnica.....	40



1.3 Microscopía de Campo.....	47
1.3.1 Microscopio metalográfico.....	48
1.3.2 Microscopio metalográfico portátil.....	51
1.4 Metodología para la Obtención de Metalografía de Componentes Estructurales.....	54
1.4.1 Inspección visual.....	55
1.4.2 Desbaste.....	56
1.4.3 Técnicas de pulido.....	59
1.4.4 Revelado de la micro estructura.....	70

## CAPÍTULO 2

### 2. PLAN DE TRABAJO PARA INSPECCIÓN DE DOS COMPONENTES

MEDIANTE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS.....	75
2.1 Plan de Inspección.- Metodología.....	75
2.2 Inspección visual en un Horno Catalítico.....	78
2.3 Preparación de las superficies.....	79
2.3.1 Desbastado.....	80
2.3.2 Pulido mecánico.....	81
2.3.3 Pulido electroquímico.....	85
2.3.4 Revelado micro estructural.....	95

2.4 Obtención de las micro estructuras.....	97
2.4.1 Microscopio portátil.....	97
2.4.2 Réplicas Metalográficas.....	106
CAPÍTULO 3	
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	111
3.1. Réplicas Metalográficas.....	111
3.2. Microscopio Portátil.....	119
CAPÍTULO 4	
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	130
APÉNDICES	
BIBLIOGRAFÍA	

## ABREVIATURAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
CD	Compact Disc
CNEA	Centro Nacional de Energía Atómica
cm <sup>2</sup>	Centímetro cuadrado
Cr	Cromo
HP	High Power
LP	Low Power
min	Minuto
mm	Milímetro
Mo	Molibdeno
mts	Metros
PC	Personal Computer
SEM	Scanning Electron Microscope
USB	Universal Serial Bus
ZAT	Zona Afectada Térmicamente

## SIMBOLOGÍA

'	Angstrom ( $10^{-10}$ metros)
°C	Grado Centígrado
δ	Ferrita Delta
σ	Fase sigma
μm	Micrómetro ( $10^{-6}$ metros)

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Instalaciones en montaje – control inicial.....	5
Figura 1.2 Proceso de laminación en caliente.....	6
Figura 1.3 Réplicas de goma, se mezclan dos componentes y se obtiene una pasta.....	10
Figura 1.4 Réplicas de ranuras realizadas en el interior de un tubo.....	11
Figura 1.5 Equipo para réplicas fabricado por Struers, incluye el solvente y el kit con 50 replicas.....	12
Figura 1.6 Hojas de acetato de 50 $\mu\text{m}$ .....	13
Figura 1.7 Esquema de un proceso típico de replicación de dos etapas.....	21
Figura 1.8 Esquema de replicación carburo-fisura.....	22
Figura 1.9 Esquema de los Distintos Tipos de Fisuras que pueden ser puestos en evidencia por una replica micro estructural en un material de base hierro .....	26
Figura 1.10 Distribución de la vida por Creep basada en la Clasificación de Cavidades.....	29
Figura 1.11 Curva de progresión del daño por Creep.....	31
Figura 1.12 Clasificación del daño por creep a partir de la evolución de la micro estructura.....	33
Figura 1.13 Estado de degradación micro estructural A.....	34
Figura 1.14 Estado de degradación micro estructural B.....	35
Figura 1.15 Estado de degradación micro estructural C.....	35
Figura 1.16 Estado de degradación micro estructural D.....	36
Figura 1.17 Estado de degradación micro estructural E.....	37
Figura 1.18 Estado de degradación micro estructural F.....	37

Figura 1.19	Esquema para la determinación del parámetro Micro estructural A ligado al grado del daño, para determinar la vida remanente del componente.....	39
Figura 1.20	Curva de creep, específica del material analizado, para determinar la vida remanente del componente (Método cuantitativo).....	39
Figura 1.21	Tubo de sobrecalentador fisurado, con corrosión erosión en la pared exterior.....	42
Figura 1.22	Disminución de espesor en zona fisurada.....	43
Figura 1.23	A la izquierda la microestructura tomada en la zona de fractura, nótese la globulización de la perlita. A la derecha la micro estructura tomada a 180°, no presenta degradación .....	43
Figura 1.24	Corte transversal de un microscopio metalográfico. Camino de la luz.....	50
Figura 1.25	Ilustración del aspecto microscópico de los límites de grano que aparecen como líneas oscuras. Reflexión del haz de luz.....	50
Figura 1.26	Esquema de las Zonas Críticas de obtención de Metalografías de un Componente en Campo.....	55
Figura 1.27	Desbaste grueso con el uso de una amoladora Portátil.....	56
Figura 1.28	Representación de la superficie al comienzo del pulido grueso.....	58
Figura 1.29	Pulido mecánico “in situ” con abrasivos y felpas con pasta diamantada.....	60
Figura 1.30	Elementos utilizados para preparar superficies metálicas con pulido mecánico.....	61
Figura 1.31	Etapas que deben eliminarse en el pulido fino.....	62
Figura 1.32	Esquema de nivelación de la superficie en el pulido Electrolítico.....	64
Figura 1.33	Curva densidad de corriente / voltaje.....	65
Figura 1.34	Fuente de corriente continua para pulido electroquímico....	68
Figura 2.1	Horno Catalítico a evaluar, primero a la izquierda.....	77
Figura 2.2	Inspección visual interior Horno Catalítico.....	79

Figura 2.3	Desbaste grueso con la amoladora.....	81
Figura 2.4	Taladro con el adaptador portapapeles (disco de goma).....	83
Figura 2.5	Pulido manual con papeles de granulometría #400 y 600....	85
Figura 2.6	Rectificador de corriente DC – AC.....	89
Figura 2.7	Conexión del ánodo (-) al rectificador.....	90
Figura 2.8	Inicio del pulido electrolítico, se moja en tampón en el electrolito.....	91
Figura 2.9	Movimientos circulares para el pulido, con una presión relativamente baja para no quemar el paño.....	92
Figura 2.10	Arriba, superficie sin el pulido electrolítico final, abajo la superficie ya pulida. Nótese el círculo de aprox. 1.5 cm de diámetro con una calidad tipo espejo. ....	94
Figura 2.11	Microscopio Metalográfico Portátil utilizado en el proyecto.....	98
Figura 2.12	Cámara Digital para microscopio .....	99
Figura 2.13	Vista del programa para la digitalización de las Fotografías.....	100
Figura 2.14	Trabajo en equipo para la digitalización de las imágenes por medio del Microscopio Portátil.....	103
Figura 2.15	Manejo del microscopio hasta obtener un enfoque preciso para la digitalización de la micro estructura .....	104
Figura 2.16	Digitalización de la imagen.....	105
Figura 2.17	Se coloca una capa de disolvente (acetona) a la superficie para luego adherir la Hoja de Acetato por tensión superficial .....	108
Figura 2.18	Se extrae la réplica de la superficie luego de 5 min de espera. Se lo realiza con la mano .....	109
Figura 2.19	Se clasifica la réplica para su transporte y posterior análisis en laboratorio .....	110
Figura 3.1	Análisis punto 1 por medio de Réplicas.....	112
Figura 3.2	Análisis punto 4 por medio de Réplicas.....	113
Figura 3.3	Análisis punto 5 por medio de Réplicas.....	114
Figura 3.4	Análisis punto 17 por medio de Réplicas.....	115
Figura 3.5	Análisis punto 18 por medio de Réplicas.....	116
Figura 3.6	Análisis punto 23 por medio de Réplicas.....	117

Figura 3.7	Análisis punto 34 por medio de Réplicas.....	118
Figura 3.8	Análisis punto 1 por medio de Microscopio Portátil.....	120
Figura 3.9	Análisis punto 4 por medio de Microscopio Portátil.....	121
Figura 9.10	Análisis punto 5 por medio de Microscopio Portátil.....	122
Figura 3.11	Análisis punto 17 por medio de Microscopio Portátil.....	123
Figura 3.12	Análisis punto 18 por medio de Microscopio Portátil.....	124
Figura 3.13	Análisis punto 23 por medio de Microscopio Portátil.....	125
Figura 3.14	Análisis punto 34 por medio de Microscopio Portátil.....	126



## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1 Ventajas y desventajas de los diferentes materiales Para Réplicas Metalográficas.....	23
Tabla 1.2 Criterios aplicables a la degradación por cavidades.....	30
Tabla 1.3 Electrolitos y voltaje para pulido con tampón.....	70
Tabla 2.1 Electrolitos y Voltaje para Pulido Electrolítico del Acero Inoxidable A - 312.....	87
Tabla 2.2 Electrolitos y Voltaje para Revelado Micro estructural del Acero Inoxidable A - 312.....	96
Tabla 2.3 Características Microscopio Metalográfico utilizado en el proyecto.....	99

# INTRODUCCIÓN

El mantenimiento y análisis de la vida remanente de todo componente estructural es de vital importancia para toda industria. Con ello se minimizan pérdidas económicas y en mayor importancia, pérdidas humanas.

En industrias donde trabajen componentes a altas temperaturas y presiones es importante su continua revisión mediante chequeos periódicos. Estos chequeos que son parte del mantenimiento preventivo, incluyen ensayos no destructivos, de cualquier tipo dependiendo de las exigencias de la estructura, pero muchas veces no es suficiente con realizar medición de espesores o tintas penetrantes por ejemplo, entonces es cuando hay que analizar la Micro estructura del material para ver como se está comportando a nivel micro estructural.

Es cuando se hace uso de la Metalografía, para realizar este tipo de análisis. Pero en ese momento surge el dilema sobre que técnica extractiva es mas conveniente utilizar. Nos referimos a Las Replicas Metalográficas y al uso del Microscopio Metalografico Portátil.

El Análisis Micro estructural que se realice en un laboratorio va a diferir en gran manera del que se realice en campo, por ello se requiere de técnicas que permitan extraer estas micro estructuras de manera correcta y fácil.

El desarrollo de la presente Tesis, aportará en gran manera como una guía para futuros proyectos similares, gracias a la experiencia que se adquirió al analizar un componente estructural en campo. Se trata de un Horno Catalítico, el cual se aprovechó su parada de operación para su revisión. Se tomaron 41 puntos de análisis en toda la integridad del Horno, muchas veces en lugares de difícil acceso, ventilación e iluminación.

Es en ese momento, gracias a la experiencia, es que se puede decidir sobre uno u otro método para la extracción de las Micro estructuras, cada una con sus ventajas y desventajas. Se explicará el procedimiento de inspección con cada método, y quedará a criterio del lector, cual de ellos es el más factible para usar.

# 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 cm<sup>2</sup>.

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 $\mu$ 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  $\mu$ 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  $\mu$ , mientras que en el segundo se pueden llegar a observar detalles de unos 150  $\mu$ .

#### **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

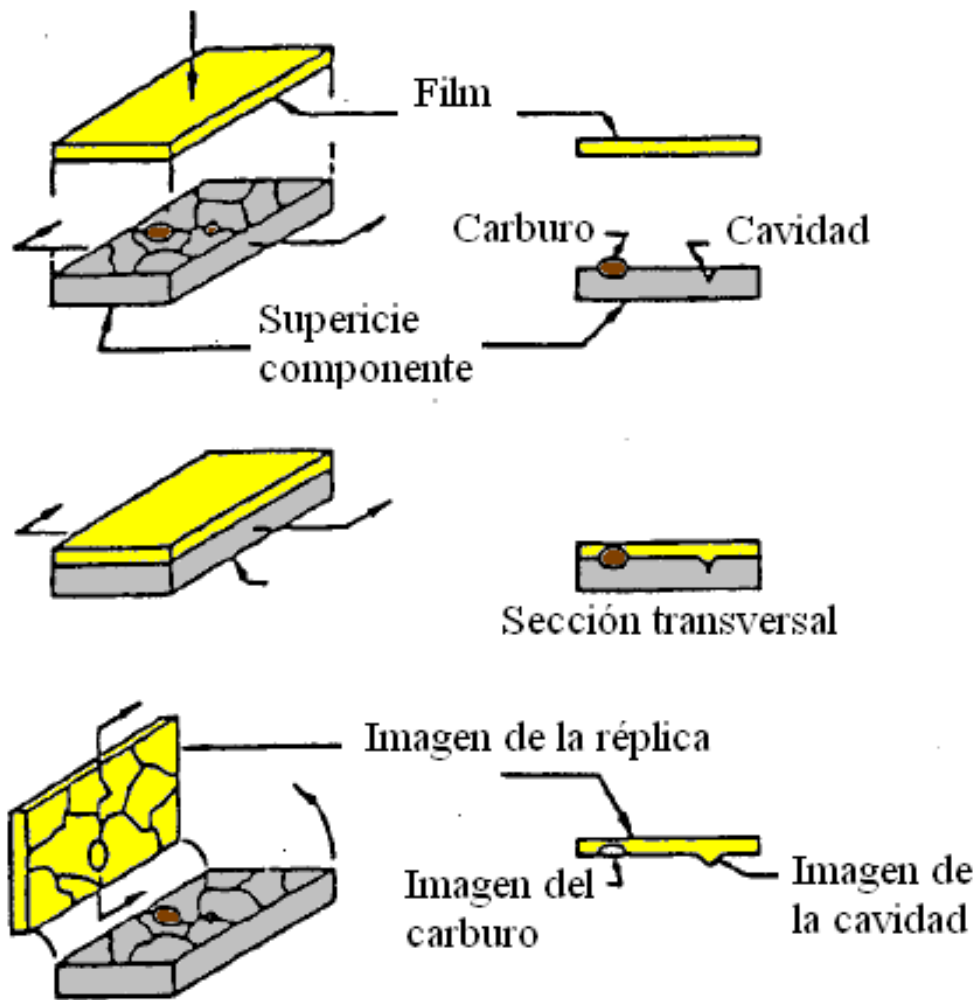


superficie una cinta adhesiva transparente doble faz. La réplica, en estas condiciones, puede ser observada por transparencia mediante un microscopio biológico o por reflexión mediante un microscopio metalográfico, colocando para este último caso un espejo debajo del portaobjetos. Se obtienen mejores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

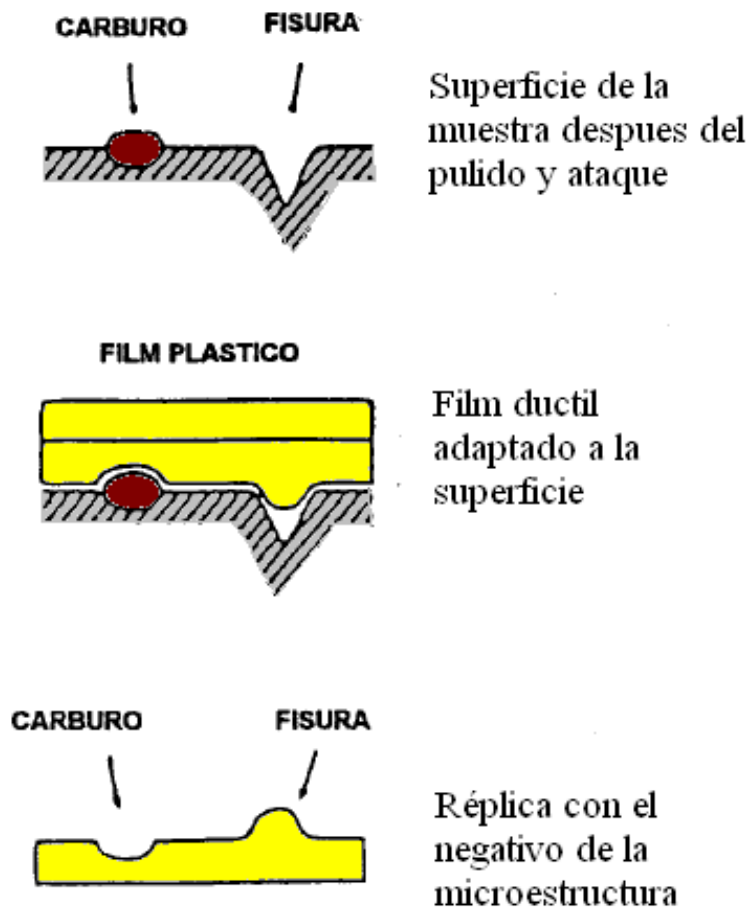
3. En el caso de las hojas de acetato, la técnica operatoria consiste en humedecer la superficie con solvente, para luego, por tensión superficial, adherir la película de acetato. Se espera 5 minutos y se procede a su extracción con una pinza.
4. Se fija la réplica sobre un vidrio portaobjeto en cual 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  $200 \text{ \AA}$ , 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
-----------------	----------	-------------

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

#### 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**

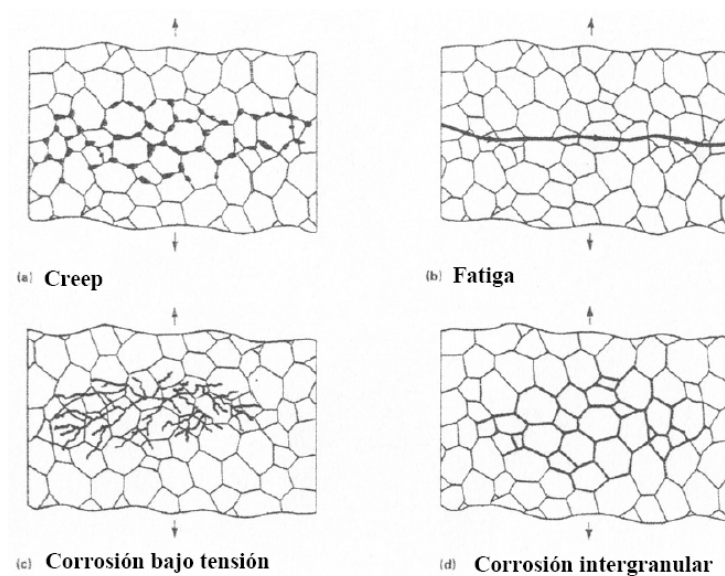
Un examen por partículas magnéticas permite una definición grosera del tipo de Fisuras, mientras que un análisis micro estructural permite una definición precisa de la misma.

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**

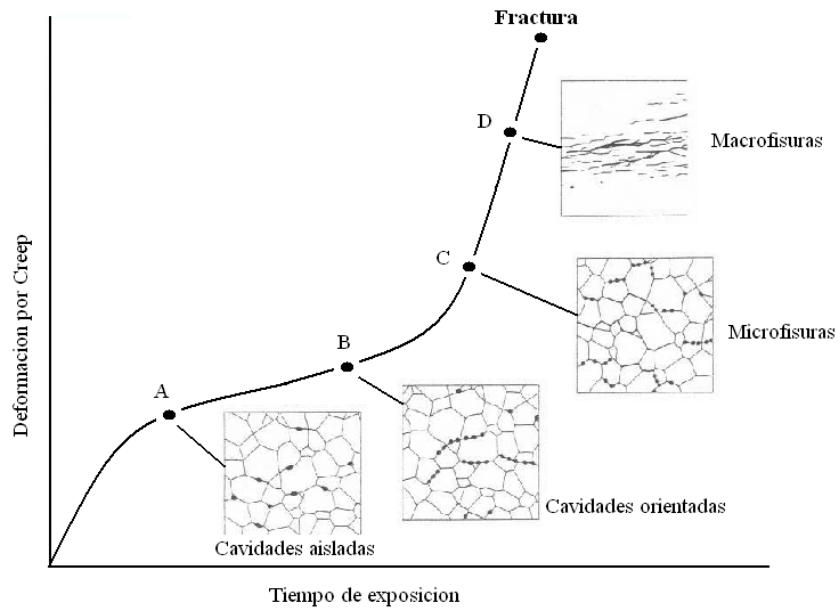
La mayor parte de las fallas por creep en servicio, ocurrieron en los cordones de soldadura a partir de la nucleación y crecimiento de cavidades. Este proceso se desarrolla en los antiguos límites de granos austeníticos y están orientadas normalmente la máxima tensión principal. Estas cavidades coalescen 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)<sup>1</sup>, el que establece cinco (primero fueron cuatro) estados del daño por creep a partir de la observación de las micro estructuras.

---

<sup>1</sup> 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**

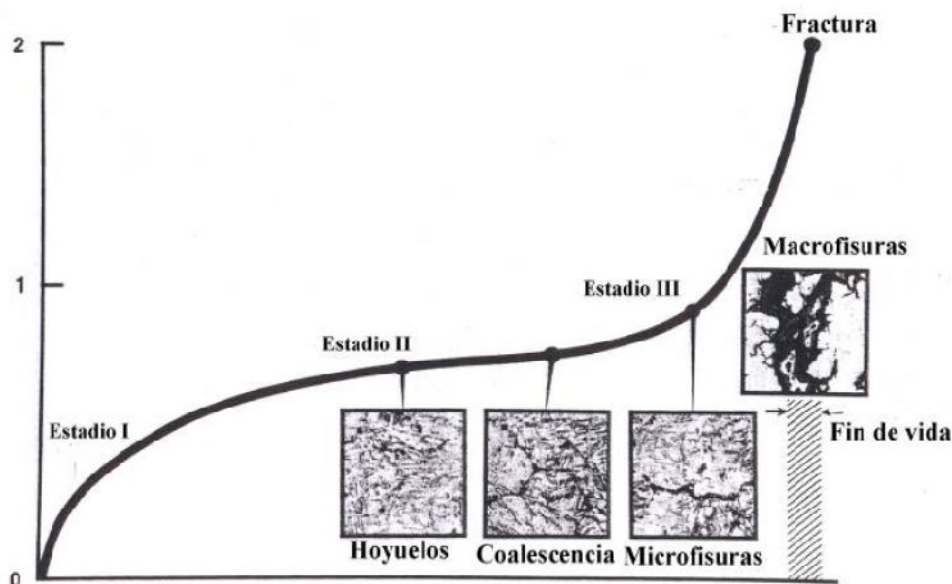
Clase	Estado	Accionar
0	No presenta defectos de Creep	Controlar cada dos años, según ASME VIII
1	Pequeña cantidad de cavidades	Reinspección después de 20.000 horas de servicio
2	Coalescencia de cavidades	Reinspección después de 15.000 horas de servicio
3	Microfisuras generadas por Creep	Reinspección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

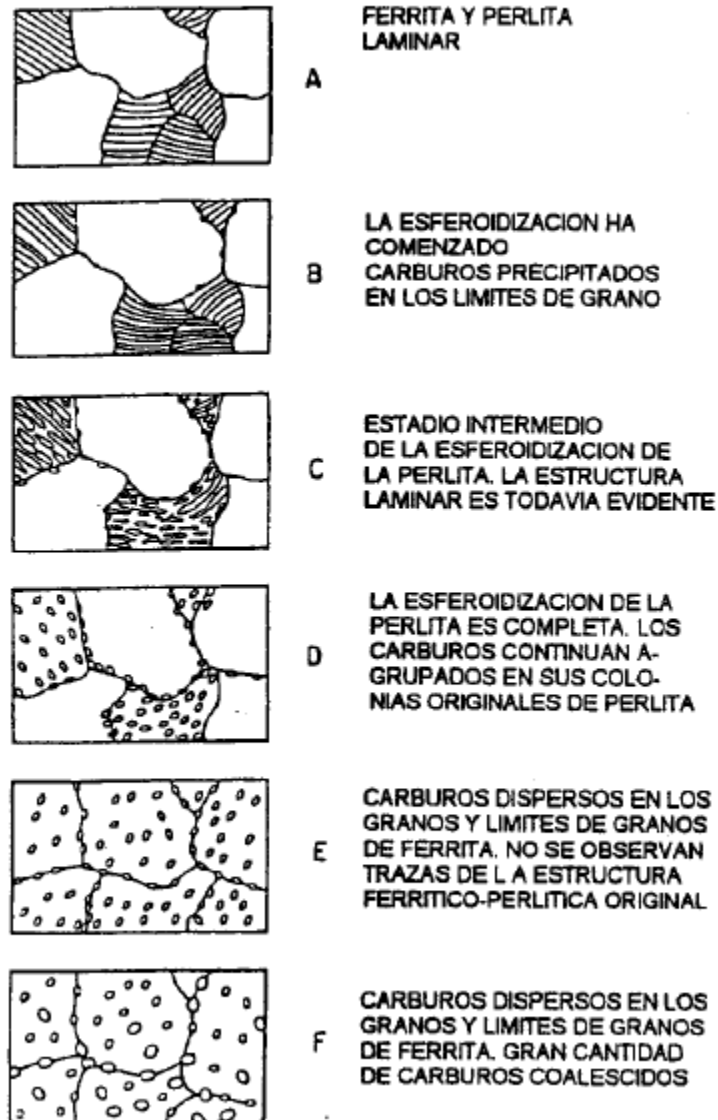
## **Evaluación de la Vida Remanente a Partir del Grado de Esferoidización de la Perlita**

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:

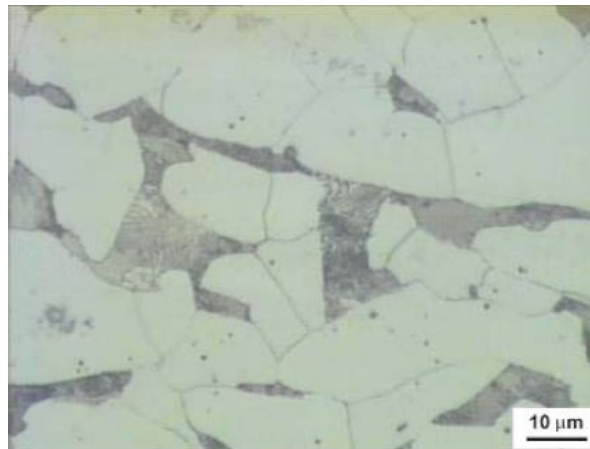
**CLASIFICACIÓN DE LA DEGRADACION  
MICROESTRUCTURAL**



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

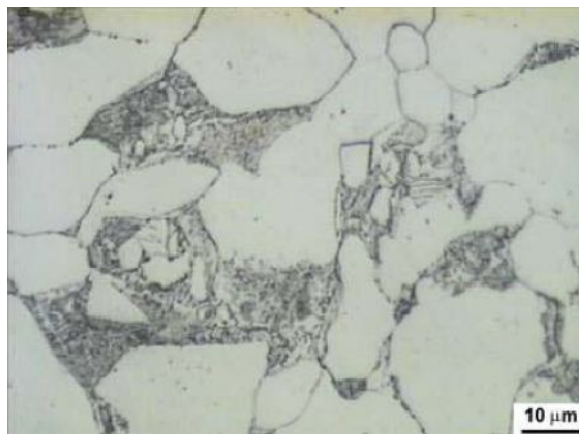
A continuación se verán ejemplos de los 6 Estados de degradación anteriores al Creep I, los mismos se los identifica desde la letra A hasta la F.

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



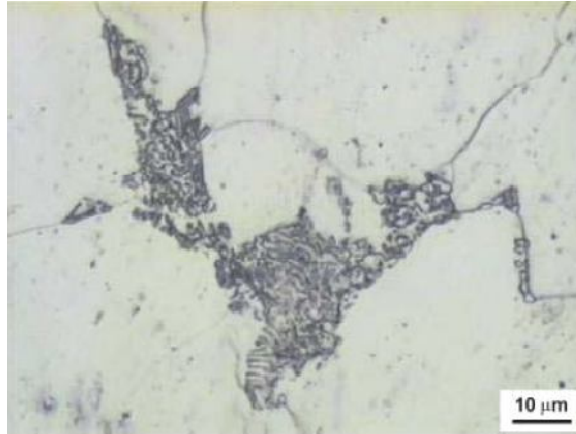
**Figura 1.13** ESTADO DE DEGRADACIÓN MICRO ESTRUCTURAL A

**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

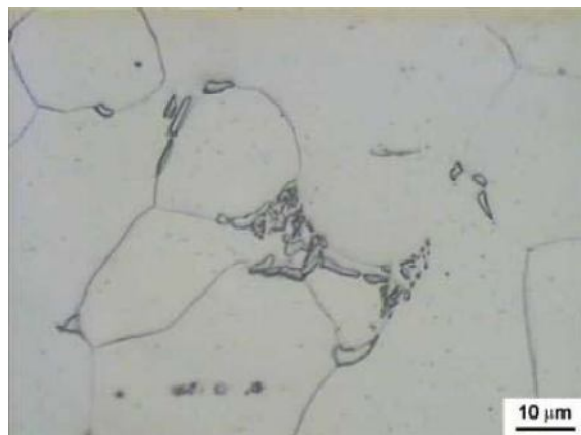
**Estado C:** En un acero al carbono sobre una matriz ferrítica las colonias de perlita poseen las láminas totalmente globulizadas.



**Figura 1.15** ESTADO DE DEGRADACIÓN MICRO ESTRUCTURAL C

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

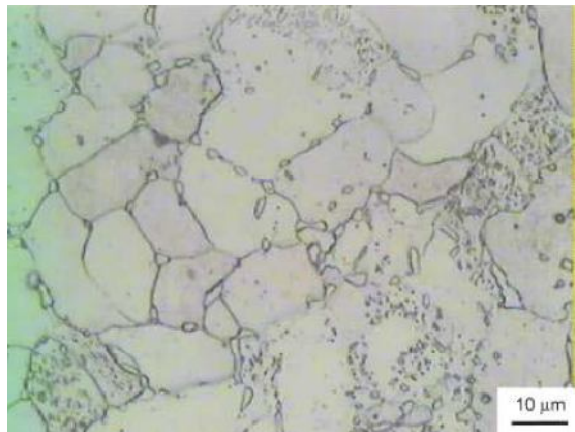
**Estado D:** En un acero al carbono sobre una matriz ferrítica las colonias de perlita poseen las láminas totalmente globulizadas. Comienza la precipitación en límite de grano.



**Figura 1.16** ESTADO DE DEGRADACIÓN MICRO ESTRUCTURAL D

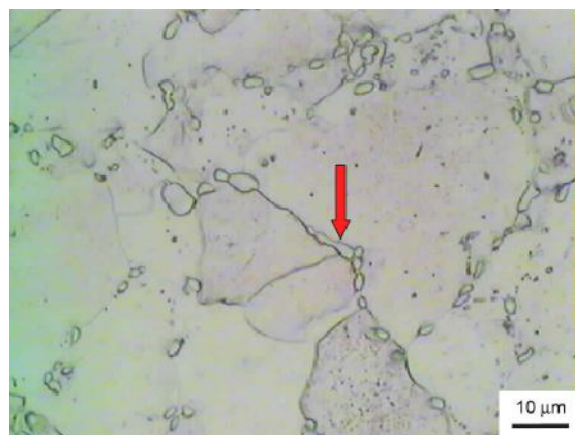
Esferoidización completa, pero los carburos siguen agrupados en sus colonias perlíticas originales. Comienza la precipitación en los límites de grano.

**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

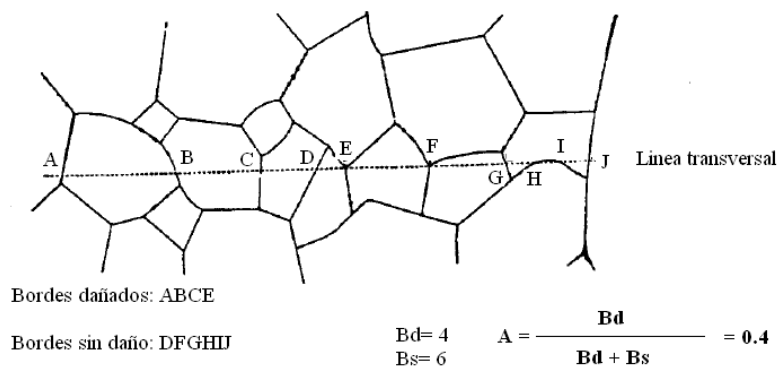
Para estimar la vida residual es necesario contar con un parámetro micro estructural que esté ligado al grado del daño y poder correlacionarlo con la fracción de vida remanente del componente. Tal parámetro deberá reunir las siguientes condiciones:

- 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.

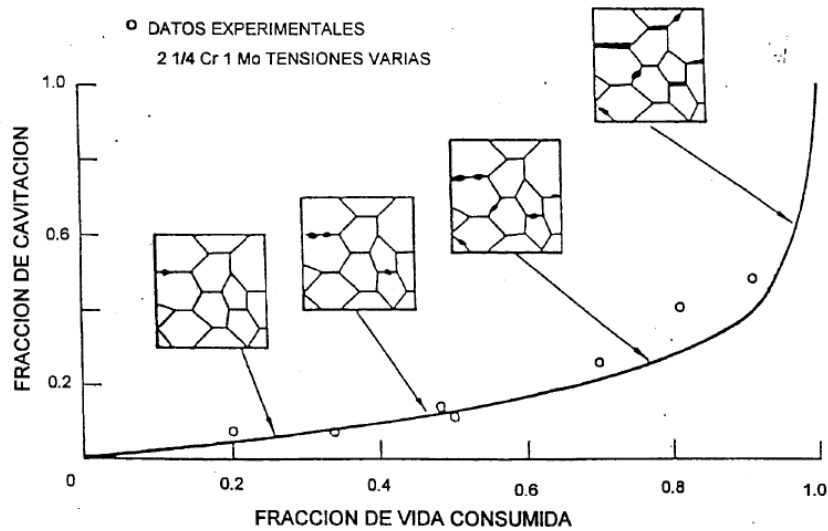
De todos los parámetros posibles el que más se adapta a estos requerimientos es el denominado "Parámetro A" definido como:

### **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.

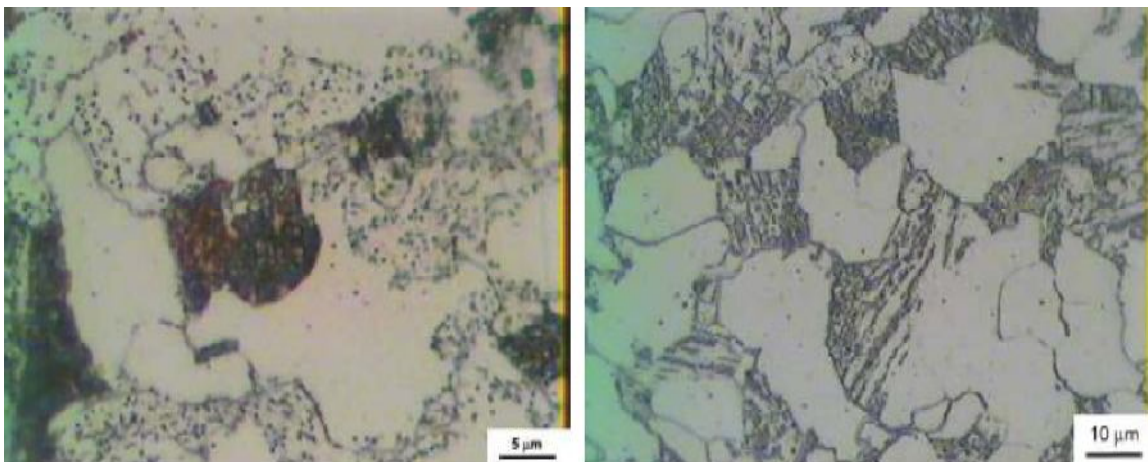


**Figura 1.21** TUBO DE SOBRECALENTADOR FISURADO, CON CORROSIÓN-EROSIÓN EN LA PARED EXTERIOR.

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( $\delta$ ) 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 ( $\sigma$ ), la cual se forma de la transformación de parte de la ferrita  $\delta$ , 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**

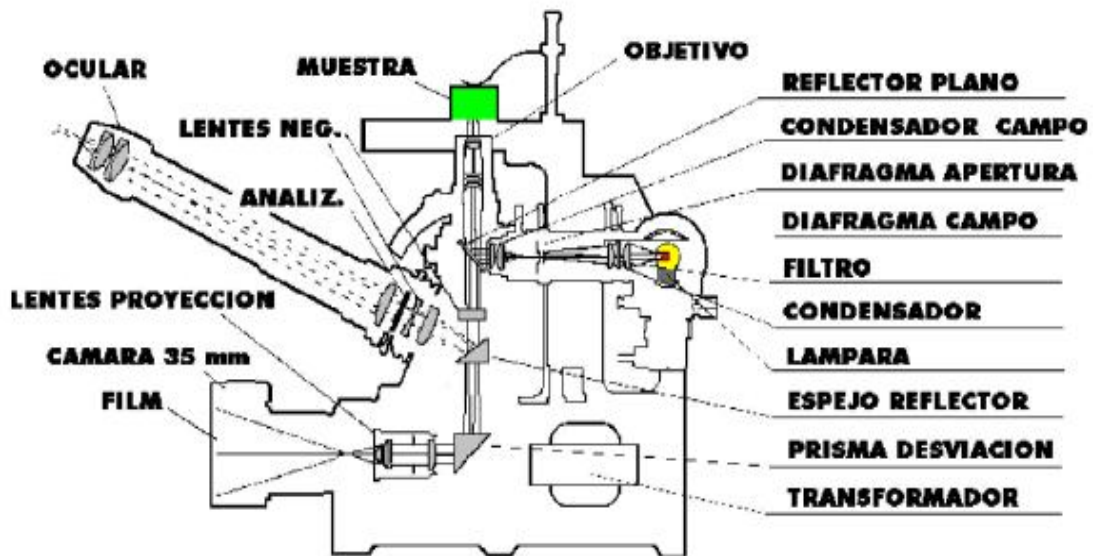
Las imágenes de las características micro estructurales pueden ser obtenidas de microscopios metalográfico, que pueden ser de transmisión o reflexión de luz o electrones. La elección del tipo de microscopio depende de ciertos factores, tales como el tipo de material y la calidad de la imagen.

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

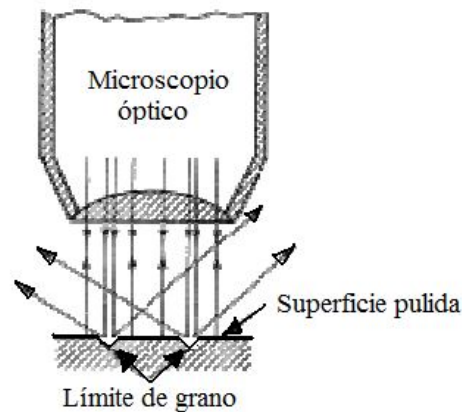
### **Principio del Microscopio de Reflexión de Luz**

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.

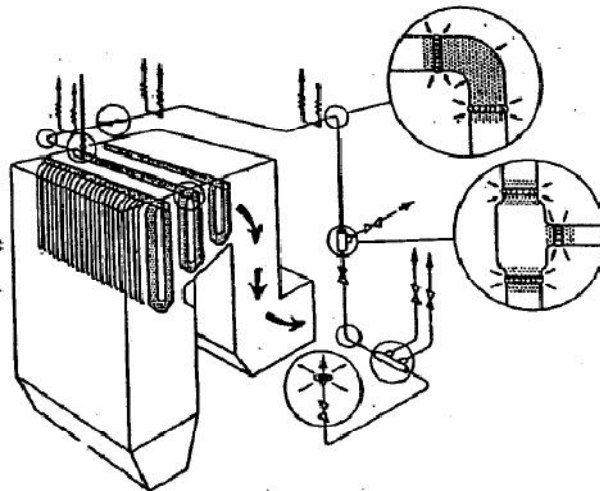
#### **1.4 Metodología para la Obtención de Metalografía de Componentes Estructurales**

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

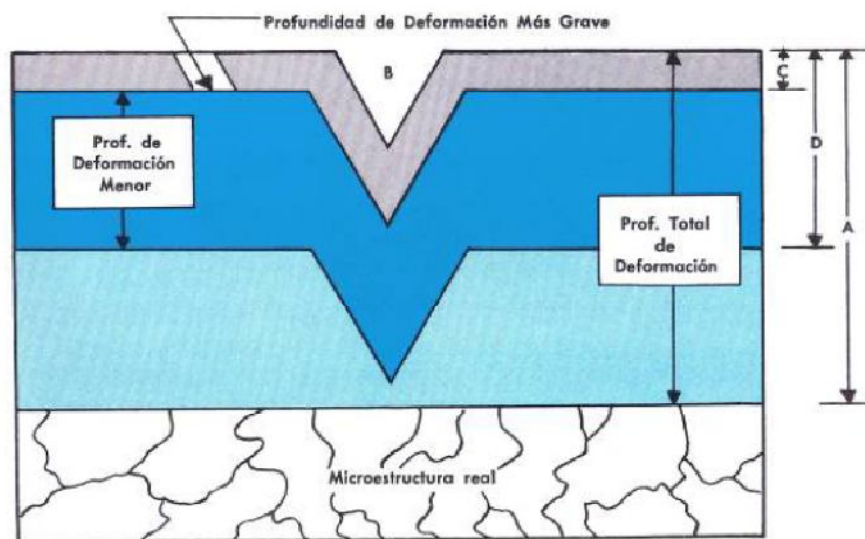


oscila entre 0,1-1,0 mm aproximadamente, dependiendo del espesor de estos depósitos, dureza, etc.

### **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.

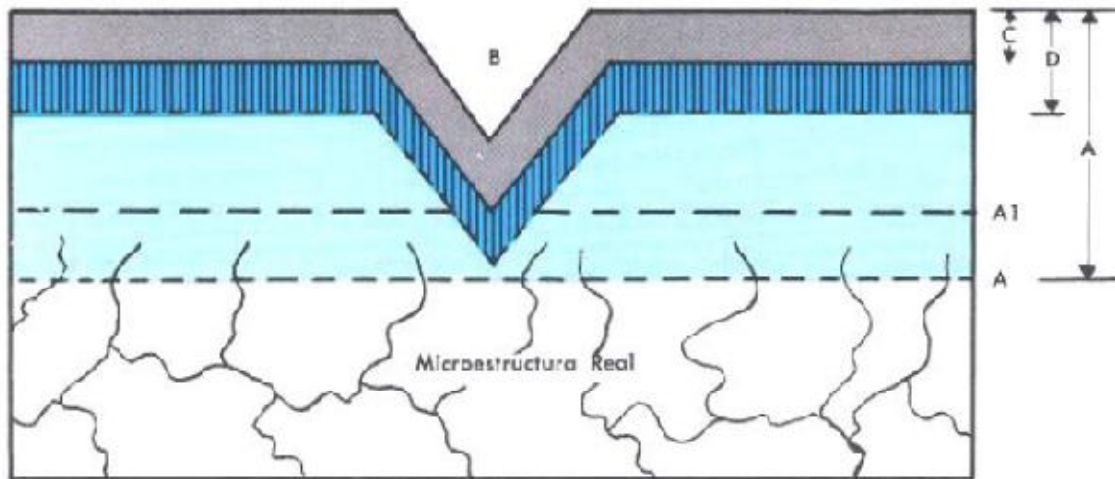


**Figura 1.30** ELEMENTOS UTILIZADOS PARA PREPARAR SUPERFICIES METÁLICAS CON PULIDO MECÁNICO

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  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$  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

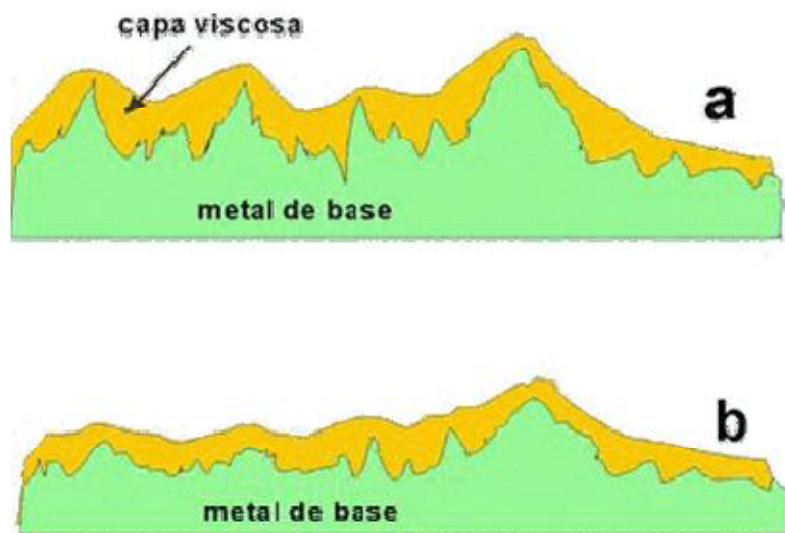
Es de vital importancia realizar muy bien esta etapa para no generar distorsiones de la micro estructura, rayado o deformación siendo la línea A1 la que representa estas condiciones. Iguales o mayores imperfecciones pueden aparecer si los pasos anteriores no han sido correctos. Donde la línea imaginaria 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".

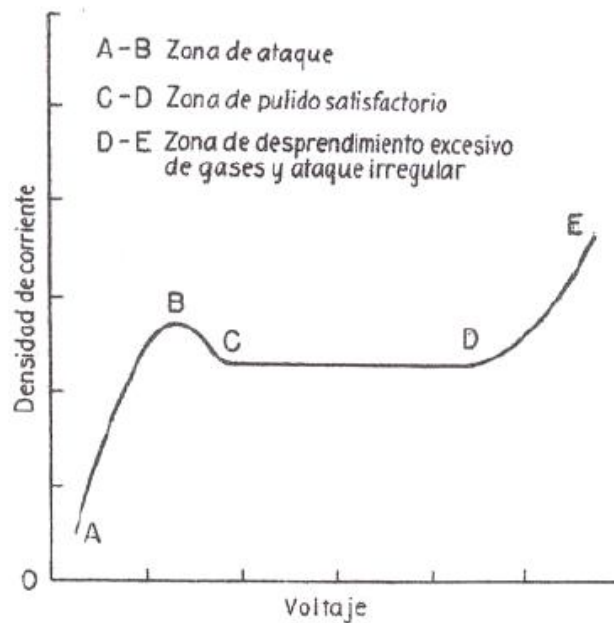


**Figura 1.32** ESQUEMA DE NIVELACIÓN DE LA SUPERFICIE EN EL PULIDO ELECTROLÍTICO

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**

<b>Electrolitos</b>	<b>Materiales</b>	<b>Tension (Volt)</b>
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.

# CAPÍTULO 2

## 2. PLAN DE TRABAJO PARA INSPECCIÓN DE DOS COMPONENTES MEDIANTE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS

### 2.1 Plan de Inspección.- Metodología

Se aprovecha la parada de operación de un Horno Catalítico *Figura 2.1*, cuyo año de fabricación fue en 1996 a cargo de la Compañía Técnicas Reunidas.

Al momento del ingreso al Horno, ya se tenían los andamios previamente armados en 5 niveles separados casi equidistantemente, uno de los problemas con los que se encontró fue que los tablonos no estaban sujetos contra la estructura metálica de los andamios, se tuvo que realizar esta operación. Este punto hay que tenerlo muy en cuenta por medidas de seguridad, ya que se trabajaron en alturas superiores a 6 m. y esto constituía un riesgo latente.

Una vez que se tienen todos los aspectos de seguridad controlados, empieza el plan de inspección para el análisis íntegro de dicho horno.



**Figura 2.1 HORNO CATALÍTICO A EVALUAR. PRIMERO A LA IZQUIERDA**

## **2.2 Inspección visual en un Horno Catalítico**

La selección de las zonas críticas y representativas de posibles daños de tipo termo mecánicos se tienen en cuenta para la detección de degradación microestructural en este componente.



Por medio de inspección visual **Ver Figura 2.2** se deciden previamente cuales serán las posibles zonas críticas las cuales serán verificadas buscando, en el caso de este componente, daños tales como:

Oxidación excesiva, deformación plástica, zonas erosionadas, uniones soldadas fisuradas, en áreas donde funcionen quemadores restos de combustibles quemados pueden indicar desviaciones que podrían provocar degradación micro estructural anormales.

Para este Horno, se precisan de 41 puntos a evaluarse, los cuales son distribuidos como se detalla en el **Plano 1 (ver Apéndice A)**.



**Figura 2.2** Inspección visual interior Horno Catalítico.

### **2.3 Preparación de las superficies**

Para la preparación y análisis cuantitativo de los 41 puntos que se tienen que realizar en el Horno para el análisis metalográfico, se utiliza la norma ASTM E 1351 – 06.

El procedimiento de preparado superficial es el mismo para los 41 puntos a realizarse en el Horno.

Cabe resaltar que todos los instrumentos utilizados para el desbaste inicial, así como de pulido intermedio y final, tanto mecánico como electrolítico, son instrumentos que pueden ser obtenidos en cualquier ferretería o tienda electrónica.

Se utilizan este tipo de artefactos “comunes” ya que estos poseen mayor torque y potencia que los aparatos que usualmente se venden para trabajos metalográficos en campo, y suelen ser más costosos.

Se detalla a continuación los respectivos pasos a seguir hasta tener completamente preparada la superficie para su análisis metalográfico:

### **2.3.1 Desbastado**

Debido a la atmósfera de trabajo del componente que genera oxidación, se necesita como primer paso utilizar una amoladora portátil *ver Figura 2.3*, para realizar el también llamado “pulido grueso”

Se utiliza el disco de corte que viene con la amoladora, que sumado al potente torque que posee, es suficiente para desbastar una capa superficial de aprox. 1mm de espesor.

Se realiza el pulido de un área de 10 x 5 cm.



**Figura 2.3 DESBASTE GRUESO CON LA AMOLADORA**

### **2.3.2 Pulido mecánico**

Una vez concluida la etapa de desbaste grueso (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.

El procedimiento y herramientas utilizados en este proceso se detallan a continuación:

Los papeles abrasivos de carburo de silicio de granulometría #120, 220, 320 tienen forma de disco (tienen exactamente las mismas dimensiones de un disco compacto) y son colocados en un adaptador portapapel (disco de goma, marca Black & Decker), el

mismo que es adaptado al mandril de un taladro cualquiera a manera de broca. **Ver Figura 2.4**

Este adaptador portapapel es fabricado con un plástico flexible por lo que al momento de uso es muy cómodo para desbastar superficies irregulares.

En el centro posee un agujero donde va un tornillo con arandela para realizar el cambio de papel abrasivo y así completar el pulido hasta el papel #320.

Como en el caso anterior se utiliza una herramienta “común” como es el caso de un taladro, en este caso la misma marca Black & Decker. **Ver Figura 2.4**

El procedimiento de pulido se realiza suavemente por aprox. 3 min con cada papel y en direcciones opuestas cada vez que se realice el cambio (tal como se lo realizaría en laboratorio para evitar las llamadas “colas de cometa”). Este procedimiento es el más decisivo a la hora de tener una buena micro estructura, por lo que hay que realizarlo con mucho cuidado y sin apuros.



**Figura 2.4** TALADRO CON EL ADAPTADOR PORTAPAPELES (DISCO DE GOMA)

Para el pulido final con los papeles de granulometría #400 y 600, se utilizan tiras de 10 x 5 cm. El pulido se lo realiza a mano, procurando cambiar la dirección del mismo, cada que se realice el cambio de papel.

Hay que tener mucho cuidado de no contaminar la superficie de preparación llevando resto de óxidos de las vecindades hacia ella. Para evitar esto procurar realizar el pulido manual únicamente en el centro de la superficie (de todas formas para la obtención de la metalografía no se necesita más que una superficie de 1cm<sup>2</sup>. **Ver**

***Figura 2.5***





**Figura 2.5** PULIDO MANUAL CON PAPELES DE GRANULOMETRÍA #400 Y 600

### **2.3.3 Pulido electroquímico**

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.

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.

Se sabe que el material de las tuberías del Horno son: **ASTM A-312**, (Standard Specification for Seamless and Welded Austenitic Stainless Steel Pipes". Norma ASTM para tubería "Pipe de **acero inoxidable austenítico**, con y sin costura, para usos generales de corrosión y alta temperatura).

Una vez conocido este dato, se consulta las tablas respectivas para saber el Electrolito y variables Tiempo, y Voltaje a utilizar para el electropulido con tampón.

En la siguiente tabla se tienen los valores para este tipo de Acero Inoxidable:

**TABLA 2.1**  
**ELECTROLITOS Y VOLTAJE PARA PULIDO ELECTROLÍTICO DE ACERO**  
**INOXIDABLE A - 312**

<b>Electrolitos</b>	<b>Materiales</b>	<b>Tensión (Volt)</b>
10 ml de ácido perclórico 90 ml Butil cellosolve	- Aceros al C e inoxidables	30 - 35



El pulido electroquímico para obtener réplicas “in situ” se la realiza con la técnica denominada TAMPÓN. Se reemplaza la celda electrolítica por un menisco de reactivo ubicado entre la pieza a pulir (ánodo) y un cátodo (tampón).

El tampón está formado por una varilla metálica que termina en una cabeza cilíndrica semiesférica, en este caso como el material a pulir es **acero inoxidable**, la cabeza cilíndrica también tiene que ser de acero inoxidable.

La cabeza del tampón está cubierta por un material absorbente no conductor. La felpa está sujeta al tampón con unas ligas para su fácil cambio, ya que con el uso tiende a quemarse.

El material de esta felpa tiene que ser de carácter inerte, para que de esta manera no afecte la integridad de la estructura metalográfica.

La parte eléctrica es muy económica, como se había dicho anteriormente, esta técnica de preparación de superficies es realizada con materiales que se pueden conseguir fácilmente, como ocurrió con la amoladora y el taladro, la **Fuente de Corriente Continua** consiste en un transformador que es construido con materiales que fácilmente se pueden conseguir en un tienda de repuestos electrónicos. **Ver Figura 2.6**

A pesar de ser un Rectificador “común”, comparado con los que se pueden conseguir en el mercado, se puede decir con certeza que

tiene un mejor desempeño que los diseñados por grandes casas comerciales, ya que esos son Digitales, y por tal motivo cuando ocurra un leve corto en el sistema a la hora de realizar el pulido, alguno de sus componentes sufrirá serios daños.

Por el contrario, el Rectificador que en este trabajo se utiliza, al ser construido de manera “Análoga”, posee mayor resistencia a los cortos, y de paso, a los golpes y maltratos la hora del trabajo en campo.

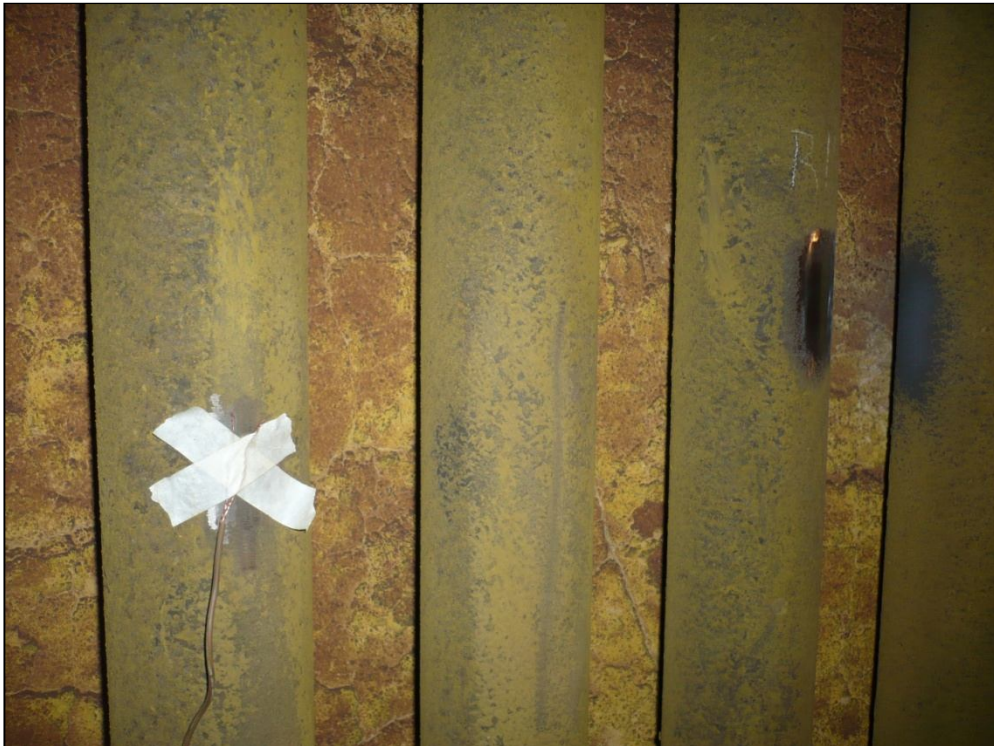


**Figura 2.6** RECTIFICADOR DE CORRIENTE DC - AC

El uso de este tipo de rectificador para el pulido es el siguiente:

El tampón es conectado al cátodo (-) (cable negro) de la fuente y la superficie a pulir al ánodo (+) (cable rojo).

La manera de conectar la superficie a pulir es simplemente con una cinta adhesiva en una superficie previamente desbastada con la amoladora (para hacer contacto). Se la muestra en el siguiente gráfico. **Figura 2.7**



**Figura 2.7** CONEXIÓN DEL ÁNODO (-) AL RECTIFICADOR

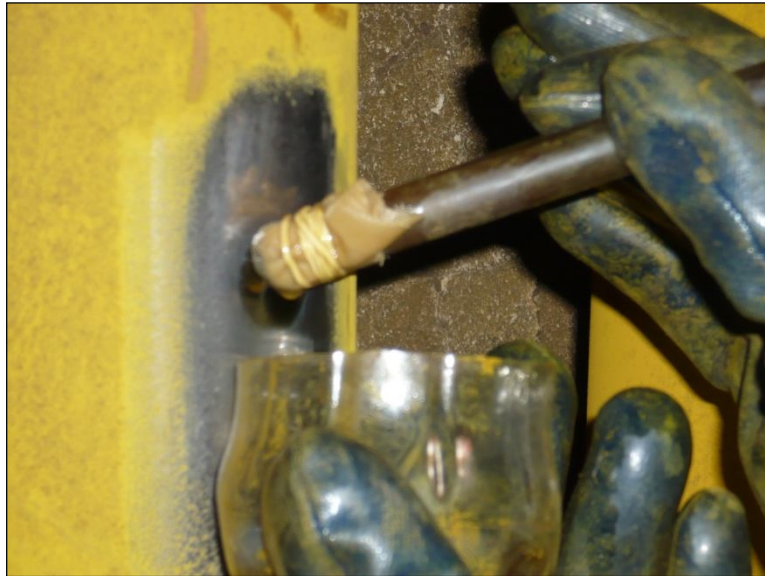
Una vez fijada la tensión de trabajo, se moja el tampón en el electrolito correspondiente al metal o aleación, en este caso Butilcellosolve, y se comienza la operación. **Ver Figura 2.8**



**Figura 2.8** INICIO DEL PULIDO ELECTROLÍTICO, SE MOJA EL TAMPÓN EN EL ELECTROLITO

El tampón se lo moja constantemente en el electrolito, cuando se haga contacto con la superficie, procurar no realizar excesiva fuerza, hay que realizar movimientos circulares con una presión relativamente baja a tal punto de que solo el electrolito haga contacto con la superficie a pulir. De no ser así, el paño se degradará fácilmente y provocará un corto circuito en el sistema y un mal proceso de pulido. **Ver Figura 2.9**





**Figura 2.9** MOVIMIENTOS CIRCULARES PARA EL PULIDO, CON UNA PRESIÓN RELATIVAMENTE BAJA PARA NO QUEMAR EL PAÑO

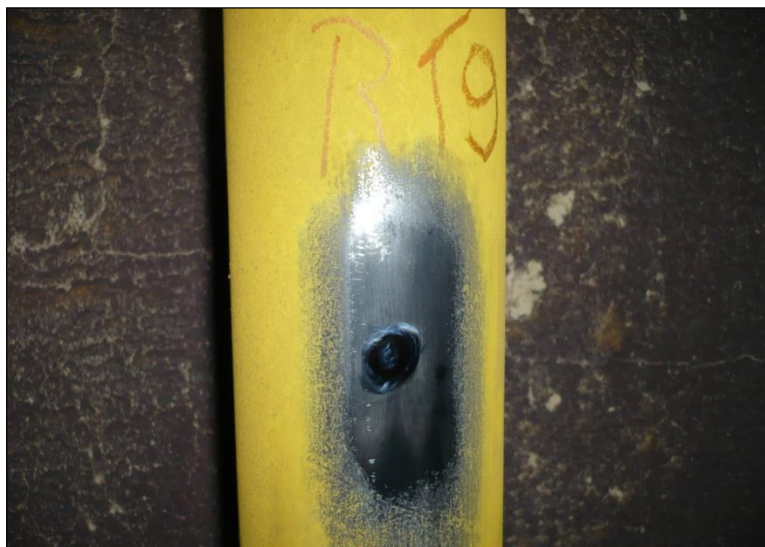
El pulido se lo realiza por aprox. 3 min hasta que se empiece a notar una superficie completamente liza tipo espejo.

Una vez que se considere que el pulido está completo, proceder a mojar la superficie con Alcohol (para desinfectar) y luego con

Acetona (para evaporar y limpiar), se procede a soplar y la superficie queda lista.

Se muestran dos gráficos comparativos en donde se tienen dos superficies iguales, pero una de ellas ya tiene el pulido electrolítico realizado.





**Figura 2.10.** ARRIBA, SUPERFICIE SIN EL PULIDO ELECTROLÍTICO FINAL, ABAJO LA SUPERFICIE YA PULIDA. NÓTESE EL CIRCULO DE APROX. 1.5 CM DE DIÁMETRO CON UNA CALIDAD TIPO ESPEJO.

#### **2.3.4 Revelado micro estructural**

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 micro ataque de metales y aleaciones, se utilizan según las fases que quiera observar diferentes reactivos de ataque.

En el caso de nuestro metal base, se tienen los siguientes parámetros de operación y reactivos:

**TABLA 2.2**  
**ELECTROLITOS Y VOLTAJE PARA REVELADO MICROESTRUCTURAL DE**  
**ACERO INOXIDABLE A - 312**

<b>Electrolitos</b>	<b>Materiales</b>	<b>Procedimiento</b>
10 g de ácido oxálico 100 ml de agua	Aceros al C e inoxidables	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Electrolito a 6 Volt</li> <li>- 1 minuto</li> <li>- Usar cátodo de acero inoxidable</li> </ul>

Como se puede observar, este tipo de Revelado Micro estructural **no es** por inmersión, si no, por medio de Ataque Electrolytico.

El procedimiento es similar al Pulido Electrolytico, con la diferencia de que se tienen diferentes reactivos y parámetros de operación con el rectificador.



Una vez que el Revelado esté completo, proceder a mojar la superficie con Alcohol (para desinfectar) y luego con Acetona (para evaporar), se procede a soplar y la superficie queda lista.

Se debe tener MUCHO CUIDADO de no pasarse con el tiempo de revelado especificado en la Norma, ya que de no ser así, se puede arruinar por completo la micro estructura del material.

## **2.4 Obtención de las micro estructuras**

Una vez que se tiene lista la superficie para su análisis, se procede a la obtención de su micro estructura. Para la presente tesis, se las obtendrá por dos medios:

- Replicas Metalográficas
- Microscopio Portátil

Como se puede observar, el método de preparación de la superficie es el mismo independiente de que medio se utilice para la obtención de la metalografía.

### **2.4.1 Microscopio Portátil**

Para la obtención de la micro estructura por medio del Microscopio Metalográfico Portátil, de la misma manera que con las Réplicas Metalográficas, la superficie tiene que estar correctamente pulida y atacada.

El procedimiento va a depender del tipo de Microscopio que se posea, y de la interfase para poder digitalizar las imágenes.

Para el proyecto, se utilizó un microscopio con las siguientes características:



**Figura 2.11** MICROSCOPIO METALGRÁFICO PORTÁTIL UTILIZADO EN EL PROYECTO

**TABLA 2.3**

**CARACTERÍSTICAS MICROSCOPIO PORTÁTIL UTILIZADO EN EL PROYECTO**

<b>Marca</b>	Allring
<b>Modelo</b>	BS53
<b>Tipo</b>	Metalográfico
<b>Iluminación</b>	Eléctrica

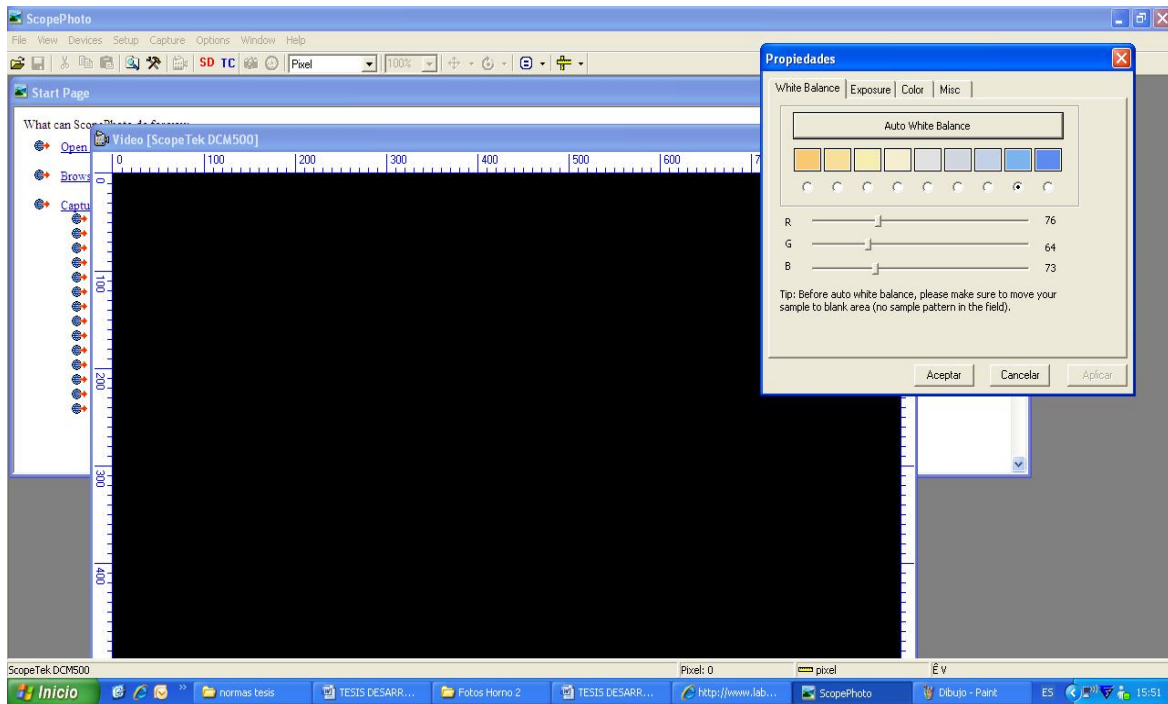
<b>Objetivos</b>	4, 10, 25, 40x
<b>Oculares</b>	10 x WF

Se utilizó también un Cámara Digital para Microscopio, modelo DCM 500 de 1.3 mega pixeles de fabricación china.



**Figura 2.12** CÁMARA DIGITAL PARA MICROSCOPIO

La cámara tiene una interface USB para su conexión con una computadora. Viene además un CD con información de su uso además del programa para la digitalización de las imágenes y su posterior variación en color, tamaño, matiz, etc.



**Figura 2.13** VISTA DEL PROGRAMA PARA LA DIGITALIZACIÓN DE LAS FOTOGRAFÍAS

Se utilizó también un computador portátil de 14 in. Vale decir que se puede utilizar cualquier tipo de computador portátil, el programa no es para nada pesado así que no requiere de mayor capacidad de la máquina.

El procedimiento para la obtención y digitalización de la microestructura por medio de este método es sencillo, y se lo detalla a continuación:

Preparar el Microscopio con el Objetivo deseado, preparar la Cámara Digital y conectarla al Computador.

Para el caso de los componentes utilizados en este Proyecto, se necesitan de dos personas para poder digitaliza las imágenes de forma correcta: una que maneje el Microscopio y otra que se encargue del manejo del computador. En nuestro caso, por la dificultad del área a trabajar, se necesitó de más personas para cuestiones de iluminación, etc. **Ver Figura 2.14**

La persona que maneja el Microscopio, debe observar el monitor del computador hasta enfocar correctamente la micro estructura.

**Ver Figura 2.15**

La persona que maneja el computador debe estar atenta para tomar la fotografía en el instante preciso, ya que la magnitud de la magnificación hace que el mínimo movimiento distorsione la imagen. En este caso, el botón para tomar la fotografía se debe aplastar desde el computador. **Ver Figura 2.16**



**Figura 2.14** TRABAJO EN EQUIPO PARA LA DIGITALIZACIÓN DE LAS IMÁGENES POR MEDIO DEL MICROSCOPIO PORTÁTIL.



**Figura 2.15** MANEJO DEL MICROSCOPIO HASTA OBTENER UN ENFOQUE PRECISO PARA LA DIGITALIZACIÓN DE LA MICRO ESTRUCTURA.



**Figura 2.16** DIGITALIZACIÓN DE LA IMAGEN

Los pasos antes descritos son los necesarios para la obtención de las Metalografías deseadas por medio del uso del Microscopio Portátil.

Solo se necesita llegar a casa u oficina e interpretar los resultados obtenidos.

#### **2.4.2 Réplicas Metalográficas**

Ahora que se tienen las superficies preparadas para su análisis metalográfico, se necesita de algún medio para obtener la microestructura que con mucho cuidado se la preparó, para este caso se utilizaron las Réplicas Metalográficas, los mismos que fueron explicadas en el Capítulo 1.



Fueron usadas las Réplicas de Acetato de Celulosa sin soporte de 50  $\mu\text{m}$  de espesor. Este tipo de material tiene un valor relativamente bajo en el mercado (comparado con los distribuidos por Struers por ejemplo), se pueden conseguir hojas enteras, lo único que hay que hacer es cortar el acetato en pedazos para poder transportarlo y usarlo al momento de utilizarlo como réplica.

El procedimiento que se siguió es el siguiente:

Colocarse firmemente frente a la superficie a replicar, sujetar en una mano la Hoja de Acetato y en la otra a pipeta con Acetona.

Se humedece la superficie con solvente (Acetona) para luego, con ayuda de la tensión superficial, adherir la Hoja de Acetato a la superficie. Se debe tener cuidado de no humedecer demasiado la superficie, de esta manera se evita formar burbujas de aire dentro de la Réplica. **Ver Figura 2.17**

Esperar 5 minutos y proceder al retiro de la misma. **Ver Figura 2.18**

No olvidar clasificar la Réplica con la superficie replicada para que luego no se den confusiones a la hora de emitir un informe. Guardarlas cuidadosamente para su transporte y posterior análisis en el laboratorio. **Ver Figura 2.19**



**Figura 2.17.** SE COLOCA UNA CAPA DE DISOLVENTE (ACETONA) A LA SUPERFICIE PARA LUEGO ADHERIR LA HOJA DE ACETATO POR TENSIÓN SUPERFICIAL



**Figura 2.18** SE EXTRAE LA RÉPLICA DE LA SUPERFICIE LUEGO DE 5 MIN DE ESPERA. SE LO REALIZA CON LA MANO



**Figura 2.19** SE CLASIFICA LA RÉPLICA PARA SU TRANSPORTE Y POSTERIOR ANÁLISIS EN LABORATORIO

Ahora que se han obtenido todas las Réplicas del Horno, se procede al análisis de las mismas en el laboratorio.

Para su observación en el microscopio, es necesario realizar el llamado Sublimado en Vacío a cada réplica.

# CAPÍTULO 3

## 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Ahora que se han obtenido las Micro estructuras de las dos maneras a analizar, se comparan unas con otras para observar que método es capaz de entregar micro estructuras con mayor resolución a la hora de inspeccionar metalográficamente componentes en campo.

Como se tomaron 41 puntos, solo se van a mostrar los más representativos, es decir, los que presenten fallas en su micro estructura o al contrario, los que no presenten ninguna.


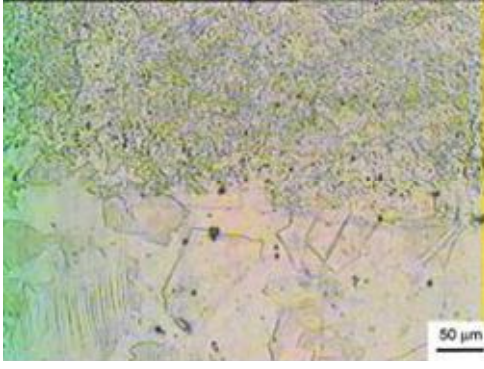
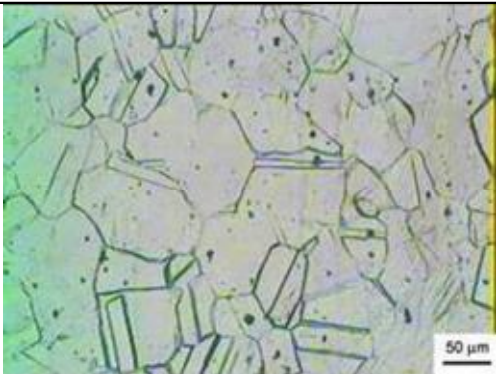
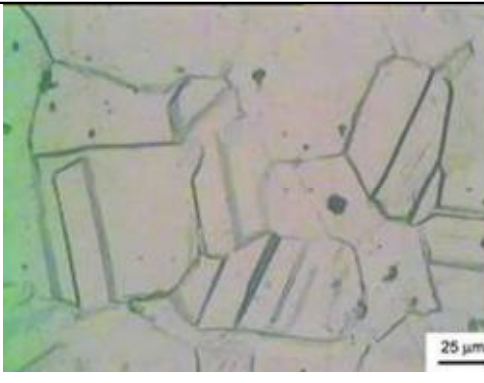
### 3.1 Réplicas Metalográficas

Al dar los resultados por esta técnica, se detallará el número de réplica (especificado en el plano), así como un breve análisis cualitativo de lo obtenido.



**Réplica 1- Unión soldada Codo-Tubo Paso 1-Tubo 2-Cota 6 mts:**

La micro estructura del cordón de soldadura como la Zona afectada por el Calor (ZAC) no presenta anomalías micro estructurales. En cuanto a la Degradación Micro estructural del material base del Tubo 2 no se observa precipitación de Carburos en los límites de grano, encontrándose operativo.

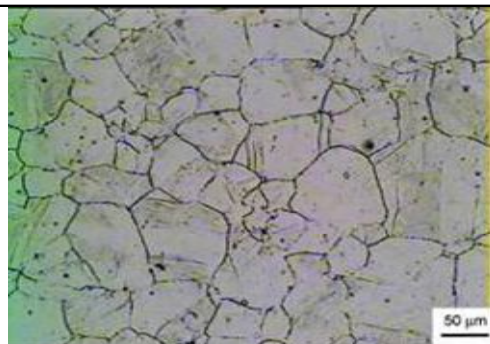
 <p>Rép. 1</p>	 <p>50 µm</p>
<p><b>Fig.5 Ubicación en zona convectiva-Techo.</b></p>	<p><b>Fig. 6 Zona afectada por el calor.</b></p>
 <p>50 µm</p>	 <p>25 µm</p>
<p><b>Fig. 7 No presenta Precipitación de Carburos en los límites de granos.</b></p>	<p><b>Fig. 8 Matriz Austenítica libre de precipitación .</b></p>

**Figura 3.1 ANÁLISIS PUNTO 1 POR MEDIO DE RÉPLICAS**

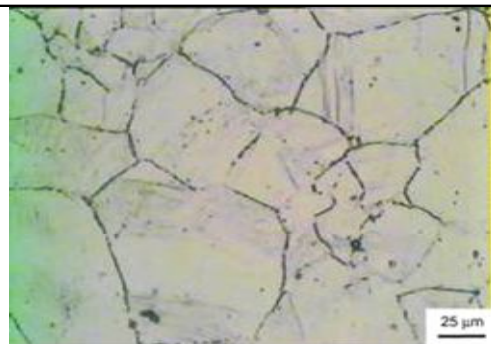
**Réplica 4 - Tubo de unión Paso 1 y 2-Cota 6 mts:** La Degradación Micro estructural del Tubo de unión se encuentra en sus Estado medio donde se observa precipitación de Carburos en los límites de grano, encontrándose aún operativo, recomendándose su cambio en la próxima parada general.



**Fig. 17** Ubicación en zona convectiva-Techo. Tubo de Unión Paso 1 y 2.



**Fig. 18** Presenta Precipitación de Carburos en los límites de granos.



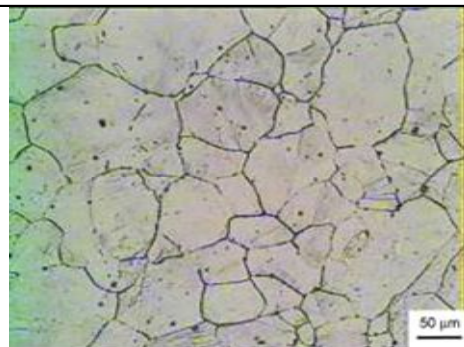
**Fig. 19** Matriz Austenítica con precipitación.

**Figura 3.2 ANÁLISIS PUNTO 4 POR MEDIO DE REPLICAS**

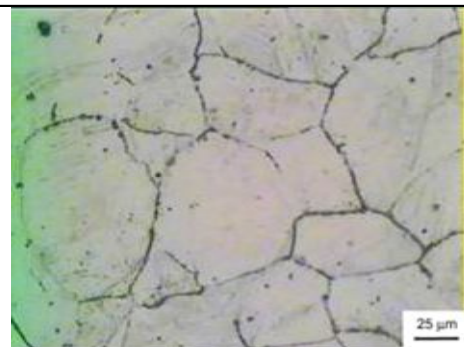
**Réplica 5- Tubo de unión Paso 2 y 3-Cota 6 mts:** La Degradación Micro estructural del Tubo de unión se encuentra en sus Estados iniciales donde se observa leve precipitación de Carburos en los límites de grano, encontrándose aún operativo.



**Fig. 20** Ubicación en zona convectiva-Techo. Tubo de Unión Paso 2 y 3.



**Fig. 21** Presenta Precipitación de Carburos en los límites de granos.



**Fig. 22** Matriz Austenítica con precipitación .

**Figura 3.3 ANÁLISIS PUNTO 5 POR MEDIO DE RÉPLICAS**

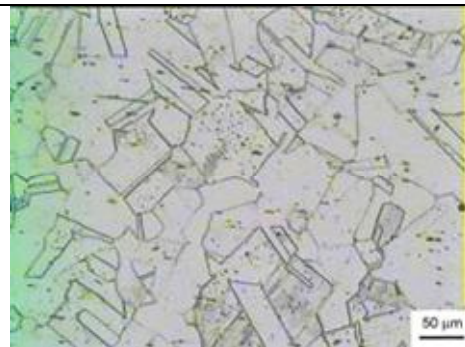


**Réplica 17- Tubo 3- Paso 1 Entrada 1 Este-Cota 5 mts:** La Degradación Micro estructural del Tubo de unión se encuentra en sus Estados iniciales donde no se observa precipitación de Carburos en los límites de grano, encontrándose aún operativo.

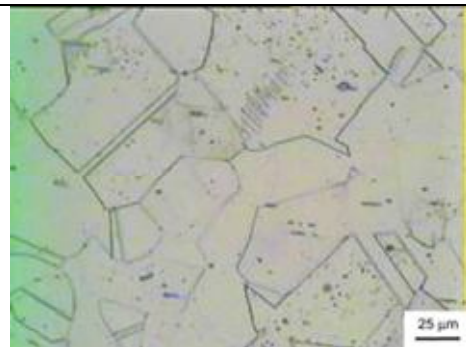


**Fig. 62**

**Ubicación en cota 5 mts. Tubo 3 Paso 1.**



**Fig. 63** No presenta Precipitación de Carburos en los límites de granos.



**Fig. 64** Matriz Austenítica sin precipitación.

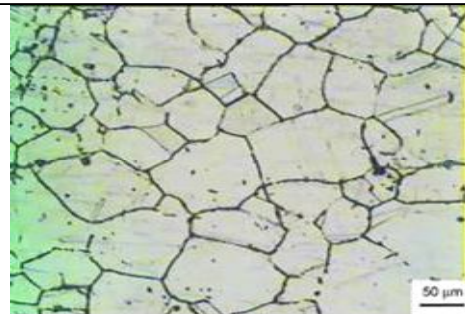
**Figura 3.4 ANÁLISIS PUNTO 17 POR MEDIO DE RÉPLICAS**

**Réplica 18- Tubo 9- Paso 2 -Cota 5 mts:** La Degradación Microestructural del Tubo de unión se encuentra en un Estado medio donde se observa precipitación de Carburos en los límites de grano, encontrándose aún operativo, pero se recomienda su cambio en la próxima parada general.

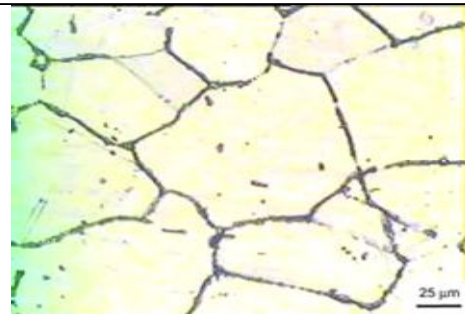


**Fig. 65**

**Ubicación en cota 5 mts. Tubo 9 Paso 2.**



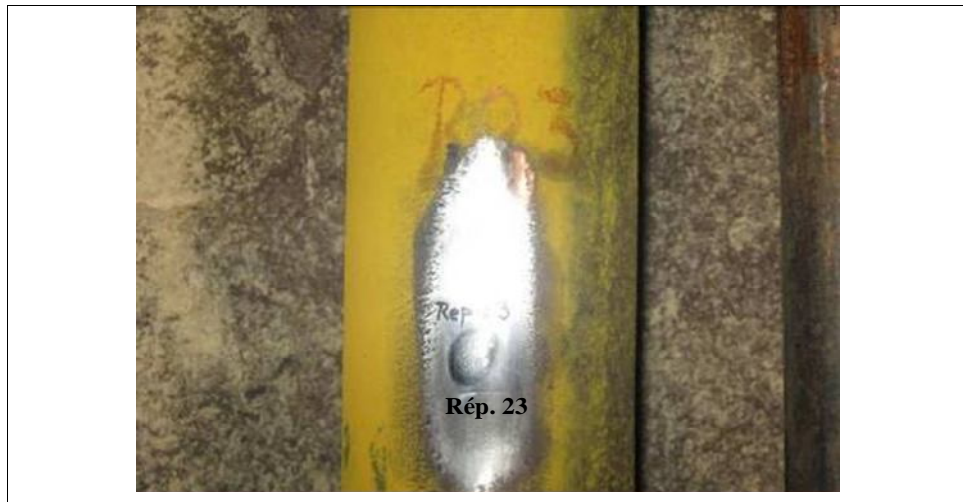
**Fig. 66 Presenta Precipitación de Carburos en los límites de granos.**



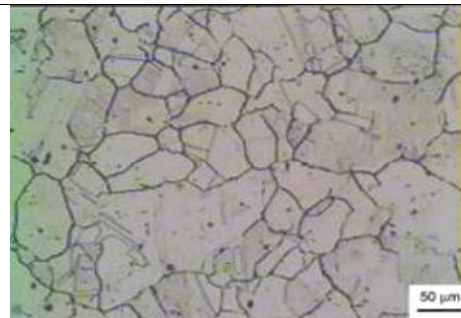
**Fig. 67 Matriz Austenítica con precipitación continua en límite de grano.**

**Figura 3.5 ANÁLISIS PUNTO 18 POR MEDIO DE RÉPLICAS**

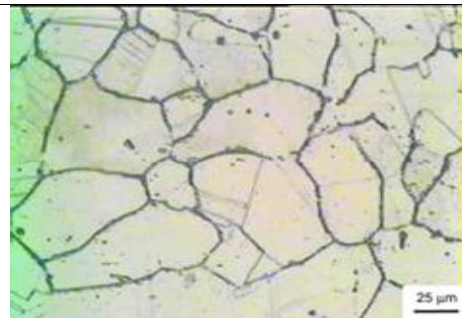
**Réplica 23- Tubo 6- Paso 2 -Cota 3 mts:** La Degradación Microestructural del Tubo de unión se encuentra en un Estado medio donde se observa precipitación de Carburos en los límites de grano, encontrándose aún operativo, recomendándose su cambio en la próxima parada general.



**Fig. 80** Ubicación en cota 3 mts. Tubo 6 Paso 2.




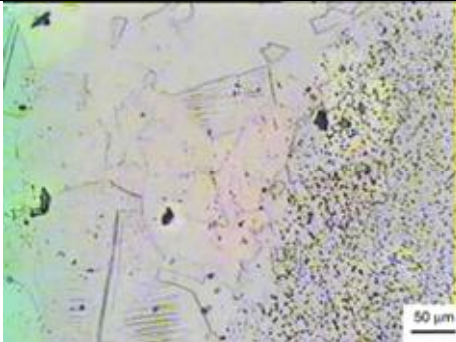
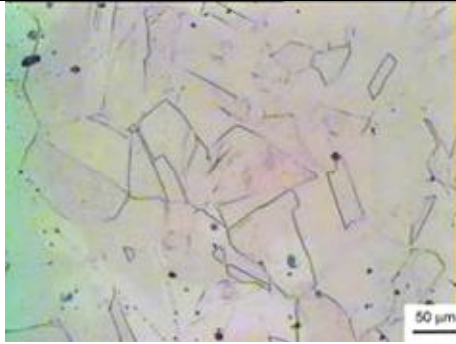
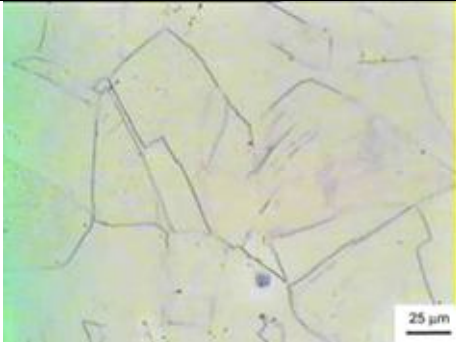
**Fig. 81** Presenta Precipitación de Carburos en los límites de granos.



**Fig. 82** Matriz Austenítica con precipitación en límite de grano.

### **Figura 3.6 ANÁLISIS 23 POR MEDIO DE RÉPLICAS**

**Réplica 34 - Unión soldada Codo-Tubo Paso 1-Tubo 6 -Cota 0 mts:** La micro estructura del cordón de soldadura como la Zona afectada por el Calor (ZAC) no presenta anomalías micro estructurales. En cuanto a la Degradación Micro estructural del material base del Tubo 6 no se observa precipitación de Carburos en los límites de grano, encontrándose operativo.

	
<p><b>Fig. 114</b> Ubicación zona Quemadores-Piso.</p>	<p><b>Fig. 115</b> Zona afectada por el calor.</p>
	
<p><b>Fig. 116</b> No presenta Precipitación de Carburos en los límites de granos.</p>	<p><b>Fig. 117</b> Matriz Austenítica sin precipitación de Carburos .</p>

**Figura3.7 ANÁLISIS PUNTO 34 POR MEDIO DE RÉPLICAS**

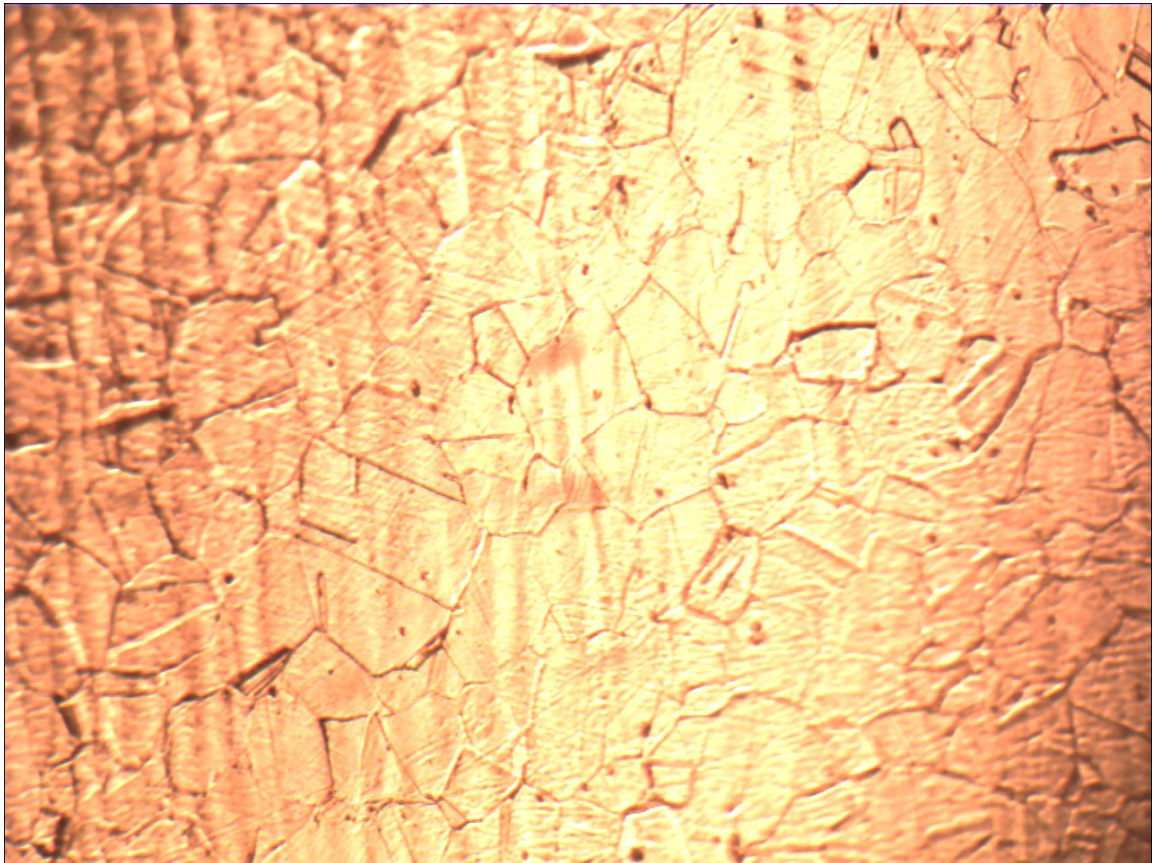
### **3.2. Microscopio Portátil**

Al dar los resultados por esta técnica, se detallará en número de replica (especificado en el plano), así como un análisis cualitativo de lo obtenido.

Se darán los resultados de los mismos puntos que se mostraron para las Réplicas Metalográficas.

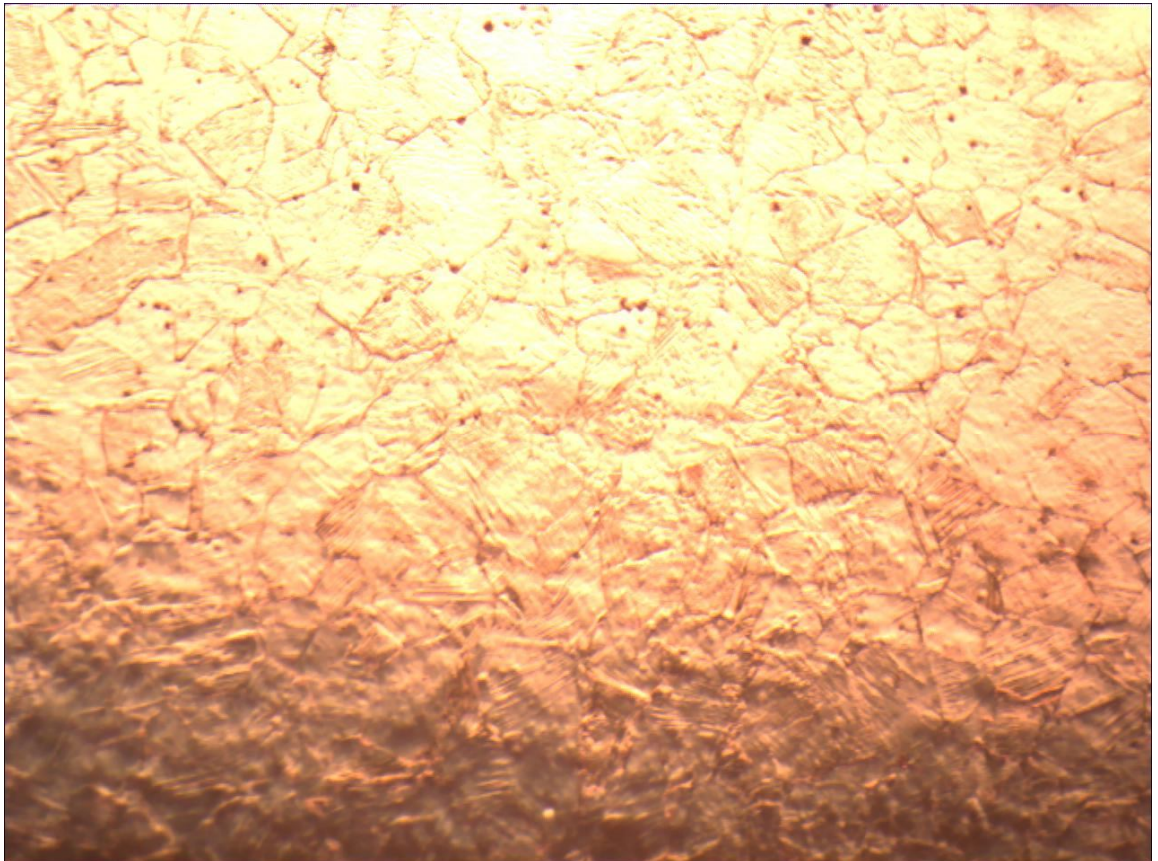


**Punto 1.** La Degradación Micro estructura no presenta precipitación de Carburos en los límites de grano.



**Figura 3.8** ANÁLISIS PUNTO 1 POR MEDIO DE MICROSCOPIO PORTÁTIL. AUMENTO A 250X

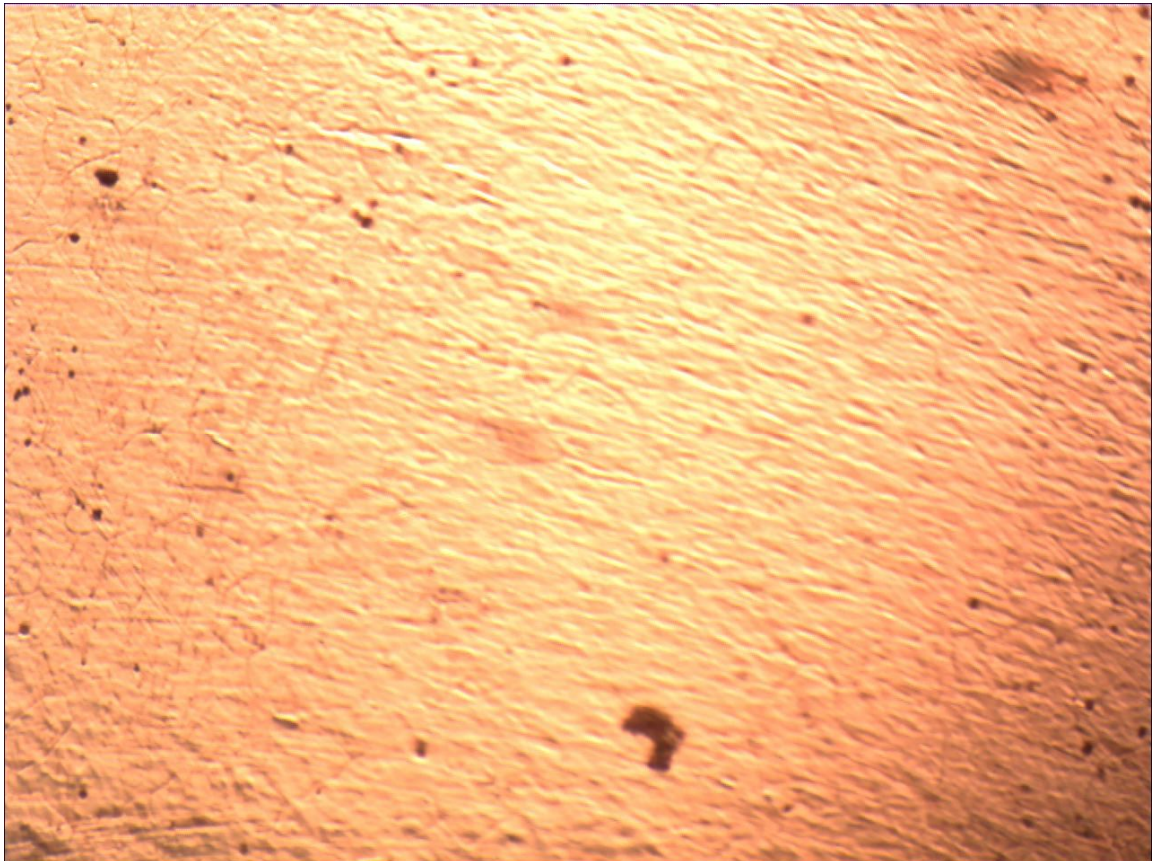
**Punto 4.** La Degradación Micro estructural no presenta precipitación de Carburos en los límites de grano.



**Figura 3.9** ANÁLISIS PUNTO 4 POR MEDIO DE MICROSCOPIO PORTÁTIL. AUMENTO A 250X



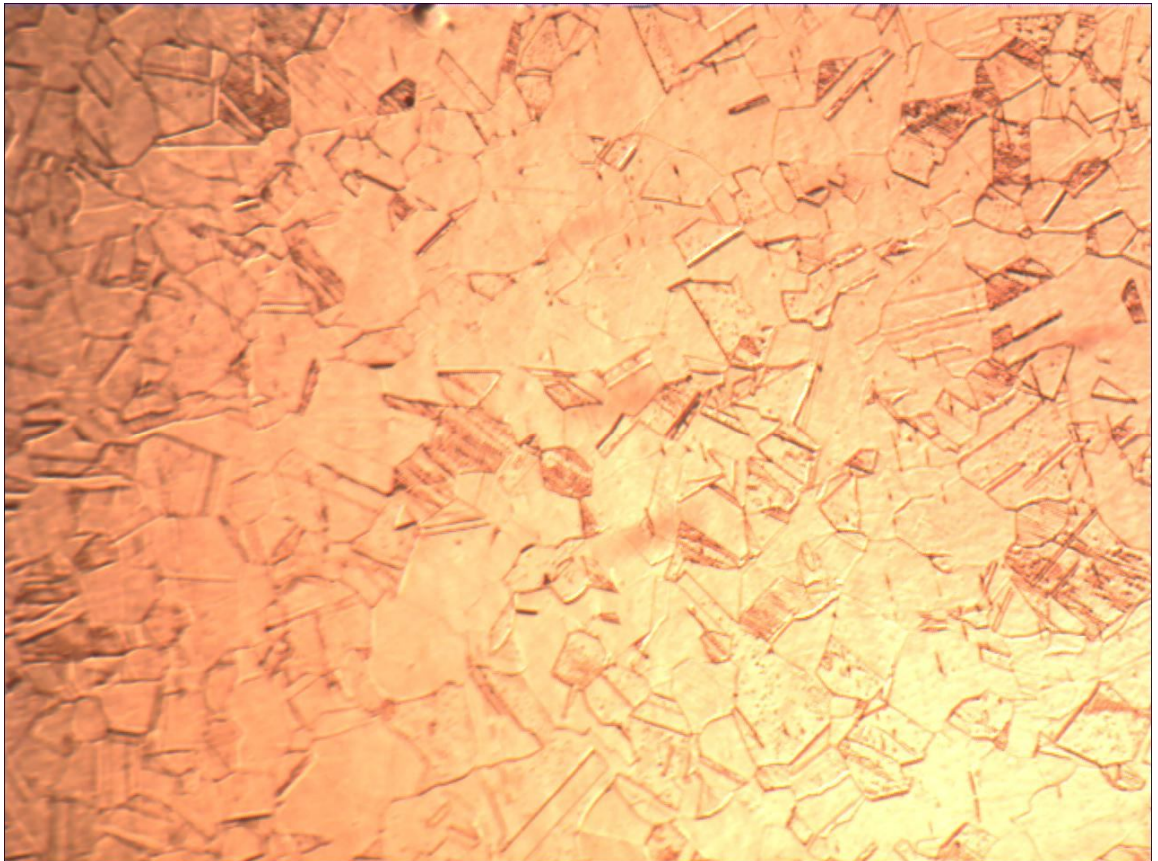
**Punto 5.** No se puede dar un análisis cualitativo del estado microestructural.



**Figura 3.10** ANÁLISIS PUNTO 5 POR MEDIO DE MICROSCOPIO PORTÁTIL. AUMENTO A 250X

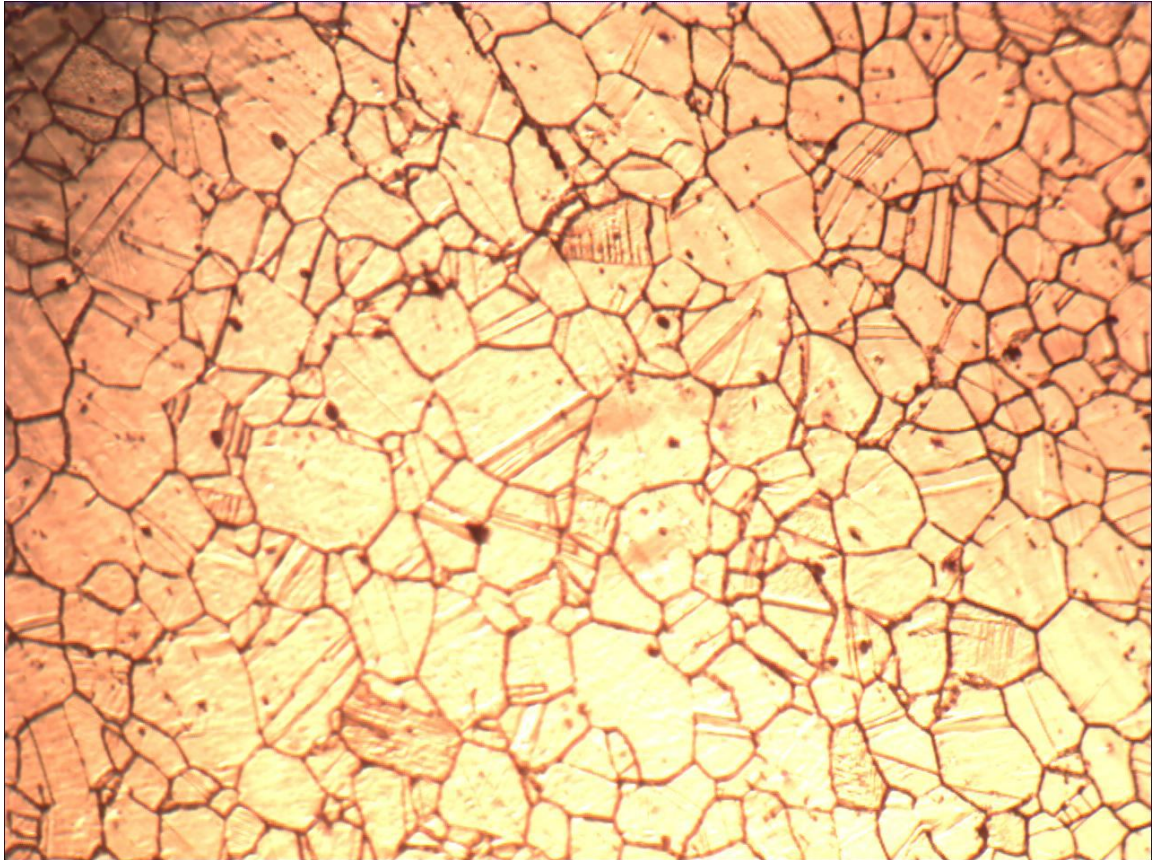


**Punto 17.** La Degradación Micro estructural no presenta precipitación de Carburos en los límites de grano. Perlita laminar.



**Figura 3.11** ANÁLISIS PUNTO 17 POR MEDIO DE MICROSCOPIO PORTÁTIL. AUMENTO A 250X

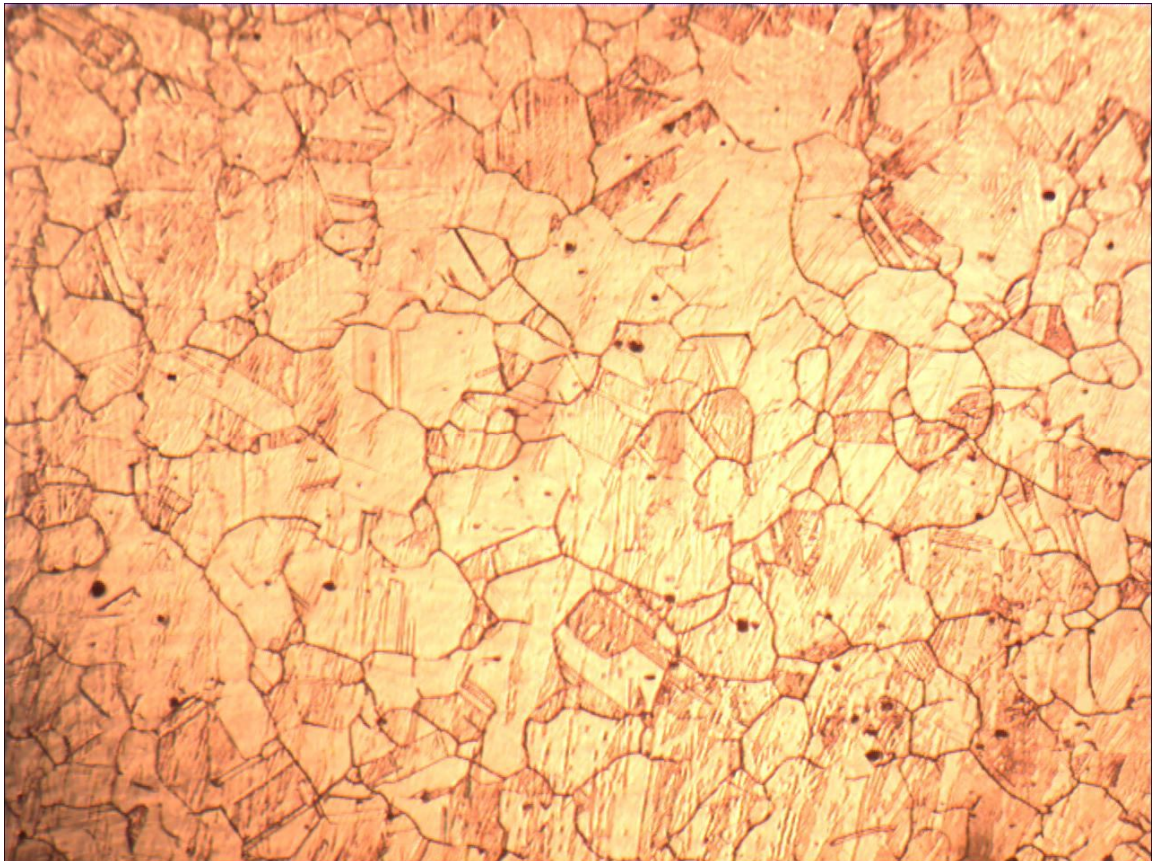
**Punto 18.** Presenta precipitación de carburos en los límites de grano.



**Figura 3.12** ANÁLISIS PUNTO 18 POR MEDIO DE MICROSCOPIO PORTÁTIL. AUMENTO A 250X

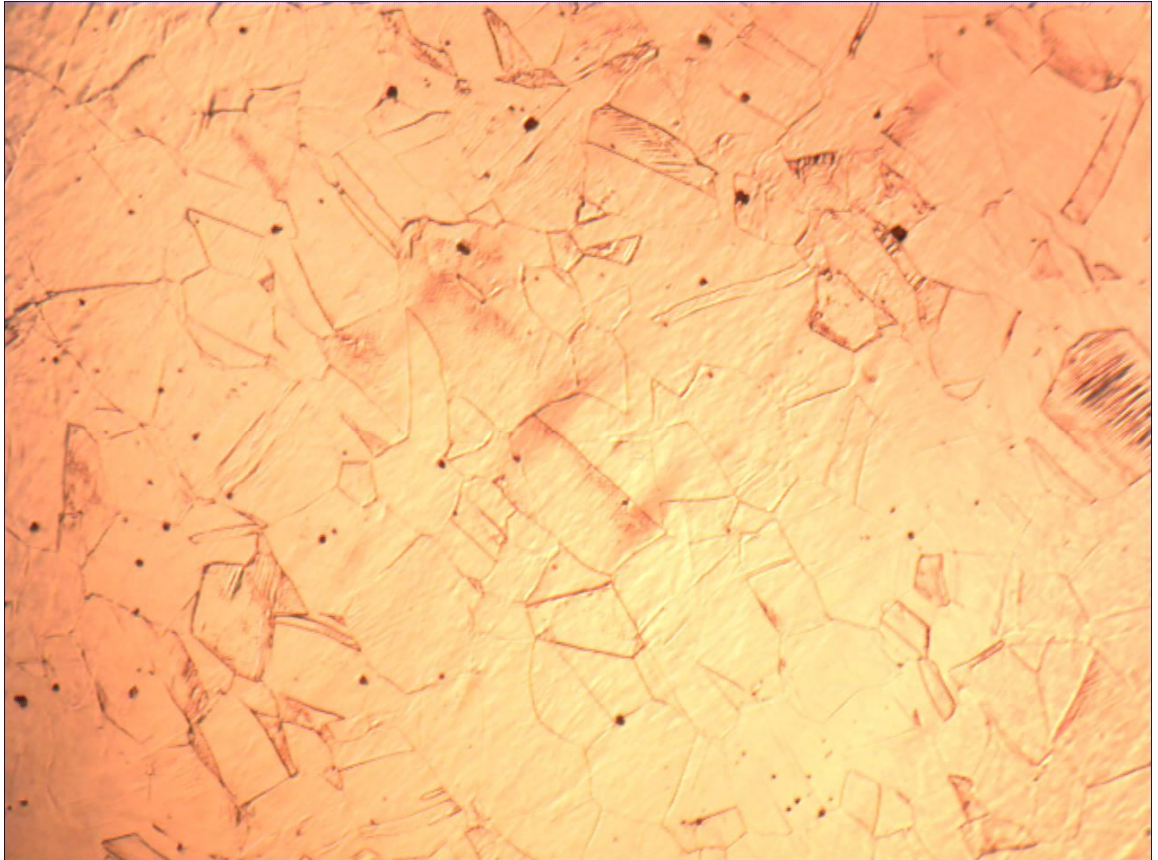


**Punto 23.** Presenta precipitación de carburos en los límites de grano.



**Figura 3.13** ANÁLISIS PUNTO 23 POR MEDIO DE MICROSCOPIO PORTÁTIL. AUMENTO A 250X

**Punto 34.** No presenta precipitación de carburos en los límites de grano.



**Figura 3.14** ANÁLISIS PUNTO 34 POR MEDIO DE MICROSCOPIO PORTÁTIL. AUMENTO A 250X

## **Análisis de los resultados**

Al tener la topografía de la micro estructura copiada en la réplica, ésta puede ser analizada con mayor profundidad ya que en el laboratorio se dispone del microscopio de banco con el cual se pueden hacer mayores magnificaciones de la micro estructura, lo que no es muy factible con el Microscopio Portátil.

Al querer realizar un análisis cuantitativo de una micro estructura, resulta más conveniente utilizar las Replicas Metalográficas, ya que como se puede observar en las Metalografías obtenidas, dan un mayor area de topografía para realizar el conteo de los granos.

Al analizar superficies donde se encuentren diferentes fases, o un cordón de soldadura, las Replicas Metalográficas tienen ventaja sobre el Microscopio Portátil, ya que con la réplica se pueden analizar con detalle toda la zona copiada, lo que no se puede con el microscopio, ya que éste, cuando se lo coloca en un punto específico y se enfoca, al querer desplazarlo se pierde la calidad de la imagen y hay que volver a regularlo.

Si la superficie posee concavidad o convexidad exagerada, el uso de la Replica Metalográfica es más conveniente (si se utiliza la hoja de acetato son soporte), ya que ésta al ser flexible, permite un manejo preciso para su observación, ya que se la puede aplanar sin que la topografía copiada pierda fidelidad. No ocurre lo mismo con el microscopio, ya que si la superficie es irregular, al tener una base plana (como es el caso del microscopio usado en este Proyecto), es difícil poder enfocar de manera correcta la micro estructura.

Al trabajar en espacios tales como: incómodos, confinados de gran altura, el uso de las Replicas es más factible, ya que puede ser realizado por una sola persona, con relativa facilidad a pesar de un medio con dificultades, a diferencia del Microscopio, ya que para este se necesita mas de un operador para extraer las metalografías, además de que si el espacio es incomodo o de altura, se debe tener mucho cuidado de no golpear el microscopio, dejar caerlo, o perder sus piezas.

Si algún proyecto requiere de una toma significativa de metalografías, y el factor económico juega un papel importante, el Microscopio se torna más factible, ya que no se tiene que gastar en las réplicas, además de que si no se dispone de la tecnología del Sublimado en Vacío, se tiene que

enviar las réplicas a donde exista dicha tecnología para este trabajo, y su valor sube notablemente.

Si el proyecto requiere de un Pre informe para entregar al momento de finalizar el trabajo, el uso del Microscopio es el único método a usar, ya que las metalografías se obtienen al instante, a diferencia de las Réplicas, las que hay que preparar hasta su observación.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se concluye lo siguiente:

1. Las Réplicas Metalográficas tienen cierta ventaja sobre el Microscopio Portátil en cuando a fidelidad de la micro estructura obtenida se refiere.
2. Si no se dispone de un Microscopio Portátil con buenas características, la toma de imágenes será más compleja comprometiendo la calidad de las mismas.
3. Al hacer uso del Acetato de Celulosa sin soporte, se logra un ahorro económico considerable frente al uso del Acetato de celulosa con soporte de aluminio fabricado por Struers, consiguiendo los mismos resultados.
4. Al usar Réplicas Metalográficas, el trabajo se torna más fácil en condiciones de difícil acceso que usando el Microscopio Portátil.



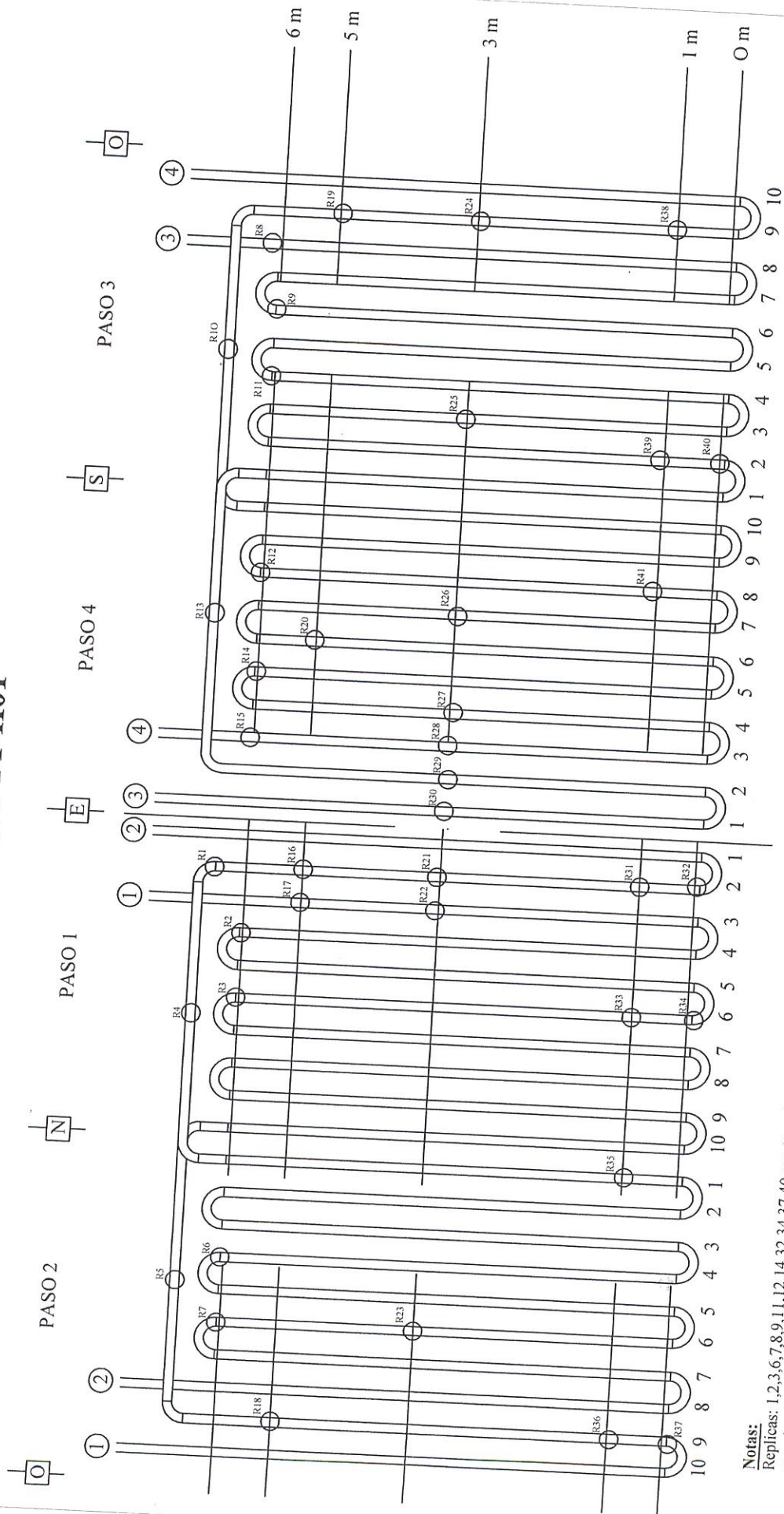
5. Si se quiere realizar un análisis cuantitativo de la micro estructura, la Replica Metalográfica resulta más factible por tener la capacidad de copiar una topografía amplia para realizar el conteo requerido de granos.
6. No se requiere demasiada experiencia al hacer uso del Microscopio Portátil para el copiado de la Micro estructura, a diferencia de las Réplicas, donde el Metalógrafo debe poseer basta experiencia y práctica para colocar, extraer y manipular la Réplica de manera correcta.
7. En cuanto a infraestructura, el Microscopio Portátil requiere un número mayor de medios técnicos y humanos.
8. Económicamente a largo plazo, el uso del Microscopio Portátil resulta más factible que las Réplicas.
9. Si se requiere de un Informe inmediato al finalizar algún proyecto que involucre estas dos técnicas, el uso del Microscopio Portátil es más factible.

Se recomienda lo siguiente:

1. Construir un transformador rectificador para realizar ataque y pulido electrolítico y contar con una infraestructura básica en el Laboratorio de Materiales de la Espol, para poder realizar análisis de componentes estructurales “in situ” dentro del campus, a manera de prácticas para los estudiantes.
2. En caso de querer contar con la técnica de Replicas Metalográficas dentro de la infraestructura para el laboratorio, adquirir una Campana de Sublimado en Vacío.
3. Realizar cursos para analizar con más profundidad el uso y las ventajas de las Replicas Metalográficas para estudiar componentes en campo.
4. Realizar una investigación para la compra de Acetato de Celulosa de 50  $\mu\text{m}$  de espesor para el Laboratorio de Materiales de la Espol. El uso de este tipo de material genera un ahorro monetario considerable frente a otro tipo de réplicas que se pueden encontrar en el mercado.

# APÉNDICE A

# HORNO P1-H01



**Notas:**  
Replicas: 1,2,3,6,7,8,9,11,12,14,32,34,37,40 son tomadas en union soldada tubo-codo.



## **BIBLIOGRAFIA**

1. Calvo F. A., Metalografía Práctica, 1972.
2. Combustion Engineering Inc, Remaining Life Estimation of Boiler Pressure Parts.
3. L. H. Van Vlack, Materiales para Ingeniería, 1973.
4. Metals Handbook, Volume 9, Metallography, 2004.
5. Montero Ricardo, Curso Réplicas Metalográficas.
6. Ovejero García José, Réplica sus Aplicaciones, Universidad Nacional de General San Martín (Argentina), Maestría en Ciencia y Tecnología de Materiales, 1998.
7. Sturla – Castellano, Metalografía Microscópica, 1951.