

ALEXANDRE AVELAR ALVES MENDES

**ESTUDO DE PROCESSO DE RETIFICAÇÃO APLICADO À
RECUPERAÇÃO DE PLACAS DE MOLDE DE MÁQUINAS
DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE PLACAS DE AÇO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre Em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: materiais e processos de fabricação.

Orientador

Prof. Marcelo Camargo Severo de Macedo, Dr.

**Mestrado em Engenharia Mecânica
Universidade Federal do Espírito Santo
Vitória, julho de 2011**

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Mendes, Alexandre Avelar Alves, 1978-
M538e Estudo de processo de retificação aplicado à recuperação de
placas de molde de máquinas de lingotamento contínuo de
placas de aço / Alexandre Avelar Alves Mendes. – 2011.
101 f. : il.

Orientador: Marcelo Camargo Severo de Macedo.

Coorientador: Flavio Silva.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Retificação e polimento. 2. Fundição contínua. 3.
Moldagem (Fundição). 4. Usinagem. 5. Siderurgia. I. Macêdo,
Marcelo Camargo Severo de. II. Silva, Flavio. III. Universidade
Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621

RESUMO

Este estudo apresenta uma proposta alternativa à recuperação por usinagem das placas de cobre do molde da Máquina de Lingotamento Contínuo da ArcelorMittal Tubarão, utilizando o processo de retificação em substituição aos processos atuais (aplainamento, fresamento e mandrilhamento). O trabalho objetiva, assim, verificar as condições atuais e analisar a viabilidade técnica da retificação como processo único de recuperação das placas em questão. Variáveis de diversas naturezas motivaram este estudo, uma vez que o processo atual de recuperação demanda um tempo excessivo e que a sugestão proposta confronta com o paradigma da utilização da retificação na usinagem de materiais dúcteis. Adicionalmente, é senso acadêmico e prático, que a rugosidade superficial das placas de molde tem influência no controle térmico deste e possivelmente na qualidade superficial das placas de aço lingotadas. Para o processo de retificação proposto, foi avaliada a influência da velocidade de avanço da mesa e da penetração de trabalho na rugosidade superficial das amostras. Com base em revisão da literatura e pesquisa bibliográfica, foi estabelecido um referencial teórico contextualizado para a investigação do processo atual e do sugerido, visando analisar e comparar as características e limitações de cada um. O estudo apresenta, além da análise dos processos atual e sugerido de recuperação de placas de molde, uma revisão sucinta do processo de lingotamento contínuo de placas de aço e dos aspectos tribológicos relativos aos processos de usinagem por abrasão. A conclusão deste trabalho apresenta resultados positivos na utilização da retificação, tanto em termos de qualidade superficial quanto em ganho de produtividade, sobre os processos convencionais de recuperação das placas, apontando esta alternativa como tecnicamente viável.

ABSTRACT

This study presents an alternative for recuperation by machining of the ArcelorMittal Tubarao Continuous Casting Machine wide copper plates proposing a grinding process instead of the current ones (planning or boring). Some of the variables that motivated this study were the lead time required to complete the current machining operations and because the proposed process confronts with the paradigm of the grinding applied to ductile materials. In addition to those variables in an academic and practical sense the superficial roughness may influence the mold thermal control and slabs superficial quality. The grinding process proposed evaluated the influence of the feed rate and cut depth in the specimens' roughness. Based upon a broad revision of the related literature, a theoretical reference has been established to investigate the current and the proposed machining operations, towards the characteristics and limitations analysis and comparison. In addition to the current and proposed processes aspects, this study presents a general review of steel slabs continuous casting and tribological aspects related to the abrasive machining operations. The conclusion presents positive results in terms of superficial roughness and productivity if compared to conventional mold repair processes, also indicating the technical feasibility of the grinding as a sustainable process.

SUMÁRIO

RESUMO.....	4
SUMÁRIO	6
1 INTRODUÇÃO	8
1.1 LINGOTAMENTO CONTÍNUO	8
1.2 OBJETIVO	10
1.3 JUSTIFICATIVA.....	10
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1 PROCESSOS DE USINAGEM	12
2.1.1 Definição do processo de usinagem	12
2.1.2 Aplainamento	13
2.1.3 Fresamento	14
2.1.4 Mandrilamento	16
2.1.5 Usinagem por Abrasão.....	17
2.1.5.1 Retificação	18
2.1.5.2 Abrasivos	19
2.2 TRIBOLOGIA DOS PROCESSOS DE USINAGEM POR ABRASAO	22
2.2.1 Princípios Tribológicos	22
2.2.2 O Processo de Retificação	24
2.2.3 Tribosistemas.....	26
2.2.4 Cinemática	30
2.2.5 Mecânica do Contato	35
2.2.6 Atrito, Forças e Energia.....	37
2.2.7 Aspectos Térmicos.....	41
2.2.8 Aplicação de Fluidos	43
2.2.9 Usinabilidade de Metais	49
2.2.10 Usinabilidade do Cobre	50
2.3 RUGOSIDADE.....	51
2.3.1 Rugosidade das Superfícies	51
2.3.2 Conceitos Básicos.....	52
2.3.2 Critérios para Avaliação	54
2.3.4 Parâmetros de Rugosidade.....	55
3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	59

3.1 MATERIAIS E DESIGNAÇÃO DE AMOSTRAS	59
3.1.1 Conjunto Montado Placa/ jaqueta de Refrigeração – Observação dos processos atuais	59
3.1.2 Amostras – Processo alternativo de retificação proposto.....	61
3.2 EQUIPAMENTOS.....	63
3.2.1 Máquina e Equipamentos Aplicados ao Aplainamento (processo atual) ...	63
3.2.2 Máquinas e Equipamentos Aplicados ao Fresamento (processo atual)	68
3.2.3 Máquinas e Equipamentos Aplicados à Retificação (processo alternativo proposto).....	71
3.2.4 Instrumentos de Medição	73
3.2.5 Outros Instrumentos.....	74
3.3 METODOLOGIA	74
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	78
4.1 DUREZA DAS AMOSTRAS.....	78
4.2 RUGOSIDADE.....	79
4.2.1 Rugosidade das Amostras	79
4.2.2 Rugosidade das Placas Fresadas e Aplainadas	87
4.3 EMPASTAMENTO DO REBOLO	89
4.4 MORFOLOGIA DOS CAVACOS	92
4.4.1 Cavacos da retificação com $a_e = 0,01$ mm	92
4.4.2 Cavacos da retificação com $a_e = 0,02$ mm	92
4.5 TEMPOS DE USINAGEM.....	93
5 CONCLUSÕES	96
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

1 INTRODUÇÃO

1.1 LINGOTAMENTO CONTÍNUO

O lingotamento contínuo do aço (figura 1) é o processo de solidificação a partir do metal no estado líquido em um único equipamento, resultando como produto final a placa ou tarugo de aço. Esse processo compreende a seguinte sequência de operação:

- Fluxo do metal líquido através de um distribuidor alimentando o molde em cobre;
- Solidificação de uma casca, a partir do molde resfriado à água;
- Extração contínua da placa/tarugo;
- Remoção do calor do núcleo ainda líquido, por meio de *sprays* de água de resfriamento;
- Corte no comprimento desejado e remoção das peças.

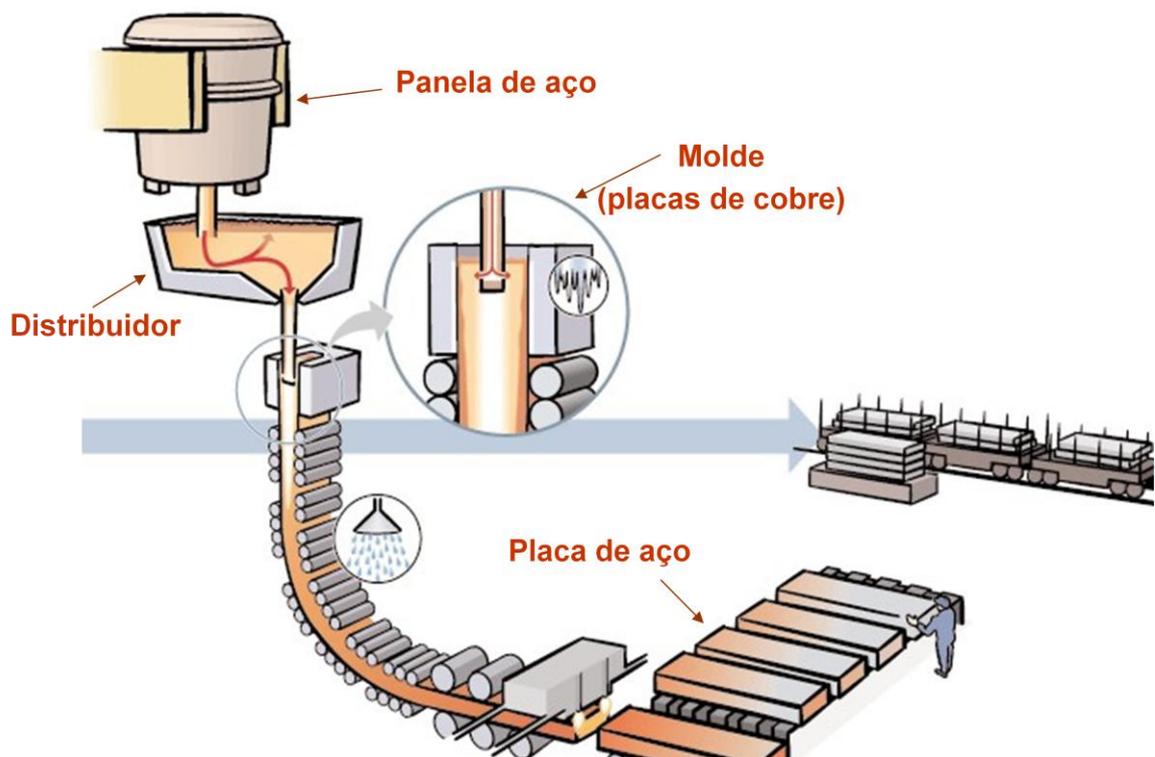


Figura 1 - Processo de lingotamento contínuo de placas de aço.

Fonte: arquivo ArcelorMittal Tubarão.

O molde determina a forma da seção transversal da placa/tarugo e é o componente da máquina de lingotamento contínuo responsável pela retirada de calor do aço líquido e pela conseqüente formação de uma fina camada sólida de aço, que aumenta de espessura ao longo de toda a extensão da máquina. O molde é constituído pelo cassete (figura 2) e por sua estrutura de sustentação. O cassete é o conjunto formado pelas placas de cobre forjado ou laminado aparafusadas em jaquetas de aço refrigeradas à água para forçar o resfriamento e solidificação do aço.

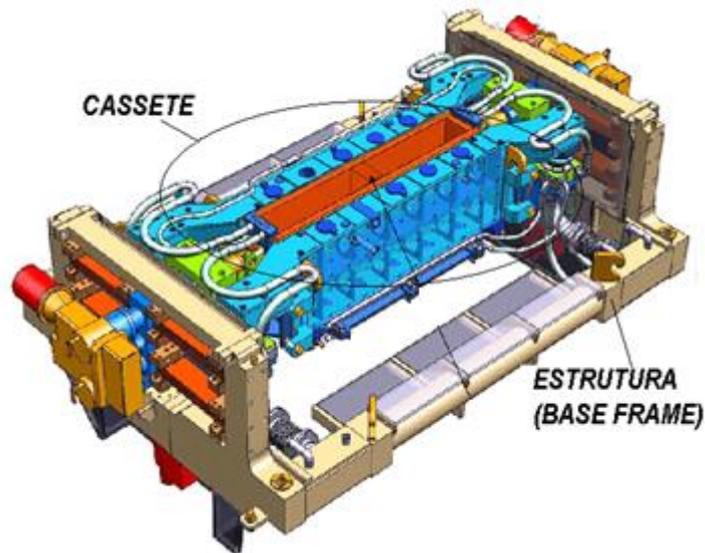


Figura 2 - Molde de cobre para lingotamento de placas de aço.

Fonte: arquivo ArcelorMittal Tubarão.

Algumas propriedades metalúrgicas de produtos obtidos a partir do lingotamento contínuo, tais como, estrutura cristalográfica, distribuição de inclusões não metálicas, micro e macro segregações, além das propriedades mecânicas, estão fortemente relacionadas aos fenômenos de solidificação do aço (ASSOCIAÇÃO..., 2003). Desta forma, a transferência de calor durante a solidificação no processo de lingotamento contínuo está intimamente relacionada à qualidade do produto. Por isto, grande atenção é dedicada à automação e manutenção dos equipamentos relativos a este processo. Entretanto, existem outros fatores operacionais que também influenciam na qualidade, tais como: o nível de preenchimento, a rugosidade superficial e a taxa de resfriamento do molde do distribuidor (ver Figura 1). O resfriamento inadequado pode provocar a formação de defeitos superficiais e internos às placas/tarugos de aço (ASSOCIAÇÃO..., 2003).

Dentre as variáveis dominantes no controle térmico do molde nos primeiros 5 segundos de lingotamento está a rugosidade superficial das placas de cobre que o compõem. Irregularidades na superfície destas placas podem causar uma deficiência no contato com o aço em solidificação, criando um *gap* responsável pela variação no coeficiente de transferência de calor aço/cobre e, conseqüentemente, anomalias no controle térmico do processo de solidificação. (SPINELLI et al., 2004).

1.2 OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo propor uma alternativa à recuperação de placas de cobre das máquinas de lingotamento contínuo (MLC's) da ArcelorMittal Tubarão por meio do processo de (retificação), em condições de ensaio, bem como contrastá-lo com os processos atuais (aplainamento, fresamento e mandrilhamento).

A proposta de solução estudada neste trabalho, utilização do processo de retificação, teve como premissa, o aumento da produtividade e a redução da qualidade das superfícies usinadas (redução da rugosidade).

1.3 JUSTIFICATIVA

A atividade de manutenção das placas de cobre é de fundamental importância, uma vez que a frequência da demanda por esse serviço é alta, ou seja, a cada troca de espessura no molde da máquina de lingotamento contínuo é necessária a recuperação da superfície das placas de cobre e porque a ArcelorMittal Tubarão comercializa placas de aço diretamente no mercado, portanto a qualidade superficial das placas comercializadas é um fator diferencial da qualidade em seu produto. Além disso, a produtividade dos processos de recuperação atualmente é muito baixa, podendo consumir mais de 20 horas de processo.

O processo de retificação foi escolhido devido ao baixo volume de material removido das placas em questão e devido ao elevado nível de exigência quanto à qualidade superficial.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre os temas abordados neste trabalho. Neste capítulo serão revisados os processos usualmente aplicados na usinagem de placas de cobre de moldes de máquinas de lingotamento contínuo. Neste capítulo também serão apresentados os aspectos tribológicos relativos aos processos de usinagem por abrasão, bem como uma revisão das condições de aplicação e utilização dos fluidos de corte nos processos de retificação e da metodologia e simbologia aplicada ao estudo da qualidade superficial dos materiais, ou seja, um estudo breve sobre a rugosidade.

O capítulo 3 aborda aspectos relativos aos ensaios propostos. Este capítulo focará o detalhamento da metodologia utilizada e da preparação das amostras, os materiais e equipamentos utilizados nos ensaios (máquinas operatrizes, ferramentas de corte, acessórios, etc.) e os de análise (microscópio eletrônico de varredura (MEV), rugosímetro ótico e interferômetro digital).

O capítulo 4 aborda os resultados e as discussões motivadas pelas análises das amostras, cavacos gerados, situação dos equipamentos e resultados obtidos na medição da rugosidade e do tempo.

As conclusões finais obtidas a partir de todo o estudo serão apresentadas no capítulo 5 e as referências bibliográficas ao final desta dissertação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROCESSOS DE USINAGEM

2.1.1 Definição do processo de usinagem

Segundo a norma 8580 (DIN, 2003), usinagem é o processo de fabricação que confere à peça forma, dimensões ou acabamento, ou ainda uma combinação de qualquer desses três, através da remoção de material sob a forma de cavaco, sendo esse a porção de material da peça retirada pela ferramenta de corte, caracterizando-se por apresentar forma irregular. “Quando este processo empregar abrasivos ligados ou soltos, receberá o nome de usinagem por abrasão” (SILVA, 2006). Ainda segundo a norma 8580 (DIN, 2003), “O Estudo da usinagem é baseado na mecânica (atrito, deformação plásticas), na Termodinâmica (calor) e nas propriedades dos materiais”.

O estudo atual se limita aos processos de usinagem convencionais indicados em negrito no Quadro 1.1, bem como o detalhamento de outros processos de usinagem por abrasão não listados, como, por exemplo, o lixamento manual. Os processos de aplainamento, fresamento e mandrilhamento serão menos explorados, pois estes foram apenas observados e não tiveram relação direta com os experimentos pertinentes a este estudo.

Quadro 1.1 - Classificação dos processos de fabricação com remoção de material.

Processos de fabricação	COM remoção de cavaco	USINAGEM	Convencional	Ferramenta de geometria não definida	Retificação
				Ferramenta de geometria definida	Torneamento Fresamento Furação Aplainamento Mandrilhamento Serramento Brochamento Roscamento etc...

Fonte: Adaptado de Machado; Silva (2003).

Cabe ressaltar a existência dos métodos de usinagem não convencionais, dentre eles a usinagem por jato d'água e/ou abrasivo, ultrassom, eletroquímica, eletroerosão, feixe de elétrons, laser, plasma, etc.

2.1.2 Aplainamento

O aplainamento é definido como o processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies planas, rebaixos, perfis, rasgos, etc. por meio de um movimento retilíneo alternado da peça ou da ferramenta. O aplainamento pode ser executado em posição horizontal, vertical ou inclinado e também pode ser classificado em aplainamento de desbaste ou acabamento (SILVA, 2006).

Nas operações de aplainamento, o corte é unidirecional e em um único sentido. “O curso de retorno da ferramenta é um tempo perdido. Assim, esse processo é mais lento que o fresamento, por exemplo, que corta continuamente” (ROCHA; DIAS, 2008).

Nas operações de aplainamento, quando a ferramenta de corte é móvel a peça é estacionária (Figura 3A) e quando a peça é móvel a ferramenta é estacionária (Figura 3B).

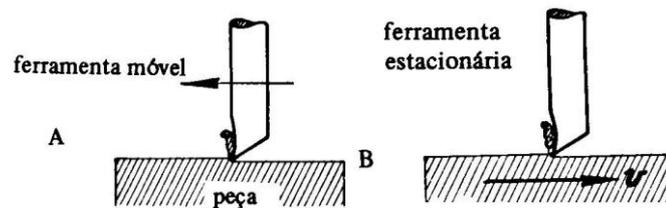


Figura 3 - A) Aplainamento com ferramenta móvel e peça estacionária; B) Aplainamento com ferramenta estacionária e peça móvel.

Fonte: Rocha; Dias (2008).

As plainas horizontais apresentam movimento retilíneo alternado “vaivém” que move a ferramenta sobre a superfície plana da peça (plaina limadora), ou vice-versa (plaina de mesa), retirando material desta. Um ciclo se completa com o avanço da ferramenta ou da peça, com corte de material, e com o recuo em vazio, onde não há trabalho.

Na plaina de mesa mostrada na figura 4 a mesa executa o curso útil e a ferramenta é estacionária e responsável pelo avanço transversal, também conhecido como passo de avanço. Este tipo de plaina é apropriado para a usinagem de peças de maior porte com de comprimento que pode superar 10 metros.

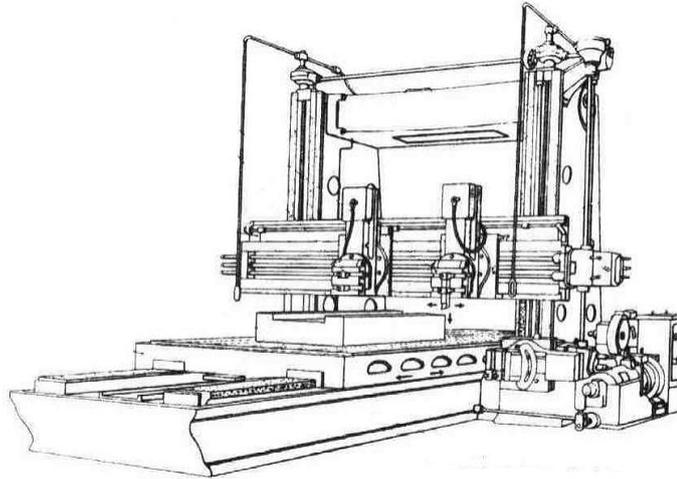


Figura 4 - Plaina de mesa horizontal.

Fonte: Rocha; Dias (2008).

Atualmente a máquina utilizada para usinagem das superfícies das placas de cobre dos moldes das máquinas de lingotamento contínuo na ArcelorMittal Tubarão é a plaina de mesa, porém ela é aplicável apenas às placas de superfícies côncavo/convexas, e serão melhor detalhadas no Capítulo 3.

2.1.3 Fresamento

De forma resumida, o fresamento pode ser definido como o corte de materiais com uma ferramenta rotativa de múltiplas arestas de corte que executa movimentos predefinidos sobre uma peça em sentidos de direção diversos, o que torna este processo um método de usinagem versátil e amplamente difundido. Geralmente o fresamento é utilizado na usinagem de superfícies planas – como no caso do faceamento – porém a usinagem de outras formas e superfícies vem crescendo com a evolução das máquinas operatrizes (MANUAL..., 2005).

Uma fresa normalmente executa uma ou um grupo das seguintes operações básicas de corte: radial, periférico e axial (ver figura 5). Através das variações dos métodos

de fresamento, pode-se direcionar a operação de corte nesses sentidos de avanço em relação ao eixo de rotação da ferramenta.

O fresamento de disco é uma operação de corte que utiliza predominantemente as arestas de corte periféricas da ferramenta (ver figura 5).

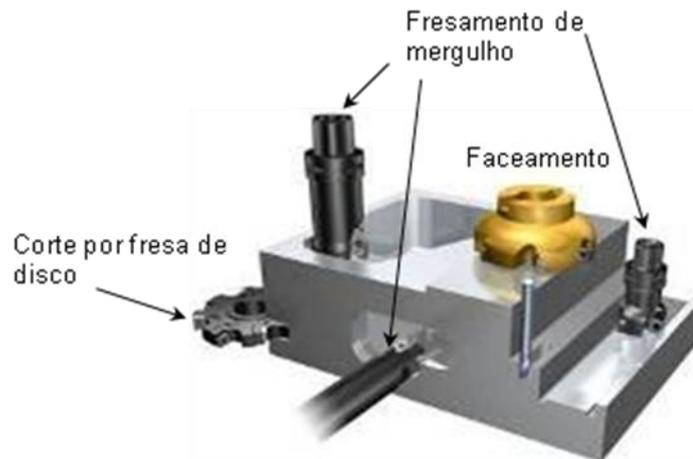


Figura 5 - Exemplos de operações de fresamento.

Fonte: Manual... (2005).

No faceamento a operação de corte é obtida pela ação combinada das arestas de corte periféricas e frontais onde a fresa gira em relação à peça, perpendicularmente à direção do avanço (ver figura 5).

No fresamento de mergulho as arestas de corte utilizadas são as frontais da ferramenta que avança axialmente, executando uma operação de furação (ver figura 5).

As máquinas operatrizes tradicionalmente utilizadas para as operações de fresamento são as fresadoras verticais e horizontais. Elas se diferenciam pela posição do eixo árvore de seus cabeçotes (ver figura 6).

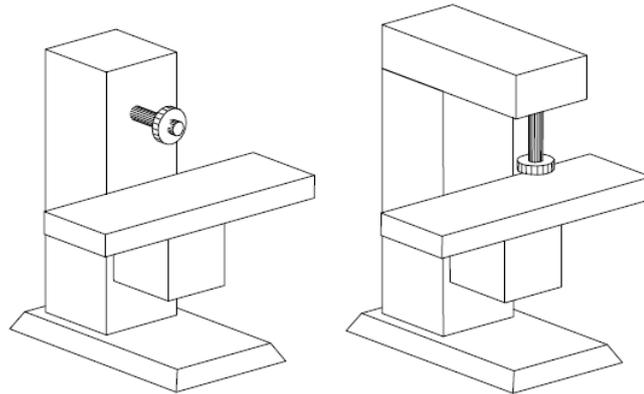


Figura 6 – Tipos de fresadora (horizontal à esquerda e vertical à direita).

Fonte: Fresamento (2008).

Neste estudo, a operação de fresamento observada é a usinagem das superfícies planas das placas do molde da máquina de lingotamento contínuo, portanto faceamento. A particularidade do processo utilizado para usinagem destas placas é que o faceamento é realizado com uma barra de mandrilhar com apenas uma pastilha de metal duro e não com uma fresa, o que caracteriza o processo como mandrilhamento e não propriamente como fresamento.

2.1.4 Mandrilamento

Processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies de revolução com o auxílio de uma ou várias ferramentas de barra. Para tanto a ferramenta de corte, fixada à barra de mandrilhar, gira e a peça ou a ferramenta se deslocam simultaneamente segundo uma trajetória determinada. A barra de mandrilhar é também conhecida como mandril, dando origem ao nome da operação de usinagem (GUEDES, 2006).

As operações de mandrilamento normalmente são aplicadas na usinagem de furos previamente feitos por outros processos. As operações de desbaste são feitas para alargar o furo e as operações de acabamento são realizadas para a obtenção das tolerâncias dimensionais desejadas.

A máquina operatriz utilizada na operação de mandrilhamento é a mandriladora (ver figura 7), máquina de grande versatilidade que permite a adaptação de uma gama

variada de ferramentas como fresas, brocas, machos, etc. Assim como as fresadoras as mandriladoras se classificam como de eixo horizontal ou vertical, dependendo da posição do eixo árvore.

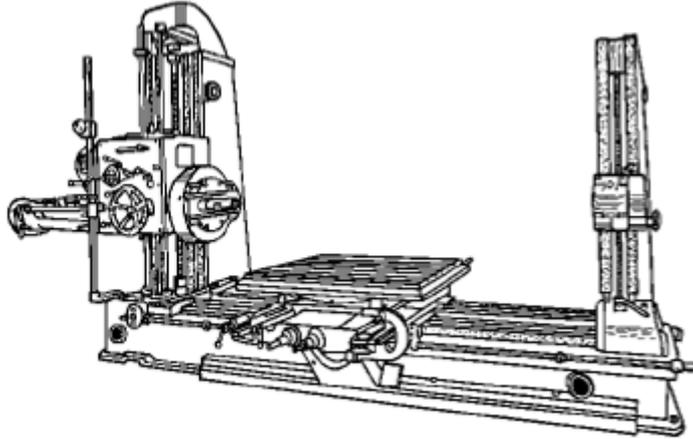


Figura 7 - Mandriladora horizontal.
Fonte: Rocha; Dias (2008).

Neste estudo a operação de mandrilamento é aplicada conforme descrito ao final do subitem anterior. Sobre a utilização da barra de mandrilar com apenas uma aresta cortante, é conveniente observar que, de acordo com (MANUAL..., 2005), “geralmente, o mandrilamento com aresta única é aplicado em operações de acabamento e, para desbaste e acabamento, em materiais em que o controle de cavacos é exigente.”

2.1.5 Usinagem por Abrasão

Os processos de usinagem por abrasão abrangem a retificação, o superacabamento, a afiação, o polimento, etc. A característica comum a todos estes processos é o fato de a remoção de material ser predominantemente realizada por processo abrasivo, porém, diferentemente da tribologia clássica, neste caso o desgaste abrasivo é um processo desejável, responsável pela remoção de material nas peças usinadas. Ao mesmo tempo em que o desgaste abrasivo do material usinado é desejável no processo de usinagem por abrasão ele pode ser indesejável do ponto de vista da manutenção das ferramentas de corte (MARINESCU et al., 2004).

A usinagem por abrasão é um processo no qual partículas duras abrasivas são empregadas com objetivo de modificar a forma ou a textura da superfície de peças manufaturadas. Este tipo de processo é geralmente aplicado a peças que exigem alta qualidade e tolerâncias geométricas precisas, porém, além dessas aplicações, outra razão motiva a sua utilização: a elevada dureza de alguns materiais e revestimentos, que restringe a utilização de outros processos de usinagem convencionais.

Dos processos relacionados à usinagem por abrasão, neste estudo abordaremos especificamente a retificação tangencial.

2.1.5.1 Retificação

A retificação é comumente conhecida como o processo que utiliza partículas abrasivas duras como meio de corte e talvez seja um dos processos de conformação mais antigos, datado da Era da Pedra, quando ferramentas eram afiadas em pedras. Atualmente a retificação é provavelmente o processo de fabricação mais representativo, consumindo cerca de 20-25% do total de gastos envolvidos nos processos de usinagem em países industrializados (MALKIN, 1989).

Na retificação a ferramenta de corte é o rebolo que é, geralmente, composto de partículas abrasivas (grãos) aderidas na matriz (aglomerante) onde cada grão é uma ferramenta de corte microscópica. O rebolo desempenha uma velocidade de corte significativamente superior aos demais processos de usinagem, como fresamento e torneamento. A velocidade de corte nos processos de retificação convencionais geralmente se encontra dentro faixa de 20 – 45 m/s (1200 – 2700 m/min), podendo atingir até 140 m/s (8400 m/min) em processos de retificação a altas velocidades, o que exige a utilização de rebolos especiais. É conveniente pontuar que neste tipo de usinagem a velocidade de corte é geralmente muito maior do que a velocidade de avanço.

Apesar da retificação poder ser executada a seco, a condição lubrificada deve ser priorizada para reduzir as perdas por atrito e melhorar a qualidade superficial produzida. Geralmente os lubrificantes utilizados são os diversos fluidos de corte

integral, aditivado, solúveis convencionais ou sintéticos e alguns pastosos ou sólidos (MARINESCU et al., 2004).

2.1.5.2 Abrasivos

Para todos os tipos de usinagem por abrasão, os grãos abrasivos devem apresentar dureza superior à do material na interface a ser usinada à temperatura de corte (ver exemplos no quadro 2). Este princípio, conhecido com princípio da dureza relativa, também é válido para os demais processos convencionais de usinagem. Mesmo em exposição às altas temperaturas de usinagem os grãos devem manter sua dureza, pois, do contrário, o rebolo poderá sofrer desgaste superior ao desejado.

Quadro 2 – Algumas propriedades de abrasivos à temperatura ambiente.

Abrasivo	Dureza (GPa)	Estrut. cristalina	Ponto fusão (°C)
Diamante	56 – 102	cúbica	3.700 (a 130 kbar)
Nitreto cúbico de boro (CBN)	42 – 46	cúbica	3.200 (a 105 kbar)
Carboneto do silício	~ 24	hexagonal	~2.830
Óxido de alumínio	~ 21	hexagonal	~2.040
Aço ferramenta M2 (duplamente temperado)	~ 0,81	n/d	n/d

Fonte: Adaptado de Marinescu et al. (2004) e Malkin (1989).

A temperaturas de trabalho, que podem atingir 1000° C, a maioria dos abrasivos sofre redução de sua dureza para valores até 50% inferiores aos valores apresentados à temperatura ambiente. O nitreto cúbico de boro (CBN) é o abrasivo que melhor mantém sua dureza em elevadas temperaturas, porém, como a dureza dos materiais retificados também cai com a elevação da temperatura, a redução de dureza do abrasivo se compensa.

Os abrasivos mais comuns são o óxido de alumínio (Al_2O_3) e o carboneto de silício (SiC). Estes abrasivos são fornecidos com uma vasta gama de características técnicas, são relativamente baratos e facilmente encontrados no mercado.

Óxido de alumínio (Al_2O_3) - Obtido a partir da “bauxita”, caracteriza-se pela fase α -alumina de estrutura cristalina hexagonal. Apresenta-se comercialmente em duas qualidades segundo o critério de pureza conseguida na sua elaboração:

- Óxido de alumínio comum - De cor acinzentada, é produzido por meio de fusão da bauxita calcinada, coque e ferro. Com grau de pureza química em torno de 96-97%, tem, como principais características, a dureza inferior à da alumina branca e a alta tenacidade. Tem grande aplicabilidade, desde operações de desbaste até o acabamento (MALKIN, 1989);
- Óxido de alumínio branco - Com 99% de pureza distingue-se pela sua cor, geralmente branca, e com propriedades semelhantes ao óxido de alumínio comum, porém devido a sua forma de obtenção (processo Bayer em forno de arco elétrico) apresenta contaminantes (principalmente Na_2O) que restringem sua aplicação à retificações que requerem baixa geração de calor, qualidade elevada de acabamento superficial e baixo tempo de execução. Exemplo: aços-liga em geral (MALKIN, 1989).

Carboneto de silício (SiC) - Obtido indiretamente por meio da reação química (redução) da areia (SiO_2) com coque (C) em fornos elétricos (2000°C). Este tipo de abrasivo apresenta maior dureza e melhores propriedades térmicas que os óxidos de alumínio. É mais empregado em materiais não ferrosos e ferros fundidos por questões de reatividade química com ligas de aço (MALKIN, 1989).

Além dos abrasivos comuns supracitados podem-se listar, também, os superabrasivos produzidos com diamante e CBN (nitreto cúbico de boro), porém os rebolos fabricados com estes materiais contam com apenas uma fina camada de abrasivos aderida ao aro do rebole, diferentemente dos rebolos convencionais integralmente compostos de abrasivos e aglomerante (MALKIN, 1989).

Diamante - Material mais duro encontrado na natureza é utilizado em estado natural ou sintético na elaboração de rebolos para lapidação, porém de aplicação restrita em função da grafitação e difusão de carbono em ligas ferrosas, provocando excesso de desgaste e custos elevados (MALKIN, 1989).

O diamante e o CBN são muito mais caros do que os citados anteriormente, porém sua utilização vem sendo difundida devido suas propriedades superiores de dureza e resistência ao desgaste (MARINESCU et al., 2004), com vantagem para o CBN que apresenta estabilidade térmica superior ao diamante, função da camada protetora de B_2O_3 resistente até $1400^\circ C$ (MALKIN, 1989).

O tamanho do grão (grana) é determinado por meio do peneiramento. O peneiramento é feito através de peneiras sucessivas, com certo número de malhas por polegada linear. Por exemplo, o tamanho de grão 80 significa que foi obtido através de uma peneira cuja malha tem $1/80$ de polegada (aproximadamente 0,32 mm).

Os fabricantes de rebolos adotam um código alfanumérico internacional para indicar as especificações do rebolo, conforme demonstrado na figura 9.

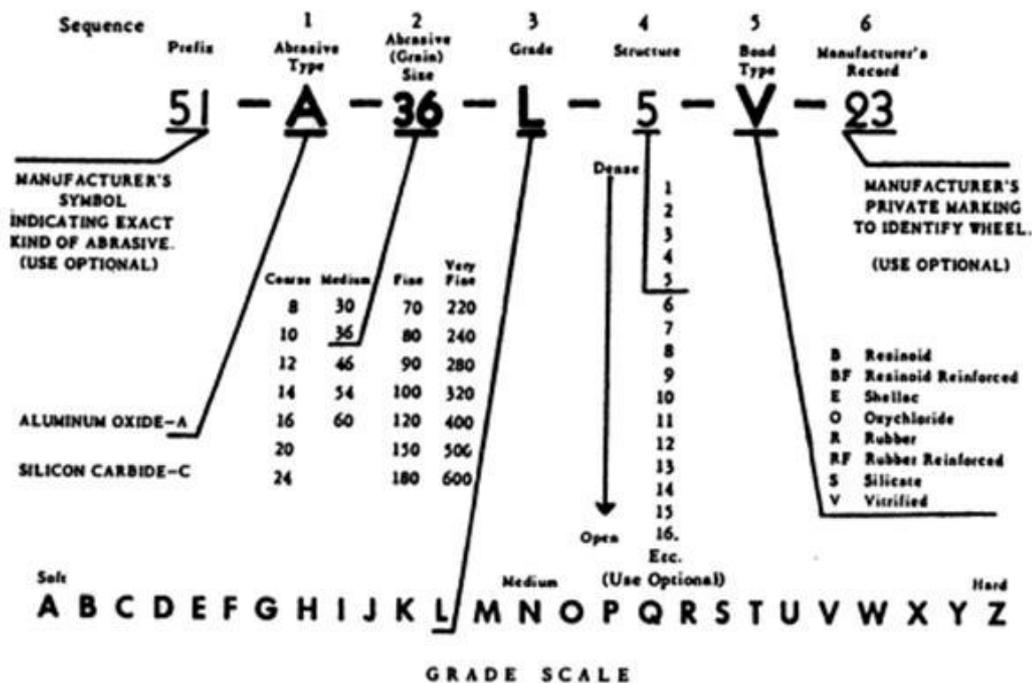


Figura 9 - Representação do código internacional para especificação de rebolos de óxido de alumínio e carboneto de silício.

Fonte: Malkin (1989).

O elemento aglomerante do abrasivo permite que a ferramenta mantenha a sua forma e resistência, dando-lhe condições de fazer o trabalho desejado e desprender o grão quando ele perder suas características de corte. A proporção e qualidade da

liga bem como o abrasivo determinam dureza e grau de porosidade, exigidos pelo tipo de retificação.

As ligas mais empregadas são:

- Vitrificadas (V): feitas à base de mistura de feldspato e argila, são as mais utilizadas, pois não sofrem ataque ou reação química pela água, óleo ou ácidos. São usadas nas máquinas retificadoras com velocidade periférica de até 35 m/s;
- Resinóides (B): são feitos com base em resinas sintéticas (fenólicas) e permitem a construção de rebolos para serviços pesados com cortes frios e em alta velocidade, porém nunca deve superar 80 m/s;
- Borracha (R): utilizada em aglomerante de ferramentas abrasivas para corte de metais e em rebolos transportadores das retificadoras sem centro (*Centerless*).

O grau de dureza de um rebolo é a medida do poder de retenção dos grãos abrasivos pelo aglomerante. Um rebolo muito duro retém seus grãos até depois destes terem perdido a capacidade de corte. Um rebolo muito mole perde seus grãos antes de terem executado inteiramente o trabalho. No caso de usinagem de materiais que tendem a empastar o rebolo, deve-se usar um rebolo mole, que solte os grãos com mais facilidade.

Estrutura é o grau de compactação dos grãos abrasivos no rebolo e refere-se também à porosidade do rebolo. Para operações de desbaste devem-se utilizar rebolos de estrutura aberta e para acabamento rebolos de estrutura densa (fechada).

2.2 TRIBOLOGIA DOS PROCESSOS DE USINAGEM POR ABRASAO

2.2.1 Princípios Tribológicos

Os princípios científicos que suportam a usinagem por abrasão são do domínio da tribologia. A tribologia é definida como a ciência e tecnologia da interação entre superfícies em movimento relativo que está relacionada ao estudo do atrito, lubrificação e desgaste (MARINESCU et al., 2004).

O desgaste abrasivo pode ser definido como o desgaste no qual asperidades duras movem-se sobre um corpo menos duro sob aplicação de carga, penetram e removem material deixando um sulco. Segundo Hutchings (1992) o desgaste abrasivo é aquele associado à presença de partículas duras, tanto separadas das superfícies em movimento relativo quanto como integrante de uma ou ambas as superfícies, que proporcionam a remoção ou o deslocamento de material.

O objetivo da usinagem é a remoção de material da peça preferencialmente por livre corte e não necessariamente por desgaste. Normalmente a tribologia é aplicada ao estudo de equipamentos críticos onde o desgaste deve ser minimizado, porém, no estudo da usinagem por abrasão, a busca pela maximização das taxas de remoção de material da peça é a condição fundamental. Por outro lado, enquanto busca-se a máxima taxa de desgaste da peça, é desejada a minimização do desgaste do rebolo. Obviamente, além das elevadas taxas de remoção de material da peça, a qualidade superficial e a redução dos efeitos térmicos do processo são fatores de extrema importância nos processos de usinagem por abrasão (MARINESCU et al., 2004).

Em termos tribológicos, a retificação pode ser classificada como um processo abrasivo a dois corpos, onde as partículas abrasivas são fixas à ferramenta e o movimento relativo é normalmente considerado como escorregamento/deslizamento puro (ver figura 10).

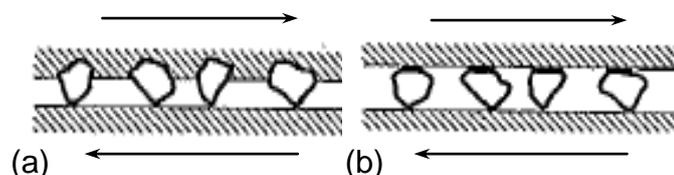


Figura 10 - Ilustração de processo abrasivo a dois corpos (a) e três corpos (b).

Fonte: Hutchings (1992).

Em termos práticos, o processo abrasivo a dois corpos envolve elementos do processo a três corpos, pois os grãos aderidos ao rebolo se soltam ou se quebram. De qualquer forma este tipo de fenômeno é indesejado e o efeito deste material solto no processo de retificação pode gerar anomalias superficiais na peça.

Segundo Gates (1998), apesar da utilização ampla das definições de abrasão a dois e três corpos, estas terminologias têm sido discutidas e tendem à obsolescência. A discussão gira em torno das diferentes interpretações dos dois conceitos, ou seja, da condição fixa ou livre dos grãos abrasivos (inclusive suas propriedades e tensões de contato) e da severidade que seus respectivos processos abrasivos podem causar.

O foco na observação das condições e fenômenos macroscópicos proporciona a definição de termos padronizados menos sujeitos à obsolescência, como os termos propostos por Hutchings (1992): abrasão de alta tensão (onde a tensão de compressão das partículas é ultrapassada provocando a sua ruptura durante o processo abrasivo) e abrasão de baixa tensão (onde a tensão de compressão das partículas não é ultrapassada mantendo a sua integridade). Sendo assim, o desgaste abrasivo pode acontecer por mecanismos de deformação plástica ou por fratura frágil.

2.2.2 O Processo de Retificação

Num processo de retificação 5 elementos estão geralmente envolvidos: o rebolo, a peça, o fluido de corte, a atmosfera e os resíduos sólidos (ver figura 11). O rebolo usina a peça, mas a peça, conseqüentemente, provoca o desgaste do rebolo. Os resíduos sólidos são os cavacos removidos da peça e as partículas desgastadas ou desprendidas do rebolo.

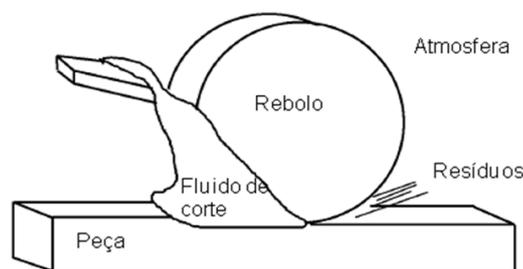


Figura 11 - Esquemático de um processo típico de retificação tangencial plana.

Fonte: Marinescu et al. (2004).

O fluido de corte pode exercer uma ou mais funções: refrigerar a ferramenta, a peça e o cavaco gerado; lubrificar a região de contato peça-ferramenta; minimizar o surgimento da aresta postiça; lavar a região de corte (expulsando cavacos), reduzir a

tendência de contaminação do rebolo pelo material da peça e proteger a superfície usinada contra corrosão (BIANCHI; AGUIAR; PIUBELI, 2004).

A atmosfera também exerce papel relevante no processo de retificação uma vez que as superfícies usinadas de grande parte dos materiais possuem reatividade química superior se comparada à superfície bruta oxidada. Adicionalmente deve-se considerar que as elevadas temperaturas na região de corte também podem influenciar na reatividade da superfície usinada com a atmosfera. Os óxidos formados nas superfícies retificadas podem provocar efeitos lubrificantes quando em velocidades baixas. Esse efeito lubrificante é reduzido à medida que a velocidade de retificação aumenta.

Em termos mais abrangentes, os principais elementos do processo de retificação são (ver figura 12):

- A peça: geometria, dureza, velocidade, rigidez e propriedades térmicas e químicas;
- A ferramenta abrasiva: geometria, dureza, velocidade, rigidez e propriedades térmicas e químicas, tamanho dos grãos e aglomerante;
- A geometria e o mecanismo de interação entre a ferramenta de corte e a peça;
- O fluido de corte: vazão, velocidade, pressão e propriedades físicas, químicas e térmicas;
- A atmosfera;
- A máquina envolvida: precisão, rigidez, estabilidade térmica e vibrações.

O processo de retificação pode ser comparado com o microfresamento que é análogo ao fresamento convencional, porém ao invés de as arestas cortantes estarem com posições bem definidas, elas se encontram distribuídas aleatoriamente. O formato das arestas de corte também varia aleatoriamente (ferramenta de geometria não definida).

2.2.3 Tribosistemas

Um tribosistema genérico, pertinente à usinagem por abrasão, consiste em duas superfícies em movimento relativo (corpo e contra corpo), um meio entre estas duas superfícies e o meio ambiente (ver figura 12). Já a investigação dos tribosistemas relacionados aos processos de usinagem por abrasão é baseada nas entradas e saídas do processo para a melhor identificação das influências de cada parâmetro no processo (ver figura 13). Algumas perturbações são inerentes ao processo e podem ser controladas, porém não evitadas. Algumas saídas podem ser consideradas com perdas.

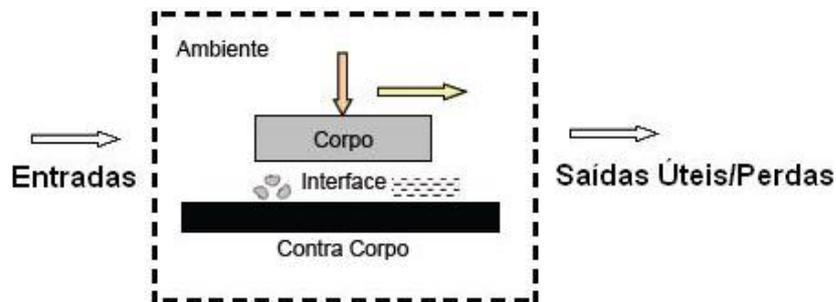


Figura 12 – Ilustração de um sistema tribológico.

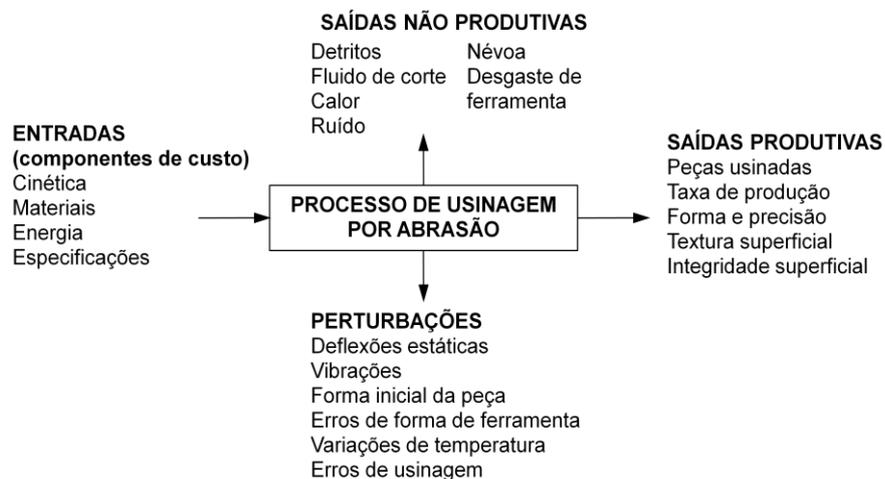


Figura 13 - Entradas e saídas do processo de usinagem por abrasão.

Fonte: Marinescu et al. (2004).

A estrutura dos processos de usinagem por abrasão pode ser relacionada ao estudo do atrito, desgaste e aos procedimentos de lubrificação para processos abrasivos (CZICHOS, 1992; ZUM GAHR, 1987 apud MARINESCU et al., 2004).

Segundo Hutchings (1992) os mecanismos do desgaste abrasivo podem envolver deformação permanente e/ou fratura frágil, podendo ocorrer isoladamente ou simultaneamente, mesmo em materiais considerados como tipicamente frágeis.

O par conjugado no processo típico de retificação é representado pelo rebolo e pela peça, podendo envolver partículas soltas (cavacos ou grãos do rebolo) e fluido de corte na área de contato.

O rebolo, por meio de seus grãos abrasivos, provocará o desgaste na peça conforme sua forma, dimensões e características do abrasivo, como dureza e elasticidade, que são resultado do tipo e tamanho dos grãos, bem como da natureza do aglomerante. A especificação do rebolo tem que ser consistente com a composição e estrutura do material a ser processado (OTT, 1993 apud MARINESCU et al., 2004).

A peça a ser processada pode ter suas propriedades divididas em dois subgrupos:

1. Propriedades de volume: forma, tamanho, composição e estrutura do material bem como suas propriedades físicas (elasticidade, dureza, densidade e propriedades térmicas);
2. Propriedades superficiais: rugosidade, composição química e microdureza.

O fluido de corte deve ser escolhido de maneira a assegurar a lubrificação mista ou limite formada por uma camada fina de lubrificante cujas propriedades são afetadas pela viscosidade e oleosidade do fluido bem como pela rugosidade da superfície processada. A camada de lubrificante contribui para a lubrificação e a refrigeração da região de corte reduzindo o desgaste do rebolo e protegendo a peça contra corrosão. Adicionalmente o fluido de corte pode exercer uma função de limpeza promovendo a remoção dos resíduos da superfície de trabalho.

O relacionamento entre o rebolo, os resíduos, a peça e o fluido de corte determinam os processos tribológicos na região de contato e os efeitos combinados desses processos influenciam fortemente o processo de usinagem por abrasão.

Os processos tribológicos, pertinente à usinagem por abrasão, podem divididos como segue:

- Processos de contato: relativos às áreas real e aparente de contato e pressão, deformações elástica e plástica, processos de absorção físico-química por contato, adsorção e corrosão (PAVELESCU; MUSHAT; TUDOR, 1977 apud MARINESCU et al., 2004);
- Processos de atrito: caracterizados pela transformação da energia mecânica em outros tipos de energia. Os processos de atrito podem causar alterações físico-químicas nos materiais da superfície de contato e seus substratos (NAKAYAMA; TAKAGU et al., 1980 apud MARINESCU et al., 2004);
- Processos de desgaste de ferramenta: relativos ao desgaste da ferramenta abrasiva, que pode provocar alterações da forma, dimensões ou da estrutura da camada ativa de abrasivo (RABINOWICZ, 1994 apud MARINESCU et al., 2004);
- Processos de desgaste da peça em usinagem: relativos aos ocorridos na peça sob usinagem. Consistem nas ações de três microprocessos (SALMON, 1992 apud MARINESCU et al., 2004): a formação do cavaco, o sulcamento e o escorregamento (BLAENDEL; TAYLOR; PISCOTTY, 1996 apud MARINESCU et al., 2004);
- Processos de lubrificação: o par ferramenta/ peça é fortemente influenciado pelas condições de usinagem, as quais podem ser a seco ou a úmido com mínima quantidade ou abundancia de lubrificante. O modelo mais comum é o modelo de lubrificação limite com múltiplos pontos de aplicação (RABINOWICZ, 1994 apud MARINESCU et al., 2004).

Os resultados dos processos tribológicos se refletem na precisão dimensional e na qualidade superficial da peça. Durante os processos abrasivos, as partículas provenientes do desgaste da ferramenta e os cavacos gerados devem ser removidos como resíduos e, conseqüentemente, perdas de processo.

Os processos abrasivos podem ser agrupados em três tribosistemas:

- Fixos: processos abrasivos que envolvem dois elementos principais (conceito de abrasão a dois corpos);

- Soltos: processos abrasivos que envolvem três elementos (conceito de abrasão a três corpos);
- Dressagem: processos relativos à ferramenta abrasiva.

Este estudo se limitará à abordagem de tribosistemas com abrasivos fixos. Este tribosistema pode ser desenhado da seguinte forma (ver figura 14):

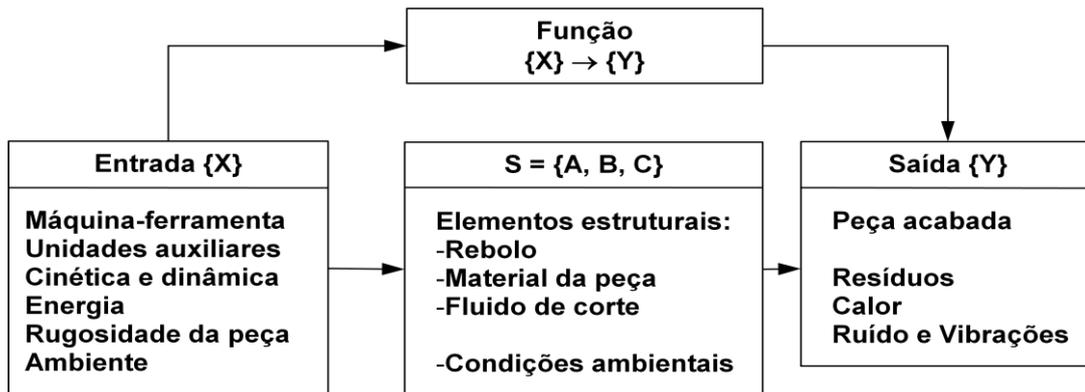


Figura 14 - Tribosistema para processos abrasivos fixos.

Fonte: Marinescu et al. (2004).

No processo com abrasivos fixos o principal elemento é a camada abrasiva, composta dos grãos abrasivos e uma matriz de aglomerante, fixada a uma estrutura suporte. As propriedades mecânicas do abrasivo e aglomerante são muito diferentes. O principal contato entre a superfície da ferramenta abrasiva, no caso estudado, o rebolo, e a peça se dá nas bordas duras e afiadas dos grãos abrasivos (NAKAYAMA, 1972 apud MARINESCU et al., 2004). A dureza dos grãos abrasivos é suficiente para deformar plasticamente, provocar sulcamento ou cortar o material da peça a ser usinada (KATO, 1992 apud MARINESCU et al., 2004). As deformações sofridas pelos grãos abrasivos são desprezíveis se comparadas com as do aglomerante.

O atrito representa uma parcela muito importante da energia utilizada no processo abrasivo (OTT, 1993 apud MARINESCU et al., 2004), contribui significativamente na temperatura máxima de processo e conseqüentemente influencia a qualidade superficial da peça. Por sua vez a resistência ao desgaste da peça processada influencia diretamente na usinabilidade do material, bem como a ferramenta abrasiva e o fluido de corte (SALJE; MUSHARDT; DAMLOS, 1981 apud MARINESCU et al., 2004).

Um modelo de usinagem por abrasão deve considerar a existência de dois mecanismos, dos quais apenas um é dominante:

1. Processamento frágil (fratura): é caracterizado pelo surgimento de trincas estruturais, baixas tensões residuais, baixa demanda de energia para retificação e cavacos curtos;
2. Processamento dúctil (deformação permanente): é caracterizado pelo cisalhamento e deslizamento das camadas de material, incluindo alterações na composição e estrutura da superfície processada, geração de tensões de tração e compressão nas subcamadas, alta demanda de energia e cavacos longos e espiralados (MARINESCU et al., 2004).

2.2.4 Cinemática

A análise cinemática define a taxa de remoção de material e a penetração dos grãos abrasivos na peça. Além das velocidades e dos movimentos da ferramenta e da peça, a análise cinemática envolve as consequências físicas da distribuição das bordas cortantes.

O grão abrasivo sempre deve ser mais duro do que o material da peça para que seja efetivamente uma ferramenta de corte. Para isso, assume-se que a forma e o tamanho do grão são mantidos durante a interação peça-ferramenta. Assim o material no caminho do grão é deslocado por cisalhamento (formação de cavacos) ou deformação plástica (ver figura 15).

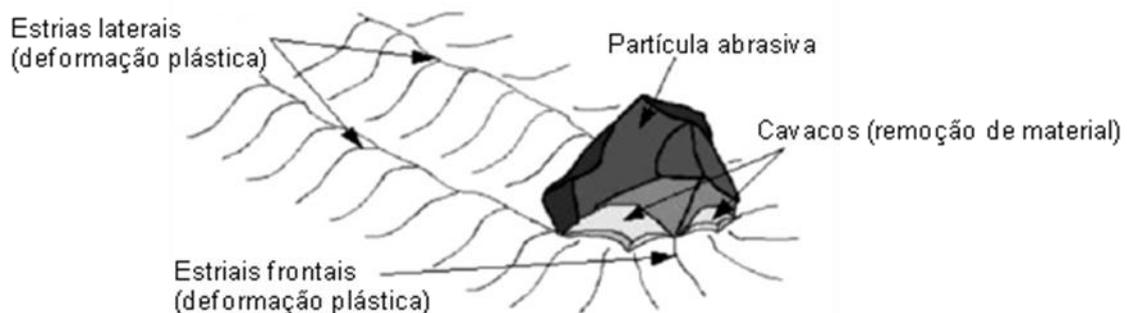


Figura 15 - Ilustração da ação de uma partícula abrasiva (grão) contra o material de uma peça.

Fonte: Barge (2007).

No caso da retificação plana tangencial as variáveis de controle relativas à máquina operatriz são a velocidade da ferramenta, v_s , a velocidade de avanço da mesa, v_w , o avanço transversal, v_f , e a penetração de trabalho, a_e (ver figura 16).

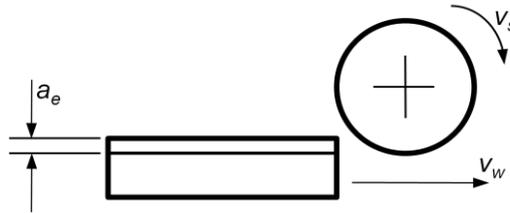


Figura 16 - Ilustração da retificação tangencial plana.

Fonte: Marinescu et al. (2004).

A usinagem por abrasão também é um processo aleatório no qual o espaçamento entre grãos, a profundidade dos grãos abaixo da superfície da ferramenta e o formato das arestas cortantes também varia aleatoriamente. Apesar de a usinagem por abrasão envolver uma série de eventos aleatórios a média dos valores dos parâmetros de usinagem apresentam mais consistência do que alguns processos não aleatórios, como o fresamento, no qual a ferramenta de corte é sujeita a um modelo de desgaste imprevisível. A aleatoriedade do espaçamento entre os grãos não deve ser considerada como uma desvantagem ou principal causa de anomalias dimensionais e na qualidade superficial. Obviamente ela é a fonte de variabilidade no comportamento individual dos grãos abrasivos e na microsuperfície produzida. A analogia com o microfresamento pode ser caracterizada pelo comportamento geral do processo e pela natureza das microvariações (ver figura 18).

O volume médio de material removido (\bar{V}_{cu}) pode ser calculado pelo produto do avanço por aresta cortante (s), a penetração de trabalho (a_e) e a largura média do cavaco (\bar{b}_{cu}) (ver figura 17 e Eq. 2.1).

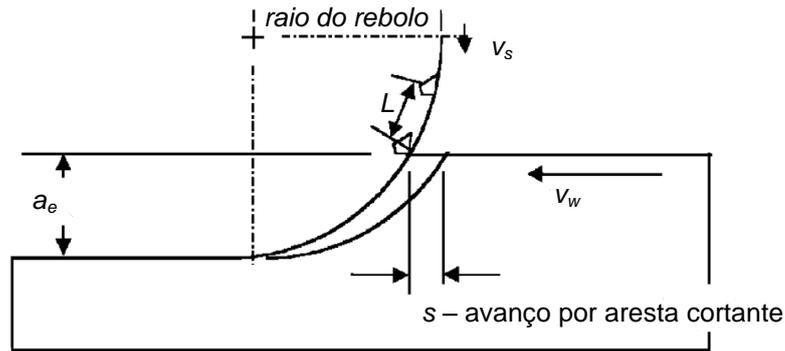


Figura 17 - Analogia da retificação com o microfresamento (v_s – velocidade tangencial do rebolo; v_w – velocidade de avanço da peça; L – espaçamento entre grãos).

Fonte: Marinescu et al. (2004).

$$\text{Eq. (2.1)} \quad \bar{V}_{cu} = s \cdot a_e \cdot \bar{b}_{cu} = \text{volume médio de material removido}$$

A partir da equação 2.1 pode-se deduzir que o volume de material removido é proporcional à densidade de grãos na superfície do rebolo, porém os fabricantes de abrasivos não informam a distância média entre os grãos abrasivos devido à variabilidade do tamanho e incerteza de espaçamentos. O espaçamento depende do tamanho do grão, da proporção de aglomerante e da característica da estrutura do rebolo. Além disso, o espaçamento entre as arestas de corte pode ser alterado artificialmente pelos procedimentos de dressagem bem como pelo próprio desgaste do rebolo.

Do ponto de vista tribológico, à medida que a penetração de trabalho aumenta, cresce a espessura do cavaco, o que implica no aumento da taxa de desgaste e da probabilidade de fraturas dos grãos abrasivos. O desgaste por atrito, que ocorre lentamente quando aplicadas pequenas forças de corte, depende mais da temperatura de contato do que da dureza do material da peça (BACKER; MARSHALL; SHAW, 1952 apud MARINESCU et al., 2004).

Em geral as forças que provocam fraturas nos grãos abrasivos precisam ser maiores do que as forças que provocam desgaste por atrito. Alguns grãos são projetados para se desgastar por microfatura causando a reafiação contínua com uma baixa taxa de desgaste. Aparentemente o espaçamento afeta a natureza das forças e o desgaste dos grãos abrasivos. O desgaste dos grãos, por sua vez, parece afetar o

espaçamento à medida que as arestas cortantes são removidas (MARINESCU et al., 2004).

O desgaste do rebolo pode causar os seguintes efeitos prejudiciais ao controle do processo:

- Erro na definição da penetração de trabalho;
- Deficiência no acabamento da peça;
- Perda do corte e elevação das forças de corte;
- Perda da forma original do rebolo e redução das forças de corte;
- Alterações na rugosidade superficial;
- Necessidade excessiva de dressagem do rebolo e desgaste do dressador;
- Alteração do número de arestas cortantes do rebolo.

O fator mais importante de impacto na rugosidade superficial da peça é o tamanho do grão abrasivo, porém outros fatores, como o espaçamento entre grãos, podem impactar na variação da rugosidade ao longo da superfície. Outros efeitos que podem alterar a previsibilidade da rugosidade superficial são as deformações plásticas e a adesão de material no abrasivo (MARINESCU et al., 2004).

A penetração de trabalho afeta indiretamente a rugosidade, pois, em valores elevados, pode haver ruptura ou arrancamento dos grãos abrasivos, aumento do espaçamento entre grãos e, conseqüentemente, elevação da rugosidade (MARINESCU et al., 2004).

Cabe ressaltar a importância da dressagem do rebolo, pois dependendo da forma de como a dressagem é executada, esta influi diretamente no acabamento, no volume de arranque do material, na tolerância geométrica do perfil retificado, bem como na vida útil do rebolo (OLIVEIRA, 2001). A dressagem é recuperação da capacidade de corte do rebolo e ainda permite a remoção de material aderido, o perfilamento e a recomposição da concentricidade da face de trabalho e o eixo de rotação.

É praticamente impossível prever com precisão a rugosidade de uma peça retificada a partir de modelos analíticos. Os principais fatores que influenciam nessa condição são (MARINESCU et al., 2004):

- Espaçamento e profundidade irregulares entre grãos abrasivos;
- Efeito da dressagem e densidade de grãos;
- Efeito do desgaste na densidade de grãos;
- Efeito do sulcamento;
- Deflexão dos grãos;
- Efeito do faiscamento;
- Adesão de material entre os grãos abrasivos e a peça.

A maioria dos fatores acima está relacionada à variabilidade do espaçamento entre grãos ou à elevação da temperatura da região de contato.

Algumas condições de corte têm forte efeito na rugosidade superficial dos materiais usinados. Em baixas velocidades, por exemplo, pode ocorrer a formação da aresta postiça de corte, causando a elevação da rugosidade. O aumento do avanço em baixas velocidades de corte pode resultar numa qualidade superficial ainda pior (MACHADO; SILVA, 2003). Apesar das afirmações mencionadas se referirem à usinagem com ferramentas de geometria definida, é esperado um comportamento análogo nos grãos abrasivos do rebolo no processo de retificação.

O avanço e a penetração de trabalho têm grande influência no acabamento superficial dos materiais usinados. A altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço tendem a aumentar com o avanço. A penetração de trabalho aumenta as forças e, portanto as deflexões. Adicionalmente, a penetração de trabalho tem relação direta com a área de contato entre a peça e o rebolo, ou seja, quanto maior a penetração de trabalho maiores serão a área de contato e, conseqüentemente as forças de corte e energia consumida no processo (MACHADO; SILVA, 2003).

Outros parâmetros que podem influenciar na rugosidade superficial das peças são: a geometria da ferramenta de corte e da peça, a rigidez da máquina ferramenta, o material da peça, as condições de corte e o material da ferramenta (NAKAYAMA et al., 1966 apud MACHADO; SILVA, 2003).

Além dos aspectos relativos à qualidade superficial do material usinado deve-se ainda considerar que os parâmetros mencionados têm influência direta na produtividade dos processos de usinagem. Em geral velocidades de corte e avanços elevados permitem uma redução significativa nos tempos de processo, porém podem provocar forças de corte excessivas, vibrações, consumo excessivo de energia e ferramentas e perda de qualidade superficial. O desafio na Indústria é encontrar a relação ótima de elevação da velocidade de corte e avanço sem perda da qualidade superficial.

2.2.5 Mecânica do Contato

A mecânica do contato, pertinente à usinagem por abrasão, é a terminologia utilizada para o estudo do tamanho da área de contato entre o rebolo e a peça, levando-se em consideração as tensões entre ambos e os efeitos elásticos causados por essas tensões. O comprimento de contato tem importância tribológica relevante, pois está relacionado com os seguintes fatores:

- O comprimento do contato deslizante dos grãos abrasivos;
- A intensidade da energia transferida à peça;
- A espessura dos cavacos;
- A rugosidade da peça;
- O tempo de contato dos grãos abrasivos;
- O número de grãos abrasivos em contato;
- O desgaste dos grãos abrasivos.

A área aparente de contato, A_c , é dada pela equação 2.2 (ver figura 18):

Eq. (2.2) $A_c = b_w \cdot l_c$, onde l_c é o comprimento da região de contato e b_w é a largura da peça.

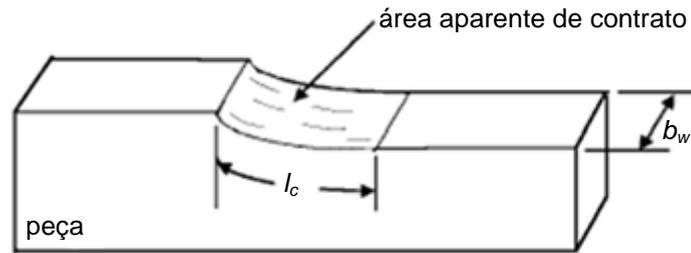


Figura 18 - Área aparente de contato.

Fonte: Marinescu et al. (2004).

O comportamento do rebolo, a temperatura da região de contato, a rugosidade superficial, as forças de corte e a eficiência de corte do abrasivo são afetadas pelo comprimento da zona de contato.

A área de contato entre o rebolo e a peça pode crescer principalmente devido à deflexão dos grãos abrasivos causada pela força normal de corte (ver figura 20 e 21) ou por variações de tensão em pontos distintos de contato. Este efeito é mais comum nos rebolos com aglomerantes do tipo resinóide e vitrificado que possuem módulo de elasticidade inferior ao módulo de elasticidade do material da maioria das peças retificadas.

A área de contato também pode crescer quando utilizadas grandes profundidades de corte ou quando ocorrer tanto a deflexão quanto utilização de elevadas profundidades de corte.

O rebolo é projetado para tocar a peça nos pontos onde os grãos são mais protuberantes, (ver figura 17 e 19). Cada aresta cortante deforma plasticamente a peça à medida que passa pela zona de corte à alta velocidade. A tensão predominante na ponta dos grãos ultrapassa o limite de escoamento à temperatura de corte. A força normal é suportada pelos pontos de contato e a penetração do rebolo na peça ou o seu achatamento ocorre até que seja estabelecido o suporte à força normal aplicada.

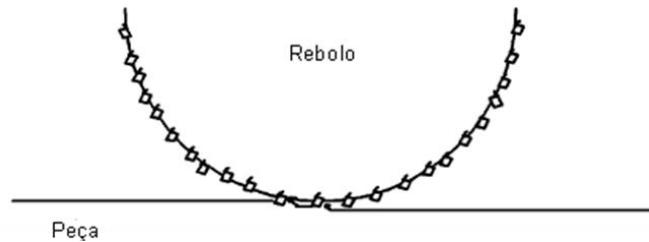


Figura 19 - Área aparente de contato.

Fonte: Marinescu et al. (2004).

Apesar das forças nos pontos de contatos entre os grãos abrasivos e a superfície usinada promoverem fortes deformações plásticas, essas deformações podem não necessariamente implicar em remoção de material. As interações entre os grãos do rebolo e a peça geram tensões de tração e compressão cíclicas que podem provocar a propagação de trincas.

As deflexões elásticas do rebolo e da peça aumentam o comprimento de contato, l_c (ver figura 18), podem provocar redução da temperatura na zona de corte, redução da rugosidade superficial e redução do desgaste por fratura de grãos, porém pode acarretar na perda da afiação dos grãos. Existem evidências de que a deflexão elástica contribui para redução das vibrações inerentes do processo de retificação (ROWE, BARASH, KOENIGSBERGER, 1987 apud MARINESCU et al., 2004) porém a rigidez dinâmica deve ser maximizada para a redução da amplitude das vibrações e o desgaste irregular do rebolo que implicam diretamente na qualidade do acabamento.

2.2.6 Atrito, Forças e Energia

A energia consumida pela maioria das retificadoras é geralmente alta, se comparada ao consumo de outras máquinas operatrizes, e o fator limitante da taxa de remoção de material está relacionado à eficiência das condições operacionais. A energia dissipada na retificação é equivalente ao calor gerado e as forças envolvidas, embora relevantes, não são tão altas como nas operações de fresamento, devido às elevadas velocidades de corte da ferramenta abrasiva (MARINESCU et al., 2004).

A taxa de remoção de material na usinagem por abrasão depende apenas da potência aplicada ao processo e da eficiência de remoção de material, o que pode ser detalhado nas seguintes condições:

- Velocidades altas para direcionamento de energia ao ponto de usinagem;
- Ferramenta abrasiva afiada e lubrificação efetiva para minimização das forças e energia requerida;
- Maximização da área de contato de usinagem para aumento da superfície usinada num determinado tempo.

A afiação da ferramenta abrasiva é responsável pela redução das forças de corte, pela redução do tempo de corte, pela redução da energia necessária e pela qualidade superficial da peça. Quando a ferramenta se apresenta cega além dos efeitos opostos aos citados para a ferramenta afiada, surgem, em maiores ou menores proporções problemas relativos à vibração, ruídos, variações dimensionais e danos térmicos. O estudo das forças, atrito e energia estão relacionados mais diretamente com a melhoria da qualidade superficial, produtividade e redução de custos de produção (MARINESCU et al., 2004).

Nos processos abrasivos uma força atua entre a ferramenta e a peça. Essa força pode ser decompostas em 3 componentes de efeitos distintos na performance do processo, ver figura 20:

- Força tangencial, F_t ;
- Força normal, F_n ;
- Força axial ou lateral, F_a .

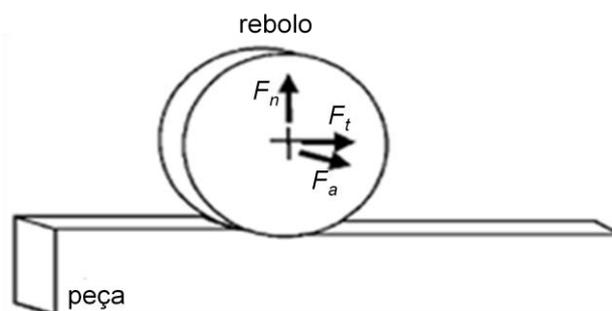


Figura 20 - Componentes da força de corte no caso de retificação tangencial plana.

Fonte: Marinescu et al. (2004).

A força tangencial, F_t (ver eq. 2.3), atua tangencialmente à superfície do rebolo, inclusive com efeitos sobre a velocidade superficial deste. A força tangencial é a principal responsável pela dissipação de energia, P , devido às altas velocidades do rebolo:

$$\text{Eq. (2.3)} \quad P = F_t \cdot v_s, \text{ onde } v_s = \text{velocidade superficial do rebolo}$$

A força normal, F_n , é perpendicular à superfície do rebolo na posição do contato com a peça. Normalmente assume valores muito superiores ao da força tangencial e o seu efeito causa a redução da penetração de trabalho. Adicionalmente, esta força é a responsável pelas deflexões das peças, rebolo e/ ou da estrutura da máquina operatriz. A força normal depende da afiação dos grãos abrasivos e da dureza do material da peça em processamento (MARINESCU et al., 2004).

A força lateral, F_a , surge quando existem movimentos laterais ao rebolo, como, por exemplo, durante o avanço transversal.

O módulo da força total de usinagem, F , é calculado a partir da seguinte equação:

$$\text{Eq. (2.4)} \quad F = \sqrt{F_t^2 + F_n^2 + F_a^2}$$

Em termos de energia, um processo de usinagem por abrasão é eficiente se o material da peça é removido rapidamente e com um baixo consumo de energia. O termo energia específica é utilizado largamente como medida de eficiência. Em usinagem, a energia específica é definida como a relação entre a potência e a taxa de remoção de material (MARINESCU et al., 2004).

Um processo de usinagem por abrasão pode ser considerado eficiente quando apresentar um valor baixo para a energia específica.

Segundo Kannapan e Malkin (1972) a energia específica, E_c , pode ser segregada em 3 componentes, uma para a formação do cavaco, E_{ch} , outro para o sulcamento, E_p , e outra para o escorregamento, E_s (ver eq 2.5):

$$\text{Eq. (2.5)} \quad E_c = E_{ch} + E_p + E_s$$

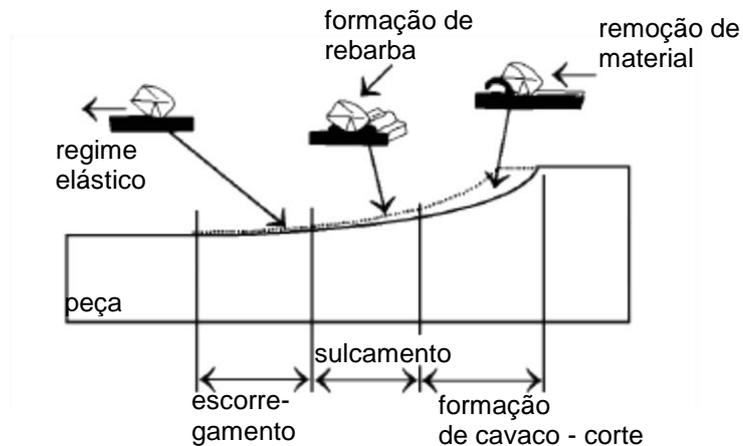


Figura 21 - Regimes de deslizamento, sulcamento e corte do processo abrasivo.

Fonte: Marinescu et al. (2004).

Segundo Hahn (1966) existem três estágios de deformação do material na interação do rebolo com a peça: deslizamento, sulcamento e corte (ver figura 21). No estágio de deslizamento a remoção de material é desprezível apesar de o atrito ser perceptível a olho nu. Este estágio é típico do polimento e acabamento na retificação com rebolo alisador, após um longo período de avanço sem penetração de trabalho em condições de lubrificação abundante. No sulcamento a força aplicada sobre os grãos é muito pequena para causar a penetração na peça, portanto ocorre a deformação elástica ou uma pequena deformação plástica nos picos das asperidades. Nos casos onde o valor da penetração é muito baixo o atrito adesivo pode ocorrer, mesmo em condições lubrificadas e, principalmente, quando usinados materiais de baixa dureza (MARINESCU et al., 2004).

O sulcamento acontece quando a penetração dos grãos abrasivos aumenta (ver figura 21). Neste estágio arranhões se tornam evidentes e rebarbas são formadas aos lados dos arranhões, porém a remoção de material da peça ainda é desprezível. A energia de formação do cavaco, E_{ch} , pode ser estimada a partir da premissa de que a energia absorvida pelos cavacos é limitada pela redução brusca da tensão de cisalhamento assim que a temperatura se aproxima da temperatura de fusão do material. O processo de retificação concentra uma quantidade muito grande de energia num volume muito pequeno de material durante um período de tempo muito curto. A energia de formação de cavacos pode ser estimada como:

$$\text{Eq. (2.6)} \quad E_{ch} = \rho \cdot C \cdot \theta_{mp}$$

Onde ρ é a densidade, C a capacidade calorífica e θ_{mp} o ponto de fusão do material da peça.

A energia de escorregamento, E_s , é definida pela componente da energia proporcional à área de contato do plano dos grãos desgastados. A área dos grãos desgastados, A , é expressada como porcentagem da área superficial do rebolo. A energia de escorregamento pode então ser estimada como:

$$\text{Eq. (2.7)} \quad E_s = \mu_s \cdot F_{ns} \cdot v_s, \text{ onde } v_s = \text{velocidade superficial do rebolo}$$

Onde μ_s é o coeficiente de escorregamento, F_{ns} é a parte da força normal proporcional à área dos grãos desgastados e o produto $\mu_s \cdot F_{ns}$ é definido pela porção da força tangencial requerida para ultrapassar o atrito por escorregamento, F_{ts} , portanto:

$$\text{Eq. (2.8)} \quad E_s = F_{ts} \cdot v_s$$

A energia de sulcamento, E_p , pode ser calculada a partir da Eq.(2.5), pela dedução das parcelas das energias de escorregamento, E_s , e de formação de cavacos, E_{ch} . De acordo com Malkin (1989) a energia de sulcamento diminui com o aumento da taxa de remoção de material enquanto a energia de formação de cavacos permanece constante.

2.2.7 Aspectos Térmicos

Geralmente quanto mais alta é a temperatura de usinagem à qual um material é submetido maiores são os danos causados à superfície da peça. Alguns dos efeitos da alta temperatura são:

- Difusão de microconstituintes, provocando crescimento de grãos, precipitação e alteração de dureza;
- Transformação de fases, podendo provocar endurecimento;

- Efeitos térmicos de expansão e contração, formação de trincas e tensões residuais;
- Reações químicas, principalmente oxidação.

A alteração da coloração da superfície retificada, oxidação, é um indicador dos danos térmicos causados pela alta temperatura. A coloração azulada ocorre na retificação convencional de alguns aços a temperaturas acima de 450°C (MARINESCU et al., 2004).

O formato dos cavacos observados em microscópio também pode identificar temperaturas excessivas no processo de retificação. O formato esférico do cavaco pode indicar que o material na zona de corte pode ter se fundido, ver figura 22 [c].

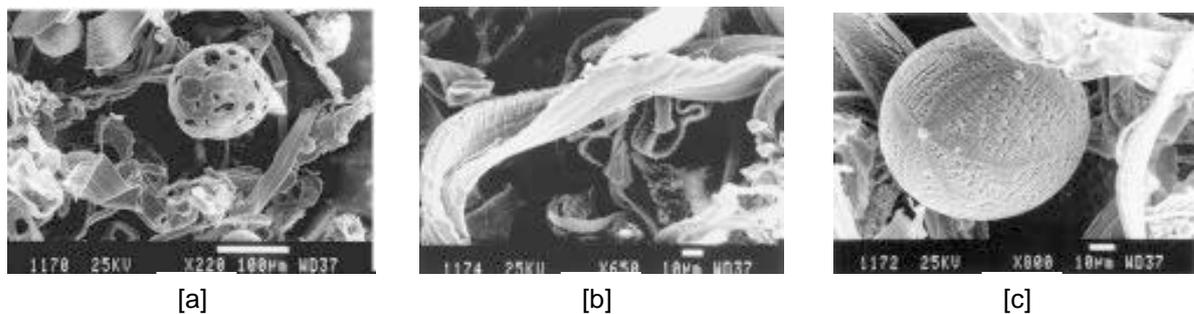


Figura 22 - [a] cavaco típico do processo de retificação com presença de cavacos espiralados e ligeiramente arredondados por elevação da temperatura de corte e cegamento de grãos abrasivos, [b] cavaco longo característico de materiais dúcteis e [c] cavaco esférico característico de material fundido.

Fonte: Marinescu et al. (2004).

A temperatura na região de corte depende principalmente do fluxo de calor gerado na região de contato. A dissipação do calor gerado ocorre principalmente pela peça usinada, pelos grãos abrasivos e pelo fluido de corte. A dissipação de calor através do material removido é muito baixa (MARINESCU et al., 2004).

A utilização de fluido de corte é fundamental para redução da temperatura na região de contato entre o rebolo e peça e, conseqüentemente, redução dos efeitos dela, porém sua eficácia é limitada quando a aplicação acontece na periferia da região de corte (DES RUISSEAU; ZERKLE, 1970 apud MARINESCU et al., 2004).

A temperatura nos processos de retificação depende da energia específica, das propriedades térmicas do rebolo e das propriedades térmicas do material da peça. Como a velocidade do rebolo está relacionada à energia específica e a energia específica está associada à temperatura de retificação então o aumento da velocidade do rebolo está relacionado com o aumento da temperatura na região de corte (MARINESCU et al., 2004).

O uso de rebolos de CBN (nitreto cúbico de boro) é uma alternativa para redução da temperatura na região de corte. Rebolos de carboneto de silício (SiC) apresentam boa estabilidade térmica e também podem ser utilizados, porém em velocidades inferiores às aplicadas aos rebolos de CBN. Rebolos de alumina (Al_2O_3) apresentam baixa estabilidade térmica.

2.2.8 Aplicação de Fluidos

Para a maioria dos casos de retificação a aplicação de fluidos de corte pode ter importante papel. Eventualmente gases inertes ou ar são utilizados em casos onde a aplicação de fluidos líquidos não é permitida. Na maioria dos casos os fluidos são à base de água ou óleo. A aplicação de lubrificantes sólidos também pode ser viável, porém mais indicada para baixas velocidades de processo e para alguns casos especiais, por exemplo, onde a contaminação não é permitida, a usinagem por abrasão ainda pode ser conduzida a seco.

Atualmente os estudos na área da aplicação de fluidos de corte têm explorado principalmente os aspectos relativos a custos, consumo, meio ambiente e desempenho. Neste sentido pode-se listar a resistência ao ataque de bactérias, a manutenção de características físicoquímicas a temperaturas elevadas, nocividade ao homem e meio ambiente, reciclagem e descarte. Quanto aos métodos de aplicação a literatura acadêmica é vasta em pesquisas com tubeiras especialmente projetadas, utilização de pressões de aplicação elevadas e, eventualmente, com vazões baixas (lubrificação com mínima quantidade de fluido).

O fluido de corte, também conhecido como refrigerante, tem suas funções que vão bem além da refrigeração. Em geral dentre as funções do fluido de corte, estão:

- Lubrificação mecânica e físico-química dos contatos abrasivos;
- Refrigeração da área de contato e periferias;
- Lavagem ou transporte dos resíduos;
- Captação da poeira abrasiva e vapores metálicos de processo.

A aplicação de fluidos de corte abaixa a temperatura por meio da redução do atrito, das forças envolvidas e do “cegamento” do rebolo o que, conseqüentemente, permite a redução da potência requerida e do calor gerado. Segundo Weingärtner e Haertel (2004) a eficácia de um fluido de corte depende do posicionamento do bico, da velocidade de aplicação, da vazão de fluido e projeto do bocal. O fluido deve contribuir para a formação do cavaco, favorecendo o corte ao invés da deformação plástica sem remoção de material (*plowing*), mantendo o rebolo afiado e reduzindo o coeficiente de atrito entre o grão abrasivo e a peça (WEINGÄRTNER; HAERTEL, 2004).

A aplicação abundante de refrigerante sobre e ao redor da peça propicia o resfriamento em geral e a lavagem dos resíduos, o que é essencial quando apenas uma pequena quantidade de fluido atinge a região de contato entre o rebolo e a peça. A eficiência do fluido de corte é assegurada quando ele atinge completamente a região de contato rebolo-peça. Não é necessária aplicação de um grande volume de lubrificante para se obter redução significativa de desgaste do rebolo, porém a eficácia da lubrificação não é atingida se nenhum fluido penetrar na zona de retificação. Estudos sobre a aplicação de quantidade mínima de lubrificação (MQL – *minimum quantity lubrication*) têm demonstrado que quantidades reduzidas de fluido na região de contato são benéficas à eficiência do processo além de proporcionar redução dos aspectos ambientais e custos (HAFENBRAEDL; MALKIN, 2000).

Normalmente a aplicação dos fluidos de corte é feita por meio de tubeiras. No caso da retificação em baixas velocidades é usual a utilização de apenas uma tubeira e a aplicação do fluido é feita à baixa pressão (cerca de 1 bar). No caso de processos mais avançados tecnicamente, como a retificação a elevadas velocidades (*high speed*), podem ser requeridas elevadas vazões, múltiplas tubeiras com funções distintas e pressões bem mais elevadas para garantia do fornecimento adequado de

fluido na região de corte. Eventualmente, são utilizados jatos de alta pressão, da ordem de 100 bar, para remover os grãos soltos e enfraquecidos do rebolo.

As maiores limitações na aplicação de fluidos de corte na retificação ocorrem nos casos de velocidades acima de 45 m/s. Como os experimentos realizados neste estudo estão na faixa de velocidades inferiores ao valor citado, o aprofundamento na revisão das técnicas e conceitos pertinentes à lubrificação aplicada a processos em alta velocidade não será priorizado.

Vários aspectos devem ser avaliados antes da decisão por sistema de lubrificação a óleo mineral ou emulsões à base de água. Custos, vida útil, ataque por bactérias, propriedades refrigerantes, lubrificantes e anticorrosivas, enclausuramento da máquina, inflamabilidade, aspectos ambientais e ocupacionais e restrições legais são bastante diferenciados para os dois casos citados.

Os fluidos de corte podem ser agrupados em quatro tipos básicos (ver também quadro 3):

- Óleos de corte ou fluidos de corte (integral ou aditivado);
- Fluidos de corte solúveis em água:
 - Emulsionáveis convencionais;
 - Emulsionáveis semi-sintéticos;
 - Soluções (fluidos sintéticos);
 - Gases;
- Pastas e lubrificantes sólidos.

Os óleos de corte têm como base o óleo mineral no estado puro ou aditivado com compostos polares ou aditivos químicos. Estes óleos apresentam base parafínica com compostos aromáticos policíclicos que podem causar câncer ou dermatites. Apesar de suas excelentes propriedades lubrificantes, anticorrosivas e longa vida útil apresentam baixo poder refrigerante quando comparados aos fluidos hidrossolúveis (BIANCHI; AGUIAR; PIUBELI, 2004).

Os fluidos solúveis em água formam as emulsões e soluções assim que diluídos dependendo da constituição do concentrado (óleo mineral ou sais, respectivamente),

da presença e do nível de emulgadores no concentrado. Geralmente os fluidos solúveis apresentam refrigeração eficiente e moderado poder lubrificante se comparados ao óleo mineral. Nas emulsões os emulgadores proporcionam a dispersão do óleo mineral em pequenas gotículas. Além das características citadas, os fluidos solúveis exigem cuidados em relação à qualidade da água utilizada, controle de microorganismos, ao PH e concentração da emulsão ou solução (BIANCHI; AGUIAR; PIUBELI, 2004).

Os fluidos sintéticos são soluções químicas constituídas de sais orgânicos e inorgânicos dissolvidos em água sem a presença do óleo mineral. Em geral apresentam boas propriedades térmicas, alto poder detergente e visibilidade da região de corte, facilidade no preparo da solução e alta resistência à oxidação do fluido e da peça. Os fluidos sintéticos apesar de apresentarem custo inferior e menores restrições de utilização se comparado aos fluidos integrais possuem desvantagens como poder lubrificante limitado e formação de compostos insolúveis e de espuma (BIANCHI; AGUIAR; PIUBELI, 2004).

Os gases, ar, argônio, hélio e nitrogênio, têm sua aplicação restrita às operações onde é necessário o controle da oxidação da peça ou cavacos.

As pastas e lubrificantes sólidos são aplicados manualmente sobre a peça e na ferramenta. Alguns rebolos são impregnados com lubrificantes sólidos durante sua fabricação. Os lubrificantes sólidos mais utilizados são o grafite e o bissulfeto de molibdênio e, dentre as pastas, são comuns os sabões e ceras (BIANCHI; AGUIAR; PIUBELI, 2004).

Quadro 3 - Características dos fluidos de corte (1 - ruim; 2 - bom; 3 - ótimo; 4 - excelente).

	SINTÉTICO	SEMI-SINTÉTICO	ÓLEO SOLÚVEL	ÓLEO MINERAL
Calor removido	4	3	2	1
Lubrificação	1	2	3	4
Manutenção	3	2	1	4
Filtrabilidade	4	3	2	1
Danos – meio ambiente	4	3	2	1
Custo	4	3	2	1

Fonte: Catai et al. (2003).

Nos processos de retificação a velocidades superiores a 45 m/s é comum o surgimento de uma barreira de ar ao redor do rebolo devido à turbulência que limita a aplicação do fluido de corte (ver figura 23). Esse fenômeno pode eventualmente também ser perceptível em processos a velocidades baixas.

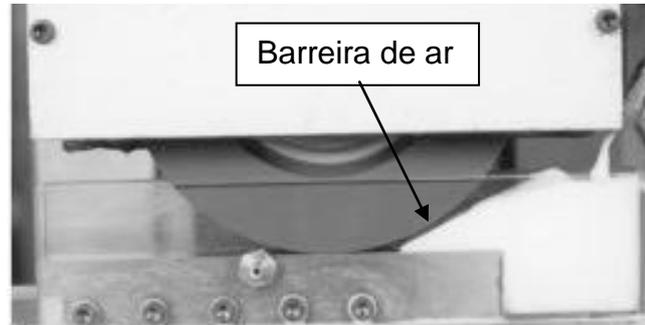


Figura 23 - Evidência da barreira de ar formada pela turbulência ao redor do rebolo em baixas velocidades. Espaçamento entre o rebolo e a peça de 0,08 mm e velocidade de 33,5 m/s.

Fonte: Marinescu et al. (2004).

A elevação da velocidade do fluido ou aumento do espaçamento entre o rebolo e a peça é suficiente para que o fluido possa fluir normalmente. Obviamente no processo de retificação real não existe espaçamento entre o rebolo e a peça, porém o espaçamento corresponde aos poros da superfície do rebolo.

Os métodos utilizados para otimização da penetração do fluido na região de corte geralmente envolve uma ou uma combinação das técnicas apresentadas abaixo (ver figura 24):

- Elevação da velocidade de aplicação do fluido na direção da área de contato;
- Elevação da pressão para forçar a penetração de fluido nos poros do rebolo;
- Métodos de rompimento da barreira de ar;
- Aproveitamento da barreira de ar para direcionar o fluxo de fluido.

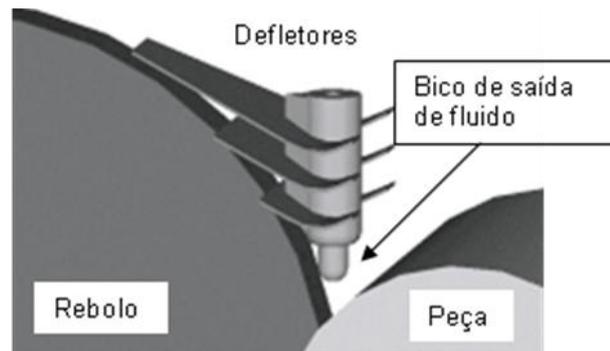


Figura 24 - Ilustração de um sistema de defletores aerodinâmicos para minimização da formação da barreira de ar.

Fonte: Bianchi (2002).

Para retificação a altas velocidades existem vários tipos de bocais e tubeiras aplicáveis. Geralmente o projeto deles se baseia em dois conceitos básicos: tubeiras de jato livre, para introdução de fluido a alta velocidade, e sapatas, com objetivo de minimizar a formação da camada de ar (ver figura 25 e 26).

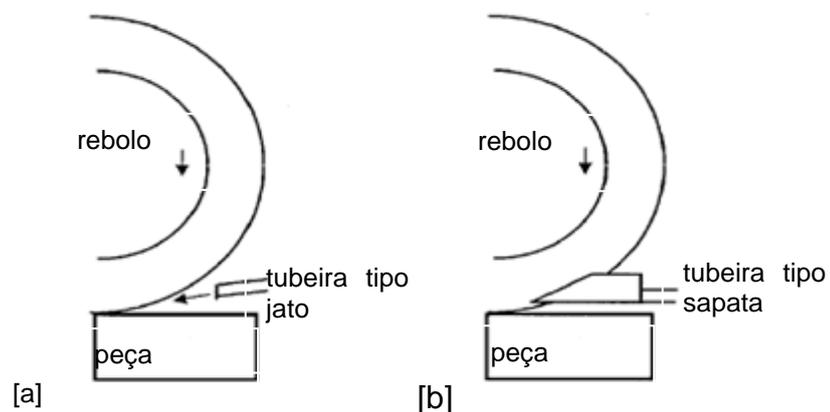


Figura 25 - [a] bocais que utilizam a velocidade de processo para criação de uma camada líquida para penetração na área de contato e [b] sapata para pressurização de fluido na superfície do rebolo e redução da camada de ar e penetração na área de contato.

Fonte: Marinescu et al. (2004).

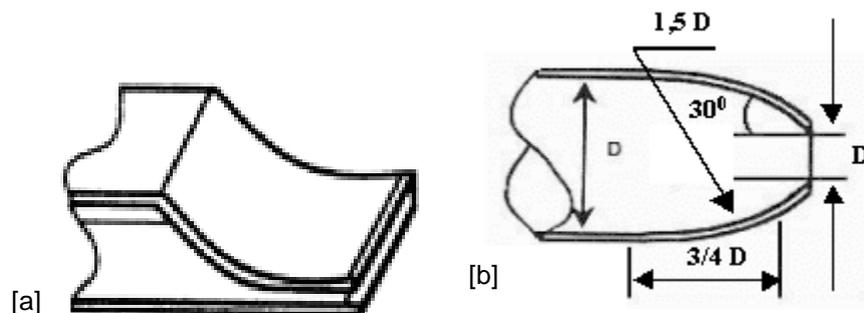


Figura 26 - [a] bocal tradicional e [b] bocal especial arredondado que, por possuir superfície côncava, minimiza a queda de pressão e a turbulência ocasionada pela passagem e saída do fluido do bocal.

Fonte: Catai et al. (2003).

Além dos conceitos citados, projetos alternativos como a introdução de fluido internamente por meio dos poros ao rebolo chegaram a ser propostos (PAHLITZSCH, 1953; GRAHAM; WHISTO, 1978 apud MARINESCU et al., 2004). A grande limitação desse projeto é a complexidade de projeto e a restrição quanto à velocidade do rebolo bem como a necessidade de um sistema de filtragem muito eficiente para impedir os entupimentos.

2.2.9 Usinabilidade de Metais

As forças de usinagem tendem a aumentar à medida que a dureza dos materiais cresce o que implica na usinabilidade dos metais, ligas e revestimentos. Abaixo são detalhadas algumas observações gerais:

- A força de corte e as dificuldades de usinagem tendem a aumentar com a elevação da dureza do material;
- A dureza dos aços tende a aumentar com a elevação do teor de carbono em sua composição o que implica em maiores dificuldades de usinagem;
- Com relação à estrutura metalúrgica a usinabilidade dos aços diminui de acordo com a seguinte ordem:
 - Ferrita (baixo C) → Perlita (macia) → Bainita → Pearlita (alto C) → Martensita (alto C)
- A dificuldade de usinagem aumenta quando o aço é adicionado dos seguintes elementos de liga segundo a ordem indicada:
 - Cr → Cr-Mo → Ni-Cr-Mo
- Procedimentos de endurecimento superficial aumentam a resistência à usinagem por abrasão, ou seja, o desgaste da ferramenta abrasiva aumenta (MARINESCU et al., 2004).

Apesar das generalidades citadas acima, é importante pontuar que materiais macios podem introduzir outras restrições ao processo de usinagem por abrasão. A baixa dureza implica em forças de corte baixas e a alta ductilidade de alguns metais tendem a gerar cavacos mais longos. Cavacos longos geralmente proporcionam a obstrução dos poros do abrasivo o que acarreta na redução brusca da capacidade de corte do rebolo. Adicionalmente, se o material tem a tendência de adesão ao rebolo, a rugosidade superficial da peça crescerá rapidamente. Desta forma, o fato

de um material apresentar baixa dureza não necessariamente implica em boa usinabilidade (MARINESCU et al., 2004).

Uma vez que este estudo é direcionado ao cobre eletrolítico utilizado nas placas de cobre dos moldes utilizadas no processo de lingotamento contínuo, o aprofundamento será restrito ao cobre e suas ligas.

2.2.10 Usinabilidade do Cobre

A análise da usinagem do cobre e suas ligas pode ser dividida em três grupos:

- Ligas de fácil usinagem: incluem a maioria dos latões e alguns bronzes ao fósforo e fundidos. Estas ligas possuem ductilidade relativamente baixa e geralmente contam com a presença de elementos de corte fácil (chumbo, enxofre, selênio e telúrio) que funcionam como quebra cavacos, proporcionando a formação de cavacos quebradiços. O telúrio, assim como o enxofre e o selênio, forma com o cobre compostos estáveis, que ficam distribuídos na matriz de cobre como partículas finamente dispersas. A presença destas partículas não provoca aumento acentuado de dureza nem a diminuição sensível da condutividade elétrica, porém facilita muito a usinagem do cobre, na medida em que eleva a resistência ao amolecimento em temperaturas elevadas, pode atuar como elementos lubrificantes e favorece a quebra do cavaco durante o corte do metal, reduzindo o atrito entre o cavaco e a ferramenta. O fluido de corte geralmente utilizado na usinagem dessas ligas é a emulsão de óleo mineral (MACHADO; SILVA, 2003);
- Ligas de usinabilidade moderada: incluem os latões sem chumbo, alguns bronzes ao fósforo e bronzes ao silício. Estas ligas apresentam alta ductilidade o que implica em elevados consumos de potência e dificulta a obtenção de bom acabamento superficial. O fluido de corte geralmente aplicado é a emulsão de óleo mineral adicionado ou não de gordura e a forma de cavaco mais comum é a espiral ou hélice (MACHADO; SILVA, 2003);
- Ligas de difícil usinagem: incluem as ligas de chumbo, as de níquel-prata e os bronzes ao fósforo. Estas ligas apresentam baixa resistência mecânica, alta ductilidade e grande tendência ao arrancamento, gerando, na maioria das

vezes cavacos longos e contínuos. Neste caso são aplicáveis um mistura densa de gordura e óleo mineral (MACHADO; SILVA, 2003).

A temperatura de fusão do cobre puro é 1083° C e sua estrutura é CFC (cúbica de corpo centrado). Durante a usinagem de algumas ligas, as forças de corte são elevadas e a temperatura na região de corte pode atingir o ponto de fusão e dificultar a usinagem. Com a elevação da temperatura, inerente a qualquer processo de usinagem, é comum a queda de resistência mecânica (amolecimento) limitando a usinabilidade destes tipos de liga. No caso da usinagem do cobre puro as temperaturas de corte não são elevadas (MACHADO; SILVA, 2003).

O cobre puro e suas ligas monofásicas são de difícil usinagem devido à alta ductilidade. É necessária a utilização de ferramentas diferenciadas para facilitar a quebra e saída do cavaco. Este tipo de material provoca baixo desgaste na ferramenta de corte, porém exige um ângulo de saída alto e um ângulo cunha pequeno o que pode tornar a ferramenta frágil (SAHOO; KUYUCAK, 1996).

2.3 RUGOSIDADE

2.3.1 Rugosidade das Superfícies

A rugosidade pode ser considerada como o conjunto de irregularidades, pequenas reentrâncias e saliências, que caracterizam uma superfície. Essas irregularidades podem ser avaliadas com aparelhos eletrônicos, a exemplo do rugosímetro. A rugosidade desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos. Ela influi na:

- Qualidade de deslizamento;
- Resistência ao desgaste;
- Possibilidade de ajuste do acoplamento forçado;
- Resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes;
- Qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras;
- Resistência à corrosão e à fadiga;
- Vedação;
- Aparência.

A grandeza, a orientação e o grau de irregularidade da rugosidade podem indicar suas causas que, entre outras, são:

- Imperfeições nos mecanismos das máquinas-ferramenta;
- Vibrações no sistema peça-ferramenta;
- Desgaste de ferramentas;
- Método de conformação da peça.

2.3.2 Conceitos Básicos

A maioria dos conceitos aplicados no estudo da rugosidade é definida pela norma NBR 6405 (ABNT, 1988). A seguir algumas definições (ver também figura 27):

- Superfície geométrica: é a superfície ideal prescrita no projeto, na qual não existem erros de forma e acabamento (exemplo: superfície plana, cilíndrica, etc, que sejam por definições, perfeitas);
- Superfície real: é a superfície que limita o corpo e o separa do meio que o envolve. É a superfície que resulta do método empregado na sua produção (exemplo: torneamento, retífica, ataque químico, etc). É a superfície que podemos ver e tocar;
- Superfície efetiva: é a superfície avaliada pela técnica de medição, com forma aproximada da superfície real de uma peça;
- Perfil geométrico: é a interseção da superfície real com um plano perpendicular. O plano perpendicular geralmente é imaginário e corta a superfície que resultou do método de usinagem e origina uma linha irregular;
- Perfil real: Intersecção da superfície real com um plano perpendicular. Neste caso, o plano perpendicular (imaginário) cortará a superfície que resultou do método de usinagem e originará uma linha irregular.

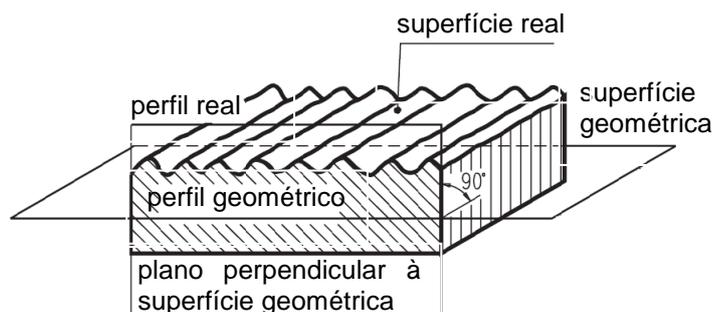


Figura 27 - Perfil real cortado por um plano perpendicular.

Fonte: Adaptado de NBR 6405 (ABNT, 1988).

- Perfil efetivo: é a imagem aproximada do perfil real, obtido por um meio de avaliação ou medição. (exemplo: o perfil apresentado por um registro gráfico, sem qualquer filtragem e com as limitações técnicas dos aparelhos utilizados);
- Perfil de rugosidade: é obtido a partir do perfil efetivo, por um instrumento de avaliação, após filtragem (ver figura 28). É o perfil apresentado por um registro gráfico, depois de uma filtragem para eliminar a ondulação à qual se sobrepõe a rugosidade.

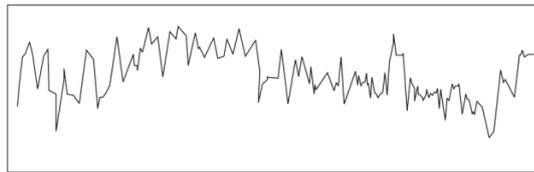


Figura 28 - Perfil de rugosidade.

A rugosidade ou textura primária (A – figura 29) é o conjunto das irregularidades causadas pelo processo de produção, que são as impressões deixadas pela ferramenta de corte.

A ondulação ou textura secundária (B – figura 29) é o conjunto das irregularidades causadas por vibrações ou deflexões do sistema de produção ou do tratamento térmico.

A orientação das irregularidades (C – figura 29) é a direção geral dos componentes da textura e pode ser periódica ou não periódica.

O passo das irregularidades é a média das distâncias entre as saliências ou frequência das irregularidades:

- Passo das irregularidades da textura primária (D-1, figura 29);
- Passo das irregularidades da textura primária (D-2, figura 29).

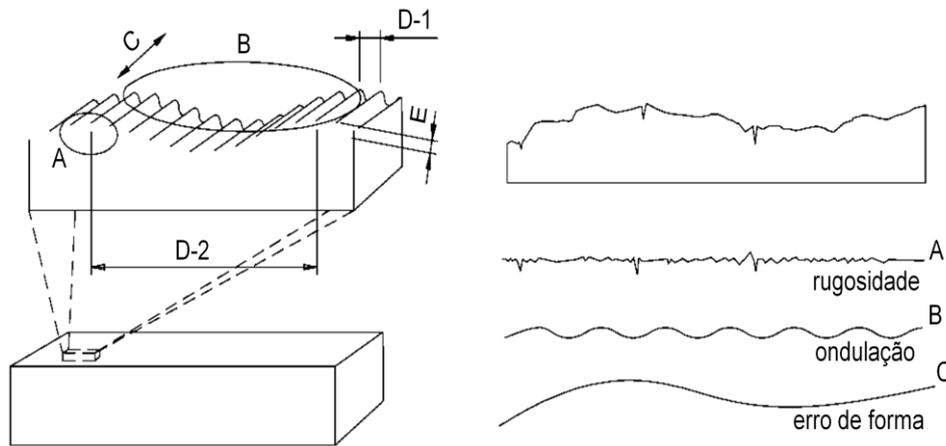


Figura 29 - Perfil de rugosidade.

Fonte: Adaptado de NBR 6405 (ABNT, 1988).

2.3.2 Critérios para Avaliação

O comprimento de amostragem, l_e , é a fração (1/5) do comprimento, l_m , necessário para a definição do perfil efetivo de uma superfície. O comprimento de amostragem, também conhecido como *cut off*, não deve ser confundido com a distância total percorrida pelo apalpador sobre a superfície, l_t .

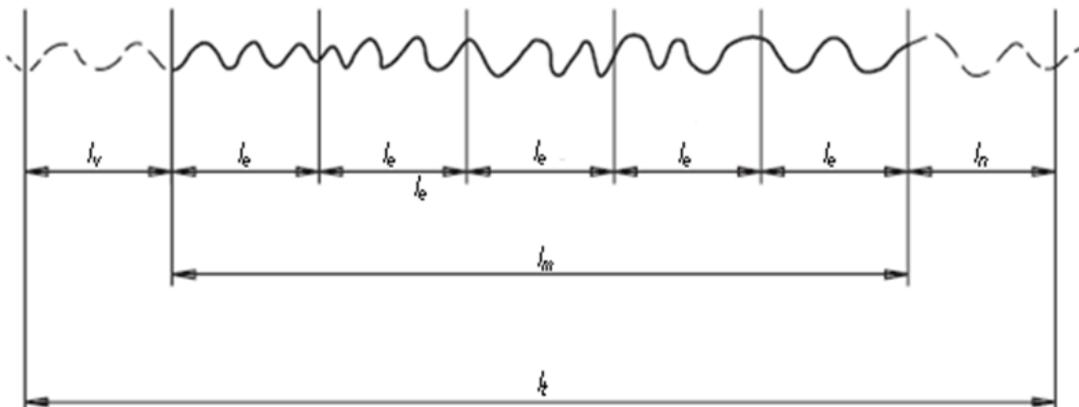


Figura 30 - Comprimentos para avaliação da rugosidade.

Fonte: Adaptado de NBR 6405 (ABNT, 1988).

A distância percorrida pelo apalpador deverá ser igual a $5l_e$ mais a distância, l_v , para atingir a velocidade de medição e para a parada do apalpador, l_m (ver figura 30).

2.3.4 Parâmetros de Rugosidade

A diversidade de perfis e padrões particulares de fabricantes e normas nacionais e internacionais justificou a adoção de um parâmetro que permitisse avaliação da rugosidade. A rugosidade média (R_a - *roughness average*) é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (l_m), ver figura 31. Essa grandeza pode corresponder à altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento o percurso de medição (l_m).

$$\text{Eq. (2.9): } R_a = \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_n}{n} = (\mu m)$$

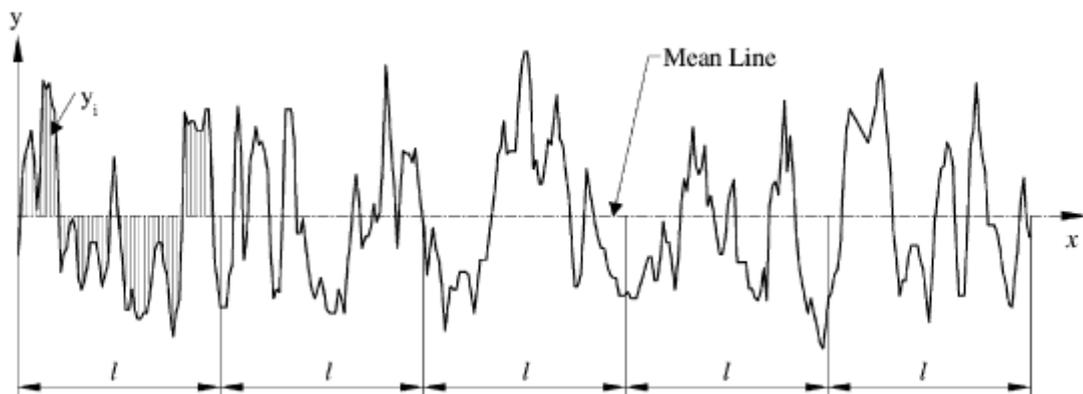


Figura 31 - Esquemático do cálculo da rugosidade R_a .

Fonte: Gadelmawla et al. (2002).

O parâmetro R_a pode ser usado nos seguintes casos:

- Quando for necessário o controle contínuo da rugosidade nas linhas de produção;
- Em superfícies em que o acabamento apresenta sulcos de usinagem bem orientados (torneamento, fresamento, etc.);
- Em superfícies de pouca responsabilidade, como no caso de acabamentos com fins apenas estéticos.

Vantagens do parâmetro R_a :

- É o parâmetro de medição mais utilizado em todo o mundo;

- É aplicável à maioria dos processos de fabricação;
- Devido a sua grande utilização, quase todos os equipamentos apresentam esse parâmetro (de forma analógica ou digital eletrônica);
- Os riscos superficiais inerentes ao processo não alteram muito seu valor;
- Para a maioria das superfícies, o valor da rugosidade nesse parâmetro está de acordo com a curva de Gauss, que caracteriza a distribuição de amplitude.

Desvantagens do parâmetro Ra:

- O valor de Ra em um comprimento de amostragem indica a média da rugosidade. Por isso, se um pico ou vale não típico aparecer na superfície, o valor da média não sofrerá grande alteração, ocultando o defeito;
- O valor de Ra não define a forma das irregularidades do perfil. Dessa forma, poderemos ter um valor de Ra para superfícies originadas de processos diferentes de usinagem;
- Nenhuma distinção é feita entre picos e vales;
- Para alguns processos de fabricação com frequência muito alta de vales ou picos, como é o caso dos sinterizados, o parâmetro não é adequado, já que a distorção provocada pelo filtro eleva o erro a altos níveis.

A norma NBR 8404 (ABNT, 1984) de indicação do Estado de Superfícies em Desenhos Técnicos esclarece que a característica principal (o valor) da rugosidade Ra pode ser indicada pelos números da classe de rugosidade correspondente, conforme quadro a seguir (quadro 4):

Quadro 4 - Relação do valor da rugosidade com a classe de rugosidade.

Classe de rugosidade	N12	N11	N10	N9	N8	N7	N6	N4	N3	N2	N1
Rugosidade Ra (μm)	50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,025

Fonte: Adaptado de NBR 8404 (ABNT, 1984).

Na medição da rugosidade, são recomendados valores para o comprimento da amostragem, conforme quadro abaixo (quadro 5):

Quadro 5 - Tabela de comprimento de amostragem (*cut off*).

Rugosidade Ra (μm)	Mínimo comprimento de amostragem (mm)
$0 < Ra < 0,1$	0,25
$0,1 < Ra < 2,0$	0,80
$2,0 < Ra < 10,0$	2,50
$> 10,0$	8,00

Fonte: TELECURSO 2000. Processos de Fabricação. Volume 3. Parâmetros de Rugosidade. Aula nº19 (2009).

Outros parâmetros de rugosidade são utilizados em diferentes processos de fabricação, porém o mais utilizado para a maioria das aplicações da engenharia mecânica é a rugosidade média Ra. Dentre os outros estão a rugosidade máxima (Ry), a rugosidade total (Rt), a rugosidade média (Rz) e a rugosidade média do terceiro pico e vale (R_{3z}). Esses parâmetros apresentam vantagens e desvantagens em relação ao parâmetro Ra, porém não serão detalhados, pois os aspectos de projeto e dos testes envolvidos neste estudo se limitam ao parâmetro Ra.

A figura que se segue (figura 32) classifica os acabamentos superficiais – geralmente encontrados na indústria mecânica - em 12 grupos, e as organiza de acordo com o grau de rugosidade e o processo de usinagem que pode ser usado em sua obtenção. Permite, também, visualizar uma relação aproximada entre a simbologia de triângulos, as classes e os valores de Ra (μm).

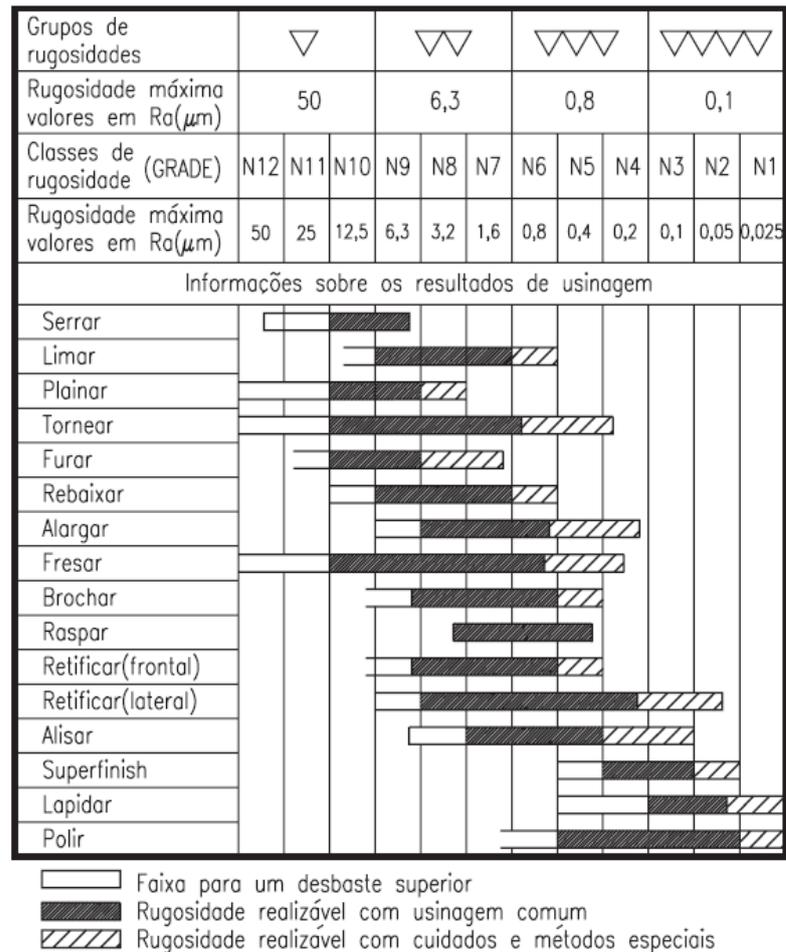


Figura 32 - Simbologias e associações aos processos de usinagem.

Fonte: TELECURSO 2000. Processos de Fabricação. Volume 3. Parâmetros de Rugosidade. Aula nº19 (2009).

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo aborda as condições de preparação dos equipamentos, ferramentas, peças, amostras e materiais envolvidos nos testes de retificação (processo alternativo proposto) bem como na observação dos processos atuais. Além dessas condições, aqui estão detalhados os procedimentos adotados.

3.1 MATERIAIS E DESIGNAÇÃO DE AMOSTRAS

Todos os materiais envolvidos neste estudo foram cedidos pela Oficina Mecânica Central da ArcelorMittal Tubarão. Para o processo proposto, uma vez que a preparação das amostras implica na destruição da peça original, foram escolhidas duas placas de cobre em final de vida útil e para os casos de observação dos processos atuais (fresamento/mandrilhamento e aplainamento) as condições são reais e as peças observadas são peças utilizadas no processo produtivo da ArcelorMittal Tubarão.

Quanto aos processos atuais, pode-se observar que o fresamento/mandrilhamento é pertinente à recuperação das placas de cobre de perfil plano que compõem o molde da máquina de lingotamento contínuo nº 2 (MLC2) da ArcelorMittal Tubarão. Em relação ao processo de aplainamento, observa-se que o mesmo aplica-se às placas de cobre de perfil curvo (côncavo/convexo) que compõem o molde da máquina de lingotamento contínuo nº 1 (MLC1). da usina supracitada.

3.1.1 Conjunto Montado Placa/ jaqueta de Refrigeração – Observação dos processos atuais

Os processos atuais de recuperação das placas de cobre dos moldes das máquinas de lingotamento contínuo (MLC's) da ArcelorMittal Tubarão são executados no conjunto placa de cobre/ jaqueta de refrigeração (figuras 2, 34 e 35).

Foram selecionados aleatoriamente dois conjuntos/ amostras, um do molde da máquina de lingotamento contínuo nº 1 (figura 33 e 34 - comprimento 1.888 mm e

largura 904 mm) e outro da máquina 2 (figura 35 - comprimento 2.560 mm e largura 904 mm).

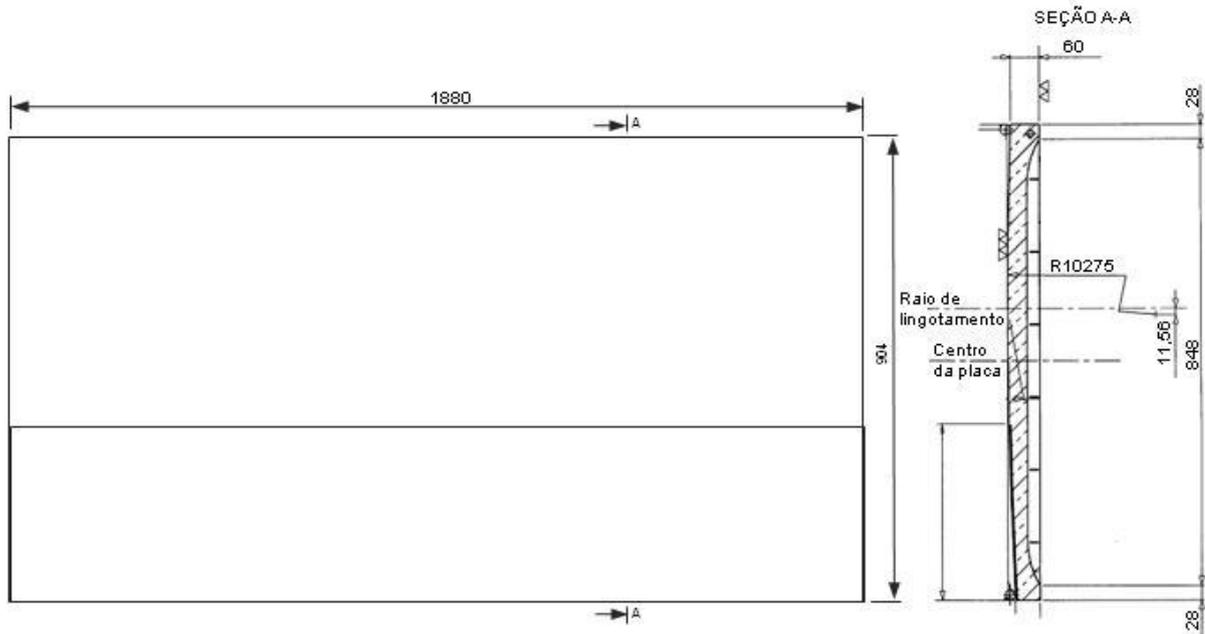


Figura 33 - Desenho placa de cobre do molde da MLC 1 desmontada da jaqueta de refrigeração.

Fonte: Adaptado de arquivo ArcelorMittal Tubarão.

A rugosidade exigida no projeto original é $R_a = 0,8 \mu\text{m}$, de acordo com a simbologia de três triângulos da figura 33 apresentada na Seção A-A, valor relativamente baixo, porém teoricamente realizável por processo de retificação frontal, conforme se pode observar no Capítulo 2, a partir da figura 33 referência de classe de rugosidade N6.



Figura 34 - Fotografia do conjunto placa de cobre (MLC1) montada na jaqueta de refrigeração.

PLACA DE COBRE
MONTADA NA JAQUETA
DE REFRIGERAÇÃO



Figura 35 - Fotografia do conjunto placa de cobre (MLC2) montada na jaqueta de refrigeração, travada e posicionada para usinagem.

As diferenças nas características das placas dos moldes das duas máquinas de lingotamento em questão se justificam por seus projetos concebidos em épocas distintas. A MLC1 foi a primeira máquina de lingotamento instalada na ArcelorMittal Tubarão e segunda entrou em operação mais de 5 anos depois.

A proposta deste estudo foi a execução de testes de retificação em amostras extraídas de duas placas de molde da máquina de lingotamento contínuo nº 2, de perfil retangular/superfície plana, com o objetivo de extrapolar os resultados obtidos nestes testes às placas da máquina nº 1, apesar de seu perfil côncavo/convexo. Esta extrapolação pode ser justificada pelas características do material das peças serem idênticas (cobre eletrolítico revestido parcialmente com níquel) e apenas a geometria da superfície ser distinta. Desta forma a utilização de um cabeçote copiador ou recursos como controlador por comando numérico possibilitaria a retificação das superfícies curvas da mesma forma que das superfícies planas.

3.1.2 Amostras – Processo alternativo de retificação proposto

As amostras utilizadas nos testes de retificação, totalizando 11 amostras, foram extraídas de duas placas de molde da máquina de lingotamento contínuo nº 2, ou

seja, de perfil transversal retangular, condição essencial para a operação de retificação plana tangencial.

Cada placa foi cortada com o auxílio de uma fresa de disco, em 8 segmentos de largura aproximadamente de 320 mm (figura 36). Este procedimento foi necessário devido à capacidade limitada da mesa da retificadora que não permitiria a fixação de uma peça inteira (largura máxima retificável 750 mm).

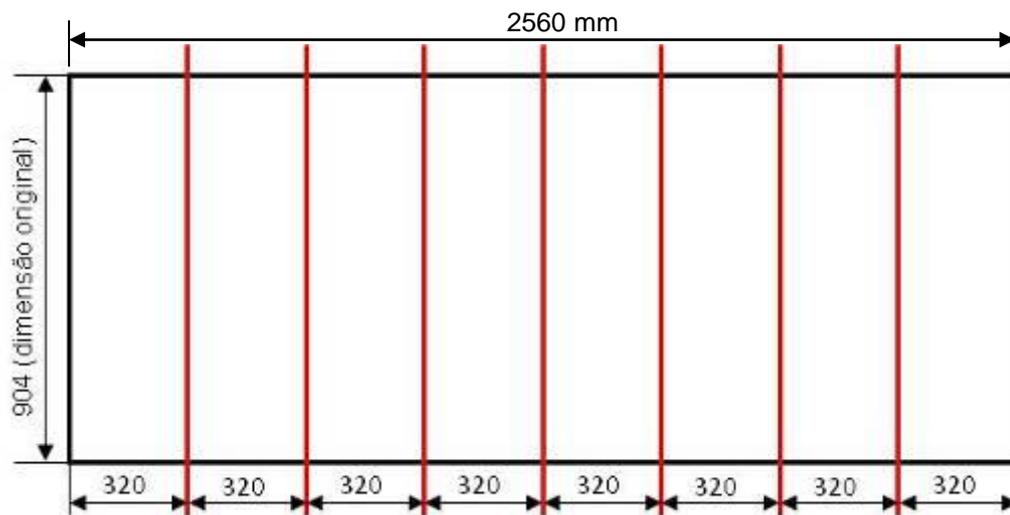


Figura 36 – Esquema mostrando a divisão das placas em amostras.

Na preparação das amostras a placa original foi cortada transversalmente ao longo de seu comprimento, porém a largura original (904 mm) foi preservada (figura 36). As amostras foram furadas em suas faces frontais para abertura de duas roscas que permitiram a utilização de olhais para içamento/movimentação, visível na figura 39.

Foi necessária a fabricação de um suporte de aço para fixação na mesa magnética da retificadora (figura 37 e 38), uma vez que as amostras são de cobre eletrolítico e, portanto não ferromagnéticas. Foram aproveitadas as furações originais das faces posteriores das placas - utilizadas para montagem nas jaquetas de refrigeração. No suporte foram abertos furos passantes e rebaixados para montagem dos parafusos sem exposição de suas cabeças na face em contato com a mesa magnética.



Figura 37 - Fotografia do suporte de aço e amostra da placa de cobre montados.

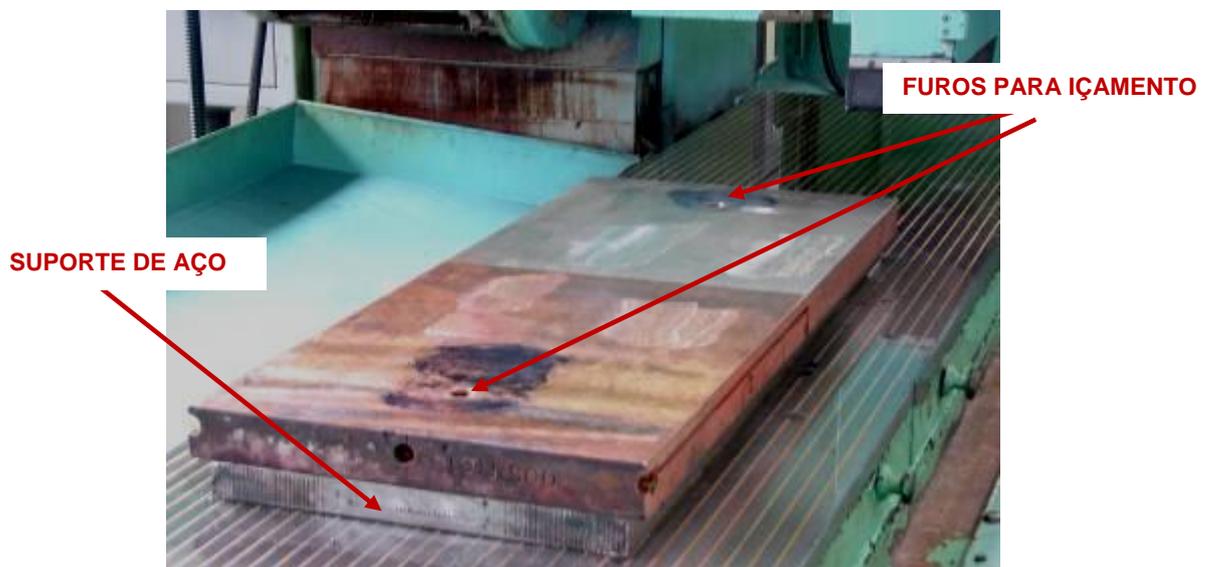


Figura 38 - Fotografia do suporte e amostra montados e fixados à mesa magnética da retificadora.

Além da preparação das 11 amostras para os testes de retificação foram preparadas 3 miniaturas das amostras (réplicas) para medição de rugosidade em microscópio eletrônico de varredura. Esta preparação está detalhada no item 3.2.

3.2 EQUIPAMENTOS

3.2.1 Máquina e Equipamentos Aplicados ao Aplainamento (processo atual)

A máquina operatriz utilizada para a usinagem do conjunto da máquina de lingotamento nº 1 foi uma plaina de mesa horizontal (figura 39) com as seguintes características descritas no quadro 6:

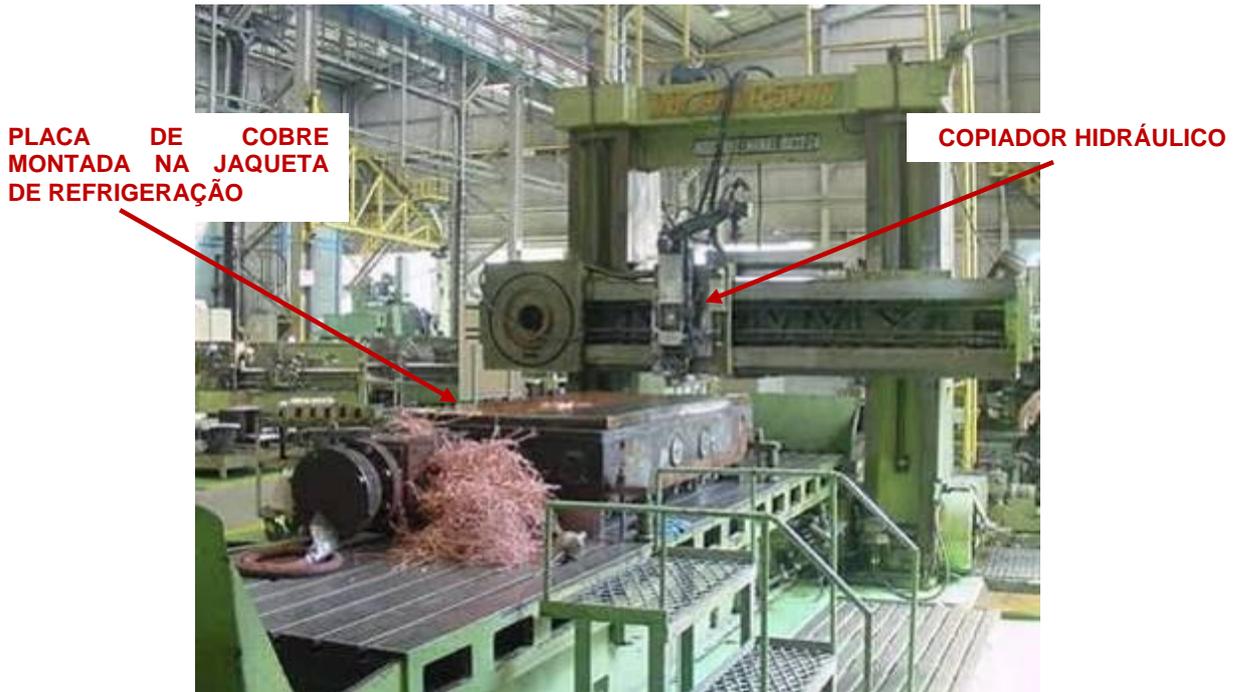


Figura 39 - Fotografia da plaina de mesa utilizada para usinagem de placas de cobre da MLC1.

Quadro 6 - Características da plaina de mesa

Plaina de Mesa			
Fabricante	Ind. Emanuel Rocco SA	Largura da mesa	1.250 mm
Modelo	Orlanda PFO/III – 5.000	Altura livre	1.200 mm
Comprimento da mesa	5.000 mm	Livre entre colunas	1.500 mm

As placas de cobre do molde da máquina de lingotamento contínuo nº 1 possuem perfis côncavo e convexo, por isso, há necessidade de utilização de um cabeçote copiador hidráulico especial com curso transversal e vertical definido pela matriz fabricada nos mesmos perfis das placas (ver figura 40). Atualmente tecnologias como controladores por comando numérico (CNC) podem fazer o mesmo papel do copiador hidráulico.

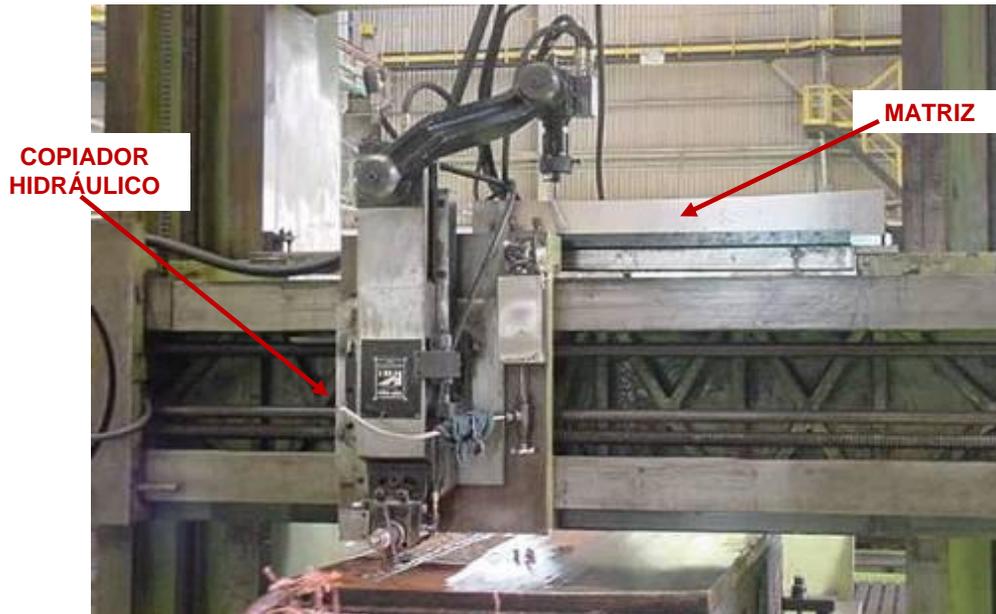


Figura 40 - Copiador hidráulico para cópia do perfil da placa a ser usinada.

O copiador hidráulico utilizado é fabricado pela IBH Indústria de Máquinas e Equipamentos LTDA, cujo modelo é o TA 260.

No cabeçote hidráulico é montado um conjunto de suporte e ferramenta monocortante comuns. O suporte utilizado é o modelo PDJNR de dimensões 25 x 25 x 150 mm do fabricante Sandvik Coromant de fixação por parafuso (ver figura 41).

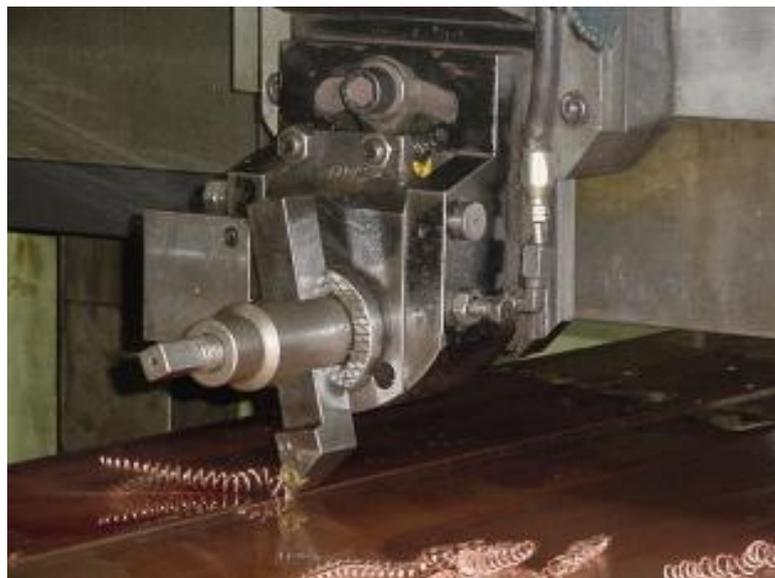


Figura 41 - Fotografia do suporte e ferramenta de corte utilizado no aplainamento.

A ferramenta de corte utilizada na usinagem da superfície revestida de níquel é o inserto de metal duro classe ISO P25 recoberto por nitreto de titânio, óxido de

alumínio e carbonitreto de titânio (TiN + Al₂O₃ + Ti(CN)). O formato é o rômbico de 55° com fixação por parafuso. O modelo utilizado foi o DNMG 150608 PM 4025 do fabricante Sandvik Coromant (ver figura 42 [a]).

Para o desbaste e acabamento da superfície de cobre o inserto utilizado é o mesmo da usinagem da superfície de níquel, porém reafiado (raio 6 mm), para que a ferramenta tenha um maior ângulo de saída, facilitando a quebra do cavaco, uma vez que o cobre apresenta alta ductilidade e necessita de uma ferramenta com ângulo de saída positivo (ver figura 42 [b]). Estas informações se alinham às considerações de Sahoo e Kuyucak (1996) no item 2.2.10.

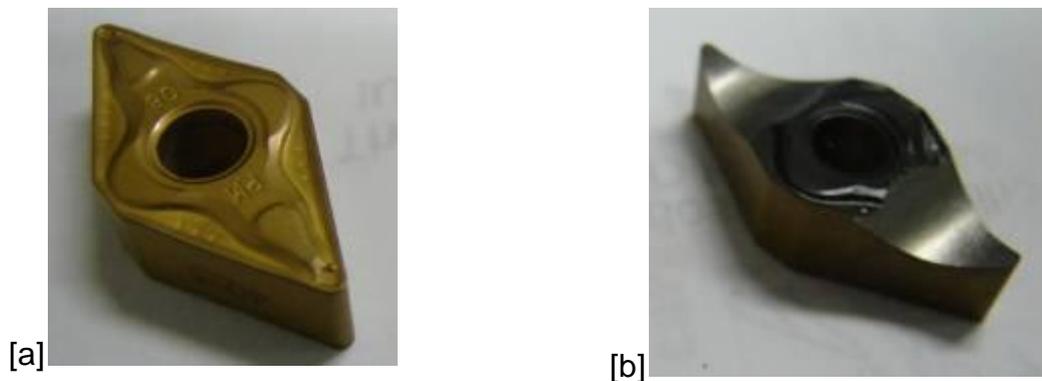


Figura 42 - Fotografias dos insertos de metal duro utilizados no aplainamento (sem aumento): [a] inserto utilizado para usinagem da superfície de níquel; [b] inserto reafiado para usinagem da superfície de cobre.

Os fluidos aplicados durante todo o processo são querosene, quando da usinagem da superfície de cobre, e óleo lubrificante mineral LG68 (norma Siderbras SB154) para a usinagem da superfície de níquel. A aplicação desses fluidos é feita por meio de borrifadores manuais e conforme necessidade identificada visualmente pelo operador. Estes fluidos foram selecionados empiricamente e são utilizados pelos operadores da Oficina há anos, porém demonstra coerência com as sugestões de Machado e Silva (2003) no item 2.2.10. Como a aplicação é pontual e intermitente não existe fluxo suficiente para retirada do calor gerado ou limpeza da peça, porém os efeitos lubrificantes desses óleos têm consequências na redução do desgaste e temperatura na região de corte e no aumento da vida da ferramenta.

Além do copiador hidráulico que define o perfil da usinagem é utilizado um cabeçote lixador (figura 43) que executa o processo de acabamento da peça. Esse cabeçote é montado no local do suporte de ferramenta do cabeçote hidráulico e foi desenvolvido internamente pelas equipes das Oficinas Mecânica e Elétrica Centrais da ArcelorMittal Tubarão e possui as características descritas no quadro 7.



Figura 43 - Fotografia do cabeçote lixador utilizado no acabamento das placas da MLC 1.

Quadro 7 – Características do cabeçote lixador.

Cabeçote Lixador			
Rotação do motor	1.720 rpm	Diâmetro da polia movida	200 mm
Potência do motor	0,75 cv	Relação de transmissão	0,7
Diâmetro da polia motora	140 mm	Rotação de saída	1.204 rpm

A lixa utilizada no cabeçote lixador é a lixa do fabricante Norton modelo Durite W425, formato de cinta, tipo lixa ferro (carboneto de silício), costado de pano, adesivo resina, granulometria 180 para desbaste e acabamento da superfície de cobre e granulometria 320 para desbaste e acabamento da superfície de Ni. O comprimento da cinta é 915 mm e a largura 40 mm.

3.2.2 Máquinas e Equipamentos Aplicados ao Fresamento (processo atual)

A máquina operatriz utilizada para a usinagem do conjunto da máquina de lingotamento nº 2 foi uma mandriladora/fresadora horizontal de piso (*floortype*) CNC (figura 44) com as características descritas no quadro 8:



Figura 44 - Fotografia da mandriladora/fresadora utilizada.

Quadro 8 - Características da mandriladora/fresadora.

Mandriladora de Piso			
Fabricante	Wotan	Comando numérico	Heidenhain iTNC 530
Modelo	B130K	Curso vertical	2.500 mm
Diâmetro do fuso	150 mm	Curso horizontal	8.000 mm
Potência	37 kW	Gama de rotação	5 – 3.000 rpm

A mandriladora/fresadora em questão é de porte superior ao da plaina de mesa, porém é operada através de comando numérico, o que torna a operação mais simples para o operador. Não é necessária utilização de acessórios, apenas a

substituição do inserto utilizado na usinagem da superfície de cobre por outro distinto na usinagem da superfície de níquel.

A operação de usinagem predominante na recuperação das placas de cobre do molde da máquina de lingotamento contínuo nº 2 da ArcelorMittal Tubarão é o mandrilamento de faceamento por meio de barra de mandrilar de diâmetro de 240 mm, de fabricação própria, em aço SAE 1045. A barra é aparafusada no cone ISO50, compatível com o cabeçote da mandriladora/fresadora. O suporte de ferramenta utilizado, aparafusado na barra de mandrilar, é do modelo CTFPL de dimensões 25 x 25 x 150 mm do fabricante Sandvik Coromant (ver figura 45).



Figura 45 - Fotografia do conjunto cone ISO, barra de mandrilar, suporte de ferramenta e inserto de metal duro utilizado na usinagem da superfície de níquel.

A ferramenta de corte utilizada na usinagem da superfície de níquel é o inserto de metal duro classe ISO P15 recoberto por nitreto de titânio, óxido de alumínio e carbonitreto de titânio (TiN + Al₂O₃ + Ti(CN)). O formato é o triangular com fixação por grampo de topo. O modelo utilizado foi o TPMR 160308 4025 do fabricante Sandvik Coromant (ver figura 46 [a]).

Para a usinagem da superfície de cobre é utilizado o inserto de metal duro classe ISO K10, sem cobertura, com quebra cavaco para usinagem de alumínio - maior ângulo de saída (SAHOO; KUYUCAK, 1996) - facilitando a quebra do cavaco, uma vez que o cobre apresenta alta ductilidade e necessita de uma ferramenta positiva. O formato e sistema de fixação são os mesmos da ferramenta utilizada na usinagem

da superfície de níquel. O modelo utilizado foi o TCGX 16T308 AS IC20 do fabricante Sandvik Coromant (ver figura 46 [b]).

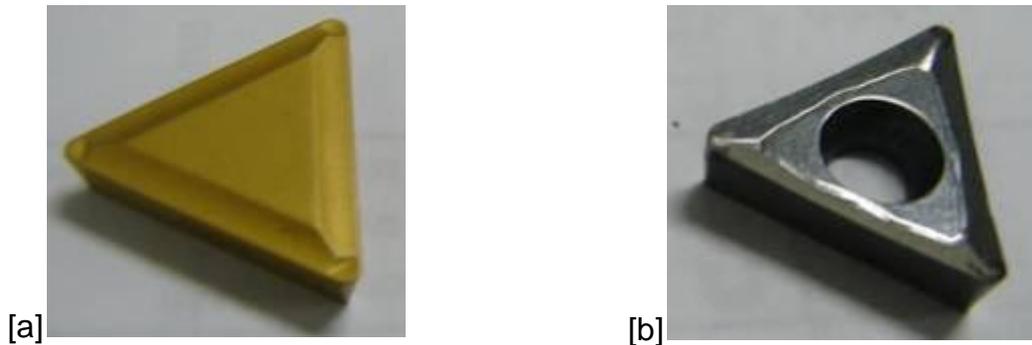


Figura 46 - Fotografias dos insertos de metal duro utilizados no fresamento (sem aumento): [a] inserto utilizado para usinagem da superfície de níquel; [b] inserto utilizado para usinagem da superfície de cobre.

Os fluidos e suas condições de aplicação são as mesmas apresentadas na operação de aplainamento, citada anteriormente neste subitem.

A operação de mandrilhamento de acabamento é seguida da outra operação de acabamento, o lixamento manual com lixadeira do tipo orbital pneumática (figura 47) e características descritas no quadro 9.

A lixa utilizada no acabamento manual é a lixa do fabricante Norton modelo K246, formato de folha, tipo lixa ferro (óxido de alumínio), costado de pano, adesivo resina e cola, granulometria 150. As dimensões da folha são 275 mm de comprimento e 225 mm de largura.



Figura 47 - Fotografia da lixadeira orbital utilizada no acabamento manual da placa do molde da máquina de lingotamento 2.

Quadro 9 - Características da lixadeira orbital.

Lixadeira orbital			
Fabricante	Reitz	Dimensões	Lixa: 90x230 mm Base: 90x180 mm
Modelo	LOR 80/90180	Peso	1,6 kg
Rotação	8.000 rpm	Acionamento	alavanca
Vazão de ar requerida	0,31 m ³ /min	Pressão de ar	7,0 kgf/cm ²

3.2.3 Máquinas e Equipamentos Aplicados à Retificação (processo alternativo proposto)

A máquina operatriz utilizada nos testes de retificação propostos foi uma retificadora plana tangencial (figura 48) com as características descritas no quadro 10.

Quadro 10 - Características da retificadora.

Retificadora plana tangencial			
Fabricante	Zema	Velocidade da mesa	1 – 25 m/min
Modelo	RT-3.000	Rotação do rebolo	1.150 rpm
Comprimento retificável	3.000 mm	Avanço vertical	0,005 – 0,05 mm
Largura retificável	750 mm	Motor do rebolo	20 CV
Altura retificável	1.000 mm	Bomba de refrigeração	Vazão: 32 l/min
Potência	0,25 CV		

A retificadora em questão possui sistema de fixação de peças por meio de mesa magnética, porém as amostras são de cobre eletrolítico (não ferromagnética), o que implicou no desenvolvimento do suporte mostrado nas figuras 37 e 38.

O rebolo utilizado nos testes foi o modelo 37C46NVK, do fabricante Norton, que utiliza abrasivo carboneto de silício cinza, grão de granulometria 46/ 0,55 mm (média), grau de dureza N (média), aglomerante vitrificado (V), de diâmetro 500 mm e espessura 100 mm. Este rebolo foi utilizado por já estar disponível e ser indicado para retificação de materiais não ferrosos (não demandou investimento).



Figura 48 - Fotografia da retificadora utilizada nos testes.

O fluido de corte aplicado foi o do tipo óleo solúvel sintético, modelo Mecafluid S7 Eco, do fabricante Tutela, na concentração de 6% em volume, o que demonstra coerência com as sugestões de Machado e Silva (2003) citadas no item 2.2.10. O fluido foi aplicado continuamente por meio do sistema de bombeamento original da retificadora a uma vazão de 32 l/min dispensada por quatro bocais tipo fixoflex de dimensões 24 x 1 mm (ver figura 49). Essas condições são as condições originais da máquina e qualquer elevação da pressão e/ou vazão de fluido implicaria em substituição parcial ou total do sistema de bombeamento e proteções, o que não foi realizado.



Figura 49 - Fotografia dos bocais de aplicação de fluido de corte.

Foi utilizado o dressador original da máquina do tipo bastão incrustado de diamantes (ver figura 50).



Figura 50 - Fotografia do dressador.

3.2.4 Instrumentos de Medição

Nos testes do processo de recuperação das placas de cobre por meio da retificação e análise dos processos atuais foram utilizados um durômetro e um rugosímetro.

O durômetro utilizado foi o modelo portátil digital Equotip 2000, do fabricante Proceq (ver figura 51).



Figura 51 - Fotografia do durômetro utilizado.

O rugosímetro utilizado foi o modelo portátil SurfTest SJ201P do fabricante Mitutoyo (ver figura 52).



Figura 52 - Fotografia do rugosímetro utilizado.

3.2.5 Outros Instrumentos

Além dos instrumentos mencionados foram utilizados o microscópio digital por varredura eletrônica (MEV), para análise dos cavacos gerados, e o analisador topográfico tridimensional para verificação da rugosidade das réplicas.

3.3 METODOLOGIA

Para verificação dos processos atuais, aplainamento e fresamento/mandrilamento, foram acompanhados em campo os serviços realizados pela oficina central da ArcelorMittal Tubarão e tabuladas todas as características, parâmetros de usinagem, máquinas, ferramentas e tempos consumidos (ver figura 53). Para os testes de retificação foram preparados corpos de prova/amostras reduzidos, a partir de duas placas em final de vida útil, e planejados procedimentos de usinagem exclusivos para observação do comportamento do material de acordo com a variação dos parâmetros de corte na operação de retificação, ou seja, a influência dos parâmetros de corte, variáveis na retificadora disponível, na rugosidade superficial da placa (ver item 3.1.2).

Foram preparadas 11 amostras a partir das duas placas de molde da máquina de lingotamento contínuo nº 2, ou seja, de perfil retangular e face plana (ver figuras 35 e 36), pois a retificadora disponibilizada é do tipo plana e não possui sistema de

compensação para retificação de raios nem controlador por comando numérico (CNC). Foi considerada a premissa de que o perfil transversal da placa de cobre não influenciaria significativamente o acabamento final nem o tempo total de usinagem caso a retificadora fosse dotada de recursos para retificação de superfícies côncavas ou convexas, como a da placa de molde da MLC1.

Os parâmetros de usinagem adotados nos processos atuais e proposto, aplicados à recuperação das placas de molde das máquinas de lingotamento contínuo da ArcelorMittal Tubarão, objeto deste estudo, estão apresentados na figura 54, a qual também apresenta as etapas destes processos.

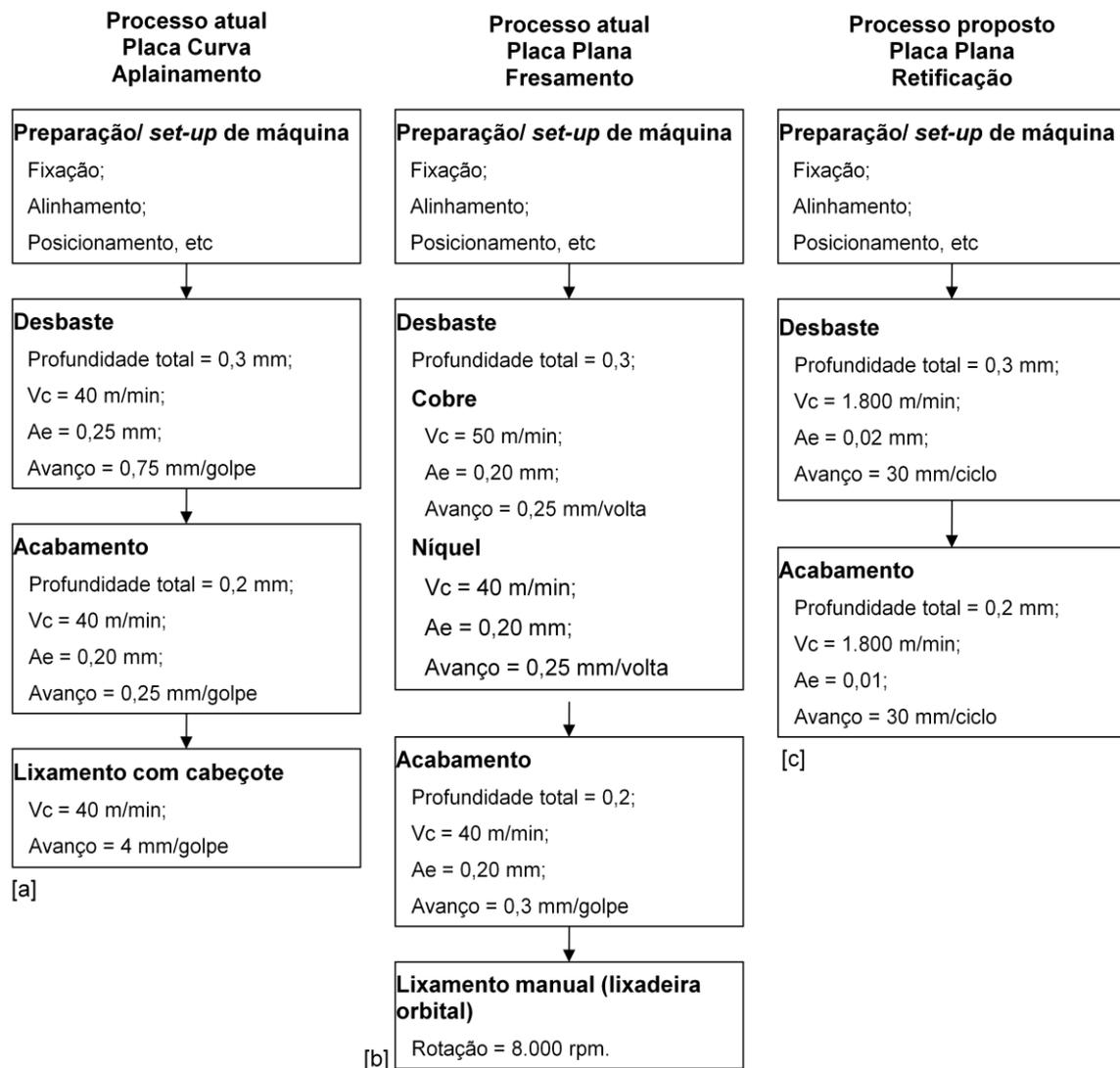


Figura 53 - Fluxograma esquemático dos processos atuais e proposto; [a] processo atual de aplainamento aplicado à placa de perfil curvo, [b] processo atual de fresamento/mandrilhamento aplicado à placa plana e [c] processo proposto de retificação a ser testado na placa da MLC 2.

Os testes foram planejados sempre objetivando a obtenção da melhor qualidade superficial nas faces das placas, bem como o aumento de produtividade, comparando-se o processo de retificação proposto e os processos atuais, ou seja, uma rugosidade inferior à obtida nos processos atuais e uma redução no tempo total de usinagem de recuperação das placas.

A escolha da variação dos parâmetros de penetração de trabalho (a_e) e velocidade de avanço da mesa (V_f) no processo de retificação proposto foi definida pelos recursos disponíveis na máquina e ambiente de teste. Outras variações de V_f , rotação do rebolo, substituição de rebolo ou especificação, pressão e vazão de fluido de corte implicaria em investimentos significativos não disponíveis. A variação de a_e em 0,01 mm foi definida a partir das profundidades de corte geralmente aplicadas aos processos de retificação de outras peças na retificadora em questão.

Para os testes de retificação, foram planejadas 11 condições distintas onde as velocidades de avanço da mesa (V_f) puderam ser testadas com penetrações de trabalho (a_e) de 0,01 mm e 0,02 mm. Para cada uma das penetrações de trabalho foram executados 5 testes, variando-se V_f . As velocidades utilizadas foram 5, 10, 15, 20 e 25 m/min. Após estes testes optou-se por executar um ensaio extra (11ª condição) em duas etapas: desbaste com $a_e = 0,02$ mm e $V_f = 25$ m/min e acabamento à $a_e = 0,01$ mm e $V_f = 20$ m/min. Os parâmetros usados para a operação de desbaste foram definidos a partir da premissa de aumento de produtividade (maior penetração de trabalho e velocidade de avanço) e os parâmetros para o acabamento foram definidos a partir das condições que apresentaram a melhor qualidade superficial nos testes executados anteriormente. Para todos os testes realizados, considerou-se a referência de profundidade total de corte de 0,5 mm, conforme descrito na figura 53. O procedimento de dressagem do rebolo foi feito com avanço de 0,05 m/min e profundidade total de 0,02 mm, em consonância com a maior penetração de trabalho utilizada nos testes de retificação.

Antes da preparação das amostras para o processo de retificação, foram medidas a dureza e a rugosidade em uma das duas placas que foram cortadas que deram origem às amostras. Por semelhança foi considerado que os valores de dureza e rugosidade das duas placas não apresentam variações significativas (as placas são

idênticas). Após os testes de retificação a dureza e a rugosidade foram medidas novamente. Também foi medida a rugosidade nas placas observadas nos processos atuais de recuperação, fresamento/mandrilhamento e aplainamento.

Para a medição da dureza, foi definida uma amostragem aleatória de 5 pontos. Para a medição da rugosidade nas placas antes dos testes de retificação foi utilizada uma amostragem aleatória de 10 pontos com *cut off* de 2,5 mm, valor máximo oferecido pelo rugosímetro e de acordo com o *cut off* mínimo definido no item 2.3.4 deste estudo para a faixa de rugosidade em questão. Para a medição da rugosidade nas amostras a amostragem aleatória foi reduzida para 5 pontos (devido às dimensões das amostras) e o *cut off* reduzido para 0,8 mm, também de acordo com as definições do item 2.3.4.

Para melhor caracterização dos resultados foi prevista a análise topográfica tridimensional de 3 réplicas retiradas da amostra retificada que apresentou a menor rugosidade (ver figura 54). As réplicas foram retiradas próximo às duas bordas longitudinais e na região central. As réplicas são retangulares e de dimensões 50 x 70 mm e a análise topográfica foi feita no laboratório da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

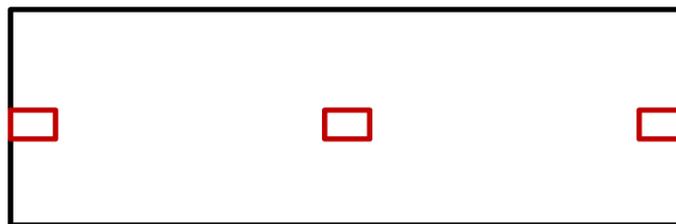


Figura 54 - Esquemático da posição das réplicas retiradas da amostra.

Os cavacos gerados nos testes de retificação com $a_e = 0,01$ e $0,02$ mm foram recolhidos e segregados para análise em microscópio digital por varredura eletrônica do laboratório da UFES. A coleta foi feita diretamente na entrada do filtro da retífica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados e as discussões propostas para este estudo podem ser caracterizados pela análise da dureza e da rugosidade das amostras, das condições do rebolo, da morfologia dos cavacos e da produtividade dos processos. A análise da morfologia dos cavacos foi feita apenas no processo de retificação para investigação das possíveis anomalias, como possibilidade de fusão de material da peça, contaminação por outros metais, irregularidades geométricas, etc.

4.1 DUREZA DAS AMOSTRAS

Analisando-se os resultados de dureza antes e após os testes, pôde-se verificar que o processo de retificação não gerou tensões significativas suficientes para alterar os valores iniciais (ver tabela 1). Apesar de se ter conhecimento da aplicabilidade técnica e científica do método Vickers e das restrições do método Brinell de medição de dureza, esta escala foi utilizada em função da habitualidade prática na oficina onde os testes foram realizados.

Tabela 1 - Resultado da medição de dureza nas amostras antes e após os testes de retificação.

Dureza HB			
Antes		Depois	
121		122	
118		120	
113		116	
120		117	
114		119	
Média	117	Média	119
Desvio Padrão	3,7	Desvio Padrão	2,5

O fato de não haver variação significativa da dureza das amostras pode indicar a manutenção da usinabilidade, em termos da força de corte, do material no decorrer dos testes, porém não foi possível medir a força de corte neste estudo. Além da

usinabilidade, cabe observar que a manutenção da dureza sugere que a temperatura no processo não foi excessiva, do contrário ocorreriam tensões residuais causadas pelo resfriamento rápido da região de corte. É importante lembrar que, principalmente no caso de materiais dúcteis, a tensão de cisalhamento máxima ocorre abaixo da superfície (MARINESCU et al., 2004).

Apesar de não ter sido feita medição das forças de corte, não foi observada variação significativa na corrente elétrica do motor principal da retífica em nenhuma das condições de testes, o que leva à conclusão de que as forças de corte não variaram significativamente para as diversas condições de teste. Adicionalmente pôde-se observar que, em todas as condições de teste, não foi evidenciada vibração excessiva da máquina em nível de percepção ao tato nem por emissão acústica anormal.

Segundo Marinescu et al. (2004) o desgaste por microfratura de grãos do rebolo pode provocar o aumento do espaçamento entre os mesmos o que implica na elevação da rugosidade, porém este comportamento não pôde ser observado uma vez que as forças de corte não variaram significativamente a ponto de causar tal nível de fratura.

4.2 RUGOSIDADE

4.2.1 Rugosidade das Amostras

A rugosidade medida nas amostras antes dos testes apresentou um valor médio (10 pontos aleatórios) de 2,43 Ra(μm) e desvio padrão de 0,52. O desvio padrão apresentou-se ligeiramente elevado devido às irregularidades nas faces das amostras (ver tabela 2), causadas pelo processo de lingotamento contínuo.

Tabela 2 - Resultado da medição de rugosidade das amostras antes dos testes.

Rugosidade das amostras			
Pontos	Ra (μm)	Pontos	Ra (μm)
1	1,93	6	2,96
2	2,10	7	2,88

Rugosidade das amostras			
Pontos	Ra (μm)	Pontos	Ra (μm)
3	1,92	8	3,03
4	1,89	9	2,82
5	1,87	10	2,94
Desvio padrão		0,52	
Média geral		2,43	

Observou-se nos testes com avanço vertical (penetração de trabalho - a_e) de 0,02 mm um patamar de rugosidade superior (1 a 1,35 Ra) ao observado nos testes com a_e de 0,01 mm (0,8 a 0,85 Ra), ver figuras 55 e 56.

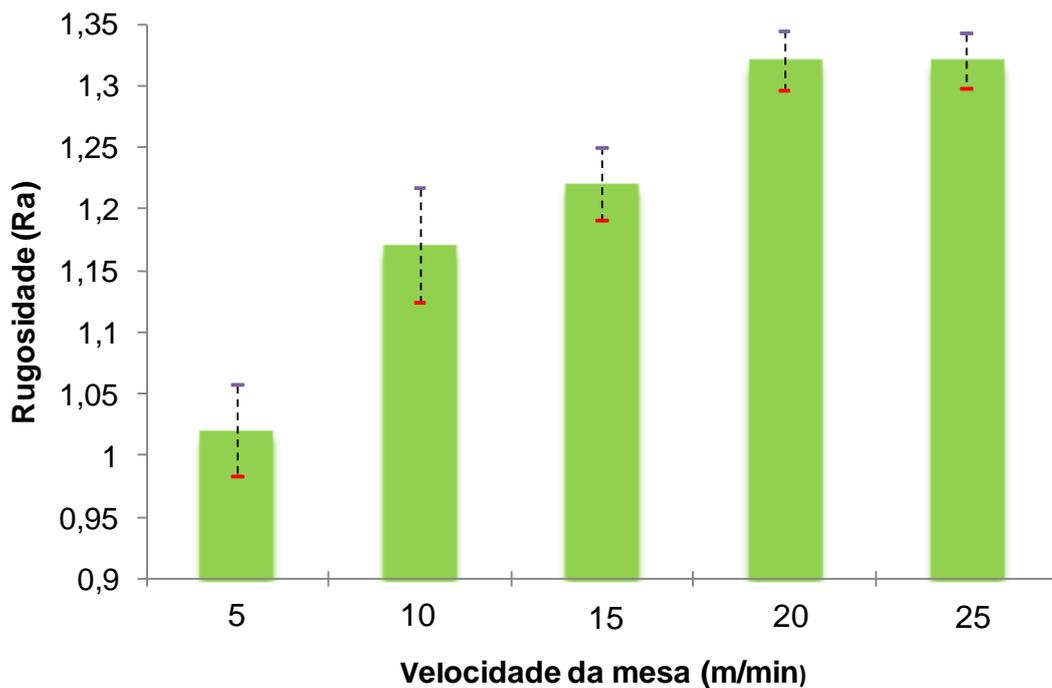


Figura 55 - Rugosidade das amostras de acordo com a velocidade de avanço da mesa – penetração de trabalho ($a_e = 0,02\text{mm}$).

O gráfico acima mostra que, para a penetração de trabalho 0,02 mm, a rugosidade apresentou uma tendência de crescimento à medida que se elevou a velocidade de avanço da mesa, ainda considerando-se que o desvio padrão não foi elevado. Apesar desta tendência a referência bibliográfica deste estudo não indicou relações

entre V_f e a rugosidade obtida em processos de retificação e, além disso, esta variação tem baixa influência na velocidade de corte final do rebolo.

Cabe acrescentar que, normalmente, para operações de acabamento e obtenção de melhor qualidade superficial são utilizadas velocidades de avanço da mesa inferiores, o que poderia explicar a tendência de redução de rugosidade a velocidades inferiores.

De acordo com Marinescu et al. (2004) a penetração de trabalho pode afetar a rugosidade, porém indiretamente. Em profundidades elevadas pode ocorrer o arrancamento de grãos do rebolo, provocando o aumento do espaçamento entre eles e conseqüentemente implicando em elevações na rugosidade. Apesar das considerações supracitadas não foi observado nenhum sintoma durante os testes que pudesse ser interpretado como arrancamento excessivo de grãos nas duas condições de penetração de trabalho.

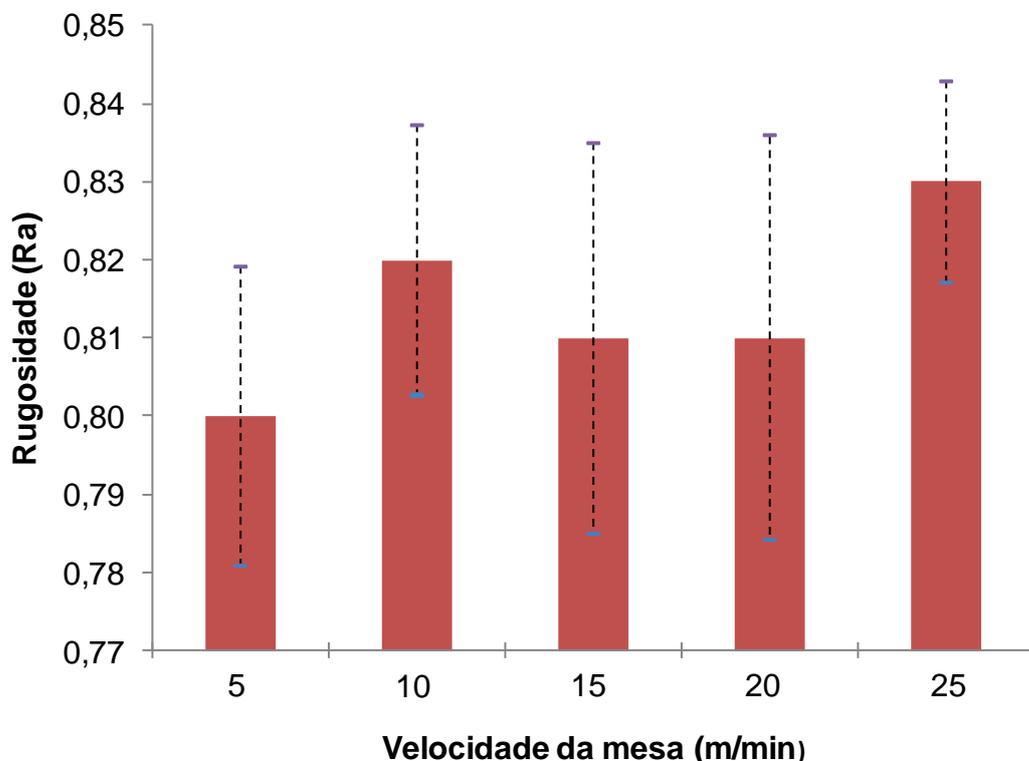


Figura 56 - Rugosidade das amostras de acordo com a velocidade de avanço da mesa – penetração de trabalho ($a_e = 0,01\text{mm}$).

O gráfico acima mostra que, à penetração de trabalho 0,01 mm, a rugosidade apresentou comportamento regular à medida que se elevou a velocidade de avanço da mesa, mantendo valores muito semelhantes em todas as velocidades de avanço da mesa testadas. Ainda, considerando-se o desvio padrão, pode-se deduzir que a rugosidade variou muito pouco em relação à V_f evidenciando alinhamento com a argumentação de que a velocidade de avanço da mesa apresenta pouca influência sobre a rugosidade nos testes realizados, cabendo à penetração de trabalho o papel de afetar mais significativamente os valores de rugosidade obtidos.

Tabela 3 - Melhores resultados de rugosidades obtidas nos testes.

Penetração de trabalho a_e (mm)	Rugosidade (Ra)	Desvio padrão (Ra)	Velocidade da mesa - V_f (m/min)
0,01	0,80	0,02	5
0,02	1,02	0,03	5

Os menores valores de rugosidade (0,80 e 1,02 Ra), nas duas condições de penetração de trabalho, foram obtidos com velocidades de avanço da mesa de 5 m/min (ver tabela 3), porém a rugosidade obtida na condição de $a_e = 0,01$ mm com velocidades de avanço da mesa de 15 e 20 m/min (0,81 Ra), ver figura 56, pode ser considerada ainda mais satisfatória se considerado o desvio padrão, pois a diferença de rugosidade apresentada é muito pequena se comparada ao ganho de produtividade proporcionado.

Nos testes executados com penetração de trabalho de 0,02 mm, além do patamar de rugosidade superior foi observada a formação de sulcos e texturas (anomalias) nas amostras quando retificadas em velocidades da mesa superiores a 15 m/min (ver figuras 57 e 58). Pode-se associar o surgimento das anomalias superficiais ao acúmulo de material das amostras (cobre) no rebolo (KUYUCAK; SAHOOO, 1996), fenômeno conhecido como empastamento que será mais bem detalhado no item 4.3 deste capítulo.

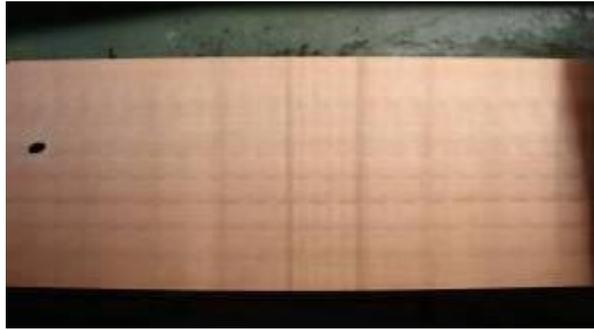


Figura 57 - Fotografia da amostra texturizada sem aumento ($a_e = 0,02$ mm e V_f 25 m/min).



Figura 58 - Fotografia da amostra com presença de sulcos sem aumento ($a_e = 0,02$ mm e $V_f = 20$ m/min).

Foi observado que as anomalias se agravaram a partir de certa distância da borda esquerda das amostras – ponto inicial de retificação - o que pode indicar a tendência do empastamento, uma vez que a retificação foi iniciada com rebolo dressado.

A tendência de elevação da rugosidade e as anomalias observadas nos testes com penetração de trabalho de 0,02 mm não foram evidenciadas nos testes com 0,01 mm, nem mesmo quando realizadas com velocidade de avanço da mesa superiores a 15 m/min (ver figura 59). Neste segundo caso foi observado um comportamento mais adequado do material sem presença de sulcos ou texturas relevantes. Tanto para velocidades de avanço da mesa altas (> 15 m/min) quanto para as mais baixas (< 10 m/min) foram medidos valores de rugosidade bem mais baixos do que nos testes com penetração de 0,02 mm (ver figura 59 e 60).

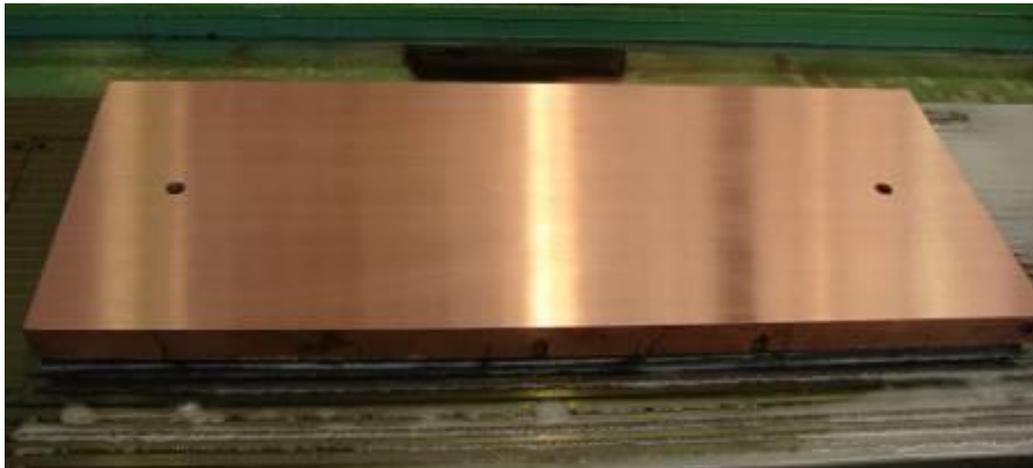


Figura 59 - Fotografia da amostra sem imperfeições sem aumento ($a_e = 0,01$ mm e $V_f = 25$ m/min).

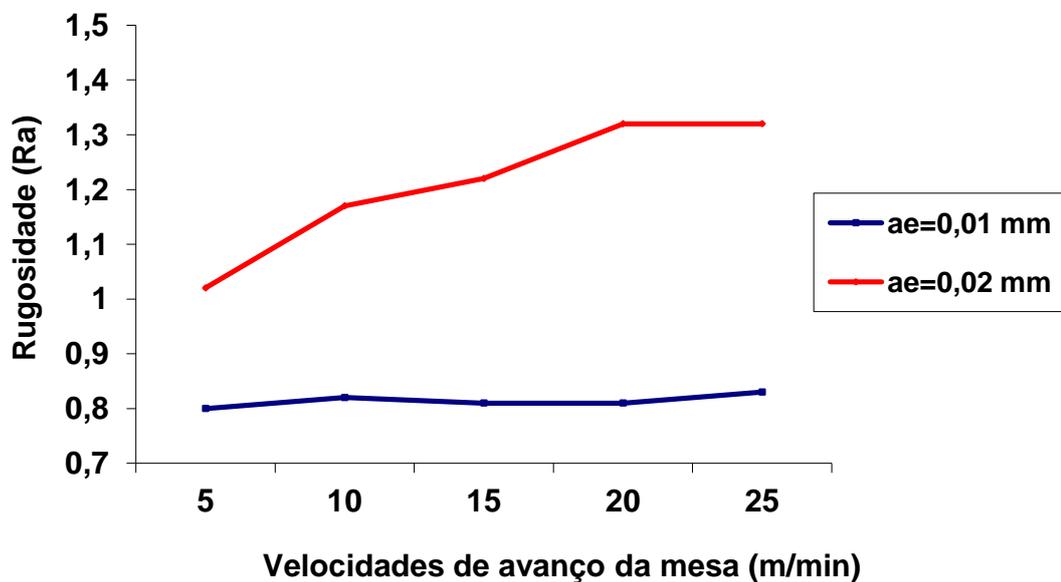


Figura 60 - Variação da rugosidade das amostras retificadas em função da velocidade de avanço da mesa.

Comparando-se as curvas de rugosidade em função de V_f (ver figura 60), para cada condição de penetração de trabalho, pode-se constatar que os valores de rugosidade obtidos nos testes com penetração de trabalho 0,02 mm são claramente mais elevados do que os obtidos à 0,01 mm. A variação da rugosidade em função de V_f (inclinação da reta) para a condição de retificação com $a_e = 0,02$ mm também foi superior aos testes com $a_e = 0,01$ mm demonstrando, a primeira, uma tendência de elevação e, a segunda, variação aparentemente desprezível.

A fim de elevar a produtividade do processo foi executado mais um ensaio utilizando-se das principais vantagens de cada condição: o tempo reduzido de processo com $a_e = 0,02$ mm e a qualidade superficial superior obtida com $a_e = 0,01$ mm. Definiu-se então a remoção dos primeiros 0,30 mm em operação de desbaste com $a_e = 0,02$ mm e $V_f = 25$ m/min e os 0,20 mm restantes em operação de acabamento com $a_e = 0,01$ mm e $V_f = 20$ m/min. O rebolo foi dressado após a fase de desbaste para garantia da manutenção das características originais do rebolo e minimização do empastamento.

O resultado do ensaio extra foi bastante satisfatório, pois apresentou uma rugosidade final de 0,81 Ra e uma redução significativa no tempo de usinagem, detalhado no item 4.5 deste capítulo. A diferença entre o valor de rugosidade obtido no teste extra e na condição de penetração de trabalho de 0,01 mm é muito pequena (o desvio padrão foi de 0,02 Ra) e foi considerada desprezível (ver tabela 4).

Tabela 4 - Média das rugosidades obtidas nos testes com $a_e = 0,01$ e 0,02 mm e ensaio extra.

Penetração de trabalho - a_e (mm)	Rugosidade média (Ra)	Desvio padrão - σ (Ra)
0,01	0,80	0,02
0,02	1,02	0,03
0,02/0,01^(*)	0,81	0,02

*Ensaio extra (desbaste/acabamento)

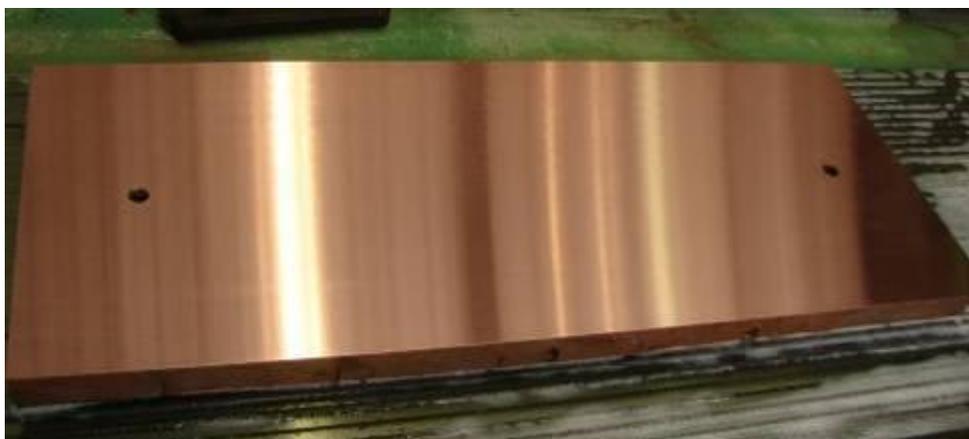


Figura 61 - Fotografia da amostra após ensaio extra sem aumento (desbaste: $a_e = 0,02$ mm e $V_f = 25$ m/min; acabamento: $a_e = 0,01$ mm e $V_f = 20$ m/min).

A superfície obtida na retificação em condição extra de teste apresentou-se altamente lisa ao tato, com aspecto espelhado e excelente aparência (ver figura 61). O aspecto visual da amostra do ensaio extra foi muito semelhante ao obtido na retificação com $a_e = 0,01$ mm (figura 59).

Após a retificação da amostra da placa na condição extra de teste foram retiradas 3 réplicas, conforme descrito no item 3.3, para análise topográfica tridimensional. O contato foi feito em uma área de 2 x 2 mm, com 4.000 pontos e 200 traços. Para cada uma das amostras foram feitas duas medições de rugosidade totalizando 6 análises topográficas. Aqui cabe ressaltar que o parâmetro utilizado o S_a , que leva em consideração a área mencionada.

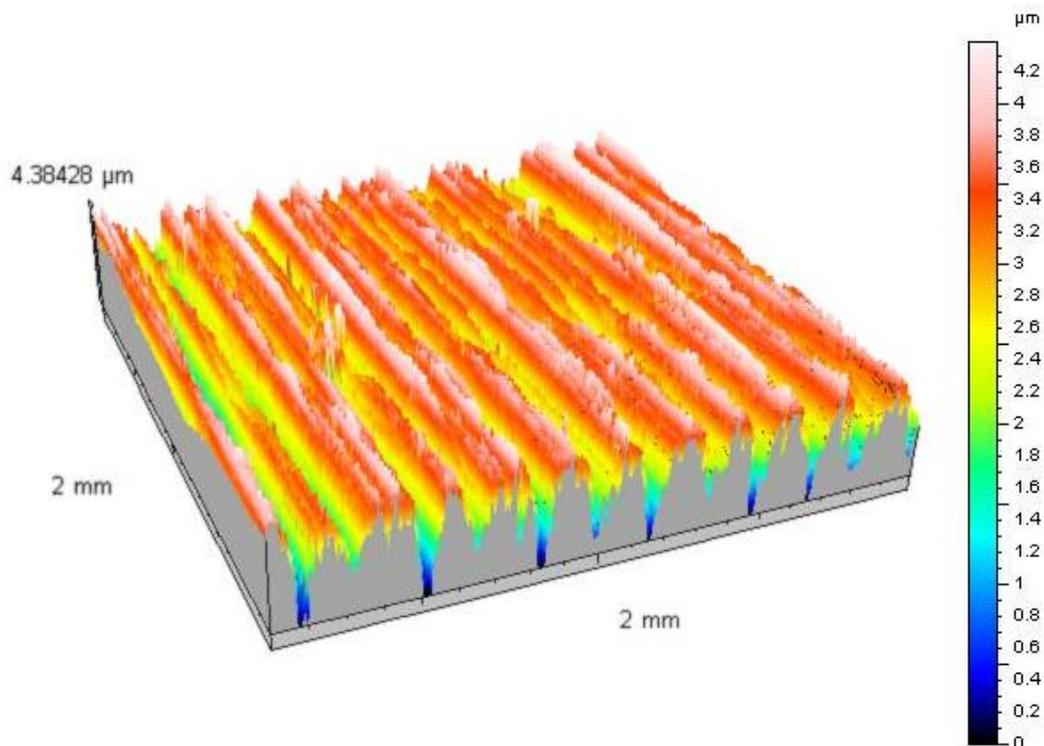


Figura 62 - Análise topográfica tridimensional da réplica (conforme item 3.2) retirada na região central da peça (condição extra de teste – $S_a = 0,74$ μm e $\sigma = 0,05$).

Pode-se observar a partir da figura 62 que o sentido do fluxo de corte, ou seja, a direção de avanço e da rotação do rebolo determina um alinhamento de picos e vales na amostra retificada. Este alinhamento, quando considerado na placa de cobre como um todo, pode se alinhar também à direção do escoamento do aço em solidificação no molde da máquina de lingotamento contínuo. É sabido, porém não explorado neste estudo, que o alinhamento entre o sentido de usinagem e o de

escoamento do aço pode trazer benefícios ao controle térmico do molde e eventualmente à vida útil da placa (SPINELLI et al., 2004).

Tabela 5 - Análise das rugosidades por topografia tridimensional.

Descrição da amostra*	Rugosidade média (Sa)
Réplica retirada à esquerda	0,72
Réplica retirada na região central	0,74
Réplica retirada à direita	0,87
Desvio padrão - σ	0,08
Média	0,77

*Condição extra de teste (desbaste + acabamento)

As análises das três réplicas (tabela 5) apresentaram diferenças em relação à rugosidade medida anteriormente com rugosímetro convencional (0,81 μm – tabela 4). Esta diferença, 0,04 μm , pode estar relacionada à oxidação das réplicas, pois as análises topográficas tridimensionais foram realizadas cerca de 3 meses após a usinagem e medições da amostra mãe (figura 61). Além do aspecto mencionado, merece destaque a diferença entre os parâmetros de rugosidade Sa e Ra que consideram a área e a linha analisada, respectivamente.

Finalmente, cabe observar que o rebolo utilizado, 37C46NVK, tem granulometria e dureza média, além de sua especificação não detalhar o tipo de estrutura especificado (ver figura 9). Estas características influenciam a rugosidade final da peça retificada, portanto a utilização de um rebolo com menor granulometria, dureza inferior (que permite maior renovação dos grãos) e estrutura mais fechada, poderia proporcionar um acabamento superior, porém sob risco de prolongamento do tempo de usinagem.

4.2.2 Rugosidade das Placas Fresadas e Aplainadas

Foi realizada a medição da rugosidade de duas placas em recuperação na Oficina Mecânica Central da ArcelorMittal Tubarão (ver tabela 6). Os processos de usinagem aplicados foram fresamento seguido de lixamento manual e aplainamento

seguido de lixamento mecânico. Apenas como comparativo entre os resultados dos processos atuais e o alternativo proposto foi acrescentada uma coluna à tabela 6.

Tabela 6 - Condições de rugosidade das placas de cobre usinadas por fresamento e aplainamento.

Rugosidade média Ra (μm)				
Fresamento		Aplainamento		Retificação
Antes	Depois	Antes	Depois	Depois
2,43	0,85	2,61	0,78	0,81
$\sigma = 0,52$	$\sigma = 0,07$	$\sigma = 0,57$	$\sigma = 0,04$	$\sigma = 0,02$

As condições de rugosidade das placas antes dos processos de usinagem dependem das condições de processo nas quais foram expostas e retiradas, conseqüentemente, podem variar significativamente de uma placa para outra e entre uma e outra recuperação por usinagem. A variabilidade das condições de rugosidade encontradas na placas de cobre antes de sua recuperação pode ser confirmada pelo elevado desvio padrão antes da usinagem (ver tabela 6).

A rugosidade final apresentada na placa usinada por fresamento é superior à do aplainamento, pois seu acabamento é realizado com lixadeira pneumática manual e, no caso do aplainamento, realizado com dispositivo lixador mecânico montado no torpedo da plaina, garantindo um avanço transversal e longitudinal contínuo e, conseqüentemente, uma superfície mais lisa. Ainda sobre o processo de fresamento, pode-se associar a causa da elevação do desvio padrão da rugosidade após usinagem, em comparação com os demais processos, ao processo de acabamento manual.

Em geral pode-se concluir que os três processos (fresamento, aplainamento e retificação) apresentam resultados satisfatórios em termos de acabamento superficial uma vez que a rugosidade exigida no projeto das placas é 0,8 Ra, porém segundo SPINELLI et al. (2004), uma vez que a rugosidade tem influência no controle térmico do molde das máquinas de lingotamento contínuo, o processo que proporciona a menor rugosidade é o mais desejável, portanto, dentre os estudados, o aplainamento sobressai-se. Por outro lado, a viabilidade técnico/econômica nos

indica o processo de retificação como o mais interessante do ponto de vista do tempo de usinagem/produzividade.

Conforme descrito ao final do subitem 2.1.3, a operação de usinagem aplicada às placas do molde da máquina de lingotamento contínuo 02 (placas planas) é realizada por meio da utilização de uma barra de mandrilhar dotada de inserto de metal duro e corte por aresta única ao invés de uma fresa com múltiplas arestas cortantes. O levantamento de campo revelou que a opção adotada justificou-se pelo maior controle de cavacos que este tipo de ferramenta proporciona em relação à multi-aresta. Segundo informação da supervisão de ferramentaria da Oficina Mecânica Central da ArcelorMittal Tubarão testes anteriores revelaram que os cavacos gerados no corte com fresas enfrentavam restrições na região de saída da ferramenta e provocavam arranhões na área usinada. Tal característica de corte e as limitações para refrigeração em alta pressão da Mandriladora utilizada os levaram a utilizar a ferramenta monocortante. A justificativa informada pela ArcelorMittal Tubarão se confirmou no estudo bibliográfico a respeito da aplicabilidade das ferramentas de mandrilhamento, detalhado ao final do subitem 2.1.4 deste documento.

4.3 EMPASTAMENTO DO REBOLO

Para as condições de corte adotadas foram observadas situações distintas de tendência de aderência de material das amostras no rebole (empastamento). O empastamento pode estar relacionado diretamente às características metalúrgicas e mecânicas do cobre eletrolítico das amostras. Devido à alta ductilidade, o material tende a aderir aos grãos do rebole, enquanto o cavaco flui continuamente sobre o material aderido. À medida que o volume de material aderido aumenta o ângulo de saída da ferramenta e o ângulo de cisalhamento também aumentam, podendo causar redução das forças de corte e encruamentos de material, sobre o qual o material da peça escoar. A primeira camada de material que se une à ferramenta, através de ligações atômicas, é encruado, aumentando o limite de escoamento, e as tensões de cisalhamento são insuficientes para quebrar essas ligações. As deformações plásticas provocadas pelo movimento do cavaco continuam nas

camadas mais afastadas da interface até que elas são suficientemente encruadas. Esse processo é repetitivo e a sucessão de camadas formadas é denominada aresta postiça de corte (APC). A APC cresce, se rompe e o material encruado, agora solto, flui entre a superfície da peça e a superfície de folga da ferramenta provocando anomalias na superfície usinada como citado em algumas condições nos testes de retífica (KUYUCAK; SAHOOO, 1996; MACHADO; SILVA, 2003).

Nos testes realizados com $a_e = 0,02$ mm foi verificada uma tendência significativa de empastamento. Foi evidenciada uma aderência significativa de material no rebolo (ver figura 63) e anomalias na superfície da amostra (figura 57 e 58). Conseqüentemente, os valores de rugosidade medidos foram bastante elevados (valores de rugosidade e fotografias das amostras detalhadas no item 4.2 deste capítulo).



Figura 63 - Fotografia do rebolo com evidências de empastamento ($a_e = 0,02$ mm).

O fenômeno do empastamento do rebolo tende a ocorrer em velocidades de corte muito baixas, quando há má renovação da face de corte, arredondamento das arestas cortantes ou adoção de rebolo com dureza acima do necessário (INFORMATIVO..., 2003). É possível que o empastamento possa ter sido acentuado pela dureza do rebolo relativamente alta para a retificação de peças de cobre (dureza classe N – média). Outra hipótese é o tipo de estrutura do rebolo utilizado nos testes: indefinida na especificação do modelo. O ideal é que a estrutura fosse do

tipo fechada, reduzindo-se a possibilidade de acúmulo de material da amostra nos poros do rebolo. Ainda segundo Marinescu et al. (2004) alguns grãos são projetados para se desgastar por microfratura causando a reafiação contínua com uma baixa taxa de desgaste, porém este fenômeno não foi caracterizado nitidamente nos testes.

Cabe destacar que as operações de dressagem durante todos os testes foram feitas com os mesmos parâmetros (avanço de 0,05 m/min e penetração de trabalho de 0,01 mm e profundidade total de 0,02 mm). O perfil topográfico da dressagem é o perfil plano, adequado à superfície das amostras. É possível que os poros do rebolo possuam profundidade superior à 0,02 mm, o que proporcionaria um possível acúmulo de material da amostra mesmo após a dressagem. Apesar dessa possibilidade, este fenômeno não foi identificado visualmente.

Nos testes realizados com avanço vertical de 0,01 mm não foi verificada a ocorrência nítida do empastamento apesar de ser visível a presença de material das amostras nos poros do rebolo. Para os testes executados nestas condições não ocorreram anomalias nas superfícies das amostras (ver figura 64).

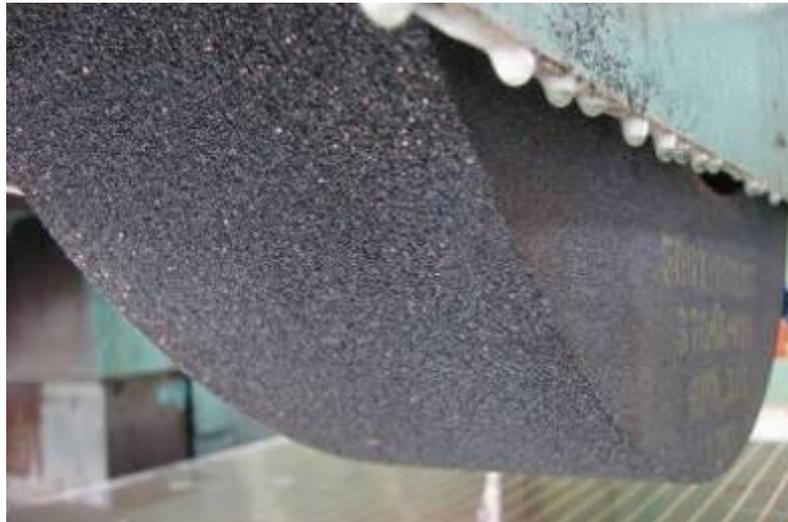


Figura 64 - Fotografia do rebolo sem evidências de empastamento ($a_e = 0,01$ mm).

4.4 MORFOLOGIA DOS CAVACOS

4.4.1 Cavacos da retificação com $a_e = 0,01$ mm

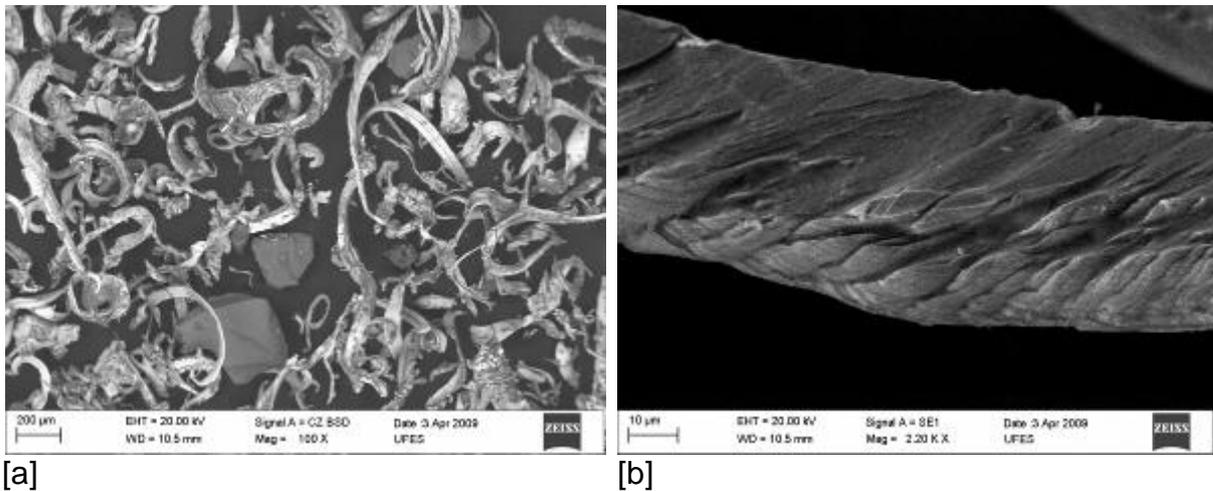


Figura 65 - [a] Fotografia do cavaco gerado pela retificação das amostras com aumento de 200X e [b] com aumento de 2.200X ($a_e = 0,01$ mm).

Na figura 65 é possível observar o formato típico dos cavacos da retificação com $a_e = 0,01$ mm. Os cavacos se apresentam contínuos, característicos dos materiais dúcteis como o cobre. Apesar da degradação provocada pela oxidação ao longo do tempo, entre a coleta e a análise, ainda é perceptível o formato alongado e contínuo dos cavacos [a]. O detalhe [b] da figura 65 mostra a formação cíclica das lamelas de cavaco sem anomalias aparentes.

4.4.2 Cavacos da retificação com $a_e = 0,02$ mm

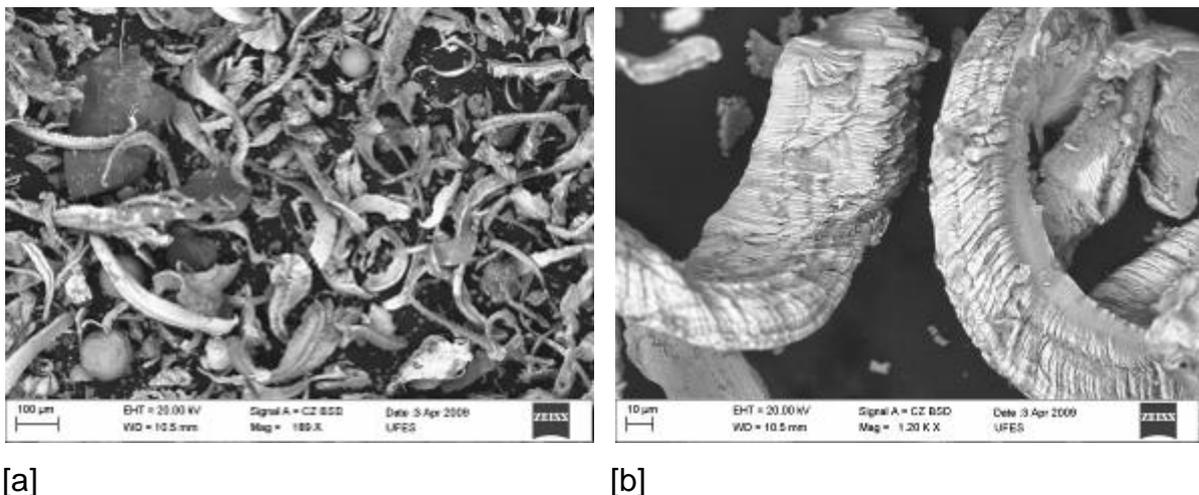


Figura 66 - [a] Fotografia do cavaco gerado pela retificação das amostras com aumento de 189X e [b] com aumento de 1.200X ($a_e = 0,02$ mm).

Assim como os cavacos gerados nos testes com $a_e = 0,01$ mm os cavacos apresentados na figura 66 também mantêm o formato alongado, típico da usinagem de metais dúcteis. Pode-se observar a presença de corpos esféricos (detalhe [a]), o que, inicialmente, motivou a suspeita da presença de material fundido (semelhante à figura 22[c]), porém a análise química indicou a presença de contaminantes como ferro e cromo que podem ter sido misturados aos cavacos de cobre nas tubulações de drenagem de fluido de corte ou no próprio filtro da retífica de onde foram retirados todos os cavacos para análise. O detalhe [b] da figura 66 mostra a formação cíclica das lamelas de cavaco também sem anomalias aparentes.

De acordo com as considerações de Marinescu et al. (2004) no item 2.2.9, materiais macios, como o cobre eletrolítico, tendem a gerar cavacos mais longos que geralmente proporcionam a obstrução dos poros do abrasivo o que acarreta na redução brusca da capacidade de corte do rebolo podendo proporcionar tendência de adesão ao rebolo. A morfologia dos cavacos recolhidos nos testes de retificação e a tendência de empastamento do rebolo verificada indicam coerência com as considerações supracitadas.

Era esperado que a morfologia dos cavacos não se diferenciasse muito entre as condições de penetração de trabalho $a_e = 0,01$ e $0,02$ mm, pois, além de as características do rebolo serem as mesmas, o parâmetro que menos influencia na forma dos cavacos é a penetração de trabalho (MACHADO; SILVA, 2003). Adicionalmente pode-se observar que a largura dos cavacos não varia significativamente nas duas condições de corte, pois ela depende das dimensões dos grãos do rebolo, que são uniformes.

4.5 TEMPOS DE USINAGEM

Para que o tempo consumido no processo de recuperação de placas pelo processo de retificação possa ser comparado ao tempo de usinagem de uma placa inteira, seja por fresamento ou aplainamento, deve-se considerar o fator de redução das amostras a partir da placa que as originaram, ou seja, o tempo de retificação de

cada amostra deverá ser multiplicado por 8, uma vez que cada amostra representa 1/8 da largura original da placa.

Para o levantamento do tempo consumido nos processos foi considerado o tempo total da atividade, ou seja, incluídos no tempo total as atividades de preparação e *set up* de máquina, excetuando-se os tempos de parada por necessidades pessoais do operador. Os tempos de preparação e *set up* de máquina foram cronometrados.

Tabela 7 - Tempos médios de usinagem em horas para os processos de fresamento, aplainamento e retificação com $a_e = 0,01$ mm e otimizada.

Tempo médio (horas)					
Fresamento	Aplainamento	Retificação ($a_e=0,01$ mm, $V_f = 5$ m/min)	Retificação ($a_e=0,01$ mm, $V_f = 20$ m/min)	Retificação ($a_e=0,01$ mm, $V_f = 25$ m/min)	Retificação otimizada ^(*)
8,5	19,5	15,04	3,76	3,01	2,62
Rugosidade obtida (Ra)					
0,85	0,78	0,80	0,81	0,83	0,81
^(*) Condição otimizada: desbaste (profundidade = 0,3 mm; $a_e = 0,02$ mm; $V_f = 25$ m/min), acabamento (profundidade = 0,2 mm; $a_e = 0,01$ mm; $V_f = 20$ m/min)					

Os tempos de usinagem das placas pelos processos de fresamento e aplainamento foram cronometrados e os tempos de usinagem pelo processo de retificação foram calculados a partir dos testes com amostras.

A condição otimizada apresentou-se como a alternativa mais produtiva para execução da usinagem de recuperação das placas de molde em estudo. A condição de retificação que apresentou o melhor resultado em termos de rugosidade dentre todas as condições de testes ($a_e = 0,01$ mm e $V_f = 5$ m/min) resultou num tempo de usinagem elevado, se aproximando do tempo de usinagem por aplainamento, porém há de considerar a retificação com $a_e = 0,01$ mm e $V_f = 20$ m/min que apresentou rugosidade muito próxima do melhor resultado num tempo reduzido.

Ainda cabe observar que as trajetórias das ferramentas de corte tanto no fresamento quanto no aplainamento não estão alinhadas com o sentido de escoamento do aço no molde das máquinas de lingotamento contínuo. Isto pode implicar numa

microtexturização do material e, conseqüentemente, valores de rugosidade superiores aos obtidos pela retificação, sugerida para ser executada no sentido do escoamento do aço (VENKATESCH; BOBJI; BISWAS, 1998).

5 CONCLUSÕES

- A alternativa de retificação proposta demonstrou viabilidade técnica e os cálculos de tempo de usinagem sinalizaram ganho de produtividade significativo em relação aos processos atuais sem sacrifício da qualidade superficial das placas. Adicionalmente deve-se considerar que o processo de retificação, além de proporcionar tempos de usinagem reduzidos, permite a usinagem de placas com perfis planos e curvos e ainda não demanda operações adicionais de acabamento, dispensando outras máquinas ou equipamentos e reduzindo os processos envolvidos em operações de desbaste e de acabamento.
- Os processos atuais de usinagem de placas (fresamento/mandrilhamento e aplainamento) apresentam um grau significativo de obsolescência e podem não estar adequadamente dimensionados se levada em consideração a produtividade em relação ao volume de material removido em cada peça.
- O processo de fresamento/mandrilhamento sinaliza potencial de estudo e desenvolvimento de ferramentas multicortantes (fresas) especialmente especificadas para usinagem de cobre, o que pode trazer algum aumento de produtividade e melhoria na qualidade superficial. Por outro lado, a rugosidade ideal dificilmente seria atingida apenas com operações de fresamento, demandando processos adicionais de acabamento.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Devido a uma série de limitações pertinentes aos testes de campo realizados em ambiente industrial e aos recursos financeiros, humanos e operacionais disponíveis, algumas oportunidades puderam ser identificadas no sentido da progressão dos estudos e continuidade do tema. Dentre elas pode-se listar o estudo da variação da rugosidade das placas usinadas em função da velocidade de corte, da pressão e vazão de aplicação de fluido de corte, da geometria dos bocais, das características do rebolo, da rotação do rebolo, etc.

Em termos dos efeitos sobre o processo de lingotamento contínuo foi identificada a oportunidade de estudo da variação do controle térmico do molde, a partir das considerações de SPINELLI et al. (2004) e VENKATESCH; BOBJI; BISWAS (1998) e da qualidade superficial das placas de aço lingotadas em função da rugosidade superficial das placas dos moldes.

No sentido dos aspectos financeiros ainda restou a oportunidade de avaliação da viabilidade econômico-financeira do investimento em uma retificadora de médio porte levando-se em consideração o aumento de produtividade proporcionado pelo processo de retificação em relação aos processos tradicionais de recuperação de placas de molde.

Adicionalmente é válido citar a contribuição deste estudo no enriquecimento acadêmico e didático dos processos de usinagem, principalmente por abrasão, aplicados ao cobre eletrolítico, pouco disponível na literatura científica e rede mundial de computadores (internet). Ainda considerando-se o aspecto acadêmico, duas amostras de placas de cobre foram doadas pela ArcelorMittal Tubarão à UFES para possíveis testes e sequência de estudos em retificadora recém comprada por esta instituição federal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E METAIS (ABM). **Siderurgia para não siderurgistas**. VITÓRIA, 2003. 125 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6405: Rugosidade das Superfícies**. Rio de Janeiro, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8404: Indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos**. Rio de Janeiro, 1988.
- BACKER, W. R.; MARSHAL, E. R.; SHAW, M. C. The Size Effect in Metal-Cutting, **ASME**, 74:61–72. 1952.
- BARGE, M. Experimental study of abrasive process. **Wear**, doi:10.1016/j.wear.2006.08.046. 2007.
- BIANCHI, E.C. *et al.* **Otimização do processo de retificação pela análise da quantidade de fluido de corte aplicada**. Bauru, Universidade Estadual Paulista, 2002.
- BIANCHI, E.C., AGUIAR, P.R.; PIUBELI, B.A.; **Aplicação e Utilização dos Fluidos de Corte nos Processos de Retificação**. São Paulo: Artliber, 2004. Introdução, p. 14-15.
- BLAENDEL, K. L.; TAYLOR, J. S.; PISCOTTY, M. A. **Summary Session Precision Grinding of Brittle Materials**, Spring Topical Meeting of A. S. P. E., Annapolis, MD, 1996.
- CATAI, R.E.; BIANCHI, E.C.; SILVA, L.R.; AGUIAR, P.R.; CATAI, D., Estudo dos Métodos Otimizados de Aplicação de Fluidos de Corte no Processo de Retificação, **Revista de Ciência e Tecnologia**, v. 11, nº 22, pp. 7-18, jul/dez 2003.
- CZICHOS, H.; HABIK, K. H., **Tribologie Handbuch: Reibung und Verschleiss. Prueftechnik, Werkstoffe und Konstruktionselemente**, Vieweg Vlg., Wiesbaden, German, 1992.
- DES RUISSEAU, N. R.; ZERKLE, R. D. Temperatures In Semi-infinite and Cylindrical Bodies Subject to Moving Heat Sources and Surface Cooling, **J. Heat Transfer**, 92:456–464 (1970).
- DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG E.V.. **DIN 8560: Manufacturing Process – Terms and Definitions**. Germany, 2003.
- GADELMAWLA, E.S.; KOURA, M.M.; MAKSOUD, T.M.A.; ELEWA, I.M.; SOLIMAN, H.H. Roughness Parameters. **Journal of Materials Processing Technology**, 123, 2002.

FRESAMENTO. São Bernardo do Campo. Disponível em: <<http://www.fei.edu.br/mecanica/me733/Me733a/Apfresamento01.pdf>>. Acesso em 14/12/2008.

GATES, J.D.. Two-body and three-body abrasion: A critical discussion. **Wear**, 214, 1998.

GOMES DE OLIVEIRA, J. Tópicos Avançados sobre o Processo de Retificação. São Carlos 2001. (Apostila 2).

GRAHAM, W.; WHISTO, M. G., Some Observations on Through the Wheel Coolant Application in Grinding, **Int. J. Machine Tool Design and Research**, 18:9 (1978).

GUEDES, Luis F.M. **Processos de Fabricação por Usinagem/ Conformação: Classificação e nomenclatura dos processos mecânicos de usinagem**. Porto Alegre, FENG/PUCRS, março de 2006.

HAERTEL, S; WEINGÄRTNER, E.; WEINGÄRTNER W.L.;. **Influência do Sistema de Alimentação de Fluido de Corte sobre os Resultados no Processo de Retificação**, Instituto Politécnico Nova Friburgo, paper RE 04-PF41, 2004.

HAFENBRAEDL, D.; MALKIN, S. **Environmentally-Conscious Minimum Quantity Lubrication (MQL) for internal Cylindrical Grinding**, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Massachusetts Amherst, MA 01003-2210, Volume XXVIII, 2000.

HAHN, R. S. On The Mechanics of The Grinding Process Under Plunge Cut Conditions, Trans ASME, **J Engineering Industry**, pp. 72–80, 1966.

HUTCHINGS, Ian M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. ISBN 0 340 56184 X, Great Britain, 1992.

INFORMATIVO Técnico. Carborundum abrasivos. Engenharia de Aplicação, nº04. Março de 2003. <<http://www.carbo-abrasivos.com.br/uploadedFiles/SGcarboabrasivosbr/Documents/ITC%20003%20-%20DISCOS%20DE%20CORTE%20IDENTIFICACAO%20E%20CORRECAO%20DE%20PROBLEMAS.pdf>> Acesso em 10/11/2006.

KANNAPAN, S.; MALKIN, S. Effects of Grain Size and Operating Parameters on the Mechanics of Grinding, Trans ASME, **J. Engineering Industry**, 94:833–842, 1972.

KATO, K.. Micromechanisms of Wear—Wear Modes, **Wear**, 153:277–295. 1992.
MACHADO, Alisson Rocha; SILVA, Marcio Bacci da. **Usinagem dos Metais**. Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia, ago. 2003. 5ª versão, p.4, 69, 217, 218, 254.

MALKIN, S., **Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives**, first ed, Ellis Horwood Limited, Chichester, 1989.

MANUAL Técnico de Usinagem. Sandvik do Brasil S.A.. São Paulo. Divisão Coromant: Suécia, 2005.

MARINESCU, Ioan D. et al. **Tribology of Abrasive Machining Processes**. Norwich – Estados Unidos: Willian Andrew Inc., 2004.

NAKAYAMA, K. **Elastic Deformation of Contact Zone in Grinding**, *Bull. Jpn. Soc. Precision Eng.*, 5(4):93–98. 1972.

NAKAYAMA, K. et al. **Sharpness Evaluation of Grinding Wheel Face by Coefficient of Friction**, Proc. 4th Int. Conf. Prod. Eng., Tokyo, 1980.

OTT, H. W. **Grundlagen der Schleiftechnik**, Schleiftechnik Co., Pfaeffikon - ZH, German, 1993.

PAHLITZSCH, G., Features and Effects of A Novel Cooling Method, *Microtecnic*, 8:4 (1953).

PAVELESCU, D.; MUSHAT, M.; Tudor, V. **Tribology**, Editura Dedactica & Pedagogica, Bucharest, Romanian, 1977.

RABINOWICZ, E.. **Friction and Wear of Materials**, J. Wiley & Sons, New York, 1994.

ROCHA, Melchi; DIAS, André. **Plaina**. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. Disponível em: <<http://www.em.pucrs.br/~valega/plaina.doc>>. Acesso em: 12/10/2008.

ROWE, W. B.; BARASH, M. M.; Koenigsberger, F. Some Roundness Characteristics of Centerless Grinding, *Int. J. of Machine Tool Design & Research*, 5:203–215, 1965 AND Rowe, W. B., Spraggett, S., and Gill, R., Improvements in Centerless Grinding Machine Design, *Annals of the CIRP*, 36:207–210, 1987.

SAHOO, M.; KUYUCAK, S., A Review of the Machinability of Copper-Base Alloys, *Canadian Metallurgical Quartely*, Vol. 35, No 1, pp. 1-15, 1996.

SALJE, E.; MUSHARDT, H.; DAMLOS, H. **Verschleisskenngrößen und Bedeutung zur Beschreibung und Bewertung von Schleifprozessen**, *Jahrbuch: Schleifen, Hohnen, Laeppen und Polieren*, 50. Ausgabe, pp. 110–117. German, 1981.

SALMON, S. C. **Modern Grinding Process Technology**, McGraw-Hill, New York, 1992.

SILVA, Flávio José. **Aulas de Usinagem**. Universidade Federal do Espírito Santo, 2006.

SPINELLI, J. E. et al. A Microstructure and solidification thermal parameters in thin strip continuous casting of a stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**. Volume 150, Issue 3, p. 255-262. 20 July 2004.

TELECURSO 2000. Processos de Fabricação. Volume 3. Parâmetros de Rugosidade. Aula nº19. Biblioteca Virtual do Estudante Brasileiro. Disponível em: <http://destec.no.sapo.pt/pdf/parametros_rugosidade.pdf> Acesso em: 18/01/2009.

VENKATESCH, K.; BOBJI, M.S.; BISWAS, S.K. Some features of surface topographical power spectra generated by conventional machining of a ductile metal. **Material Science and Engineering**, A252, P. 153-155, 1998.

WEBSTER, J. **Selection of coolant type and application technique in grinding.** **Supergrind**, 1995, 205-218

ZUM GAHR, K. H., *Microstructure and Wear of Materials*, **Elsevier**, Amsterdam, 1987.