

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

BRUNO EDUARDO ALMEIDA ARAÚJO

**PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA ENSAIO DE REBOLO NA RETIFICAÇÃO
PLANA FRONTAL**

Juiz de Fora - MG

2021

BRUNO EDUARDO ALMEIDA ARAÚJO

**PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA ENSAIO DE REBOLO NA RETIFICAÇÃO
PLANA FRONTAL**

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 - MG

2021

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

Araújo, Bruno Eduardo Almeida.

Proposta de metodologia para ensaio de rebolo na retificação plana frontal / Bruno Eduardo Almeida Araújo. -- 2021.

51 p. : il.

Orientador: Raphael Fortes Marcomini

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2021.

1. Rebolo. 2. Retificação. 3. Metrologia. I. Marcomini, Raphael Fortes, orient. II. Título.

BRUNO EDUARDO ALMEIDA ARAÚJO

**PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA ENSAIO DE REBOLO NA RETIFICAÇÃO
PLANA FRONTAL**

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.

Aprovado em 15 de Março de 2021.

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Raphael Fortes Marcomini - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora



Prof. Dr. Carlos Renato Pagotto
Universidade Federal de Juiz de Fora



Prof. Dr. Moisés Luiz Lagares Júnior
Universidade Federal de Juiz de Fora

Juiz de Fora - MG

2021

Dedico este trabalho a todos os que me ajudaram de alguma forma ao durante desta longa e árdua caminhada.

AGRADECIMENTOS

Não há quem possa trilhar caminhos sozinho, e por isso, a palavra que resume minha caminhada até aqui é gratidão. Primeiramente sou grato aos meus pais, Solange e Valmir, que sempre me proporcionaram o melhor que tinham a oferecer, visando o meu bem sem esperar nada em troca. Agradeço também aos meus avós, em especial à avó Nágyla, por muitas vezes acreditarem em mim mais do que eu mesmo. Ao meu irmão, busquei ser um espelho para a sua vida assim como os mais velhos foram para mim. Aos meus tios, primos e amigos agradeço pelos momentos de descontração e pelo apoio, estes momentos foram cruciais durante este árduo período. Agradeço à Luiza, pelos desabafos, conversas e apoio incondicional. E por último, mas não menos importante, agradeço aos professores e colegas de classe que fizeram parte de minha caminhada até aqui.

“Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo a certeza de seu destino.”

(Leonardo Da Vinci, 1452 - 1519)

RESUMO

Este trabalho consiste em analisar trabalhos e artigos científicos para escolher a metodologia mais adequada para realizar ensaios de eficiência e desgaste de rebolo no Laboratório de Metrologia da Universidade Federal de Juiz de Fora, tendo em vista não só os equipamentos que lá já estão presentes como também realizar indicações de novos equipamentos a serem comprados no futuro para a bancada de teste. Uma vez que não há uma norma que especifique este tipo de ensaio laboratorial, a metodologia escolhida é aquela que mais se adéqua à realidade de nosso laboratório levando em consideração a tentativa de obter controle sobre o maior número de variáveis possíveis deste processo de usinagem de retificação. Os parâmetros medidos ou calculados por grande parte dos ensaios analisados nos artigos e que foram indicados para uso no Laboratório da UFJF são: quantidade de lubrificante, temperatura, desgaste da peça e da ferramenta de corte, força tangencial e força normal, energia, razão G e acabamento superficial. Além disso, um método para medição de potência do motor elétrico bifásico foi sugerido, bem como uma maneira de se encontrar a temperatura na zona de corte. Por fim, foi proposta uma metodologia para ensaio de rebolo na retificação plana frontal.

Palavras-chave: Rebolo – Retificação – Metrologia

ABSTRACT

This work consists of analyzing works and scientific articles to choose the most appropriate methodology to perform efficiency tests and grinding wheel wear at the Metrology Laboratory at Universidade Federal de Juiz de Fora, considering not only the equipment that is already there, but also perform indications of new equipment to be purchased in the future for the test bench. Since there is no standard that specifies this type of laboratory test, the methodology chosen is the one that best fits the reality of our laboratory, taking into account the attempt to obtain control over the largest number of possible variables in this process. grinding machining. The parameters measured or calculated by most of the tests on the articles and which were indicated for use at UFJF Laboratory are: quantity of lubricant, temperature, wear of the part and cutting tool, tangential force and normal force, energy, G ratio and finish superficial. In addition, a method for determining the power of the two-phase electric motor has been suggested, as well as a way to find the temperature in the cutting zone. Finally, a methodology was proposed for testing the grinding wheel in the frontal flat grinding.

Keywords: Grinding Wheel – Grinding – Metrology.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Peças usinadas.....	19
Figura 2	– Retificação plana tangencial e frontal, respectivamente	21
Figura 3	– Máquina retificadora de linhas férreas	22
Figura 4	– Gráfico de grafite-IPA pulverizado e revestido.....	24
Figura 5	– Gráfico da temperatura por diferentes porcentagens de carbono	25
Figura 6	– Gráfico da força tangencial por diferentes porcentagens de carbono e lubrificação.....	27
Figura 7	– Gráfico da força normal por diferentes porcentagens de carbono e lubrificação.....	27
Figura 8	– Dinamômetro Kistler 9257B e Amplificador Kistler 5019B.....	28
Figura 9	– Esquema do experimento	30
Figura 10	– Forma de sinal típica de potência de moagem medida usando sensor de efeito Hall.....	30
Figura 11	– Gráfico da Razão G para diferentes lubrificantes.....	32
Figura 12	– Imagens ampliadas demonstrando o desgaste de peças retificadas	34
Figura 13	– Fluxograma da metodologia	36
Figura 14	– Rebolo ensaiado no software ANSY	37
Figura 15	– Rebolo de retificação plana frontal	38
Figura 16	– Termopar e arduino MAX6675 do Lab. de Metrologia da UFJF	39
Figura 17	– Transferência de calor unidimensional por condução em regime permanente	40
Figura 18	– Representação dos pontos de coleta da temperatura	40
Figura 19	– Disposição dos componentes elétricos no sistema	42
Figura 20	– Rugosímetro de superfície da Instrutherm modelo PR-100.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MLQ	Mínima Quantidade de Lubrificante
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Profundidade de corte
Am	Altura menor
AM	Altura maior
b	Largura de corte
Bm	Base menor
BM	Base maior
Cr	Coefficiente de retificação
CaF ₂	Fluoreto de cálcio
E	Energia específica
F _n	Força normal
F _t	Força tangencial
G	Razão G
I	Corrente elétrica da máquina
I _a	Corrente elétrica na fase "a" do motor
I _b	Corrente elétrica na fase "b" do motor
I _n	Corrente elétrica de retorno pelo neutro no motor
L	Distância entre os termopares
P	Potência elétrica do motor
P1	Potência elétrica no primeiro wattímetro
P2	Potência elétrica no segundo wattímetro
R _a	Rugosidade média da superfície
T _s	Temperatura na superfície de corte
T1	Temperatura no primeiro termopar

T2	Temperatura no segundo termopar
V	Tensão elétrica no motor bifásico
vs	Velocidade periférica de rebolo
vw	Velocidade de avanço
Vs	Volume do desgaste de rebolo
Vw	Volume de material removido
Wr	Taxa de desgaste
μ	Coefficiente real de atrito

LISTA DE UNIDADES

A	Unidade de corrente elétrica
J	Unidade de energia – Joule
K	Unidade de temperatura – Kelvin
mm	Unidade de medida – Milímetros
Mpa	Unidade de tensão – Mega Pascal
N	Unidade de força – Newton
V	Unidade de tensão – Volt
W	Unidade de potência – Watt
°C	Unidade de temperatura – Celsius
μm	Unidade de medida – Micrômetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	17
1.2	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.1	Objetivos Específicos	18
1.3	JUSTIFICATIVA	18
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	USINAGEM	19
2.1.1	Retificação	20
2.2	CONTEXTUALIZAÇÃO	21
2.3	LUBRIFICAÇÃO	22
2.4	TEMPERATURA	24
2.5	FORÇA	26
2.6	ENERGIA	29
2.7	ATRITO E DESGASTE	31
2.8	RUGOSIDADE	32
2.9	PASSADAS E VELOCIDADE DE ROTAÇÃO	34
3	METODOLOGIA	35
3.1	FLUXOGRAMA	36
4	ANÁLISES E DISCUSSÕES	37
4.1	USINAGEM	37
4.2	MEDIÇÕES	38
4.2.1	Temperatura	38
4.2.2	Força	41
4.2.3	Energia / Potência	42
4.2.4	Atrito e Desgaste	43
4.2.5	Rugosidade	44
4.3	SUGESTÃO DE METODOLOGIA	44

5	CONCLUSÃO	46
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	46
	REFERÊNCIAS	47
	APÊNDICE A – Código de leitura dos dados do arduino aplicado no Laboratório de Metrologia da UFJF para medição da temperatura via termopar tipo K	50
	ANEXO – Termo de Autenticidade	51

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A presente monografia tem como objeto principal a realização de uma análise sobre ensaios de rebolo realizados e publicados por artigos científicos nos quais o principal processo de usinagem utilizado é a retificação de objetos metálicos com uso de lubrificantes sólidos.

A retificação é um processo de usinagem direcionado para o acabamento superficial das peças, ou seja, é um processo final de usinagem que visa garantir a qualidade da peça e evitar refugo, demanda precisão dimensional e homogeneidade ao longo da peça usinada.

O ensaio de rebolo não é normalizado, logo a metodologia de ensaio proposta neste trabalho será validada com os artigos científicos publicados e que obtiveram resultados satisfatórios em seus ensaios laboratoriais.

Após uma extensiva revisão de artigos e trabalhos de pesquisas disponíveis, foi observado que este tema é pouco abordado pelos pesquisadores, justamente por ser um tema de difícil acesso à informação, literatura específica e não há metodologias direcionadas para avaliação de rebolos e seus respectivos testes.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo estudar ensaios de rebolo na retificação plana frontal, especificar equipamentos e uma metodologia para que estes ensaios possam ser realizados de maneira sistêmica na bancada do Laboratório de Metrologia da Universidade Federal de Juiz de Fora.

1.2.2 Objetivos Específicos

A partir dos artigos científicos sobre usinagem, tendo como enfoque a retificação, espera-se encontrar um método ideal para medir:

- a temperatura na zona de corte;
- o desgaste do rebolo;
- o desgaste da peça retificada;
- as forças provenientes do processo;
- o acabamento superficial da peça.

1.3 JUSTIFICATIVA

Este trabalho tem como motivação a dificuldade de se realizar um ensaio de rebolo de maneira sistemática e padronizada, uma vez que o ensaio de rebolo não é normatizado. O fato de a retificação plana frontal ser uma fase final de acabamento de usinagem a torna pouco conhecida e mais complexa de se analisar do que as demais fases e processos da usinagem. Além disso, a padronização deste ensaio fará com que os resultados encontrados possam ser analisados e validados em diferentes ensaios mesmo com diferentes condutores.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Inicialmente será realizada uma fundamentação teórica, tendo como base principal artigos relacionados ao tema deste trabalho de maneira a contextualizar os pontos de interesse sobre o que foi feito nos ensaios descritos nestes artigos. Posteriormente, a metodologia abrangerá os pontos em comum destes artigos que podem ser aproveitados em nossa bancada de testes atual. Ainda convém lembrar que sugestões de componentes mecânicos para a realização das medições estarão disponíveis no tópico Resultados e Discussões. Por fim, mas não menos importante, serão explicitadas as conclusões a respeito deste assunto contendo, também, sugestões para que trabalhos futuros possam ser desenvolvidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 USINAGEM

Entendem-se como usinagem as operações que, de certa forma, modifiquem a forma, as dimensões ou o acabamento de uma peça, ou ainda combinações entre estes três itens, e que tenham como produto, cavaco. O cavaco caracteriza-se por ser uma porção de forma irregular retirada da peça usinada. A remoção desta porção de material decorre da interferência entre a ferramenta de corte e a peça usinada. (FERRARESI, 2013)

Existem diferentes tipos de usinagem, alguns mais conhecidos e outros mais específicos e pouco difundidos. Dentre os mais conhecidos, estão: o torneamento, fresamento, furação, retificação, mandrilamento, brunimento, serramento, roscamento, aplainamento, entre outros. Alguns dos tipos não convencionais de usinagem são: o jato d'água, jato abrasivo, eletroquímica, laser, plasma, feixe de elétrons e diversos outros. É importante ressaltar que dentre estes tipos de usinagem, há aqueles que se caracterizam pelo enfoque no desbaste da peça, ou seja, uma retirada de material de maneira mais bruta sem a preocupação com o acabamento, como o torneamento, e há também os processos cujo objetivo é acabamento superficial da peça usinada, como a retificação.

Figura 1: Peças usinadas



Fonte: STOETERAU. Fundamentos dos Processos de Usinagem.

2.1.1 Retificação

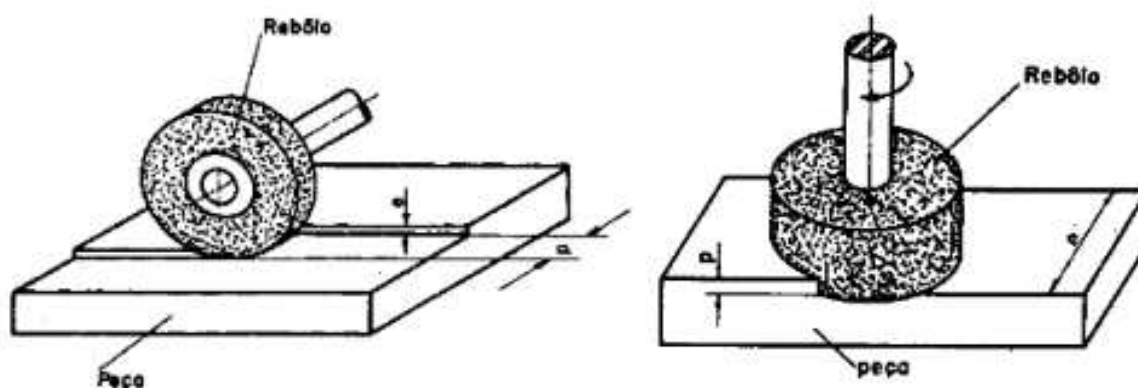
A retificação é uma técnica de remoção de cavaco, este processo utiliza um grão abrasivo como ferramenta de corte. A ferramenta de corte utilizada neste tipo de usinagem é denominada rebolo. Os processos de remoção de material abrasivo demandam muita energia e temperaturas elevadas, especialmente na interface peça-rebolo. A causa para esta demanda no processo são os grãos abrasivos que, em contato com a peça de trabalho, não cortam, mas geram calor ao esfregar e arar a superfície da peça de trabalho na zona de contato. (HOFY, 2007).

A retificação pode ser classificada de diferentes maneiras de acordo com seu método de trabalho, sendo elas: (DINIZ, 2010)

1. Retificação Cilíndrica
 - a) Externa
 - i. Entre pontas
 - ii. Sem pontas
 - b) Interna
2. Retificação Cônica
3. Retificação de Perfis
4. Retificação Plana
 - c) Tangencial
 - d) Frontal

Os artigos analisados por este trabalho e também a bancada de ensaio do Laboratório de Metrologia da UFJF têm como enfoque a retificação plana, mais especificamente a retificação plana frontal, que é aquela na qual o contato do rebolo com a peça é dado pela face da ferramenta de corte. Nos casos citados nos artigos, variáveis específicas foram encontradas e avaliadas visando otimizar o processo de retificação. Além disso, a peça usinada permanece estática e a ferramenta de corte é quem apresenta movimento.

Figura 2: Retificação plana tangencial e frontal, respectivamente



Fonte: FERRARESI. Fundamentos da Usinagem dos Metais.

2.2 CONTEXTUALIZAÇÃO

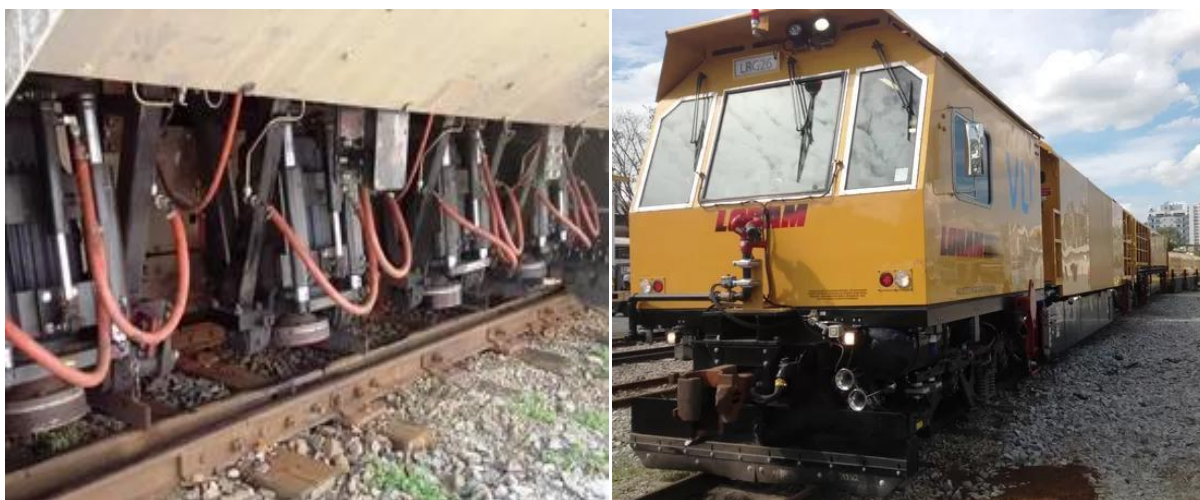
A lubrificação líquida foi e ainda é usada predominantemente nos processos de usinagem, porém, diferentemente do passado, atualmente há uma grande preocupação com o meio ambiente. As exigências feitas por regulamentos mais rígidos e sua aplicação no que diz respeito a fluidos usados na usinagem, forçaram os pesquisadores a explorar metodologias alternativas. Com essas novas exigências, o manuseio e o descarte destes fluidos estão ficando mais trabalhosos e custosos. A redução dos custos do processo de usinagem e a redução dos custos associados ao fluido refrigerante e seu descarte são fundamentais para manter a indústria competitiva e lucrativa.

Os processos de usinagem podem ser feitos em ambientes controlados, como em laboratórios, fábricas ou oficinas, o que torna o manuseio e controle sobre o fluido de corte facilitado. Porém, existem processos em que isso não é possível, pois a usinagem é feita em campo, de maneira que todo o fluido de corte utilizado naquele processo é perdido para o meio ambiente. Um exemplo deste tipo de processo é a retificação de linhas férreas realizada com o uso de rebolos acoplados a veículos sobre trilhos.

Logo, alternativas ao uso de fluidos refrigerantes devem ser estudadas, como a usinagem a seco, com resfriamento criogênico ou ainda com o uso de lubrificantes sólidos, sejam estes acoplados à ferramenta de corte ou inseridos externamente.

A Figura 3 a seguir, mostra uma locomotiva construída para retificar linhas férreas a partir da retificação plana frontal automatizada utilizando-se de rebolos revestidos com lubrificante sólido.

Figura 3: Máquina retificadora de linhas férreas



Fonte: Ricardo Welbert, 2014 ¹

¹ Disponível em: <<http://g1.globo.com/mg/centro-oeste/noticia/2014/11/divinopolis-recebe-maquina-que-amplia-vida-util-das-linhas-ferreas.html>>. Acesso em: 20 jan. 2021.

Quando não há uma lubrificação correta nos processos de usinagem, haverá alto atrito e aderência entre a ferramenta de corte e a peça, gerando acúmulo de calor na região de contato e resultando em altas temperaturas. Essa temperatura em excesso além de causar maior desgaste da ferramenta, produzem cavacos em forma de fita que afetam a forma e a precisão dimensional da superfície usinada (KURIMOTO; BARROW, 1997). Conseqüentemente, lubrificantes sólidos estão sendo estudados e já utilizados como uma alternativa em aplicações industriais para reduzir o atrito entre duas superfícies metálicas. (NEALE, 1993)

2.3 LUBRIFICAÇÃO

Apesar de haver uma interdependência entre os fatores que envolvem processos de usinagem, como temperatura, energia, forças normal e tangencial, atrito, desgaste da ferramenta de corte, rugosidade da peça, entre outros, sem dúvidas, o parâmetro que mais influencia e causa essa dependência é a lubrificação.

Na ausência de lubrificação adequada, o atrito entre a ferramenta e a peça na operação de usinagem resulta em altas temperaturas de corte e desgaste da ferramenta (RAO; KRISHNA, 2007). Além disso, a necessidade de usar menos fluido de corte e de limitar seu descarte e o contato do operador são agora muito importantes para minimizar os efeitos nocivos do uso de fluido de corte (REDDY;

RAO, 2006). Esta necessidade levou os cientistas e pesquisadores à procura de melhores métodos de lubrificação, como a Mínima Quantidade de Lubrificante – MQL, líquida com diferentes fluidos, sólida revestida, sólida pulverizada e até mesmo sem lubrificação.

Segundo Erdemir (1994), além de serem poluentes, os lubrificantes líquidos atuais parecem ser ineficazes para aplicações envolvendo altas temperaturas. Logo, lubrificantes sólidos são a melhor opção disponível para controlar o desgaste e o atrito em todos os tipos de tribossistemas envolvendo condições tribológicas severas (por exemplo, alta temperatura, meios corrosivos, ambiente de vácuo, alta carga e velocidade). A forte adesão desse lubrificante é essencial para longa duração de filmes de lubrificantes sólidos.

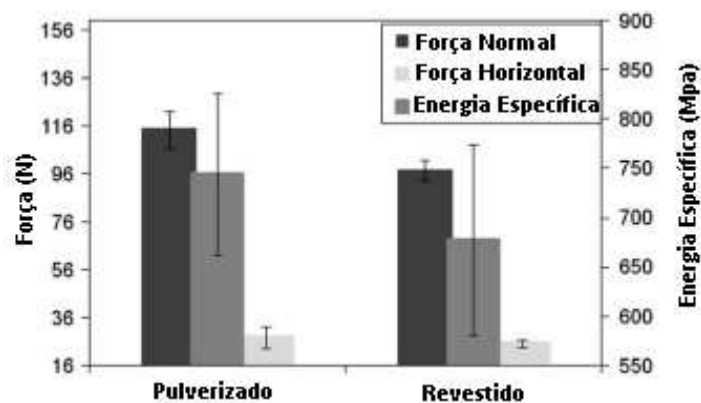
Os lubrificantes sólidos para retificação devem atender aos seguintes requisitos: ser capaz de suportar as altas temperaturas presentes no processo de retificação, ser atóxico, fácil de aplicar e ter um bom custo-benefício. (ALBERTS, *et al*, 2009)

Para Shaji e Radhakrishnan (2002), os principais materiais que têm sido empregados como lubrificantes sólidos na retificação de superfície, são: grafite, trióxido de molibdênio e dissulfeto de molibdênio, e cálcio e fluoreto de bário. Dissulfeto de molibdênio e grafite são os mais comuns, devido suas propriedades de lubrificação à sua morfologia em camadas e estrutura cristalina. Sua morfologia consiste em um arranjo hexagonal de átomos de carbono que formam redes planas estáveis devido a fortes ligações covalentes. Os planos paralelos permanecem juntos devido à fraca ligação entre as camadas, principalmente as forças de Van Der Waals. A força de atrito tangencial presente durante o processo de retificação quebra essas ligações elétricas fracas, causando deslizamento entre camadas com um baixo coeficiente de atrito. (ALBERTS, *et al*, 2009)

O método de aplicação, ou seja, como o lubrificante é introduzido na zona de moagem, pode ter um forte efeito no processo de lubrificação. Ao comparar o grafite-IPA pulverizado com a ferramenta de corte revestida deste lubrificante, em termos de forças de retificação e energia específica representados na Figura 4, conclui-se que o método de revestimento leva a uma melhor lubrificação. A diferença básica é que a camada de grafite formada durante o revestimento é uniforme e homogênea cobrindo completamente a área da peça, enquanto no caso da pulverização é

possível que algumas plaquetas sejam empurradas para fora da zona de moagem, de forma que não contribuam realmente para a lubrificação. (ALBERTS, *et al*, 2009)

Figura 4: Gráfico de grafite-IPA pulverizado e revestido



Fonte: Adaptado de ALBERTS; KALAITZIDOU; MELKOTE, 2009.

Como resultado dos ensaios de Alberts, *et al* (2009), além do diâmetro e da concentração do grafite, suas propriedades intrínsecas como área de superfície, cristalinidade, impurezas e espessura das plaquetas também afetam sua capacidade de lubrificação.

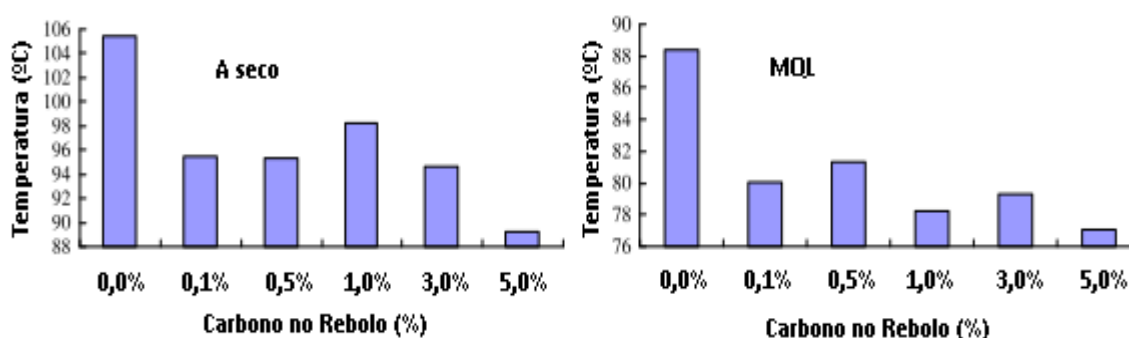
Assim como Alberts, *et al* (2009), Reddy e Rao (2006) considera que a usinagem com grafite como lubrificante sólido incluso no rebolo durante a fase de moldagem é a forma ideal de extrair as vantagens da aplicação de lubrificante sólido. A uniformidade do fornecimento de lubrificante para a zona de retificação é uma vantagem adicional a este tipo de lubrificação.

2.4 TEMPERATURA

No artigo de Rao e Krishna (2007), cuja abordagem é a usinagem convencional em torno, um termopar é colocado na parte inferior do inserto da ferramenta no suporte da ferramenta. A temperatura medida pelo termopar é apenas uma figura representativa para fins de comparação, pois isso não mede a temperatura da zona de corte. A calibração do termopar é realizada em banho-maria com termômetro e uma diferença máxima de 2 °C é observada em uma faixa de 40 a 95 °C. Embora não seja observada muita diferença nas temperaturas durante a usinagem usando fluido de corte ou lubrificante sólido, a temperatura é menor no caso de usinagem assistida por lubrificante sólido.

No artigo científico de Tsai e Jian (2012), cujo processo experimentado é a retificação com o rebolo perpendicular à peça (tipo esmeril), a temperatura da peça de trabalho foi medida pelo termopar acoplado à peça esmerilada com uma sensibilidade mínima de 1°C em uma faixa de 20–950 °C. Cada amostra foi medida três vezes para determinar a reprodutibilidade dos resultados. A temperatura de contato de retificação foi medida durante os testes. Isso permitiu que o desempenho térmico dos rebolos impregnados de grafite fosse comparado com os rebolos convencionais e também deu uma visão sobre a força do efeito de lubrificação nos rebolos impregnados de grafite. Observou-se que os rebolos impregnados de grafite reduzem a temperatura média de corte em cerca de 7–17% em comparação com o rebolo convencional, conforme mostrado na Fig. 5 a seguir.

Figura 5: Gráfico da temperatura por diferentes porcentagens de carbono



Fonte: Adaptado de TSAI; JIAN, 2012.

Um descontrole da temperatura na zona de corte pode acarretar em defeitos na peça conhecidos como dano térmico. Segundo por Shaji e Radharkrishnan (2002), o calor gerado pode não ter tempo suficiente para escapar em altas taxas de deformação. Com os resultados deste ensaio, pode-se perceber que grande parte do calor gerado no processo é transferido para a peça, devido à natureza típica do processo (MALKIN; ANDERSON, 1974). Isso pode levar a danos na peça de trabalho, como queimadura térmica, tensão residual de tração, transformações de fase e microfissuras (SNOEYS, *et al*, 1978). Esses defeitos são altamente indesejáveis em um componente acabado, especialmente em aplicações críticas.

A temperatura em Shaji e Radharkrishnan (2002) foi medida por um termômetro infravermelho da fabricante Raytek e modelo Raynger MX4, com foco na interface entre a peça esmerilada e a ferramenta de corte.

2.5 FORÇA

As forças de retificação são baseadas em diferentes elementos, que dependem muito das características do rebolo, do material de trabalho, dos parâmetros do processo, da natureza da interação entre o rebolo e a peça de trabalho e do ambiente escolhido. (SHAJI; RADHARKRISHNAN, 2002)

A correta lubrificação no processo de usinagem é responsável por diversos fatores, dentre eles a diminuição das forças de corte na retificação. Conforme o esperado, em artigos nos quais houve estudo de força, os componentes da força aumentaram com o aumento do avanço, foram eles Shaji e Radharkrishnan (2002), Alberts *et al* (2009) e Reddy e Rao (2006).

Ainda convém lembrar que Shaji e Radhakrishnan (2002) relataram que as contribuições relativas de diferentes parâmetros na força de retificação dependiam do tipo de material de trabalho, de características abrasivas, de parâmetros de processo e da presença de lubrificante. Eles ainda demonstraram que aumentar a força de retificação resulta em mais remoção de material, o que deve ser levado em consideração para o projeto de rebolos.

A razão entre a força tangencial e a força normal (F_t / F_n), adimensional, é denominada coeficiente de retificação (C_r) proposto por Marshal e Shaw (1952). Apesar desta relação não fornecer o coeficiente real de atrito (μ), é possível avalia-lo como uma indicação dos efeitos do atrito na zona de retificação. A variação da força tangencial depende das características de atrito da interação a ferramenta de corte e a peça usinada.

$$C_r = \frac{F_t}{F_n} \quad (2.1)$$

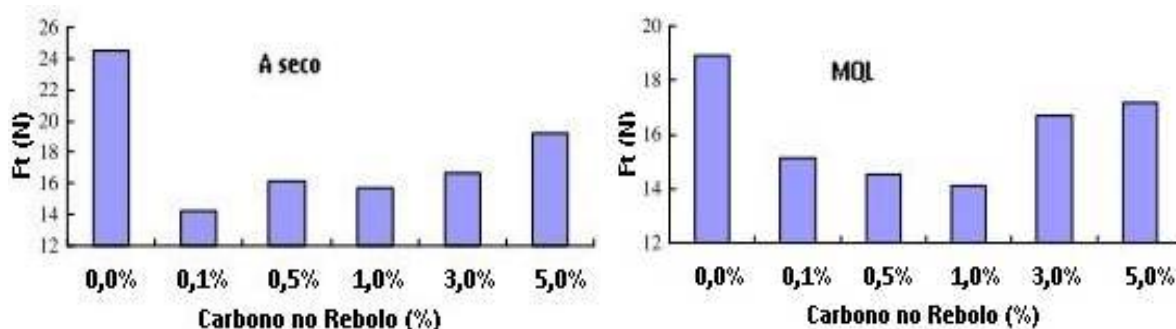
Pode-se dizer também que Reddy e Rao (2006) indicaram que a intensidade de geração de calor dependia da força tangencial. Segundo Shaji e Radhakrishnan (2002), as forças encontradas devem ser aquelas quando o processo está estável com pulsos quase estáveis para minimizar a fase de aceleração da ferramenta e efeitos do estado transiente iniciais.

A força de corte é uma das variáveis físicas importantes na usinagem. Essas informações podem ser usadas para auxiliar na compreensão dos atributos críticos

de usinagem, como usinabilidade, desgaste, vibração da máquina-ferramenta, precisão de usinagem e qualidade da superfície. (REDDY; RAO, 2006)

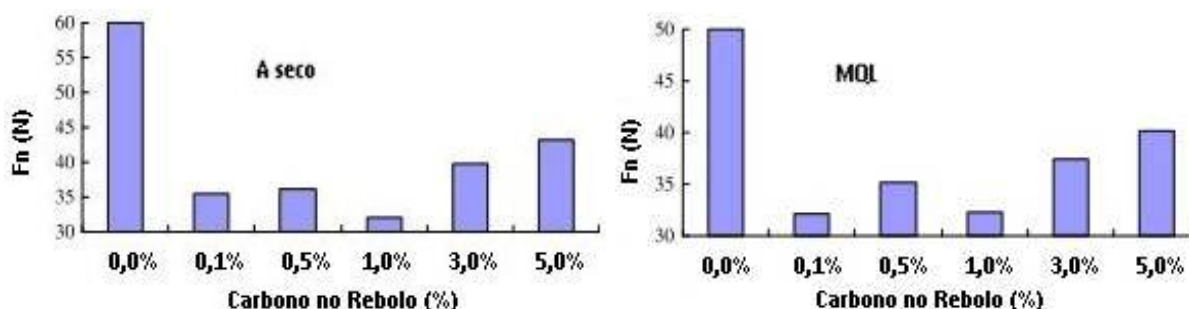
O componente da força de corte determina a necessidade de energia do processo. A intensidade da geração de calor depende dessa força e é de primordial importância no que diz respeito à temperatura de usinagem e à qualidade da superfície dos produtos (REDDY; RAO, 2006). As Fig. 6 e 7 mostram a variação nas forças tangenciais (F_t) e forças normais (F_n) em rebolos com diferentes concentrações de carbono em sua estrutura, e em um ambiente de retificação a seco e em MQL. A partir destes gráficos, pode-se perceber que a força de corte (F_t e F_n) era consideravelmente menor com rebolos com lubrificação sólida em comparação com rebolos convencionais.

Figura 6: Gráfico da força tangencial por diferentes porcentagens de carbono e lubrificação



Fonte: Adaptado de TSAI; JIAN, 2012.

Figura 7: Gráfico da força normal por diferentes porcentagens de carbono e lubrificação



Fonte: Adaptado de TSAI; JIAN, 2012.

A partir do artigo de Reddy e Rao (2006) que tem como objeto a retificação utilizando uma fresa, conclui-se que conforme o avanço aumenta, a força de corte aumenta. Isso se deve ao fato de que, à medida que a taxa de avanço aumenta, mais material terá que ser cortado por dente por rotação, para o qual é necessária mais energia. Isso causa um aumento na força de corte. Além disso, pode-se

perceber que conforme a velocidade de corte aumenta, a força de corte diminui. Isso pode ser devido ao fato de que, em altas velocidades, uma grande quantidade de calor é gerada na zona de cisalhamento do material da peça durante o processo de formação de cavacos devido à alta taxa de deformação plástica. (REDDY; RAO, 2006)

Medição das Forças: Em todos os artigos nos quais as forças no processo de retificação são citadas, o equipamento utilizado para medi-las foi um dinamômetro. Nos artigos de Xua, *et al* (2015) e Reddy e Rao (2006), as forças tangencial e normal foram medidas com um dinamômetro de três componentes do tipo 9129A e 9257A, respectivamente, ambos da fabricante Kistler. Já os artigos Tsai e Jian (2012) e Shaji e Radhakrishnan (2002), também utilizam-se de um dinamômetro de três componentes baseado em transdutor piezoelétrico da fabricante Kistler, porém o modelo usado em ambos é o 9257B.

Para gravar os dados obtidos o artigo Reddy e Rao (2006) utilizou o gravador da fabricante Graphtec-4, modelo *Channel Thermal Array Corder*. Diferente disso, os artigos Shaji e Radhakrishnan (2002) e Tsai e Jian (2012) utilizaram-se de um amplificador de carga, também da fabricante Kistler modelo 5019B e um osciloscópio de dois canais conectado diretamente a um computador pessoal.

Figura 8: Dinamômetro Kistler 9257B e Amplificador Kistler 5019B



Fonte: Kistler *Product Catalog* ¹ e *InterTechnology* ²

¹ Disponível em: <<https://www.kistler.com/fileadmin/files/divisions/sensor-technology/cutting-force/960-002e-05.14.pdf>>. Acesso em: 12 fev. 2021.

² Disponível em: <https://www.process-controls.com/intertechnology/Kistler/ACC_Model_5019B.htm>. Acesso em: 12 fev. 2021.

2.6 ENERGIA

A retificação como processo de usinagem é considerada um processo de acabamento final para a peça. Logo, ela requer uma maior atenção, pois as margens para erro diminuem nesta etapa do processo. Segundo Marshal e Shaw (1952), a retificação requer maior energia específica do que os outros processos de usinagem convencionais. Além disso, toda essa energia acaba virtualmente em calor (OUTWATER; SHAW, 1952). Devido à natureza típica deste processo, esse excesso de calor é transferido para a peça usinada (MALKIN; ANDERSON, 1974).

No ensaio de retificação tratado no artigo de Shaji e Radhakrishnan (2002), a energia específica (E) foi calculada usando a fórmula a seguir na qual seus termos são força tangencial (F_t), velocidade periférica do rebolo (v_s), velocidade de avanço (v_w), profundidade de corte (a) e largura do corte (b).

$$E = \frac{F_t \cdot v_s}{v_w \cdot a \cdot b} \quad (2.2)$$

Ainda neste artigo, Shaji e Radhakrishnan (2002), pode-se perceber que a energia específica requerida neste processo é substancialmente menor nos casos em que há a correta lubrificação do sistema.

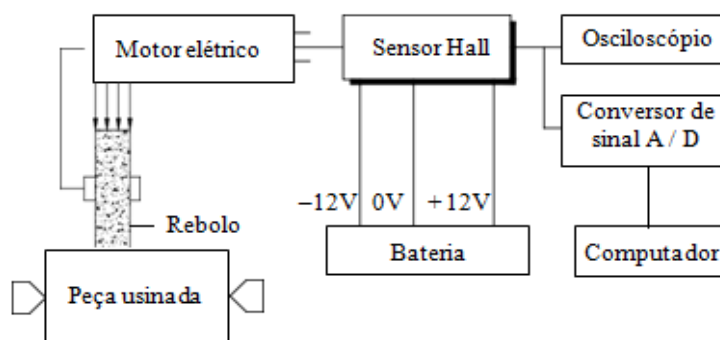
Como dito anteriormente, existem poucos trabalhos científicos e literatura específica sobre ensaio de rebolo em retificação plana, principalmente na retificação plana frontal. No caso deste artigo, a retificação por ele abrangida é a retificação plana tangencial.

Observação: Um sensor de efeito Hall, utilizado em diversas aplicações industriais, também pode ser utilizado para medir a potência gasta de uma máquina elétrica durante o processo. O princípio do sensor de efeito Hall é baseado no efeito magnético Hall, que foi descoberto pelo Dr. Edwin Hall em 1879. (KWAK, *et al*, 2006)

Pode-se dizer que a corrente que flui através do cabo do motor de acionamento produz um campo magnético. Ao colocar um sensor de efeito Hall neste cabo, a força de Lorentz produz uma tensão induzida no sensor. Essa tensão é conhecida como tensão Hall e é proporcional à corrente original que flui para o cabo. Portanto, ao medir as variações da tensão Hall, pode-se obter a potência

gasta do motor de acionamento durante o processo de retificação. (KWAK, *et al*, 2006) A Figura 9 representa o esquema de como o sensor de efeito Hall, o osciloscópio e o conversor de sinal foram distribuídos no experimento:

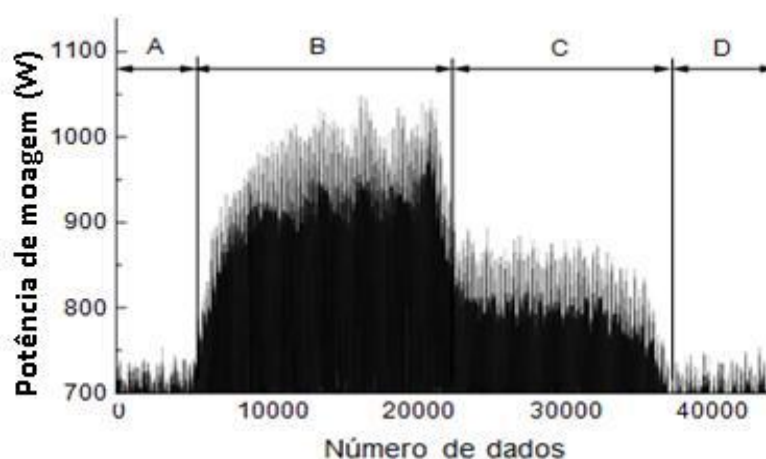
Figura 9: Esquema do experimento



Fonte: Adaptado de KWAK, *et al*, 2005.

No processo descrito por Kwak (2005), a variação da energia de retificação foi encontrada com o uso de 3 destes sensores instalados nos cabos elétricos do motor, e o poder de retificação gasto durante o processo foi obtido multiplicando a corrente medida no cabo do motor e a tensão fornecida do motor. O gráfico a seguir demonstra a forma de sinal obtida da potência de retificação durante o ciclo do processo, designados por A, B, C e D., na qual consistem, respectivamente em: motor livre de carga, carga da primeira passada, carga da próxima passada em sentido oposto, e motor livre. Além disso, por conveniência matemática, o poder de moagem total, que somava o poder motriz ao poder líquido de retificação, foi definido como o poder de retificação gasto durante o processo.

Figura 10: Forma de sinal típica de potência de moagem medida usando sensor de efeito Hall.



Fonte: Adaptado de KWAK, *et al*, 2005.

2.7 ATRITO E DESGASTE

De acordo com a investigação de Shaji e Radhakrishnan (2002) e Xua, *et al* (2012), o atrito na interface rebolo-peça pode ser minimizado fornecendo lubrificação constante e eficaz.

Os resultados mostram que a força de corte é consideravelmente menor com a aplicação de mistura de lubrificante sólido em comparação com a usinagem a seco e a úmido. O resultado está implícito no baixo coeficiente de atrito, à medida que os lubrificantes sólidos amolecem a temperaturas elevadas. (RAO; KRISHNA, 2008)

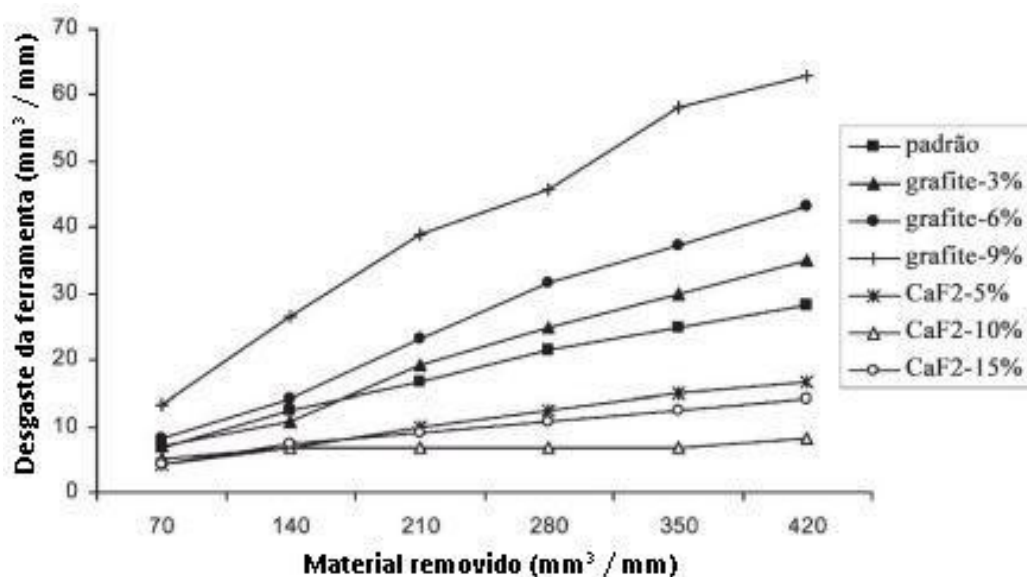
Resultados da correta lubrificação: Reduzir o atrito e o desgaste para, assim, melhorar a vida útil da ferramenta (HOFY, 2007) e Remover os cavacos da zona de corte para evitar que os cavacos interfiram no processo de corte. (SHAW, 1996)

O desgaste do rebolo geralmente está relacionado à quantidade de material da peça retificada. Apesar de usarem uma nomenclatura diferente para a mesma relação, os artigos utilizam-se do parâmetro denominado Taxa de Desgaste (W_r) em Tsai e Jian (2012), e do parâmetro Razão G (G) em Xua *et al* (2015), eles são definidos como a razão entre o volume de material removido (V_w) e volume de desgaste do rebolo (V_s). Quando submetidos à força, os grãos com aglomerados de partículas de grafite são facilmente desalojados para enfraquecer a ligação, levando a um maior desgaste da roda. (TSAI; JIAN, 2012)

$$W_r \text{ ou } G = \frac{V_w}{V_s} \quad (2.3)$$

A partir dos dados coletados por Shaji e Radharkrishnan (2002) para determinados intervalos, pode-se representar graficamente – Figura 11, a seguir – a relação entre o volume de material removido (V_w), representado pelo eixo das abscissas, e o volume de desgaste do rebolo (V_s), representado pelo eixo das ordenadas. Assim, a Razão G, ou ainda Taxa de Desgaste segundo Tsai e Jian (2012), pode ser calculada pela inclinação da reta traçada a partir dos pontos coletados representados graficamente.

Figura 11: Gráfico da Razão G para diferentes lubrificantes



Fonte: Adaptado de SHAJI; RADHAKRISHNAN, 2002.

Medição do Desgaste: No experimento descrito por Dilbag e Rao (2007), o desgaste da ferramenta foi verificado com um microscópio óptico da fabricante Mitutoyo, com resolução de 1 μm e com aumento de 30 vezes para medir o desgaste após a experimentação.

O desgaste da ferramenta de corte é medido off-line ao final de cada processo de corte também com 30 ampliações em um projetor de perfil tanto em Rao e Krishna (2007) quanto em Rao e Krishna (2008). Nos demais artigos essa medição é realizada com o uso de paquímetros em 3 locais diferentes na peça, considerando o valor da média para os efeitos de cálculo.

2.8 RUGOSIDADE

Nas operações de usinagem, a qualidade da superfície é um requisito importante, pois desempenha um papel fundamental na resistência ao desgaste, ductilidade e resistência à tração e fadiga das peças usinadas e, portanto, não pode ser negligenciada. Pode-se dizer que a qualidade da superfície e a precisão dimensional são dois dos parâmetros mais importantes para avaliar a qualidade da peça. (REEDY; RAO, 2006)

Um grande problema diagnosticado por Shaji e Radharkrishnan (2002), cujo ensaio foi com lubrificação sólida pulverizada, foi a ausência de remoção efetiva das

limalhas provenientes da retificação, o que mostrou-se como um grande obstáculo na obtenção de resultados mais desejáveis. Uma das soluções por ele propostas, foi a inserção de lubrificante no rebolo para garantir um suprimento uniforme de lubrificante para a zona de retificação, garantindo quantidade suficiente para uma lubrificação eficaz que minimizasse a carga no rebolo.

Medição da Rugosidade: Nos artigos descritos por Rao e Krishna (2008), Dilbag e Rao (2007) e Shaji e Radharkrishnan (2002), um medidor Talysurf é empregado para medir a rugosidade média da superfície (R_a) usinada. No caso de Dilbag e Rao (2007), uma média de 3 medições foi adotada como a medida oficial.

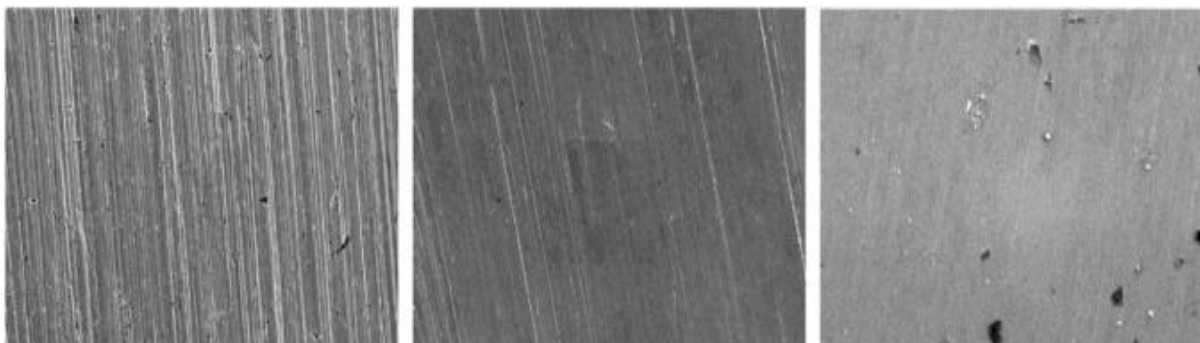
No artigo de Alberts *et al* (2009), a rugosidade da superfície foi encontrada através de um instrumento de medição de textura de superfície baseado em interferômetro de varredura de luz branca de microscópio da fabricante ZYGO modelo New View 200. A rugosidade média da superfície (R_a) foi medida perpendicular e paralelamente à direção de retificação e foi tirada a média entre as medidas.

O artigo de Tsai e Jians (2012) utilizou-se do equipamento da fabricante Hommel modelo Tester T-1000 para medir a rugosidade superficial da peça usinada. A R_a foi medida ao longo da direção de retificação em cinco pontos diferentes da superfície da peça. Além disso, um microscópio eletrônico de varredura (MEV) foi usado para analisar a morfologia da superfície para possíveis danos causados pelas forças térmicas e mecânicas que atuam na superfície do material.

Já o trabalho realizado por Xua, *et al* (2015) mediu a rugosidade de superfície de sua peça usinada usando um medidor de rugosidade de superfície da fabricante alemã Mahr modelo Perthometer S2.

A partir da Figura 12 abaixo, pode-se perceber que tanto os cavacos provenientes da usinagem quanto pedaços que se desprendem do rebolo podem ficar na região de contato peça-rebolo durante o processo, o que pode acarretar em um acabamento superficial inadequado. A lubrificação eficaz é ponto crucial para evitar que esse problema aconteça.

Figura 12: Imagens ampliadas demonstrando o desgaste de peças retificadas



Fonte: Adaptado de TSAI; JIAN, 2012.

2.9 PASSADAS E VELOCIDADE DE ROTAÇÃO

Este parâmetro foi citado superficialmente pelos trabalhos, mas pode-se perceber que os pontos comuns entre eles são os cuidados para garantir uma uniformidade das medidas, desconsiderando dados provenientes do período transiente dos processos. Além disso, nas comparações entre diferentes rebolos, as medidas foram sempre realizadas com velocidade constante, em peças semelhantes, tanto em suas medidas quando em suas rugosidades superficiais, com o objetivo de garantir que os dados pudessem ser coletados adequadamente.

3 METODOLOGIA

Nesta monografia foi realizada uma análise com base na literatura e em artigos científicos cujo tema principal é a usinagem, principalmente o processo de retificação utilizando rebolo com lubrificação sólida como ferramenta de corte. Devido à dificuldade de se achar literatura específica sobre este processo, ainda mais com foco na lubrificação cujo lubrificante é sólido, artigos com distintos tipos de usinagem, metodologias e ferramentas foram analisados também. Desta forma, foi possível extrair os pontos positivos destes ensaios descritos nos artigos, como os principais parâmetros de usinagem analisados e as ferramentas utilizadas para melhorar o resultado da retificação. Por conseguinte, compara-los aos ensaios realizados no Laboratório de Metrologia da UFJF utilizando rebolo como ferramenta de corte.

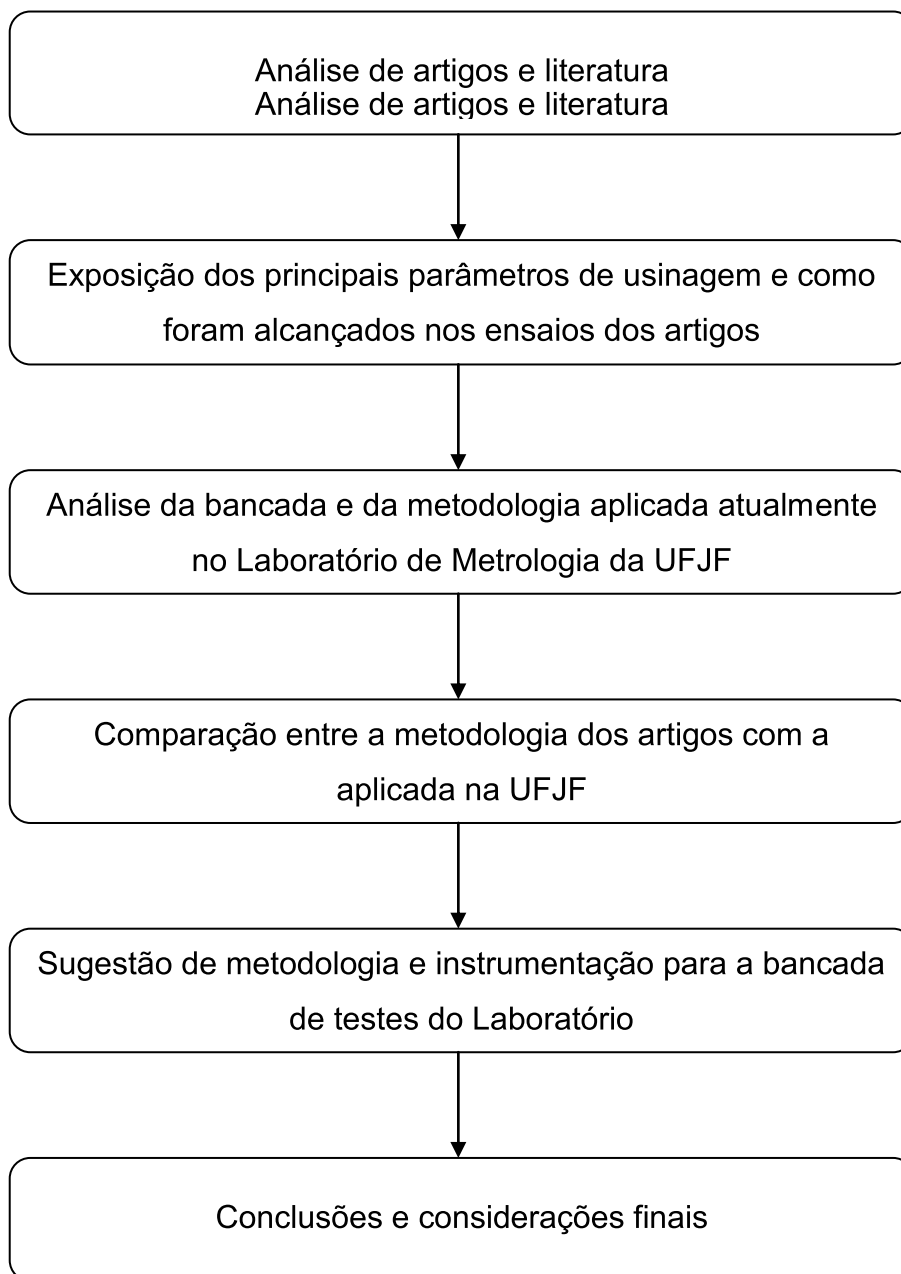
A partir dessa comparação, uma metodologia específica para o ensaio de rebolo pôde ser proposta para que os ensaios realizados no laboratório tivessem uma padronização e confiabilidade, e, assim, um respaldo prático e teórico, já que para este tipo de ensaio não há uma norma que o regulamente. Além disso, foi possível verificar o que estava sendo feito corretamente e quais equipamentos e métodos já utilizados podem ser aproveitados neste novo modelo de ensaio de rebolo para o Laboratório da UFJF e quais equipamentos devem ser comprados para que a metodologia seja aplicada.

Por fim, estão dispostas as conclusões e considerações finais desta monografia, além de sugestões sobre novos trabalhos que complementam o tema de ensaio de rebolo em processos de retificação.

3.1 FLUXOGRAMA

A metodologia empregada nesta monografia segue o fluxograma apresentado abaixo:

Figura 13: Fluxograma da metodologia



Fonte: Elaborada pelo autor.

4 ANÁLISES E DISCUSSÕES

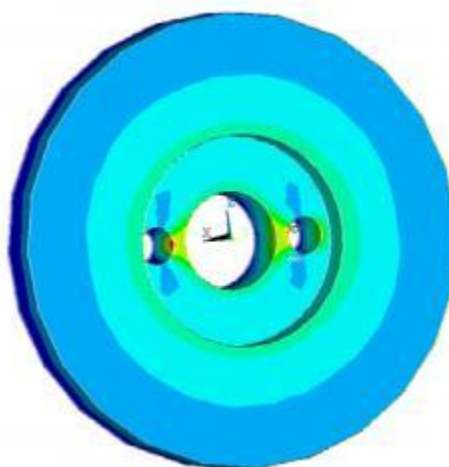
A partir da análise dos ensaios relatados nos artigos científicos descritos acima é possível estipular uma metodologia que vá ao encontro dos equipamentos já existentes no Laboratório de Metrologia da UFJF, com pequenas modificações.

4.1 SELEÇÃO E FIXAÇÃO

O processo de retificação, por ser um processo final de usinagem voltado para o acabamento superficial, é sensível aos erros, pois eles acarretam no refugo da peça, seja devido a imperfeições rugosas, seja devido a erros dimensionais. Foi ressaltado por Tsai e Jian (2012) que rebolos são estruturas sensíveis e demandam uma série de tratamentos para evitar a existência de trincas superficiais e internas, e também para mantê-los uniformes e balanceados.

Com uma natureza de processo mais simples e difundida, a fixação dos rebolos utilizados na retificação plana tangencial, facilmente encontrados no mercado, é realizada na região central do rebolo apenas com um parafuso passante central ou com alguns parafusos passantes distribuídos simetricamente ao redor do centro do rebolo.

Figura 14: Rebolo ensaiado no software ANSYS

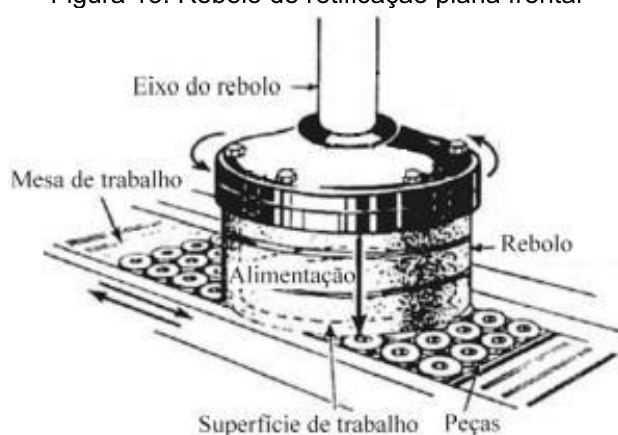


Fonte: Adaptado de WEINGAERTNER; SEVERIANO ¹

¹ Disponível em: <http://abcm.org.br/app/webroot/anais/cobef/2005/COF_011076338.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2021.

Já na retificação plana frontal, que é o caso estudado em nosso Laboratório, esta fixação é um pouco mais complexa. Neste tipo de retificação, os rebolos podem ter forma de disco ou de copo. De maneira distinta à retificação plana frontal, no processo de retificação plana tangencial, a fixação central por meio de parafuso passante é possível, pois a cabeça do parafuso não entra em contato com a peça usinada. Já o rebolo em forma de disco, – retificação plana frontal – que é o caso dos produzidos no Laboratório da UFJF, a fixação é realizada externamente, com a presença ou não de parafusos.

Figura 15: Rebolo de retificação plana frontal



Fonte: Adaptado de MARINESCU *et al.*, 2007.

4.3 MEDIÇÕES

4.2.1 Temperatura

No que diz respeito à temperatura na zona de corte, houve unanimidade entre os artigos aqui citados no que diz respeito aos valores coletados desta medida, na qual é mais um efeito comparativo do que uma medida efetiva da temperatura na zona de corte. Dois métodos foram empregados, a utilização de um sensor termopar e um termômetro óptico.

No caso do termômetro óptico, é possível medir a temperatura na zona de contato entre a ferramenta de corte e a peça usinada, porém a natureza rotativa da ferramenta tira a precisão deste método. Logo, a utilização de um termopar para realizar esta medida torna-se recomendável para capturar essa medida.

Em ensaio anterior realizado por Siqueira (2018), no Laboratório de Metrologia da UFJF, foi utilizado um termopar tipo K com módulo conversor

MAX6675, com faixa de medição para até 800 °C, precisão de 1,5% e escala de 0,25 °C. Os dados foram coletados com auxílio de um arduino com conversor MAX 6675, e o código de programação está disponível no Apêndice A.

Figura 16: Termopar e arduino MAX 6675 do Lab. de Metrologia da UFJF



Fonte: SIQUEIRA, 2018.

Nos cálculos de temperatura empregados tanto nos ensaios quanto no Laboratório da UFJF, os valores coletados pelo termopar, a fim de facilitar as contas e como método comparativo, foram considerados nos cálculos como sendo a temperatura na região de corte. Porém, é possível aproximar ainda mais este valor medido ao valor real.

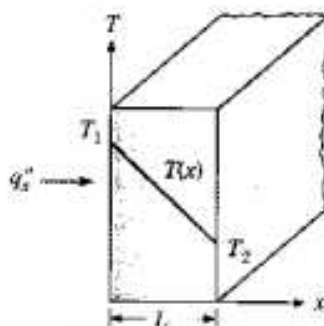
No trabalho de Siqueira (2018), a distância inicial e final que o termopar se encontrava da superfície usinada foram, respectivamente, iguais a 20mm e 17,5mm. Em valores absolutos, esta diferença é pequena, apenas 2,5mm, mas em valores proporcionais essa distância é 12,5% menor.

Método: Portanto, para realizar a medida desta temperatura de maneira mais real, deve-se considerar essa diferença da distância entre o termopar e a superfície usinada. Para isso, deve-se colocar 2 termopares alinhados entre si, distantes 20mm e 40mm, respectivamente, em relação à superfície rebolo-peça. Desta maneira, considerando o sistema em regime permanente, o fluxo térmico unidirecional, a peça com estrutura homogênea e condutividade térmica constante, como demonstrado na Figura 17 abaixo, pode-se utilizar a relação proposta por Fourier na equação conhecida como Lei de Fourier usada para encontrar o fluxo térmico:

$$q' = \frac{k \cdot A \cdot \Delta T}{L} \quad (4.1)$$

Onde q' é o fluxo térmico, k é a condutividade térmica do material, A é a área da seção transversal, ΔT é a variação da temperatura entre os pontos, e L é a espessura da parede.

Figura 17: Transferência de calor unidimensional por condução em regime permanente

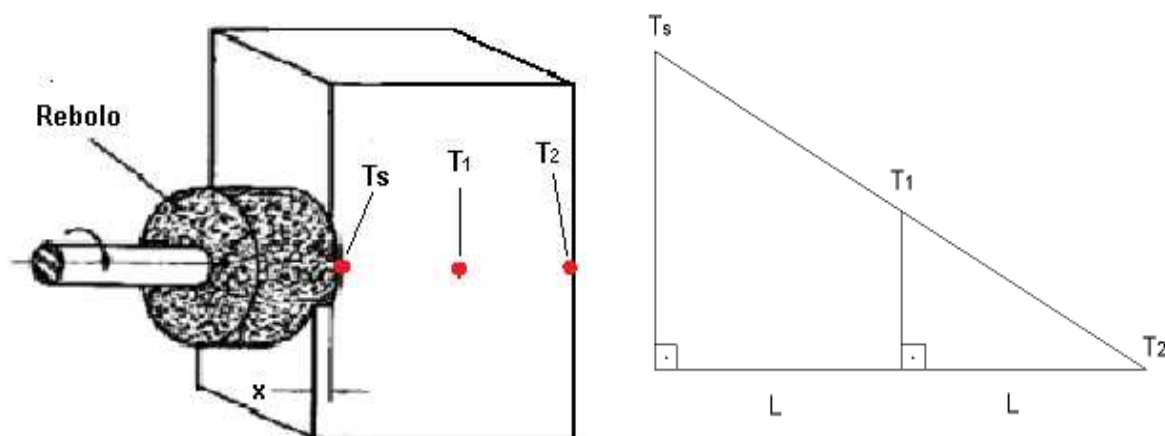


Fonte: Adaptado de INCROPERA *et al.*, 2008.

Sabe-se que a inclinação da reta de variação da temperatura entre os termopares é a mesma entre o termopar mais próximo e a superfície de trabalho, logo, por semelhança de triângulos, chega-se à equação:

$$\frac{Bm}{Am} = \frac{BM}{AM} \quad (4.2)$$

Figura 18: Representação dos pontos de coleta da temperatura



Fonte: Elaborada pelo autor.

Substituindo as incógnitas, temos:

$$\frac{L}{T1 - T2} = \frac{2 \cdot L - x}{Ts - T2} \quad (4.3a)$$

Isolando o termo Temperatura na Superfície de Corte (T_s):

$$T_s = 2 \cdot T1 - T2 + \frac{x \cdot (T2 - T1)}{L} \quad (4.3b)$$

Os valores de T_1 , T_2 em determinado tempo são fornecidos pelos termopares e L é conhecido. No que diz respeito ao valor de x (profundidade desbastada), adota-se como um procedimento linear, de maneira que o desbaste seja igual para intervalos de tempo iguais. Sendo assim, é possível encontrar o valor de x simplesmente relacionando-o com o tempo de ensaio.

A partir destes dados, torna-se possível demonstrar e analisar graficamente o comportamento da variação da temperatura na zona de corte ao longo do ensaio, levando em consideração a variação de profundidade da peça usinada.

4.2.2 Força

Na grande maioria dos artigos, as forças tangencial e normal de corte foram calculadas através de um dinamômetro de três componentes, como o do tipo 9129A e 9257A, da fabricante Kistler, utilizados especialmente para este tipo de medição em processos de usinagem. Tentativas de contato para realizar uma cotação deste produto com o representante brasileiro foram em vão e os valores não estão disponíveis na internet. Como uma forma alternativa para saber a viabilidade do uso destes equipamentos, realizou-se uma pesquisa em sítios da Internet e o Amplificador, nos modelos descritos, não foi encontrado à venda, somente o dinamômetro modelo 9257A pôde ser encontrado, em estado de seminovo, anunciado por R\$23300,00 no sítio de Internet de comércio eletrônico internacional: <https://www.ebay.com/itm/Kistler-9257A-/313203837063?_ul=BR>, cujo custo de aquisição elevado também inviabiliza a compra.

No que diz respeito à força normal, o método já utilizado em laboratório – que é a utilização de um peso metálico pressionando a peça retificada contra o rebolo – é uma boa alternativa para se manter fixado este parâmetro do processo.

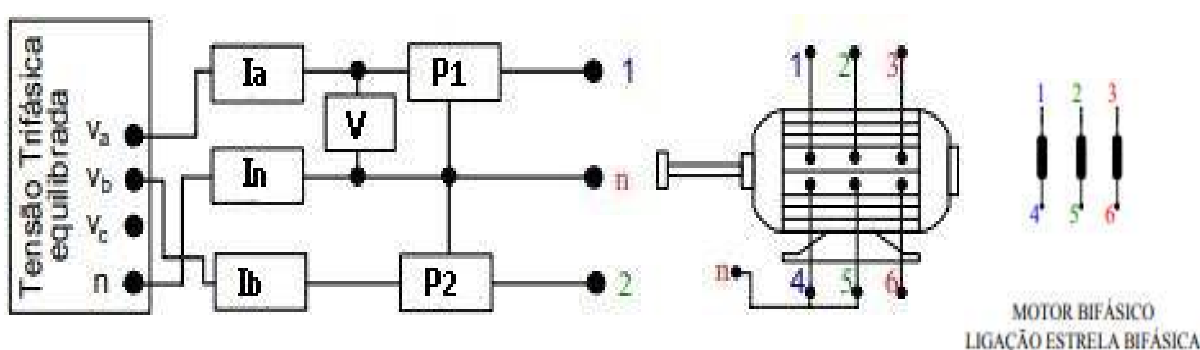
4.2.3 Energia / Potência

Uma alternativa ao uso do dinamômetro da Kistler é seguir os passos de Kwak *et al* (2006) e usar um sensor de efeito Hall para realizar medidas no motor elétrico e caracterizar, indiretamente, a potência de corte requerida no processo de usinagem ensaiado.

Assim como no parâmetro das forças normais e tangenciais, a energia gasta na retificação é um parâmetro diretamente relacionado com os outros parâmetros do processo de retificação. Por conseguinte, realizar a sua medição contribui para a análise do rebolo, mas a sua não observância não inviabiliza o ensaio.

Medição com um Wattímetro: No trabalho de pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFU, realizado por Neto (2006), é realizada a medição da potência de um motor bifásico com o uso de um wattímetro, posicionado no sistema como na Figura 19 a seguir:

Figura 19: Disposição dos componentes elétricos no sistema.



Fonte: Adaptado de NETO, L. M. C., 2008.

Em que I_a é o valor da leitura da corrente na fase “a” do motor, I_b é o valor da leitura da corrente na fase “b” do motor, I_n é o valor da leitura da corrente de retorno pelo neutro do motor, V é a leitura da tensão no motor, P_1 é a leitura da potência no primeiro wattímetro e P_2 é a leitura da potência no segundo wattímetro.

Ainda segundo Neto (2006), nesta configuração de medida, a potência elétrica da máquina “P” é a soma das potências medidas pelos wattímetros, equação (4.4):

$$P = P1 + P2 \quad (4.4)$$

E a corrente elétrica da máquina “I” é o valor médio entre as correntes, equação (4.5) a seguir:

$$I = \frac{Ia + Ib + In}{3} \quad (4.5)$$

Segundo Outwater e Shaw (1952), toda essa energia de usinagem acaba virtualmente em calor. Logo, a partir desta afirmação e considerando o sistema isolado, pode-se dizer que no balanço energético elucidado pelas leis da termodinâmica, a energia de entrada do sistema é igual à energia de saída.

Portanto, a energia elétrica de entrada no motor é convertida em energia térmica e em energia química, sendo esta a energia que promove a quebra das ligações químicas tanto da peça usinada quanto do rebolo. Por conseguinte, tem-se que a eficiência energética do processo de retificação é inversamente proporcional à taxa de transferência de calor proveniente do contato peça-rebolo durante a usinagem.

4.2.4 Atrito e desgaste

O atrito e o desgaste são relacionados pela fórmula (2.3), na qual é traçada um parâmetro denominado Taxa de Desgaste (W_r) ou Razão G (G), que relaciona o volume de material removido (V_w) com o volume de desgaste do rebolo (V_s).

A medição de volume de desgaste do rebolo e do volume de material removido deve ser realizada com a utilização de paquímetro, ferramenta já presente no laboratório. Essas medidas devem ser realizadas em pelo menos três pontos distintos para cada medida e o valor médio deve ser considerado como a medida real da amostra.

A partir do gráfico da Razão G mostrado na Figura 11, pode-se perceber que, a medida que o ensaio avança, o comportamento dos desgastes é praticamente

linear. Sendo assim, adotando que este comportamento seja de fato linear, a medida da Razão G se mantém constante ao longo do experimento.

4.2.5 Rugosidade

Neste tópico, a utilização do aparelho medidor de rugosidade de propriedade do Laboratório de Metrologia da UFJF deve ser realizada em seis pontos distintos da peça usinada, sendo metade na direção longitudinal e a outra metade na direção transversal à peça. O valor encontrado para R_a , em micrômetros, é a média aritmética entre estas medidas.

Figura 20: Rugosímetro de superfície da Instrutherm modelo RP-100.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.4 SUGESTÃO DE METODOLOGIA

1. Escolher o rebolo a ser ensaiado;
2. Medir as dimensões do rebolo em 3 pontos diferentes e calcular a média entre elas;
3. Medir as dimensões da peça a ser usinada em 3 pontos diferentes e calcular a média entre elas;
4. Fixar o rebolo em seu suporte;

5. Fixar os termopares à uma distância de 20 e 40mm, respectivamente da superfície a ser usinada;
6. Fixar a peça em seu suporte;
7. Posicionar o equipamento na posição inicial de teste;
8. Colocar a carga fixa para compor a força normal;
9. Selecionar, se possível, a velocidade angular do rebolo;
10. Selecionar, se possível, a velocidade de avanço do rebolo;
11. Ligar o equipamento pelo tempo determinado de ensaio (10 minutos);
12. Esperar 30 segundos para o sistema atingir o regime permanente;
13. Coletar os dados dos Wattímetros a cada 30 segundos;
14. Após o tempo de ensaio determinado, desligar o equipamento;
15. Medir o desgaste da ferramenta de corte em 3 pontos diferentes e calcular a média entre elas;
16. Medir o desgaste da peça usinada em 3 pontos diferentes e calcular a média entre elas;
17. Calcular a Razão G;
18. Realizar a leitura dos dados dos termopares;
19. Calcular T_s , fórmula 4.3b, a partir dos dados coletados a cada 30 segundos;
20. Calcular q' , fórmula 4.1, a partir dos dados coletados a cada 30 segundos;
21. Medir o valor de R_a em 6 pontos diferentes e calcular a média;
22. Traçar os gráficos pertinentes ao ensaio a partir dos dados coletados e calculados.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como eixo central o estudo de ensaios de rebolos no processo de retificação plana frontal. Pode-se perceber que este é um tema pouco abordado na literatura, tendo-se à disposição apenas alguns artigos científicos sobre o assunto, e nos livros, o tema é apenas citado superficialmente, não aprofundado.

A partir da leitura de diversos artigos de usinagem, conclui-se que os parâmetros de usinagem são interdependentes, ou seja, à medida que um varia, os outros variam também. Dito isso, não foram todos os ensaios que mediram todos os parâmetros, pois alguns resultados são previsíveis, como o aumento da lubrificação gerar uma diminuição nas forças de corte e na temperatura da região usinada.

Ainda convém lembrar que alguns dos aparelhos utilizados para realizar a medição de parâmetros de usinagem são extremamente caros, a exemplo dos dinamômetros da fabricante Kistler. A utilização de um wattímetro na medição das medidas elétricas do motor pode ser capaz de suprir essa demanda, sendo necessário um ensaio laboratorial para testar a eficácia dessas medidas.

As dificuldades provenientes do elevado custo dos equipamentos e do experimento em si, podem ser superadas pela comparação entre a eficiência energética do processo e a taxa de transferência de calor proveniente do contato peça-rebolo durante a usinagem, pois são medidas inversamente proporcionais.

No que diz respeito à temperatura na região de corte, a metodologia proposta neste trabalho aparenta ser de grande valia, pois traz consigo uma projeção mais próxima da realidade do que o método utilizado anteriormente em laboratório.

Finalmente, acredita-se que este trabalho elucida pontos importantes do ensaio laboratorial de rebolos servindo como base para que os ensaios a serem realizados sejam padronizados e alcancem resultados mais conclusivos e confiáveis.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar um estudo aprofundado do motor utilizado para mover o rebolo;
- Realizar a simulação numérica da temperatura na superfície de corte;
- Projetar uma bancada específica para ensaio de rebolo;
- Realizar um estudo da interferência da vibração no processo de retificação;
- Realizar um ensaio com a metodologia aqui proposta.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15230: Ferramentas abrasivas – Uso, manuseio, segurança, classificação e padronização**. Rio de Janeiro, ABNT, 2016.
- ALBERTS, M.; ALAITZIDOU, K.; MELKOTE, S., An investigation of graphite nanoplatelets as lubricant in grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 49, p. 966–970, 2009.
- DANDOLINO, D.L. **Gerenciamento Ambiental de Fluidos de Corte em Industrias Metal-Mecânicas**. Florianópolis, 2001. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina.
- DILBAG, S.; RAO, P. V., Performance improvement of hard turning with solid lubricants. **Springer-Verlag London Limited**, 2007.
- DINIZ, A.; MARCONDES, F.; COPPINI, N. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**, 7^a ed., São Paulo: Artliber, 2010.
- ERDEMIR, A., A review of the lubrication of ceramics with thin solid films. **Jahanmir S (ed) Friction and wear of ceramics**. Marcel Dekker, New York, USA, p. 119–162, 1994.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Blucher, 2013.
- HOFY, H. E. **Fundamental of Machining Process**. Taylor & Francis Group: 2007.
- KURIMOTO, T.; BARROW, G. The influence of aqueous fluids on the wear characteristics and life of carbide cutting tools. **Annals of CIRP**, v. 46, p. 43–48, 1997.
- KWAK, J. S.; SIM, S. B.; JEONG, Y. D., An analyses of grinding power and surface roughness in external cylindrical grindind of hardened SCM440 steel using the response surface method. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, p. 304-312, 2006.

MALKIN, S.; ANDERSON, R. B., Thermal aspects of grinding. Part 1: Energy partition. **Transactions of ASME**, v. 98, p. 1177-1183, 1974.

MARINESCU *et al.* **Handbook of Machining with Grinding Wheels**. 1ª ed., Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2007.

MARSHAL, E. C.; SHAW, M. C., Forces in dry surface grinding. **Transactions of ASME**, v. 74, p. 51-59, 1952.

NEALE, M. J., Lubrication - A Tribology Hand Book; **Butterworth-Heinemann Ltd.**: Oxford, 1993.

NETO, L. M. C., **Motor de Indução Bifásico em Rede de Alimentação Bifásica Simétrica com Condutor de Retorno**. Uberlândia, 2006. Dissertação de Pós-graduação em Engenharia Elétrica – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal Uberlândia.

OUTWATER, J. O.; SHAW, M. C., Surface temperatures in grinding. **Transactions of ASME**, v. 74, p. 73-86, 1952.

RAO, D. N.; KRISHNA, P. V., The influence of solid lubricant particle size on machining parameters in turning. **International Journal of Machine Tool and Manufacture**, v. 48, p. 107–111, 2007.

RAO, D. N.; KRISHNA, P. V., Performance evaluation of solid lubricants in terms of machining parameters in turning. **International Journal of Machine Tool and Manufacture**, v. 48, p. 107–111, 2008.

REDDY, N.; RAO, P., Experimental investigation to study the effect of solid lubricants on cutting forces and surface quality in end milling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, p. 189-198, 2006.

SCARI, A. **Trabalho de Conclusão de Curso: Orientações**. Disponível em: <http://www.ufjf.br/mecanica/files/2008/07/Orientações-Gerais_TCC.pdf> Acesso em 18 jan. 2021.

SHAJI, S.; RADHAKRISHNAN, V. An investigation on solid lubricant moulded grinding wheels. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, p. 965-972, 2002.

SHAW, M.C. Principles of abrasive processing. **Oxford University Press Inc.**, New York, 1996.

SIQUEIRA, L.A., **Fabricação e Testes de Rebolos Com Uso de Grafite Como Lubrificante Sólido**. Juiz de Fora, 2018. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica – Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica, Universidade Federal de Juiz de Fora.

SNOEYS, R.; LEUVEN, K. U.; MARIS, M.; WO, N. F.; PETERS, J. Thermally induced damage in grinding. **Annals of CIRP**, v. 27, p. 571-581, 1978.

STOETERAU, R. L., **Fundamentos dos Processos de Usinagem**. Disponível em : <<http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/PMR2202-AULA%20RS1.pdf>> Acesso em 19 jan 2021.

TSAI, M.; JIAN, S., Development of a micro-graphite impregnated grinding wheel. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 56, p. 94-101, 2012.

XUA, X.; HUANGA, S.; GUANA, J.; HUA, J.; PENGGA, W., Grinding performance and self-lubrication mechanism of phenolic resin-bonded grinding wheel filled with inclusion complex of β -cyclodextrin and dialkyl pentasulfide. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 221, p. 163-171, 2015.

APÊNDICE A – Código de leitura dos dados do arduino aplicado no Laboratório de Metrologia da UFJF para medição de temperatura via termopar tipo K

```
// obtenção de temperatura

#include "max6675.h"

int thermoDO = 8;

int thermoCS = 9;

int thermoCLK = 10;

MAX6675 thermocouple(thermoCLK, thermoCS, thermoDO);

int vccPin = 3;

int gndPin = 2;

void setup() {

  Serial.begin(9600);

  // usar pinos do Arduino

  pinMode(vccPin, OUTPUT); digitalWrite(vccPin, HIGH);

  pinMode(gndPin, OUTPUT); digitalWrite(gndPin, LOW);

  Serial.println("Temperatura de retificação com uso do termopar MAX6675");

  // tempo de espera para estabilizar o conversor, 1/2 seg delay(500);

}

void loop()

// imprime a temperatura em graus Celsius de 5 em 5 seg

  serial.println(thermocouple.readCelsius());

  delay(5000);
```

ANEXO A – TERMO DE AUTENTICIDADE



UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA

Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.

Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.

Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral¹ e criminais previstas no Código Penal², além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, 15 de Março de 2021.

Assinatura manuscrita de Bruno Eduardo Almeida Araújo em azul.

Bruno Eduardo Almeida Araújo

Discente Matrícula: 201471054 – CPF: 11408399695

¹ LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

² Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena – detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.