

TÉCNICAS DE PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS METALOGRÁFICAS



CÁSSIO BARBOSA

**COLEÇÃO
DE LIVROS
abm**

Blucher

abm
Associação Brasileira de
Metalurgia, Materiais e Mineração

Cássio Barbosa

TÉCNICAS DE PREPARAÇÃO
DE AMOSTRAS METALOGRÁFICAS

Técnicas de preparação de amostras metalográficas

© 2025 Cássio Barbosa

Editora Edgard Blücher Ltda.

Publisher Edgard Blücher

Editor Eduardo Blücher

Coordenação editorial Rafael Fulanetti

Coordenação de produção Ana Cristina Garcia

Produção editorial Rosemeire C. Pinto

Diagramação Know-how Editorial

Revisão de texto Vânia Cavalcanti

Capa Juliana Midori Horie

Imagem da capa iStockphoto

Blucher

Rua Pedrosa Alvarenga, 1245, 4º andar

04531-934 – São Paulo – SP – Brasil

Tel.: 55 11 3078-5366

contato@blucher.com.br

www.blucher.com.br

Segundo o Novo Acordo Ortográfico, conforme 6. ed.
do *Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa*,
Academia Brasileira de Letras, julho de 2021.

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer
meios sem autorização escrita da editora.

Todos os direitos reservados pela Editora Edgard Blücher Ltda.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Heytor Diniz Teixeira, CRB-8/10570

Barbosa, Cássio

Técnicas de preparação de amostras metalográficas / Cássio
Barbosa. – São Paulo : Blucher, 2025.

224 p. : il. – (Série de livros ABM)

Bibliografia

ISBN 978-85-212-2608-6 (Impresso)

1. Metalografia. 2. Amostras metalográficas. 3. Metalurgia.
4. Materiais metálicos. 5. Metais – Processos de preparação.
I. Título. II. Série.

CDU 620.18

Índice para catálogo sistemático:

1. Metalografia

CDU 620.18

SUMÁRIO

1. Introdução	19
1.1 Metalografia	19
1.1.1 Macrografia	20
1.1.2 Micrografia.....	21
1.1.3 Aplicações da metalografia/análise microestrutural	21
2. Corte.....	23
2.1 Equipamentos de corte e discos.....	25
2.2 Posição do disco de corte na máquina	28
2.3 Precauções com o corte	28
2.4 Procedimentos que aumentam a eficiência, a rapidez e a qualidade do corte	30
2.4.1 Eliminação de rebarbas	30
2.4.1.1 Fixação das amostras em ambos os lados	31
2.4.1.2 Redução da velocidade de avanço do corte	31
2.4.2 Como evitar o dano térmico (“queima”: oxidação superficial).....	31
2.4.2.1 Uso do disco de corte adequado.....	31
2.4.2.2 Uso de máquinas de corte totalmente automatizadas.....	31
2.4.2.3 Controle da vazão de fluidos de refrigeração/lubrificação ..	32

2.4.2.4	Informação importante para tentar minimizar a ocorrência de dano térmico	32
2.4.2.5	Ajustar a técnica de corte.....	32
2.4.2.6	Apoiar bem a amostra que será cortada	32
2.4.2.7	Uso de uma máquina de corte automática.....	32
2.4.2.8	Seleção do disco de corte adequado	33
2.4.2.9	Como proteger o disco de corte ao evitar a “pinçagem”	33
2.4.2.10	Uso de ferramentas como braçadeiras e tornos para fixar as amostras a serem cortadas.....	33
2.4.2.11	Como fixar corretamente amostras com formato irregular	33
2.4.2.12	Uso de blocos de suporte	34
2.5	Outros tipos de corte	34
3.	Embutimento	37
3.1	Embutimento a quente	38
3.1.1	Resina ou baquelite	39
3.1.2	Embutidoras.....	40
3.1.3	Embutidora manual	41
3.1.4	Embutidora automática	42
3.2	Embutimento a frio	43
3.2.1	Embutimento a frio com pressão atmosférica.....	43
3.2.2	Embutimento a vácuo (exemplo de procedimento).....	44
3.3	Embutimento condutor	46
3.4	Amostras sem embutimento	47
4.	Marcação/identificação da amostra	49
5.	Lixamento.....	53
5.1	Processo de lixamento	54
5.1.1	Lixamento grosseiro e fino.....	59
5.1.1.1	Principais características de cada lixamento grosseiro	59
5.1.1.2	Principais características de cada lixamento fino	60
5.1.2	Tipos de lixas	60
5.1.3	Substratos para lixamento e polimento.....	63
5.1.4	Lubrificantes para lixamento/desbaste e polimento metalográficos.	64
5.2	Equipamentos para lixamento/lixas	65
5.3	Brunimento	69
6.	Polimento	71
6.1	Processo de polimento	71
6.2	Dicas de polimento	73

6.2.1	Tipos de panos de polimento.....	75
6.2.2	Tipos de abrasivos de polimento.....	75
6.2.3	Informações para lixamento e polimento de amostras porosas.....	80
6.2.4	Polimentos e ataques alternados.....	81
6.2.5	Polimento automático/semiautomático.....	82
6.2.6	Polimento eletrolítico.....	83
6.2.6.1	Vantagens e desvantagens do polimento eletrolítico	85
6.2.6.1.1	Vantagens	85
6.2.6.1.2	Desvantagens.....	86
6.2.6.2	Equipamentos para polimento eletrolítico	86
6.2.6.2.1	Aspectos operacionais e teóricos do polimento eletrolítico	87
6.2.6.3	Fatores que influenciam o polimento eletrolítico	88
6.2.6.4	Comparação entre superfícies polidas mecânica e eletroliticamente	89
6.2.6.5	Problemas comuns no polimento	91
6.2.6.6	Revestimentos	91
6.2.6.7	Retenção de grafite e de inclusões	93
6.2.6.8	Recomendações específicas para o polimento de alguns metais.....	95
6.2.6.9	Diferenças entre o polimento e o ataque eletrolíticos.....	98
6.2.6.10	Outros processos semelhantes ao polimento eletrolítico ..	98
6.2.6.10.1	Polimento mecanoeletrolítico	98
6.2.6.10.2	Polimento químico	99
6.2.6.10.3	Critérios para a escolha do processo de polimento.....	99
6.3	Lubrificação e tipos de lubrificantes	99
6.3.1	Tipos de lubrificantes para o polimento metalográfico.....	99
6.3.1.1	Sílica coloidal	100
6.4	Equipamentos para polimento metalográfico	100
6.4.1	Polimento manual com pratos giratórios	100
6.4.2	Polimento automático.....	100
6.4.3	Preservação das amostras polidas.....	102
6.5	Considerações gerais.....	103
7.	Limpeza e secagem da amostra.....	105
8.	Ataque metalográfico	107
8.1	Conceito básico de ataque metalográfico.....	108
8.2	Teoria do ataque metalográfico	108

8.3	Técnica de ataque.....	114
8.4	Diferentes métodos de ataque.....	117
8.5	Eventuais problemas nos ataques.....	117
8.6	Ataque colorido (<i>tint etchant</i>).....	118
8.7	Ataque eletrolítico.....	121
8.7.1	Anodização.....	122
8.7.2	Ataque potenciostático.....	123
8.8	Ataques para observação sob luz polarizada.....	125
8.9	Ataque colorido por calor.....	126
8.9.1	Ataque por bombardeamento iônico.....	127
8.9.2	Ataque por pites em discordâncias.....	129
8.9.3	Recomendações específicas para ataque em determinados metais/ligas.....	131
8.10	Ataques para diferentes metais e suas ligas.....	132
8.10.1	Alumínio e suas ligas.....	132
8.10.2	Chumbo, estanho e zinco.....	133
8.10.3	Cobalto e suas ligas.....	134
8.10.4	Cobre e suas ligas.....	134
8.10.5	Aços e ligas ferrosas em geral.....	136
8.10.6	Aços bifásicos.....	139
8.10.7	Ataques para determinar o tamanho de grão da austenita prévia.....	139
8.10.8	Ataques seletivos para carbetos.....	141
8.10.9	Ataques para inclusões.....	142
8.10.10	Reagente de Oberhoffers: características.....	143
8.10.10.1	Solução A.....	143
8.10.10.2	Solução B.....	143
8.10.11	Ataques para aços inoxidáveis.....	144
8.10.12	Ligas de magnésio.....	151
8.10.13	Níquel e suas ligas.....	152
8.10.14	Nióbio.....	152
8.10.15	Metais preciosos.....	154
8.10.16	Terras raras.....	155
8.10.17	Titânio e suas ligas.....	155
8.10.18	Zircônio e suas ligas.....	157
8.10.19	Ataque metalográfico e observação da microestrutura.....	158
8.11	Armazenamento da amostra atacada.....	159
8.12	Normas para preparação/ataque de amostras metalográficas.....	159
8.12.1	Métodos de ataque químico para metalografia.....	160
8.12.2	Reprodutibilidade do ataque metalográfico.....	161

9. Segurança: equipamentos de proteção	163
9.1 Solventes.....	171
9.2 Ácidos.....	173
9.3 Outras substâncias químicas usadas na preparação metalográfica	177
10. Microscopia (conceitos básicos e referências).....	181
10.1 Elementos óticos	184
10.1.1 Formação da imagem: princípios óticos	184
10.1.2 Tipos de objetivas	185
10.1.2.1 Características das objetivas	186
10.1.2.2 Profundidade de foco e profundidade de campo	187
10.1.2.3 Profundidade de foco.....	187
10.1.2.4 Profundidade de campo	187
10.1.2.5 Aberrações esférica, cromática e astigmatismo.....	188
10.1.2.6 Calibração do microscópio ótico com uma escala micrométrica	190
10.1.2.7 Sistema de iluminação.....	190
10.1.2.8 Filtros.....	191
10.1.2.9 Absorção infravermelha.....	191
10.1.2.10 Absorção ultravioleta	191
10.1.2.11 Tipos de iluminação.....	191
10.1.2.12 Luz polarizada	191
10.1.2.12.1 Conceitos fundamentais.....	192
10.1.2.12.2 Contraste de fase	193
10.1.2.12.3 Contraste de interferência	194
10.1.2.12.4 Acessórios	194
10.1.3 Técnicas específicas de preparação de amostras para análises em outros tipos de microscópios e seus dispositivos	196
10.1.3.1 EBSD (<i>electron back scattering diffraction</i> – difração de elétrons retroespalhados)	196
10.1.3.2 MET	197
11. Metalografia de campo/não destrutiva	199
11.1 Réplica metalográfica	199
11.1.1 Definição.....	199
11.1.1.1 Obtenção.....	200
11.1.1.2 Características que tornam a réplica importante	200
11.1.1.3 Diretrizes consideradas no planejamento da obtenção de réplicas	201

11.1.1.4	Preparação prévia (lixamento/desbaste e polimento)	202
11.1.2	Descrição do procedimento de obtenção de réplicas.....	205
11.1.3	Dificuldades operacionais relacionadas com as condições de trabalho	206
11.1.4	Outras técnicas analítico-experimentais utilizadas na metalografia de campo.....	206
12.	Processamento de imagens metalográficas/análise automática de imagens/ metalografia quantitativa.....	207
13.	Relação de alguns ataques metalográficos recomendados para metais ou ligas metálicas mais usados na indústria.....	209
13.1	Aços.....	209
13.1.1	Ataques para aços carbono (comuns: ligas Fe-C):	209
13.1.2	Ataques para aços inoxidáveis	211
13.1.2.1	Ataques para outros aços/ligas ferrosas	216
13.1.2.2	Alumínio.....	216
13.1.3	Cobre e suas ligas	217
13.1.4	Cobalto e suas ligas	218
13.1.5	Ferros fundidos	219
13.1.5.1	Níquel e suas ligas	219
13.1.6	Titânio e suas ligas.....	221
13.1.7	Zinco e suas ligas	222
	Referências bibliográficas.....	223

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Este manual descreve conceitos gerais utilizados na preparação do corpo de prova para análise microscópica. Todos os materiais e produtos metálicos ferrosos podem ser preparados com este manual. Já os materiais e produtos não ferrosos exigem uma preparação mais detalhada, meticulosa, com total atenção uma vez que apresentam particularidades que dificultam sua preparação. Mas de modo geral, é necessário esclarecer que este texto não tem a pretensão de ser uma instrução normativa sobre o tema, e sim um conjunto de técnicas e práticas que utilizamos por vários anos em laboratório e que produziram resultados satisfatórios ou excelentes para os propósitos almejados.

1.1 METALOGRAFIA

Metalografia, como ciência, corresponde ao estudo da morfologia e microestrutura dos metais. Do ponto de vista de metodologia, a metalografia pode ser definida como um conjunto de práticas laboratoriais de preparação de amostras metálicas com o propósito de identificação e análise da microestrutura dos metais e suas ligas. Segundo registros históricos, surgiu em 1863, quando o precursor, o britânico Henry Clifton Sorby (1826-1908) pela primeira vez visualizou a estrutura interna de um material metálico em um microscópio ótico, o que possibilitou correlacioná-la a outras características, como composição química e propriedades físicas/

mecânicas. Sorby se dedicava primordialmente à geologia/mineralogia/petrografia, basicamente às análises de meteoritos, mas à época, passou a se interessar também por amostras de aços e outras ligas ferrosas fabricadas industrialmente, considerando certas semelhanças entre os meteoritos e os produtos metálicos industriais^[1,2]. A importância do conhecimento sobre a microestrutura dos materiais metálicos deriva de sua grande influência sobre as propriedades desses materiais, sobretudo as propriedades mecânicas, muito importantes para as diversas aplicações de uma ampla variedade de produtos metálicos, fato frequentemente citado na literatura sobre o tema. A metalografia pode servir a diferentes propósitos relacionados com a caracterização microestrutural, como: controle de qualidade na indústria; pesquisa científica em laboratório; e como subsídio ou informação complementar à análise de falhas. Para a realização da análise, o plano de interesse da amostra é cortado, lixado, polido e atacado com reagente químico, de modo a revelar as características estruturais e diferentes constituintes que compõem o metal. As amostras metalográficas, assim preparadas, são, depois, observadas em diferentes tipos de microscópios adequados a essa finalidade.

Atualmente, existe o termo “materialografia”, destinado a designar, de forma mais ampla, o estudo da microestrutura dos materiais em geral e das técnicas de preparação das amostras desses materiais. Assim, desdobrando esse conceito, além de metalografia, é possível utilizar expressões como “ceramografia”, para materiais cerâmicos, e “plastografia”, para materiais plásticos, mais bem-definidos como “poliméricos”. Entretanto, o escopo deste texto se restringe à metalografia, ou seja, aos materiais metálicos.

É importante considerar que, embora as imagens obtidas diretamente, sem tratamento computacional, de microscópios em geral, tanto óticos como eletrônicos sejam bidimensionais (2D), na realidade os materiais metálicos são formados por microestruturas tridimensionais (3D), então as imagens que observamos e capturamos com esses microscópios são projeções bidimensionais de microestruturas tridimensionais^[3].

Quanto ao tipo de observação desejada, a metalografia pode ser dividida em duas categorias: macrografia; e micrografia.

1.1.1 Macrografia

Na macrografia, a amostra é examinada a olho nu ou com o auxílio de um estéreo microscópio com baixa ampliação ($3,5\times$ até $67,5\times$). A amostra deve ser lixada, eventualmente polida e atacada para que a análise possa ser concluída. Na macrografia, são observados defeitos de fabricação no material, análises em juntas soldadas, observação de trincas, pites (*pitting*), poros, segregação, cordão de solda e outros tipos de análise que possam ser feitos em baixa ampliação.

1.1.2 Micrografia

Na micrografia, o corpo de prova é utilizado com o auxílio de um microscópio ótico (50 a 1.000×) para análise microestrutural, estudo de tamanho de grão, análise de fase e inclusões. A preparação é mais criteriosa quando relacionada à macrografia, sendo necessário um lixamento e um polimento com maior rigor de preparação.

1.1.3 Aplicações da metalografia/análise microestrutural

Além de ser uma ferramenta importante de caracterização de materiais metálicos em geral, a metalografia, ou seja, a metodologia que envolve a preparação de amostras e a observação destas em microscópios (óticos, eletrônicos de varredura e, eventualmente, outros tipos) também é uma técnica muito útil para a realização de projetos de pesquisa, análises de falhas e controle de qualidade na indústria metalúrgica.

Capítulo 2

CORTE

O corte de um material metálico costuma ser a primeira etapa de preparação de uma amostra para análise microestrutural. É realizado sempre que se deseja analisar parte de um material com massa e volume de tal ordem que suas dimensões ultrapassem os limites de acondicionamento no porta-amostra do microscópio utilizado para essa observação, seja este de qualquer tipo, estéreo, ótico, eletrônico ou de diferentes modalidades.

Entretanto, o corte a ser realizado não deve levar em consideração apenas as dimensões do porta-amostra, mas também se essa amostra representativa do material que está sendo analisado, ou seja, em suas dimensões, e posicionamento no material recebido para corte, deve apresentar características microestruturais compatíveis com as do material recebido como um todo ou que, pelo menos, sejam suficientemente abrangentes no contexto da análise que será realizada^[1].

A escolha e a localização da seção a ser estudada dependem basicamente da forma da peça e dos dados que se deseja obter ou analisar. Em geral, é efetuado o corte longitudinal ou o corte transversal na amostra.

A seção resultante do corte pode ser transversal ou longitudinal. A escolha do tipo de seção será direcionada pelos objetivos a serem alcançados na análise microestrutural do material. Em geral, é obtida uma seção transversal, quando o

objetivo é observar o formato e o tamanho (diâmetro médio) dos grãos (cristais) que compõem a microestrutura do material, se é mais equiaxial ou mais alongado; a segregação (gradiente de composição química do interior para os contornos de grãos); a posição, a distribuição, a forma e as dimensões de poros e cavidades em geral; formato e dimensões de dendritas (estruturas típicas de solidificação, de formato ramificado); profundidade de têmpera, principalmente. A seção longitudinal, em geral, é preferida quando se deseja observar: o tipo de processo de fabricação escolhido para aquele material, como fundição, forjamento, laminação, estampagem, usinagem/torneamento, soldagem e outros; a extensão de camadas superficiais resultantes de tratamentos termoquímicos, como cementação, nitretação, carbonitretação e outros; a presença de inclusões não metálicas^[1,4].

Outro aspecto importante que deve ser considerado no corte de amostras metalográficas é a necessidade de não alterar a microestrutura do material durante a realização dessa etapa inicial de seccionamento. O corte pode ser realizado com diferentes máquinas e materiais consumíveis, mas é possível minimizar a extensão do dano: alteração do aspecto visual da amostra, como “queima” nas bordas da amostra, geralmente resultante do atrito excessivo entre o material de corte e a amostra causado por velocidade excessiva de corte, deve ter a mínima extensão possível, podendo variar em função do tipo de material de corte e da amostra metálica que está sendo cortada. Essa “queima” é um aquecimento excessivo que, além do atrito mecânico, também pode provocar alterações microestruturais na amostra metalográfica. Caso seja impossível evitar totalmente essa “queima”, é necessário cuidar para que ela ocorra a uma distância significativa da área de interesse a ser analisada ao microscópio^[5,6] (Figura 2.1) pelo corte com dano térmico.



Figura 2.1 Amostra metalográfica “queimada” (escurecida) pelo corte com dano térmico.

Fonte: Acervo do autor.

Além disso, a escolha da região da amostra original a ser cortada é de fundamental importância. Essa região, a ser separada do restante do material para ser analisada, deve ser representativa de toda a amostra original da qual está sendo removida por seccionamento. Essa é, geralmente, a etapa inicial de todo o processo de preparação de amostras metalográficas, ou seja, de amostras para observação da microestrutura, tendo, assim, grande impacto nas etapas posteriores^[6].

2.1 EQUIPAMENTOS DE CORTE E DISCOS

Uma vez definidos o posicionamento e as dimensões da amostra que será cortada, escolhe-se a ferramenta de corte para a secção. O equipamento mais utilizado para o corte, em virtude de sua grande versatilidade, que permite cortar amostras com vários níveis diferentes de dureza, é conhecido como “policorte”, a máquina de corte com discos abrasivos e rotativos. Entretanto, existem vários tipos de máquinas policorte, sendo essas diferenciadas pelo tipo de corte. Para cortes comuns em peças de dimensões grandes, é utilizada a policorte com discos abrasivos mais robustos. Se o corte for de precisão em razão de a peça ser estreita ou pequena, utiliza-se a policorte para cortes precisos, uma vez que esta usa discos mais finos que uma policorte comum. Em todo caso, geralmente os discos abrasivos de corte são considerados materiais consumíveis, pois, com o uso frequente, podem sofrer desgaste, deixando de ser suficientemente afiados e, até mesmo, podem ser quebrados após muito tempo de uso^[1,5] (Figura 2.2).

As dimensões e os materiais com os quais os discos de corte metalográfico são fabricados variam de acordo as características do material que será cortado assim como o tipo de corte desejado.

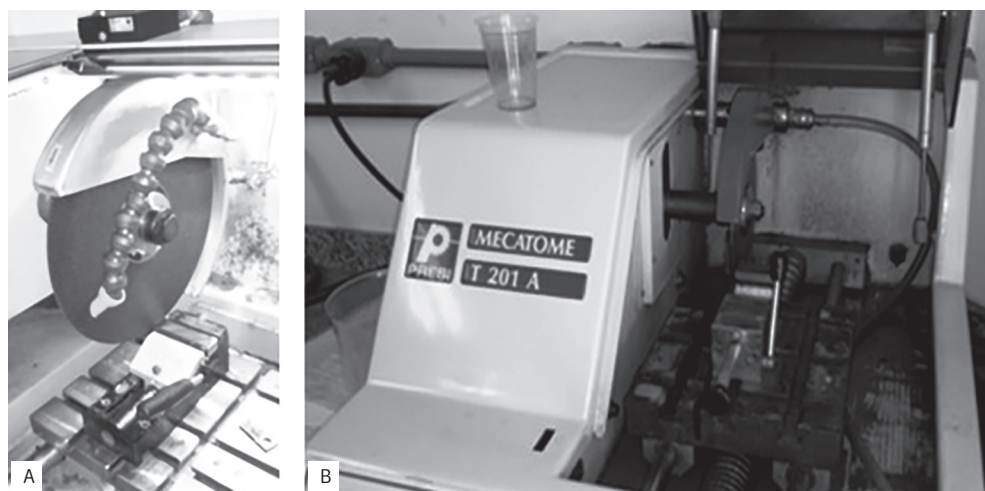


Figura 2.2 (a) Policorte e (b) policorte de precisão.

Fonte: Acervo do autor.

Em geral, cortes mais grosseiros são realizados com discos fabricados com carbetto de silício (SiC) aglomerado, ao passo que cortes finos, aqueles nos quais a perda de material na amostra cortada tem de ser mínima, devem ser realizados com discos metálicos diamantados de pequena espessura (Figura 2.3). Os discos de corte mais grosseiro contêm partículas abrasivas aleatoriamente orientadas que podem incidir sobre a amostra metálica em diferentes ângulos, alguns dos quais podem ser desfavoráveis para o corte. Os discos de corte mais fino são, geralmente, metálicos, de aço inoxidável ou de alguma liga de cobre, em cujas bordas são aderidas, com o uso de resinas ligantes específicas, partículas de diamante, de elevada dureza, que efetivamente garantem o corte da amostra por abrasão. Entre os discos diamantados para corte fino, existem dois tipos diferentes: os que são usados em baixa velocidade de rotação para o corte de amostras muito duras, como as de materiais cerâmicos e minerais (diamante para baixas velocidades); e os que são utilizados em velocidade mais alta para o corte de amostras menos duras, como a maioria dos materiais metálicos. Esses discos são mais caros e direcionados para cortes finos. No que se refere aos discos de SiC para corte mais grosseiro, alternativamente alumina (Al_2O_3) para o corte de materiais metálicos mais duros, como as ligas ferrosas, por exemplo, as partículas de abrasivo podem ser mais finas ou mais grosseiras. O abrasivo à base de alumina apresenta partículas mais arredondadas e compactas do que o abrasivo de carbetto de silício. Assim, os discos de corte de alumina se desgastam bem mais lentamente que os de carbetto de silício, proporcionando uma vida mais prolongada; sendo, desse modo, mais adequados para o seccionamento de amostras de ligas ferrosas. Por sua vez, o abrasivo de carbetto de silício

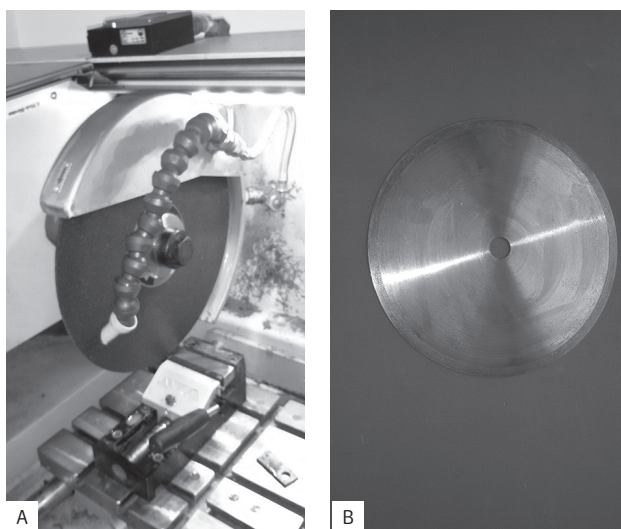


Figura 2.3 (a) Discos de corte grosseiro posicionado na máquina. (b) Disco de corte fino.

Fonte: Acervo do autor.

é muito frágil, quebradiço, então, as partículas de SiC, ao se fraturarem durante a realização do corte, geram novas arestas afiadas, que são mais indicadas para o seccionamento de materiais mais macios e dúcteis, como grande parte das ligas não ferrosas.

No que se refere ao tamanho das partículas abrasivas, por um lado, as partículas mais grosseiras permitem cortes rápidos e “limpos”, enquanto as partículas mais finas produzem cortes mais suaves e são mais adequadas para trabalhos mais delicados. Por outro lado, quanto ao alinhamento, as partículas adequadamente alinhadas são capazes de garantir um corte efetivo e apropriado, enquanto as partículas inadequadamente alinhadas geram calor por atrito durante a operação de corte e podem causar arranhões e arrancamento de material na superfície da amostra metálica. Embora o calor gerado pelo atrito favoreça o corte, ele pode danificar a amostra e, por esse motivo, praticamente sempre é necessário o uso de um fluido lubrificante, em geral uma emulsão de óleo em água, conhecida popularmente como “óleo solúvel”, que é despejado por meio de dutos sobre a amostra metálica que está sendo cortada^[1,5,6].

Cada fabricante determina o tipo do disco relacionado à dureza do material a ser seccionado. Os discos de corte são produzidos com diferentes diâmetros e espessuras, porém, em laboratórios de metalografia, o diâmetro dos discos de corte geralmente não ultrapassa o limite de 300 mm (30 cm). Discos de maior espessura costumam produzir maior deformação (profundidade máxima de dano: 1 mm) em amostras metalográficas do que discos mais finos (máxima: 0,55 mm, na média: 0,20 mm). Esses discos mais finos removem uma quantidade mínima de material ao longo de uma dimensão da amostra. Isso é muito importante quando a amostra é pequena, ou quando é de um material precioso, de alto custo ou difícil obtenção. Quanto mais fino o corte, menor será a energia necessária para o seccionamento, o que se traduz em menor possibilidade de correr o dano térmico e a deformação/encruamento da amostra, o que possibilita, assim, reduzir o tempo de lixamento e de polimento subsequentes. Contudo, esses discos de corte fino, de alta precisão, necessitam de máquinas específicas, não podendo ser utilizados em máquinas de corte de maior porte, usadas com discos mais espessos. Outros métodos de corte, como a eletroerosão, podem proporcionar menores profundidades de deformação (danos). De modo geral, os discos de corte devem ser armazenados na posição vertical, e não horizontal, pois esta pode acarretar o surgimento de distorções ou empenamentos ao longo do tempo. Um fator que influi na dureza dos discos de corte abrasivos é o nível de porosidade que, quanto menor, proporciona maior dureza, o que implica no uso com menores velocidades de giro^[1,5].

2.2 POSIÇÃO DO DISCO DE CORTE NA MÁQUINA

Outro aspecto importante do corte metalográfico é o posicionamento do disco em relação à amostra dentro da máquina de corte. O disco deve estar alinhado perpendicularmente (a 90°) da superfície da amostra que deve estar bem fixa na morsa da máquina de corte.

A amostra pode ter uma superfície plana ou curva, como no caso da superfície longitudinal de um cilindro, por exemplo. Quando a superfície é curva, é necessário, a princípio, mover suavemente o disco de corte de modo que este incida com toques suaves sobre a superfície curva, inicialmente marcando a amostra e prosseguir de modo a abrir gradativamente um sulco nessa superfície. Só então é possível descer o disco mais de forma mais vigorosa e concluir o corte.

Em geral, os discos de corte metalográfico giram no sentido anti-horário, porém alguns discos metálicos diamantados apresentam em sua face metálica uma gravação mostrando o sentido de rotação durante o corte (Figura 2.4).

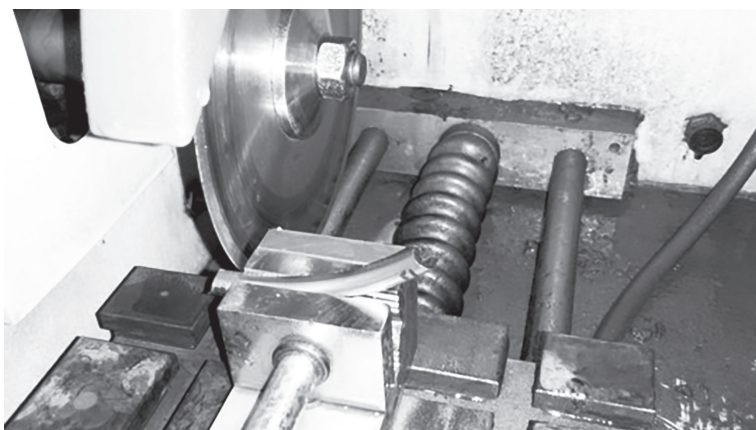


Figura 2.4 Posicionamento de corte.

Fonte: Acervo do autor.

2.3 PRECAUÇÕES COM O CORTE

Precauções de segurança devem ser tomadas pelo operador que executa o corte metalográfico, sobretudo o uso de equipamentos de proteção.

O corte deve ser realizado com o uso de óleo solúvel (emulsão de óleo em água) como lubrificante e refrigerante, evitando o superaquecimento da peça que está sendo cortada, que, nesse caso, apresentará aspecto visual escurecido e localizado, sendo corriqueiramente denominada “amostra com queima” ou “amostra queimada” pelo corte, ou seja, com dano térmico, resultante do aquecimento excessivo decorrente do atrito demasiado do disco com a amostra durante o corte (Figura 2.1). Isso pode ser evitado mediante aplicação de menores pressão e

velocidade do disco durante o corte, além da vazão adequada e contínua de óleo solúvel. O fluxo da emulsão deve ser o mais uniforme possível, preferencialmente como corte submerso, garantindo a maior continuidade possível no contato com o disco de corte e a amostra. Outro cuidado consiste em evitar o excessivo encruamento superficial da amostra metálica que está sendo cortada^[1,5].

Outro aspecto importante na realização do corte metalográfico é a fixação da amostra no policorte, que não pode apresentar nenhum tipo de instabilidade mecânica, ou seja, não pode ficar solta, nem mesmo parcialmente, pois isso poderia levar à quebra do disco e mesmo a acidentes bem mais graves.

A utilização de ferramentas adequadas, para a fixação da amostra a ser cortada, é de grande importância para evitar que a amostra fique solta e se mova durante o corte, com consequências indesejáveis, o que é ainda mais frequente quando a amostra tem grandes dimensões. Essa etapa de fixação da amostra para o corte pode ser demorada e, mesmo assim, caso não seja adequada, pode danificar a amostra, comprometendo todo o trabalho de preparação metalográfica. Se frequentemente é necessário cortar amostras com formato semelhante, recomenda-se o uso de ferramentas personalizadas (“customizadas”), não só para uma fixação mais eficiente, evitando problemas de instabilidade no corte, mas também propiciando maior rapidez e eficiência no corte, assim como reduzindo a probabilidade de quebra do disco abrasivo de corte.

Algumas máquinas de corte são programáveis/automatizadas, porém sua utilização depende do tipo de material que será cortado e das recomendações do fabricante do equipamento no que se refere aos discos que serão utilizados e ao encruamento que pode ser introduzido no material durante o corte, entre outros fatores.

A realização da operação de corte, se inadequada, pode acarretar problemas como: a quebra do disco; o aquecimento excessivo da amostra; o desgaste excessivo do disco de corte; e a formação de rebarbas nas amostras^[1].

A quebra do disco pode ser causada por um ou mais dos seguintes fatores: velocidade excessiva no corte; pressão excessiva no corte; fixação inadequada da amostra; e refrigeração inadequada^[1,5].

O aquecimento excessivo (“queima”) pode ser causado por: refrigeração insuficiente; velocidade de corte inadequada; ou uso de disco de corte inadequado. Um tipo de disco que serve para um determinado material, pode não servir para outro^[1].

O desgaste excessivo do disco de corte pode ser provocado pela insuficiente dureza do disco, pela refrigeração irregular: em geral, acarretada pelo entupimento dos dutos que conduzem o líquido refrigerante, pela presença de rolamentos defeituosos na máquina de corte e pela instalação inadequada do disco de corte na máquina^[1].

A formação de rebarbas no material cortado pode resultar de: dureza muito elevada do disco de corte em comparação com o material; utilização de um disco de corte com granulometria muito grosseira; e velocidade excessiva no corte^[1].

Assim, é muito importante selecionar o disco de corte mais adequado para o tamanho e o material da amostra, de modo a garantir a eficiência do corte, bem como reduzir o tempo e o consumo de outros recursos dedicados a essa operação. Geralmente, amostras com maiores dimensões acarretam maior desgaste no disco abrasivo durante a operação de corte, em comparação com amostras menores. O mesmo ocorre com amostras mais duras, que levam muito mais tempo para serem cortadas, em comparação com amostras mais macias, que também podem ser cortadas com velocidades muito maiores.

Outro aspecto importante que deve ser considerado no corte de amostras metalográficas é a utilização de uma máquina específica para cada tipo de corte. Existem máquinas de corte mais adequadas para cortes com mais discos grosseiros (espessos) em amostras com maiores dimensões e outras máquinas mais adequadas para cortes mais finos em amostras com menores dimensões. Porém, além disso, é necessário considerar que, cortando amostras maiores, existe uma grande área superficial de contato entre o material e o disco de corte, o que resulta em maior risco de geração de calor excessivo por atrito durante o corte. Então, além de “queimar” a superfície da amostra, esse calor assim gerado pode alterar a microestrutura do material que está sendo cortado. Esse dano poderia ser eliminado durante o lixamento/desbaste, mas isso acarretaria considerável aumento de tempo na execução do processo de preparação da amostra metalográfica. Assim, para tentar evitar, ou pelo menos minimizar a ocorrência desse tipo de problema, é necessária uma adequada combinação de uso de máquinas de corte, acessórios e material de consumo (discos de corte, fluidos de refrigeração, ferramentas de fixação e máquinas de corte).

2.4 PROCEDIMENTOS QUE AUMENTAM A EFICIÊNCIA, A RAPIDEZ E A QUALIDADE DO CORTE

O corte da amostra metalográfica é uma etapa muito importante para proporcionar eficiência e rapidez nas etapas seguintes da preparação dessas amostras. Algumas recomendações simples, ao serem seguidas, podem viabilizar ganhos de precisão, reprodutibilidade e rapidez durante a operação de corte. Nesse sentido, alguns cuidados são necessários para evitar, ou pelo menos minimizar erros, e são descritos a seguir.

2.4.1 Eliminação de rebarbas

Rebarba é definida como uma pequena protuberância existente no material, geralmente após o corte. Essas rebarbas precisam ser eliminadas antes das etapas seguintes da preparação de amostras metalográficas, pois do contrário acarretariam

um aumento significativo no tempo de lixamento/desbaste e polimento dessas amostras. Assim, é possível evitar o surgimento dessas rebarbas durante a operação de corte, seguindo alguns procedimentos básicos descritos na sequência.

2.4.1.1 Fixação das amostras em ambos os lados

Um corte bem-executado começa com uma boa fixação das amostras na máquina. Quando apenas um dos lados da amostra está bem-fixado, quando o material é separado em partes cortadas, frequentemente serão formadas uma ou mais rebarbas. A fixação de ambos os lados da amostra resolve esse problema.

2.4.1.2 Redução da velocidade de avanço do corte

Ao executar o corte manual, pode ser difícil manter adequadamente baixa a velocidade de avanço, sobretudo pouco antes de deixar a amostra, o que pode acarretar a formação de rebarbas. Uma possível solução seria usar uma máquina de corte totalmente automática, com controle de avanço de corte.

2.4.2 Como evitar o dano térmico (“queima”: oxidação superficial)

O dano térmico é conhecido como “queima” da superfície do material causada por operação incorreta de corte, o que gera oxidação superficial localizada na região do corte e adjacências. Quando isso acontece, adjacente à região cortada surge uma descoloração visível e também ocorre uma alteração microestrutural até certa profundidade. Para o dano térmico ser removido, é necessário um lixamento muito demorado; por vezes, até mesmo um polimento também prolongado, antes do ataque e da observação ao microscópio.

2.4.2.1 Uso do disco de corte adequado

Uma das causas mais comuns de dano térmico é a utilização de disco de corte errado, inadequado. A escolha do disco de corte mais adequado, além de melhorar a qualidade na preparação das amostras, permitirá maior rapidez e menor gasto de consumíveis nas etapas seguintes, principalmente no lixamento/desbaste, também de modo a assegurar maior número de cortes por disco. Como consequência, será possível preparar mais amostras num tempo mais curto e com menor custo por amostra.

A escolha do disco de corte mais adequado requer algumas considerações, incluindo o tipo de material a ser cortado e o tamanho da amostra, mas uma consulta aos catálogos dos fornecedores pode ajudar nessa seleção.

2.4.2.2 Uso de máquinas de corte totalmente automatizadas

Assim como no caso das rebarbas, o dano térmico é frequentemente causado por elevadas velocidades de avanço no corte. É possível resolver esse problema com o uso de máquinas de corte automáticas que permitem ajustar a velocidade de avanço. Assim é possível reduzir mais facilmente a velocidade de avanço de corte, evitando ou minimizando o dano térmico.

2.4.2.3 Controle da vazão de fluidos de refrigeração/lubrificação

É muito importante manter a mostra razoavelmente fria durante o corte. Assim, é necessário verificar regularmente o sistema de resfriamento e o nível do fluido de resfriamento, também de modo a assegurar o posicionamento correto/adequado do bocal de saída desse líquido em relação à amostra que está sendo cortada.

2.4.2.4 Informação importante para tentar minimizar a ocorrência de dano térmico

Se mesmo com o uso de uma máquina automática de corte, com ajuste regulável de avanço, ainda ocorrer com certa frequência o dano térmico, alguns desses equipamentos possibilitam um movimento oscilatório do disco de corte, o que permite reduzir a área de contato entre o disco e a amostra. Desse modo, é possível cortar materiais muito duros sem a ocorrência do dano térmico e, simultaneamente, usar discos de corte mais duros, que duram mais tempo, assim reduzindo os custos.

Como aumentar a reprodutibilidade ao evitar o surgimento de trincas em materiais frágeis ou revestimentos?

É bastante comum o surgimento de trincas em amostras de materiais frágeis ou com revestimentos, o que geralmente torna necessário cortar outro corpo de prova na mesma região, atrasando o processo de corte. Mas é possível evitar esse atraso, seguindo alguns procedimentos básicos.

2.4.2.5 Ajustar a técnica de corte

Quando se corta um material metálico revestido, o material de base age como suporte, então é recomendável começar o corte pelo lado revestido da amostra. Caso o operador comece pelo material de base, pode levar a um corte irregular e dificultar o processo de corte, além de potencialmente danificar o revestimento, formando lascas ou desprendimento do revestimento, que inviabilizariam um corte limpo e preciso.

2.4.2.6 Apoiar bem a amostra que será cortada

Apoiar a amostra é muito importante para parar o trincamento. Se a amostra for muito pequena, é necessário embuti-la. Para melhorar o apoio, pode ser aplicada resina epóxi durante o embutimento a vácuo. Isso garantirá que a resina epóxi penetre em todos os poros, trincas e aberturas do revestimento, proporcionando apoio completo durante o corte.

2.4.2.7 Uso de uma máquina de corte automática

A velocidade excessiva de corte é uma causa muito comum do surgimento de trincas. É muito difícil obter e manter a velocidade de corte adequada em materiais frágeis e revestidos quando se utiliza uma máquina de corte manual. Assim, a melhor solução é usar uma máquina de corte automática com velocidade ajustável.

2.4.2.8 Seleção do disco de corte adequado

Em menos de 10 a 20% das amostras revestidas, o mesmo disco de corte usado para o substrato também pode ser utilizado para o corte da área revestida; na maioria dos casos, é necessário usar um disco de corte diferente.

2.4.2.9 Como proteger o disco de corte ao evitar a “pinçagem”

Amostras de aços endurecidos tendem a provocar o surgimento e aumento das tensões internas durante os cortes longitudinais. Assim, a amostra tende a prender (“pinçar”) o disco de corte, o que levaria este a ficar preso ou a se quebrar. No pior dos casos, essa “pinçagem” deformaria a amostra, o que poderia até causar o surgimento de tensões e mudanças microestruturais, o que eliminaria a representatividade da amostra e invalidaria toda a análise. Mas há um modo simples de evitar todos esses problemas.

2.4.2.10 Uso de ferramentas como braçadeiras e tornos para fixar as amostras a serem cortadas

O uso de ferramentas simples, ajustáveis e compactas, como braçadeiras e tornos, minimiza tensões, deformações, deslocamentos e a “pinçagem” de modo a proteger a amostra e o disco de corte (Figura 2.5).

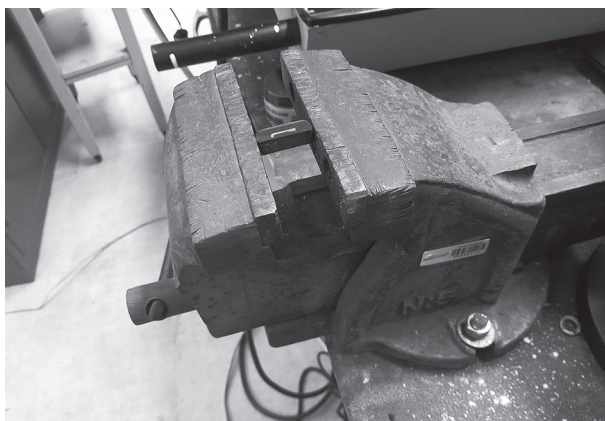


Figura 2.5 Exemplo de ferramenta de fixação (torno) que pode ser usada para evitar a “pinçagem” e deslocamentos no corte de uma amostra com uma ferramenta manual.

Fonte: Acervo do autor.

2.4.2.11 Como fixar corretamente amostras com formato irregular

Uma amostra com formato irregular pode dificultar a fixação necessária para o corte, o que dificulta e atrasa essa importante operação. Se essa amostra não for adequadamente fixada, os movimentos durante o corte podem inviabilizar a operação, que precisará ser refeita. Mas alguns procedimentos básicos podem resolver esse problema como os três citados a seguir.

2.4.2.12 *Uso de blocos de suporte*

Para amostras com maiores dimensões, pode ser bastante útil usar blocos de apoio para a amostra durante o corte de modo a evitar que esta se desloque indevidamente, ou mesmo seja derrubada ou virada durante essa etapa da preparação metalográfica.

Outras providências podem facilitar o corte: o embutimento de amostras muito pequenas; a utilização de ferramentas de fixação customizadas; e a realização do corte com velocidades mais baixas. Se o disco de corte for muito duro para o material da mostra, deve ser substituído por um menos duro.

2.5 OUTROS TIPOS DE CORTE

Além do equipamento conhecido como máquina de corte com disco abrasivo, ou polí-corte, o corte de amostras metalográficas pode ser realizado por outros meios, como^[1,5]:

- **Maçarico oxiacetilênico/oxicorte:** processo de corte que utiliza a chama oxiacetilênica, resultante da oxidação (exotérmica, podendo chegar a 3.100 °C) do acetileno (C_2H_2) para cortar amostras metálicas, com um equipamento relativamente simples, denominado “maçarico”, que direciona a chama para a região da amostra onde deve ser realizado o corte^[7]. Esse processo só é indicado no início da etapa de corte, quando é necessário cortar alguma peça de grandes dimensões para, depois, efetuar cortes de amostras menores com outros processos, como os que utilizam discos abrasivos de corte. Embora seja muito eficiente para o corte de peças grandes, não é indicado para cortes de maior precisão, necessários em peças menores.

Além do corte, o processo oxiacetilênico também pode ser usado para soldar amostras de algumas ligas metálicas, mas existe certa diferença entre o maçarico de corte e o maçarico de solda: além dos componentes existentes no maçarico de solda, o maçarico de corte tem uma tubulação de oxigênio para corte que dispõe de uma válvula de comando. O maçarico de corte tem uma extremidade funcional com peças removíveis, formando um conjunto denominado “cabeça” no qual também estão os orifícios da chama de aquecimento e do jato de corte. Essas cabeças são de diferentes tipos no que se refere à posição dos orifícios de aquecimento/corte, e ao nível de pressão, alta ou baixa. Outra diferença entre os maçaricos de corte está no tipo de operação: manual; e automático. De modo geral, o controle das pressões e velocidades de aquecimento e de corte é muito importante para evitar problemas/defeitos na peça cortada. Isso é mais fácil com maçaricos automáticos, embora seu custo de aquisição seja maior. Outro aspecto importante, nesse contexto, é o uso de cabeças cortadoras em boas condições e adequadas à espessura da amostra que será cortada, assim como a pureza do oxigênio utilizado, que deve ser de, pelo menos, 99,5%^[7].

- **Eletroerosão:** processo de corte baseado na existência de dois eletrodos, sendo um deles a própria amostra a ser cortada. Então, uma descarga elétrica é aplicada, porém com intensidade e duração controladas. A depender das propriedades térmicas da centelha do metal que está sendo fundido e da intensidade da vaporização localizada, é possível obter uma camada superficial menos afetada do que a obtida pelos processos de corte por abrasão^[4].

Durante o processo de corte por eletroerosão, o conjunto formado pela amostra e pela ferramenta é mergulhado em um tanque contendo líquidos isolantes e com constante dielétrica elevada (alta capacidade de armazenar carga elétrica) e baixa viscosidade, por exemplo, querosene, óleo para transformador e óleo parafínico^[4].

No início do processo, é utilizada uma lâmina que corta uma seção superficial ou um disco rotativo, usada como ferramenta para planificar o acabamento do plano de corte. É importante garantir um controle automático do espaço entre a ferramenta e a amostra e essencial assegurar que não seja fechado totalmente este espaço. As características elétricas favorecem a rapidez do corte, com superfície mais irregular, porém com maior planicidade no corte mais lento^[4].

As principais características do processo de corte por eletroerosão são:

- A superfície apresenta crateras, que são pequenas, quando a energia de centelhamento é baixa.
- Em vários metais, como latões, zinco, cromo, antimônio, molibdênio e tungstênio, ocorre extensa formação de crateras superficiais.
- É possível a ocorrência de transformações de fase, na região adjacente à zona fundida.
- Podem ocorrer alterações de composição química nas camadas mais externas, por algum tipo de contaminação.
- É possível surgir algum tipo de camada superficial deformada, encruada, até certo ponto, porém muito menos profunda do que a camada encruada resultante do corte abrasivo.
- Uma desvantagem significativa do processo de corte por eletroerosão é o alto custo de aquisição do equipamento, assim como seu alto custo operacional.
- Eletroquímico (com jato ou outras formas de aplicação de ácido): embora produza muito menor deformação (encruamento), praticamente inexistente, é um processo lento, a solução ácida utilizada é muito corrosiva, gerando problemas de manutenção no equipamento, além de gerar superfícies onduladas, não planas, apesar de livre de deformações^[4].

- **Mecânico:** com outro tipo de ferramenta, como tesouras/guilhotinas, que corta por cisalhamento e não abrasão, ou serras/serrotes (manuais ou mecanizados). Essas ferramentas de corte são aplicadas a materiais relativamente macios, propiciando relativa rapidez ao corte; mesmo assim, produzem deformação extensa, aspereza excessiva, atrito e calor, gerando danos que requerem lixamento considerável para produzir uma superfície livre de encruamento e com microestrutura autêntica do material.
- **Fratura:** mais indicada para materiais muito duros e relativamente frágeis, porém requer adequado lixamento ou polimento posterior para remoção da superfície artificialmente fraturada com esse propósito.
- **Cortes por microtomia:** utiliza um sistema mecânico com navalhas finas e afiadas no qual a amostra colocada em suportes para deslocamentos micrométricos ou com ângulos de corte muito pequenos, havendo também a possibilidade de o porta-amostra realizar deslocamentos micrométricos, o que permite baixas pressões e pequenos avanços de corte. O processo é utilizado para metais muito dúcteis como chumbo, índio e cádmio, geralmente como metais comercialmente puros^[4].

Uma versão desse equipamento de corte, porém operando em baixas temperaturas, denominado “criomicrotomo”, é empregado no corte de materiais ainda mais sensíveis, como amostras poliméricas e biológicas para observação em microscópio eletrônico de varredura (MEV). Um exemplo é mostrado na Figura 2.6.



Figura 2.6 Criomicrotomo usado para cortar amostras poliméricas e biológicas para MEV.

Fonte: Acervo do autor.

Entretanto, o equipamento de corte mais comumente utilizado para o seccionamento de amostras metalográficas, é o policorte com disco abrasivo.

Esta obra apresenta procedimentos bem-sucedidos e conceitos relacionados à metodologia de preparação de amostras metalográficas para microscopia.

Os temas foram organizados da seguinte forma:

- **capítulo 1:** definição de metalografia, alguns aspectos históricos e conceitos fundamentais;
- **capítulo 2:** corte de amostras, inclusive equipamentos e insumos utilizados, como também informações para maior eficiência e precisão no corte;
- **capítulo 3:** embutimento das amostras: variedades (a quente e a frio), equipamentos e insumos;
- **capítulo 4:** marcação de amostras;
- **capítulo 5:** lixamento, com equipamentos e insumos;
- **capítulo 6:** polimento, com suas variedades, equipamentos, insumos e informações para melhorar a qualidade e eficiência;
- **capítulo 7:** limpeza e secagem de amostras;
- **capítulo 8:** ataque para revelação da microestrutura: métodos, variedades e informações (qualidade, eficiência e segurança);
- **capítulo 9:** segurança e o uso de equipamentos de proteção;
- **capítulo 10:** conceitos básicos de microscopia;
- **capítulo 11:** tópicos introdutórios de metalografia de campo (uso de réplicas);
- **capítulo 12:** tópicos básicos de processamento, análise automática e quantitativa de imagens;
- **capítulo 13:** relação de ataques usados satisfatoriamente para diferentes ligas metálicas.



www.blucher.com.br

**COLEÇÃO
DE LIVROS
abm**

Blucher



Clique aqui e:

VEJA NA LOJA

Técnicas de preparação de amostras metalográficas

Cássio Barbosa

ISBN: 9788521226086

Páginas: 224

Formato: 17 x 24 cm

Ano de Publicação: 2025
