

---

# ***O ENSAIO METALOGRAFICO NO CONTROLE DA QUALIDADE***

---

**André Luís de Brito Baptista**

UFF / EEIMVR - Laboratório de Metalografia

**Ângelo Rosestolato Soares**

UFF / EEIMVR - Sistemas Computacionais

**Ivaldo Assis do Nascimento**

Spectru Ltda - Divisão Instrumental Científico

# ÍNDICE

O ENSAIO METALOGRÁFICO NO CONTROLE DE QUALIDADE

NORMAS UTILIZADAS EM METALOGRAFIA

MACROGRAFIA

EXTRAÇÃO E SELEÇÃO DA AMOSTRA

CORTE

EMBUTIMENTO

LIXAMENTO

POLIMENTO

ATAQUE

INCLUSÃO

MICROCONSTITUÍNTES

TEXTURAS

METALOGRAFIA QUANTITATIVA (TAMANHO DE GRÃO E PROPORÇÃO DE FASES)

AVALIAÇÃO DO TEOR DE CARBONO PELA MICROGRAFIA

MICRODUREZA

## *O ensaio metalográfico no controle de qualidade*

Genericamente o Controle de Qualidade de um produto metalúrgico pode ser:

- dimensional
- estrutural

Dimensional, como o próprio nome indica, é aquele que se preocupa em controlar um determinado produto em geral acabado ou semi-acabado, quanto às suas dimensões físicas. Este campo também é denominado de Metrologia.

O controle estrutural preocupa-se com o material que forma a peça, sua composição, propriedade, estrutura, aplicação, etc. Classifica-se em:

- a) Ensaios físicos: destrutivos e não destrutivos
- b) Análise química.
- c) Ensaio metalográfico.
- d) Ensaios especiais.

### **Ensaio Metalográfico**

#### **Verificações elementares**

Para se ter uma idéia aproximada da natureza de certos materiais metálicos ou de como certas peças foram fabricadas, pode-se usar os seguintes exames elementares:

- a) Aspecto da superfície.
- b) Aspecto da fratura.
- c) Ação da lima.
- d) Centelhas ao esmeril.
- e) Atração pelo imã, sonoridade, etc.

Estes exames elementares são rápidos, econômicos e dão ao analista experimentando uma série de informações básicas.

Entretanto, com o incremento da tecnologia, um controle mais severo tornou necessário o exame em laboratório, com outros meios, ou seja, com máquinas, aparelhos ou instrumentos que forneçam, de preferência, um valor numérico que servirá para o confronto com normas e especificações.

Este procedimento constitui um critério justo e seguro na avaliação das qualidades dos materiais, contribuindo para a correção dos defeitos e para melhoria da qualidade. Ambos os controles, na oficina e no laboratório, se completam perfeitamente.

### **A macro e a micrografia**

O exame metalográfico procura relacionar a estrutura íntima do material às propriedades físicas, ao processo de fabricação, etc. Pode ser:

- Macrográfico

- Micrográfico

## Macrografia

Consiste no exame do aspecto de uma superfície plana seccionada de uma peça ou amostra metálica, devidamente polida e atacada por um reagente adequado. Por seu intermédio tem-se uma idéia de conjunto, referente à homogeneidade do material, à distribuição e natureza de falhas, impurezas; ao processo de fabricação. Para a macrografia o aço é o material de maior interesse. Algumas das heterogeneidades mais comuns nos aços são as seguintes:

- vazio, causado pelo resfriamento lento;
- segregação, causadas pelas impurezas e outros metais;
- dendritas, formação de grãos de vários tamanhos;
- trincas, devido às tensões excessivas no resfriamento.

**Técnica macrográfica** – o primeiro passo consiste em saber qual o fim visado e o que se deseja obter. Para isto necessita-se de um corpo de prova escolhido e preparado com critério. A técnica do preparo de um corpo de prova de macrografia abrange as seguintes fases:

**Escolha e localização a ser estudada**, a qual ficará a critério do analista, que será guiado na sua escolha pela forma, pelos dados que se quer obter e por outras considerações da peça em estudo.

Um corte transversal permitirá verificar:

- a natureza do material (aço, ferro fundido);
- seção homogênea ou não;
- forma e intensidade da segregação;
- posição, forma e dimensões das bolhas;
- forma e dimensões dos dendritas;
- existência de restos do vazio;
- profundidade da têmpera, etc.

Um corte longitudinal será preferível quando se quiser verificar:

- se uma peça é fundida, forjada ou laminada;
- se a peça foi estampada ou torneada;
- solda de barras;
- extensão de tratamentos térmicos superficiais. Etc.

**Preparação de uma superfície plana e polida na área escolhida** – compreende duas etapas:

a) O corte que é feito com serra ou com cortador de disco abrasivo adequado; quando este meio não é viável, recorre-se ao desbaste, que é praticado com esmeril comum até atingir a região que interessa. Todas estas operações deverão ser levadas a cabo com o devido cuidado, de modo a evitar encruamentos locais excessivos, bem como aquecimento a mais de 100°C em peças temperadas, pois estes fenômenos seriam mais

tarde postos em evidência pelo ataque, adulterando a conclusão do exame.

b) O polimento é iniciado com lixa, em direção normal aos riscos já existentes; passa-se sucessivamente para lixa de granulação mais fina, sempre mudando a direção de 90°. Deve-se tomar cuidados especiais para não arredondar as arestas dos corpos de prova. Após cada lixamento a superfície deve ser cuidadosamente limpa a fim de que o novo lixamento não fique contaminado com resíduos do lixamento anterior.

Neste estágio, a superfície denota por vezes algumas particularidades tais como:

- restos do vazão;
- trincas, grandes inclusões;
- porosidades, falhas em soldas.

**Ataque da superfície preparada** – Para por em evidência outras heterogeneidades, é indispensável proceder-se a um ataque comparativo químico. De acordo com o material e com a finalidade do exame, têm-se diversos reativos:

- reativo de iodo;
- reativo de ácido sulfúrico;
- reativo de ácido clorídrico;
- reativo Fry;
- reativo Heyn.

## Micrografia

Consiste no estudo dos produtos metalúrgicos, com o auxílio do microscópio, permitindo observar a granulação do material, a natureza, forma, quantidade e distribuição dos diversos constituintes ou de certas inclusões, etc. Estas observações são de grande utilidade prática.

**Técnica micrográfica** – a técnica do preparo de um corpo de prova de micrografia abrange as seguintes fases:

### Preparação da amostra

O primeiro passo para a obtenção de um bom resultado é a escolha e preparação adequada da amostra. Esta deve representar a peça em estudo; para isto não deve sofrer qualquer alteração em sua estrutura.

Um aquecimento demasiado (acima de 100°C), deformações plásticas (em metais moles), ou a formação de novos grãos por recristalização devem ser evitados. A área da amostra a ser examinada não deveria exceder de 1 a 2 cm<sup>2</sup>, sob pena de se ter um tempo de preparação excessivo. Qualquer preparação depende igualmente do material da amostra; a técnica de lixamento e polimento deve ser adaptada à mesma.

#### 1. Embutimento da amostra

A necessidade do embutimento de amostras metalográficas é de grande importância em micrografia, pois além de facilitar o manuseio de peças pequenas, evita que corpos de prova com arestas rasguem a lixa e o pano de polimento, bem como evita o abaulamento dos corpos de prova durante o polimento, o que influencia bastante na observação microscópica (facilita a observação dos bordos, que ficam planos). O embutimento com resinas sintéticas apresenta ainda as seguintes vantagens:

- a) são neutras em relação as soluções de ataque;
- b) impedem a infiltração das soluções em poros e fendas;
- c) a dureza pode ser adaptada à dureza do material a ser embutido, através de aditivos específicos.

O embutimento pode ser:

- a) a frio – quando se usa resinas sintéticas de polimerização rápida;
- b) a quente – quando a amostra é embutida em materiais termoplásticos por meio de prensas.

## 2. Lixamento ou pré-polimento

O lixamento é essencialmente o processo de preparação de uma superfície lisa e plana da amostra metalográfica para o subsequente polimento. Para isto, começa-se por lixar a amostra em lixas de granulação cada vez menor, mudando de direção (90°) em cada mudança de lixa até desaparecerem os traços da lixa anterior.

De acordo com a dureza da amostra, da pressão do trabalho e da velocidade de lixamento surgem deformações plásticas de toda a superfície por amassamento e um aumento de temperatura. Estes fatores devem ser evitados ao máximo, pois podem dar origem a uma imagem falseada. Inclusões duras se desgastam menos; após um certo tempo são arrancadas da superfície e a depressão resultante é preenchida com pó ou então exageradamente ampliada. Por isso o requerimento primordial da técnica micrográfica de lixamento é:

- a) Escolha adequada do material de lixamento em relação à amostra e ao tipo de exame final;
- b) A superfície deve estar sempre rigorosamente limpa isenta de líquidos e graxas que possam provocar reações químicas na superfície.
- c) Na mudança de lixas deve-se limpar perfeitamente a superfície da amostra.
- d) Riscos profundos que surgiram durante o lixamento, de preferência devem ser eliminados por novo lixamento, pois um polimento demorado em geral não resolve.
- e) Metais diferentes não devem ser lixados sobre a mesma lixa.

O lixamento pode ser:

- a) seco: a amostra é lixada diretamente sobre a superfície da lixa;
- b) úmido: este processo facilita o lixamento, evitando aquecimento e a formação de poeira no ar;

c) manual: quando a amostra é trabalhada pelo analista diretamente sobre a lixadeira;

d) automático: o trabalho monótono de lixamento é substituído por este processo. Diversas amostras são presas em suportes e lixadas sobre a ação de cargas variáveis. Pode-se assim comparar diversas amostras sobre as mesmas condições. As lixas normalmente são de carbetto de silício, com granulação classificada em grupos. O tamanho dos grãos diminui com o aumento deste número. Aconselha-se sempre usar lixas do mesmo fabricante, pois uma numeração idêntica não é uma garantia suficiente para se obter os mesmos resultados. O tratamento diferente da matéria-prima e, principalmente, variação do teor de óxido de ferro, são as causas destas diferenças.

### 1. Polimento

Consiste na obtenção de uma superfície isenta de risco, do modo a se obter uma imagem clara ao microscópio. Para isto, inicia-se por polir a amostra com material de granulação cada vez menor. Para se obter uma superfície perfeitamente polida, os seguintes cuidados devem ser observados:

a) Escolha adequada do material de polimento em relação em relação à amostra e ao tipo de exame final.

b) A superfície deve estar sempre rigorosamente limpa, isenta de poeira de vestígio do polimento anterior, a fim de não provocar riscos.

c) Na mudança dos panos ou feltros de polimento, deve-se limpar perfeitamente a superfície da amostra.

O polimento pode ser:

a) *mecânico* – quando se usa uma politriz fixa ou motorizada, apresentando esta última geralmente velocidade variável. O polimento mecânico pode ser ainda manual, quando a amostra é trabalhada manualmente no disco de polimento; e automático quando a amostra são fixadas em dispositivos especiais e polidas sobre a ação de cargas variáveis. Como o material de polimento tem-se óxido de alumina ou alumina (natural ou sintética), óxido de cromo, pasta de diamante os quais são aplicados sobre panos especiais ou feltros. No caso da pasta de diamante, esta fixa-se no pano e o mesmo pode ser regenerado de tempos em tempos eliminando-se o material retirado das amostras.

b) *eletrolítico* – neste processo, descoberto por Jacquet em 1935, as irregularidades de superfície são alisadas quando a amostra funciona como ânodo dentro de um banho eletrolítico. Sendo a distância no local de protuberâncias, entre ânodo e cátodo, inferior àquele existente no local de depressões, a passagem da corrente faz-se com maior facilidade, gastando-se mais estes pontos; obtém-se assim uma superfície plana. As vantagens do processo são economia de tempo e de trabalho e a não formação de camadas superficiais deformadas (principalmente para metais moles, aço inoxidável austeníticos). Apesar de ter sido recebido com desconfiança em relação aos materiais heterogêneos, o processo

desenvolveu-se também para estes, pois o ataque desigual da superfície geralmente não tem grande importância.

c) *Mecânico eletrolítico* – este pode ser alternado, passando da pasta de diamante ao processo eletrolítico, ou combinado. Neste caso tem-se o disco giratório (cátodo) mergulhado no eletrólito; a amostra funciona como ânodo. Sobre o disco tem-se ainda a pasta especial para o polimento.

*A escolha do tipo de polimento* – Os materiais podem ser divididos em três grupos principais de acordo com o método de polimento mais indicado:

a) *Materiais homogêneos comuns (aço, cobre, etc.)*

Para estes tipos de materiais usa-se o polimento eletrolítico, podendo ainda ser usado o polimento mecânico (pasta de diamante).

b) *Materiais heterogêneos (ferro fundido, alumínio e ligas)*

Este grupo de materiais pode normalmente ser melhor polido por meio do polimento mecânico (método do diamante). Porém, deve-se dar um tratamento especial durante o polimento mecânico do alumínio e suas ligas.

c) *Metais especiais ( metais preciosos, tungstênio, ligas de cobre, etc.)*

Para este grupo de materiais, o polimento mais indicado é o polimento eletro-mecânico.

#### *5. Ataque da superfície preparada*

O ataque é feito agitando-se a superfície polida mergulhada no reativo posto numa pequena cuba. A duração do ataque depende da concentração de reativo e da natureza e textura da amostra. Em média, a duração do ataque para ferro fundido e aços comuns é de 5 a 15 segundos. Após o ataque lava-se imediatamente a superfície atacada com álcool e em seguida efetua-se a secagem, passando-se primeiramente um pequeno chumaço de algodão umedecido com álcool e depois um jato de ar quente à superfície.

#### *Reativos comumente usados*

- Solução de ácido nítrico a 1% em álcool etílico – Nital.
- Solução de ácido pícrico a 4% em álcool etílico – Picral.
- Solução de picrato de sódio.



## *Normas Utilizadas em Metalografia*

E 1181 – 87	Characterizing Duplex Grain Sizes
E 1077 – 91	Descarburization of Steel Specimens, Estimating the Depth of
E 930 – 92	Grain Observed, Largest, in a Metallographic Section (ALA Grain Size), Estimating
E 1382 – 91	Grain Size, Average, Using Semiautomatic and Automatic Image Analysis
A 247–67 (1990)	Graphite in Iron Castings, Evaluating the Microstructure of
E 1245 – 89	Inclusion Content of Steel and Other Metals by Automatic Image Analysis, Determining
E 1122 – 92	Obtaining JK Inclusion ratings Using Automatic Image Analysis
E 768– 80 (1985)	Specimens for Automatic Inclusion Assessment os Steel, Preparing and Evaluating
E 175	Terminology of Microscopy
E 456	Terminology Relating to Quality and Statistics
ASTM E 44	Definitions of Terms Relating to Heat Treatment of Metals
ASTM E 1268 – 88	Microstructures, Assessing the Degree of Banding or orientation of
ASTM E 340 – 87	Macroetching and Alloys
ASTM E 407 – 70	Microetching Metal and Alloys
ASTM E 384 – 89	Microhardness of Materials
ASTM E 3 – 80	Preparation of Metallographic Specimens
ASTM E 112 – 88	Grain Size, Average, Determining
ASTM E 45 – 87	Inclusion Content of Steel, Determining
ASTM E 562 – 89	Volume Fraction by Systematic Manual Point Count, Determining

ASTM E 7 – 92b	Metallography
ASTM E 883 – 86	Metallographyc Photomicrography
DIN 17.014	Heat Treatment of Ferrous Metals
ABNT – 8108	Ataque com Reativos Metalográficos em Ligas Não Ferrosas
ABNT – 9208	Determinação dos Níveis de Microinclusões
ABNT – 7555	Revelação do Grão Austenítico
ABNT – 11568	Determinação de Tamanho de Grão de Materiais metálicos
ABNT – 6339	Determinação da Temperabilidade Jominy em Aço
ABNT – 8653	Metalografia e Tratamentos Térmicos e Termoquímicos das Ligas Ferro – carbono
ABNT MB03218	Aço – Análise por Macroataque
ABNT MB00747	Aço - Determinação de Microinclusões pelo Método de Fratura Azul
ABNT MB01101 – II	Aço Fundido e Ferro Fundido – Amostragem e Preparação de amostras
ABNT MB01101 – I	Aço fundido e ferro Fundido – Coleta de Amostras
ABNT PB00578	Aço Inoxidável – Tratamento Térmico
ABNT MB03189	Aços – Determinação da Profundidade de Descarbonetação
ABNT MB00573 – II	Amostragem e Preparação de Amostras de Ferro – Gusa
ABNT NB 1227	Amostragem e Preparação de Amostras de Aços Forjados
ABNT MB00573 - I	Coleta de Amostras de Ferro – Gusa
ABNT MB00463 – I	Coleta de Amostras de Ferroligas e outras Adições Metálicas
ABNT MB03544	Coque – Determinação Quantitativa da Textura por Microscopia Óptica
ABNT TB00406	Coque – Termos Relativos à Análise de Textura por Microscopia Óptica – Terminologia

ABNT NB01232	Ensaio Visual em Soldas, Fundidos, Forjados e Laminados
ABNT MB01342	Ferro Fundido – Avaliação da Tendência ao Coquilhamento
ABNT MB01511	Ferro Fundido – Determinação do Número e Tamanho das Células Eutéticas
ABNT MB01512	Ferro Fundido Nodular e Ferro Fundido Maleável – Contagem de Nódulos de Grafita
ABNT NB00309	Guia para Inspeção por Amostragem no Controle e Certificação de Qualidade
ABNT MB01510	Inoculante para Ferro Fundido – Avaliação da Perda de Eficiência
ABNT NB01295	Lavagem, Preparo e Esterilização de Materiais em Laboratório
ABNT EB01151	Morfologia de Grafita em Ferro Fundido
ABNT NB00671	Planos de Amostragem e Procedimentos para Qualificação de Componentes, baseados na Taxa de Falhas
ABNT TB00245	Qualidade
ABNT PB00671	Tabelas de Valores da Dureza Vickers (HV) para Materiais Metálicos
ABNT PB00672	Tabelas de Valores de Dureza Brinell (HB) para Materiais Metálicos
NBR 13790	Terminologia – Princípios e Métodos – Harmonização de Conceitos e Termos
NBR 13187	Tratamentos Térmico e Termoquímico de Ferro Fundido
NBR 13789	Terminologia – Princípios e Métodos – Elaboração e Apresentação de Normas e Terminologia
NBR NMISO 03713	Ferroligas – Amostragem e Preparação de Amostras – Regras Gerais
NBR 13286	Aço para Cementação – Avaliação Microscópica de Estrutura Bandeada

# *Macrografia*

## **OBJETIVO**

Obter uma informação ampla da peça, facilitar a micrografia e determinar a região crítica para análise detalhada.

### **1) PREPARAÇÃO DA AMOSTRA**

- a) escolha da secção a ser estudada;
- b) preparação da superfície ( lixamento);
- c) ataque com reagente químico adequado;
- d) interpretação dos resultados;
- e) documentação;

#### **2.1) Escolha da secção:**

- Transversal

- Naturezas do material;
- Homogeneidade da secção;
- Intensidade da segregação;
- Forma de disposição das bolhas;
- Existência de restos de vazios;
- Profundidade e uniformidade da carbonetação;
- Profundidade de descarbonetação;
- Profundidade de têmpera;
- Inclusões;

- Longitudinal

- processos de fabricação;
- análise de cordão de solda;
- caldeamento;

### **3) PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE**

- Cuidados :

- Mudança da estrutura;
- Aquecimento não superior a 100°C;
- Pressão excessiva ( encruamento)

- Lixamento :

100, 200, 400, 500, 800 máx.

- Ataque químico:

Em função de variações estruturais ou químicas o material vai ser mais ou menos atacado.

Pode ser quanto a forma:

- Imersão
- Aplicação
- Impressão direta

Quanto ao tempo:

- Longo ou profundo
- Rápido ou superficial

Quanto a temperatura:

- A frio
- A quente

- Interferem no comportamento do ataque:

- Variação da composição do material ( concentração de impurezas);
- Variação de estrutura ( deformação a frio);
- Variação de cristalização ( granulometria grosseira, textura acicular, gradiente térmico);

#### **4) INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS**

- Quanto a estrutura atacam mais:

- Regiões encruadas;
- Regiões temperada ou temperadas e revenidas;
- Granulação grosseira;

- Quanto a composição química atacam mais:

- Regiões com maior teor de carbono;
- Regiões com maior teor de fósforo;
- Regiões com maior quantidade de inclusões não metálicas, principalmente enxofre e fósforo;

## 5) IDENTIFICAÇÃO

Técnica de polimento, repolimento e ataque, serve para definir o defeito:

- Regiões ricas em carbono, desaparecem com um leve repolimento;
- Regiões ricas em impurezas, principalmente inclusões de S e P, sofrem um ataque profundo escurecendo mais, permanecendo assim mesmo após um leve polimento;
- Regiões com granulação grosseira, aparecem como mosaicos de lado escuro ( parte clara e parte escura);
- Regiões com têmpera branda ou temperadas e revenidas, ficam mais brilhantes que o resto da amostra após um repolimento;
- Regiões encruadas, retira-se todo o ataque, com o polimento;

## 6.) REATIVO NECESSÁRIO PARA EFETUAR O ATAQUE MACROGRÁFICO

<b>S cm<sup>2</sup></b> <b>Superfície a atacar</b>	<b>V cm<sup>3</sup></b> <b>Volume do reativo</b>
6	75
12	125
18	150
24	185
30	225
36	250
42	270
48	295
54	310
60	340
95	440
125	540
150	610
190	680
220	750
250	820
280	880
310	950
340	1000
375	1090
400	1150
440	1200
470	1250
500	1300
530	1350
560	1400
600	1450
625	1500
690	1600
750	1650
810	1750
875	1850
940	1900
1000	2000

## *Extração e seleção da amostra*

### **EXTRAÇÃO DA AMOSTRA :**

Pode ser por :

- \*Quebrar ;
- \*Serrar ;
- \*Estampagem ;
- \*Usinagem ;
- \*Oxi-corte .

### **SELEÇÃO DA AMOSTRA**

#### **1) OBJETIVO**

Escolher e localizar a secção a ser estudada.

#### **2) CONDIÇÕES GERAIS:**

##### **2.1) Cuidados a Observar:**

Em qualquer hipótese é altamente prudente proceder a um exame detido da peça sob diversos pontos de vista, como o aspecto da fratura, a existência de marcas de pancadas, gripamentos, vestígios de soldas, azulamento por aquecimento, porosidades, rebarbas, trincas, polimentos locais, enferrujamento, corrosões, desgastes, marcas punçoadas, entortamentos, etc., antes de determinar cortes ou extração de amostras ou de corpos de prova.

Na apreciação dos sinais encontrados, é preciso muita atenção para não confundir aqueles que possivelmente já existiam na peça, antes do evento que deu motivo ao estudo, e que podem conduzir a alguma pista para as investigações, com os que possam ter sido ocasionados pela aplicação de ferramentas para retirar a peça de onde estava instalada, ou então, ocasionados por quedas, ou durante o transporte.

##### **2.2) Rotina da Seleção da amostra**

###### **2.2.1) Na macrografia**

A escolha e localização da secção intervém a critério do operador, que será guiado em sua escolha pela forma da peça, pelos dados que ele quer colher e por outras considerações.

Far-se-á de preferência um corte transversal, se o objetivo é verificar:

- A natureza do material: aço, ferro fundido, etc;
- Se a secção é inteiramente homogênea ou não;
- A forma e intensidade de segregação;
- A posição, forma e dimensões das bolhas;

- A forma e dimensões das dendritas;
- A existência de restos do vazio;
- Se a peça sofreu cementação, a profundidade e regularidade desta;
- A profundidade da têmpera;
- Se um tubo é inteiriço, caldeado ou soldado;
- Certos detalhes de soldas de chapas (secção transversal à solda);
- No caso de ferramentas de corte, calçadas, a espessura e regularidade das camadas caldeadas (secção perpendicular ao gume);
- A regularidade e a profundidade de partes coquilhadas de ferro fundido, etc.

Far-se-á um corte longitudinal se preferível quando se quer verificar:

- Se uma peça é fundida, forjada ou laminada;
- Se a peça foi estampada ou torneada;
- A solda de barras;
- Como se processou um caldeamento de topo;
- Eventuais defeitos nas proximidades de fraturas;
- A extensão de tratamentos térmicos especiais, etc.

### **2.2.2) Na micrografia**

A localização do corpo ou dos corpos para micrografia em peças grandes, é freqüentemente, feita após o exame macrográfico, porque, se o aspecto for homogêneo, a localização do corpo de micrografia é em geral indiferente; se porém, não for e revelar anomalias ou heterogeneidades, o observador poderá localizar corpos de prova em vários pontos, caso julgue de interesse um exame mais detalhado dessas regiões.

Quando se trata de uma peça pequena é ela diretamente seccionadas.

### **3) Amostragem**

A posição de onde é tirado um corpo de prova a fim de ser usado para um estudo metalográfico, depende do fim a que se destina o ensaio. Para atingir esse fim, os corpos de prova devem ser representativos das condições existentes. Se deve ser feito um exame geral sem o cuidado da preservação da amostra, eles podem ser tirados de qualquer parte da peça, conforme se deseje. Se a peça deve voltar ao serviço, as posições disponíveis para o exame são necessariamente limitadas. Se deve ser feito estudo de uma fratura, devem-se tomar seções do metal na vizinhança dessa fratura, de modo que estes corpos de prova ofereçam as maiores possibilidades na determinação de sua causa. Outra seção deve ser tomada a alguma distância da fratura, para fins de comparação.



Deve ser organizado um fichário com o máximo de informações sobre os ensaios realizados, incluindo ainda a localização das amostras, um número capaz de identificar a seção que foi tomada, se transversal, longitudinal ou em ângulo; a direção de laminação ou forjamento, análise química, tratamento térmico e qualquer outro dado necessário a um completo histórico.

O tamanho dos corpos de prova deve ser mantido dentro dos limites razoáveis ( 1 a 2,5 cm para o lado do quadrado ou diâmetro do círculo ). Isto é geralmente governado pela construção do microscópio, representando o espaço disponível no suporte, para exame; pela área superficial do corpo de prova, pois o tempo gasto em polir uma polegada quadrada ( 6,4 cm<sup>2</sup> ), é muito maior que o tempo necessário para o polimento de 4 corpos de prova de ½ polegada ( 12,7 mm ) de lado; e pela espessura que deve ser menor que qualquer outra dimensão, de modo que durante o seu polimento não exista tendência à produção de cantos arredondados ou facetas suplementares.

## *Corte*

### **1) OBJETIVO:**

Cortar o corpo de prova do tamanho e formato desejado.

### **2) CONDIÇÕES GERAIS**

Pode ser :

- \*Manual ;
- \*Automático ;
- \*À seco ;
- \*À úmido ;
- \*Arrancamento de cavaco ;
- \*Abrasivo .

#### Corte Abrasivo :

Discos de corte :

- \*Natureza do abrasivo ;
- \*Granulometria dos grãos abrasivos ;
- \*Natureza do material aglutinante ;
- \*Proporção abrasivo/aglutinante ;
- \*Porosidade do disco .

### **3) Material :**

Óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) ;  
Carbeto de silício (SiC) .

### **4) Precauções :**

- \*Aquecimento excessivo do material ;
- \*Introdução de deformações plásticas e mecânicas na superfície da amostra .

### **5) Indicações :**

$Al_2O_3$  para corte de materiais ferrosos :

-Aços duros e semi-duros , aços de construção , aços tratados , aços-ferramentas , aços refratários de alta tenacidade , aço carbono doce e extra-doca , aço inoxidável ferrítico e austenítico , ferro fundido maleável , etc .

SiC para corte de metais não-ferrosos e metais não-metálicos :

-Alumínio , magnésio , zircônio e suas ligas , urânio , latão , bronze , cobre e suas ligas , titânio , não-metálicos duros , rochas , refratários, cerâmicas , tungstênio , etc .

Regra básica para escolha do disco :

Corte em material duro = disco mole  
Corte em material mole = disco duro

#### **6) Refrigeração :**

Durante o processo de corte de amostras é muito importante ter um eficiente sistema de refrigeração para reduzir o aquecimento e evitar alteração da estrutura da amostra.

O líquido refrigerante utilizado, deve proporcionar lubrificação adequada para a amostra e para o disco de corte, como também evitar a corrosão da cortadora.

#### **7) Proporção lubrificante/água :**

\* Fornecedor 1:10

\* Prática 1:20 à 30

- Mais lubrificante com menos água = baixa oxidação com menor refrigeração

- Mais água com menos lubrificante = alta oxidação com alta refrigeração

Obs.: O ideal é ter baixa oxidação com boa refrigeração .

#### **8) Recomendações na operação de corte metalográfico :**

1 - Cuidar para que o armazenamento do disco de corte seja em ambiente seco.

2 - O disco de corte abrasivo é frágil e não tem boa resistência a choques mecânicos.

3 - A escolha incorreta do disco de corte pode causar queima da amostra ou o desgaste excessivo do disco abrasivo.

4 - A fixação correta do disco de corte e da amostra são fatores importantes para se evitar quebra e desgaste do disco abrasivo e também a queima da amostra.

5 - Pressão excessiva do disco de corte contra a amostra pode causar quebra ou desgaste prematuro do disco abrasivo e queima da amostra.

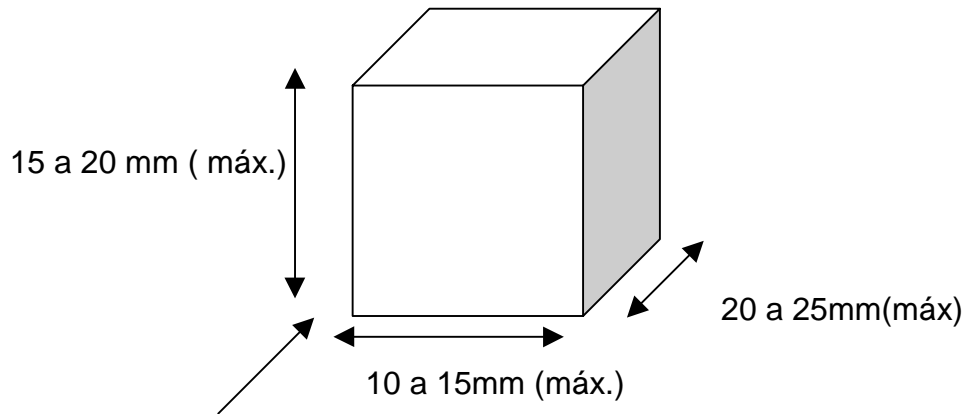
6 - Insuficiente irrigação do líquido refrigerante sobre o conjunto pode causar problemas de queima na amostra e desgaste acentuado do disco abrasivo.

7 - Depois de terminar o corte da amostra, o disco ainda está com umidade excessiva, portanto não desligue a máquina e deixe-o girando em alta velocidade, para eliminar a umidade retida. Não se deve armazenar o disco de corte abrasivo úmido.

#### **9) Dimensões de corpo de prova**

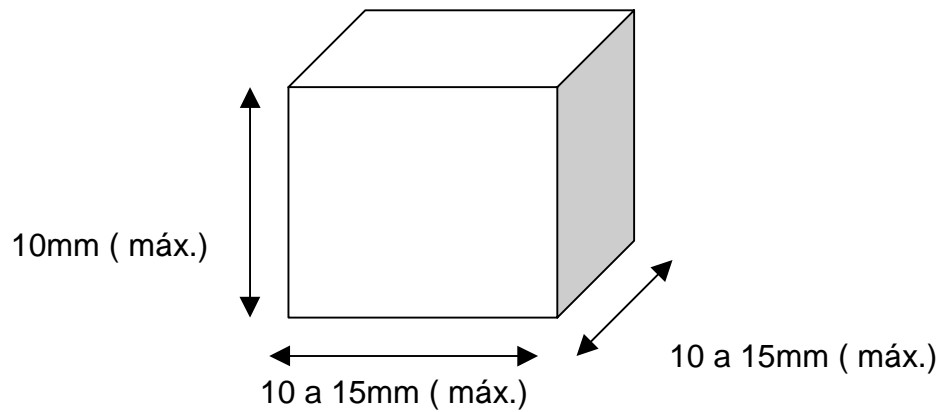
## Dimensões padronizadas para amostras Metalográficas

Amostras sem embutimento metalográfico:



Raio de 3 a 5mm  
na face de estudo

Amostras para embutimento metalográfico:



## ***Embutimento***

O embutimento da amostra para o ensaio metalográfico é de grande importância, pois além de facilitar o manuseio de peças pequenas, evita que amostras com arestas rasguem a lixa ou pano de polimento.

### **- À quente :**

As resinas para embutimento a quente, apresentam baixa viscosidade, contração, boa adesão à amostra e resistência a ação de agentes químicos, bem como propriedades mecânicas adequadas para aplicações específicas.

### **- À frio :**

São resinas auto-polimerizáveis, com propriedades químicas e mecânicas para atendimento das mais diversas necessidades de embutimento, metalográfico, mineralógico, cerâmico e petrográfico.

### **-Precauções :**

- \*Quantidade de material ;
- \*Temperatura de trabalho ;
- \*Tempo de aquecimento
- \*Lubrificação ;
- \*Pressão de trabalho ;
- \*Granulometria ;
- \*Refrigeração do equipamento .

## *Lixamento*

### **1) OBJETIVO**

Eliminar as imperfeições da superfície da amostra (ex.: oxidação, rebarbas, arranhados profundos, etc.).

### **2) CONDIÇÕES GERAIS**

Pode ser de acordo com :

- Trabalho ( mecânico ; motorizado )
- Operação ( manual , automático )
- Meio ( a seco , a úmido )

Para a preparação de uma superfície plana, isenta de deformações plásticas e mecânicas é necessário um correto lixamento, principalmente considerando-se a diversificação de materiais oriundos da moderna tecnologia industrial.

As lixas são fabricadas com três matérias primas básicas : o grão de mineral abrasivo, o adesivo ( resina ) e o costado ( suporte )

### **3) Granulometrias :**

Mais grossa       $\longrightarrow$       mais fina  
180,220,320,400,500,600,800,1000,1200 (Grana)  
Mais esforço       $\longleftarrow$       menor esforço  
(dependendo do material )

### **4) Cuidados :**

*Amostra sem embutir :*

- Quebrar sempre os cantos vivos ;
- Trabalhar com tamanho adequado .

*Amostras embutidas :*

- Arredondar as quinas inferior e superior da baquelite
- Girar 90° de uma lixa para outra ;
- Manter o esforço no centro da amostra para não criar planos .

### **5) Precauções :**

- Tempo de lixamento ;
- Lubrificação (quantidade) ;
- Granulometria correta (sequência) ;
- Pressão de trabalho (adequada a lixa e/ou material) ;

- Velocidade de trabalho (+/- 200 à 400 rpm) .

#### 6) Limpeza :

- Água corrente ;
- Ar comprimido ;
- Ultrassom (durante um máximo de 4 minutos) .

#### Procedimento para o Lixamento de Metais e Ligas Metálicas

MATERIAL	SEQÜÊNCIA DE LIXAMENTO
Alumínio e Ligas de alumínio	Lixamento em disco lapidado ou em lixas de papel com abrasivo do tipo Esmeril n <sup>o</sup> 0, 00 e 000, impregnadas com parafina dissolvida em querosene (15g de parafina por 250 ml de querosene), ou em lixa de papel com abrasivo de SiC n <sup>os</sup> 320, 400, 600, 1000 e 1200, utilizando água como lubrificante.
Cobre e ligas de cobre	Lixas de papel com abrasivo de SiC n <sup>os</sup> 320, 500, 800, 1000 e 1200, utilizando água como lubrificante.
Chumbo e ligas de chumbo	Lixamento em papel de SiC n <sup>os</sup> 320, 400, 600 e 1000 .
Estanho e ligas de estanho	Lixas de papel com abrasivo do tipo Esmeril n <sup>os</sup> 0, 00, 000 e 0000, impregnadas com parafina dissolvida em querosene (100 g de parafina por 200 ml de querosene), ou lixa de SiC n <sup>os</sup> 220, 320, 500, 800, 1000 e 1200 .
Ferros Fundidos	Lixas de SiC n <sup>os</sup> 220, 500, 800 e 100. Para maior retenção da grafita, recomenda-se utilizar lixas já bastante gastas.
Magnésio e ligas de magnésio	Lixas de papel com abrasivo do tipo Esmeril n <sup>os</sup> 0, 00, 000 e 0000 por processo úmido. Ou lixas de SiC n <sup>os</sup> 320, 500, 800, 1000 e 1200 em água.
Zinco e ligas de zinco	Lixas de SiC n <sup>os</sup> 220, 320, 400, 600, 800, 1000 e 1200 por processo úmido.

Materiais Ferrosos	Lixas de papel com abrasivo do tipo SiC n <sup>os</sup> 220, 320, 500, 800 e 1000 por processo úmido.
Molibdênio, Nióbio, Tântalo, Titânio, Vanádio e Zircônio	Lixas de papel com abrasivo do tipo SiC n <sup>os</sup> 220, 320, 500, 800 e 1000 por processo úmido.



# *Polimento*

## **1) OBJETIVO**

Deixar a superfície da amostra espelhada e sem nenhum arranhado para posterior análise.

## **2) Pode ser de acordo com :**

- Trabalho ( mecânico , motorizado )
- Operação ( manual , automático )
- Meio ( à úmido , à seco )

O grau de acabamento e a planicidade que pode ser obtida na preparação de uma superfície de um determinado material, com um abrasivo de granulometria conhecida, depende principalmente do suporte ( pano ) , que será utilizado com esse abrasivo.

Quanto mais macio for o pano, melhor será o grau de acabamento obtido . Quanto mais rígido for o pano, melhor será a planicidade obtida.

A seleção de um pano de polimento resulta de um compromisso entre os critérios expostos, que são opostos.

Por outro lado, um pano de polimento deve ter alta resistência e durabilidade, pois os abrasivos mais utilizados em metalografia são o diamante e o óxido de alumínio, e a troca constante do pano de polimento implicaria, inevitavelmente, numa perda do abrasivo que não tenha sido utilizado completamente.

## **3) Tipos de panos :**

- Feltro ;
- Veludo ;
- Nylon ;
- Seda .

Consistência :

- Duro ;
- Mole .

## **4) Abrasivos :**

- Óxido de alumínio ;
- Óxido de magnésio ;
- Óxido de cromo ;
- Diamante ;

- Sílica coloidal .

Granulometria :

- 9mm ;
- 6mm ;
- 3mm ;
- 1mm ;
- 0,25mm ;
- 0,1mm .

Forma :

- \* Pasta , pó , solução , spray .

### **5) Lubrificantes :**

- Óleos minerais ;
- Água ;
- Querosene ;
- Parafina .

### **6) Precauções :**

- Velocidade de polimento (+/- 100 à 150 rpm) ;
- Tempo de operação ;
- Pressão de trabalho ;
- Tipo do pano ;
- Granulometria do abrasivo ;
- Tipo de abrasivo ;
- Lubrificante ;
- Quantidade lubrificante/abrasivo ;
- Movimentação da amostra .

# *Ataque*

## **1) OBJETIVO:**

Revelar a microestrutura e os constituintes da amostra, possibilitando maior entendimento das suas propriedades.

## **2) EQUIPAMENTO:**

- Recipiente com a solução de ataque;
- Luva plástica;
- Pinça;
- Picete com álcool;
- Secador
- Água corrente;
- Algodão;
- Beckers de diversos tamanhos;
- Pipetador.

## **3) CONDIÇÕES GERAIS**

### **3.1) Ataque para Ensaio Micrográfico**

O exame posterior de uma superfície bem polida, em geral, não revela traços de suas características estruturais, quer em exame visual (macro), quer em exame óptico (micro). Para obter-se uma visão conveniente dentro da estrutura, a superfície polida deve ser tratada de modo a “trazar visível as partes química e fisicamente distintas e aumentar ou diminuir os contrastes ópticos entre os vários componentes estruturais”.

O método comum para o desenvolvimento da estrutura cristalina para exame microscópico é o do emprego de um reagente químico.

Se uma amostra convenientemente preparada for examinada ao microscópio antes de atacada pelo reagente, ela apresentará poucos detalhes aparentes da estrutura.

Tal exame, contudo, pode ser de valor, uma vez que os defeitos superficiais, como as partículas não metálicas que não foram polidas durante o polimento, podem ser estudados. Acredita-se que a ausência de estrutura cristalina é devida a uma película metálica extremamente delgada, opaca e amorfa, que cobre a superfície polida. Esta película, aparentemente, é o resultado do severo esforço mecânico e do trabalho a frio durante o polimento, que rompe a estrutura cristalina da camada mais alta, convertendo-a em uma camada dura constituída de maior ou menor quantidade de metal amorfo. Este efeito é particularmente importante naqueles aços que possuem uma alta taxa de temperabilidade pelo trabalho, como os aços inoxidáveis.

Em subsequente ataque com reagente químico, a primeira ação deve ser a remoção completa da camada amorfa. Depois de sua remoção, a solução de ataque pode então agir vagarosamente e provocar o desenvolvimento da verdadeira estrutura do metal. A ação dessa solução depende da natureza química e estrutural do corpo de prova, a natureza química do reagente, o tempo de ataque, as temperaturas do reagente, e a agitação do reagente durante o processo.

Os reagentes, em todos os tipos de ataque metalográfico, atuam do mesmo modo, isto é, atacam e dissolvem lentamente metal. A maneira pela qual o reagente ataca depende do propósito do material, isto é, se ele consiste em um constituinte único no qual todas as partes do metal são exatamente da mesma composição química, ou se ele é de natureza complexa, quando existem diversos constituintes diferentes, cada um diferindo dos outros nessa composição química.

No caso em que um metal puro está sendo atacado metalograficamente, o ataque químico do reagente não se faz uniformemente em todos os grãos da superfície exposta, mas verifica-se que ele se processa sobre cada grão de um modo seletivo ao longo determinados planos cristalográficos. Resulta disto que a velocidade de ataque varia de acordo com a orientação dos grãos na superfície, sendo evidente um contraste de grãos.

Este contraste é devido ao fato de que os planos, que são paralelos no mesmo grão, não são necessariamente paralelos aos planos nos grãos vizinhos.

Nos casos em que uma liga composta de dois ou mais constituintes estruturais estiver sendo atacada, o reagente é escolhido de modo a ser seletivo em seu ataque. O resultado é usualmente um ataque parcial e o desgaste de um constituinte, enquanto que o outro permanece sem ser afetado. Isto permite que certos constituintes fiquem em relevo e produzam, quando observados pelo microscópio, o que se pode ser chamado um efeito de sombra. As partes não afetadas aparecerão em cores brilhantes, enquanto que outras, em planos inferiores, aparecerão escuras.

### **3.2) Reagentes para Ataque Metalográfico**

Estes reagentes são basicamente soluções diluídas de ácidos orgânicos ou inorgânicos, álcalis, ou outras soluções de natureza complexa. Como foi verificado anteriormente, a seleção final de uma solução, para fazer aparecer um desenvolvimento da estrutura, depende da composição e condições estruturais do metal ou da liga.

### **3.3) Processo de Ataque Metalográfico**

O modo de se proceder para se realizar o ataque metalográfico, exige certa habilidade, fácil de se desenvolver. Certos fatores devem ser considerados para que os melhores resultados sejam atingidos. Estes fatores são o modo de aplicar o reagente sobre a superfície, o tempo

aproximado do contato entre o reagente e a superfície, e a temperatura do reagente.

Em geral, a aplicação do reagente para o ataque é feita ou por imersão ou por esfrega. Quando se usa por imersão na solução, o corpo de prova é mantido na solução por meio de pinças pelo tempo necessário. É recomendável que se o movimente constantemente, de modo que as bolhas de ar aderentes à superfície possam ser eliminadas, e que uma camada de reagente fresco esteja todo tempo em contato com a superfície atacada.

Se o corpo de prova for atacado por esfrega da solução, a superfície polida é friccionada rapidamente, pelo tempo necessário, com um tufo de algodão que foi saturado com reagente.

Depois de decorrido o necessário tempo de ataque, o corpo de prova deve ser completamente lavado sob um jato d'água, de modo que seja removido o reagente e o ataque seja interrompido. Tal prática é absolutamente essencial, não somente porque ela interrompe a ação, mas também porque previne a formação de sais ácidos que desfigurariam a superfície. Uma limpeza completa sob um jato d'água quente com sua remoção e evaporação por violentas sacudidelas, ou enxugamento cuidadoso com um tecido macio, será suficiente. Quando se tornam necessários cuidados especiais, o corpo de prova deve ser lavado em álcool absoluto para remoção de água, e o álcool deve então ser evaporado na corrente de ar de um ventilador. Se o tempo de ataque foi insuficiente, o melhor caminho a seguir é polir novamente a peça, até que todos os vestígios do ataque tenham sido removidos, e então proceder a um novo ataque.

A superfície quando atacada e seca convenientemente, permanecerá em condições de trabalho por muitos dias, ou mesmo semanas se ela for guardada em um secador munido de um conveniente agente contra umidade (cloreto de cálcio).

### **3.4) Tempo de Ataque**

O primeiro fator importante para o ataque correto a um corpo de prova é a seleção do reagente que melhor se adapte à composição química e à condição física do metal, e o segundo é o controle conveniente do tempo de ataque para que se produza um grau de contraste apropriado entre os diferentes componentes da estrutura. O tempo de ataque depende da estrutura em questão e da ampliação que se deseja na fotografia.

Conforme o reagente escolhido, o tempo de ataque variará de poucos segundos até alguns minutos, ou mesmo tempos maiores. É difícil dar instruções precisas abrangendo todos os casos, e assim fazemos apenas as seguintes recomendações:

- Não atacar mais que o necessário para fazer aparecer o detalhe significativo;
- Um grau de contraste satisfatório para uma micrografia com pequeno aumento é geralmente excessivo para uma melhor definição da estruturas em ampliações muito maiores;

- Desejando-se um alto contraste, é preferível obtê-lo por meios fotográficos a recorrer a um ataque profundo, pois este ocultará os detalhes mais finos da estrutura;
- Se um corpo de prova for insuficientemente atacado (pouco contraste), é preferível poli-lo novamente no disco acabador e atacá-lo novamente com ácido superpor, a um ataque já levado a efeito, outro posterior;
- Não tocar com coisa alguma numa superfície já atacada e fotografá-la logo após o ataque.

### 3.5) Rotina do ataque do corpo de prova

- Verificar se todos os equipamentos estão em ordem;
- Após o polimento, lavar a amostra em água corrente com auxílio de um algodão;
- Jogar álcool na superfície da amostra;
- Secá-la com secador;
- Colocar a luva plástica;
- Selecionar a solução de ataque adequado;
- O ataque pode ser por meio de fricção, imersão, aspersão;
- Atacar a amostra, com o auxílio de uma pinça;
- A verificação do ataque é feito através do microscópio;
- Efetuar a limpeza e guardar os equipamentos utilizados.

COMPORTAMENTO DO ATAQUE	OBSERVAÇÕES
Contorno do grão	O contorno do grão é importante devido a descontinuidade estrutural no reticulado cristalino. O efeito do ataque se faz sentir, mais ecentuadamente, por causa das impurezas depositadas na interface.
Superfície do grão	A superfície dos grãos reflete a luz incidente em ângulos diferentes em função dos produtos da reação ou da superfície atacada.
Figuração cristalina	A revelação das deslocções depende da área da tensão das diferentes distâncias entre os átomos. A figuração dos grãos aparece nas regiões onde os deslocamentos cortam a superfície.
Sombreamento	A película que se origina durante o ataque retrai-se quando submetida à secagem, formando-se estrias orientadas sobre a superfície dos grãos.

Celular	As regiões eutéicas tornam-se visíveis, especialmente quando contém segregações.
Primário ou segregação	Aparecimento de cristais primários e de segregações.
Secundário ou microconstituente	A estrutura diverge da formação primária após deformação mecânica ou tratamento térmico.
Tensão	Revelação do campo de deformação próxima às regiões não deformadas.

### UTILIZAÇÃO DOS REAGENTES DE Nital e Picral

NITAL	PICRAL
Na revelação de contorno dos grãos de ferrita em aços de baixo teor de carbono.	Na revelação detalhada de : - Perlita - Martensita - Martensita revenida - Bainita
Na obtenção de contraste máximo entre perlita, cementita e ferrita em contorno de grão.	Na distinção entre Bainita e Perlita fina.
Na revelação dos contornos de grãos dos aços ao silício contendo 4% Si.	Na detecção de carbonetos não dissolvidos na Martensita.
No ataque de aços de baixa liga e aços ao cromo resistentes à ação do picral.	Na diferenciação pela coloração entre ferrita, martensita e carboneto livre.
Na revelação de limite de grão de ferrita nas estruturas de martensita com presença de ferrita.	Na revelação de paretículas de carbonetos no contorno dos grãos de aço de baixo teor de carbono.

## *Inclusões*

São pequenas partículas dispersas na matriz metálica.

As inclusões interrompem a matriz metálica e acarretam alta concentração de tensões, por extinguir a distribuição uniforme da tensão.

### CLASSIFICAÇÃO

As inclusões podem ser classificadas sob vários aspectos, como por exemplo, quanto à origem, composição química e propósito.

**ORIGEM** – São classificadas em exógenas e endógenas.

- a) Exógenas – De origem externa, resultante da entrada de escória juntamente com o metal, da erosão mecânica do refratário do forno ou do material do molde e de reações químicas entre o refratário do forno e o metal e ou a escória.
- b) Endógenas – De origem interna e resultantes de reações químicas, transformações e precipitações que ocorrem dentro de um metal. Como exemplos podem-se citar transformações de óxidos, sulfetos, fosfetos, nitretos e carbonetos, precipitação de cobre e de chumbo.

**COMPOSIÇÃO QUÍMICA** – São classificadas em não metálicas e metálicas.

- a) Não metálicas – Quando estão sob forma combinada como por exemplo: óxido, sulfeto, fosfeto, nitreto e carboneto.
- b) Metálicas – Quando estão sob forma de elemento puro, como no caso do chumbo e do cobre, inclusive a grafita nos aços grafíticos e ferros fundidos.

**PROPÓSITO** – São classificadas em desejáveis e indesejáveis.

- a) Desejáveis – Quando são produzidas, propositalmente, com fim específico, como no caso do chumbo e do sulfeto de manganês, para proporcionar melhoria da usinabilidade ou, como no caso do óxido de alumínio, para evitar crescimento dos grãos austeníticos dos aços. Portanto, as inclusões nem sempre são malélicas. As inclusões, às vezes, são criadas com o fim de impedir que certo tipo de inclusão seja gerada, como é o caso da adição do manganês ao aço, cujo enxofre nunca é totalmente eliminado na sua elaboração, para formar o sulfeto de manganês e impossibilitar a formação do sulfeto de ferro, o qual provoca fragilidade a quente ou de impedir a formação de bolhas, que ocorrerão no aço, caso não seja adicionado ao líquido um desoxidante, como por exemplo, o alumínio, a fim de fixar o oxigênio do óxido de ferro, formar a alumina e evitar que se uma ao carbono, cujo gás resultante poderá ficar retido durante a solidificação.



b) Indesejáveis – Quando surgem não intencionalmente.

## **FORMAÇÃO DE INCLUSÕES NO AÇO**

Serão abordadas, resumidamente, como algumas das inclusões se formam no aço.

Os óxidos surgem devido à reação do oxigênio, dissolvido no metal líquido, com o silício, manganês e alumínio existentes ou por serem adicionados como desoxidantes, resultando os óxidos de silício, manganês e de alumínio, e evitando-se a reação do carbono com o oxigênio dissolvido no ferro e conseqüentemente desprendimento de gases e possibilidade de formação de bolhas e ou porosidades.

Os sulfetos são formados, porque o enxofre remanescente, por ser impureza difícil de total eliminação, reage com o ferro e manganês, resultando os sulfetos de ferro e manganês.

Os fosfetos só ocorrem quando o teor de fósforo é elevado, como 0,4%, com a formação do eutético fosforoso de partículas de fosfeto de ferro,  $Fe_3P$ , sobre a matriz ferrítica saturada de fosfeto. A impureza fósforo é de difícil eliminação e, normalmente, existe nos aços, porém em teores máximos permitidos e fica em solução na ferrita.

Os nitretos resultam da reação entre o nitrogênio e o ferro, alumínio ou outro elemento, originando-se os nitretos de ferro, alumínio, etc..., que só ocorrem, quando o teor de nitrogênio ultrapassa 0,001%, que é o máximo da sua solubilidade na ferrita à temperatura ambiente.

Os carbonetos se formam pela união do carbono com o elemento carbonetante, desde que ambos não fiquem em solução, como no caso da cementita dos aços comuns, do carboneto de manganês no aço ao manganês e do carboneto de cromo no aço inoxidável.

A inclusão de cobre só ocorre, porque ela não se combina com os elementos do aço, todavia é necessário que a sua solubilidade na ferrita exceda o limite máximo, que é cerca de 1,3% a 850°C e mais ou menos 0,35% desde 400°C até temperatura ambiente, precipitando-se na matriz de aço.

A inclusão de chumbo existe no aço, porque ele não é solúvel no ferro líquido e sólido, permanecendo disseminado na matriz de aço.

## **INFLUÊNCIA**

As inclusões exercem influencia sobre o metal, porque interrompem a matriz metálica, acarretam alta concentração de tensões e são barreiras ao movimento atômico.

A descontinuidade metálica favorece a fragilidade e a usinabilidade, as tensões localizadas acarretam aumento da energia interna e acelera a cinética das reações, as barreiras inibem o crescimento dos grãos, por dificultarem, mecanicamente, o movimento atômico inter cristalino e tornam o metal mais resistente e menos dúctil, por impedirem o deslocamento das discordâncias.

Por outro lado, as inclusões, finamente dispersas no líquido, propiciam granulação fina, por agirem como sítios nucleantes, acarretando velocidade de nucleação superior à de crescimento.

O efeito das inclusões depende da sua composição, tamanho, forma, quantidade e distribuição.

As propriedades das inclusões estão ligadas à sua composição, podendo ser muito duras e frágeis, quando por exemplo, sob a forma de carbonetos e nitretos, ou de baixíssimas durezas, como no caso do chumbo e da grafita.

A influência das inclusões é menos prejudicial às propriedades mecânicas do metal quando em menor quantidade, menor tamanho, mais homogeneamente distribuídas e de forma esférica, caso em que favorece a tenacidade, a resistência ao impacto, a usinabilidade, etc., e a peça fica com menos tendência à fratura por fadiga. Quando segregadas, afetam mais propriedades do metal e a propensão à ruptura por fadiga, devido à sua natural não plasticidade e à alta concentração de tensões. Quando alongadas, por efeito de trabalho mecânico, acarretam propriedades anisotrópicas, reduzindo sensivelmente a ductilidade e a resistência ao impacto transversal.

O efeito maléfico das inclusões é mais acentuado nos materiais duros do que nos moles, porque nestes poderá ocorrer redução da concentração de tensões resultante de deformações plásticas localizadas.

Na elaboração do aço, as impurezas enxofre e fósforo são controladas, para evitar seus efeitos perniciosos.

O sulfeto de ferro forma com o ferro um eutético de baixo ponto de fusão, 988°C, que se localiza entre os grãos. Quando o aço é aquecido para ser deformado, esse sulfeto fica líquido, a coesão entre os grãos austeníticos é afetada e ocorre a ruptura fácil do aço. É a conhecida fragilidade à quente. Afortunadamente, como o enxofre tem maior afinidade pelo manganês do que pelo ferro, evita-se a formação do sulfeto de ferro com adição de manganês ao aço, pela formação preferencial do sulfeto de manganês. Este sulfeto funde a cerca de 1600°C e fica disseminado no aço, deformando-se e alongando-se, pela ação de trabalho mecânico a quente, quando adquire plasticidade.

O fósforo fica em solução na ferrita, endurecendo-a. acima de 0,1% é identificado, por tornar a ferrita sombreada e o aço com granulação grosseira persistentes aos tratamentos térmicos para refiná-lo, acarretando-lhe fragilidade à temperatura ambiente, conhecida como fragilidade a frio. Teores mais elevados como 0,4%, podem propiciar a formação do eutético fosforoso, que se solidifica, aproximadamente, a 1050°C e fica intergranular, causando ao aço maior fragilidade a frio, por ser duro, ou esboroamento quando deformado a essa temperatura ou a superiores, por estar líquido.

## **CARTA PADRÃO**

São cartas que, por meio de desenhos representativos de microtexturas, indicam os tipos, formas, tamanhos, quantidades e distribuição das inclusões. Vários são as cartas, porém a mais representativa das inclusões mais comuns dos aços é a JK, elaborada pela Jernkontoret – Associação dos Siderúrgicos Suecos – e adotada pela ASTM – E 45 – 46 T, e que divide as inclusões nos tipos A, B, C, e D, desdobradas nas séries fina e grossa, com cinco esboços diferentes e numerados de 1 a 5, para cada série. Os números indicam quantidade de inclusões por unidade de área a 100x, sendo o 1 designativo de baixa e o 5 de alta porcentagem de inclusões.

O uso da carta, por não existir carta representativa para todos os tipos e formas de inclusões, é limitado aos tipos mais comuns de inclusões nos aços, e, geralmente, não traduz o estado médio do material.

Os tipos de inclusões são identificados por meio de ensaio microscópico em corpo de prova polido e sem ataque. O sulfeto de manganês, sob forma poligonal globular, dendrítica, etc., ou alongamento por ação de deformação plástica a quente, tem coloração cinzenta-escura; o sulfeto de ferro é amarelado e a superfície, comumente, é côncava; os óxidos de alumínio são escuros e apresentam-se esparçados ou, normalmente, grupados ou sob a forma de pequenas partículas esféricas; os silicatos são negros e ficam concentrados ou alongados e partidos pelo trabalho mecânica a quente.

### **Classificação Metalografica de Inclusões**

- De acordo com a composição química :
  - metálicas
  - não-metálicas
- De acordo com a origem :
  - endogenas
  - exogenas
- De acordo com o efeito :
  - desejáveis
  - indesejáveis

### **Características**

- Mecânica ( dureza , plasticidade )
- Química ( dissolução em determinada solução )
- Geométrica ( forma e espessura )
- Física ( coloração )

Métodos de indentificação de inclusões via metalografia ótica :

- Quadro comparativo ( aumento de 100X )
- Dissolução por determinados reagentes
- Avaliação da coloração

## *Microconstituintes*

Propriedades dos constituintes dos aços

Os constituintes básicos dos aços são :

A *austenita* (do nome do metalurgista inglês Robert – Austen), nos aços comuns, só é estável acima de 727°C; consta de uma solução sólida de carbono no ferro gama e apresenta uma estrutura de grãos poligonais irregulares; possui boa resistência mecânica e apreciável tenacidade; é não magnética.

A *ferrita* (do latim “ferrum”) é ferro no estado alotrópico alfa, contendo em solução traços de carbono; apresenta também uma estrutura de grãos poligonais irregulares; possui baixa dureza e baixa resistência à tração, cerca de 28 Kgf/mm<sup>2</sup> (270 MPa), mas excelente resistência ao choque e elevado alongamento.

A *cementita* (do latim “caementum”) é o carboneto de ferro Fe<sub>3</sub>C contendo 6,67% de carbono; muito dura (na escala Moh’s ocuparia aproximadamente o lugar do feldspato), quebradiça, é responsável pela elevada dureza e resistência dos aços de alto carbono, assim como pela sua menor ductilidade. Possui estrutura cristalina ortorrômbica.

A *perlita* (nome devido à “nuance” de cores de madrepérola que esse constituinte frequentemente apresenta ao microscópio) é a mistura mecânica de 88,5% de ferrita e 11,5% de cementita, na forma de lâminas finas (de espessura raramente superior a um milésimo de milímetro) dispostas alternadamente. As propriedades mecânicas da perlita são, portanto, intermediárias entre as da ferrita e da cementita, dependendo, entretanto, do tamanho das partículas de cementita. Sua resistência à tração é, em média, 75 Kgf/ mm<sup>2</sup> (740 MPa). A proporção de perlita num aço cresce de 0% para ferro até 100% para aço eutetóide (0,77% de carbono), de modo que um aço com 0,5% de carbono, por exemplo, apresentará cerca de 65% de perlita.

A *martensita* apresenta um reticulado tetragonal e sua dureza é muito elevada, podendo atingir 65 a 67 Rockwell C. Sua resistividade térmica é consideravelmente mais alta que a dos conglomerados ferrita-cementita, qualquer que seja o seu grau de dispersão. Sua elevada dureza é devido a diversos fatores como:

- precipitação de partículas submicroscópicas de carboneto de ferro da solução sólida gama e retenção dessas partículas na forma de uma solução sólida supersaturada no reticulado do ferro alfa (formado no esfriamento) onde atuam como espécies de “chavetas”, impedindo o escorregamento;
- distorção do reticulado;
- tensões internas;
- tamanho de grão muito pequeno.

A *bainita*, que é formada na temperatura entre 550 e 200°C, varia de aspecto, que vai desde um agregado de ferrita em forma de pena e carboneto de ferro muito fino, em torno de 450°C, até um constituinte em forma de agulhas com coloração escura (em torno de 200°C) e sua dureza varia de 40 a 60 Rockwell C. Na parte mais baixa do diagrama TTT, a bainita caracteriza-se pela excelente ductilidade e resistência ao choque, com durezas elevadas, acima mesmo de 50 Rockwell C.

A *ledeburita* é um equilíbrio de duas fases: austenita de um lado e cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) do outro. Esse eutético cristalizado é constituído de um fundo de cementita com aproximadamente 6,7% de carbono e cristais dendríticos de austenita, contendo 2% de carbono.

Nos ferros fundidos brancos, é um constituinte formado de pequenos glóbulos de perlita, sobre um fundo de cementita; por isso apresenta elevada dureza.

## Identificação Metalográfica

### FERRITA

- Solução sólida de carbono no ferro alfa
- Origina-se na zona crítica
- É a forma estável a temperatura ambiente.

Identificação metalográfica :

- Apresenta-se ao microscópio como grãos brancos com finos contornos pretos
- Arranha e deforma-se facilmente
- Arestas arredondadas
- É fortemente atraída pelo ímã

### CEMENTITA

- Carboneto de ferro  $\text{Fe}_3\text{C}$
- Chega a riscar o vidro

Identificação metalográfica :

- Se apresenta como uma só massa e não mostra subdivisão em grãos
- Não é riscada , se apresenta precipitada , forma um abaulamento
- Possui cor amarelada
- Brilho intenso
- Forma bastonetes ou nódulos
- Atacada com picrato de sódio em ebulição se torna escura diferenciando da ferrita.

### PERLITA

- Agregado mecânico
- Constituída por finas lamelas justapostas de ferrita e de cementita e que ocorre abaixo de 723°C

- As lamelas são mais ou menos paralelas podendo ser planas, curvas, ondeadas, etc...
- O afastamento entre elas depende, entre outros fatores, da velocidade de resfriamento e do ângulo segundo o qual o grão de perlita é cortado.
- Dureza é intermediária entre ferrita e cementita
- Proporção de  $\pm 1$  de cementita para 6 de ferrita
- Formas mais comuns lamelas ou granulos
- Em determinadas condições pode apresentar-se sob outras formas

#### Identificação metalográfica :

- Em aços com baixo carbono se localiza em geral nos contornos da ferrita, aumentando-se a %C este quadro vai se modificando até se tornar o constituinte principal.
- São envolvidos ou quase, por rede de ferrita ou cementita
- Possui coloração marrom, verde ou preta, dependendo do ataque (reagente e tempo), aumento de observação e estrutura da perlita
- As lamelas só podem ser vistas com ampliações de mais de 200 X
- Forma grãos.

## *Texturas*

Os materiais metálicos, apresentam os seguintes tipos de texturas :

- reticular
- granular
- alinhada
- acicular ou widmanstatten
- encruada
- descarbonetada
- queimada
- martensítica
- esferoidizada
- bruta de fusão

## *Metalografia Quantitativa (Tamanho de Grão e Proporção de Fases)*

A metalografia quantitativa vem se firmando cada vez mais como uma técnica experimental de grande utilidade tanto no estudo de fenômenos metalúrgicos como na caracterização das microestruturas e sua correlação com as propriedades mecânicas.

A metalografia quantitativa é uma ferramenta extremamente útil no estudo de fenômenos metalúrgicos, gerando informações que eventualmente podem embaçar o correto dimensionamento de processos industriais. A seguir, alguns exemplos da aplicação desta técnica no estudo de fenômenos metalúrgicos.

- recristalização e crescimento de grão: determinação do tamanho e da superfície específica dos grãos cristalizados, bem como medida da fração recristalizada, após laminação a quente ou tratamento térmico;
- precipitação: determinação de fração volumétrica, tamanho e grau de dispersão dos precipitados;
- transformação de fases: determinação de fração volumétrica e dureza de fases como auxílio na determinação de diagramas TRC ou após a laminação a quente de aços bifásicos;
- solidificação: determinação da morfologia da grafita e da microestrutura dos ferros fundidos em termos gerais.

Quanto à caracterização da microestrutura e sua correlação com as propriedades mecânicas, há mais de uma década estão sendo feitos estudos sistemáticos, particularmente no caso dos aços. Tais trabalhos são de fundamental importância, pois não só a dureza e as frações das fases presentes na microestrutura definem a resistência mecânica e a ductilidade do material: a morfologia – ou formato – das fases, bem como a natureza e a densidade dos contornos presentes podem atuar de maneira fundamental. Dentro desta linha de pesquisa há estudos voltados para diversos tipos de aços:

- microligados: relação entre resistência mecânica, ductilidade e propriedades de impacto em função do tamanho de grão ferrítico e fração volumétrica de perlita;
- bifásico *dual phase*: caracterização topológica da microestrutura *dual*; relações estatísticas entre as propriedades mecânicas e o tamanho de grão e fração volumétrica das fases; modelamento matemático da microestrutura e propriedades mecânicas; relações estatísticas entre o espaçamento da segunda fase e sua fração em volume como o coeficiente de encruamento do material;
- inclusões não metálicas: determinação do grau de limpeza do aço, caracterizando a fração em volume e a morfologia das inclusões não metálicas – óxidos, sulfetos, nitretos – que ele possa conter.

As amostras podem ser analisadas em termos de:



- fração volumétrica de fase
- tamanho de grão da microestrutura

Normalmente a microestrutura varia estatisticamente de um ponto a outro da amostra que está sendo analisada. Logo, para que o valor final do parâmetro em estudo tenha significado estatístico, é necessário que ele seja calculado a partir da média de um número mínimo de observações – ou campos metalográficos -, o qual é função grau de flutuação estatística das medidas na microestrutura e da precisão desejada.

**Fração Volumétrica** – A determinação da fração volumétrica de uma fase particular presente na microestrutura é feita através da aplicação de uma rede sobre a imagem da microestrutura, e contando-se o número de pontos coincidentes entre a rede e a fase em estudo. Essa contagem pode ser feita em fotos ou diretamente no microscópio. A fração volumétrica da fase é calculada a partir da média do quociente do número de pontos total da rede a partir das diversas medidas efetuadas.

**Tamanho de grão da microestrutura** – A determinação do tamanho é feita através da sobreposição de uma linha-teste sobre a imagem da microestrutura em estudo e contando-se o número de interseções dos contornos de grão da microestrutura com ela. Essa linha-teste pode ser um segmento de reta ou um círculo, com comprimento conhecido. Recomenda-se o uso de círculos quando se quer evitar o efeito da orientação preferencial dos grãos, minimizando-se desta forma o erro estatístico produzido.

### ***Determinação da Fração Volumétrica por Contagem Manual de Pontos segundo a Norma ASTM E - 562***

**OBJETIVO** : Quantificar as partes presentes , devido as propriedades estarem ligadas a microestrutura . Pode-se avaliar a anisotropia analisando a seção normal, transversal e longitudinal .

**PRINCÍPIO** : Coloca-se uma rede de pontos (grade) sobre a imagem de uma campo de uma amostra metalográfica que está sendo projetada na tela de uma microscópio ótico.

#### **PROCEDIMENTO :**

**A** - Estime visualmente o percentual do constituinte ou fase que será contada.

**B** - Selecione a grade adequada de acordo com a fração estimada da fase avaliada.

\* 1) Na prática, observamos o tamanho (pequena ou grande), a distribuição (muito ou pouco) e a concentração (aberta ou fechada) da fase, colocamos o melhor aumento para visualizar a fase, onde a mesma não pode tocar dois pontos da grade.

2) Tendo a grade já determinada colocamos um aumento que proporcione boa visualização.

3) Ideal é ter uma grade de 25 e outra de 49 pontos no mínimo.

**C** - Coloque a grade escolhida na tela do microscópio e selecione o aumento a ser utilizado de forma que dois pontos não toque uma mesma fase. Com o aumento adequado, o tamanho do constituinte deve ser aproximadamente a metade da distância entre os pontos da grade.

**D** - Selecione o número de medidas para um intervalo de confiabilidade de 95%

O mínimo de campos contados deve ser de 30 (Pode-se na prática executar-se 10)

**E** - Conte e anote o número de pontos da grade que estiverem sobre o constituinte como 1 e os que caírem na interface como 0,5 (meio) . Em caso de dúvida considere sempre como meio .

**F** - Divida o número encontrado no item anterior pelo número total de pontos da grade .  
Obtendo a fração volumétrica parcial.

**G** - Some os resultados, e tire a média aritmética  $\times 100$  , obtendo o resultado final em (%)

### ***Determinação do Tamanho de Grão Médio segundo a Norma ASTM E - 112***

**OBJETIVO** : Utilizando o método das interseções, executamos uma análise linear de número de objetos por tamanho da linha teste .

#### **1 ) Análise de uma Fotomicrografia**

**A** ) Geralmente uma foto 10 X 15

**B** ) Ataque deve ser perfeito sem mascarar o grão

**C** ) Os contornos bem definidos

**D** ) O comprimento da linha teste, geralmente de 100 mm

**E** ) Dividir o resultado em ( mm ) pelo aumento da foto.

**F** ) Equação Básica :

$$N_L = L_T / P = \text{mm}$$

P = número de interseções

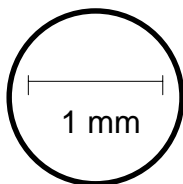
$L_T$  = comprimento da linha teste

**G** ) Número de contagens de 20 à 50 (na prática de 5 à 10)

\* Começando ou terminando no meio do grão contar 0,5 (meio), quando for ponto triplo considerar 1,5 (um e meio) e quando for ponto quadruplo considerar como 2 (dois). Evitar sempre as polijunções .

**H** ) Transformar em cm e entrar na fórmula ASTM

## 2.) Análise com uma Ocular com Linha Teste Impressa (padronizada)



- A) Determinar o diâmetro médio do grão
- B) Escolhemos o aumento que melhor nos mostra o contorno de grão e um campo bom para contagem
- C) O número de interseções em uma linha deve ser de 20 à 30 pontos
- D) O número de medidas deve ser de 10 à 20
- E) Equação básica :

$$d = L_T / P \times M = \varnothing \text{ do grão em mm em um campo}$$

$L_T$  = comprimento da linha teste  
 $P$  = número de pontos contados  
 $M$  = aumento utilizado

- F) Tamanho de grão médio (todas as medidas) da amostra

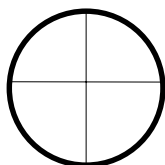
$$TG = N_c / \Sigma = \text{mm}$$

$N_c$  = número de campos obtidos (medidos)  
 $\Sigma$  = somatório das medidas feitas (pode ser feita por média aritmética)

- G) Transformar em cm e entrar na fórmula ASTM

## 3) Análise pelo Método de Determinação da Linha Teste

- A) Ocular em Cruz



- B) Escala Micrométrica 1 / 0,01 mm
- C) Escolher o aumento onde no mínimo 20 pontos se encontram dentro da linha teste (limite da ocular)
- D) Determinar com a escala micrométrica o tamanho da linha teste para um determinado aumento que deve ser constante
- E) Equação básica :

Princípio

$$d = L_T / P \times M$$

$L_T$  = comprimento da linha teste  
 $P$  = número de interceptos  
 $M$  = aumento

**F)** Eliminamos  $L_T$  e  $M$  conforme o item ( D ) transformando na equação seguinte :

$$TG = T_{MED.} \times L_T / \Sigma = \text{tamanho de grão em mm} \\ (\text{Ø do grão})$$

$T_{MED.}$  = total de campos medidos

$L_T$  = tamanho da linha teste

$\Sigma$  = somatório (média aritmética) dos valores contados (pontos) na horizontal e vertical .

**G)** Transformar em cm

**H)** Calcular o tamanho de grão pela ASTM segundo a fórmula

$$G = - 10,0 - 6,64 \log d$$

$$d = TG$$

Tamanho de Grão ABNT / ASTM

TG	Ø médio do grão ( mm )	comprimento médio do intercepto ( mm )	grãos / mm <sup>2</sup>	grãos / mm <sup>3</sup>
0	0,36	0,32	7,75	17,3
1	0,25	0,226	15,5	48,8
2	0,18	0,16	31,8	138
3	0,125	0,113	62,0	391
4	0,09	0,080	124	1105
5	0,065	0,056	248	3126
6	0,045	0,04	496	8842
7	0,032	0,028	992	25010
8	0,022	0,020	1980	7070
9	0,016	0,014	3970	20 x 10 <sup>4</sup>
10	0,011	0,010	7940	56 x 10 <sup>4</sup>
11	0,008	0,007	15870	16 x 10 <sup>5</sup>
12	0,0056	0,0050	31700	45 x 10 <sup>5</sup>
13	0,0040	0,0035	63500	13 x 10 <sup>6</sup>
14	0,0028	0,0025	12700	36 x 10 <sup>6</sup>

## *Avaliação do teor de carbono pela micrografia*

Métodos :

- 1 - Por comparação
- 2 - Gráfico
- 3 - Matemático

### Por Comparação :

Confeccionar um quadro comparativo :

- a) Analisar as amostras previamente para verificação % C
- b) Preparar as amostras recozidas , e atacar com nital 3%
- c) Fotografar com aumento real de 100X

Comparar as amostras recozidas ou normalizadas em aumento de 100 X

### Método Gráfico :

Avaliar por estimativa ou por grade de pontos as quantidades de perlita e ferrita.

Executar a leitura no gráfico.

### Método Matemático :

Avaliar por estimativa, comparação ou por metalografia quantitativa as porcentagens de ferrita, perlita ou cementita.

Entrar com os valores nas fórmulas correspondentes :

Para estruturas com ferrita + perlita -

$$\% C = X \cdot 0,02 + Y \cdot 0,77$$

Para estruturas com perlita + cementita -

$$\% C = X \cdot 0,77 + Y \cdot 6,67$$

## **Microdureza**

**Dureza Vickers** – Como se sabe, o ensaio de dureza Vickers consiste em se aplicar, sob uma carga preestabelecida, um penetrador piramidal sobre a superfície polida do material em estudo. A impressão, assim, tem o aspecto de uma pirâmide, e o valor de dureza é calculado a partir da média das duas diagonais de sua base, que forma um losango regular. Essas diagonais são medidas através de uma ocular presente na máquina de dureza.

A magnitude da carga a ser aplicada no ensaio é função da dureza do material em estudo, gerando uma impressão regular, sem deformação e com tamanho adequado para medição através da ocular da máquina. Obviamente, para um mesmo material, quanto maior o valor da carga maior será a impressão produzida. A seleção do valor de carga permite ainda a medição da dureza de fases discretas da microestrutura, que devem ser reveladas previamente através de polimento e ataque metalográfico. Neste caso, o valor da carga tem de ser pequeno – 25 a 50g, ou até menos. A dureza assim medida representa um grande auxílio na identificação de fases ou dos mecanismos metalúrgicos que a geraram. O programa requer os seguintes dados: carga utilizada, e para cada ensaio, o tamanho das duas diagonais da impressão.

**Microdureza ASTM E 384** – A microdureza é a medida da dureza de formações microscópicas ou cristais de metais e seções extremamente delgadas. O processo consiste em trazer a superfície do material altamente polida e/ou atacada para baixo de uma ponta de diamante, lapidada com precisão, em três facetas, formando entre si um ângulo sólido, reto, sendo o ponto de interseção a ponta de trabalho, sob a pressão determinada de 3 gramas, para os casos comuns, e 9 gramas para materiais duros, durante um tempo de 15 segundos.

Para se obter o resultado, mede-se com precisão a largura da impressão, pelo uso de um microscópio óptico perfeitamente calibrado. Assim se verifica que a dureza é inversamente proporcional ao quadrado da largura do corte. Matematicamente, isto é expresso pela fórmula :

$$K = \lambda^{-2} \cdot 10^4$$

na qual  $K$  representa a microdureza e  $\lambda$  a medida da largura da impressão, em microns. A fórmula é multiplicada por 10 elevado à quarta potência para evitar decimais longas.

O ensaio de dureza é um controle indispensável no exame e seleção de materiais. O método de microdureza Vickers é o mais usado para o estudo das fases de uma estrutura, geralmente trabalhando com cargas que oscilam entre 0,005 a 0,2 Kg. Este método está baseado na resistência que um material oferece à penetração de uma pirâmide de diamante de base quadrada e ângulo entre faces de 136°, sob uma determinada carga. O valor da dureza Vickers (HV) é o quociente da carga aplicada  $F$  pela área de impressão  $S$  :

$$HV = F / S$$

Para a medição da microdureza a amostra preparada é colocada na platina do microscópio, a carga de ensaio é selecionada e então aplicada sobre a área de medição por cerca de 10 a 30 segundos. O penetrador é retirado,

fazendo-se então a medição das diagonais da penetração. O resultado obtido desta medição é plotado na fórmula seguinte ou lido diretamente em tabelas.

$$H_p = \frac{2 P \cdot \sin \frac{Q}{2}}{2} \text{ Kg / mm}^2$$

Esta fórmula pode ser ainda expressa como :

$$HV = \frac{1854 \times P}{d^2} \text{ kg/mm}^2$$

onde :

P – carga aplicada em Kg

d – média do comprimento da diagonal em mm

Considerando o aspecto matemático deve-se também computar o valor de Z , que é definido como uma diminuta aresta não maior que 1 micron localizada no vértice da pirâmide de diamante. Quando este valor é considerado, o resultado da medição da microdureza obtida difere ligeiramente da expressão simplificada. A fórmula incluindo o valor de Z é dada como :

$$HV = \frac{1854 \times P}{(d^2 - Z^2)} \text{ Kg/mm}^2$$

onde : Z – é o comprimento da aresta em microns.