

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

VITTOR HUGO GONÇALVES

**O USO DE GRAFITE COMO LUBRIFICANTE SÓLIDO PARA USINAGEM:
UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

JUIZ DE FORA

2017

VITTOR HUGO GONÇALVES

**O USO DE GRAFITE COMO LUBRIFICANTE SÓLIDO PARA USINAGEM:
UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Raphael Fortes Marcomini

JUIZ DE FORA

2017

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Gonçalves, Vittor Hugo.

O uso de grafite como lubrificante sólido para usinagem : Uma revisão bibliográfica / Vittor Hugo Gonçalves. -- 2017.

66 f. : il.

Orientador: Raphael Fortes Marcomini

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2017.

1. Usinagem. 2. Retificação de trilhos. 3. Rebolos. 4. Grafite. 5. Lubrificante sólido. I. Marcomini, Raphael Fortes, orient. II. Título.

VITTOR HUGO GONÇALVES

**O USO DE GRAFITE COMO LUBRIFICANTE SÓLIDO PARA USINAGEM:
UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raphael Fortes Marcomini

Orientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Moisés Luiz Lagares Júnior

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Marco Aurélio da Cunha Alves

Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e por iluminar meu caminho durante todo o meu curso e também na elaboração deste trabalho. Aos meus pais, Fernando e Angélica, que não mediram esforços para que eu realizasse meu sonho de me tornar engenheiro. À minha irmã, Carol, pela convivência durante boa parte da minha vida acadêmica e pelos ensinamentos. Ao meu sobrinho, Luiz Guilherme, que acaba de chegar ao mundo trazendo enorme felicidade à nossa família, dedico este trabalho a você. Aos demais familiares, que direta ou indiretamente, foram importantes na minha caminhada ao longo da graduação.

À Universidade Federal de Juiz de Fora e ao LIT, pelo acolhimento e aprendizado durante minha vida acadêmica, tanto no Brasil, quanto na Irlanda, sendo fontes essenciais para meu desenvolvimento pessoal.

Aos meus amigos de curso, intercâmbio e estágio, por compartilharem inúmeros momentos importantes ao longo destes anos.

“Todas as vitórias ocultam uma abdicação.”

(Simone de Beauvoir)

RESUMO

A retificação de trilhos se tornou uma ferramenta indispensável no processo de manutenção de ferrovias desde seu surgimento no século XX. Para isso, rebolos abrasivos são utilizados na remoção de material da superfície do boleto do trilho, eliminando desgastes ondulatórios e outros defeitos. Foi comprovado que a implementação desse processo é capaz de conter significativamente fraturas anuais de trilhos, reduzindo a necessidade de trocas. Para que o esmerilhamento ocorra de maneira correta, é preciso conhecer qual tipo de rebolo utilizar. Portanto, conhecer suas especificações e como o processo de retificação é realizado são informações essenciais. O desenvolvimento de técnicas para aprimorar os processos de usinagem tem despertado o interesse de pesquisadores, principalmente devido à utilização de lubrificantes sólidos nesse contexto. Assim, surge o grafite como uma alternativa para evitar o desperdício de fluidos refrigerantes, que podem ser tóxicos à saúde humana e à natureza. Dessa forma, este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica acerca do uso do grafite como lubrificante sólido na usinagem. Este se mostrou eficaz no aumento da vida útil da ferramenta de corte, na melhoria da rugosidade superficial, na queda da temperatura da amostra e nos baixos valores para as componentes da força de corte durante o processo. Dois estudos apresentaram a fabricação de rebolos contendo grafite em sua composição, os quais também obtiveram excelentes resultados quanto aos aspectos anteriores, além de avaliarem a relação G desses rebolos, fator importante para análise de vida útil.

Palavras-chave: Usinagem. Retificação de trilhos. Rebolos. Grafite. Lubrificante sólido.

ABSTRACT

Rail grinding has become an indispensable tool in railway maintenance process since its emergence in the 20th century. To do so, abrasive grinding wheels are used on the railhead's superficial material removal, eliminating undulating wear and other defects. It has been proven that the implementation of this process is significantly able to contain annual rail fractures, reducing the need for replacements. In effort to make grinding occur correctly, it is necessary to know which type of grinding wheel will be used. Therefore, knowing its specifications and how the grinding process is performed are essential information. The development of techniques to improve the grinding process has been fomenting researchers interest, mainly due to the use of solid lubricants in that context. Thus, the graphite appears as an alternative to avoid coolant waste, which can be toxic to human health and nature. Then, this study presents a bibliographic review about the use of graphite as a solid lubricant in the machining. The graphite has shown its effectiveness in increasing cutting tool life cycle, improving surface roughness, decreasing sample temperature and cutting forces values. Two studies presented graphite molded grinding wheels, which also obtained excellent results as the previous aspects, besides evaluating the G-ratio of those grinding wheels, an important factor for life cycle analysis.

Keywords: Machining. Rail Grinding. Grinding Wheels. Graphite. Solid lubricant.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Forças de Corte Atuantes em uma Ferramenta.....	17
Figura 2 - Representação de um torno mecânico	20
Figura 3 - Representação de Ferramenta de Corte para Torno	21
Figura 4 - Representação de Fresadora Horizontal	22
Figura 5 - Fresamento Vertical.....	22
Figura 6 - Tipos de Operações de Retificação.....	23
Figura 7 - Formação de Cavaco por Grão Abrasivo.....	24
Figura 8 - Rebolo Convencional.....	29
Figura 9 - Rebolo Superabrasivo	30
Figura 10 - Esmerilhadora de Trilhos.....	34
Figura 11 - Componentes da Esmerilhadora	35
Figura 12 - Atuação do Rebolo no Trilho.....	36
Figura 13 – Toneladas Brutas Transportadas	37
Figura 14 - Trocas de Trilhos Realizadas	38
Figura 15 - Indicador de Produção LRG26	39
Figura 16 - Vida da Ferramenta na Usinagem do Inconel 718.....	41
Figura 17 - Gráficos de Rugosidade Ra.....	43
Figura 18 - Temperaturas de Usinagem	44
Figura 19 - Variação das Forças de Corte com o Ângulo de Inclinação da Ferramenta.....	46
Figura 20 - Relação Espessura do Cavaco.....	47
Figura 21 – Componentes da Força de Corte	49
Figura 22 - Análise da Energia Específica, Rugosidade e Desgaste do Rebolo.....	50
Figura 23 - Esquema de Produção de Rebolo Resinoide.....	52
Figura 24 - Bancada de Testes.....	52
Figura 25 - Análise da Rugosidade Superficial	53

Figura 26 - Relação G para Diferentes Rebolos	53
Figura 27 - Análise da Temperatura de Operação	54
Figura 28- Análise das Componentes da Força de Corte	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Escala Granulométrica em MESH	25
Tabela 2 - Escala de Dureza de Rebolos	28
Tabela 3 - Características dos Fluidos de Corte	33
Tabela 4 - Composição Química Inconel 718 % peso.....	40
Tabela 5 - Parâmetros de Corte	42
Tabela 6 - Parâmetros do Fresamento do Aço AISI 1045	45
Tabela 7 - Condições do Experimento de Shaji e Radhakrishnan (2003).....	48
Tabela 8 - Condições do Experimento de Tsai e Jian (2012).....	51

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

MLQ	Mínima Quantidade de Lubrificante
R	Força da ferramenta de corte sobre o cavaco
F_n	Componente normal de R
F_f	Componente de atrito de R
R'	Força do material sobre o cavaco
F_N	Componente de R'
F_S	Componente de R'
F_C	Componente da força sobre a ferramenta
F_L	Componente da força sobre a ferramenta
t₂	Espessura do cavaco
t₁; a_p	Profundidade de Corte
f	Avanço
α	Ângulo de inclinação da ferramenta
φ	Ângulo de cisalhamento
μ	Coefficiente de atrito
S_o	Área transversal do cavaco
W	Força total de corte
v; v_s	Velocidade de corte
CBN	Nitreto Cúbico de Boro
P	Potência de corte
R_a	Rugosidade Superficial
G	Relação G

V_w	Volume de material retificado
V_m	Volume desgastado no rebolo
MTBT	Milhões de Toneladas Brutas Transportadas
mgt	<i>Million Gross Tons</i>
TKB	Tonelada-Quilômetro Bruto

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	14
1.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	14
1.2.	JUSTIFICATIVA.....	15
1.3.	ELABORAÇÃO DOS OBJETIVOS	15
1.3.1.	OBJETIVOS GERAIS.....	15
1.3.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
1.4.	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
2.	USINAGEM CONVENCIONAL	17
2.1.	VARIÁVEIS ATUANTES NO PROCESSO DE USINAGEM.....	17
2.1.1.	FORÇAS DE CORTE.....	17
2.1.2.	PARÂMETROS DE CORTE.....	18
2.1.3.	RUGOSIDADE R_a	19
2.1.4.	RUGOSIDADE R_z	19
2.2.	TORNEAMENTO	20
2.3.	FRESAMENTO	21
2.4.	O PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	23
2.4.1.	FORMAÇÃO DO CAVACO.....	24
2.4.2.	O REBOLO.....	24
2.4.2.1.	GRANULOMETRIA	25
2.4.2.2.	LIGANTES	26
2.4.2.3.	DUREZA.....	27
2.4.2.4.	ESTRUTURA	28
2.4.2.5.	TIPOS DE REBOLOS ABRASIVOS.....	28
2.4.2.6.	ESPECIFICAÇÃO DE REBOLOS.....	31
2.4.3.	PARÂMETROS DA RETIFICAÇÃO.....	31
2.4.3.1.	POTÊNCIA DE CORTE.....	31

2.4.3.2.RELAÇÃO G.....	32
2.5. FLUIDOS DE CORTE.....	32
3. RETIFICAÇÃO DE TRILHOS	34
3.1. FUNCIONAMENTO DA ESMERILHADORA	35
3.2. BENEFÍCIOS DA RETIFICAÇÃO DE TRILHOS	37
4. GRAFITE COMO LUBRIFICANTE SÓLIDO.....	39
4.1. ANÁLISE DE VIDA DE FERRAMENTA DE CORTE.....	39
4.2. AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE EM UMA LIGA DE TITÂNIO	41
4.3. AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA EM UMA LIGA DE TITÂNIO	44
4.4. MELHORIA DO DESEMPENHO NA USINAGEM DO AÇO AISI 1045	45
4.5. REBOLOS COM GRAFITE EM SUA COMPOSIÇÃO	48
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	57
REFERÊNCIAS	58
ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES DA ESMERILHADORA LORAM RG148.....	61
ANEXO B – CATÁLOGO DE FABRICANTES DE REBOLOS FERROVIÁRIOS	62
ANEXO C – TERMO DE AUTENTICIDADE.....	64

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O avanço tecnológico no campo da usinagem vem despertando interesse de inúmeros pesquisadores, visando a elaboração de processos mais rápidos, eficientes e sustentáveis. Além disso, a utilização de novos materiais a serem usinados também é um desafio na obtenção de tais processos.

Superligas de níquel e titânio são exemplos desses novos materiais extremamente complexos de usinar. Elas são muito importantes na construção de turbinas a gás, motores de aeronaves, reatores nucleares e até mesmo bombas. Suas propriedades, como elevada resistência à corrosão em altas temperaturas e baixo peso, justificam sua utilização. Entretanto, a usinagem das mesmas é extremamente difícil devido à sua baixa condutividade térmica, alta taxa de encruamento e afinidade química com materiais das ferramentas de corte, provocando desgaste rápido e severo. (MARQUES et al., 2015)

Uma alternativa para uma boa usinagem desses tipos de ligas e dos outros materiais convencionais consiste em focar na lubrificação adequada da região de corte. Porém, lubrificação adequada não significa lubrificação abundante, exagerada. Pelo contrário, combater o desperdício é um dos focos em estudos recentes, assim como neste trabalho. Fluidos de corte podem ser tóxicos à saúde humana e ao meio ambiente, sendo necessário evitar seu descarte inadequado. Para isso, a técnica MQL (Mínima Quantidade de Lubrificação) vem sendo empregada. (SHAJI & RADHAKRISHNAN, 2003)

Um caminho para substituir o uso de fluidos refrigerantes consiste em diminuir a geração de calor durante o processo ao invés de remover calor após sua geração. Para isso, lubrificantes sólidos, como o grafite, são utilizados na usinagem e provaram sua eficácia em diferentes faixas de temperatura. Portanto, a utilização desses lubrificantes pode significar a redução do calor gerado por atrito. (TSAI & JIAN, 2012)

Segundo Chiaverini (1986), a retificação também participa desses processos de busca por melhores soluções na lubrificação. É um processo de acabamento através da remoção de material superficial por meio de rebolos abrasivos com arestas afiadas. Atualmente no mercado existem diversos tipos de rebolos, cada qual mais indicado para determinada finalidade, como por exemplo a retificação de trilhos ferroviários.

1.2. JUSTIFICATIVA

O presente trabalho está relacionado a um projeto em vigência entre a Faculdade de Engenharia Mecânica da UFJF e uma empresa de logística ferroviária, o qual consiste no desenvolvimento de uma bancada de testes para rebolos utilizados na retificação ferroviária. Os testes apoiam-se em avaliar as características de diferentes rebolos em amostras de trilhos, simulando a operação da esmerilhadora, apresentada no capítulo 3.

Esses rebolos são constituídos por grãos abrasivos e materiais aditivos unidos por um material ligante. Um reboło pode conter milhares de grãos abrasivos, os quais um por um removem finas camadas de material até perderem sua capacidade de remoção e se soltarem do ligante. Os aditivos são materiais utilizados para melhorar o desempenho do reboło, podendo ser voláteis, polímeros orgânicos e lubrificantes sólidos. (STEMMER, 1995)

A geração intensa de calor envolvido na usinagem em geral, principalmente devido ao atrito entre peça-ferramenta, é crítica para o acabamento superficial. Portanto, o resfriamento e lubrificação do sistema possuem uma função determinante no processo. (SHAJI & RADHAKRISHNAN, 2003)

No caso da retificação de trilhos, há uma grande geração de faíscas durante o processo, evidenciando essa geração de calor. Com isso, incêndios podem ser causados nas áreas próximas aos trilhos. Para evitar tal problema, a esmerilhadora possui vagões-tanque com água, que é dispersada logo após os vagões-esmerilhadores. (FERREIRA, 2010)

Portanto, o grafite pode surgir como uma alternativa para que essa geração de calor durante a usinagem seja menor, diminuindo o gasto e desperdício com água. Além disso, garante um bom acabamento na superfície do boleto, melhorando o contato roda-trilho. Dessa forma, este estudo visa levantar dados bibliográficos sobre a aplicação do grafite como lubrificante sólido, úteis para a sequência do projeto.

1.3. ELABORAÇÃO DOS OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVOS GERAIS

- a) Realizar uma revisão bibliográfica sobre a utilização do grafite como lubrificante sólido na usinagem.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Caracterizar os processos de usinagem convencional em que o grafite vem sendo empregado, assim como seus parâmetros de entrada;
- b) Descrever o processo de retificação, em especial o esmerilhamento de trilhos;
- c) Estudar a aplicação de grafite como lubrificante sólido na mistura com fluidos lubrificantes e na composição de rebolos;

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

No primeiro capítulo, foi realizada uma introdução acerca dos principais assuntos que serão abordados ao longo do trabalho, suas justificativas, objetivos e importância do tema.

O segundo capítulo descreve a usinagem convencional, apresentando com mais ênfase os processos de torneamento, fresamento e retificação, nos quais o emprego de grafite é maior. Além disso, os parâmetros de entrada também serão estudados.

O terceiro capítulo descreve a origem e o processo de retificação de trilhos, evidenciando sua importância como ferramenta de manutenção preventiva de ferrovias. Além disso, o capítulo apresenta resultados obtidos acerca da comprovação econômica da utilização desse processo.

O quarto capítulo corresponde da revisão bibliográfica sobre a utilização do grafite como lubrificante na usinagem e também na composição de rebolos. Estes últimos importantes devido a existência de poucos estudos a respeito.

O quinto e último capítulo corresponde às considerações finais do trabalho, caracterizadas por uma visão geral dos resultados obtidos pelos diferentes estudos apresentados, e propostas para trabalhos futuros.

Segundo Chiaverini (1986), a ferramenta exerce uma força \mathbf{R} no cavaco, sendo decomposta em duas componentes: \mathbf{F}_n e \mathbf{F}_f . A força \mathbf{R}' é a força de reação, igual e oposta a \mathbf{R} , para que o cavaco permaneça em equilíbrio, sendo suas componentes \mathbf{F}_N e \mathbf{F}_S .

Em relação à ferramenta, a força \mathbf{R} também pode ser decomposta em \mathbf{F}_C e \mathbf{F}_L , como representadas na parte inferior da figura 1. Os valores dessas componentes podem ser mensurados através do uso de um dinamômetro.

A espessura do cavaco t_2 também pode ser medida e, conhecendo os valores da profundidade de corte t_1 e o ângulo α inclinação da ferramenta, pode-se avaliar o ângulo de cisalhamento ϕ com considerável precisão:

$$\frac{t_1}{t_2} = \text{sen}\phi \quad (1)$$

Conhecendo os ângulos α e ϕ , assim como \mathbf{F}_C e \mathbf{F}_L , todas as outras incógnitas podem ser calculadas por intermédio da trigonometria. Além disso, o coeficiente de atrito μ pode ser encontrado através da equação 2 a seguir:

$$\mu = \frac{F_L + F_C \text{tg}\alpha}{F_C - F_L \text{tg}\alpha} \quad (2)$$

Já a força total de corte é calculada por, sendo S_o a área transversal do cavaco antes de sua remoção da peça:

$$W = \frac{F_C}{S_o} \quad (3)$$

2.1.2. PARÂMETROS DE CORTE

De acordo com Chiaverini (1986), a movimentação da máquina operatriz gera o movimento de corte na amostra. Já o movimento relativo da ferramenta sobre a peça representa o avanço, sendo este quantificado por mm por curso (ou revolução). A velocidade de corte v é a velocidade superficial da peça sobre a ferramenta, expressa em m/min e calculada pela fórmula 4 a seguir:

$$v = \frac{\pi DN}{1000} \quad (4)$$

Onde:

D: diâmetro da peça [mm]

N: número de revoluções por minuto

Outro parâmetro importante para usinagem é a profundidade de corte a_p , sendo identificada como a distância entre a superfície não cortada da peça e o fundo do corte, avaliada em uma direção 90° à superfície de trabalho da peça. Sendo d_1 o diâmetro inicial da peça e d_2 o diâmetro pós usinagem, a_p é calculado por:

$$a_p = \frac{d_1 - d_2}{2} \quad (5)$$

2.1.3. RUGOSIDADE R_a

Esse parâmetro é utilizado para avaliar a qualidade de superfície usinada e consiste na média aritmética de todas as coordenadas de um perfil de linha média ($Z(x)$) durante um certo período (t), sendo expressa na equação (7). (BENINI, 2011)

$$R_a = \frac{1}{t} \int_0^t |Z(x)| dx \quad (6)$$

2.1.4. RUGOSIDADE R_z

Diferente da rugosidade anterior, R_z é calculado através da média aritmética de cinco valores de pico-vale extraídos de amostras individuais adjacentes. É utilizado para avaliar a qualidade de superfícies de apoio e deslizamento e ajustes prensados.

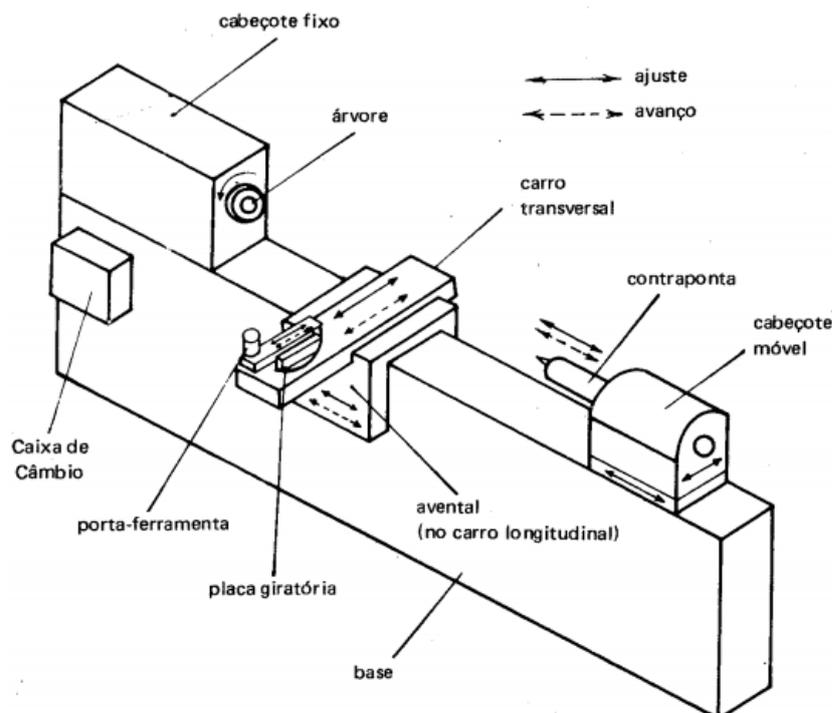
$$R_z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5} \quad (7)$$

Por fim, é válido ressaltar que a determinação desses parâmetros está diretamente ligada a alguns fatores, como o tipo de operação de corte, condições do maquinário, tipo de corte, tipo de material e condições de refrigeração.

2.2. TORNEAMENTO

É o tipo de operação de usinagem na qual um bloco de um determinado material é girado ao redor do eixo do torno, ao passo que uma ferramenta de corte retira material de sua superfície perifericamente até que o mesmo atinja seu formato e dimensões desejados. Um exemplo de torno pode ser analisado na figura 2.

Figura 2 - Representação de um torno mecânico

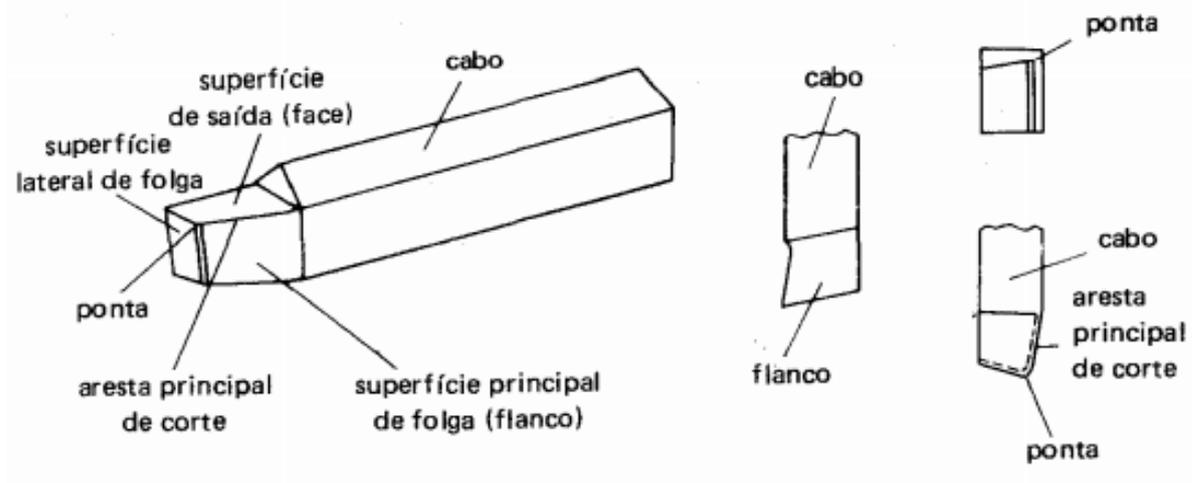


Fonte: CHIAVERINI (1986)

O torno mecânico é formado por uma base rígida e resistente, capaz de resistir a deformações e amortecer impactos oriundos de vibrações do processo de usinagem. O bloco a ser usinado é fixado nas castanhas, suportadas pela árvore principal presente no cabeçote fixo. A árvore possui a capacidade de rotacionar com diferentes velocidades, a serem escolhidas de acordo com o tipo e tamanho da peça a ser usinada, assim como o modo e acabamento desejados. Essa mudança de velocidades é realizada pela caixa de câmbio, composta por engrenagens. No centro, encontra-se o carro porta-ferramentas utilizado para movimentos

longitudinal e transversal. O avanço da ferramenta (figura 3) pode ser feito tanto manualmente, quanto automaticamente. Nesse conjunto central, por fim, encontra-se a placa giratória, permitindo colocar a ferramenta a qualquer ângulo em relação a peça a ser usinada. O cabeçote móvel é composto por uma contraponta, utilizada para firmar a peça enquanto a mesma gira, garantindo maior precisão. Neste cabeçote podem ser colocadas outras ferramentas, como brocas e alargadores, que são movidas de encontro a peça. (CHIAVERINI, 1986)

Figura 3 - Representação de Ferramenta de Corte para Torno



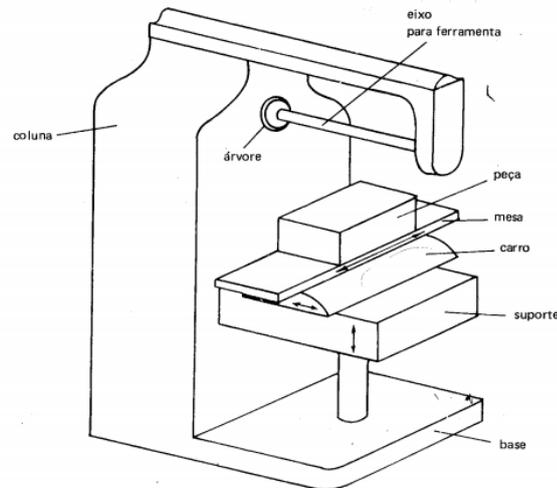
Fonte: CHIAVERINI (1986)

2.3. FRESAMENTO

Segundo Chiaverini (1986), é a operação de usinagem na qual o material é removido da peça por uma ferramenta giratória de múltiplas faces cortantes, denominada fresa. Assim, com a rotação do eixo da fresa, cada face afiada retira material da superfície da peça fixa na mesa de suporte.

Esse tipo de operação é bastante utilizado para remoção de material de superfícies, sendo possível em qualquer direção, já que a fresa e a peça podem ser ajustadas antes do início do processo. As fresadoras podem ser horizontais, verticais ou universais. A figura 4 ilustra um exemplo de fresadora horizontal.

Figura 4 - Representação de Fresadora Horizontal

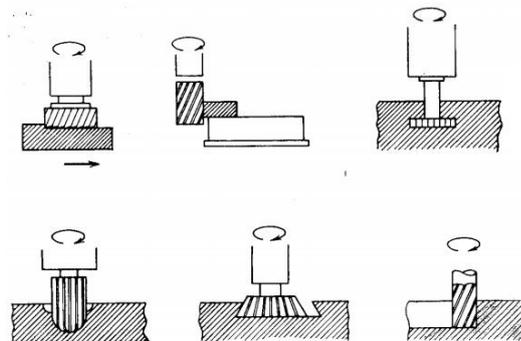


Fonte: CHIAVERINI (1986)

Assim como o torno, essa máquina possui uma base capaz de suportar vibrações e os outros componentes: a coluna, onde encontra-se a árvore, o mecanismo motor e o eixo porta-ferramentas; o suporte, capaz de se movimentar verticalmente; o carro preso no suporte e capaz de se mover na horizontal e a mesa, onde a peça é fixada.

No caso das fresadoras verticais, a coluna é disposta de tal forma a permitir que a árvore seja disposta verticalmente, fazendo com que a fresa gire também desta forma. Para melhor compreensão dos movimentos desse tipo de fresadora, a análise da figura 5 é indicada. Já as fresadoras universais, consistem em permitir a fixação da fresa na horizontal, vertical ou até mesmo obliquamente, permitindo a criação de perfis variados.

Figura 5 - Fresamento Vertical



Fonte: CHIAVERINI (1986)

2.4. O PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

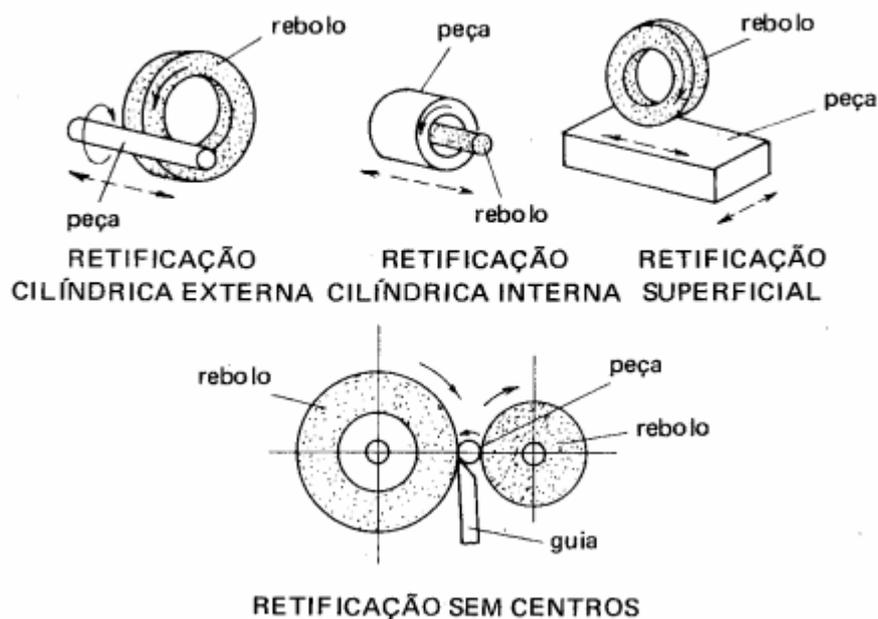
Também denominada como usinagem por abrasão, corresponde ao processo de remoção de material da peça pelas arestas ativas de corte de materiais abrasivos. Estes, por sua vez, estão ligados entre si por um material ligante, quando a ferramenta de corte utilizada é o rebolo. (SALMON, 1992)

Esse processo é normalmente usado como parte final da produção, sendo assim responsável por dar acabamento e melhorar as tolerâncias superficiais da peça produzida. (MALKIN & GUO, 2008)

Além desse aspecto de qualidade, a retificação também é utilizada quando o material da peça é extremamente duro para que outras técnicas sejam empregadas. Sendo assim, seu uso é recomendável para acabamento de peças metálicas, mas também para cerâmicas, vidros, plásticos e pedras. (LEE, 1999)

A retificação pode ser subdividida em quatro grandes grupos, de acordo com a superfície a ser usinada e movimento relativo entre rebolo e peça: retificação cilíndrica externa, retificação cilíndrica interna, retificação superficial e retificação sem centros. A figura 6 apresenta os esquemas desses diferentes tipos de retificação. (CHIAVERINI, 1986)

Figura 6 - Tipos de Operações de Retificação



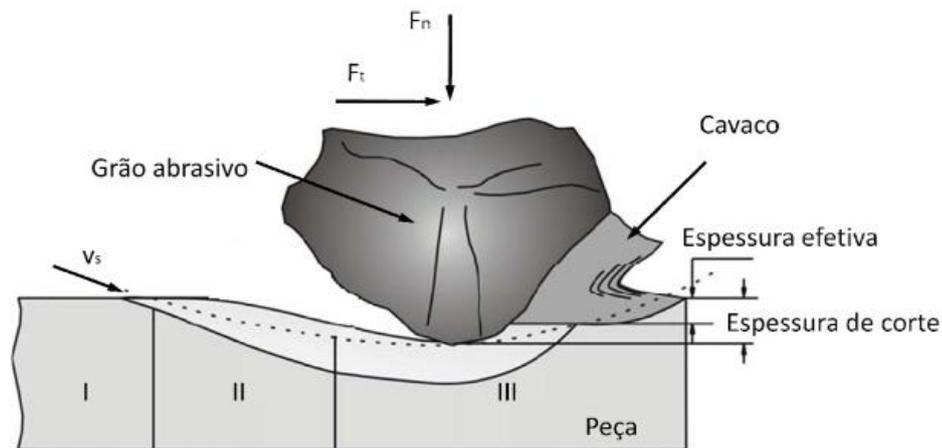
Fonte: CHIAVERINI (1986)

2.4.1. FORMAÇÃO DO CAVACO

Em essência, pode-se enumerar três diferentes fases de interação entre o grão abrasivo e a peça durante a retificação: a região elástica, região plástica e região de corte. (KLOCKE, 2009)

A figura 7 apresenta essas três regiões respectivamente por I, II e III. Na primeira, com a profundidade de corte muito pequena, o grão apenas tangencia a superfície, provocando deformações elásticas com nenhum material removido. Na segunda fase, a profundidade de corte aumenta ocasionando a deformações plásticas e escoamento lateral do material da peça. Esse aumento na penetração da aresta provoca maior atrito entre peça e rebolo, dissipando boa parte da energia em calor. Já no último estágio, a aresta ultrapassa um valor crítico de penetração, formando o cavaco. A energia produzida nessa fase é consumida no cisalhamento do material, o que explica essa geração de cavacos. (KLOCKE, 2009)

Figura 7 - Formação de Cavaco por Grão Abrasivo



Fonte: KLOCKE (2009)

2.4.2. O REBOLO

Os rebolos são ferramentas de corte rotativas e possuem variados formatos, cada qual mais adequado para certa aplicação. São formados, em sua essência, por três elementos: os grãos abrasivos, o material ligante e os poros, sendo fatores modificadores das propriedades mecânicas e de corte do rebolo, definindo dureza e porosidade, sendo mais duro o rebolo que tiver sua estrutura mais fechada (menos porosa). (BENINI, 2011).

Nesse tipo de ferramenta, a remoção do material é gerada pela ação dos grãos abrasivos, unidos pelo ligante. Essa capacidade de remoção de material, de acordo com Stemmer (1995), está diretamente ligada às seguintes características dos grãos:

- Alta dureza: para que a remoção do material ocorra majoritariamente na peça, mantendo por mais tempo arestas vivas (afiadas);
- Estabilidade térmica: para garantir a resistência do grão a altas temperaturas durante o processo e não transferir elevadas quantidades de calor à peça;
- Estabilidade química: durante a exposição a elevadas temperaturas e pressões, o grão não sofra mudanças químicas na presença de ar, lubrificante e material da peça;

2.4.2.1. GRANULOMETRIA

O tamanho do grão a escolhido a partir de sua aplicação, sendo consultada a tabela de granulometria, a qual apresenta uma numeração indicando a quantidade de malhas por polegada linear (MESH) da peneira de classificação. Essa escala de granulométrica pode ser analisada na tabela 1. A seguir, algumas considerações sobre a escolha do tipo de grão serão abordadas segundo Diniz et al (2006).

- Grãos grossos:
 - a) Materiais maleáveis e fibrosos;
 - b) Remoção de muito material (desbaste);
 - c) Sem necessidade de qualidade superficial;
 - d) Existência de grandes áreas de contato.
- Grãos finos:
 - a) Materiais friáveis, resistentes;
 - b) Necessidade de qualidade superficial;
 - c) Poucas áreas de contato;
 - d) Perfis com poucas dimensões e manutenção de bordas.

Tabela 1 - Escala Granulométrica em MESH

Muito Grosso	Grosso	Médio	Fino	Muito Fino	Pó
6	16	36	100	280	600
8	20	46	120	320	700

10	24	54	150	400	800
12	30	60	180	500	1000
14		70	220		1200
		80	240		1600
		90			

Fonte: DINIZ, COPPINI, & MARCONDES (2006) (Adaptado)

2.4.2.2. LIGANTES

O material ligante é responsável pela união dos grãos abrasivos entre si e, se necessário, a um suporte. De acordo com Stemmer (1995), os ligantes podem ser divididos em dois grupos:

- **LIGANTES INORGÂNICOS**

a) **Vitrificado (V):** formado por uma mistura de argila, quartzo, feldspato e caolim, que antes são moídos, peneirados e classificados para que, em seguida, sejam misturados de acordo com a proporção desejada, sabendo que isso implicará em diferentes propriedades. A queima é realizada em fornos sob temperaturas entre 1000 e 1350°C, garantindo o aspecto vítreo ao rebolo. Os rebolos vitrificados (cerâmicos) possuem grãos muito agressivos devido à sua estrutura porosa, baixa elasticidade, insensibilidade ao calor e frio, sensibilidade a choques térmicos e elevada estabilidade a ácidos, água e fluidos lubrificantes. Por fim, aproximadamente 75% dos rebolos fabricados são cerâmicos, garantindo sua enorme importância nesta área.

b) **Silicioso (S):** constituído por silicato de sódio misturado à argila. O primeiro é líquido e endurece a 200°C, acarretando em uma queima a temperaturas mais baixas que nos rebolos vitrificados. Podem produzir rebolos maiores, porém possuem pouca porosidade, elasticidade e baixa dureza. São principalmente utilizados em ações suaves, as quais primam por baixa geração de calor.

c) **Ligante de Magnesita (O):** material ligante muito antigo, mais conhecido como cimento de Sorell. É composto por oxiclreto de magnésio, sendo que o processo de endurecimento muito lentamente a temperatura ambiente. Devido a dificuldades em controlar reações, fissuras na estrutura são corriqueiras. A liga é muito sensível a umidade, sendo assim utilizada apenas em processos a seco.

d) **Ligante Metálico (M):** utilizado na fabricação de rebolos de diamantes sintéticos e de nitreto cúbico de boro (CBN), tanto para retificação de cerâmica, quanto para retificação eletrolítica.

- **LIGANTES ORGÂNICOS**

a) **Goma-laca (E):** consiste em um ligante elástico normalmente utilizado para dar acabamentos finos, não em cortes pesados.

b) **Borracha (R):** usados para rebolos elásticos em alta velocidade, permitindo remover o material rapidamente de maneira suave.

c) **Resinoide (B):** desenvolvidos a partir de resinas sintéticas (fenólicas ou fenoplásticas) do tipo endurecíveis ou termofixas. Essas resinas podem ser obtidas pela condensação do fenol com formaldeído na presença de catalisadores. Nesse tipo de ligante, podem ser acrescentados aditivos para obtenção de certas propriedades (resistência à flexão, estabilidade térmica, preenchimento). A modificação das resinas também pode alterar a funcionalidade do rebolo através da adição de outras resinas, como epóxi e poliamidas, ou outras substâncias, como aldeídos e acetatos. Esse tipo de liga é bastante empregado na confecção de rebolos de alta velocidade, como os usados em esmerilhadoras.

2.4.2.3. DUREZA

Pode ser entendida como a resistência oposta ao arrancamento dos grãos, sendo decisivas as participações do tipo de ligante, da granulometria e porosidade nesse processo. Os grãos devem permanecer unidos enquanto afiados e capazes de remover material por meio de uma força retentora, devida principalmente à interação grão-ligante. Porém, esta não deve ser tão forte a ponto de manter unidos grãos desgastados, incapazes de remover material. Portanto, essa ligação deve permitir a exposição de novos grãos afiados para que o processo de retificação continue. Um rebolo mole (macio) libera com facilidade os grãos e também se desgasta facilmente, ao contrário de um rebolo duro, que prende vigorosamente os grãos junto a estrutura do rebolo. (STEMMER, 1995)

De acordo com Diniz et al (2006), a dureza dos rebolos pode ser classificada por meio de letras, como pode ser analisado na tabela 2 a seguir.

Tabela 2 - Escala de Dureza de Rebolos

Muito Moles	Moles	Médios	Duros	Muito Duros
E – F – G	H – I – J – K	L – M – N – O	P – Q – R	S – T – U – V

Fonte: DINIZ, COPPINI, & MARCONDES (2006) (Adaptado)

2.4.2.4. ESTRUTURA

A estrutura de um rebolo relaciona-se diretamente com o espaçamento entre os grãos, sendo classificada por números inteiros da maneira a seguir, de acordo com Diniz et al (2006):

- 1 a 4: estrutura fechada;
- 5 a 7: estrutura média;
- 8 a 12: estrutura aberta;
- Acima de 12: rebolos com poucos grãos.

Estruturas fechadas correspondem a um elevado número de grãos vivos na área de contato do rebolo. Já as estruturas abertas oferecem mais espaços para alojamento de cavacos durante o processo de retificação, além de serem mais duráveis.

2.4.2.5. TIPOS DE REBOLOS ABRASIVOS

De acordo com Benini (2011), os rebolos abrasivos modernos podem ser divididos em dois grandes grupos: rebolos abrasivos convencionais e rebolos superabrasivos. Mais detalhes de cada tipo serão analisados nos subtópicos que seguem.

• **REBOLOS ABRASIVOS CONVENCIONAIS**

Normalmente fabricados com carbeto de silício (SiC) ou óxido de alumínio (Al_2O_3), mais conhecido como alumina, esses tipos de rebolos são misturados ao ligante resinoide, juntamente com materiais aditivos, dependendo de sua aplicação. De forma geral, o abrasivo é compactado junto ao ligante, em sequência aparecem processos intermediários de queima, polimerização ou compactação a quente, os quais produzirão rebolos com características diferentes. Este tipo de rebolo pode ser melhor observado na figura 8 a seguir. (WUNDER, 2006)

Figura 8 - Rebolo Convencional



Fonte: BENINI (2011) (Adaptado)

A obtenção do carbeto de silício é realizada de maneira indireta pela reação da sílica pura com coque em fornos elétricos. São abrasivos mais duros e mais quebradiços que o óxido de alumínio. Seu uso é mais indicado em processos de usinagem de materiais de baixa resistência à tração, porém muito duros, como por exemplo: vidros, porcelanas, ferros fundidos, alumínio e plásticos. Existem dois tipos de carbeto de silício, diferenciados por suas cores: verde e preto. O primeiro é usado para afiação de ferramentas de metal duro, por ser mais duro que o carbeto de silício preto. (BENINI, 2011)

Segundo Benini (2011), o óxido de alumínio apresenta duas classificações, seguindo o nível de pureza obtido em sua produção:

- **Óxido de alumínio comum (A):** possui cor cinza, com pureza em torno de 96% a 97% e possuindo alta tenacidade, sendo usado na retificação de materiais com elevada resistência à tração.
- **Óxido de alumínio branco (AA):** pureza mais alta que a anterior (99%), possui cor branca. No geral detém as mesmas características que o óxido de alumínio comum, porém é mais quebradiço devido à sua forma cristalizada. É empregado em processos com baixo índice de geração de calor e acabamento com menor tempo de execução.

Por fim, um rebolo convencional pode ser fabricado com ligantes cerâmico, resinoide ou de borracha. Além disso, alguns aditivos também podem constituir esse tipo de rebolo, como silicatos de boro e monóxido de magnésio, visando a diminuição da temperatura de queima na produção do rebolo. (STEMMER, 1995)

- **REBOLOS SUPERABRASIVOS**

Nos rebolos superabrasivos, além do aglomerado grão abrasivo/ligante, há também um suporte sobre o qual esse mesmo conjunto fica. Os grãos mais utilizados nesse tipo de rebolo são o nitreto cúbico de boro (CBN) e diamante sintético. Um exemplo desse tipo de rebolo pode ser observado na figura 9 abaixo.

Figura 9 - Rebolo Superabrasivo



Fonte: BENINI (2011) (Adaptado)

O CBN pode ser obtido pela transformação alotrópica do nitreto de boro hexagonal sob elevadas temperaturas e pressões. Possui elevada dureza, resistência ao desgaste, capacidade térmica e estabilidade química, propriedades que garantem um grande avanço na retificação de materiais metálicos. (LEME, 1999)

Rebolos fabricados deste tipo de material podem suportar velocidades superiores a 200 m/s, sendo que apresentam melhores resultados nessa ocasião. Durante o processo de retificação, grande parte do calor gerado é absorvido pelo abrasivo, se tratando de um ótimo condutor de calor, o CBN o absorve e evita que o mesmo seja transferido para a peça. Seu uso está presente principalmente na usinagem de aços-ferramentas, outros materiais ferrosos e ligas aeronáuticas. (LEME, 1999)

O diamante sintético possui uma dureza extrema, inatingível por nenhum outro material. Para se ter uma noção desse valor, a dureza do diamante sintético é cerca de duas vezes maior que a dureza do óxido de alumínio e a do carbetto de silício. Ele pode ser obtido pela transformação alotrópica do carbono, mediante a ação de um catalisador a alta pressão e temperatura. É válido enaltecer que o diamante sofre grafitização a partir de 900°C e oxidação após 1400°C, fato que restringe sua aplicação em materiais ferrosos. (LEME, 1999)

Os rebolos superabrasivos podem ser fabricados com ligantes resinoides, vitrificados e também metálicos, sendo estes mais resistentes ao calor, se comparados aos primeiros, e mais resistentes ao impacto, se comparados às ligas vitrificadas. (BENINI, 2011)

2.4.2.6. ESPECIFICAÇÃO DE REBOLOS

A identificação dos rebolos é realizada por marcações contendo números e letras referentes às características reportadas acima (granulometria, material ligante, dureza, estrutura e tipo de grão abrasivo). Essas informações são dispostas no rótulo do fabricante juntamente com dados das dimensões do rebolo e rotação máxima permitida. Dessa forma, foi criado um padrão internacional de para facilitar a identificação de rebolos, salvo divergências em pequenos detalhes. As normas ABNT NBR 15230, DIN 69100-1 e ISO 525:2013 podem ser consultadas para maiores esclarecimentos quanto ao assunto e semelhança. Um exemplo de como é essa especificação pode ser analisada na sequência:

A 16 Q4B

Onde:

- *A* – Óxido de Alumínio
- *16* – Granulometria Grossa
- *Q* – Dureza Média
- *4* – Estrutura Média
- *B* – Liga Resinoide

2.4.3. PARÂMETROS DA RETIFICAÇÃO

Esses parâmetros podem ser calculados e representam os eventos ocorridos durante o processo de retificação. Para que haja precisão nas informações, é preciso que a coleta de dados durante o processo seja realizada com cuidado e perícia. A seguir serão definidos alguns parâmetros relacionados à retificação.

2.4.3.1. POTÊNCIA DE CORTE

É definida como a energia necessária para a formação de cavaco e pode ser calculada como o produto da força tangencial F_t e a velocidade de corte v_s , sendo que essa força pode ser obtida através de um dinamômetro.

$$P = F_t v_s \quad (8)$$

2.4.3.2. RELAÇÃO G

Consiste na relação entre o volume de material retificado (V_w) e o volume de material desgastado no rebolo (V_m), sendo assim:

$$G = \frac{V_w}{V_m} \quad (6)$$

Essa relação avalia o desgaste de um rebolo durante o processo de retificação. Uma relação G baixa, representa um desgaste grande e uma capacidade maior de auto-afiação, mantendo a agressividade dos grãos. Já uma relação G alta, implica em um desgaste e agressividade baixos. (SOUZA, 2009)

2.5. FLUIDOS DE CORTE

No trabalho de Benini (2011), é possível identificar as principais funções dos fluidos de corte durante o processo de usinagem:

- Lubrificar a região de contato peça-ferramenta de corte;
- Refrigerar a superfície da peça por absorção e posterior transporte de calor gerado;
- Garantir uma temperatura de trabalho homogênea;
- Remover cavaco produzido;
- Formar uma camada protetora contra corrosão, tanto para ferramenta quanto para peça.

A maneira como o fluido é utilizado durante o processo, ou seja, sua composição, posição do bocal injetor e sua vazão, é determinante para a qualidade do produto e desgaste do rebolo. Portanto, é preciso utilizá-lo da forma mais adequada para cada processo para garantir melhores resultados. (STANFORD & LISTER, 2002)

Existem quatro principais categorias de fluidos de corte de acordo com suas composições: sintéticos, semissintéticos, óleos emulsionáveis e óleos minerais. (BIENKOWSKI, 1993)

A tabela 3 resume as principais características desses quatro tipos de fluidos de corte, utilizando uma escala de 1 a 4, onde 4 representa a melhor situação. (SREEJITH & NGOI, 2000)

Tabela 3 - Características dos Fluidos de Corte

Característica	Sintéticos	Semissintéticos	Emulsionáveis	Óleos Minerais
Remoção de Calor	4	3	2	1
Lubrificação	1	2	3	4
Manutenção	3	2	1	4
Filtração	4	3	2	1
Aspectos Ambientais	4	3	2	1
Custo	4	3	2	1
Aumento Vida Rebolo	1	2	3	4

Fonte: SREEJITH & NGOI (2000)

O custo relacionado ao fluido de corte é relativamente alto no total da produção. Estima-se que esse valor gira em torno de 16%, fato que implica em bastante cuidado na escolha e manuseio do mesmo. (WALKER, 2013)

Além do elevado gasto com fluidos de corte, o principal problema relacionado aos mesmos consiste nos danos à saúde humana e também ao meio ambiente, fato que vem ilustra o tema do presente estudo, no qual o grafite surge como uma alternativa natural para o processo de lubrificação na usinagem.

Os fluidos são formados por substancias tóxicas, como dispersantes, anticorrosivos, biocidas e corantes. Operadores estão sujeitos ao contato direto via tato, inalação de partículas ou até mesmo por engoli-las, provocando danos à saúde. (ANON, 2003)

Uma das principais causas de danos ao meio ambiente consiste no desperdício de fluido de corte e seu conseqüente descarte de maneira errada na natureza. Muitas vezes o fluido é descartado diretamente na natureza sem qualquer tratamento prévio, podendo assim provocar sérios danos a mesma. (IRANI, BAUER, & WARKENTIN, 2005)

Como alternativas a essa técnica convencional de lubrificação, existem novas tendências na usinagem, dignas de excelentes estudos: utilização de bocais especiais, otimização da vazão do fluido, aumento da vida útil do fluido, utilização de lubrificantes sólidos (grafite), técnica MQL etc.

A técnica MQL pode ser definida como a técnica que utiliza uma baixa quantidade de fluido (< 200ml/h) junto com ar comprimido. Essa mistura é direcionada exclusivamente à zona de corte com intuito de evitar desperdícios. (RUZZI, 2017)

3. RETIFICAÇÃO DE TRILHOS

Um dos exemplos práticos e muito utilizado no cotidiano consiste na retificação de trilhos ferroviários. Os rebolos utilizados no esmerilhamento de trilhos possuem as mesmas características de rebolos convencionais do mercado, normalmente empregados em funções como corte, afiação e retificação de determinados materiais. Contudo, eles possuem uma relação direta com o comportamento dinâmico da esmerilhadora, que, por sua vez, só funciona adequadamente se integrar todos os rebolos de maneira correta em relação ao ângulo de ataque e velocidade de avanço no trilho. Esses parâmetros são muito frequentemente configurados de maneira empírica, justificando a necessidade de se estudar o assunto para melhor aproveitamento do sistema, fato que diminuirá desperdícios, tanto de material, como de tempo. (ZHI, LI, & ZAREMBSKI, 2015).

O esmerilhamento é um processo baseado na remoção regulada de metal por rebolos acoplados a motores elétricos e componentes hidráulicos, constituindo o vagão esmerilhador, um dos componentes do complexo sistema conhecido como esmerilhadora, apresentada na figura 10. Algumas de suas especificações podem ser encontradas no catálogo da fabricante presente no Anexo A.

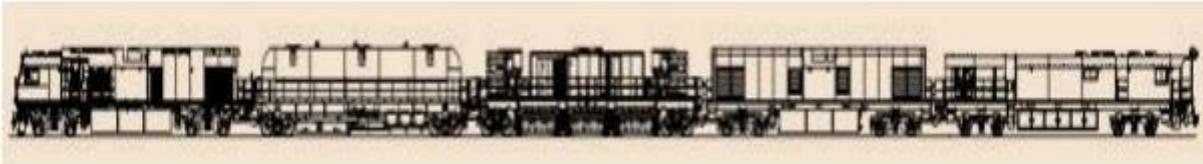
Figura 10 - Esmerilhadora de Trilhos



Fonte: LORAM MAINTENANCE OF WAY INC. ®

O sistema opera em intervalos predefinidos pela equipe de manutenção preventiva para remoção de trincas e aprimorar o perfil do boleto do trilho, de modo a controlar o aumento de defeitos superficiais por fadiga, corrugação, desgaste e escoamento plástico dos trilhos. Além disso, garante maior confiabilidade nas inspeções de qualidade dos trilhos e diminui a geração de ruído na superfície de contato roda-trilho.

Figura 11 - Componentes da Esmerilhadora



Fonte: FARIA (2017)

A esmerilhadora possui diferentes vagões em sua composição, cada um com a sua devida função no processo, como observado na figura 11 acima. O primeiro é chamado de carro controle, local de comando das funções do sistema pelo operador. O seguinte corresponde ao tanque de água, encarregado de evitar eventuais incêndios causados pelas fagulhas oriundas do esmerilhamento. O terceiro é o vagão esmerilhador de fato, cujas funções já foram mencionadas no parágrafo anterior. O quarto é o vagão de força, responsável pela geração de energia para o sistema através de geradores e motores. O último vagão é denominado de suporte, no qual o operador também pode controlar o sistema, no entanto na direção oposta. (FARIA, 2017)

3.1. FUNCIONAMENTO DA ESMERILHADORA

De acordo com Ferreira (2010), o funcionamento da esmerilhadora, durante o processo de manutenção preventiva da ferrovia, pode ser descrito pela seguinte sequência:

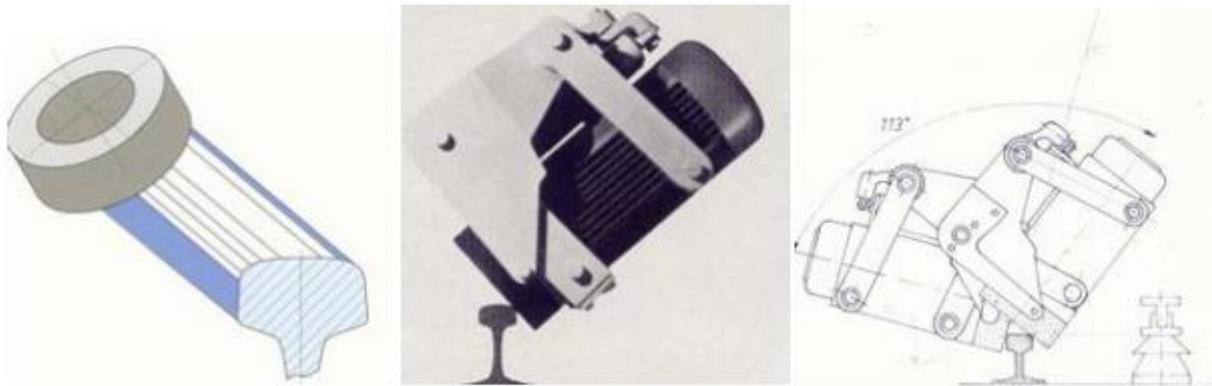
- Ao passo que a esmerilhadora caminha, são realizadas duas medições por trilho com intuito de mensurar a quantidade de material removido. Para isso, utilizam-se comparadores próprios, desenvolvido pelo fabricante;
- O esmerilhamento é realizado através do contato dos rebolos ao boleto do trilho, juntamente com uma constante dispersão de água na zona de contato para minimizar o aquecimento do sistema, remover detritos produzidos nos trilhos e diminuir o ruído;
- Ao final do trabalho, são realizadas medições e os dados obtidos são analisados graficamente em tempo real e, posteriormente, arquivados para análises

subsequentes acerca da permanência dos defeitos residuais em tolerâncias permitidas para cada trilho;

- Deve-se considerar, para esta análise, o tipo de esmerilhadora utilizada, número de passes, velocidade de avanço, pressões empregadas, especificações dos rebolos utilizados e a técnica de orientação empregada.

Durante o esmerilhamento, o rebolo atua tangencialmente ao perfil do boleto, sendo variável o ângulo de ataque de acordo com a necessidade. A figura 12 apresenta os componentes desse sistema, assim como um esboço de atuação do rebolo.

Figura 12 - Atuação do Rebolo no Trilho



Fonte: MARTINS (2010)

Para que o perfil do boleto do trilho seja completamente retificado, são necessários oito rebolos. Portanto, a esmerilhadora a ser empregada deve conter rebolos em números múltiplos de oito para cobrir todo o boleto. Com isso, para ferrovias de uso essencial para determinada companhia, a qual não há tempo para parada na operação, utilizam-se esmerilhadoras com alto número de rebolos para que o trabalho seja realizado em passe único. No caso de manutenção em trilhos de metrô por exemplo, normalmente utilizam-se esmerilhadoras com poucos rebolos, visto que há a disponibilidade de cumprir planos de manutenção preventiva em horários que esse tipo de transporte não está em operação, possibilitando o aumento no número de passes. (MARTINS, 2010)

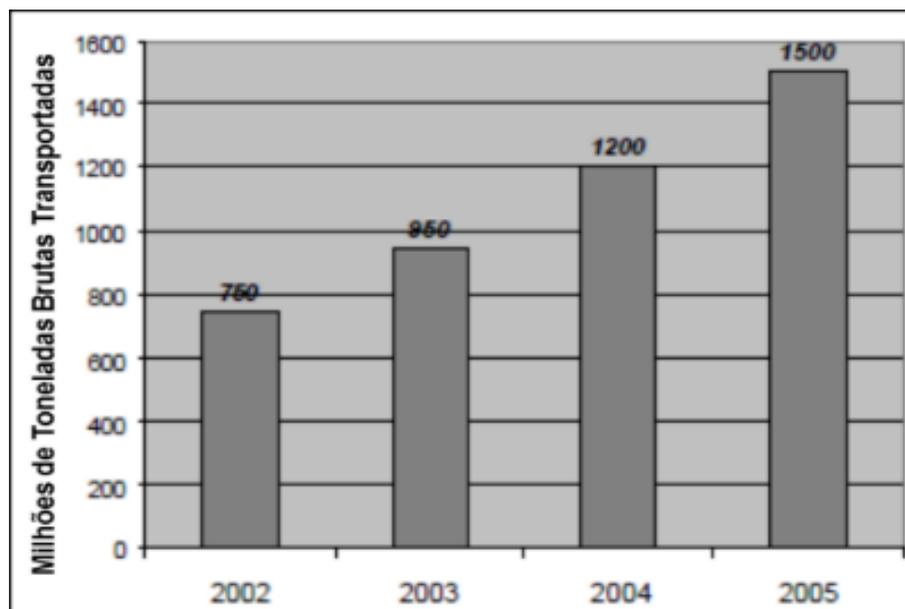
Estima-se que, durante o processo de esmerilhamento preventivo dos trilhos, um mínimo de 0,20mm e um máximo de 0,30mm é retirado do boleto de cada trilho. (FERREIRA, 2010)

3.2. BENEFÍCIOS DA RETIFICAÇÃO DE TRILHOS

Após a apresentação dos conceitos envolvidos no processo de esmerilhamento, esta seção consiste em expor os benefícios que podem ser obtidos com sua implementação. Para isso, será exposto resultados obtidos por estudos científicos, os quais consistem de uma análise da utilização do processo de retificação de trilhos. Serão observadas melhorias em aspectos, como expectativa de vida útil dos trilhos, número de trocas de trilhos e produção.

Um fator de extrema importância na ferrovia é a média da expectativa de vida útil dos trilhos, medida através de milhões de toneladas brutas transportadas (MTBT) ou, em inglês, *mgt* (*million gross tons*). A figura 13 ilustra o aumento de 750 mgt em 2002 para 1500 mgt em 2005, representando, assim, um aumento de 100% em 3 anos da utilização do esmerilhamento.

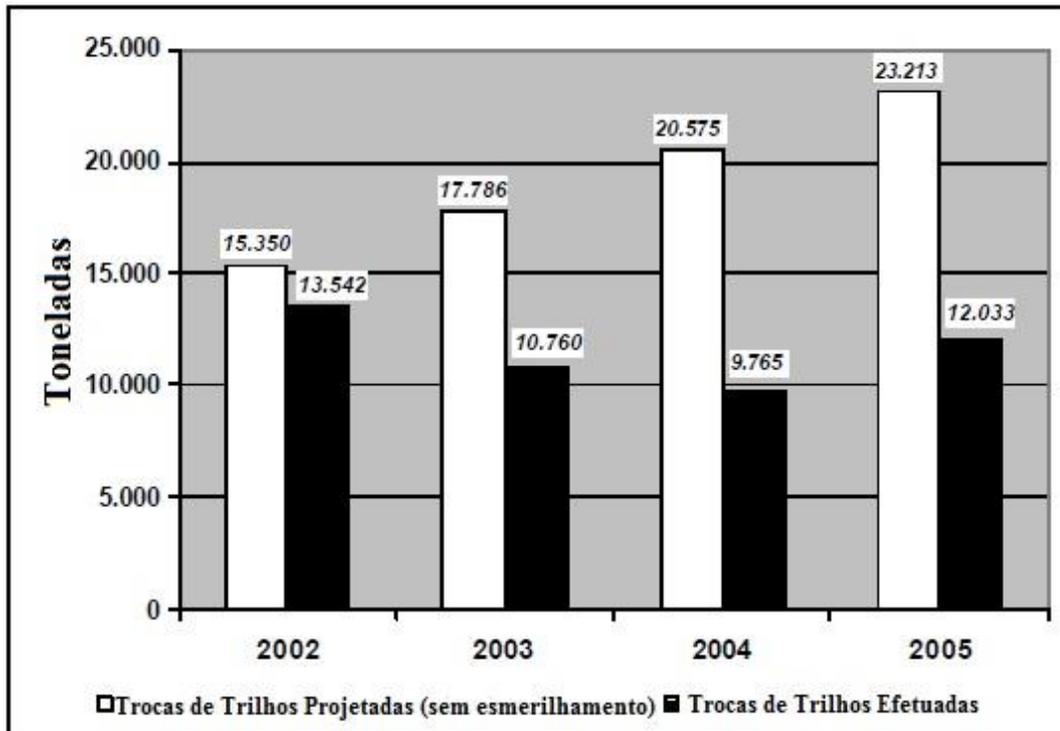
Figura 13 – Toneladas Brutas Transportadas



Fonte: SILVA, VIDON JR., RIPPETH, & CALDWELL(2005) (Adaptado)

A introdução do esmerilhamento obteve significantes resultados no número de trilhos trocados. De acordo com a figura 13, pode-se perceber o aumento na expectativa de vida útil dos trilhos, fato que reduz a necessidade de trocar os trilhos. Em sequência, a figura 14 apresenta essa redução na quantidade de trocas, juntamente com o número projetado de trocas sem a implantação do esmerilhamento ao longo dos anos analisados por Silva et al (2005).

Figura 14 - Trocas de Trilhos Realizadas

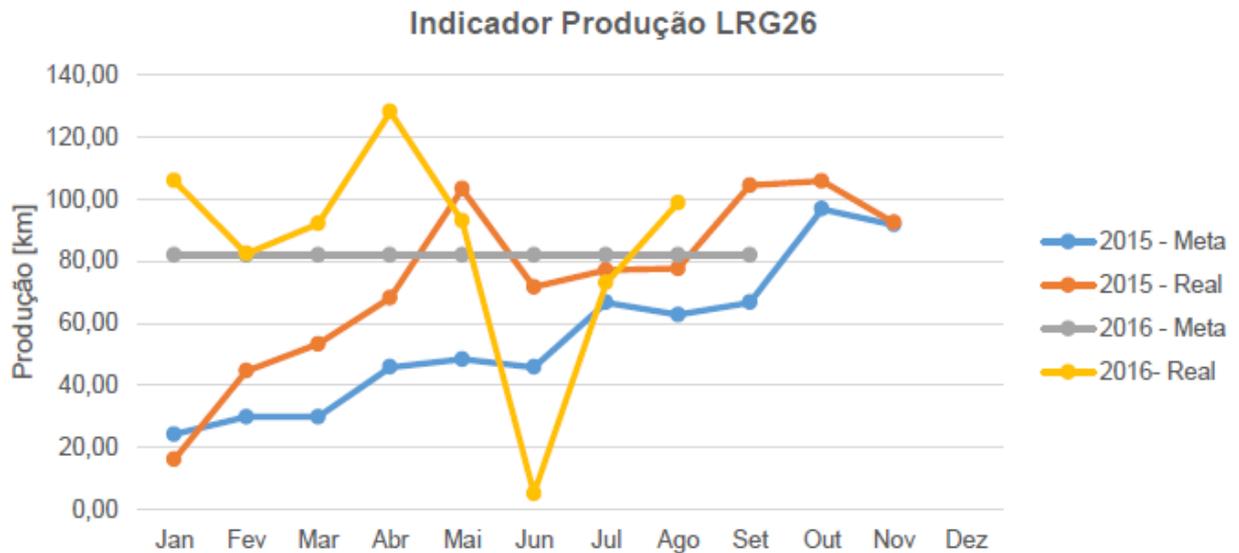


Fonte: SILVA, VIDON JR., RIPPETH, & CALDWELL (2005) (Adaptado)

Com esse levantamento, estima-se que cerca de 30000 toneladas em trocas foram evitadas de 2002 a 2005, fato que representa uma economia de aproximadamente US\$25 milhões nos valores de 2005, aproximadamente US\$ 31,57 milhões em valores atuais, de acordo com *US Government CPI* (Índice de Compra do Consumidor do Governo dos EUA). Assim, o estudo de Silva et al (2005) transformou em números a expectativa em torno da implementação do processo de esmerilhamento de trilhos, provando ser uma solução economicamente viável e interessante.

Outro estudo realizado recentemente por Borges et al. (2016) apresentou uma metodologia de implantação do uso de retificação de trilhos durante os anos de 2015 e 2016. Para isso a esmerilhadora Loram LRG 26 foi utilizada, possuindo 24 rebolos, 32.832 L de água disponíveis nos tanques, velocidade máxima de esmerilhamento de 15km/h e ângulos de esmerilhamentos entre -20° a $+50^{\circ}$. Após o início do uso, Borges et al. (2016) obtiveram o seguinte resultado para o indicador de produção, presente na figura 15.

Figura 15 - Indicador de Produção LRG26



Fonte: BORGES, JORGE, LOBATO, SANTOS, & VIANA (2016)

É possível perceber que após a implantação da esmerilhadora, em 2015, a produção real obtida foi maior que a meta estipulada ao longo de todo o ano. Com isso, foi decidido levantar essa meta para o ano de 2016. Porém, após um início satisfatório, foi observado uma queda brusca na produção no mês de junho. Os motivos para esse acontecimento não foram evidenciados no estudo abordado. A partir de julho, a produção retomou as expectativas, alcançando uma alta no mês de agosto. De forma geral, pode-se afirmar que a retificação de trilhos nessa companhia foi implantada após uma série de estudos e cumpriu com as expectativas criadas, provando novamente sua eficácia.

4. GRAFITE COMO LUBRIFICANTE SÓLIDO

Neste capítulo, serão abordados estudos realizados sobre a aplicação do grafite como lubrificante sólido no campo da usinagem, tratando de temas como análise de vida de ferramenta de corte, avaliação da rugosidade e temperatura da peça, melhoras de performance e, por fim, o desenvolvimento de rebolos com grafite em sua composição utilizados na retificação.

4.1. ANÁLISE DE VIDA DE FERRAMENTA DE CORTE

O estudo de Marques et al (2015) abordou a aplicação do grafite no fluido de corte de base vegetal durante o processo de torneamento de uma superliga de níquel denominada Inconel

718. Para avaliar a influência do grafite como lubrificante sólido, mantiveram-se constantes a velocidade e profundidade de corte, além do avanço. A concentração de grafite no fluido variou entre 0%; 1,33%; 5% e 10% e uma ferramenta de metal duro foi utilizada.

Foi utilizado um torno CNC Multiplic 35D, produzido por ROMI, com 16kW de potência no eixo principal e rotação máxima de 3000 rpm. As barras de Inconel 718 apresentavam a condição de recozidas, dureza média de 214 HV30, com 101mm de diâmetro e 250mm de comprimento. Sua composição química pode ser analisada na tabela a seguir:

Tabela 4 - Composição Química Inconel 718 % peso

Ni	Fe	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	Si	Co	C	Mn	Cu	V	B
52,92	18,91	18,34	5,13	2,99	0,98	0,57	0,04	0,03	0,033	0,02	0,01	0,01	0,0043

Fonte: MARQUES, GUIMARÃES, SOUSA, REDDY, & MACHADO (2015)

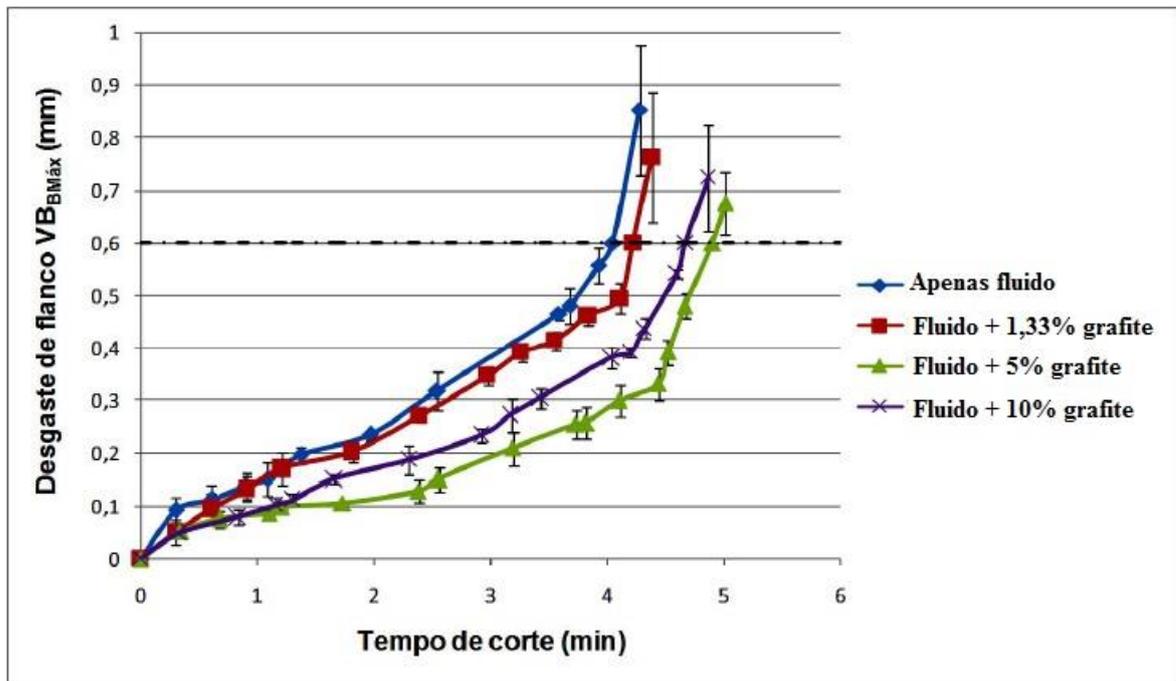
As ferramentas de corte utilizadas eram de metal duro ISO SNMG120408-SM classe (S1115) com presença de quebra cavaco e revestidas por TiAlN/(AlCr)2O3/TiAlN. Raio de ponta igual a 0,8mm, ângulo de folga/saída de +/- 6° e ângulo de posição de 75°. Para cada evento foi utilizada uma aresta de corte nova e três repetições.

O fluido de corte utilizado era de base vegetal Vasco 1000 miscível em água com concentração de 8%. O fluido foi aplicado na posição sobre-cabeça com vazão de 4,5 L/min. Ele foi misturado com o grafite nas concentrações já informadas anteriormente, sendo sua granulometria variando entre 24 e 27µm.

As medidas de desgaste da ferramenta foram feitas através de microscopia ótica, com o estereomicroscópio Olympus SZ6145TR. O fim da vida da ferramenta foi estipulado como sendo de 0,6mm para o desgaste de flanco.

Os resultados obtidos para a análise da vida da ferramenta podem ser encontrados na figura a seguir.

Figura 16 - Vida da Ferramenta na Usinagem do Inconel 718



Fonte: MARQUES, GUIMARÃES, SOUSA, REDDY, & MACHADO (2015) (Adaptado)

Pode-se perceber que a adição de grafite ao fluido permitiu um aumento significativo na vida da ferramenta, ressaltando que a mistura do fluido e 5% de grafite (em peso) apresentou os melhores resultados. Numericamente, essa adição de grafite representou um aumento de cerca de 17% na vida da ferramenta.

Segundo os autores, esse comportamento pode ser explicado pelas excelentes características do grafite como lubrificante, principalmente à sua elevada condutividade térmica. Além disso, a formação de uma fina camada de grafite na superfície da ferramenta reduz o atrito entre peça/ferramenta, facilita o escoamento de material, diminuindo o desgaste.

4.2. AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE EM UMA LIGA DE TITÂNIO

No estudo realizado por Moura et al (2013), uma peça de titânio liga Ti-6Al-4V foi torneada utilizando-se do grafite, que também foi misturado junto ao fluido de corte. Foram utilizados dois tipos: grafite malha 625 (20 μ m) e grafite 325 (40 μ m), sendo realizados testes à seco e com MQL, contendo apenas o fluido e a mistura com 20% em peso de grafite para fins comparativos. Além de grafite, os autores também utilizaram o bissulfeto de molibdênio (MoS₂) como lubrificante sólido (6 μ m).

Foi utilizado o mesmo tipo de torno descrito no estudo anterior. O corpo de prova da liga de titânio tinha diâmetro de 200mm e 300mm de comprimento. O fluido de corte empregado foi do tipo sintético (Quimatic® Super Fluido 3) através da técnica MQL com pressão de 3 bar e vazão de 5ml/min. As ferramentas de corte também são idênticas às descritas anteriormente.

Os testes foram realizados com lubrificação à seco e MQL, com apenas o fluido e com a mistura com os lubrificantes sólidos já especificados. Os parâmetros de corte podem ser encontrados na tabela a seguir:

Tabela 5 - Parâmetros de Corte

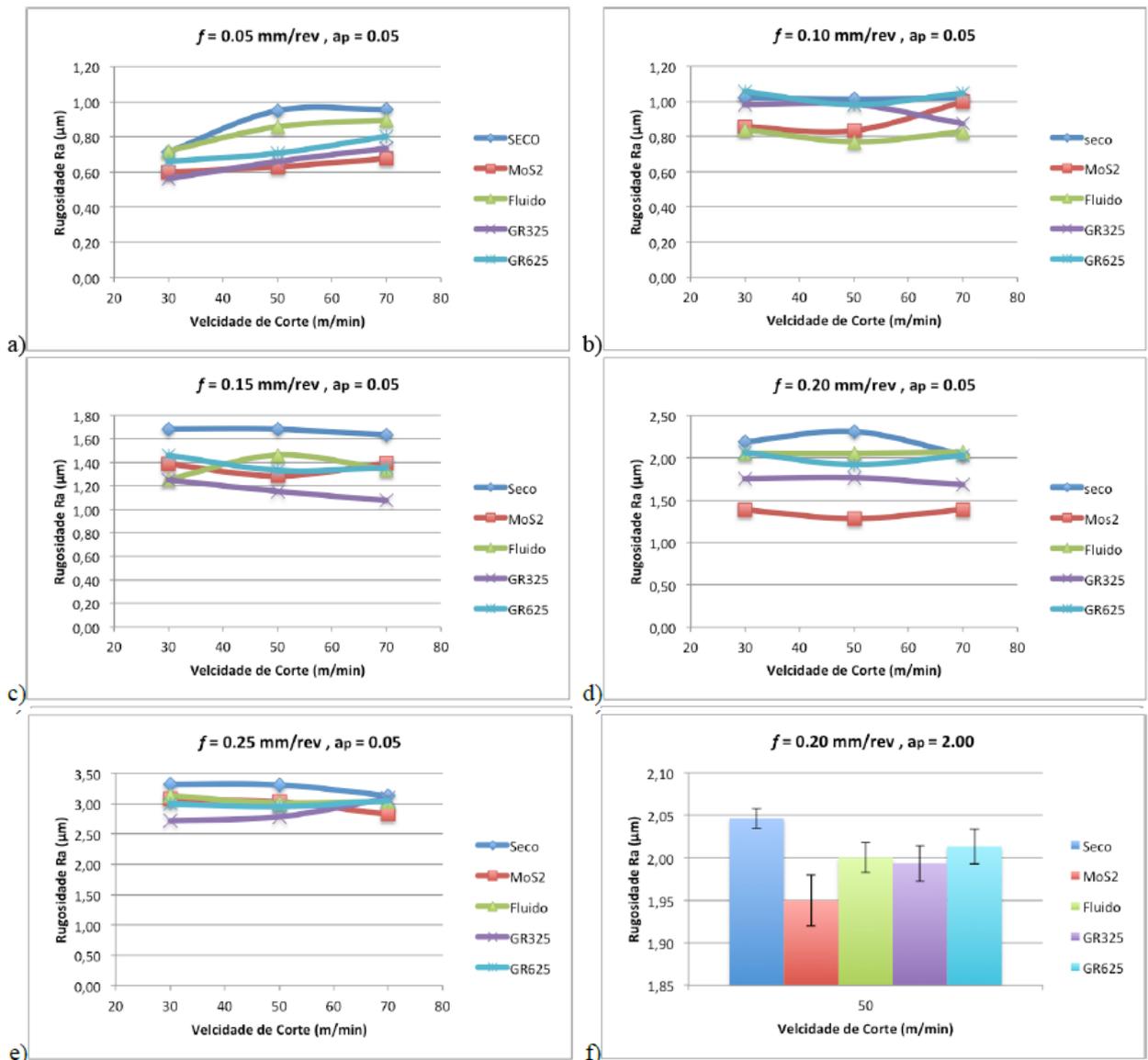
v_s (m/min)	f (mm/rev)	a_p (mm)
30, 50 e 70	0,10; 0,15; 0,20; 0,25	0,50
30, 50 e 70	0,20	2,00

Fonte: (MOURA, SILVA, & OLIVEIRA, 2013)

A rugosidade **Ra** foi aferida por um rugosímetro Mitutoyo SJ-201 com cutoff de 0.8mm x 5 leituras. O comprimento de amostragem é definido pela Norma ABNT NBR ISO 4287 (2002). Por fim, foram realizadas 6 medições para cada condição de corte com intuito estatístico, sendo a temperatura média de 28°C.

Os resultados para a análise da rugosidade superficial da liga Ti-6Al-4V estão representados na figura 17.

Figura 17 - Gráficos de Rugosidade Ra



Fonte: MOURA, SILVA, & OLIVEIRA (2013)

Percebe-se que o MoS₂ foi o lubrificante sólido com o melhor desempenho, seguido pelo grafite 325 e 625, sendo que este último apresentou resultados muito semelhantes com o processo no qual apenas fluido refrigerante foi empregado. Como o foco deste trabalho consiste em avaliar o desempenho do grafite, nota-se que o grafite 325 apresentou rugosidade menor se comparado ao processo à seco e com apenas fluido, fato que enfatiza sua função lubrificante. Ademais, percebe-se que o aumento da velocidade de corte cria uma tendência de diminuição da rugosidade, que aumenta significativamente com o aumento do avanço. Por fim, a profundidade de corte não teve grande influência na rugosidade.

4.3. AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA EM UMA LIGA DE TITÂNIO

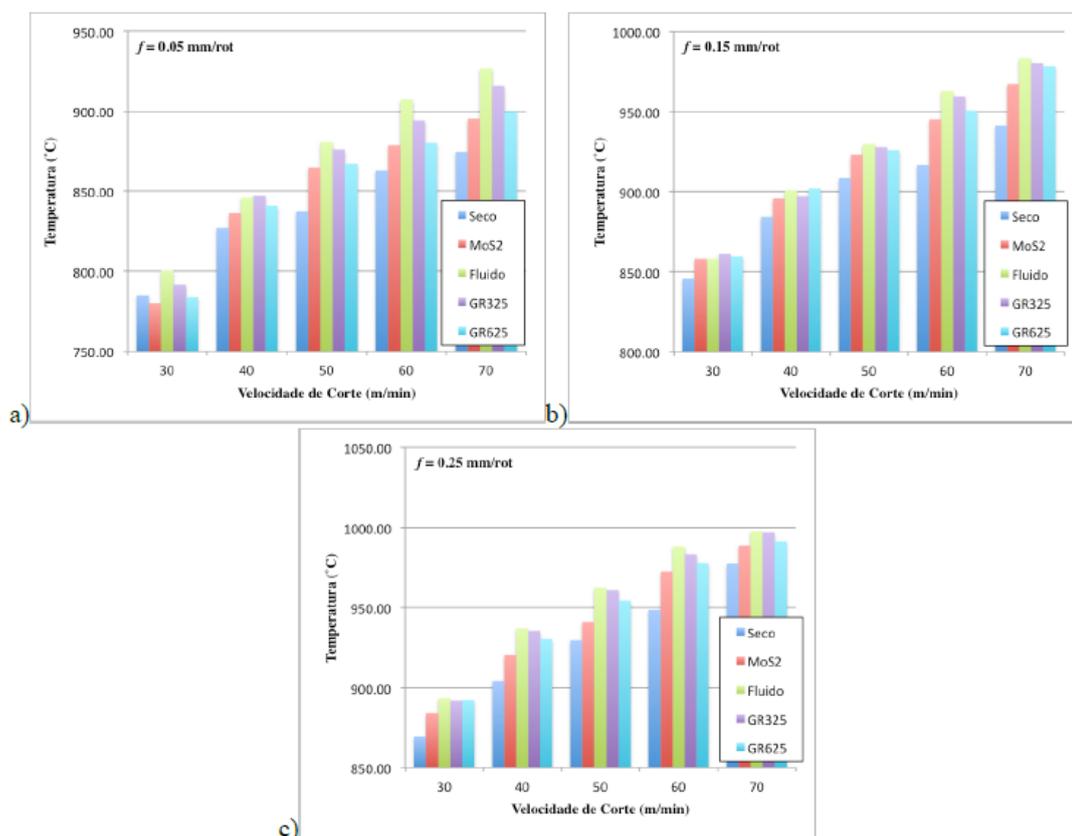
Com relação à temperatura, Tabak et al (2014) também utilizaram a liga Ti-6Al-4V como material do corpo de prova. Tal material é de alto custo, sendo interessante observar qualquer melhoria no processo.

Foi utilizado o torno de comando numérico REVOLUTION RV220. Uma ferramenta de metal duro foi utilizada, sendo da classe K10 com 10x10 mm de seção por 100mm de comprimento, ângulo primário de 75°, ângulo de folga de 5° e com profundidade de corte constante durante o processo. A velocidade de corte variou entre 30 e 70 m/min, assim como o avanço entre 0,05 e 0,25 mm/rot.

Os testes foram realizados com o fluido sintético Super Fluido 3 da Quimatic®, sendo os parâmetros de lubrificação: à seco, MQL contendo apenas fluido e MQL contendo grafite malha 625 e 325, além de MoS₂.

Os resultados para a análise da temperatura da liga Ti-6Al-4V estão representados na figura 18.

Figura 18 - Temperaturas de Usinagem



Fonte: TABAK, MOURA, & SILVA (2014)

No geral, a usinagem a seco obteve os melhores resultados mesmo com o aumento da velocidade de corte, fato provavelmente devido à baixa pressão utilizada no processo. A presença de lubrificantes sólidos junto ao fluido de corte garantiu melhores resultados, se comparados ao uso de apenas o fluido, sendo que os melhores resultados foram obtidos com (MoS_2), grafite 625 e grafite 325, respectivamente. Essa melhora pode ser explicada à boa lubrificação na interface peça-ferramenta produzida pelo grafite, garantindo um bom deslizamento do material da peça, reduzindo deformações plásticas e a liberação de energia em forma de calor.

4.4. MELHORIA DO DESEMPENHO NA USINAGEM DO AÇO AISI 1045

Reddy e Rao (2007) fizeram uso de uma fresadora vertical CNC Rambdaudi Rammatic 500 e de pó de grafite bem fino (cerca de $2\mu\text{m}$ o tamanho do grão), que foi liberado diretamente na superfície de contato entre a ferramenta e a peça (aço AISI 1045).

Os parâmetros adotados no estudo podem ser analisados na tabela a seguir.

Tabela 6 - Parâmetros do Fresamento do Aço AISI 1045

Parâmetro	Unidade	Nível I	Nível II	Nível III
Vel. Corte	m/min	150	200	250
Avanço	mm/min	200	300	400
Ângulo de Inclinação	Graus	4	10	16
Raio Ponta Ferramenta	mm	0,4	0,8	1,2

Fonte: REDDY & RAO (2007)

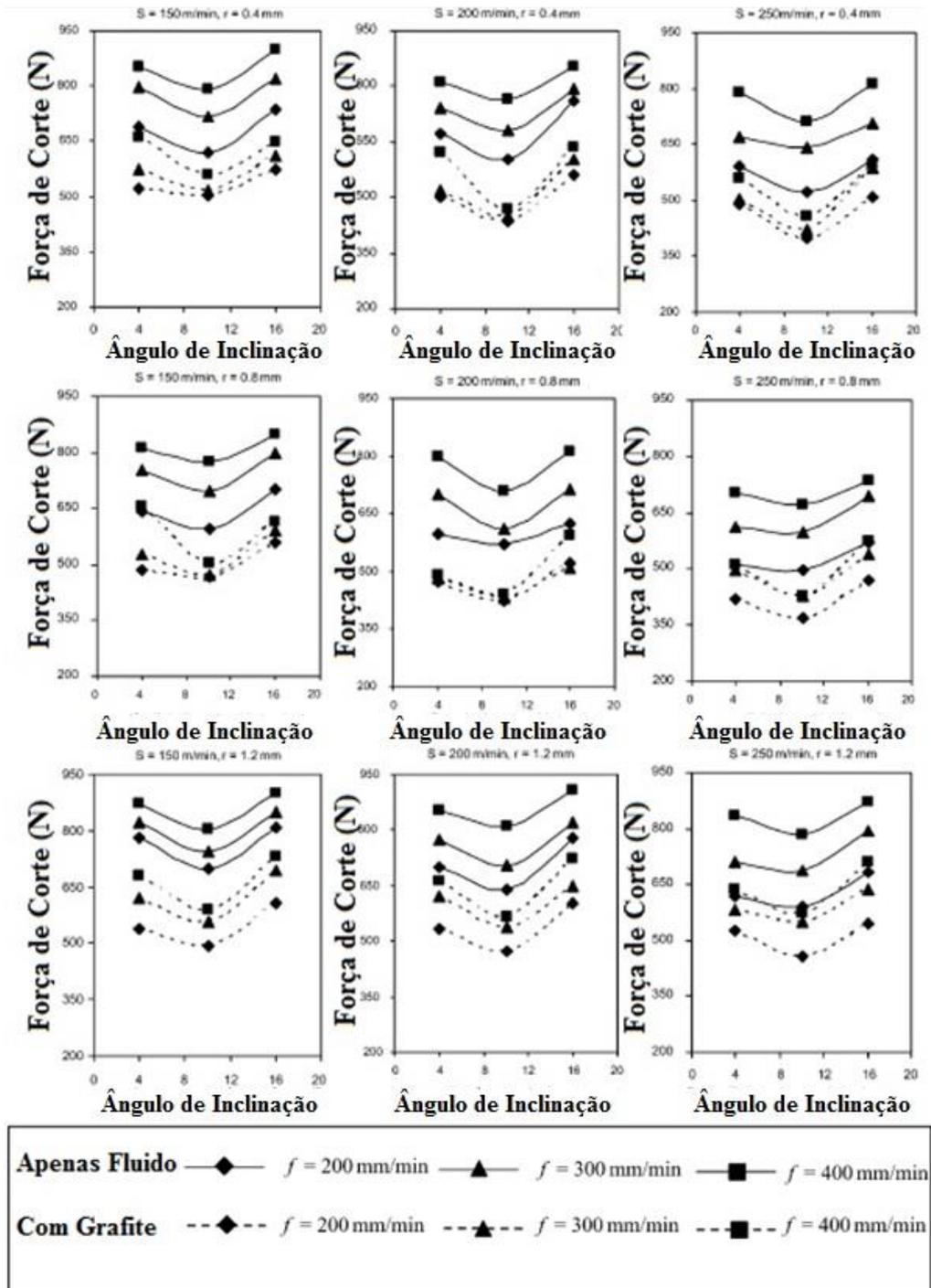
As fresas utilizadas pelos autores eram de TiAlN da fornecedora Kennametal Widia com diâmetro de 20mm, comprimento de 108mm, comprimento da ranhura de 38mm, ângulo da hélice 30° , dureza 1570 HV, densidade $14,5 \text{ g/cm}^3$ e resistência à ruptura transversal de 3800 N/mm^2 .

Os corpos de prova do aço AISI 1045 possuíam $100 \times 75 \text{ mm}$ e 20mm de espessura recozidos a 850°C durante 1 hora. Assim, a dureza obtida ficou em torno de 170 BHN. O fluido de corte utilizado foi uma mistura oleosa miscível em água na proporção 1:10. As forças presentes no sistema foram medidas por um dinamômetro Kistler tipo 9257A e por um gravador Graphtec-4. Após uma série de tentativas preliminares, os autores observaram que o fluxo mais

adequado de grafite na zona de contato da peça com a ferramenta é dado por 3g/s, valor que garante a lubrificação necessária ao sistema.

A força de corte é uma das variáveis físicas mais importantes na usinagem. Ela pode ser muito útil para entender a usinabilidade dos materiais, desgaste, precisão da usinagem e qualidade superficial. A figura 19 apresenta os resultados obtidos para essas forças.

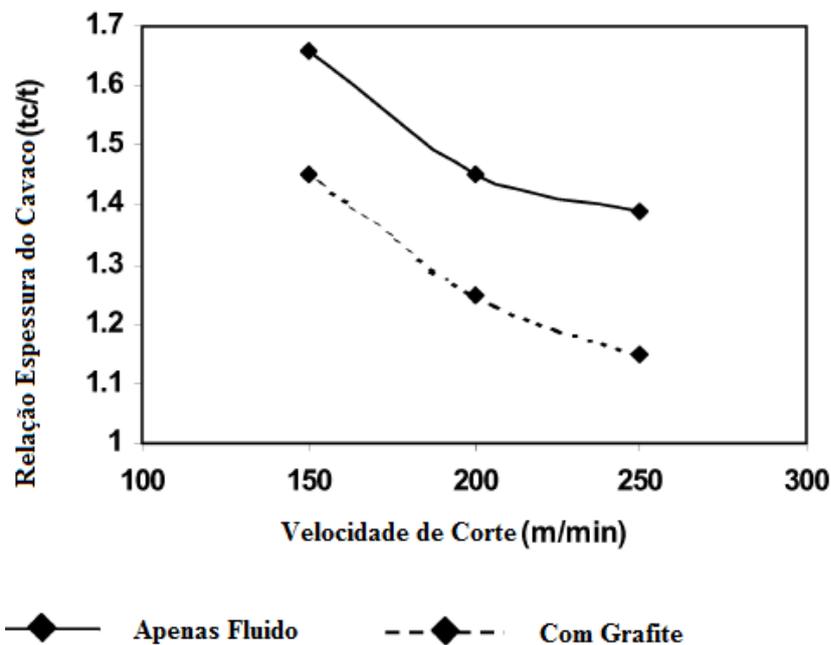
Figura 19 - Variação das Forças de Corte com o Ângulo de Inclinação da Ferramenta



É notável a diminuição das forças de corte quando o ângulo de inclinação passou de 4° para 10°, ficando claro que seu aumento diminuiu as forças, assim como o calor gerado na zona de trabalho. Porém, aumentar este ângulo além de 10° torna o processo crítico, aumentando as forças e o atrito, gerando mais calor. Além disso, é possível observar que as amostras submetidas à lubrificação por grafite (linhas tracejadas) obtiveram menores valores para as forças de corte em todas as configurações, caracterizando a excelente propriedade do grafite como condutor térmico e lubrificante.

Após a realização dos ensaios, os autores observaram diferenças na formação do cavaco do aço usinado com e sem grafite. As amostras sujeitas à utilização do grafite apresentaram aspecto pequeno, tubular e com cores mais claras, indicando baixa geração de calor durante o processo. As amostras sob ação do fluido refrigerante apresentaram coloração escura, caracterizando alta geração de calor e oxidação da superfície. Essa diferença na espessura do cavaco pode ser analisada na figura abaixo.

Figura 20 - Relação Espessura do Cavaco



Fonte: REDDY & RAO (2007)

No geral, o processo no qual se fez presente o uso do grafite foi superior se comparado ao processo com fluido. Assim, como o processo foi dito superior, toda produtividade pode também sofrer essa melhoria na qualidade, fato de extrema importância. Além disso, o grafite consiste numa alternativa sustentável de lubrificação, visto que eliminaria o uso de fluidos de cortes, muitas vezes agressivo ao meio ambiente e operador.

4.5. REBOLOS COM GRAFITE EM SUA COMPOSIÇÃO

A utilização do grafite na composição de rebolos surge como uma interessante opção para a retificação. Foram encontrados apenas dois trabalhos referentes ao tema, sendo os mesmos apresentados e discutidos ao longo deste capítulo, evidenciando seus procedimentos experimentais e resultados obtidos.

Shaji e Radhakrishnan (2003) produziram rebolos vitrificados e resinoides com diferentes concentrações de grafite em massa. Como informado anteriormente, os rebolos vitrificados são os mais utilizados no mercado e são produzidos de argila ou feldspato, originando uma estrutura similar ao vidro (daí o nome). O processo de produção se iniciou com a mistura dos abrasivos, material ligante, aditivos para porosidade, água e grafite. Em seguida, a mistura é disposta em molde, que será levado ao forno por um grande tempo e depois é resfriada vagarosamente.

Utilizou-se a retificadora superficial de fuso horizontal da marca BLOHM (6,5 kW) e as condições da retificação podem ser analisadas na tabela seguinte.

Tabela 7 - Condições do Experimento de Shaji e Radhakrishnan (2003)

Rebolo	A 60 L5B M4
Grafite	3%, 6%, 9% em massa do rebolo
Dimensões do Rebolo	250 – 76,2 – 25 mm
Peça de Trabalho	Aço Médio Carbono HRC 60
Avanço	10 m/min
Velocidade do Rebolo	42 m/s
Profundidade de Corte	10 a 80µm, em passos de 10 µm
Método de Retificação	Seco

Fonte: SHAJI & RADHAKRISHNAN (2003) (Adaptado)

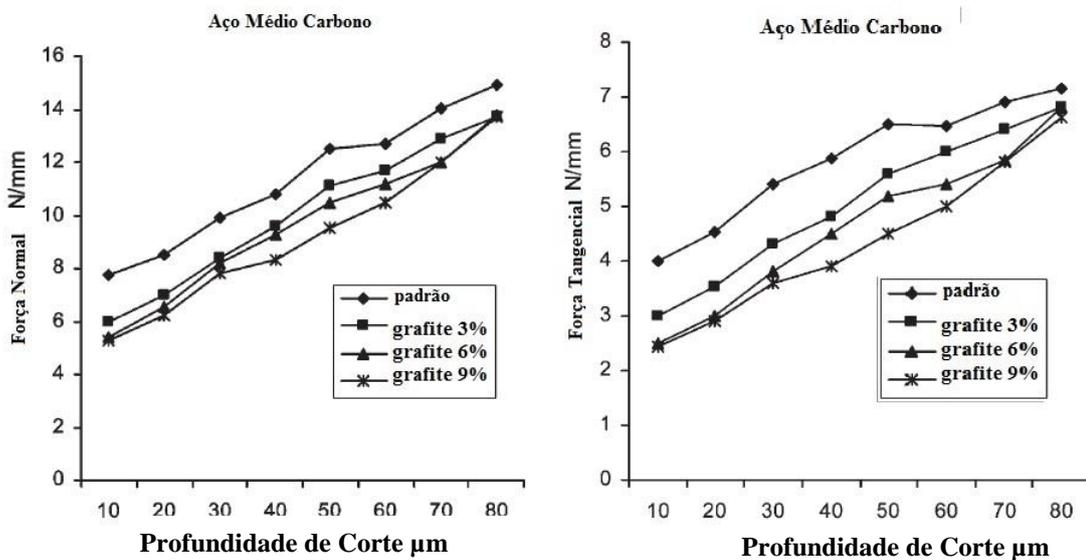
Ainda no processo de fabricação do rebolo vitrificado, a temperatura máxima do processo pode chegar a 1400°C. Porém o grafite começa a se oxidar a partir de 550°C, fazendo com que o rebolo perca sua propriedade lubrificadora e afete os resultados esperados. Assim, rebolos produzidos dessa maneira já não possuíam mais grafite em sua composição e não suportaram o teste de velocidade realizado nas condições iniciais acima descritas.

A alternativa encontrada por Shaji e Radhakrishnan (2003) foi produzir os rebolos com liga resinóide, mesma liga utilizada na retificação de trilhos. No geral, a forma de produção se

assemelha ao processo realizado para rebolos vitrificados. Contudo, o processo de cura ocorre a 150-200°C somente, valores abaixo à temperatura de oxidação do grafite. Como padrão, foi escolhido o rebolo A 60 L5B M4, que consiste de 91% de grãos abrasivos e 9% de material ligante (por peso). Foram adicionadas diferentes concentrações de grafite a fim de avaliar seu comportamento (3%, 6% e 9% por peso).

Esse estudo avaliou componentes de força, energia específica, rugosidade superficial e desgaste do rebolo. Os resultados obtidos podem ser analisados nas figuras 21 e 22.

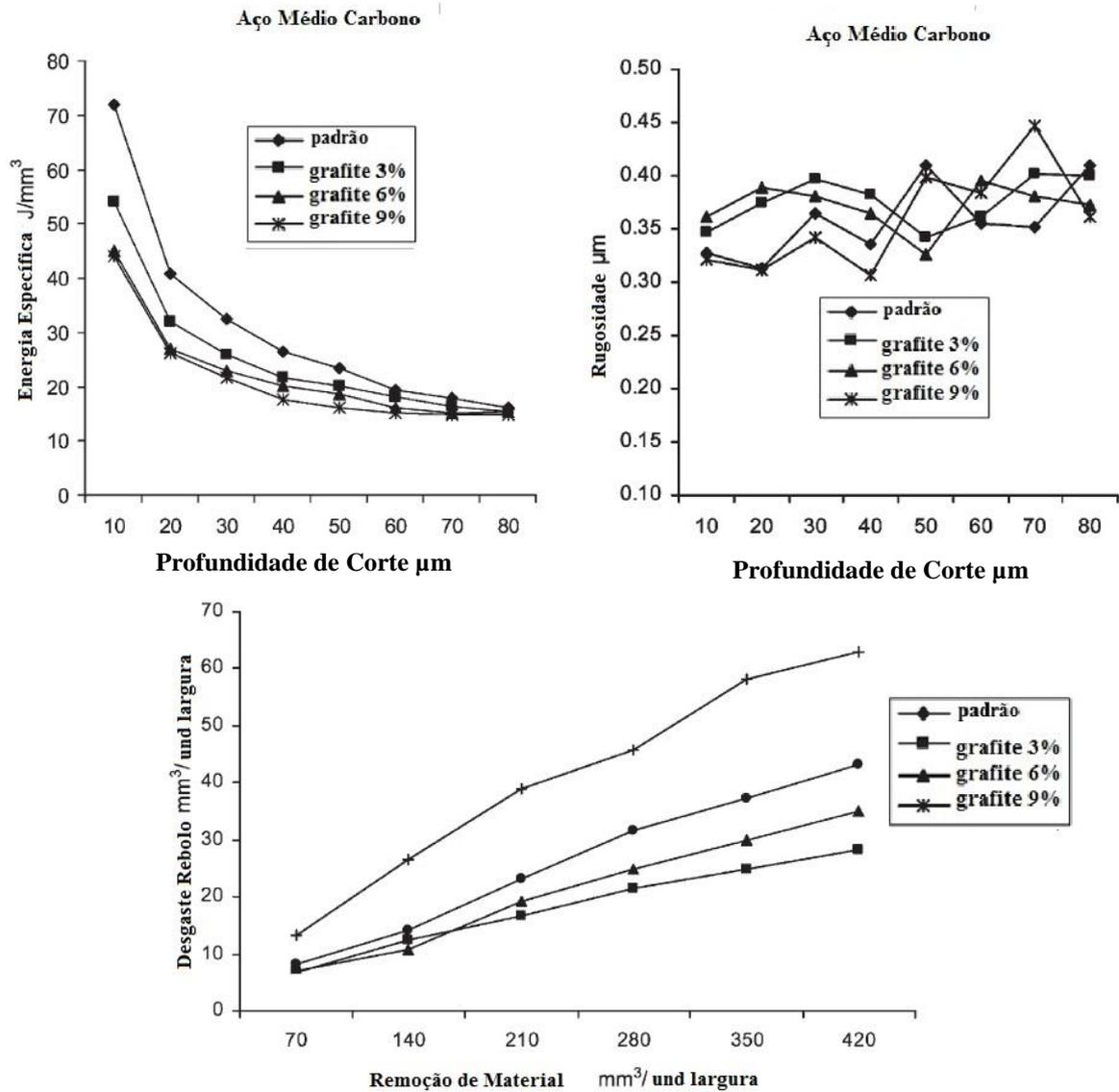
Figura 21 – Componentes da Força de Corte



Fonte: SHAJI & RADHAKRISHNAN (2003) (Adaptado)

De acordo com Shaji e Radhakrishnan (2003), as forças observadas nos resultados são componentes originárias do cisalhamento, micro fraturas, carregamento no rebolo e atrito entre grãos, ligante, aditivos e a peça de trabalho. Pode-se perceber, pela figura 21, que as componentes das forças diminuem com o emprego de grafite na composição do rebolo, destacando os menores valores para a concentração de 9%. Esse fato esclarece e comprova o papel do grafite como lubrificante no processo. A componente tangencial da força tem relação direta com a geração de calor com a peça. Portanto, seu decaimento com o uso do grafite implica numa menor geração de calor, fator atrelado à qualidade superficial da peça e também da vida útil do rebolo.

Figura 22 - Análise da Energia Específica, Rugosidade e Desgaste do Rebolo



Fonte: SHAJI & RADHAKRISHNAN (2003) (Adaptado)

A figura 22 fornece o resultado da energia específica gerada pelo rebolo, a rugosidade na superfície do corpo de prova e o desgaste do rebolo. A energia sofreu uma baixa devido à redução do escorregamento entre os componentes do rebolo devido ao grafite. A rugosidade apresentou elevada variação, tanto para o rebolo padrão, quanto para os de grafite. Porém, no início do processo, com baixa profundidade de corte, os rebolos de grafite 9% obtiveram menores valores de rugosidade. Por fim, o desgaste nos rebolos de grafite foi maior que o do rebolo padrão, podendo ser explicado pelo enfraquecimento da liga junto aos grãos ocasionado pelo grafite e sendo extremamente grande com a concentração de 9%.

Seguindo o mesmo caminho, Tsai e Jian (2012) também desenvolveram rebolos com a presença de grafite em sua composição. Para isso, o óxido de alumínio foi escolhido como abrasivo, além de cinco diferentes concentrações de grafite (0,1; 0,5; 1; 3 e 5% em massa). A partícula de grafite utilizada possuía 50µm e o grão óxido de alumínio, 150µm em tamanho.

Um diferencial deste estudo consiste no tratamento pelo qual as partículas de grafite foram submetidas. Elas passaram por um tratamento térmico em que o hidrogênio a 500°C fluía através das partículas durante 30 minutos para que estas se dispersassem de maneira uniforme no rebolo. Sua composição baseou-se na seguinte proporção: 80% de abrasivo, 12,5% de material ligante, 5,2% de resina em pó e 2,3% de aditivos. A tabela abaixo mostra maiores detalhes sobre as condições dos componentes.

Tabela 8 - Condições do Experimento de Tsai e Jian (2012)

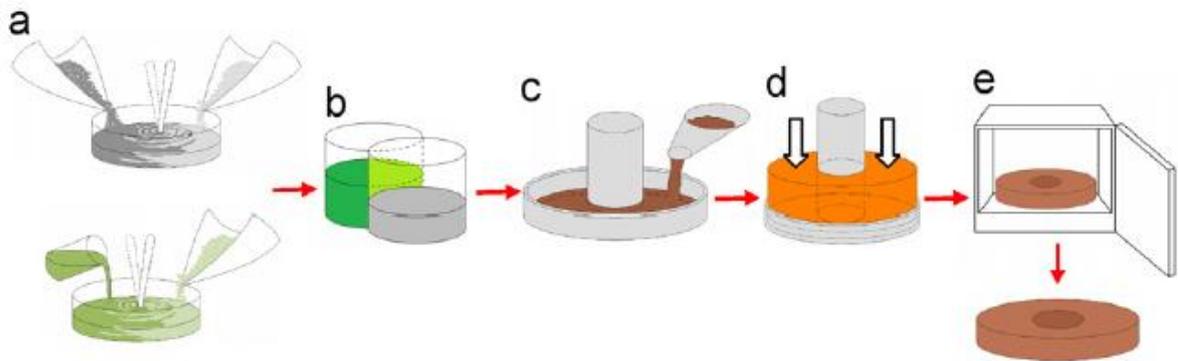
Rebolo	A 100 K8B 1A
Grafite	0,1%, 0,5%, 1%, 3% e 5% em massa do rebolo
Dimensões do Rebolo	180 – 13 – 31,75 mm
Peça de Trabalho	SKD11 HRC 60
Avanço	20 m/min
Velocidade do Rebolo	2400 rpm
Profundidade de Corte	15 µm
Método de Retificação	Seco e MQL (90ml/h; ar comprimido 25 psi)

Fonte: TSAI & JIAN (2012) (Adaptado)

A fabricação do rebolo, estipulada pelos autores, seguiu o esquema apresentado na figura abaixo. Primeiramente, o abrasivo, aditivos, ligante e o grafite são preparados e pesados na devida proporção indicada no parágrafo anterior. Em seguida, os abrasivos e a resina líquida fenólica são misturados de maneira uniforme, assim como o grafite resina fenólica em pó e aditivos. A mistura obtida (cerca de 50kg) é prensada numa forma desejada. Por fim, a mistura passa pelo processo de cura a uma temperatura em torno de 180°C para que o rebolo esteja pronto para testes e, posteriormente, para os ensaios.

Figura 23 - Esquema de Produção de Rebolo Resinoide

- (a) Preparo de insumos, (b) Mistura dos materiais, (c) Deposição no molde, (d) Prensagem, (e) Cura e testes.

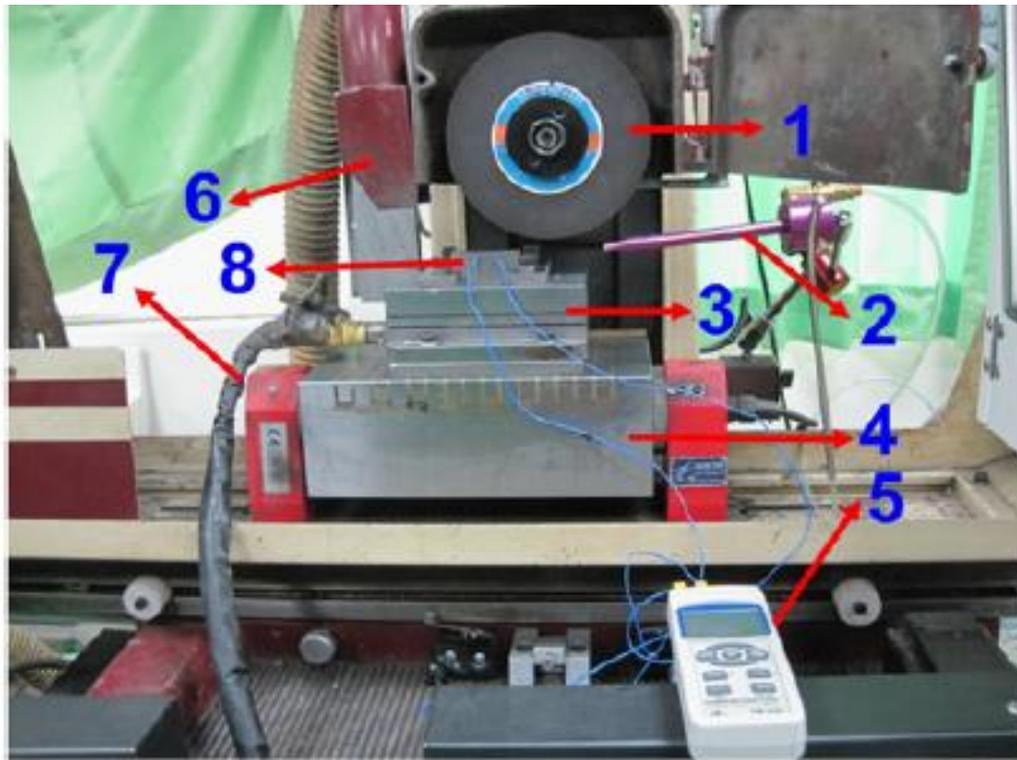


Fonte: TSAI & JIAN (2012)

Tsai e Jian (2012) também realizaram a retificação superficial por fuso horizontal. Contudo, os autores desenvolveram sua bancada de testes da maneira como ilustra a figura 24, juntamente com o equipamento de MQL.

Figura 24 - Bancada de Testes

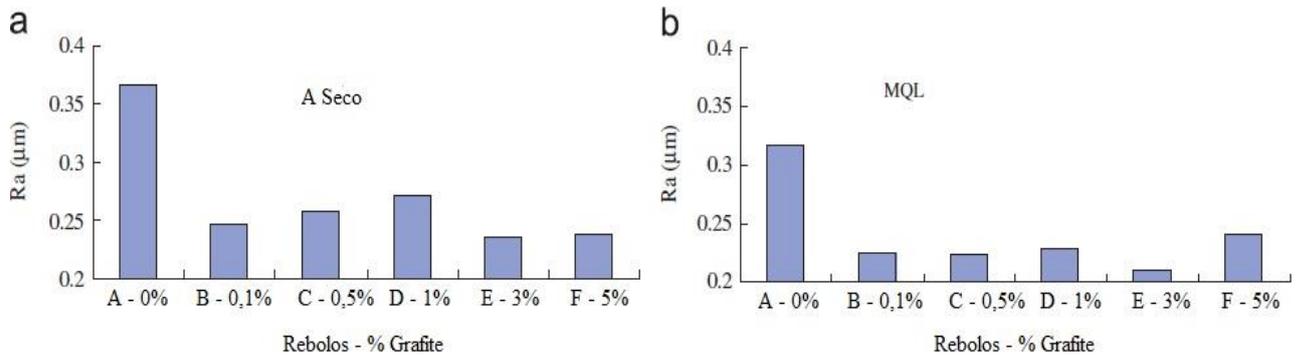
1. Rebolo, 2. Bico de Lubrificação, 3. Dinamômetro, 4. Base Magnética, 5. Termopar,
6. Aspirador, 7. Transmissor de Sinal, 8. Amostra.



Fonte: Fonte: TSAI & JIAN (2012)

As técnicas de resfriamento aplicadas foram o esmerilhamento à seco e MQL, sendo água pura o fluido utilizado. Os resultados obtidos nos ensaios serão apresentados nos gráficos a seguir.

Figura 25 - Análise da Rugosidade Superficial

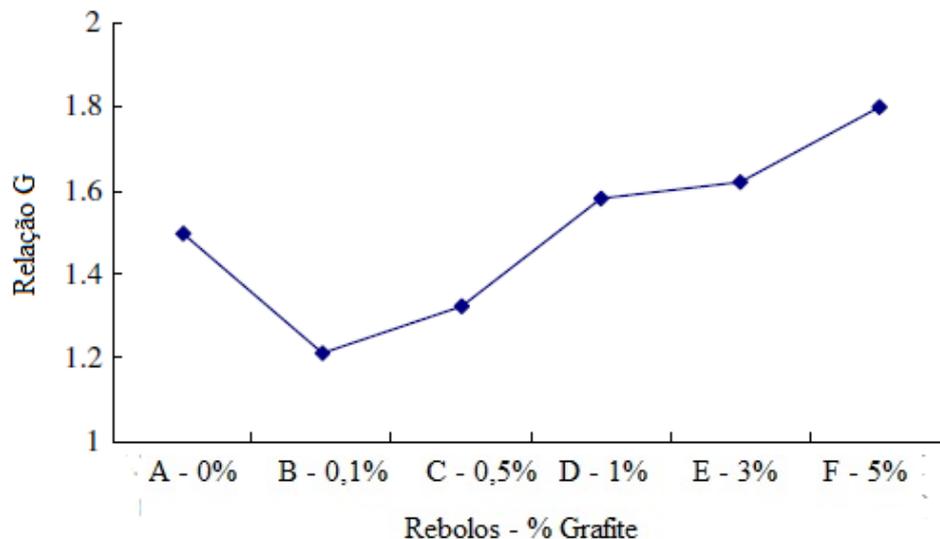


Fonte: TSAI & JIAN (2012)

Em ambas as condições se percebe que o emprego do grafite na composição do rebolo garantiu uma queda considerável no valor da rugosidade da amostra, sendo que o método MQL se comportou com maior eficácia. A explicação dada a este fato consiste no maior ganho com refrigeração da peça pela água, o que implica também numa melhora na qualidade superficial da amostra.

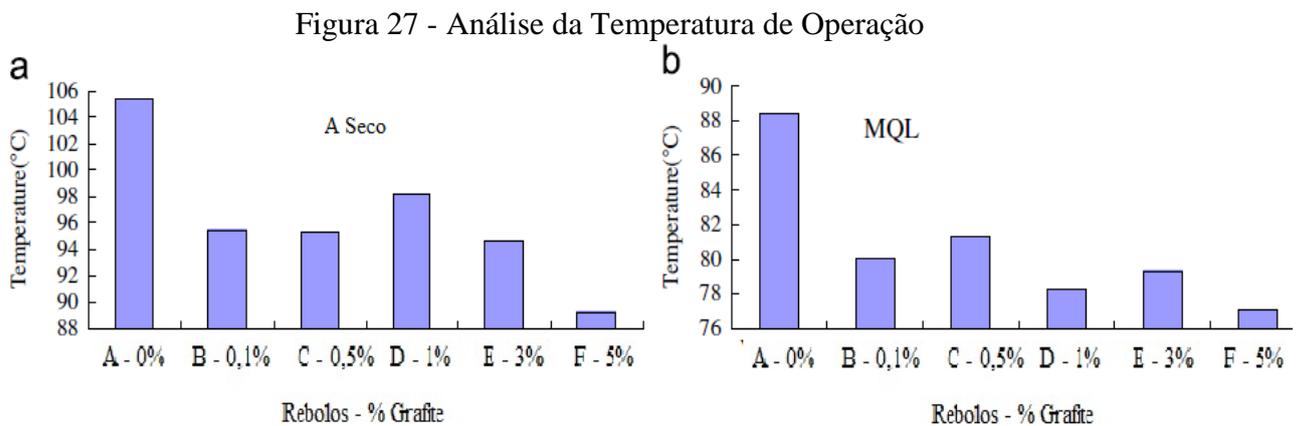
Tsai e Jian (2012) também avaliaram a relação G do rebolo produzido e o resultado é representado pelo gráfico abaixo.

Figura 26 - Relação G para Diferentes Rebolos



Fonte: TSAI & JIAN (2012)

Claramente é possível perceber que a relação G aumenta com o aumento da concentração de grafite. Isso pode ser explicado pelo encrostamento rápido do grafite no rebolo, tornando-se estruturas de bloqueio. Quando sujeitos a forças, essas partículas de bloqueio se desprendem com facilidade, enfraquecendo a ligação do rebolo e, assim, facilitando o acréscimo da relação G . A avaliação da temperatura de operação também foi analisada e seus resultados, apresentados na figura 27.

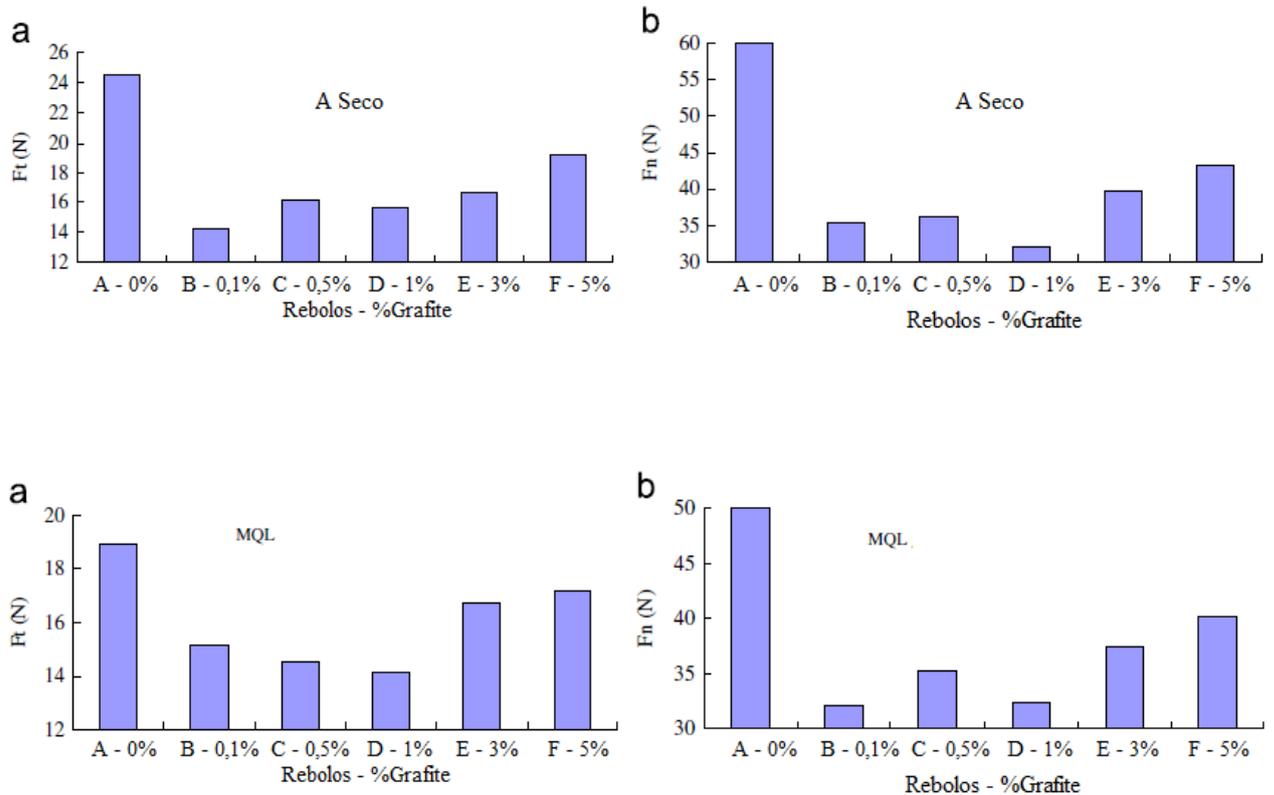


Fonte: TSAI & JIAN (2012)

Os gráficos acima detalham a diminuição da temperatura de contato, sendo que o MQL apresentou valores ainda menores que o método a seco. Em números, observou-se uma queda de 7 - 17% na média de temperatura de retificação.

Por fim, os autores estudaram a influência do grafite na composição do rebolo quanto às forças normais e tangencias ao ponto de aplicação. Os resultados obtidos estão disponíveis na figura a seguir.

Figura 28- Análise das Componentes da Força de Corte



Fonte: TSAI & JIAN(2012)

É notável a diminuição dos valores das forças, independente de qual método de refrigeração é utilizado. Além disso, é evidente uma caída brusca dos valores do rebolo puro para os que levavam grafite em sua composição e também se percebe a tendência de aumento das forças a partir do rebolo E (3% de grafite) para ambos os métodos e componentes da força. Numericamente, essa redução no valor das forças corresponde a 24%-32%, caracterizando um valor bem alto e importante. Por fim, aconselha-se a usar o grafite a 0,5% em peso, já que o mesmo apresentou baixa rugosidade superficial, baixa relação G, baixa temperatura de retificação e menores forças de corte, garantindo uma vida útil maior ao rebolo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho iniciou-se com o intuito de revisar o uso do grafite como lubrificante sólido para usinagem. Para tal, uma investigação foi realizada, demonstrando suas várias aplicações e resultados. Com base nestes, pode-se afirmar que esse objetivo foi atingido.

Foi possível também apresentar como se dá o processo de esmerilhamento de trilhos, ferramenta indispensável no processo de manutenção de ferrovias, garantindo segurança, qualidade e grande economia às companhias, como apresentou Silva et al (2005), em que foram observados o aumento em 100% da expectativa de vida útil dos trilhos após apenas 3 anos de implementação e uma economia de aproximadamente US\$ 31,57 milhões (em valores atualizados) com trocas de trilhos neste período. Portanto, investigar alternativas no processo de esmerilhamento pode significar grandes melhorias e, conseqüentemente, economia de tempo e dinheiro.

Na usinagem convencional, o emprego do grafite significou um aumento de 17% na vida da ferramenta de corte segundo Marques (2015). Outros autores observaram melhorias na rugosidade superficial e na temperatura do corpo de prova, quando o grafite misturado junto ao fluido de corte segundo as especificações apresentadas. Isso pode ser explicado pela elevada condutividade térmica do grafite e a formação de uma fina camada sobre a peça, protegendo-a contra o desgaste. Além disso, também foram observadas quedas nas componentes da força de corte, o que também é explicado pela boa condutividade térmica do grafite. Por fim, a formação de cavaco no sistema lubrificado para o grafite, tratado no estudo de Reddy e Rao (2007), apresentou aspectos diferentes do usual e que corroboram a baixa geração de calor no processo.

Na retificação utilizando rebolos com grafite, foram observados excelentes resultados quanto aos valores das forças tangencial e normal aplicadas no corpo de prova. Assim como na usinagem, a rugosidade superficial da amostra e a temperatura de contato também se apresentaram menores com o uso do grafite no rebolo. Na relação G, a amostra contendo 3% de grafite em massa, no estudo de Shaji e Radhakrishnan (2003), apresentou os menores valores. Já Tsai e Jian (2012) encontraram melhor desempenho na amostra de 0,5% de grafite em massa, sendo essa amostra com mais resultados homogêneos dentre as outras.

Outro fato bastante importante nesse contexto consiste na escassez de literaturas na área do uso do grafite na composição de rebolos, sendo encontrados apenas dois trabalhos.

Ademais, faltam estudos que relacionem o tamanho da partícula de grafite na estrutura do rebolo com as suas propriedades e efeitos na peça de trabalho.

Dessa forma, é possível notar que o emprego do grafite como lubrificante sólido, seja misturado ao fluido lubrificante ou na composição do rebolo, apresenta resultados significativos e satisfatórios, corroborando suas propriedades lubrificantes. Na retificação, um rebolo grafitado pode representar melhorias na qualidade superficial do boleto do trilho, aumento da vida útil do rebolo (menor desgaste) e queda na temperatura de contato, o que significa economia com fluidos de corte utilizados para lubrificação e arrefecimento, evitando também o seu desperdício e danos ao meio ambiente.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como a grande maioria dos processos de usinagem convencional em que o grafite é empregado como lubrificante sólido consiste no torneamento, fresamento e retificação, uma boa sugestão seria realizar esse tipo de estudo em outras operações de usinagem, como furação, mandrilamento e roscamento. Assim, a metodologia poderia se assemelhar às abordadas neste trabalho para que os resultados sejam passíveis de comparações.

Além disso, como já observado anteriormente, o emprego de grafite na composição de rebolos não vem sendo muito explorado no meio científico. Sendo assim, estudos sobre o tema se tornam cada vez mais interessantes e úteis como alternativas para o processo de lubrificação na retificação. Portanto, as técnicas de fabricação abordadas anteriormente podem ser seguidas para trabalhos futuros, sendo uma alternativa o emprego de alumina com granulometria grossa, utilizada na retificação ferroviária.

Por fim, a composição ótima do rebolo padrão baseia-se em 80% de abrasivos, 17,7% de resina fenólica e 2,3% de aditivos (furfural). Acrescenta-se grafite com diferentes tamanhos de grão com concentrações entre 0,1% e 0,5% em massa. Tais valores serão úteis para avaliar o comportamento entre os dois extremos, os quais apresentaram excelentes resultados e o início do crescimento da relação G no estudo de Tsai e Jian (2012). Valores intermediários e diferentes granulometrias do grafite serão capazes de ilustrar melhor a influência da partícula nos parâmetros da retificação, sendo também possível aplicar os conceitos abordados em conjunto com o projeto da bancada para ensaio de rebolos ferroviários já existente na Faculdade de Engenharia Mecânica da UFJF.

REFERÊNCIAS

- ANON, H. **Warnings for Grinding Coolants**. Metalworking Production, 2003.
- BENINI, L. **Características das Grandezas de Processo e Resultado de Trabalho de Retificação como Função da Composição de Rebolo Al₂O₃** . Dissertação de Mestrado. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.
- BIENKOWSKI, K. **Coolants and Lubricants: The Truth**. Manufacturing Engineering, 1993.
- BORGES, B., JORGE, C., LOBATO, P., SANTOS, R., & VIANA, T. **Implantação do Processo de Esmerilhamento de Trilhos na VLI**. 22ª Semana de Tecnologia Metroferroviária, 2016.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento** . São Paulo: McGraw-Hill, 1986.
- DINIZ, A., COPPINI, N. L., & MARCONDES, F. **Tecnologia da Usinagem de Materiais**. São Paulo: Artliber, 2006.
- FARIA, G. **Proposta de Melhoria da Avaliação do Funcionamento de Módulos Esmerilhadores da Empresa Loram Maintenance of Way Inc**. Monografia em Engenharia Elétrica. Viçosa, Minas Gerais, Brasil: Universidade Federal de Viçosa, 2017.
- FERREIRA, J. A. **Intervenções de Construção, Renovação e Manutenção na Via-Férrea**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Porto, Portugal: Faculdade de Engenharia da Faculdade do Porto, 2010.
- IRANI, R., BAUER, R., & WARKENTIN, A. **A Review of Cutting Fluid Application in the Grinding Process**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005.
- JACKSON, M., DAVIS, C., HITCHINER, M., & MILLS, B. **High-Speed Grinding with CBN Grinding Wheels: Applications and Future Technology**. Journal of Materials Processing Technology, 2001.
- KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1**. Berlin: Springer, 2009.
- LEE, J. **Modern Manufacturing: Mechanical Engineering Handbook**. Boca Raton: Frank Kreith, 1999.

- LEME, S. P. **Dressamento por Toque de Rebolos de CBN**. Dissertação de Mestrado. UFSC, 1999.
- MALKIN, S., & GUO, C. **Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives**. Industrial Press, 2008.
- MARQUES, A., GUIMARÃES, C., SOUSA, M. d., REDDY, N. S., & MACHADO, A. R. **Vida da Ferramenta e Mecanismos de Desgaste no Torneamento do Inconel 718 com Aplicação do Grafite como Lubrificante Sólido**. 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2015.
- MARTINS, P. G. **Desgaste Ondulatório em Caminhos de Ferro**. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Lisboa, Portugal: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2010.
- MOURA, R. R., SILVA, M. B., & OLIVEIRA, G. V. **Avaliação da Rugosidade no Torneamento da Liga Ti-6Al-4V com Lubrificantes Sólidos**. POSMEC, 2013.
- REDDY, S. K., & RAO, V. P. **Performance Improvement of End Milling Using Graphite as a Solid Lubricant**. Materials and Manufacturing Processes, 2007.
- RODRIGUES, D. D. **Manutenção e Conservação de Vias Férreas: Análise de Casos Práticos**. Coimbra: Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, 2012.
- ROSA, L. **Acabamento de Superfícies - Rugosidade da Superfície**. Apostila de Curso. UNESP, (s.d.).
- RUZZI, R. **Aplicação de Fluido de Corte pela Técnica MQL com Limpeza do Rebolo de Alumina na Retificação do Aço ABNT 4340**. Dissertação de Mestrado. Bauru: UNESP, 2017.
- SALMON, S. **Modern Grinding Process Technology**. McGraw-Hill, 1992.
- SHAJI, S., & RADHAKRISHNAN, V. **An Investigation on Surface Grinding Using Graphite as Lubricant**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002.
- SHAJI, S., & RADHAKRISHNAN, V. **Application of Solid Lubricants in Grinding: An Investigation on Graphite Molded Grinding Wheels**. International Conference on Mechanical Engineering. Dhaka, Bangladesh, 2003.

- SILVA, F. C., VIDON JR., W., RIPPETH, D., & CALDWELL, R. **Preventive-Gradual On-Cycle Grinding: A First for MRS in Brazil**. Hamel, 2005.
- SOUZA, A. **Monitoramento da Dressagem no Processo de Retificação**. Dissertação de Mestrado. UNESP, 2009.
- SREEJITH, P., & NGOI, B. **Dry Machining of the Future**. Journal of Materials Processing Technology, 2000.
- STANFORD, M., & LISTER, P. **The Future of Metalworking Fluids in Metal Cutting Operations**. Industrial Lubrication and Tribology, 2002.
- STEMMER, C. **Ferramentas de Corte II: Brocas, Alargadores, Ferramentas de Roscar, Fresas, Brochas, Rebolos e Abrasivos**. Florianópolis: UFSC, 1995.
- TABAK, D., MOURA, R. R., & SILVA, M. B. **Temperatura de Usinagem no Torneamento da Liga Ti-6Al-4V com o uso de Lubrificantes Sólidos**. XVIII Colóquio de Usinagem, 2014.
- TSAI, M.-Y., & JIAN, S.-X. **Development of a Micro-Graphite Impregnated Grinding Wheel**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2012.
- WALKER, T. **The MQL Handbook: A Guide to Machining with Minimum Quantity Lubrication**. Unist Inc, 2013.
- WUNDER, S. **Modelagem e Simulação da Microtopografia de Superfícies Retificadas com Ferramentas Estruturadas**. Dissertação de Mestrado. UFSC, 2006.
- ZAREMBSKI, A. **The Art and Science of Rail Grinding**. Simmons-Boardman Books, 2005.
- ZHI, S., LI, J., & ZAREMBSKI, A. M. **Predictive Modeling of the Rail Grinding Process Using a Distributed Cutting Grain Approach**. Journal of Rail and Rapid Transport, 2015.
- ZHI, S., ZAREMBSKI, A., & LI, J. **Towards a Better Understanding of the Rail Grinding Mechanism**. Altoona, Pennsylvania, USA, 2013.

ANEXO A – ESPECIFICAÇÕES DA ESMERILHADORA LORAM RG148

ESPECIFICAÇÕES

LORAM RG148

Comprimento
204 feet (62.2 m)
Largura
123 inches (3.1 m)
Altura
166 inches (4.2 m)
Peso Total
582,120 lbs.
Peso por Eixo
50,715 lbs.
Velocidade
62 mph (100 kph)
Raio Mínimo
328 feet (100 m)
Gradeabilidade
62 mph @ 0% (100 kph) 28 mph @ 3% (45 kph)
Capacidade
48 rebolos @ 30 hp each
Velocidade Esmerilhamento
1.2 - 9.0 mph (2 - 15 kph)
Valor Mínimo Esmerilhamento
591 feet (180 m)
Bitola
1,000 to 1,676 mm



ANEXO B – CATÁLOGO DE FABRICANTES DE REBOLOS FERROVIÁRIOS

- Fabricante: CGW

Rebolos Resinóides

Retífica em trilhos

Estes rebolos são utilizados para a retífica em trilhos de trem, possibilitando assim grande rendimento e excelente acabamento.

A - Óxido de Alumínio

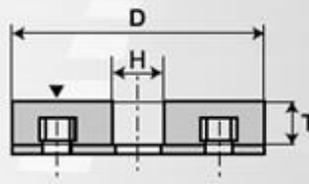
50 M/S



Tamanho	Especificação	Tipo	EAN No.	R.P.M.
mm				
150x72x57	A 16 Q4B	4xM8	118052	6,400
150x55xM20	A 16 Q4B	T-6	778638	6,400
150x65x15.88	A 16 Q4B	T-6	734634	6,400

- Fabricante: Norton Abrasivos

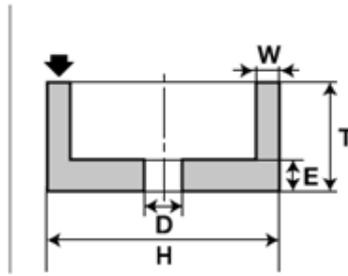
Rebolo de Parafuso Inserido



D = Diâmetro
T = Espessura
H = Furo

Código	Dimensões (mm)			Nº e tamanho parafusos	Identificação	Vel. (m/s)	Referência
	D (mm)	T (mm)	H (mm)				
36	150	73	55.2	4 M8	A14QB	50	69083102298
36	200	80	130	4 M10	A24PB	50	69083102296

Copo Reto com Suporte de Aço



D = Diâmetro
 T = Altura
 H = Largura
 E = Espessura
 W = Espessura da Borda

Código	D (mm)	T (mm)	W (mm)	E (mm)	H (mm)	Especificação	Referência
06	150	40	50	18	5/8"	A16RB	69083122221
06	150	65	40	20	M20	A14PB	69083122263