



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS

Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais

FRANCISCO MATEUS FARIA DE ALMEIDA VARASQUIM

**OTIMIZAÇÃO DA RETIFICAÇÃO TANGENCIAL PLANA DE COMPÓSITOS
PLÁSTICOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE CARBONO**

Bauru

2010



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS

Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais

FRANCISCO MATEUS FARIA DE ALMEIDA VARASQUIM

**OTIMIZAÇÃO DA RETIFICAÇÃO TANGENCIAL PLANA DE COMPÓSITOS
PLÁSTICOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE CARBONO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências do *campus* de Bauru, Universidade Estadual Paulista para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia de Materiais, área de Processamento de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi

Bauru
2010

Varasquim, Francisco Mateus Faria de Almeida.

Otimização da retificação tangencial plana de compósitos plásticos reforçados com fibras de carbono / Francisco Mateus Faria de Almeida Varasquim, 2010.

89 f. il.

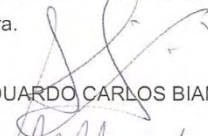
Orientador: Eduardo Carlos Bianchi

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências, Bauru, 2008

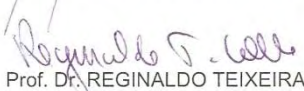
1. Retificação. 2. Fluido de corte. 3. Compósitos
4. MQL I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE FRANCISCO MATEUS FARIA DE ALMEIDA VARASQUIM, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS, DO(A) FACULDADE DE CIÊNCIAS DE BAURU.

Aos 10 dias do mês de fevereiro do ano de 2011, às 14:00 horas, no(a) Faculdade de Engenharia da UNESP/Bauru, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. MANOEL CLÉBER DE SAMPAIO ALVES do(a) Coordenadoria de Curso / Unidade de Itapeva, Prof. Dr. REGINALDO TEIXEIRA COELHO do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Escola de Engenharia de São Carlos-Usp, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de FRANCISCO MATEUS FARIA DE ALMEIDA VARASQUIM, intitulado "OTIMIZAÇÃO DA RETIFICAÇÃO TANGENCIAL PLANA DE COMPÓSITOS PLÁSTICOS REFORÇADOS COM FIBRAS DE CARBONO". Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: Aprovado. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI


Prof. Dr. MANOEL CLÉBER DE SAMPAIO ALVES


Prof. Dr. REGINALDO TEIXEIRA COELHO

DEDICATÓRIA

À minha mãe Célia Regina de Almeida e ao meu pai Luiz Rogério Varasquim que sempre souberam da importância da educação e ao apoio que sempre tive. À todos os meus amigos que sempre estiveram junto comigo independente se estavam ao meu lado ou no pensamento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha mãe, pois tudo que conquistei e ainda vou conquistar é graças a seu apoio, dedicação e amor que ela sempre teve comigo.

Agradeço ao meu pai pelo apoio, as conversas que tivemos, e tudo que pude absorver desses momentos.

A minha avó de Goiás Maria de Lurdes que sempre me manda energia positiva e que me ensinou muitas coisas que me fizeram como sou hoje.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e ao CTA (Centro de Tecnologia Aeronáutica) pelos recursos financeiros e corpos de prova disponibilizados para esta pesquisa, respectivamente.

A empresa NORTON, do Grupo Saint Gobain, pela doação do rebolo utilizado no presente trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi pela disposição e investimento do seu tempo em mim, pois só assim foi possível a realização dessa pesquisa. E ao Prof. Paulo Roberto de Aguiar pela ajuda em todas as etapas da pesquisa.

Agradeço também à Faculdade de Ciências da Universidade Estadual Paulista - UNESP, em especial ao programa de Pós-graduação em Programa em Ciência e Tecnologia de Materiais pela oportunidade que me foi concedida e a todos os professores que me ajudaram.

À Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista - *campus* de Bauru, por gentilmente ceder os Laboratórios de Usinagem por Abrasão para a elaboração deste trabalho.

Aos meus amigos Luiz Alves Ferreira Filho, Luiz Fernando Frezzatti Santiago, Ricardo Rodrigues Rosa, Diogo de Souza pelas conversas, apoio e horas de diversão que sempre me ajudaram a pensar melhor.

Aos alunos de graduação Rubens Chinali Canarim e Bruno Bastos Gonçalves, pelo apoio na realização da pesquisa, horas no laboratório e pelas risadas juntos.

Agradeço aos técnicos Hamilton José de Mello do Laboratório de Materiais e Osmar Luis Martinelli do Laboratório de Engenharia Elétrica pela ajuda prestada na realização dessa pesquisa

Agradeço especialmente a *Deus* por ter me concedido saúde, ânimo e capacidade para a realização desta pesquisa.

*“Matar o sonho é matarmo-nos. É mutilar
a nossa alma. O sonho é o que temos de
realmente nosso, de impenetravelmente e
inexpugnavelmente nosso.”*

(Fernando Pessoa)

VARASQUIM, F. M. F. A. **Otimização da retificação plana externa de compósitos plásticos reforçados com fibras de carbono.** 2010, 89p (Mestre em Ciência e Tecnologia dos Materiais na área Processamento de Materiais) - UNESP, Faculdade de Ciência e Tecnologia, Bauru, 2010.

RESUMO

Os materiais compósitos estão se tornando essenciais e amplamente utilizados na indústria moderna, principalmente nas indústrias aeronáutica e aeroespacial. Essa notável demanda por este tipo de material, proveniente da junção entre dois ou mais materiais distintos, pode ser explicada pelo resultado alcançado com essa combinação: propriedades específicas e otimizadas para cada aplicação. Devido à anisotropia do material, há a tendência de aparecimento de tensões residuais ou distorções estruturais, após o seu processamento. Para o devido controle destas distorções, é imperativo o processo de usinagem denominado retificação. Nesse processo de usinagem, há a necessidade da utilização de grande quantidade de fluido de corte (refrigeração convencional). Referente a preocupações ambientais, surgem métodos que visam reduzir a utilização abundante de fluidos de corte, como: a refrigeração otimizada, a técnica de mínima quantidade de lubrificação (MQL) e a retificação a seco. O presente trabalho analisou os métodos de lubri-refrigeração citados, na retificação plana de compósitos plásticos reforçados com fibras de carbono (PRFC's), como alternativas à retificação convencional, buscando mitigar o uso de fluidos de corte no meio industrial. Essa análise foi conduzida através da coleta de dados sobre a eficiência do processo e a qualidade superficial das peças, através das seguintes variáveis de saída: o comportamento de força tangencial de corte, rugosidade, energia específica, relação G (volume de material removido/volume de rebolo desgastado) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Com os resultados obtidos, verificou-se que a técnica de MQL gerou valores mais baixos de força tangencial de corte e energia específica de retificação. Já os métodos convencional e otimizado proporcionaram um menor desgaste da ferramenta de corte, bem como um melhor acabamento superficial.

Palavras chaves: Compósitos, retificação plana, refrigeração otimizada, MQL, retificação a seco, fibras de carbono.

VARASQUIM, F. M. F. A. **Optimization of surface grinding of plastic composites reinforced with carbon fiber.** 2010, 89p (Mestre em Ciência e Tecnologia dos Materiais na área de Processamento de Materiais) - UNESP, Faculdade de Ciência e Tecnologia, Bauru, 2010.

ABSTRACT

Composite materials are becoming essential and largely used in modern industry, mainly in aeronautics and aerospace industries. This notable demand for these materials, generated from the combination of two or more distinct materials, can be explained by some results obtained: unique and optimized properties, specific for each application. One of the main reasons for its large use is their structural composition, which comes from the fusion of two different materials, resulting into excellent structural properties. Due to the material anisotropy, there is a trend of appearing residual stresses and structural distortions, after its processing. For the adequate control of these distortions, it is necessary a machining process called grinding. When grinding these materials, there is a need of a great quantity of cutting fluids (conventional lubrication). In relation to the environmental concerns, new methodologies arise, which intend to reduce this large quantity of cutting fluid, like optimized cooling, the minimum quantity lubrication (MQL) technique and dry grinding. The present work analyzed the aforementioned lubri-cooling methods, on surface grinding of carbon fiber reinforced plastic composites (CFRP's), as alternatives to conventional cooling, in order to mitigate the deleterious effects of cutting fluids. This analysis was conducted through data gathering concerning the process efficiency and the workpiece surface quality, using the following output variables: behavior of the tangential force, surface roughness, specific grinding energy, G relation and scanning electron microscopy (SEM). With the results obtained, it can be verified that the MQL technique generated the lowest values of tangential cutting force and grinding specific energy. The optimized and conventional methods provided the lowest wear of the grinding wheel, as well as the better surface finishing.

Keywords: Composites, surface grinding, optimized cooling, MQL, dry grinding, carbon fibers.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS.....	ii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT.....	v
SUMÁRIO.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Motivação do trabalho	2
2. OBJETIVO	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. Materiais compósitos	4
3.2. Fibra de carbono	6
3.3. Compósitos reforçados com fibra de carbono	8
3.4. O processo de retificação	10
3.4.1. Retificação tangencial plana.....	11
3.4.2. Parâmetros envolvidos na retificação	13
3.4.2.1. Profundidade de corte (a).....	13
3.4.2.2. Velocidade de corte (V_s).....	13
3.4.2.3. Velocidade da mesa (V_w).....	14
3.4.2.4. Taxa de remoção de material e espessura equivalente de corte (h_{eq}).....	14
3.5. Retificação de compósitos	15
3.6. Fluidos de corte.....	16
3.6.1. Refrigeração convencional	17
3.6.2. Refrigeração otimizada.....	17
3.6.3. Mínima quantidade de lubrificação (MQL)	20

3.6.4.	Retificação sem lubrificação	21
3.7.	Rebolos	22
3.7.1.	Abrasivos	23
3.7.2.	Granulometria.....	23
3.7.3.	Dureza.....	24
3.7.4.	Estrutura	24
3.7.5.	Ligante	25
3.7.6.	Rebolos para retificação de compósitos	26
3.7.7.	Dressagem e topografia do rebolo	26
3.8.	Variáveis de controle de processo	29
3.8.1.	Força tangencial de corte e energia específica de retificação.....	29
3.8.2.	Relação G	31
3.8.3.	Microscopia Eletrônica de Varredura.....	32
3.8.4.	Rugosidade	33
4.	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	35
4.1.	Equipamentos Utilizados	36
4.1.1.	Rebolo e Dressadores	37
4.1.2.	Corpos de Prova	38
4.2.	Montagem do Banco de Dados	39
4.2.1.	Aquisição da Força Tangencial de Corte e Energia Específica de Retificação..	39
4.2.2.	Aquisição da Rotação do Rebolo	41
4.2.3.	Preparação dos corpos de ensaio para o MEV	42
4.3.	Preparação do Banco de Ensaios	43
4.3.1.	Preparação do Fluido de Corte para o Método Convencional.....	44
4.3.2.	Fixação da Peça	44
4.3.3.	Definição dos Parâmetros de Usinagem.....	45
4.4.	Preparação do fluido de corte para o método otimizado	47

4.4.1. Bocal utilizado para o método otimizado	47
4.5. Preparação do fluido para o MQL	49
4.5.1. Bocal utilizado para MQL	50
4.6. Preparação para retificação a seco	51
4.7. Procedimentos realizados antes de cada ensaio	51
4.8. Procedimentos realizados durante cada ensaio	53
4.9. Procedimentos realizados após cada ensaio.....	54
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.1. Força tangencial de corte	56
5.2. Energia específica de corte	58
5.3. Relação G.....	60
5.4. Rugosidade (Ra)	61
5.5. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	63
6. CONCLUSÃO.....	82
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Publicações recentes na língua inglesa sobre materiais e estruturas multifuncionais.	3
Figura 3.1 - Modelo matemático da composição de um painel de compósitos. a) matriz sem organização da fibra; b) e c) matriz com organização das fibras.	5
Figura 3.2 - Microscopia eletrônica de varredura de um compósito reforçado com fibra de carbono.	9
Figura 3.3 - Tabela de resistência específica de alguns materiais.	10
Figura 3.4 - Os seis elementos básicos da retificação plana.	12
Figura 3.5 - Parâmetros de entrada e saída na retificação tangencial plana.	12
Figura 3.6 - Formas de Bocal. a) refrigeração otimizada; b) refrigeração convencional.	19
Figura 3.7 - Principais constituintes do rebolo.	22
Figura 3.8 - Mecanismos de desgaste do rebolo.	27
Figura 3.9 - Esquematização da operação de dressagem.	28
Figura 3.10 - Diagrama esquemático da medição da força tangencial de corte através da medição da potência elétrica do motor.	30
Figura 4.1 - Máquina retificadora plana SULMECÂNICA.	35
Figura 4.2 - Central de aquisição de dados.	36
Figura 4.3 - Rebolo convencional de carbeto de silício fixo ao eixo árvore da máquina.	37
Figura 4.4 - Dressador do tipo conglomerado utilizado nesta pesquisa.	38
Figura 4.5 - Corpo de prova.	39
Figura 4.6 - Imagem do LabView [®] (a) Interface do programa; (b) Diagrama de blocos.	40
Figura 4.7 - Localização do encoder acoplado no eixo do motor da retificadora.	42
Figura 4.8 - Corpo de prova fixado no suporte para realização do MEV.	43
Figura 4.9 - Fixação da peça a ser usinada.	45
Figura 4.10 - Diagrama dos ensaios definitivos que serão realizados.	46
Figura 4.11 - Esquema da aplicação de fluido do método otimizado.	47
Figura 4.12 - Vista lateral do bocal utilizado para o método otimizado.	48

Figura 4.13 - Vista de perfil do bocal utilizado para o método otimizado.....	48
Figura 4.14 - Detalhes construtivos do aplicador ITW Accu-lube 79053D.....	49
Figura 4.16 - Vistas do bocal utilizado na experimentação com MQL.....	50
Figura 4.17 - Vista da parte traseira do bocal MQL mostrando os orifícios de entrada de ar comprimido e fluido de corte.....	51
Figura 4.18 - Refratômetro ATAGO N-50E, utilizado para verificação da concentração do fluido de corte do método convencional.....	52
Figura 4.19 - Medição de rugosidade.	54
Figura 5.1 - Valores médios da Força tangencial de corte.	56
Figura 5.2 - Valores médios finais da energia específica de retificação.	58
Figura 5.3 - Resultados da relação G.....	60
Figura 5.4 - Rugosidades (Ra) para os diferentes métodos de lubri-refrigeração.	61
Figura 5.5 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com refrigeração convencional e h_{eq1} (ampliação de 500 vezes).	64
Figura 5.6 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com refrigeração convencional e h_{eq1} (ampliação de 2.000 vezes).	64
Figura 5.7 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com refrigeração convencional e h_{eq2} (ampliação de 500 vezes).	65
Figura 5.8 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com refrigeração convencional e h_{eq2} (ampliação de 2.000 vezes)	66
Figura 5.9 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com refrigeração convencional e h_{eq3} (ampliação de 500 vezes)	67
Figura 5.10 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com refrigeração convencional e h_{eq3} (ampliação de 2.000 vezes)	67
Figura 5.11 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com refrigeração otimizada e h_{eq1} (ampliação de 500 vezes)	68
Figura 5.12 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com refrigeração otimizada e h_{eq1} (ampliação de 2.000 vezes)	69

Figura 5.13 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com refrigeração otimizada e h_{eq2} (ampliação de 500 vezes).....	70
Figura 5.14 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com refrigeração otimizada e h_{eq2} (ampliação de 2.000 vezes).....	70
Figura 5.15 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com refrigeração otimizada e h_{eq3} (ampliação de 500 vezes).....	71
Figura 5.16 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com refrigeração otimizada e h_{eq3} (ampliação de 2.000 vezes).....	72
Figura 5.17 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com MQL e h_{eq1} (ampliação de 500 vezes).....	73
Figura 5.18 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com MQL e h_{eq1} (ampliação de 2.000 vezes).....	73
Figura 5.19 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com MQL e h_{eq2} (ampliação de 500 vezes).....	74
Figura 5.20 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com MQL e h_{eq2} (ampliação de 2.000 vezes).....	75
Figura 5.21 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com MQL e h_{eq3} (ampliação de 500 vezes).....	76
Figura 5.22 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com MQL e h_{eq3} (ampliação de 2.000 vezes).....	76
Figura 5.23 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio sem lubrificação e h_{eq1} (ampliação de 500 vezes).....	77
Figura 5.24 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio sem lubrificação e h_{eq1} (ampliação de 2.000 vezes).....	78
Figura 5.25 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio sem lubrificação e h_{eq2} (ampliação de 500 vezes).....	79
Figura 5.26 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio sem lubrificação e h_{eq2} (ampliação de 2.000 vezes).....	79
Figura 5.27 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio sem lubrificação e h_{eq3} (ampliação de 500 vezes).....	80

Figura 5.28 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio sem lubrificação e h_{eq3} (ampliação de 2.000 vezes).....	81
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Classificação das durezas de um rebolo.....	24
Tabela 4.1- Valores da frequência, rotação e tensão utilizados para a calibração da curva de rotação do rebolo.....	41
Tabela 4.3 - Valores dos parâmetros a serem utilizados.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

- a - penetração do rebolo na peça (mm)
- b - largura de retificação (mm)
- d_s - diâmetro do rebolo (mm)
- f_{tc} - força tangencial de corte (N)
- G - relação G (-)
- h_{eq} - espessura equivalente de corte (μm)
- L - comprimento de medição (mm)
- MEV - microscopia eletrônica de varredura (-)
- MQL - mínima quantidade de lubrificante(-)
- n_s - rotação do rebolo (rpm)
- Q_w - taxa de remoção do material (mm^3/s)
- Q'_w - taxa de remoção específica de material ($\text{mm}^3/\text{mm.s}$)
- R_a - rugosidade média (μm)
- RPM - rotação por minuto (-)
- V_s - velocidade de corte (m/s)
- V_w - velocidade da peça (m/s)
- y - altura do pico ou a profundidade do vale (μm)
- y_{cl} - altura do posicionamento da linha de centro (μm)
- Z_s - volume de rebolo gasto (mm^3)
- Z_w - volume de material removido (mm^3)

1. INTRODUÇÃO

Os materiais compósitos plásticos reforçados com fibra de carbono vêm sendo largamente utilizados na indústria atual, pois possuem excelentes propriedades físicas e mecânicas, como rigidez, resistência à tração, entre outras. No seu uso como um elemento importante de precisão, geralmente é necessário usinar este componente para se atingir precisão dimensional e geométrica, como furos para juntas e extremidades para encaixe com outras peças (ZHONG, 2003). Após esse processo primário de usinagem, para melhorar a qualidade da superfície do material, é desejável estudar o processo de retificação desses compósitos, considerado como um processo viável para a melhoria da rugosidade superficial deste componente (TSO e CHANG, 2003). A classe de materiais compósitos tem sido cada vez mais importante para avanços tecnológicos em projetos e desenvolvimento de melhorias para produtos usuais, assim como, na criação de novos produtos devido as grandes variações que podem ser obtidas no material mexendo na sua composição. Também se faz necessário o conhecimento das técnicas utilizadas para o processamento do material e como ele se comporta durante seu processamento para evitar que ocorram danos nas peças finais. Para se atingir as tolerâncias geométricas e dimensionais deste material com boa qualidade superficial um dos processos utilizados é o processo de retificação.

No processo de retificação, durante a formação dos cavacos, grande parte da energia gerada é convertida em calor, causando altas temperaturas na região de corte que podem causar danos térmicos às peças e comprometer sua integridade superficial com o surgimento de fissuras, distorções, tensões residuais elevadas e não-conformidades dimensionais. O uso de fluidos de corte no processo de retificação, dessa forma, torna-se praticamente indispensável. Além da função de lubrificação e de refrigeração, o fluido de corte remove os cavacos gerados durante a usinagem, protege a máquina e peças contra oxidação, dentre outras (KOVACEVIC e MOHAN, 1995).

A redução e até mesmo a não utilização desses fluidos acarretará em um aumento de temperatura no processo e assim diminuindo o rendimento do rebolo assim como reduzindo a qualidade geométrica bem como também a qualidade superficial das peças retificadas e também facilitará o empastamento mais rápido do rebolo. Porém com as leis ambientais cada vez mais rígidas as faz-se necessário o estudo dessas novas técnicas de lubri-refrigeração devido as exigências referentes ao impacto ambiental, com isso tem sido feitos estudos em novas formas de aplicação de fluido afim de diminuir a quantidade de fluido utilizado. Uma

técnica que vem sendo empregada, com sucesso pelo Grupo de Pesquisas em Usinagem por Abrasão da Faculdade de Engenharia da UNESP, câmpus de Bauru, é a de refrigeração otimizada, que consiste da utilização de uma pequena quantidade de fluido de corte aplicada com elevada velocidade na interface entre o rebolo e a peça. Assim, a barreira aerodinâmica é quebrada e o fluido penetra nesta região, minimizando a geração de calor. Porém, apesar de toda importância que o tema ganhou nos últimos anos o processamento de compósitos, principalmente a retificação, e a aplicação de diferentes técnicas de refrigeração, como a otimizada e a mínima quantidade de lubrificante (MQL), por serem recentes, ainda são pouco estudadas e possuem reduzido número de publicações científicas.

1.1.Motivação do trabalho

Materiais compósitos tem tido grande destaque em sua utilização nos últimos anos devido a busca de novos materiais para solução de antigos problema. Com esse intuito vem-se estudando sobre as principais características desses materiais assim como a melhor forma de processamento dos mesmos.

O número de publicações relacionadas com vários aspectos da mecânica e estrutura de materiais multifuncionais tem crescido constantemente nos últimos anos. A Figura 1 mostra o crescimento do número de artigos relacionados com a mecânica e estrutura de materiais multifuncionais, em revistas a partir de 2000 (GIBSON, 2010).



Figura 1.1 - Publicações recentes na língua inglesa sobre materiais e estruturas multifuncionais (GIBSON, 2010).

Na Figura 1.1 nota-se que o grande aumento de pesquisas sobre materiais compósitos se dá em 2006, isso acontece devido a busca de novo materiais para melhorar aplicações, viabilizar projetos assim como também realizar inovações tecnológicas.

Materiais multifuncionais são principalmente materiais compósitos, e o forte crescimento na utilização desse tipo de material tem sido influenciado design e propriedades obtidas. Uma abordagem tradicional para o desenvolvimento de estruturas é estudar a relação entre a carga aplicada e outras propriedades separadamente, resultando em uma estrutura otimizada com várias características intercaladas (GIBSON, 2010).

Com esse crescimento de utilização de materiais compósitos torna-se imprescindível o conhecimento dos métodos de processamento. Por isso a escolha desse material para esse projeto, pois a retificação em aço, cerâmicas e algumas ligas metálicas já é tema de pesquisa e nos compósitos plásticos reforçados com fibra de carbono ainda segue sem pesquisa em torno do assunto.

2. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo estudar e analisar o comportamento da retificação de compósitos plásticos reforçados com fibras de carbono juntamente com as técnicas de refrigeração convencional, otimizada e o MQL, visando à minimização da

utilização dos fluidos de corte no meio industrial sem que ocorra perdas significativas de qualidade superficial bem como também que o método que possa ser implementado na indústria.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste Capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os principais assuntos tratados neste trabalho. É descrito o método de retificação tangencial plana usado e as principais variáveis envolvidas além das quatro formas de lubri-refrigeração utilizadas.

3.1. Materiais compósitos

A origem dos materiais compósitos é encontrada na natureza, onde as árvores são exemplos perfeitos. Elas são suportadas por troncos com fortes fibras de celulose unidas por lignina (resina natural). A fibra da madeira é difícil de romper quando os esforços estão atuando no sentido longitudinal da mesma, mas com os esforços atuando no sentido transversal à fibra, o seu rompimento torna-se mais fácil, ocorrendo a delaminação (separação das camadas de uma peça coextrusada ou laminada). Por esta razão os metais com suas propriedades isotrópicas tornam-se mais populares como materiais estruturais, mas ainda possuem características tais como maior densidade, baixa resistência mecânica a alta temperatura etc. Assim os modernos materiais compósitos proporcionam vantagens para compensar tais dependências (MARTINS, 1999).

Entre as características estruturais mais importantes que um sistema pode fornecer são rigidez estática e dinâmica, força normal e paralela às fibras, tenacidade, ductilidade, resistência à fadiga, de absorção de energia, amortecimento e estabilidade térmica. Apesar do peso estrutural não ser uma característica, é uma variável do projeto extremamente importante que tem sido impulsionada pelos projetos mais leves com o uso de materiais compósitos, nos últimos anos. Com materiais estruturais convencionais, tem sido difícil de alcançar a melhoria simultânea em várias propriedades estruturais, mas a crescente utilização de materiais

compósitos tem sido impulsionada, em parte, pelo potencial para essas melhorias (Gibson, 2010).

Cerâmicas como SiC, carbono e alumina são amplamente utilizadas em formas de fibra como reforço, em matrizes metálicas, cerâmicas ou poliméricas, conferindo ao material final resistência superior à dos materiais convencionais, que lhe permite suportar condições adversas durante o voo de uma aeronave, por exemplo. Diversas aplicações específicas podem ser destacadas como blindagem de painéis laterais em aeronaves, em hélices de turbinas entre outras (RAMBO, 2006).

Segundo Strong, 1989, os materiais compósitos são uma combinação de um material de reforço (partícula ou fibra) em conjunto com outro material atuando como elemento de união matriz, mantendo o material de reforço sempre junto, protegendo-o dos efeitos do meio ambiente e transferindo os esforços aplicados na estrutura para o reforço. Estes materiais podem ser divididos em compósitos plásticos reforçados com fibras de carbono (PRFC) e compósitos de carbono reforçados com fibra de carbono (CRFC).

Segundo Papargyris *et. at.* (2008), compósitos de polímeros reforçados com fibras ganhou interesse considerável nos últimos anos, principalmente devido à sua leveza e suas propriedades mecânicas. Estas características levaram à utilização e aplicação de materiais compósitos em grandes indústrias como a indústria aeroespacial e automobilística. Os altos custos operacionais envolvidos junto com a complexidade das técnicas de produção empregadas têm restringido uma maior utilização industrial dos compostos. Por essa razão, um esforço considerável tem sido feito no sentido de encontrar e desenvolver rotas alternativas rentáveis para a confecção de materiais compósitos.

A confecção desse tipo de material pode ser feita de forma randômica ou de forma ordenada durante a dispersão das fibras, como pode-se observar na Figura 3.1.

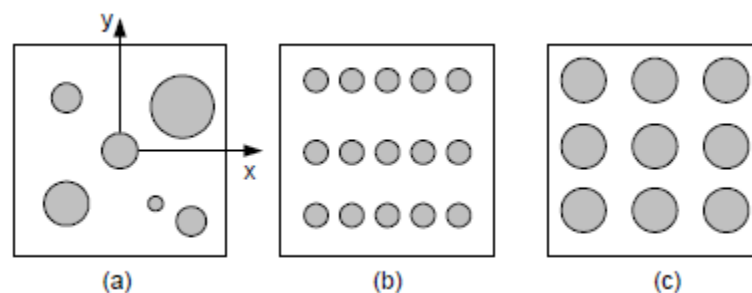


Figura 3.1 - Modelo matemático da composição de um painel de compósitos. a) matriz sem organização da fibra; b) e c) matriz com organização das fibras (YANG, HUH e HAHN., 2003).

A Figura 3.1 nos mostra em (a) uma matriz com fibras sem nenhuma organização, nem direção e nem tamanho, enquanto em (b) e (c) pode-se observar que há um arranjo ou orientação das fibras em relação umas às outras, a concentração das fibras e sua distribuição têm influência significativa sobre a resistência e sobre outras propriedades dos compósitos reforçados com fibras. O reforço de fibra geralmente é encontrado em uma das três configurações principais: alinhado em uma única direção, cortado aleatoriamente ou tramado em um tecido que é laminado com a matriz. (SHACKELFORD, 2008).

Compósitos com fibras contínuas e alinhadas têm respostas mecânicas que dependem de diversos fatores, entre os quais os comportamentos tensão-deformação das fases fibras e matriz, as frações volumétricas das fases e a direção na qual a tensão ou carga é aplicada. Além do mais, as propriedades de um compósito que possui as suas fibras alinhadas são altamente anisotrópicas, isto é, dependem da direção na qual elas são medidas (CALLISTER, 2010).

Os compósitos com fibras descontínuas e alinhadas têm uma eficiência de reforço menor que as fibras contínuas. Apesar disso, eles estão se tornando cada vez mais utilizados. Fibras de vidro picadas são reforços desse tipo usado com maior frequência. Contudo, fibras descontínuas de carbono e aramida também são empregadas. Esses compósitos com fibras curtas podem ser produzidos com módulo de elasticidade e limite de resistência à tração que se aproximam de 90% e 50%, respectivamente, dos seus análogos com fibras contínuas. Já os compósitos com fibras descontínuas e aleatórias são aplicados onde tensões são totalmente multidirecionais. A eficiência do reforço é de apenas um quinto se comparado com os compósitos reforçados com fibras contínuas e alinhadas na direção longitudinal, entretanto, as características mecânicas são isotrópicas (CALLISTER, 2010).

3.2.Fibra de carbono

As fibras de carbono têm merecido uma atenção especial de diversos grupos de pesquisas devido às suas características peculiares, das quais pode ser destacada a baixa densidade associada a uma alta resistência mecânica. Estes materiais foram utilizados pela primeira vez nas indústrias aeronáutica e aeroespacial e o sucesso desta aplicação fez crescer as pesquisas e as novas aplicações envolvendo este material, bem como aprimoramento do processo de fabricação (CARVALHO, KUBOTA e ROHWEDDER, 1999).

Fibras de carbono são referidas normalmente como fibras de grafite, entretanto somente fibras de carbono de elevado módulo de elasticidade com estrutura de grafite tridimensional podem ser denominadas propriamente fibras de grafite. Em virtude de as fibras de carbono possuírem elevados valores de resistência à tração, módulo de elasticidade extremamente elevado e baixa massa específica, comparadas com outros materiais de engenharia, são utilizadas predominantemente em aplicações críticas envolvendo redução de massa. As fibras de carbono comercialmente disponíveis podem duplicar seus valores de módulo de elasticidade em relação às outras fibras de reforço, tais como aramida e vidro de alta resistência e alto módulo, e exceder os metais em resistência à tração. Quando se utilizam materiais compósitos de fibras de carbono, a sua resistência e módulo de elasticidade podem ser orientados de modo otimizado para minimizar a massa final. Além da resistência e rigidez, as fibras de carbono possuem excelente resistência à fadiga, características de amortecimento de vibrações, resistência térmica e estabilidade dimensional. As fibras de carbono possuem também boa resistência elétrica e térmica e são quimicamente inertes, exceto quanto à oxidação (CALLISTER, 2010).

Em meados da década de 1960, no Japão e na Inglaterra foi desenvolvido um processo mais eficiente de produção de fibras de carbono utilizando-se poliacrilo-nitrila (PAN). Este processo é utilizado hoje em dia por mais de 90% da produção de fibras de carbono comercial. Durante as últimas décadas, o processo tem sido melhorado em sua eficiência para aumentar a resistência das fibras, o seu módulo, resistência à manipulação e diminuir deformações e falhas (WIEBECK, 2005).

Três diferentes materiais precursores são comumente usados actualmente para a produção de fibras de carbono: rayon, poliacrilonitrila (PAN), pitches cristalinos isotrópicos e líquidos. As fibras de carbono são feitas predominantemente da carbonização do PAN. As fibras são constituídas de fibras de grafite intercaladas com planos tubulares e basais que tende a se alinhar no eixo da fibra. Isso forma uma estrutura interna que lembra a de uma casca de cebola. Fibras de pitch podem ter uma estrutura interna diferente, mais parecida com feixes ou raios (UNITED STATES OF AMERICA, 2002).

Uma interface fibra/matriz forte aumenta a integridade dos compósitos e transfere a carga eficientemente às fibras, através da matriz, resultando em compósitos mais resistentes. Com o propósito de aumentar a atividade superficial e, conseqüentemente, melhorar a transferência de tensões em compósitos, o reforço pode ser submetido a diferentes processos de tratamento superficial (RAMBO, 2006).

As fibras contínuas mais encontradas nos polímeros reforçados com fibras para aplicações em engenharia civil são de vidro (G), de aramida (A) e de carbono (C), sendo os respectivos compósitos denominados pela língua Inglesa por GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymers - Polímeros Reforçados com Fibras de Vidro), AFRP (Aramid Fiber Reinforced Polymers - Polímeros Reforçados com Fibras de Aramida) e CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers - Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono). Entre estes três tipos de fibras, as de carbono são as que apresentam melhores propriedades mecânicas, são as mais resistentes à ação de agentes químicos, são imunes à corrosão e não absorvem água (BARROS, 2004).

3.3. Compósitos reforçados com fibra de carbono

Os plásticos reforçados com fibra de carbono (PRFC) são materiais alternativos ao aço inoxidável e outros materiais corrosivos, especialmente em aplicações industriais, tais como petróleo, gás e indústrias de processamento (GUU *et. al.*, 2001) .

Com o aumento da aplicação e maior experiência em seu uso aconteceram aperfeiçoamentos das fibras e dos materiais utilizados como matrizes (termorrígidos e termoplásticos) resultando em compósitos PRFC com propriedades mecânicas melhoradas, permitindo aos compósitos substituir outros materiais convencionais como ligas de alumínio e titânio em estruturas primárias (SOUTIS, 2005).

Os compósitos plásticos reforçados com fibra de carbono (PRFC) são fabricados pela mistura de fibras de carbono e resina plástica em condições pré-definidas. Estes materiais são distinguidos por sua elevada resistência e rigidez, baixa densidade, excelentes propriedades de amortecimento e altas resistências a impactos e corrosão, além disso, possuem uma expansão térmica que se modifica um material de características únicas. Devido a suas excelentes propriedades mecânicas, os PRFC têm sido amplamente utilizados para os componentes de precisão e componentes estruturas, tais como a fuselagem da aeronave, as estruturas da asa, rotores de helicópteros, pás do moinho de vento, estradas e estruturas de embarcações marinhas, grandes estruturas civis e pontes. PRFC pode reduzir significativamente o peso, enquanto aumentam a resistência e durabilidade que pode resultar em grande aumento na eficiência dos veículos e instalações estruturais (WEN, XIA e CHOY, 2010).

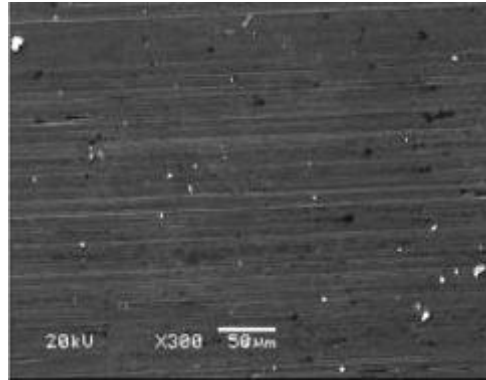


Figura 3.2 - Microscopia eletrônica de varredura de um compósito reforçado com fibra de carbono (JIA *et. al.*, 2005).

O alinhamento do plano paralelo à base com o eixo das fibras deixa as fibras rígidas, por causa da baixa densidade relativa, por perto de 2 mg/m^3 , tem um valor extremamente alto de dureza específica [aproximadamente $200 \text{ GPa}/(\text{mg.m}^3)$]. Imperfeições no alinhamento que ocorrem durante o processo de manufatura resulta em um perfil complexo vazio estendido paralelamente ao eixo das fibras. Estes espaços vazios agem como criadores de tensões e pontos de fraqueza ocasionando uma redução nas propriedades de rigidez. Outra fonte de defeitos, que muitas vezes é associada ao processo de manufatura, são os vazios da superfície e os macro-cristais. O arranjo dos planos no momento de cruzar as camadas também é importante uma vez que seus efeitos afetam as propriedades transversais e as de cisalhamento da fibra (SOUTIS, 2005).

O refinamentos na tecnologia de processamento das fibras nos últimos 20 anos tem levado a consideráveis aumentos à resistência a tração ($\sim 4,5 \text{ GPa}$) e na tensão de ruptura (mais do que 2%) para fibras baseadas no PAN. Esses materiais podem ser dispostos em três formas básicas: módulo alto (MH, $\sim 380 \text{ GPa}$), módulo intermediário (MI, $\sim 290 \text{ GPa}$) e alta tensão (AT, com módulo perto de 230 GPa e resistência à tração de $4,5 \text{ GPa}$). Os desenvolvimentos mais recentes de fibras de alta tensão tem levado à discussão do que é conhecido sobre fibras de alta tensão, que possui valores de tensão de 2% antes da fratura. A resposta ao estresse da tensão de tração é a deformação elástica até a falha e uma grande quantidade de energia quando as fibras se rompem sem deformação plástica. A seleção da fibra apropriada depende muito no que ela vai ser aplicada. Para aeronaves militares, tanto alto módulo e alta tensão são desejadas, em contraste, para aplicações em satélites é benéfico o uso de fibras de alto módulo melhorando a estabilidade e rigidez dos refletores, antenas e as estruturas de suporte (SOUTIS, 2005).

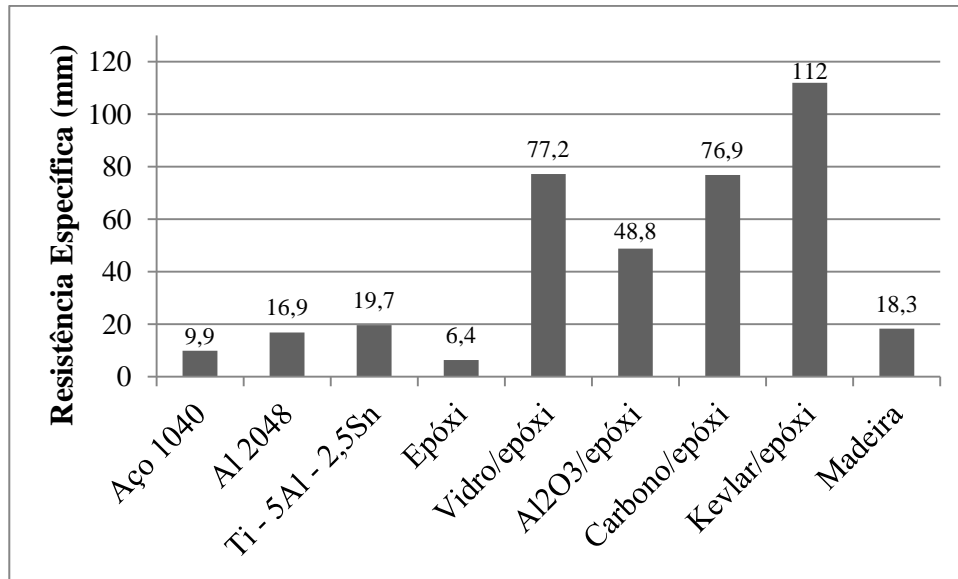


Figura 3.3 - Tabela de resistência específica de alguns materiais (SHACKELFORD, 2008 adaptada).

Nota-se analisando a Figura 3.3 que compósitos reforçados com fibra de carbono tem aproximadamente uma resistência específica 7,5 vezes maior que o aço 1040 e 4 vezes maior que uma liga de titânio. Fazendo que esse material tenha excelentes propriedades.

3.4. O processo de retificação

Recentemente com o processo de globalização da economia, as indústrias nacionais vêm sofrendo a crescente concorrência internacional. Para que um produto seja competitivo, do ponto de vista do consumidor, é preciso que a relação custo/benefício seja ótima. Por sua vez, para que uma empresa esteja inserida em tal competição, seu produto deve ser fabricado em um tempo curto, apresentando alta qualidade e baixo preço. Inserido em tal contexto, encontra-se o processo de retificação (ALVES, 2006).

Retificação é um processo de usinagem complexo, com um largo número de parâmetros característicos que exercem influência entre si (CHEN *et. al.*, 1998). A característica da retificação é a remoção de material pelo contato entre uma ferramenta contendo grãos abrasivos (rebolo) e a superfície da peça. Cada grão que compõe a estrutura topográfica do rebolo remove uma pequena quantia de material, proporcionando melhor acabamento à superfície em trabalho (KOPAC e KRAJNIK, 2006).

A retificação é um dos processos de acabamento mais utilizados na fabricação de peças que necessitam de elevada qualidade superficial, dimensional ou geométrica. É o processo que visa solucionar os problemas de qualidade e tempo de toda a sequência de fabricação, embora seja um dos processos que apresentam menor domínio tecnológico (MARINESCU *et. al.*, 2007).

De acordo com Marinescu *et. al.* (2004), no processo de retificação a ferramenta se move a altas velocidades periféricas comparado com outros processos de usinagem como o fresamento e o torneamento. As velocidades periféricas estão em torno de 20m/s a 45m/s, na retificação convencional. Na retificação a altas velocidades, o rebolo se move a velocidades ate 140m/s, sendo que estes rebolos são especialmente projetados para esse fim. Velocidades maiores que 140m/s podem ser empregadas, mas a proporção dessas aplicações é muito menor devido à sofisticação e custo das máquinas e técnicas envolvidas.

Malkin (1989) descreve que o processo de retificação é de bastante complexidade, uma vez que este apresenta muitas variáveis envolvidas, e estas são muito sensíveis a pequenas alterações. Tönshoff *et. al.* (2002) diz ser necessário analisar o maior número de variáveis possíveis para se monitorar melhor a retificação evitando assim perdas de peças durante o processo.

3.4.1. Retificação tangencial plana

A Figura 3.4 ilustra a operação de retificação tangencial plana. Seis elementos básicos estão envolvidos: a máquina retificadora, o rebolo, o material a ser retificado, o fluido de corte, a atmosfera e o cavaco. E ainda há a necessidade de um dispositivo dressador para o preparo do rebolo (MARINESCU *et. al.*, 2007).

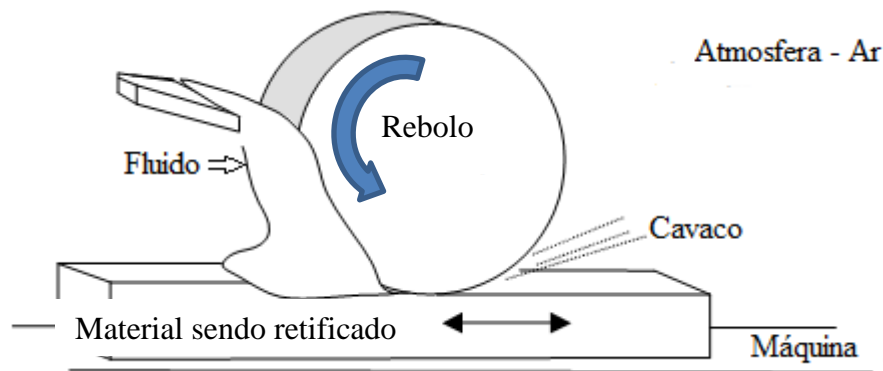


Figura 3.4 - Os seis elementos básicos da retificação plana (MARINESCU *et. al.*, 2007).

Na Figura 3.5, é apresentada a operação de retificação plana externa com as principais variáveis envolvidas no processo.

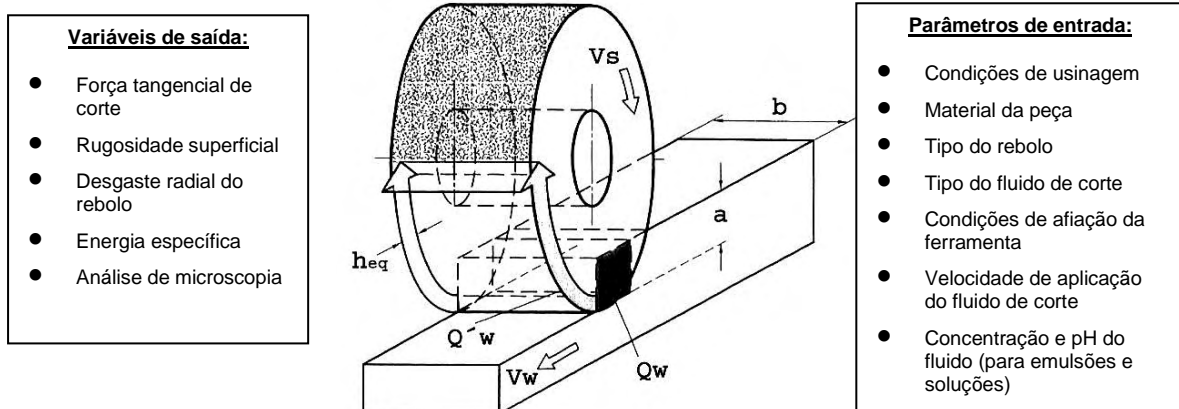


Figura 3.5 - Parâmetros de entrada e saída na retificação tangencial plana (MALKIN, 1989 adaptada).

Na Figura 3.5 observa-se as condições de saída que são profundidade de corte (a), largura de retificação (b), velocidade do rebolo (V_w), velocidade da peça (V_s), taxa de remoção do material (Q_w), taxa de remoção específica do material (Q'_w) e espessura equivalente de corte (h_{eq}).

3.4.2. Parâmetros envolvidos na retificação

Nesses tópicos serão tratados os parâmetros envolvidos na retificação tangencial plana avaliados nesse trabalho.

3.4.2.1. Profundidade de corte (a)

Segundo König (1980), aumentando-se a profundidade de corte, tem-se um aumento instantâneo do número de grãos ativos do rebolo atraindo com a peça e no tempo de contato. Este aumento da profundidade de corte também reflete em um acréscimo nas forças tangenciais de corte e energias específicas de retificação devido as maiores espessuras equivalentes dos cavacos a serem removidos. De acordo com Rowe e Morgan (1993), a profundidade de corte pode influenciar ainda na integridade superficial dos componentes retificados.

3.4.2.2. Velocidade de corte (V_s)

A velocidade de corte ou velocidade periférica do rebolo V_s é representada pelo deslocamento de um ponto na superfície de corte do rebolo em um certo espaço de tempo. Esta velocidade é extremamente importante no processo de retificação, pois determina a vida do rebolo, implicando na alteração da capacidade de remoção dos grãos abrasivos e no acabamento superficial das peças (WINTER, 2004). Influencia na força tangencial de corte, rugosidade, desgaste do rebolo, queima superficial da peça, tensão residual etc.

Segundo Diniz *et. al.* (2003), a velocidade periférica do rebolo é limitada pela resistência da liga aglomerante. Para as ligas vitrificadas estabelece-se como velocidade de corte normalmente de 30m/s e para algumas ligas vitrificadas especiais cerca de 60m/s. No caso de algumas ligas resinóides especiais a velocidade de corte fica em torno de 100m/s.

De acordo com Graf (2004), a velocidade de corte pode ser expressa pela Equação 3.1:

$$V_s(\text{m/s}) = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \quad (3.1)$$

Sendo: d_s - diâmetro do rebolo (mm).

n_s - rotação do rebolo (RPM).

3.4.2.3. Velocidade da mesa (V_w)

De acordo com Bianchi (1990), a velocidade da peça V_w é a mesma velocidade da mesa da máquina retificadora. Esta velocidade está relacionada aos impactos que os grãos abrasivos provocam na peça. Quando a velocidade da peça é baixa e a penetração é grande, os impactos dos grãos abrasivos do rebolo sobre a peça são pequenos e os cavacos são alongados. O tempo de contato grão/peça e o número de grãos ativos são maiores. Assim, a força em um grão abrasivo é pequena e atua durante um tempo longo. Os grãos abrasivos tendem a permanecer mais tempo em contato com a peça, o que provoca um desgaste maior. As forças de corte (normal e tangencial) tendem a aumentar com o tempo de retificação e devido ao desgaste das arestas cortantes. Com isto, o desgaste do rebolo tende a ser menor, considerando-se que os grãos abrasivos permanecem mais tempo presos ao ligante, o que minimiza a perda de grãos.

3.4.2.4. Taxa de remoção de material e espessura equivalente de corte (h_{eq})

De acordo com Malkin (1989), durante a retificação, a taxa de remoção de material (Q_w) é determinada pela profundidade de corte (a), pela velocidade relativa entre a peça e o rebolo (V_w) e pela largura de retificação (b). Assim, tem-se a Equação 3.2

$$Q_w = a \cdot V_w \cdot b \quad (3.2)$$

Ainda segundo Malkin (1989), pode-se obter a taxa específica de remoção de material, dividindo a taxa de remoção de material pela largura de retificação (b):

$$Q'_w = a.V_w \quad (3.3)$$

Tönshoff *et. al.* (2002) explicam que essa taxa de remoção pode ser entendida como uma camada de material que é removida da peça a uma dada velocidade de corte V_s (Figura 3.3). A espessura desta camada é chamada de espessura equivalente de corte (h_{eq}), para o processo de retificação plana, dada por:

$$h_{eq} = \frac{a.V_w}{V_s} \quad (3.4)$$

De forma geral, a espessura equivalente representa a espessura da camada de material que é arrancada pelo rebolo com a velocidade periférica deste, e cujo volume específico equivale àquele retirado da peça naquele tempo.

Tal parâmetro é o que melhor caracteriza o processo de retificação, uma vez que está englobando três importantes características do processo. A velocidade de corte é responsável pela “dureza dinâmica” do rebolo, e a sua elevação proporciona o aumento do número de grãos ativos num mesmo intervalo de tempo provocando o decréscimo na força de corte, devido à menor participação de cada grão na operação, e com isto proporcionando uma maior vida do rebolo (MALKIN, 1989).

3.5.Retificação de compósitos

Plásticos reforçados com fibras têm sido amplamente utilizados na indústria devido às suas propriedades excelentes, tais como alto módulo específico, resistência específica e capacidade de amortecimento. Embora possa-se obter esse material na forma final desejada devido a maleabilidade de seus componentes, normalmente necessita-se de uma usinagem posterior para formar a geometria, tolerância e integridade da superfície desejadas. A

retificação é particularmente necessária para adquirir alta precisão dimensional e acabamento superficial (HU e ZHANG, 2003).

As características dos compósitos variam de peça para peça. Sendo assim, ter conhecimento de como o material se comporta durante a usinagem é de grande importância na fabricação dos componentes. A usinagem de compósitos pode ser realizada com a maioria das ferramentas convencionais (CUPPINI e FERREIRA, 1997). Conforme Di Ilio e Paoletti (2000), na retificação houve melhores resultados com a utilização de rebolos constituídos por grãos abrasivos convencionais.

Quando materiais compósitos reforçados com fibra de carbono são aplicados em estruturas que necessitam de precisão, a superfície do compósito frequentemente requer vários tipos de processamento como fresamento e retificação após a moldagem em autoclave (KIM, LEE e CHOI, 2000).

Segundo Wang, Ramulu e Arola (1995) e Bhatnagar *et. al.*(1995), materiais compósitos reforçados com fibras longas devem ser processados com diferentes condições daquelas usadas pra materiais homogêneos e isotrópicos porque eles não possuem apenas anisotropia e propriedades mecânicas heterogêneas mas também possuem diferentes características de retificação que variam de acordo com o ângulo entre a fibra e a direção de retificação.

3.6.Flúidos de corte

Tem sido observado um grande interesse para o desenvolvimento de uma indústria consciente devido o aumento da poluição. O desenvolvimento de uma legislação preventiva tem aumentado por processos e produtos “verdes”. Os recentes esforços industriais para diminuir os impactos ambientais têm dois focos: desenvolvimento de bons processos recicláveis, especialmente para metais e plásticos, e substituição de produtos químicos em processos de manufatura, fazendo assim um “processo limpo” (ALVES e OLIVEIRA, 2006).

Os fluidos de corte convencionais utilizados para os processos de usinagem são considerados um problema para as empresas, visto que tais substâncias podem provocar sérios danos à saúde do trabalhador e à natureza. Recentemente, os aspectos ambientais têm-se tornado cada vez mais importante dentro dos processos produtivos, somando-se aos aspectos econômicos e tecnológicos. Motivados pela pressão dos órgãos ambientais, os parlamentos

têm elaborado leis cada vez mais rigorosas no sentido de proteger o meio ambiente e preservar os recursos energéticos. Todos esses fatores citados anteriormente têm influenciado as indústrias, centros de pesquisas e universidades a pesquisarem processos de produção alternativos, criando tecnologia que minimizem ou evitem a produção de resíduos que agridam o meio ambiente (MONICI *et. al.*, 2005).

Ainda segundo Alves e Oliveira (2006), devido essa necessidade de adaptação do processo aos requisitos de segurança dos operadores e meio ambiente, novas combinações de tipos de rebolo e fluidos de corte tem sido procurado.

Com isso torna-se extremamente importante o conhecimento de diferentes métodos de lubri-refrigeração e suas principais características.

3.6.1. Refrigeração convencional

A aplicação convencional de fluidos de corte é foco de estudo de vários autores. Irani *et. al.* (2005) apresenta uma revisão sobre a aplicação de fluidos de corte, em que o projeto do bocal aplicador, o posicionamento do bocal e a velocidade de aplicação do fluido foram considerados relevantes para a eficaz utilização dos fluidos de corte.

Segundo Ebbrell *et. al.* (1999) *apud* Irani *et. al.* (2005), os fluidos de corte são utilizados freqüentemente no meio industrial de forma inadequada, gerando consideráveis desperdícios. Normalmente, o fluido é aplicado de forma abundante, a elevadas vazões e baixa pressão. A lubrificação e refrigeração dependem da entrada efetiva do fluido na região de corte entre a peça e o rebolo e dessa forma grandes volumes de fluido podem ser reduzidos pela otimização da aplicação.

3.6.2. Refrigeração otimizada

Catai *et. al.* (2008) fala da importância da minimização dos fluídos de corte na indústria, sem que comprometa a qualidade final das peças usinadas, enquanto se mantém uma lubrificação e refrigeração eficientes na zona de corte. Isso é essencial para prevenir danos à peça usinada e aumentar a eficiência da eliminação de altas temperaturas que são

geradas na zona de corte. Então, a escolha correta do tipo de lubrificação a ser usada na retificação é de extrema importância.

Segundo Ebbrell *et. al.* (1999), os benefícios fornecidos pelo fluido de corte são muitos para o setor industrial, porém o armazenamento desses fluidos é feito de forma não satisfatória. Assim, elevadas quantidades de fluido de corte são utilizadas nas indústrias de maneira incorreta. Como exemplo dessa má utilização, em muitas indústrias ocorre grande dispersão de fluido no momento da usinagem, ocasionando dessa forma grandes perdas de fluido. A lubrificação e a refrigeração dependem da efetiva entrada de fluido na região de corte da peça com a ferramenta, não havendo efetivamente a necessidade de volumes elevados de fluido, mesmo que parte deste não esteja penetrando na região de corte efetivamente. Porém, o tipo e o posicionamento do bocal exercem grande influência no processo de corte.

Sistemas convencionais de aplicação de fluido de corte são relativamente ineficientes no processo de retificação, particularmente sobre severas condições de aplicação. A energia acumulada nos fluídos durante sua aplicação é insuficiente, na maioria dos casos, para superar a força centrífuga do rebolo ou para penetrar na barreira de ar que se encontra na periferia do rebolo em rotação (CATAI *et. al.*, 2008).

Segundo Aguiar *et. al.* (2006) a necessidade de uma redução efetiva dos custos associado com a melhora da qualidade das peças manufaturadas requerem uma implementação de sistemas mais inteligentes no ambiente industrial. O método de refrigeração otimizada demonstra uma maior eficiência se comparado com o método convencional, por isso apresenta melhores qualidades finais nas peças retificadas. (CATAI *et. al.*, 2008).

Segundo Webster (1995), um jato de fluido incidindo de forma direta sobre a região de corte é capaz de reduzir de forma significativa a temperatura na região de corte, porém altas velocidades do jato de fluido são necessárias para a penetração do fluido de maneira efetiva na região de corte. Através da utilização de um bocal de formato circular, foi constatada a redução acentuada da temperatura na região de corte, quando comparado com o jato convencional.

Foi comprovado também que o ângulo de incidência do jato na região de corte não altera de maneira significativa a refrigeração da peça, porém a velocidade periférica da ferramenta com relação ao jato é muito significativa no processo de refrigeração da peça. Um outro problema que deve ser analisado é a barreira de ar existente entre o bocal e a peça que deve ser vencida pelo fluido de corte, ocasionando a dispersão do mesmo durante sua

penetração na região de corte, fazendo-se novamente necessário, a utilização de um bocal eficiente para evitar tal ocorrência (WEBSTER e CUI,1995).

Deve ser levada em consideração a abertura geométrica de bocais na entrada e saída do fluido, bem como as superfícies internas, sendo que se as mesmas forem de superfície geométrica côncava apresentarão um melhor efeito, pois estas tendem a aproximar as lâminas de fluido que se formam no interior do bocal. Isto diminui o efeito de turbulência do fluido de corte, ao contrário dos bocais com superfície convexa, cuja tendência é de separar as lâminas de fluido formadas no interior do mesmo, aumentando o efeito de turbulência. Um outro aspecto muito importante no desenvolvimento do bocal são os cantos próximos a abertura de saída do bocal, como apresentado na Figura 3.6, os quais contribuem para a formação da turbulência devido os cantos vivos.

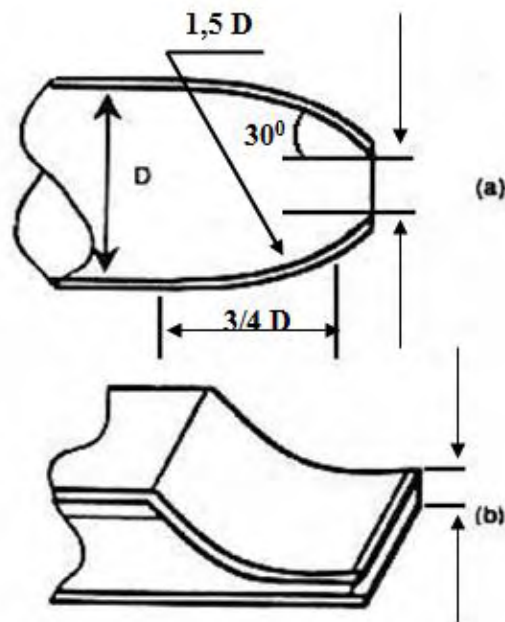


Figura 3.6 - Formas de Bocal. a) refrigeração otimizada; b) refrigeração convencional (WEBSTER, 1995).

Segundo pesquisa realizada por Webster (1995), a velocidade com que o fluido penetra na região de corte deve minimizar os possíveis impactos fluido/ferramenta durante a penetração do fluido na região de corte. Isto foi verificado quando a velocidade do fluido é igual à velocidade periférica do rebolo. Neste caso, o fluido tende a penetrar na região de corte, com a mesma velocidade do grão abrasivo, não havendo assim interferências significativas por parte do grão abrasivo durante a remoção de material.

De acordo com Campbell (1995) é importante o desenvolvimento de uma forma otimizada de aplicação de fluido de corte no processo de retificação, principalmente com

relação ao custo global envolvido, além de sua relação com o meio ambiente. A aplicação incorreta de fluido de corte pode ocasionar queima e tensionamento superficial, comprometendo assim todos os parâmetros adicionados ao processo. Caso não ocorra a penetração adequada de fluido na região de corte, o calor gerado não é retirado, diminuindo o desempenho total do processo. Além disso, as principais funções do fluido (lubrificação, refrigeração e limpeza apropriada da superfície do componente usinado) são eliminadas.

3.6.3. Mínima quantidade de lubrificação (MQL)

O meio ambiente tem se tornado um dos mais importantes temas nos contextos da vida moderna, por causa do impacto direto da degradação na humanidade. Dirigido por pressões de agências do meio ambiente, os políticos criaram uma legislação estritamente para proteger o meio ambiente e preservar os recursos naturais. Esses fatores combinados tem levado o setor industrial, centros de pesquisa e universidades buscarem processos alternativos de produção, criando tecnologias que minimizam ou evitam a produção de resíduos agressivos ao meio ambiente (SILVA *et. al.*, 2006).

A refrigeração no processo de retificação é essencial para que se obtenha maior vida útil da ferramenta e as qualidades superficiais desejadas. A técnica de MQL é uma alternativa coerente, já que combina a funcionalidade da refrigeração (ar comprimido) com um consumo muito baixo de fluido de corte, geralmente de 10 até no máximo 100 ml/h a uma pressão de 4,0 a 6,0 kgf/cm². A técnica consiste em uma mistura de ar comprimido e óleo, formando uma névoa, direcionada na região de contato peça-ferramenta. Nesse processo, o ar tem a função de refrigerar e o óleo de lubrificar (HEISEL *et. al.*, 1998).

Segundo Klocke e Einsenblätter (1997), existem muitas vantagens da utilização da MQL se comparado com a refrigeração convencional. Dentre elas, as principais são a redução da potência de retificação e energia específica, além da melhora da qualidade superficial e do menor desgaste do rebolo. Klocke (2001) afirma ainda que o processo de retificação é um dos mais críticos no que se refere à implementação da técnica MQL, devido a grande quantidade de calor existente no processo, proveniente do intenso atrito entre os grãos abrasivos, com suas múltiplas arestas cortantes, e a peça.

Heisel *et. al.* (1998) lista as principais vantagens da técnica MQL frente à refrigeração convencional:

- quantidade menor de fluido utilizado;
- não necessidade de descarte de grandes quantidades de fluidos, pois, na MQL, a quantidade de fluido a ser descartada é tão pequena que um bom mecanismo de exaustão é suficiente;
- pelo fato das peças retificadas ficarem quase secas, dispensa-se uma lavagem posterior;
- elimina-se a necessidade de aplicação de bactericidas e/ou fungicidas nos reservatórios.

3.6.4. Retificação sem lubrificação

A retificação a seco poderia diminuir grandes quantidades de recursos (lubrificantes de refrigeração, unidades de filtro) e energia (para bombas e aceleração do fluido). O tamanho das máquinas retificadoras poderia ser diminuído junto com a ausência de lubrificante de refrigeração, filtros e tanques. Em todo caso, as principais funções do lubrificante de refrigeração (transporte do cavaco e estabilização da temperatura) devem ser substituídas por outros equipamentos. O processo retificação a seco proporciona excelentes possibilidades para medidas óticas, medidas diretas de força de corte e determinação simplificada do processo de escoamento de calor (AURICH *et. al.*, 2008).

Segundo Luo (2001), especialmente em processos a seco, todas as forças de retificação são dissipadas em forma de calor na zona de retificação, no contato entre o rebolo e a peça. Esse calor causa o aumento de temperatura no rebolo e na peça, o qual pode causar danos termais. Sobre essas condições, o aumento da taxa de remoção e a obtenção de altas qualidade superficial pode ser limitada.

3.7.Rebolos

Segundo Malkin (1989), rebolo é a ferramenta de corte utilizada no processo de retificação. Tal ferramenta é composta basicamente de grãos abrasivos de elevada dureza que efetuam o corte, presos a uma matriz aglomerante de um material menos duro.

Ainda segundo Malkin (1989), o desempenho e as propriedades dos rebolos são dependentes dos seguintes fatores: material do grão abrasivo bem como o seu tamanho, material aglomerante, propriedades do abrasivo, do aglomerante e da porosidade (espaço vazio entre os grãos abrasivos no aglomerante).

A Figura 3.7 mostra todos os componentes do rebolo:

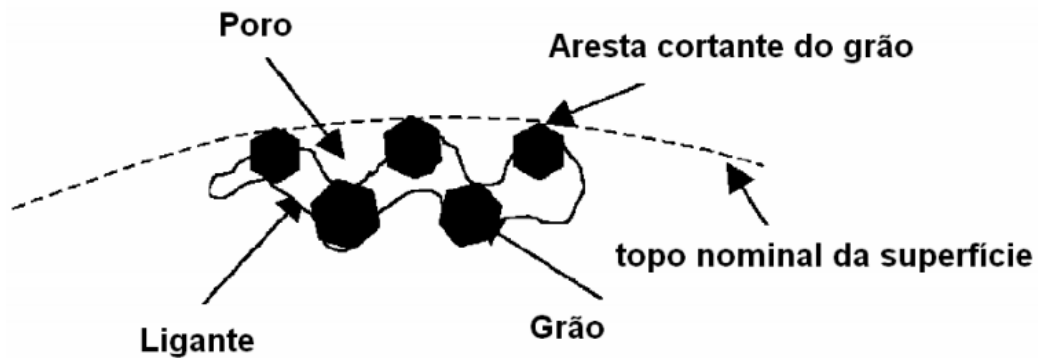


Figura 3.7 - Principais constituintes do rebolo (Marinescu *et. al.*, 2004).

Segundo as normas ANSI B74.13-1977, a identificação dos rebolos é feita através de um código alfa-numérico normalizado. Esse código indica todas as características do rebolo.

Como grão abrasivo, tem-se principalmente os tipos óxido de alumínio, utilizado na usinagem de materiais como aço carbono, ligas de aço, aço rápido, carbetos de silício, indicado para materiais de alta dureza; nitreto de boro cúbico (CBN) para materiais ferrosos; e diamante, indicado em cerâmicas e vidros (SOUZA, 2008).

As dimensões dos grãos e sua uniformidade são características importantes nos processos de usinagem com abrasivos. Grãos mais grossos são utilizados em rebolos para operações de corte e limpeza, enquanto os mais finos são utilizados para polimento e lapidação (KRAR, 1995).

3.7.1. Abrasivos

Segundo Marinescu *et. al.* (2004), materiais usados como abrasivos, incluem tanto minerais naturais quanto produtos sintéticos. Os materiais abrasivos podem ser considerados como ferramentas de corte de geometria indefinida que são caracterizadas por sua alta dureza, afiação das suas arestas e boa capacidade de corte.

Segundo a norma ANSI B74.13-1977 os grãos abrasivos seu primeiro valor e são respresentados pelas seguintes letras:

- A - Óxido de Alumínio;
- B - Nitreto cúbico de Boro (CBN);
- C - Carbeto de silício;
- D - Diamante;

Ainda segundo Marinescu *et. al.* (2004), dentre os quarto materiais mais usados nas indústrias atualmente, três deles, o carbeto de silício (SiC) e o óxido de alumínio (alumina, Al_2O_3) são considerados abrasivos convencionais, enquanto que os outros dois, o diamante e o nitreto cúbico de boro (CBN), são considerados superabrasivos.

3.7.2. Granulometria

A granulometria é o tamanho dos grãos utilizados no rebolo. Esse corresponde ao segundo valor da norma ANSI B74.13-1977 e pode ser classificado da seguinte forma:

- Muito grosso: 6 a 12 mesh;
- Grosso: 14 a 24 mesh;
- Médio: 30 a 60 mesh;
- Fino: 70 a 120 mesh;
- Muito fino: 150 a 280 mesh;
- Extra fino: 320 a 800 mesh;

Segundo Marinescu *et. al.*(2004), a porosidade do rebolo é aumentada com a diminuição da proporção de grãos abrasivos, ou com a diminuição do ligante misturados na estrutura. Isto é, quanto maior a granulometria do rebolo menor o número de grãos e com isso uma maior porosidade.

3.7.3. Dureza

A dureza de um rebolo está relacionada à dificuldade de remoção dos grãos abrasivos de sua superfície, ou ainda, à dificuldade de proporcionar o rompimento entre o grão e o material aglomerante. Define-se como sendo a resistência do rebolo ao arrancamento das partículas abrasivas, ou seja, à resistência à tração do ligante (MALKIN, 1989).

A Tabela 3.1 mostra a classificação da dureza do rebolo de acordo com a norma ANSI B74.13-1977, o valor da dureza é o terceiro valor.

Tabela 3.1 - Classificação das durezas de um rebolo (ANSI B74.13-1977, 1977 modificada).

Muito Mole	Mole	Média	Duro	Muito duro	Extra duro
E	H	L	P	S	W
F	I	M	Q	T	X
G	J	N	R	U	Y
	K	O		V	Z

Uma boa classificação dos grãos abrasivos foi feita por Shaw (1996) que os dividiu em duas categorias, segundo sua dureza: convencionais e abrasivos. Os convencionais têm dureza KNOOP próxima a 2000kgf/mm^2 , enquanto, nessa mesma escala, os superabrasivos possuem cerca de 4500kgf/mm^2 .

3.7.4. Estrutura

A estrutura do rebolo refere-se ao espaçamento entre os grãos abrasivos no rebolo. Quanto menor o número, maior a quantidade de partículas abrasivas, menor o espaçamento entre elas, portanto mais fechada a estrutura. Da mesma forma, quanto maior o número de grãos, menor a quantidade de partículas, mais aberta é a estrutura (DINIZ *et. al.*, 2003).

Segundo a norma ANSI B74.13-1977 a estrutura do rebolo pode ser definida por:

- Fechada: 1 a 4;
- Média: 5 a 7;
- Aberta: 8 a 10;

- Muito aberta: 11 e 12.

De acordo com King e Hahn (1986) *apud* Hassui (2003) uma porosidade ideal é aquela capaz de estar suficientemente aberta para permitir a remoção do cavaco e a introdução do fluido de corte na região de corte, mas suficientemente fechada para garantir um número mínimo de grãos abrasivos atuando na remoção do material.

Malkin (1989) ressalta que uma estrutura fechada apresenta maior número de grãos em contato com a peça durante o corte, fato que proporciona melhor acabamento, pois cada grão é responsável pela retirada de uma quantidade menor de material. No entanto, há tendência à queima e ao empastamento, devido à dificuldade de retirada do cavaco da região de corte.

3.7.5. Ligante

A manutenção e fixação dos grãos abrasivos em um rebolo devem-se à ação de materiais aglomerantes. Estes compostos devem resistir às forças de retificação, às elevadas temperaturas, às forças centrípetas oriundas dos elevados níveis de rotação da ferramenta e ainda aos ataques químicos provocados por componentes dos fluidos de corte. Os aglomerantes são responsáveis por assegurar a rigidez do rebolo e manter as partículas abrasivas em posição (MALKIN, 1989).

Para rebolos convencionais existem basicamente seis tipos de aglomerantes, sendo estes: resinóide, shellac, oxiclорidos, borracha, silicatos e vitrificados. Os superabrasivos utilizam fundamentalmente aglomerantes resinóides, metálicos e vitrificados. Em alguns casos, confeccionam-se rebolos por eletrodeposição, sendo uma camada de abrasivos depositada sobre o material interno do rebolo, o que dispensa a utilização de aglomerantes (MALKIN, 1989).

Os tipos de ligante e sua nomenclatura perante a norma ANSI B74.13-1977 é:

- Vitrificado (V);
- Silicato (S);
- Resinóide (B);
- Borracha (R);
- Metálico (M);

Os ligantes vitrificados estão presentes em cerca de 50% dos rebolos convencionais, sendo utilizados principalmente para a execução de retificação de precisão, devido a sua elevada rigidez. Já os aglomerantes resinóides são aplicados em rebolos destinados à execução de desbastes, devido à elevada resistência mecânica e à capacidade de absorver impactos (MALKIN, 1989).

3.7.6. Rebolos para retificação de compósitos

Conforme Di Ilio e Paoletti (2000), para os compósitos testados, os melhores resultados foram obtidos através dos rebolos com abrasivos convencionais em termos de força de retificação, rugosidade superficial e planicidade.

Sobre rebolos utilizados no teste, o rebolo de carbeto de silício foi o que representa a melhor solução se a principal meta é manter as forças de retificação baixa (DI ILIO e PAOLETTI, 2000).

A planicidade e a rugosidade exibem um comportamento mais complexo mas que também obtiveram um melhor resultado quando se utilizou o rebolo de carbeto de silício. A menor tendência de empastamento ocorreu no rebolo de óxido de alumínio que foi o rebolo utilizado com a maior abertura em sua estrutura entre os rebolos utilizados (DI ILIO e PAOLETTI, 2000).

3.7.7. Dressagem e topografia do rebolo

Segundo Malkin (1989), o desgaste do rebolo é definido como a quantidade de rebolo consumida durante um ciclo ou operação. Pode-se ainda dizer que o desgaste do rebolo é expresso como uma perda volumétrica de material medida pela diminuição diametral. Segundo Tawakoli et al. (2007), o mecanismo de desgaste do rebolo pode ocorrer por atrito, por fatura dos grãos, ou por fratura do aglomerante. A causa pode variar de acordo com os parâmetros de retificação, tipo da peça, ou mesmo tipo do fluido refrigerante.

Ainda de acordo com Tawakoli *et. al.* (2007), as causas do desgaste do abrasivo podem ocorrer por ataque químico de componentes do fluido de corte, por danos térmicos do

processo abrasivo ou por desgaste mecânico de fricção (atrito), resultando na quebra do ligante, ou na fratura do grão, como ilustra a Figura 3.8.

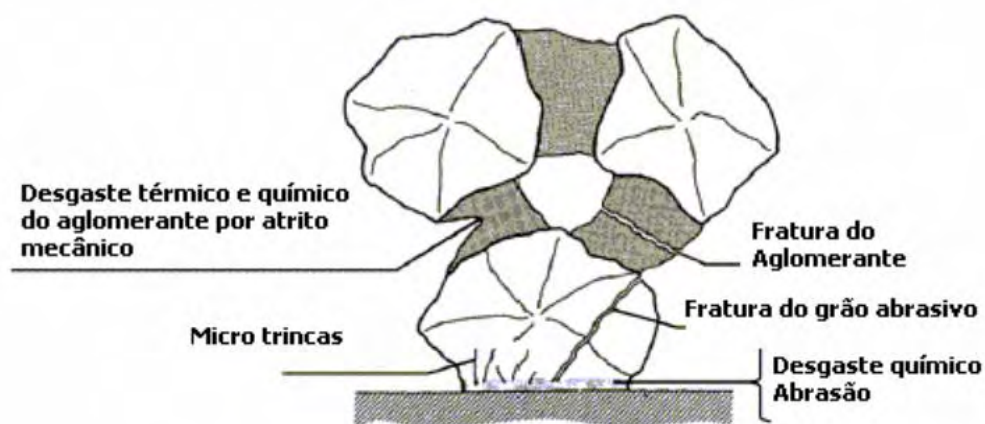


Figura 3.8 - Mecanismos de desgaste do rebolo (KÖNIG, 1980 *apud* TAWAKOLI *et. al.*, 2007 adaptada).

Segundo Malkin (1989), o desgaste por atrito envolve a perda de afiação dos grãos abrasivos e crescimento de áreas planas, decorrentes do atrito com a peça. A fratura dos grãos abrasivos provoca a remoção de fragmentos destes e a fratura do aglomerante ocorre devido ao desalojamento inteiriço do grão abrasivo, ocasionado pelos esforços de corte. Já o desgaste por erosão do aglomerante reduz a ancoragem dos grãos abrasivos, facilitando a remoção destes, reavivando o corte do rebolo, pela produção de novas arestas cortantes.

O atrito e os elevados esforços existentes na interface peça/ferramenta desgastam as ferramentas de corte. No caso de um rebolo, tem-se uma modificação considerável de sua topografia, prejudicando a capacidade de remoção de material. É então necessário recondicionar o rebolo, recompondo sua geometria. (MALKIN, 1989).

Para tal, faz-se o perfilamento e a dressagem do rebolo. Segundo Marinescu *et. al.* (2004), a operação de perfilamento busca atingir uma forma precisa para o rebolo, enquanto a dressagem tem como objetivo restaurar a eficiência de corte da ferramenta.

Dressar o rebolo é o ato de reconstituir a camada exterior do rebolo (DINIZ *et. al.*, 2003). Trata-se de se restabelecer uma topografia de corte eficaz ao rebolo. Durante o processo de retificação, a superfície da ferramenta é afetada por desgaste dos grãos e acúmulo de cavacos nos poros. Assim, quando a eficiência de corte é comprometida, deve-se dressar o rebolo, para que se obtenha uma microtopografia de corte efetiva, retomando os parâmetros de qualidade superficial e geométrica do processo de retificação (MARINESCU *et. al.*, 2004).

Segundo Diniz *et. al.* (2003), a dressagem tem como objetivo:

- Conferir ao rebolo uma determinada forma;

- Devolver ao rebolo sua forma original;
- Conferir agressividade (capacidade de corte) ao rebolo;
- Informar à máquina-ferramenta a real posição da superfície externa do rebolo (devido ao desgaste, perde-se diâmetro, e com um passe de dressagem no rebolo informa-se à máquina o novo diâmetro do rebolo);
- Retirada de grãos abrasivos gastos e composição de novas arestas cortantes, visando aumentar a capacidade de remoção de material da ferramenta abrasiva;
- Promover o desentupimento de poros com acúmulo de cavacos.

Ainda segundo Diniz *et. al.* (2003), a perda de afiação do rebolo faz com que os esforços de corte cresçam, o que pode dificultar a remoção dos grãos gastos, causando perda diametral, e podendo resultar em danificação da estrutura superficial (queima) da peça ou prejuízo ao acabamento superficial.

Malkin (1989) afirma que em operações de dressagem, com dressador de ponta única, são geradas superfícies compostas de macro e micro-efeito definidos como:

- Macro-efeito: formação devida ao formato do dressador, da profundidade de penetração deste e do passo da dressagem. Este fenômeno determina a posição em que as arestas dos grãos abrasivos estão localizadas na superfície do rebolo;
- Micro-efeito: formado pelo arrancamento dos grãos desgastados (com baixa ancoragem na liga) e fratura dos grãos que não se desgastaram por completo, em que novas arestas de corte são geradas pelo dressador.

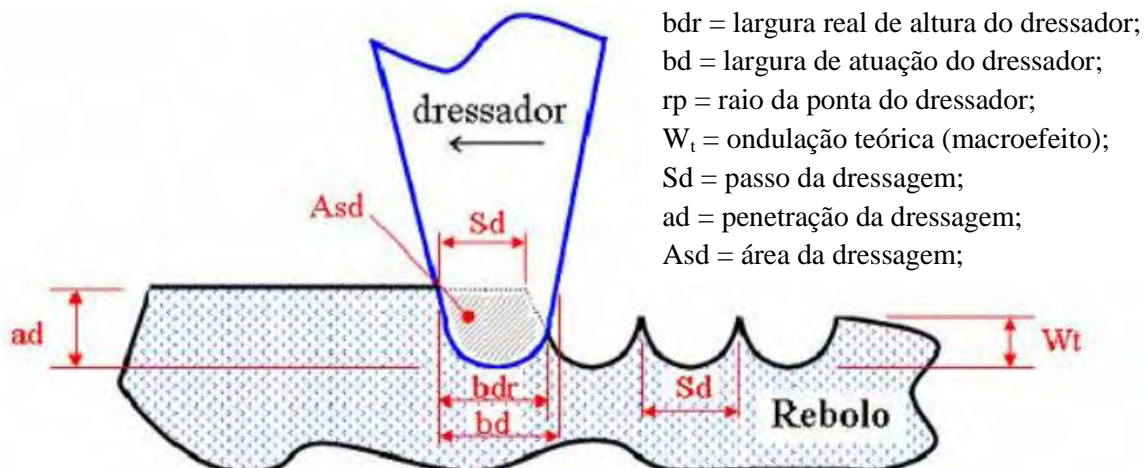


Figura 3.9 - Esquematização da operação de dressagem (HASSUI e DINIZ, 2003 adaptada).

3.8. Variáveis de controle de processo

Nesse item explica-se as variáveis utilizadas para mensurar a qualidade do processo realizado nessa pesquisa.

3.8.1. Força tangencial de corte e energia específica de retificação

De acordo com Bianchi (1999), as forças de corte no processo de retificação são importantes, pois influenciam a qualidade geométrica, dimensional e superficial da peça, a vida do rebolo (desgaste volumétrico) e por fim o tempo de execução do processo de corte. Os valores médios das forças de corte a serem empregados durante a usinagem também são importantes porque determinam a potência necessária para a máquina retificadora, assim como suas necessidades estruturais.

Com a força tangencial de corte F_{tc} pode-se analisar o desempenho das ferramentas abrasivas e detectar: a ocorrência do macro e microdesgaste; a capacidade de fixação dos grãos pelo ligante; aumento da temperatura na região de corte e estado de tensão residual. Ressalta-se ainda que variando a espessura do cavaco, alteram-se as forças de corte num grão abrasivo (BIANCHI *et. al.* 2001).

Ainda é necessário um estudo específico de mecanismos que levem ao consumo destas energias no processo de retificação, ajudando a evitar as elevadas temperaturas para manter a integridade superficial da peça (WEINGAETNER *et. al.*, 2001).

A aquisição da força tangencial de corte pode ser identificada na Figura 3.10, a partir do motor da máquina até o cálculo da mesma, de maneira simplificada.

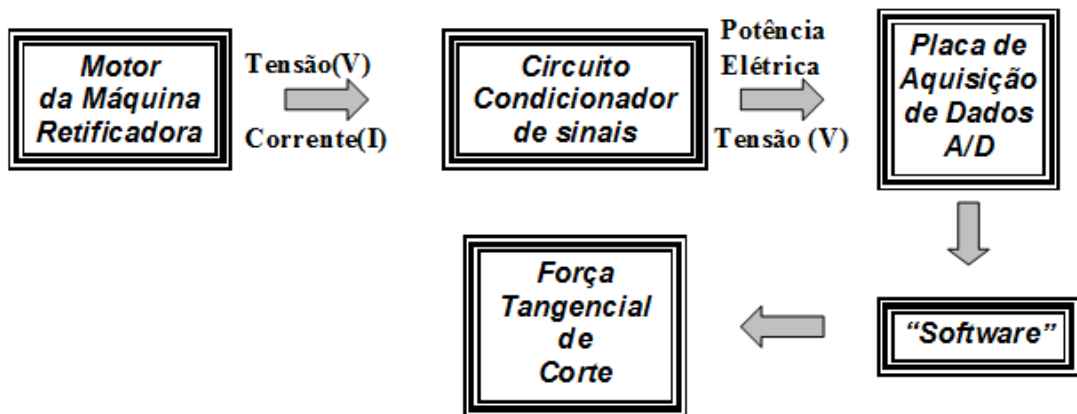


Figura 3.10 - Diagrama esquemático da medição da força tangencial de corte através da medição da potência elétrica do motor.

A energia específica (u) é uma grandeza derivada da potência e das condições de corte. Tal grandeza é definida como sendo a energia por unidade de volume de material removido. Matematicamente:

$$u = \frac{P}{Q_w} \quad (2.9)$$

Onde: P = potência de corte (W),

Q_w = taxa de remoção volumétrica (mm^3/s).

Em parâmetros de retificação, a taxa de remoção volumétrica é dada por:

$$Q_w = V_w \cdot a \cdot b = \pi \cdot d_w \cdot V_f \cdot b \quad (2.10)$$

Onde: V_f = velocidade de avanço do rebolo (m/s),

b = largura do rebolo (mm),

d_w = diâmetro da peça (mm).

Processo de retificação, a energia específica (energia por volume de cavaco removido) é muito maior do que em outros processos, uma vez que grande parte da energia de retificação é gasta em outros mecanismos além da formação de cavaco, tais como atrito das áreas planas dos grãos abrasivos com o material da peça e deformação do material da peça antes do início da formação de cavaco (MALKIN, 1989).

A remoção do cavaco é dividida, basicamente, em três regiões de micro-fenômenos. A Figura 3.11 representa tais regiões.



Figura 3.11 - Formação do cavaco por um grão abrasivo, (KÖNIG,1980 e MALKIN, 1989, adaptada)

Os detalhamentos das regiões foram feitos por Malkin (1989) da seguinte forma:

- Região I: Deformação elástica do material da peça e do material aglomerante do rebolo. A energia fornecida ao processo é consumida na forma de atrito e deformação.
- Região II: Material da peça apresenta deformação plástica, escoamento lateral e recuperação da deformação elástica do estágio anterior devido à contínua penetração do grão abrasivo. A dissipação de energia é feita por deformações e atrito.
- Região III: Formação do cavaco, uma vez que a aresta de corte atinge um valor de penetração crítico, correspondendo à uma pressão também crítica. Parte da energia é consumida no cisalhamento do material.

Segundo Nussbaum (1988), as deformações das fases I e II ocorrem porque o ângulo de ataque da ferramenta abrasiva é fortemente negativo. Fato também que ocorre no processo de torneamento. A remoção do cavaco da região de corte se dá pela porosidade do rebolo, sendo expulso da ferramenta pela ação da força centrífuga ou pelo fluido de corte. Caso contrário, ocorrerá o empastamento do rebolo.

3.8.2. Relação G

Segundo Ramesh *et. al.* (2001), o desempenho de um rebolo pode ser avaliado através da relação G, definida como sendo a relação entre volume de metal removido pelo volume de rebolo gasto:

$$G = \frac{Z_w}{Z_s} = \frac{a.V_w.t}{\pi.D_s\delta} \quad (3.5)$$

Onde:

V_w = velocidade da mesa (m/s);

t = tempo de retificação (s);

δ = desgaste radial do rebolo (mm).

Essa variável caracteriza o desgaste de uma ferramenta sob determinadas condições de trabalho. Analisando a Equação (3.5), nota-se que quanto maior for o desgaste do rebolo, menor será a relação G. Assim, o rebolo permanece agressivo durante o processo de retificação, devido à perda excessiva de grãos abrasivos da superfície de corte da ferramenta. Quando o desgaste do rebolo for menor que no caso anterior, a relação G será alta, porém a agressividade da superfície de corte diminuirá progressivamente durante o processo de usinagem.

Ramesh *et. al.* (2001) relataram o acréscimo da relação G com o aumento da velocidade de corte na retificação de alumina, zircônia e carbetto de silício. Segundo os autores, o aumento da velocidade de corte contribui para manter a força efetiva em cada grão abrasivo abaixo do limite para arrancar o diamante da liga. Desta forma, o desgaste ocorre somente pela abrasão do diamante, maximizando a relação G.

3.8.3. Microscopia Eletrônica de Varredura

Segundo Maliska (2004), Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) é uma técnica muito versátil e usada rotineiramente para a análise microestrutural de materiais sólidos. Apesar da complexidade dos mecanismos para a obtenção da imagem, o resultado é uma imagem de fácil interpretação.

A elevada profundidade de foco (imagem com aparência tridimensional) e a possibilidade de combinar a análise microestrutural com a microanálise química são fatores que em muito contribuem para o amplo uso desta técnica. A observação e análise de fratura teve um grande avanço com o uso do microscópio eletrônico de varredura (MALISKA, 2004).

Ainda segundo Maliska (2004), a versatilidade da microscopia eletrônica de varredura se encontra na possibilidade de se poder captar e medir as diversas radiações provenientes das

interações elétron-amostra. Estas interações podem revelar informações da natureza da amostra incluindo composição, topografia, potencial eletrostático, campo magnético local e outras propriedades da amostra.

3.8.4. Rugosidade

Rugosidades são micro-irregularidades geométricas decorrentes do processo de fabricação. Sua quantificação é feita pelos parâmetros de altura e largura das irregularidades. Sua magnitude está diretamente relacionada ao coeficiente de atrito, desgaste, lubrificação, transmissão de calor, resistência mecânica, rigidez do equipamento, a velocidade de remoção, a granulação dos abrasivos, entre outros fatores (WINTER, 2004).

De acordo com Carpinetti (2000) rugosidades caracterizam-se pelas microirregularidades geométricas da superfície do material usinado. A rugosidade consiste basicamente de marcas regulares oriundas do perfil da ferramenta combinada a outras irregularidades, podendo ser variáveis conforme o material e o tipo de ferramenta utilizada. As microirregularidades são em geral sobrepostas a outras irregularidades geométricas, com ordens de grandeza crescentes.

Segundo Carpinetti (2000) os parâmetros comumente utilizados são: Rugosidade média (R_a), rugosidade média quadrática (R_q), máxima distância entre pico a vale (R_t), média das distâncias entre saliências (S_m), fração de contato (t_p) e média da inclinação das irregularidades do perfil.

Considerações sobre a geração de rugosidade na retificação foram feitas por Malkin (1989), dentre as quais ressalta-se: a rugosidade de peças retificadas é devido aos riscos feitos pelos grãos abrasivos; ao material da peça que adere ao rebolo e que não é liberado pelo fluido de corte e posteriormente é impregnado na peça; ou ainda, por partículas abrasivas que se quebram durante o corte e ficam aderidas à peça.

Nesta pesquisa utilizou-se a rugosidade média (R_a) que é definida pela média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento dos pontos do perfil de rugosidade, em relação à linha média, dentro de um percurso de medição. Segundo Hecker e Liang (2003) pode ser definida matematicamente da seguinte forma:

$$R_a = \frac{1}{L} \times \int_0^L |y - y_{CL}| dl \quad (1.7)$$

Onde: L é o comprimento de medição;

y é a altura do pico ou a profundidade do vale;

y_{CL} é a variável que define o posicionamento da linha de centro (as áreas localizadas abaixo e acima desta linha são idênticas)

4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo, é apresentado um detalhamento dos procedimentos adotados para a realização dos ensaios experimentais. As variáveis e os parâmetros de usinagem são aqui definidos a partir de ensaios preliminares.

O banco de ensaios é composto por uma retificadora tangencial plana da marca SULMECÂNICA, modelo 1055E. Nela foram instalados os componentes necessários à análise pretendida, bocais, sensores de rotação e captação da força de corte.

Devido ao fluxo de fluido de corte que é gerado na lubri-refrigeração convencional, decidiu-se cobrir a máquina retificadora com plástico, a fim de evitar respingos de fluido nos módulos posicionados perto da área de retificação, e também manter o ambiente de pesquisa limpo. A Figura 4.1 mostra a posição dos componentes que foram utilizados para esta pesquisa.

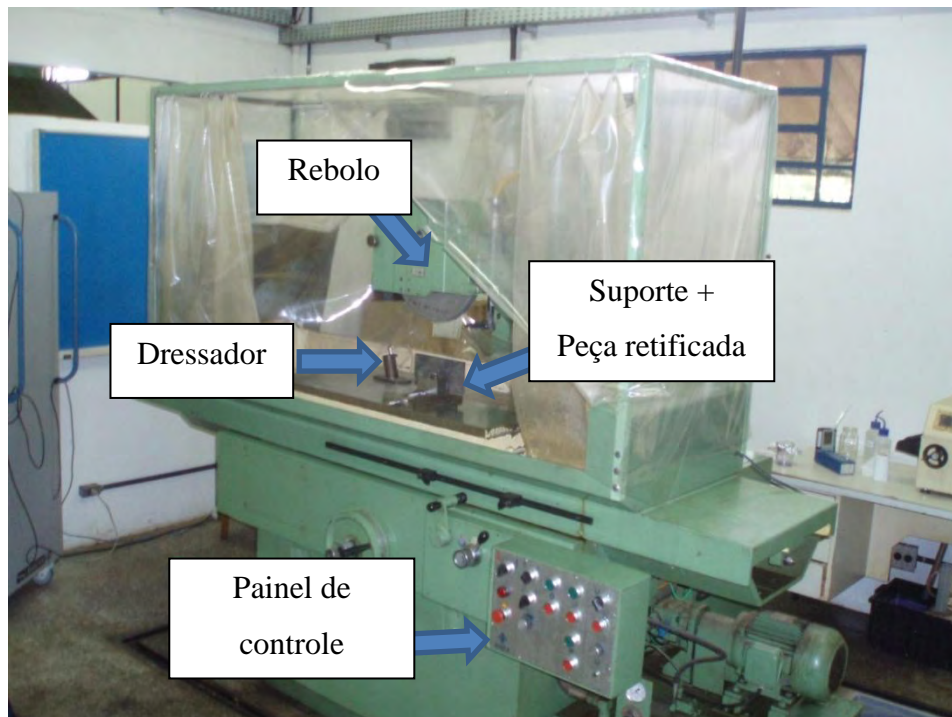


Figura 4.1 - Máquina retificadora plana SULMECÂNICA

Já a Figura 4.2 apresenta todos os componentes responsáveis pela aquisição dos sinais dos sensores.

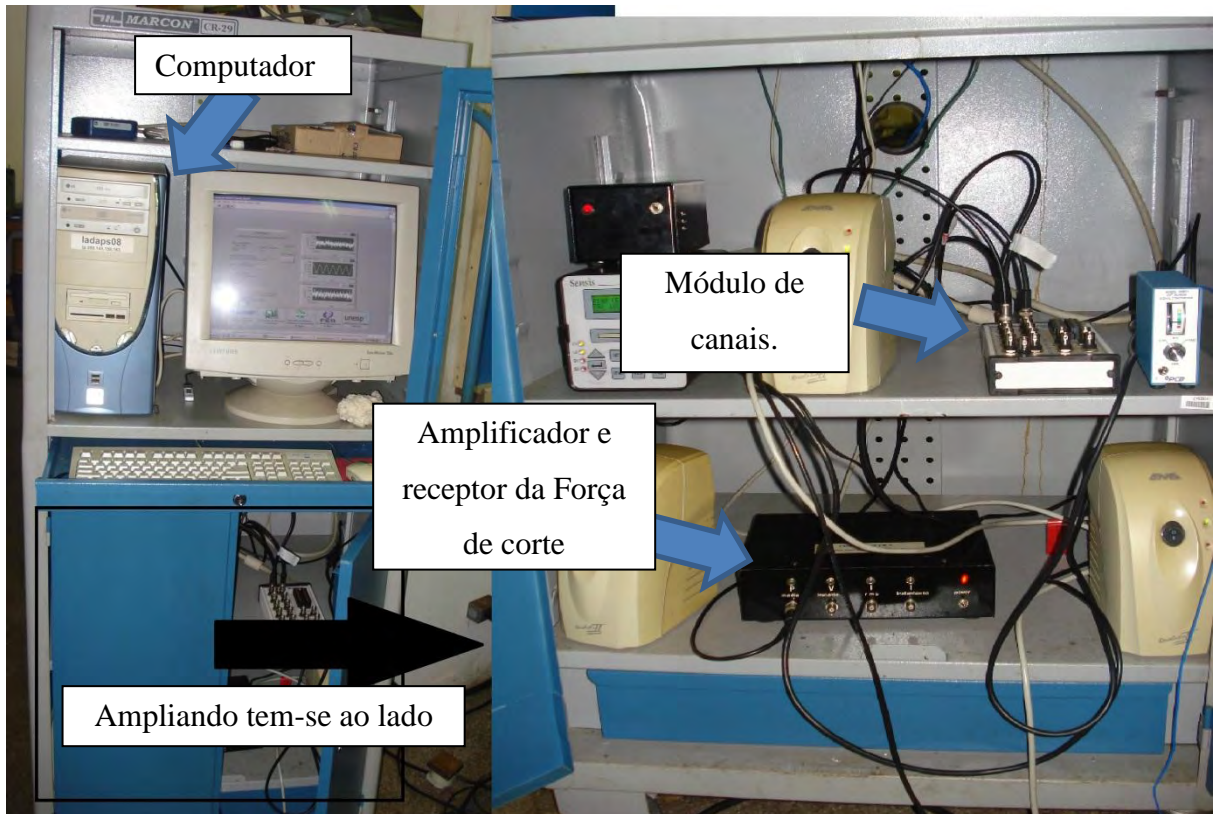


Figura 4.2 - Central de aquisição de dados.

Objetivou-se montar o banco de ensaios e definir os parâmetros de usinagem a serem empregados, através de ensaios preliminares. Além disso, optou-se por começar os experimentos pelo método de lubri-refrigeração convencional, pois este é uma referência para a análise posterior da técnica de refrigeração otimizada, MQL e a seco, respectivamente. Assim, este capítulo detalha o procedimento que foi utilizado para a realização dos ensaios de todos os métodos de lubri-refrigeração.

4.1. Equipamentos Utilizados

Nesse tópico serão descritos todos os equipamentos utilizados durante as etapas da pesquisa.

4.1.1. Rebolo e Dressadores

Para esta pesquisa, a ferramenta de corte empregada foi um rebolo convencional de carbeto de silício, cujas dimensões são diâmetro externo de 355 mm, 127 mm de diâmetro interno e 25 mm de altura. O ligante é do tipo vitrificado e o modelo do rebolo é 39C60K-VK. O rebolo foi produzido e doado pela Norton Abrasivos, uma empresa do grupo SAINT GOBAIN. Segundo a SAINT GOBAIN a estrutura desse rebolo é aberta. Classificando-se o rebolo segundo a norma ANSI B74.13 - 1977 tem-se o seguinte código C60K8V. A Figura 4.3 ilustra o rebolo fixado na máquina.



Figura 4.3 - Rebolo convencional de carbeto de silício fixo ao eixo árvore da máquina.

O dressador utilizado foi fabricado pela empresa Máster Diamond. Trata-se de um dressador do tipo conglomerado, onde os diamantes são fixados em uma extremidade metálica. As dimensões da pastilha são 15x8x10 mm. A Figura 4.4 ilustra o dressador utilizado.



Figura 4.4 - Dressador do tipo conglomerado utilizado nesta pesquisa.

4.1.2. Corpos de Prova

O material utilizado para a presente pesquisa é formado por chapas de compósito plástico reforçado com fibra de carbono (PRFC) doados pelo Centro Tecnológico da Aeronáutica (CTA). A densidade do compósito varia de $1,1 \sim 1,4 \text{ g/cm}^3$, o tipo de material do compósito é tecido de carbono com matriz epóxi. Esse compósito é disposto de 14 camadas de tecido de carbono que possuem 4 mm e têm a direção das suas fibras alternadas em paralela, perpendicular e cruzada (45 graus). A cura desse material foi feita através da camisa de vácuo (Vacuum Bag).

As dimensões originais das chapas são 650 mm de comprimento, 5 mm de espessura e 100 mm de altura. Para a realização dos ensaios, serrou-se as chapas perpendicularmente ao comprimento das mesmas obtendo-se chapas menores de dimensões 200 mm de comprimento, 5 mm de espessura e 100 mm de altura, que serão os corpos de prova utilizados para os posteriores ensaios. Do serramento dos chapas originais obtém-se, também, corpos de prova menores que os citados anteriormente com dimensões de 100 mm de comprimento, 5 mm de espessura e 100 mm de altura, os quais serão utilizados para marcar o desgaste do rebolo.

Fixou-se estes corpos de prova em uma morsa que é presa à mesa da máquina. A retificação plana ocorreu na espessura da chapa no sentido paralelo ao comprimento do

material. A fixação dos corpos de prova e o modo como foram usinados estão explicados com mais detalhes posteriormente. A Figura 4.5 mostra como são os corpos de prova.



Figura 4.5 - Corpo de prova.

4.2. Montagem do Banco de Dados

A montagem do banco de dados foi feita através de um programa, o LabView[®], toda a sua programação foi feita por estudantes do LUA.

4.2.1. Aquisição da Força Tangencial de Corte e Energia Específica de Retificação

Para a realização desta pesquisa, a força tangencial de corte (F_{tc}) foi medida pela determinação da potência elétrica consumida pelo motor de acionamento do eixo árvore do rebolo, com o monitoramento dos valores de tensão e corrente elétrica, provenientes deste motor elétrico.

Para tal, um módulo eletrônico é utilizado para transformação dos valores de corrente elétrica e tensão (provenientes do motor) em sinais de tensões compatíveis para serem enviados a uma placa de aquisição de dados e manipulados pelo programa de aquisição de dados, que foi desenvolvido, utilizando-se o software LabView 7.1[®], da National Instruments[®] (Figura 4.6).

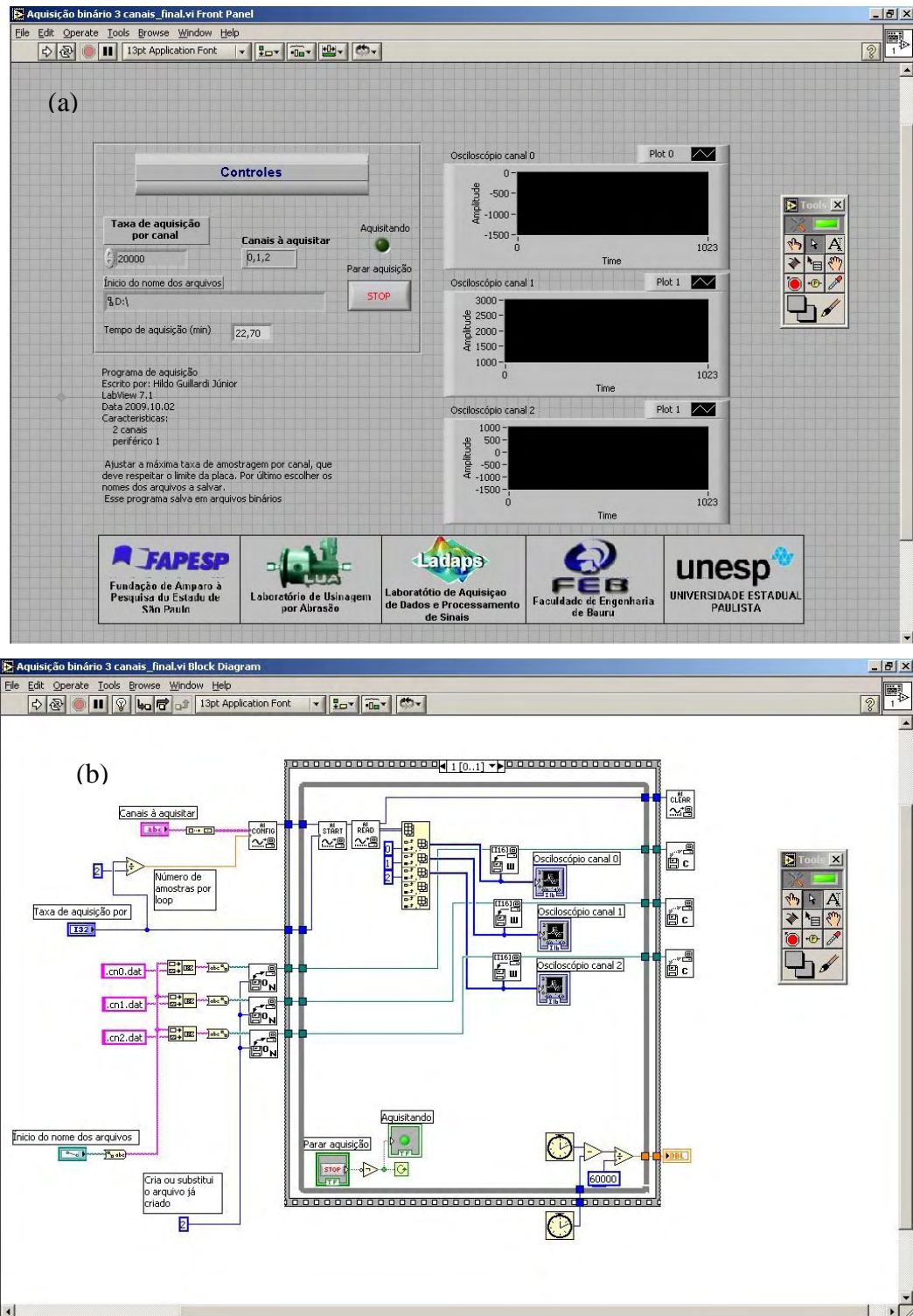


Figura 4.6 - Imagem do LabVIEW® (a) Interface do programa; (b) Diagrama de blocos

A taxa de amostragem utilizada foi de 10.000 amostras por segundo.

Evidencia-se que esta variável de saída foi medida em tempo real, ou seja, no momento em que o processo de retificação acontecia. Observa-se que antes de se iniciar processo de retificação, já existem forças devido às forças resistentes internas. Essas forças

iniciais são chamadas de forças em vazio. Em todos os ensaios realizados, descontou-se a influência destas.

A energia específica de retificação é a energia gasta por unidade de volume de remoção de material. Esta é uma variável de saída relacionada diretamente com a força tangencial de corte e a velocidade periférica do rebolo, no entanto é afetada por outros parâmetros do processo como largura de retificação e velocidade tangencial da peça. Para a aquisição da energia específica de retificação houve necessidade do monitoramento da velocidade periférica do rebolo e da força tangencial de corte, para que depois esses dados foram manipulados em um programa avançado (MatLAB® 9.0).

4.2.2. Aquisição da Rotação do Rebolo

A calibração da rotação do rebolo foi feita utilizando-se um tacômetro e um multímetro, ambos digitais. Assim, variando os valores de frequência do inversor obtinha-se uma leitura no tacômetro e simultaneamente no multímetro. Fez-se a leitura para dois valores de frequência como se observa na Tabela 4.1, sendo obtidos os respectivos valores de rotação e tensão. A Tabela 4.1 apresenta os valores médios obtidos.

Tabela 4.1- Valores da frequência, rotação e tensão utilizados para a calibração da curva de rotação do rebolo.

Rotação medida no tacômetro (rpm)	Tensão medida no multímetro (V)
867,5	3,17
1735	5,04

A partir dos dados da Tabela 4.1, obteve-se a Equação 4.1 de calibração da rotação do rebolo, a partir do relacionamento linear entre a rotação do rebolo (rpm) e a tensão gerada (V):

$$RPM = 463,9037.V - 603,0749 \quad (4.1)$$

É necessário ressaltar que a equação 4.1 só pode ser usada para valores de voltagem maiores que 1,3 V, que é o valor de tensão necessário para que o inversor de frequência vença

a resistência interna do motor e dê partida no motor. Essa equação foi calibrada no programa de aquisição, permitindo a obtenção segura dos dados necessários à análise deste projeto.

A medição da rotação do rebolo durante os ensaios foi realizada por meio de um encoder, marca Hohner, tipo 1012-0312-1800, com faixa de tensão de 5 a 28V, o qual foi acoplado ao motor de indução trifásico do motor da retificadora (Figura 4.7).

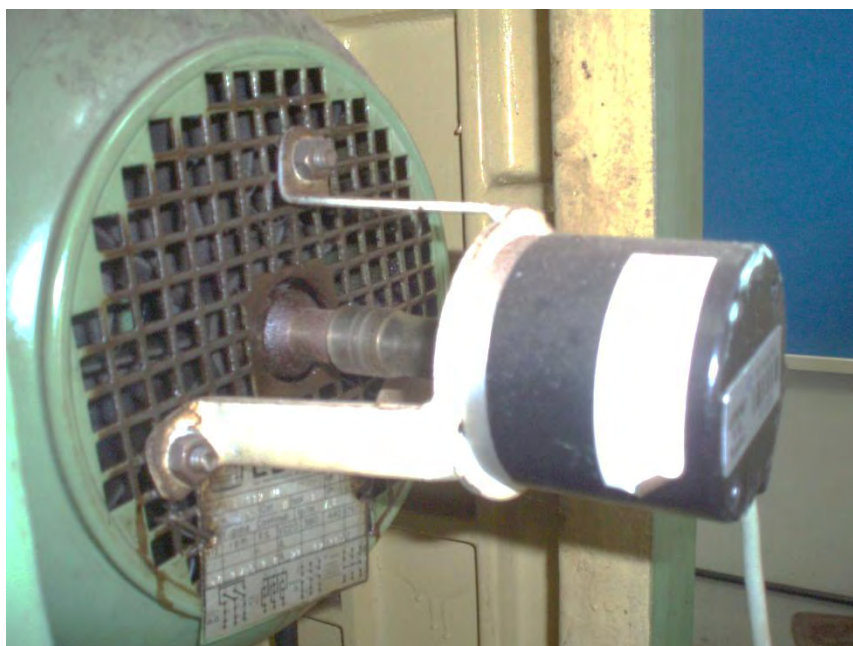


Figura 4.7 - Localização do encoder acoplado no eixo do motor da retificadora.

Os valores da rotação do rebolo foram obtidos em tempo real durante todos os ensaios. Os dados foram então armazenados pelo programa de aquisição de dados desenvolvido no software LabView 7.1[®], da National Instruments[®].

4.2.3. Preparação dos corpos de ensaio para o MEV

Para a preparação dos corpos de prova para a realização do MEV primeiramente selecionou-se o corpo com melhor valor de rugosidade entre suas repetições. Com isso escolheu-se 12 corpos de prova, um para cada método de lubri-refrigeração e espessura equivalente de corte.

Após isso realizou-se o seu corte em peças de 12 mm de altura por 17 mm de largura. Fixou-se esses corpos no suporte do MEV com o auxílio de uma cola epóxi, como se observa na Figura 4.8.



Figura 4.8 - Corpo de prova fixado no suporte para realização do MEV.

A microscopia eletrônica de varredura foi realizada no Centro de Pesquisa em Óptica e Fotônica, do Instituto de Física de São Carlos (IFSC), da Universidade de São Paulo - USP, campus de São Carlos. O microscópio eletrônico de varredura utilizado foi um microscópio da marca ZEISS, modelo DSM 960, utilizando-se a técnica dos elétrons espalhados, que permite a visualização com maior facilidade do relevo das estruturas na superfície analisada.

Realizou-se primeiramente a pintura dos corpos de prova com prata para realizar a condutividade devido ao fato do corpo de prova ser alto (superior a 5 mm), depois os corpos de prova foram para o forno Quimis a 60° C para curar a tinta, depois realizou-se um banho de ouro com um Balzers SCD 050 Sputter Coater. Após isso colocou-se as amostras no equipamento para a realização do MEV. Esse foi realizado com um vácuo sob a pressão de 10^{-5} Pa e obteve-se imagens com dois valores de zoom, 500 e 2000 vezes de aumento.

4.3.Preparação do Banco de Ensaaios

A seguir será apresentada a preparação dos equipamentos para a realização dos ensaios.

4.3.1. Preparação do Fluido de Corte para o Método Convencional

O fluido de corte utilizado é um óleo solúvel semi-sintético, ME-1, concentrado, da empresa TAPMATIC. Segundo a distribuidora, este fluido é um óleo solúvel semi-sintético de alta diluição para usinagem e retífica, que facilita as operações de corte e usinagem, aumenta a vida útil das ferramentas, apresenta resistência extra contra corrosão, e reduz os tempos de operação.

Utilizou-se este fluido na proporção de 1:39, isto é, a diluição de uma parte deste fluido será feita em 39 partes de água, o que equivale a uma concentração de 2,5% de fluido na emulsão. Essa escolha baseou-se em experiências positivas obtidas em outros trabalhos realizados no Laboratório de Usinagem por Abrasão. Colocou-se o equivalente a 192 litros de água no reservatório de fluido de corte da máquina a ser utilizada e 5 litros do óleo solúvel semi-sintético.

De acordo com o fabricante, este fluido já possui em sua composição antiespumantes, não necessitando da adição de mais destas substâncias.

4.3.2. Fixação da Peça

A peça a ser usinada e a peça utilizada para impressão do rebolo foram fixadas em uma morça presa por dois parafusos e duas porcas na mesa da máquina (Figura 4.9). Observa-se que tem duas chapas de aço ao lado do corpo de prova, essas chapas que fazem a fixação do corpo de prova junto a mesa da máquina retificadora.



Figura 4.9 - Fixação da peça a ser usinada.

4.3.3. Definição dos Parâmetros de Usinagem

A definição dos parâmetros de usinagem a serem utilizados nesta pesquisa foram definidos a partir de ensaios preliminares e com a experiência adquirida em anos de pesquisa na área de retificação pelo Laboratório de Usinagem por Abrasão.

A vazão utilizada nos ensaios com refrigeração convencional foi obtida através de um medidor de vazão acoplado nas mangueiras do bocal. Seu valor foi de 27,5 l/min tendo uma pressão de 1 bar ou 0,1 MPa. Nos ensaios com a lubrificação otimizada utilizou-se uma vazão de 20,5 l/min com uma pressão de 5,25 bar ou 0,525 MPa. No MQL a pressão e vazão utilizadas foram 6 bar ou 0,6 MPa e 100 ml/hora, respectivamente.

Discutia-se inicialmente a variação do parâmetro espessura equivalente de corte, cuja variação seria feita a partir da profundidade de corte, mantendo-se constantes a velocidade da peça e a velocidade periférica do rebolo. Assim, os valores adotados para a profundidade de corte seriam: 100 μm , 300 μm , e 600 μm . A escolha de tais medidas devem-se ao fato de analisar diferentes condições de usinagem, desde uma mais severa até uma situação mais branda.

A velocidade da mesa foi calculada manualmente fazendo-se uso de um cronômetro digital e uma trena. Na medida de 40 cm, o tempo da mesa foi cerca de 5 s, o que resulta em uma velocidade de cerca de 0,08 m/s. Já a velocidade periférica do rebolo foi calculada a partir de sua rotação de cerca de 1800 rpm, o que equivale a aproximadamente 33,5 m/s.

Para este projeto, o volume específico de material a ser removido será cerca de 2400 mm³/mm. Esse valor corresponde ao volume de material a ser removido dividido pela espessura da peça (5 mm). Assim, remover-se-á 12 mm na altura da peça. O cálculo realizado é: 12 mm x 200 mm (comprimento da peça) x 5 mm (espessura da peça), sendo o resultado obtido dividido pela espessura da peça, obtendo-se o volume específico desejado de 2400 mm³/mm.

Assim, a Tabela 4.3 apresenta os parâmetros por fim definidos.

Tabela 4.3 - Valores dos parâmetros a serem utilizados

h_{eq} (espessura equivalente de corte)	a (profundidade de corte)	V_w (velocidade da peça)	V_s (velocidade periférica do rebolo)
0,267 μ m	100 μ m	0,08 m/s	33,5 m/s
0,800 μ m	300 μ m	0,08 m/s	33,5 m/s
1,600 μ m	600 μ m	0,08 m/s	33,5 m/s

Para cada espessura equivalente de corte foram testados quatro métodos diferentes de lubri-refrigeração, o convencional, a otimizada, o MQL e a técnica de retificação a seco. Para cada método, a repetição é de três experimentações. Assim, serão realizados 36 ensaios no total, conforme ilustra a Figura 4.10.

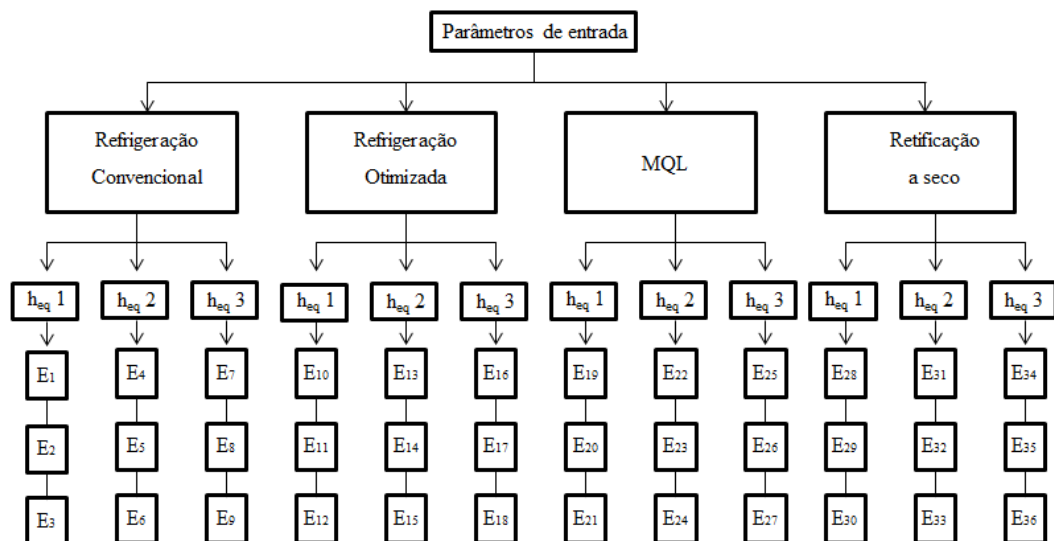


Figura 4.10 - Diagrama dos ensaios definitivos que serão realizados.

4.4.Preparação do fluido de corte para o método otimizado

Trata-se do mesmo fluido de corte utilizado para o método convencional. No entanto, para o método otimizado utilizou-se uma bomba de maior potência, fazendo com que o fluido fosse aplicado sob pressão na zona de corte. A regulagem da velocidade de aplicação foi feita ajustando-se o medidor de vazão, DMY-2030, da marca CONTECH. Buscou-se aplicar o jato de fluido à mesma velocidade periférica do rebolo, cerca de 30 m/s. A Figura 4.11 mostra a representação esquemática da disposição dos componentes do método otimizado, e o medidor de vazão utilizado.

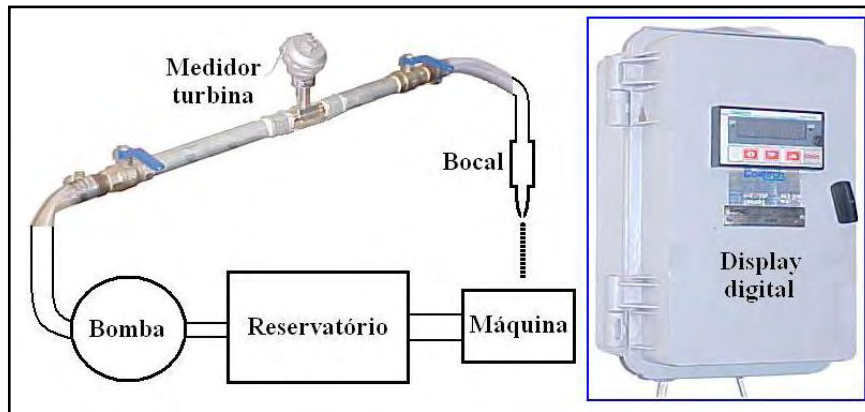


Figura 4.11 - Esquema da aplicação de fluido do método otimizado.

4.4.1. Bocal utilizado para o método otimizado

O bocal utilizado para o método otimizado foi construído com base na proposta de Webster (1995). As Figuras 4.12 e 4.13 mostram fotos do bocal utilizado.



Figura 4.12 - Vista lateral do bocal utilizado para o método otimizado.



Figura 4.13 - Vista de perfil do bocal utilizado para o método otimizado.

O bocal utilizado funciona da seguinte maneira, a mangueira é plugada na maior seção fazendo com que o fluido entre em determinada pressão, dentro do bocal ocorre uma diminuição da área pressurizando e direcionando o fluido de corte sobre a área desejada.

Em ensaios preliminares, Alves (2008) sentiu a necessidade de se colocar um elemento (tubo retangular) na saída de fluido do bocal, de forma a tornar o jato de fluido de corte menos disperso. Introduziu-se então na saída do bocal um tubo retangular fabricado com

chapa aço ABNT 1010 galvanizada cujo formato foi conseguido através da fabricação de dois perfis “U” encaixados um ao outro.

Dessa forma, o bocal construído segue os conceitos propostos por Webster (1995), de forma a apresentar menor turbulência do fluido.

4.5.Preparação do fluido para o MQL

O sistema MQL é composto basicamente de: compressor, regulador de pressão, medidor de vazão de ar, dosador (equipamento de MQL) e bocal projetado para a utilização de MQL na retificação. O equipamento de mínima quantidade de lubrificante permite uma fina regulagem do volume de lubrificante/ar separadamente, por meio de um registro tipo agulha. A Figura 4.14 mostra a unidade de controle do equipamento de MQL, onde são feitas a dosagem do óleo lubrificante e a regulagem da vazão de ar comprimido.

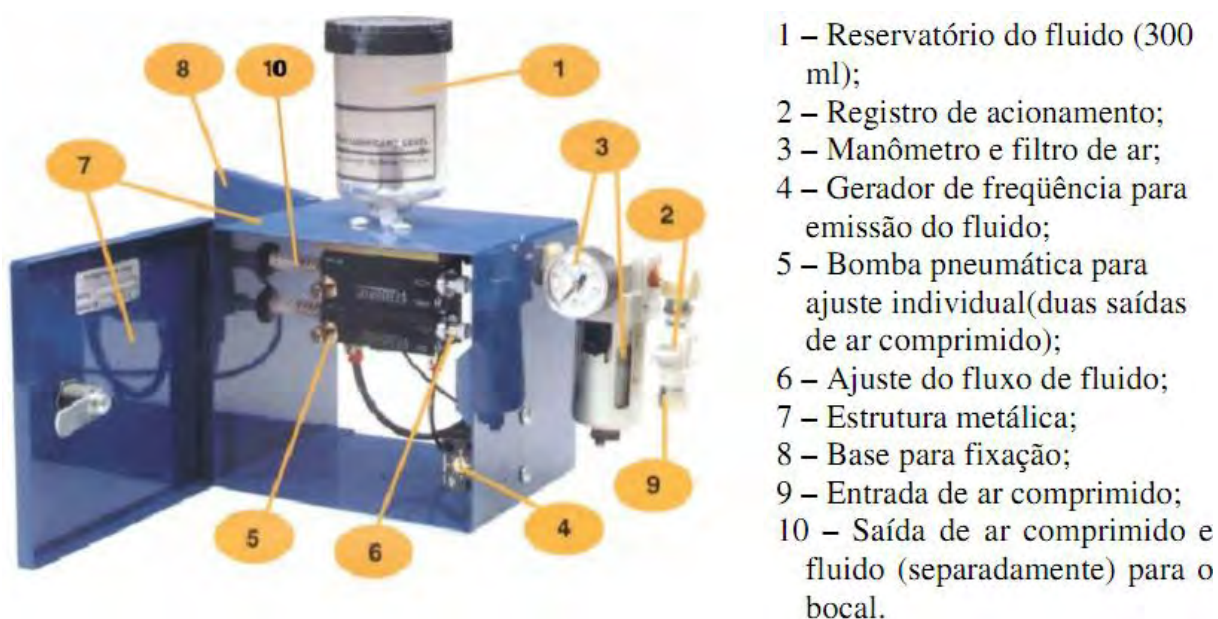


Figura 4.14 - Detalhes construtivos do aplicador ITW Accu-lube 79053D.

A utilização deste equipamento necessita de uma linha de ar comprimido com filtros e reguladores de pressão abastecida por um compressor de ar.

A pressão utilizada para o medidor de vazão foi de 8kgf/cm^2 , recomendada pelo próprio fabricante, ajustada através do regulador de pressão e mantida constante para todas as condições de MQL.

4.5.1. Bocal utilizado para MQL

Na Figura 4.15 encontra-se o projeto do bocal utilizado no método MQL no processo de retificação. O bocal, Figura 4.16 possui várias entradas de ar através de furos externos. Estes furos externos estão conectados a mangueiras independentes externas. Possui ainda 2 (duas) entradas de fluido de corte através de dois furos internos que recebem fluido de duas mangueiras independentes passadas internamente pela mangueira de ar comprimido (Figura 4.17). O bocal possui ainda uma câmara interna para uma correta mistura do ar comprimido com o fluido de corte através do princípio de Venturi. A saída da mistura fluido/ar comprimido ocorre em uma saída retangular.

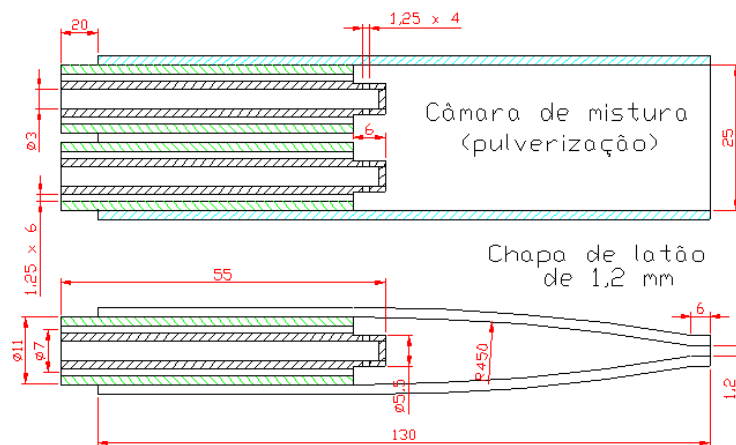


Figura 4.15 - Projeto do bocal do MQL.



Figura 4.16 - Vistas do bocal utilizado na experimentação com MQL.

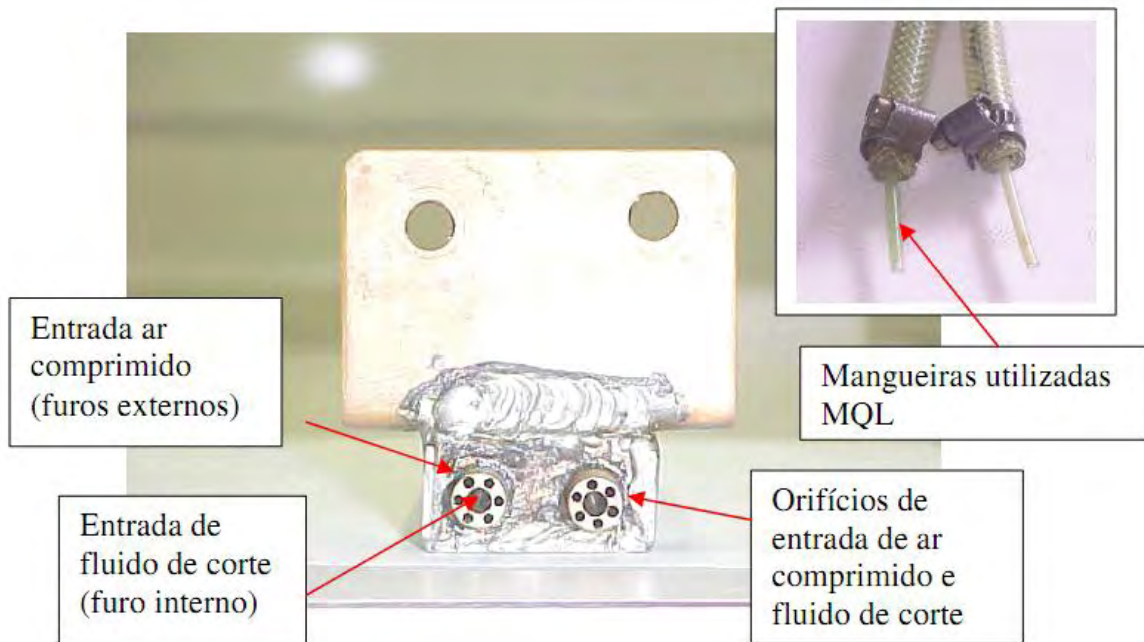


Figura 4.17 - Vista da parte traseira do bocal MQL mostrando os orifícios de entrada de ar comprimido e fluido de corte.

O bocal utilizado funciona da seguinte maneira, é injetado o fluido no furo central e o ar comprimido nos furos externos, nesses furos o fluido é comprimido e é arrastado pelo ar por pequenos orifícios para a câmara de mistura aonde é criada e dispersada uma névoa sobre o rebolo.

4.6.Preparação para retificação a seco

Para a retificação a seco apenas fez-se a remoção do bocal de lubrificação deixando assim a operação apenas com a refrigeração do ar.

4.7.Procedimentos realizados antes de cada ensaio

Os procedimentos realizados sejam antes, durante, ou após cada ensaio são os mesmos para todos os métodos de lubri-refrigeração. Assim, os procedimentos aqui e a seguir relatados foram seguidos em todos os ensaios.

Descreve-se a seguir a relação dos procedimentos gerais seguidos antes do início de cada ensaio:

- Liga-se o rebolo, deixando-o funcionar por cerca de quinze minutos, para que a máquina sofra dilatação, não comprometendo a execução do ensaio e os dados coletados;
- Liga-se o fluido de corte, no caso do método convencional, fazendo com que este circule pelo sistema; em seguida, mede-se a concentração deste, utilizando um refratômetro da marca ATAGO, modelo N-50E, como o mostrado na Figura 4.18; a escala desse aparelho é em Brix, e não em porcentagem de concentração, e assim sendo, o valor correto para cerca de 5% de concentração do fluido é de 3 na escala do refratômetro; valores abaixo deste, significam que o fluido estava com concentração baixa, sendo necessário colocar mais óleo, seguindo os valores de concentração estipulados; para valores acima de 3, a emulsão estava com concentração elevada de óleo, devendo-se acrescentar água;



Figura 4.18 - Refratômetro ATAGO N-50E, utilizado para verificação da concentração do fluido de corte do método convencional.

- Dressagem do rebolo, utilizando os dressadores descritos; durante este procedimento, busca-se obter uma superfície homogênea, e renovar os grãos abrasivos;
- Normalização da peça, fazendo com que o rebolo toque a peça, e zerando o marcador do fuso de profundidade;

Estes são os procedimentos realizados antes de cada ensaio, permitindo que a máquina e as condições do processo estejam ajustadas para o início do ensaio.

4.8. Procedimentos realizados durante cada ensaio

Uma vez realizados os procedimentos citados acima, inicia-se a execução do ensaio. Durante cada ensaio as tarefas eram:

- Efetuar a descida do rebolo, conforme a espessura equivalente de corte do ensaio (0,267 μm , 0,8 μm ou 1,6 μm), a cada passada da peça pelo rebolo, sempre no movimento de encontro destes dois (movimento de avanço); cada indicação no fuso de profundidade corresponde a 0,01mm, ou 10;
- Verificar os dados coletados em tempo real pelo computador, utilizando o programa LabView 7.1[®]; essa verificação visual é útil para detecção de problemas durante o ensaio, já que alterações anormais tornam-se visíveis no comportamento das variáveis, o qual é praticamente constante;
- Medir a rugosidade da peça a cada ensaio realizado;

A medição de rugosidade foi feita medindo-se o parâmetro R_a , com um rugosímetro da marca Taylor Hobson, modelo Surtronic 3+ (Figura 4.19). A medição foi realizada na direção perpendicular à superfície de retificação, enquanto a peça estava presa à morça. O comprimento de medição (cut-off) utilizado foi de 0,245 mm e o raio da ponta do diamante do medidor de rugosidade foi de 0,2 μm . Em todos os ensaios, a rugosidade foi medida cinco vezes em diferentes regiões da peça. Os valores foram anotados e os dados tratados estatisticamente.



Figura 4.19 - Medição de rugosidade.

Os ensaios foram executados conforme o proposto, sendo três diferentes espessuras equivalentes de corte, com repetições de três ensaios cada uma, para cada um dos quatro tipos de lubri-refrigeração considerados, o que equivale a trinta e seis ensaios no total.

4.9.Procedimentos realizados após cada ensaio

Ao final do número total de ciclos estipulados para cada espessura equivalente de corte equivalente, o ensaio está encerrado. Após seu término, deve-se proceder para a medição do desgaste do rebolo. Essa medição foi feita utilizando-se um corpo de prova da mesma chapa de compósito utilizada para a realização dos ensaios, fixo à morça com o auxílio de calços. O procedimento é simples, sendo objetivado apenas marcar a superfície do rebolo sobre a peça cilíndrica. Como o material do corpo de prova é mais mole, cuidou-se para que não ocorresse queima superficial, fazendo com que o rebolo penetrasse suavemente na peça. Dessa forma, o perfil do rebolo ficou registrado no corpo de prova cilíndrico.

Com o perfil do rebolo registrado na peça, utilizou-se o rugosímetro para realizar uma leitura da superfície na qual foi marcado o perfil. O rugosímetro foi ligado diretamente a um computador via cabo USB e as informações de leitura foram geradas na forma de um gráfico no programa Talymap da Taylor Hobson. Através destes gráficos foram obtidos os valores do desgaste diametral do rebolo, os quais foram utilizados para o cálculo da relação G.

Após o término dos ensaios, verifica-se a aquisição de dados de força tangencial de corte e emissão acústica no programa LabView 7.1[®] e salva-se os arquivos gerados no computador. Estes arquivos serão filtrados e manipulados no programa MatLab 9.0[®] e gerarão gráficos para análise e discussão de resultados

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados os resultados obtidos na forma de figuras discutindo-se cada uma das variáveis avaliadas.

5.1. Força tangencial de corte

A Figura 5.1 apresenta os resultados obtidos de força tangencial de corte em todos os métodos de lubri-refrigeração avaliados.

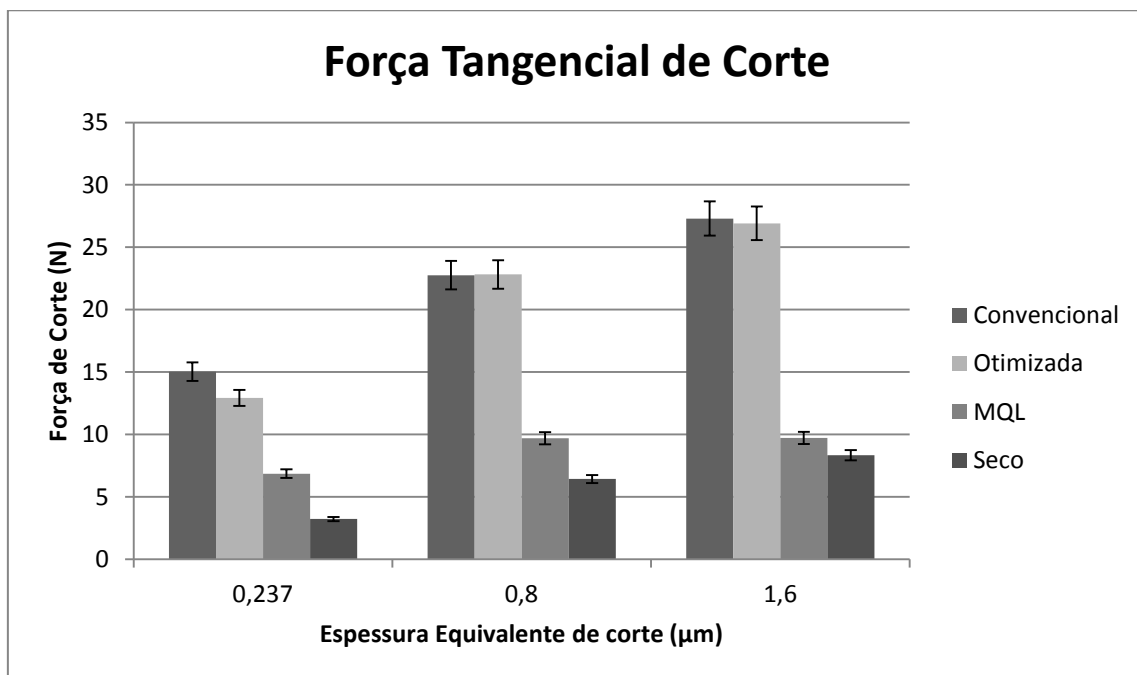


Figura 5.1 - Valores médios da Força tangencial de corte.

Segundo Hu e Zhang (2006), as forças de corte no processo de retificação de compósitos plásticos reforçados com fibra de carbono (PRFC) podem atingir valores altos devido à estrutura do compósito ser multidirecional, fazendo com que as dobras do reforço de fibra de carbono, as quais possuem orientações diferentes, se entrelacem fortemente umas com as outras a medida que se retifica o material, dificultando a usinagem da peça e necessitando maiores forças de corte.

Verifica-se que a força tangencial de corte teve uma tendência de crescimento com a elevação da profundidade de corte. Isso acontece, pois o aumento da profundidade de corte faz com que haja maior área de contato entre o rebolo e a peça. Assim, há a elevação do

número de grãos em contato e dos esforços de corte por grão e das energias dissipativas (calor, deformações, dentre outras) para uma maior remoção de material. Nota-se também que os menores valores obtidos da força de corte são para o MQL e a retificação a seco. Deve-se observar que a matriz plástica (resina epóxi) apresenta a tendência de empastamento excessivo das porosidades do rebolo. Os cavacos gerados são muito finos, entopem as porosidades do rebolo proporcionando a diminuição da superfície de contato entre o grão abrasivo e a peça. Devido ao empastamento da superfície das porosidades do rebolo, há a tendência da força de corte aumentar; porém, como o rebolo utilizado é mole, ocorre o desprendimento dos grãos da superfície de corte do rebolo e o rebolo mantém-se afiado, esse fenômeno é comprovado pelo gráfico da relação G. Assim, há a redução da força tangencial de corte pelo contínuo desprendimento dos grãos abrasivos, acarretando maiores desgastes na superfície de corte do rebolo. Consequentemente, novas camadas de grãos abrasivos vão surgindo com maior capacidade de corte, o que promove a diminuição da força tangencial de corte.

Destro *et. al.* (2009), conseguiu valores de força para o MQL na retificação plana do aço 4340 ABNT com o MQL conseguiu resultados similares aos obtidos (8 N) nesta pesquisa. Sendo que os valores de retificação para a lubrificação convencional foram maiores que os obtidos no MQL (10,5 N), já os valores da refrigeração otimizada foram menores que os da otimizada (9,5 N) para espessuras de corte equivalente menores. Com o aumento da espessura equivalentes de corte os valores de força subiram e no caso com o h_{eq} maior os valores de força de corte, em N, foram 13, 12,5 e 12, para MQL, convencional e otimizada, respectivamente.

Para as técnicas de refrigeração otimizada e convencional os valores da força tangencial de corte também permaneceram próximos entre os demais métodos para as três espessuras equivalentes de corte, sendo que a lubrificação convencional sempre mostrou-se mais elevada do que as demais. Como nestes dois métodos as lubri-refrigerações mais abundantes, os cavacos são expulsos da região de corte com maior facilidade; porém, os valores de força tangencial de corte são muito próximos um do outro. Assim, o fluido escoava com maior facilidade expulsando os cavacos gerados na região de corte rapidamente, minimizando o empastamento do rebolo. Nestes casos, os grãos abrasivos permanecem presos na superfície de corte do rebolo, promovendo o desgaste das arestas de corte e não a perda do grão abrasivo pouco desgastado, o que proporciona a elevação das forças tangenciais de corte.

5.2. Energia específica de corte

A Figura 5.3 apresenta os resultados de energia específica de corte.

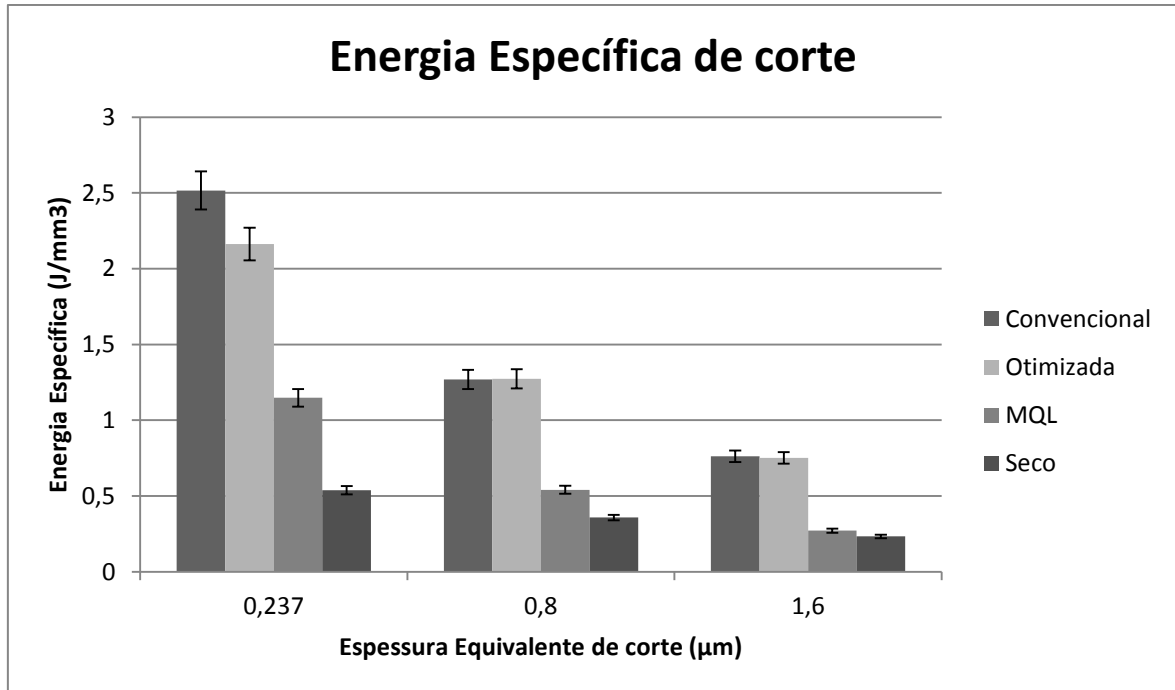


Figura 5.2 - Valores médios finais da energia específica de retificação.

Pode-se observar que o comportamento da energia específica de retificação é similar ao comportamento da força tangencial de corte. Observa-se que os menores valores obtidos de energia específica de retificação foram dados na retificação a seco, e os maiores para o método de lubri-refrigeração convencional. Nota-se a tendência da energia específica de retificação diminuir com o aumento da força de corte para todos os métodos realizados, isso se deve pois com o aumento do h_{eq} há o aumento do número de grãos em contato com a peça sendo assim, cada grão necessita de uma energia menor para remover o material da peça.

Para o MQL e a retificação a seco nota-se que esses têm os menores valores de energia específica de retificação, isso se deve ao empastamento do rebolo, pois, o rebolo diminui sua capacidade de remoção do material devido ao entupimento excessivo dos poros pelo cavaco, com isso nas técnicas de MQL e a seco há o desprendimento dos grãos abrasivos e a utilização de uma camada nova de grãos do rebolo fazendo com isso que a energia sempre se mantenha baixa nesse tipo de técnica, pois os grãos da nova camada estão afiados mantendo a energia de corte baixa. Já na refrigeração convencional e otimizada o fluido de corte consegue

retirar de forma mais eficiente o cavaco da zona de corte fazendo com que, ao invés do grão se desprender, haja a fratura do grão. Com essa fratura é gerada novas arestas de corte só que em menor quantidade do que em um grão de uma camada mais profunda do rebolo e com isso há um aumento da superfície de contato entre o grão e a peça ser retificada e assim consequentemente aumentando a energia específica.

Nota-se que com o aumento da profundidade de corte há consequentemente um aumento da espessura equivalente de corte, e com isso há uma diminuição dos valores de energia específica no processo. Isso pode ser explicado pelo fato que há um maior número de grãos em contato com a peça, com isso a energia específica cai, isso acontece pois a força por grão acaba sendo menor devido ao aumento da área de contato entre o rebolo e a peça que está sendo retificada. Essa diminuição da energia específica de corte pode ser demonstrada através de sua equação, pois o h_{eq} encontra-se como o denominador da mesma fazendo com que o seu aumento acarrete na diminuição da energia específica.

Deve-se ressaltar que a retificação de compósitos proporcionou valores baixos de energia específica de corte, o que permite dizer que este material tende a possuir boas propriedades de retificação.

5.3. Relação G

A Figura 5.3 apresenta os resultados obtidos pela relação G.

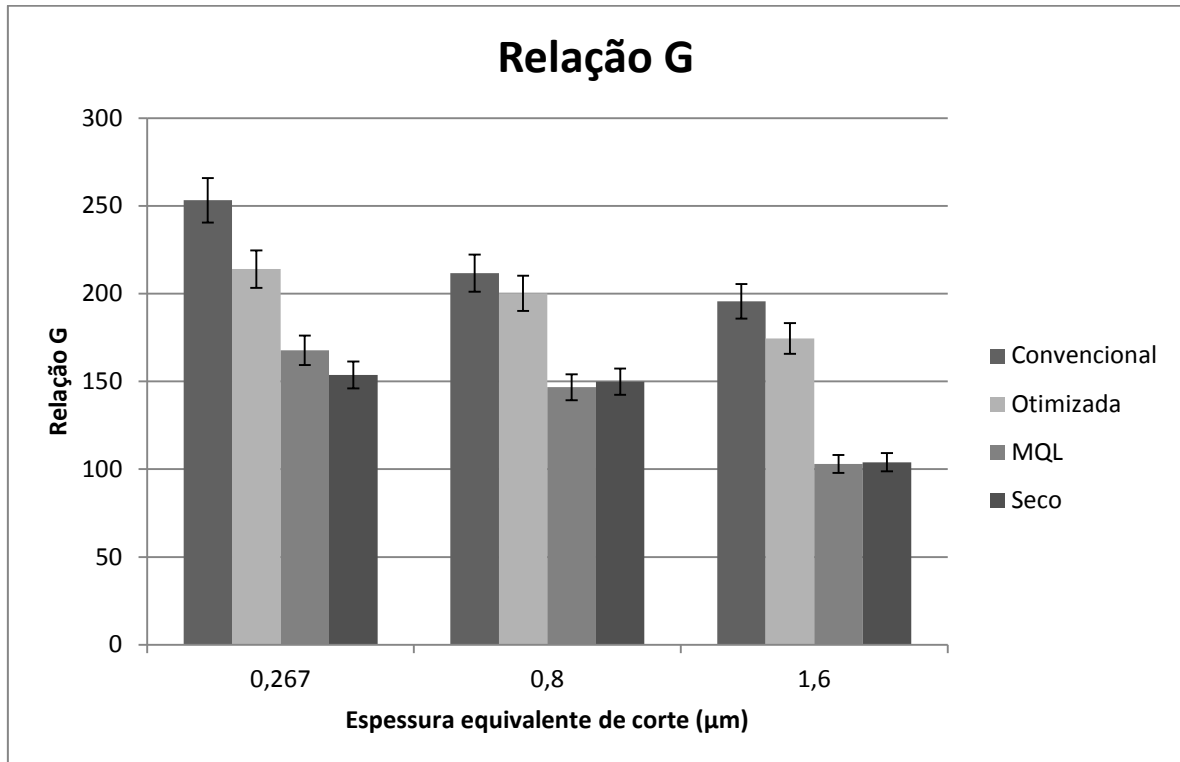


Figura 5.3 - Resultados da relação G.

Di Ilio e Paoletti (2000) estudaram compósitos e ainda observaram que a principal causa da degradação dos rebolos é a obstrução dos poros do rebole pela fina matrix do material.

Nota-se que os maiores valores obtidos na relação G foram das técnicas de lubri-refrigeração convencional e otimizada. Isso ocorre pela expulsão do cavado na zona de corte, fazendo que haja a fratura do grão abrasivo (auto-afiação do rebole). Assim, há um menor desgaste do rebole, proporcionando maiores valores de relação G. Já no MQL e na retificação a seco, a lubri-refrigeração é pouco eficiente, promovendo a elevação da temperatura e empastamento da superfície de corte do rebole dificultando a remoção eficiente dos cavacos gerados na superfície de corte. Com isso há a predominância do desprendimento do grão abrasivo da superfície de corte do rebole fazendo com que haja um maior desgaste do mesmo o que acarreta num valor menor de relação G.

Pode-se observar que com o aumento da espessura equivalente de corte há uma diminuição da relação G, isso se deve à maior superfície de contato entre o rebole e a peça,

fazendo que haja um maior número de grãos em contato com a peça e assim desgastando-os mais rapidamente.

Segundo Malkin (1989), o aumento do poder lubrificante proporcionado pelo fluido resulta na diminuição do desgaste do rebolo através da redução do atrito grão-peça e do atrito cavaco-ligante, permitindo que os grãos abrasivos permaneçam por mais tempo ao ligante ocasionando menor desgaste do rebolo.

Segundo Destro *et. al.* (2009) a relação G para aço 4340 ABNT os valores obtidos foram maiores para o MQL em menores espessuras equivalentes de corte. Quando essa espessura equivalente aumenta todos os valores sofrem uma queda que é mais acentuada no MQL sendo que esse tem o menor valor de relação G quando o h_{eq} é 0,08 mm. Isso se deve ao MQL conseguir remover o calor e lubrificar pequenas espessuras equivalentes de corte, porém com o aumento da espessura equivalente de corte a técnica começa a não ser eficiente na remoção de calor na zona de corte assim como a remoção do cavaco da mesma.

5.4. Rugosidade (Ra)

Os valores de rugosidade obtidos encontram-se na Figura 5.4.

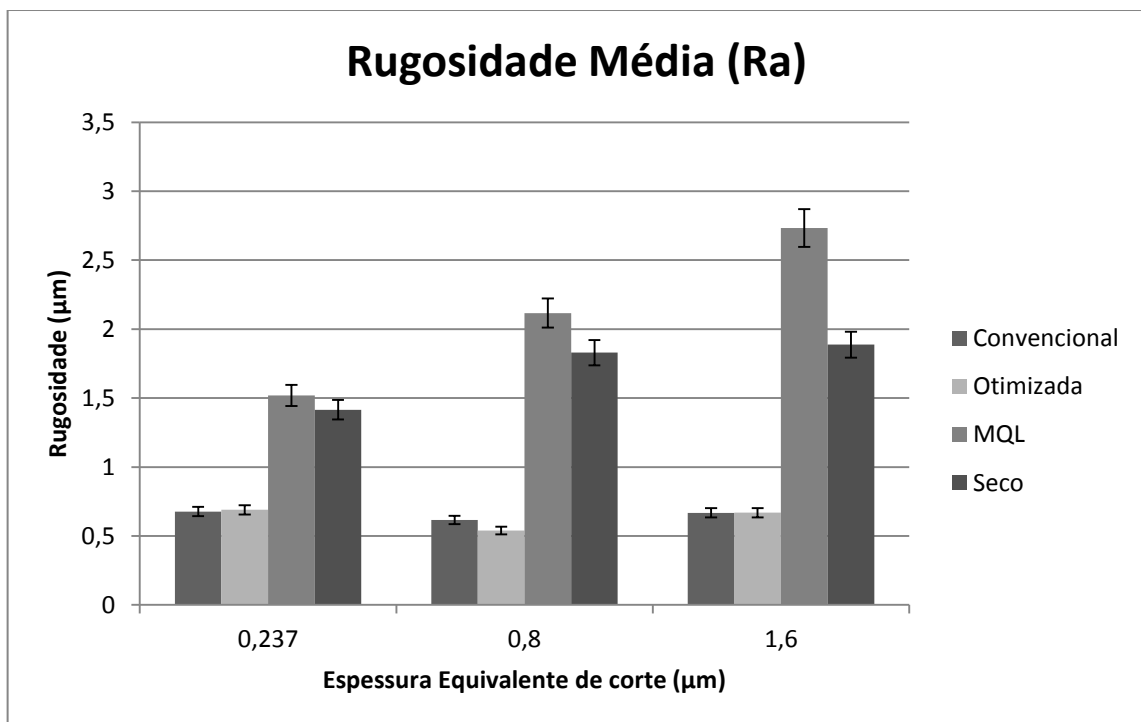


Figura 5.4 - Rugosidades (Ra) para os diferentes métodos de lubri-refrigeração.

Analisando-se os resultados obtidos observa-se que os valores de rugosidade foram bastante próximos para a lubri-refrigeração convencional e otimizada e mais próximos ainda para os valores de espessura equivalente de corte de 0,237 μm e 1,6 μm . Além disso, estes métodos de lubri-refrigeração obtiveram os melhores resultados. Percebe-se que para os dois tipos de refrigeração a melhor rugosidade (R_a) foi obtida para a espessura equivalente de corte de 0,8 μm e o pior valor de rugosidade para o valor de 0,267 μm . Esses valores, como comentados anteriormente, obtidos nos métodos de MQL e retificação a seco estão muito mais sujeitos ao empastamento do rebolo, fazendo com que se diminua a qualidade superficial da peça, essa diminuição na qualidade é dada, pois há condições mais severas de retificação nesses dois métodos. No MQL e na retificação a seco não há grande remoção do cavaco da zona de corte e com isso parte desse cavaco vai para o rebolo empastando-o e outra parte permanece na superfície agravando mais ainda o processo, pois esse cavaco que permanece na superfície e acaba danificando a superfície devido o atrito gerado entre ele e a peça.

Segundo Hu e Zhang (2006), o encolhimento mútuo das dobras de fibra do compósito PRFC, as quais são multidirecionais, torna este material mais adequado à obtenção baixos valores de rugosidade para o processo de retificação.

Observa-se também que os valores de rugosidade obtidos para as técnicas de MQL e retificação a seco foram os mais altos, sendo que tenderam a piorar com o aumento da profundidade de corte. Isso se deve ao fato dessas duas técnicas realizarem pouca ou nenhuma refrigeração da região de corte, levando a um aumento da temperatura nessa respectiva região. Segundo Lee *et. al.* (2000), um aumento na temperatura na região de corte faz com que o material compósito perca suas excelentes propriedades mecânicas, gerando um acabamento superficial menos satisfatório. Além disso, com o aumento das espessuras equivalentes de corte, realizado por meio do aumento da profundidade de corte, gera-se condições mais severas de retificação, contribuindo para um valor de rugosidade mais alto. E essas condições mais severas agravam ainda mais o problema de empastamento do rebolo. Pode-se perceber pelo fato que os valores de rugosidade para refrigeração convencional e otimizada se mantém com pouca variação entre as espessuras equivalentes de corte, enquanto para o MQL e a retificação a seco a rugosidade mostra uma tendência de aumentar de acordo com o aumento da espessura equivalente de corte.

Segundo Destro *et. al.* (2009) os valores de rugosidade obtidos na retificação plana do aço 4340 ABNT foram de 0,4, 0,45 e 0,75 μm para técnica convencional, otimizada e MQL respectivamente, quando o h_{eq} é de 0,02 mm, quando esse h_{eq} é aumentado para 0,08 mm os

valores rugosidade sobem para 0,5 μm para convencional e otimizada, e para 2,6 para o MQL. Nota que no caso do aço ocorre o mesmo que acontece aqui para o compósito, pois esse sempre tem maiores valores de rugosidade para o MQL enquanto para as técnicas de retificação convencional e otimizada há uma variação mínima entre esses valores.

5.5. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Nesse tópico são apresentadas as imagens obtidas através da técnica de MEV para os corpos de prova. Essas foram separadas e analisadas de acordo com a técnica de lubrificação utilizada.

As Figuras 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9, 5.10 nos apresenta as imagens obtidas das superfícies retificadas com a refrigeração convencional.

Há espaços vazios entre as fibras isso se deve que durante a retificação quando atingida uma camada de fibras, devido sua alta dureza, acaba removendo primeiramente a resina antes da fibra. Nota-se que há fragmentos de outro material entre as fibras, esse material são resíduos que podem ser da ferramenta com a qual se cortou o material ou do próprio rebolo, como pode ser observado na Figura 5.5.

Observando a ampliação de 2000 vezes do mesmo corpo de prova (Figura 5.6) nota-se que a matriz do corpo de prova está cheia de impurezas enquanto as fibras apresentam manter uma boa integridade. Como visto anteriormente há um espaço vazio entre as fibras, que se deve a remoção mais fácil da matriz deixando assim as fibras sobressalentes.

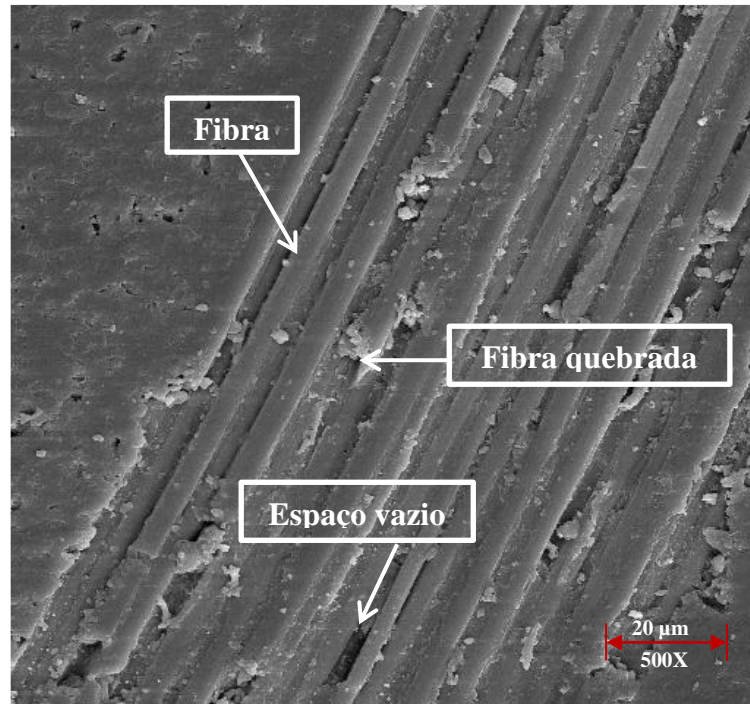


Figura 5.5 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com refrigeração convencional e h_{eq1} (ampliação de 500 vezes).

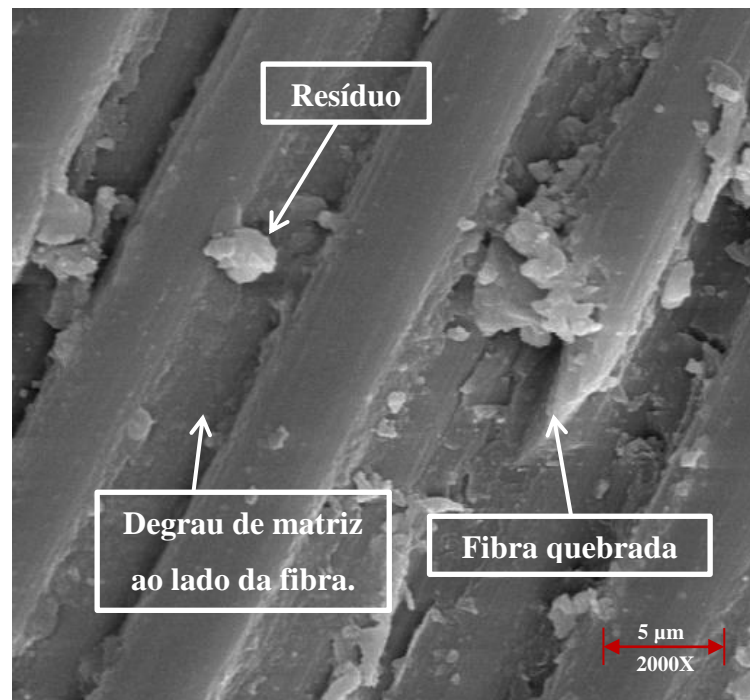


Figura 5.6 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com refrigeração convencional e h_{eq1} (ampliação de 2.000 vezes).

Na Figura 5.7 nota-se que há uma maior degradação da camada das fibras e percebe-se também o espaço vazio criado pela remoção dessas fibras. Percebe-se que com o aumento do

h_{eq} houve algumas camadas de fibras que se degradaram mais do que as outras e também que há algumas partículas de resíduo sobre a superfície retificada do material.

Quando observa-se a ampliação de 2000 vezes desse corpo de prova (Figura 5.8) nota-se que há a presença de impurezas assim como espaços vazios entre as fibras. Nota-se também que se compararmos essa imagem com a Figura 5.6, percebe-se que há uma maior degradação das fibras. Isso se deve as condições mais severas de usinagem.

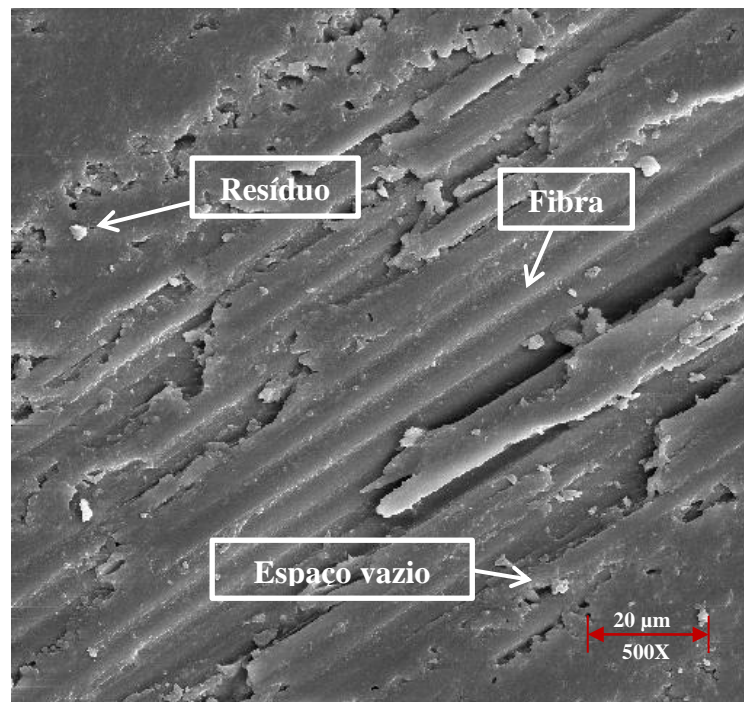


Figura 5.7 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com refrigeração convencional e h_{eq2} (ampliação de 500 vezes).

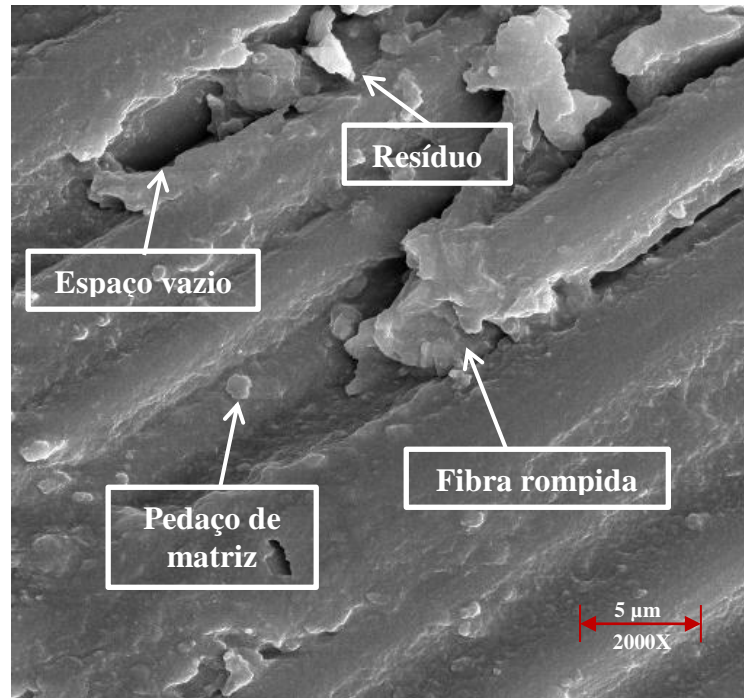


Figura 5.8 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com refrigeração convencional e h_{eq2} (ampliação de 2.000 vezes)

As Figuras 5.9 e 5.10 apresentam as imagens geradas para a retificação com lubrificação convencional e o h_{eq3} .

Na Figura 5.9 pode-se observar que há uma maior degradação das fibras quando comparadas com os outros dois valores de h_{eq} (Figuras 5.7 e 5.5). Nota-se que há um rompimento maior de fibras assim como um maior aparecimento de vazios. Esses são explicados devido à alta resistência das fibras assim como um aumento da severidade do processo.

Com a ampliação (Figura 5.10) pode-se perceber o acúmulo de resíduo em volta das fibras. Pode-se perceber que há certa degradação da fibra começando lateralmente. Percebe-se que já um aumento da profundidade dos vazios entre as fibras. Isso se deve ao aumento da profundidade de corte e com isso o aumento da severidade do processo.

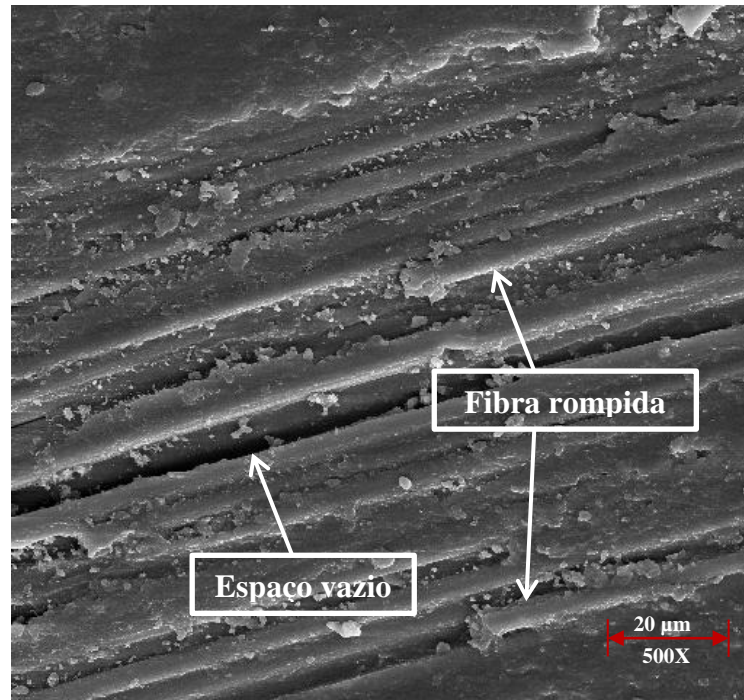


Figura 5.9 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com refrigeração convencional e h_{eq3} (ampliação de 500 vezes)

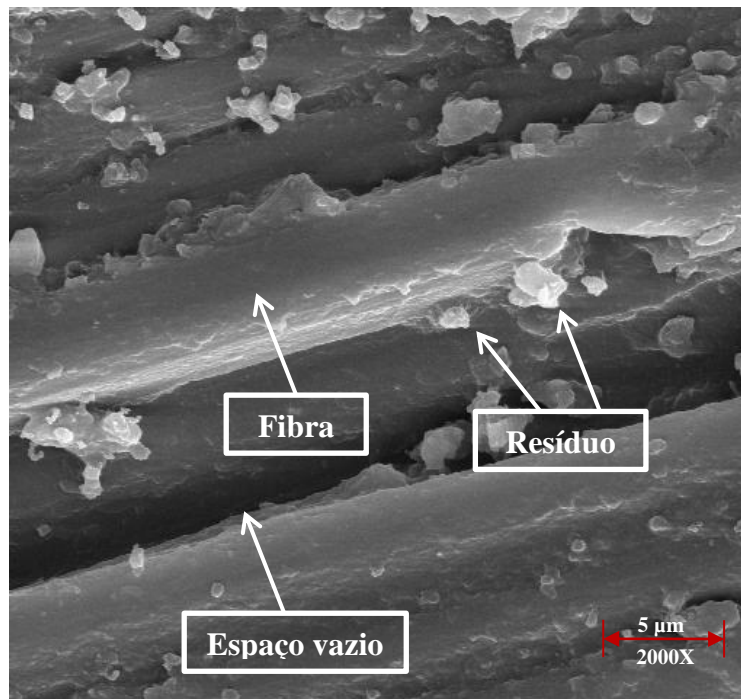


Figura 5.10 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com refrigeração convencional e h_{eq3} (ampliação de 2.000 vezes)

Comparando todos os processos de acordo com o aumento da profundidade de corte, nota-se que com o aumento do h_{eq} há um aumento de espaços vazios entre as fibras assim como uma maior degradação das mesmas. Nota-se que há o crescimento de resíduo

encontrada no material usinado, esse resíduo é proveniente das ferramentas de corte utilizadas para usinar o material, e com o aumento da profundidade de corte há o aumento do contato do rebolo com a superfície do material assim como também há o aumento da força de corte, fazendo com que aumente a severidade do processo e um maior desgaste da do rebolo.

As Figuras 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, 5.15, 5.16 apresentam as imagens obtidas das superfícies retificadas com a refrigeração otimizada.

A Figura 5.11 nos mostra que as fibras mantêm sua característica e que há alguns espaços vazios em torno das fibras devido a sua retificação. Na Figura 5.12 nota-se que há resíduo em torno das fibras assim como um pouco de resina, além de se evidenciar os espaços vazios.

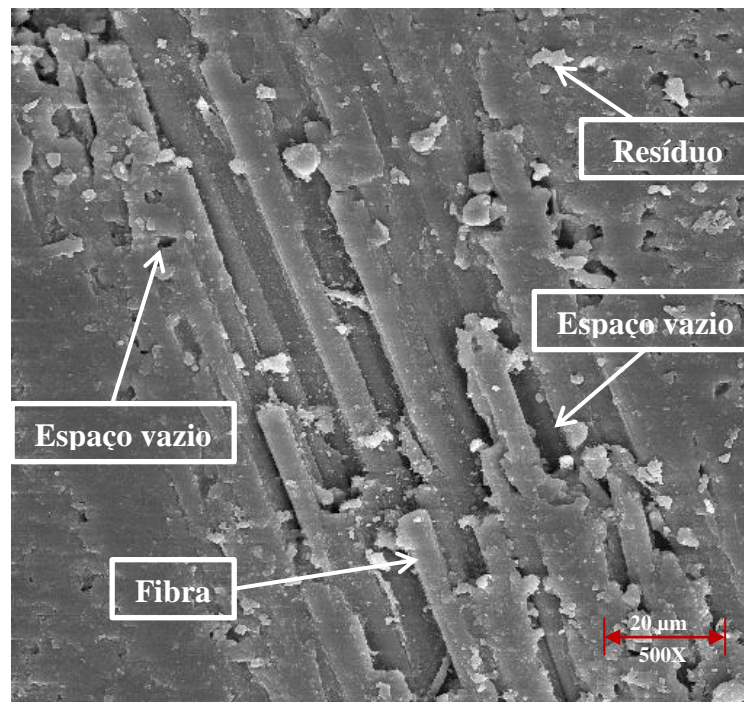


Figura 5.11 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com refrigeração otimizada e h_{eq1} (ampliação de 500 vezes)

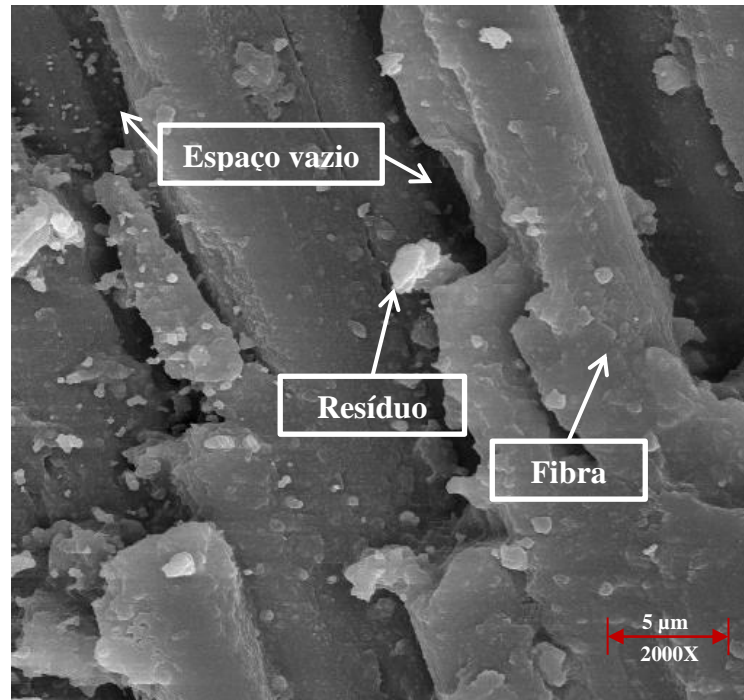


Figura 5.12 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com refrigeração otimizada e h_{eq1} (ampliação de 2.000 vezes)

Com o aumento da espessura equivalente de corte nota-se que há uma degradação maior de feixes mais profundos de fibras e o aumento de espaços vazios mais profundos (Figura 5.13). Observando a Figura 5.14 percebe-se que há um maior número de espaços vazios se compararmos com o h_{eq1} , porém as fibras ainda mantem sua orientação. Porém algumas fibras não são removidas totalmente deixando pedaços fragmentados.

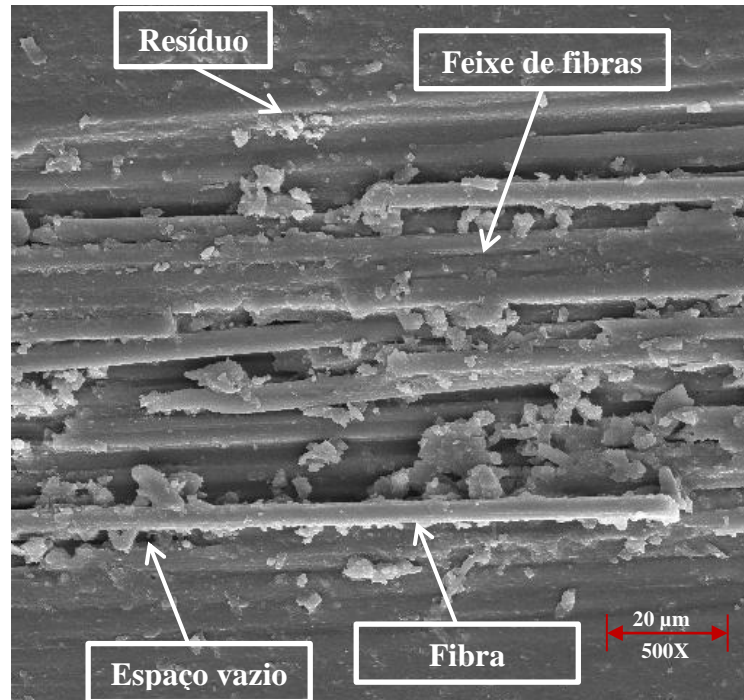


Figura 5.13 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com refrigeração otimizada e h_{eq2} (ampliação de 500 vezes).

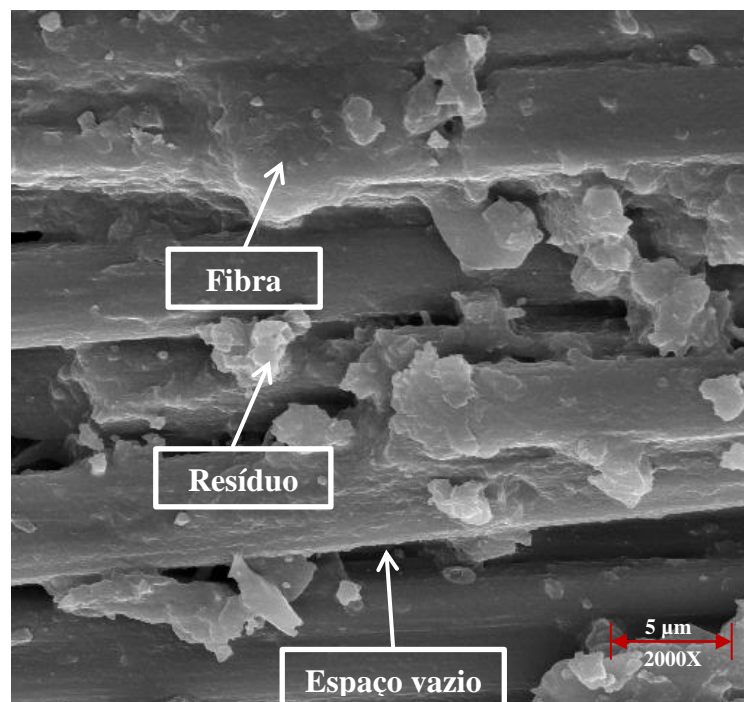


Figura 5.14 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com refrigeração otimizada e h_{eq2} (ampliação de 2.000 vezes)

Observando a Figura 5.15 nota-se que a superfície encontra-se com uma parte mantendo o sentido das fibras, contudo nota-se um maior número de fibras quebradas do que se comparando-se com os dois h_{eq} mostrados anteriormente. Analisando a ampliação (Figura 5.16) nota-se que há um número maior de espaços vazios e menor orientação das fibras, além de notar que as fibras fragmentadas estão entupindo os vazios da peça.

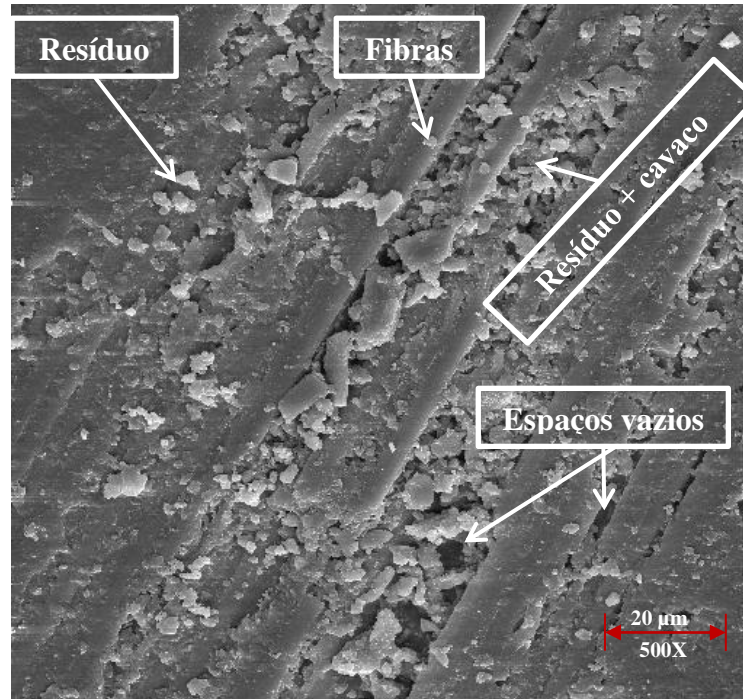


Figura 5.15 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com refrigeração otimizada e h_{eq3} (ampliação de 500 vezes)

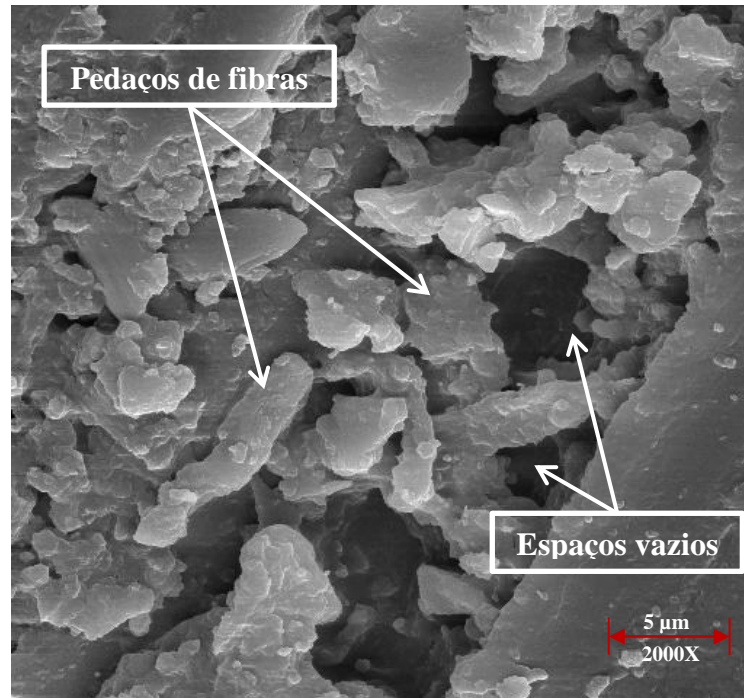


Figura 5.16 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com refrigeração otimizada e h_{eq3} (ampliação de 2.000 vezes)

As Figuras 5.17, 5.18, 5.19, 5.20, 5.21, 5.22 nos apresenta as imagens obtidas das superfícies retificadas com MQL.

Observando a Figura 5.17 nota-se que a superfície possui uma característica como se tivesse amassada, nota-se que as fibras mantêm o seu sentido e que há vários pedaços da matriz sujeitos a se soltarem. Também nota-se que a superfície não tem a característica de ser uma superfície lisa em nenhuma região.

Esses pedaços que estão quase se soltando são evidenciados na ampliação (Figura 5.18), onde é possível perceber que a peça começa a possuir vazios devido à retificação. Nota-se que há resíduo em volta das fibras assim como um aparecimento de uma resina.

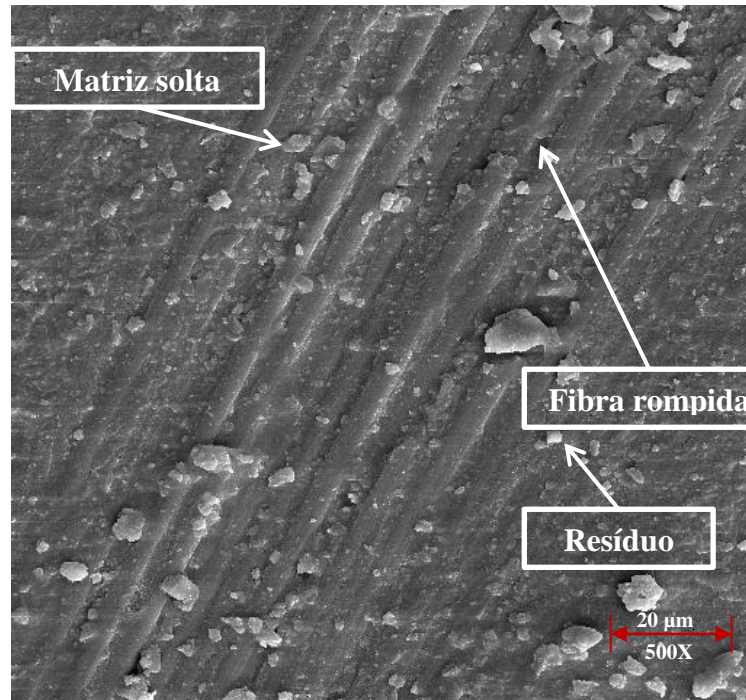


Figura 5.17 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com MQL e h_{eq1} (ampliação de 500 vezes)

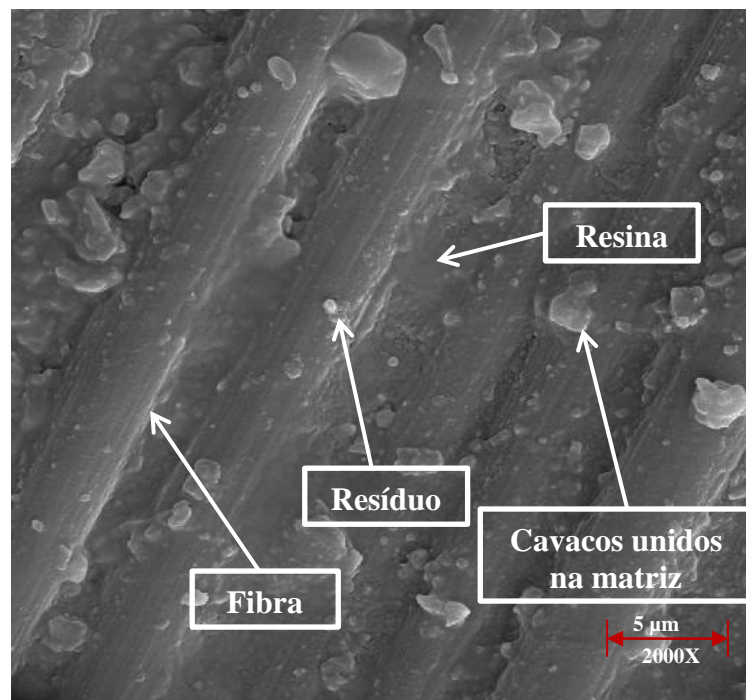


Figura 5.18 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com MQL e h_{eq1} (ampliação de 2.000 vezes)

A Figura 5.19 nos mostra que com o aumento do h_{eq} a retificação torna-se um processo severo à superfície do material fazendo com que não haja uma direção a ser seguida pelas

fibras, também não há a aparição de vazios devido à usinagem das fibras. Esses são entupidos pelos cavaco e resíduo solta do rebolo. Nota-se também que há uma resina envolta nas fibras fragmentadas isso se deve à deficiência de remoção de temperatura na técnica de MQL. Devido esse déficit de remoção de temperatura e a dificuldade na remoção do cavaco da zona de corte, esse cavaco e alguns resíduos acabam aderindo à superfície da matriz retificada comprometendo o acabamento superficial.

Nota-se ao se observar a ampliação (Figura 5.20) que a superfície da matriz contém uma espécie de resina em volta dos fragmentos da fibra, essa resina é a qual a cota de fibra de carbono foi envolta para a preparação da moldagem da placa. Pode-se observar que as fibras se encontram fragmentas sobre a matriz, isso se deve a pouca lubrificação e a forma menos eficiente de remoção do cavaco se comparados com os outros métodos vistos.

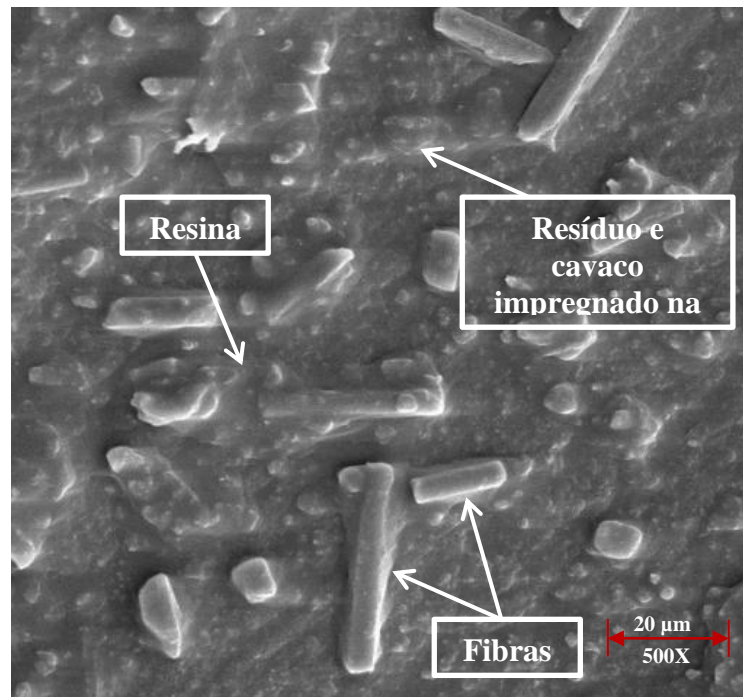


Figura 5.19 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com MQL e h_{eq2} (ampliação de 500 vezes)

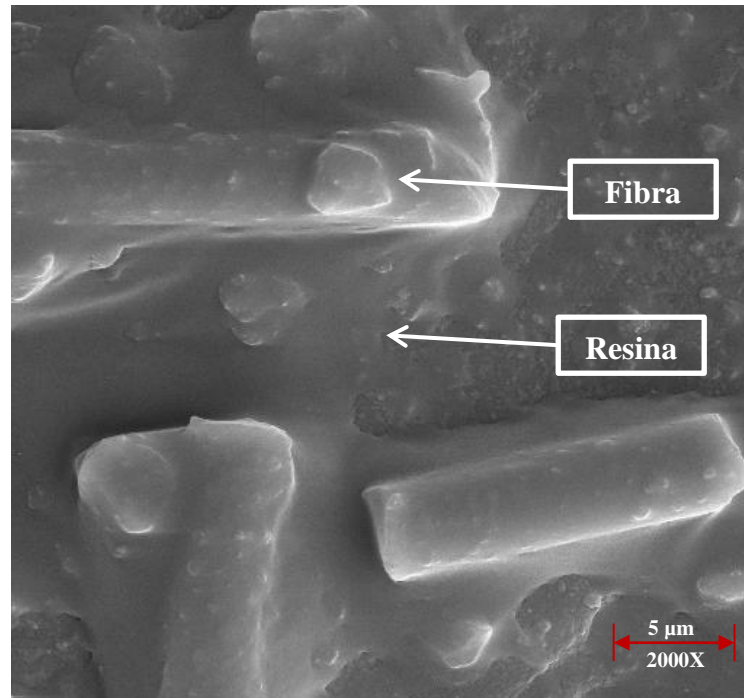


Figura 5.20 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com MQL e h_{eq2} (ampliação de 2.000 vezes)

Na Figura 5.21 nota-se que há uma maior degradação da matriz se comparadas com os outros h_{eq} utilizados nesse tipo de refrigeração. Nota-se que há um grande número de fibras fragmentadas além de uma superfície bastante irregular. O que pode-se perceber que também há muita matriz degradada, isso se deve as altas temperaturas que o corpo de prova foi submetido durante o processo de retificação. Nota-se que há vazios mais profundos, estes foram gerados devido ao arranchamento das fibras durante o processo, percebe-se que há uma fibra grande enquanto há vários pedaços de fibras fragmentadas.

Ao observar a ampliação (Figura 5.22) nota-se que há um grande número de fibras fragmentadas em pequenos pedaços além de resíduo perto da matriz. Porém, nota-se que dessa vez a matriz foi bastante degradada, e com isso esses fragmentos de fibras estão alocados novamente na matriz. Isso se deve a baixa eficiência de remoção de calor e de cavacos da zona de corte durante o processo de retificação. Nota-se que nesses fragmentos estão envoltos em resina.

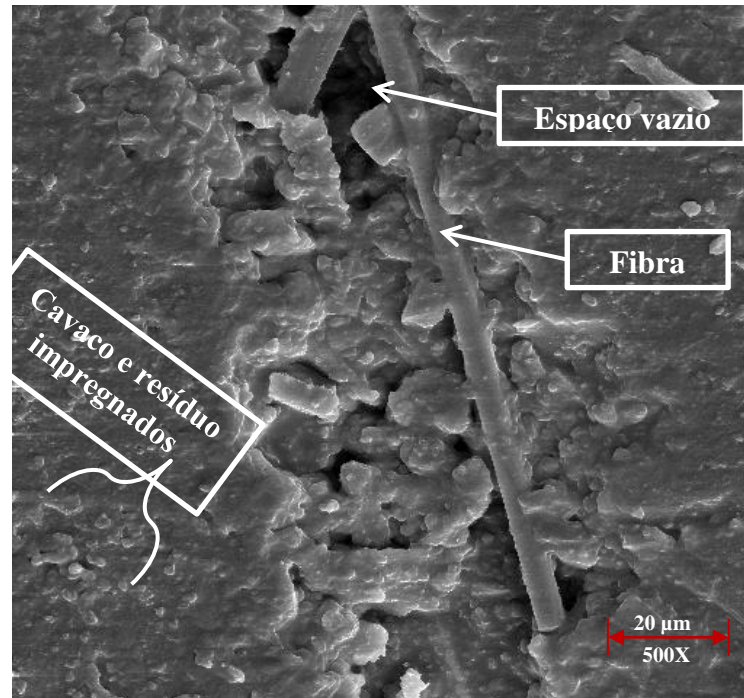


Figura 5.21 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com MQL e h_{eq3} (ampliação de 500 vezes)

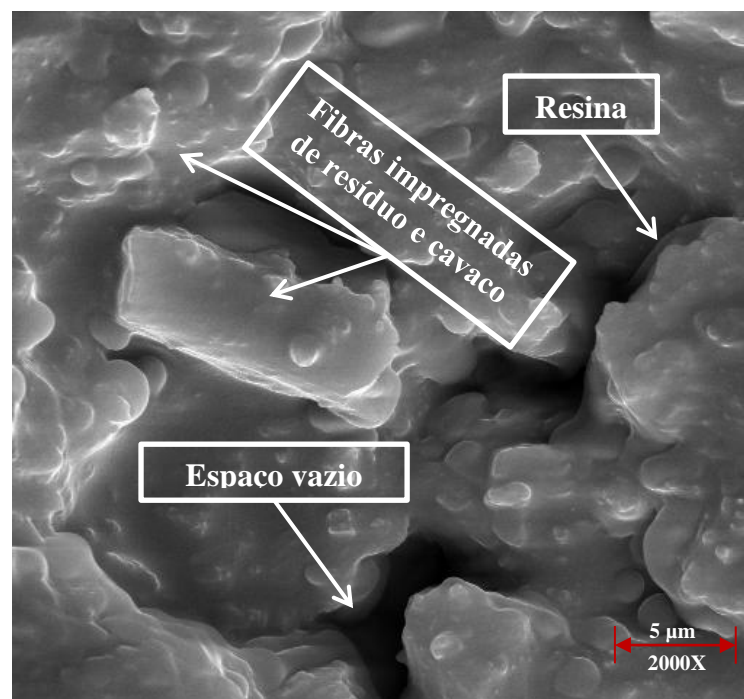


Figura 5.22 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio com MQL e h_{eq3} (ampliação de 2.000 vezes)

As Figuras 5.23, 5.24, 5.25, 5.26, 5.27, 5.28 nos apresenta as imagens obtidas das superfícies retificadas a seco.

Observando a Figura 5.23, nota-se que a superfície tem um aspecto de amassado, além de não ser possível notar a direção das fibras, e a presença de inúmeros defeitos na superfície do material. Nota-se também que a superfície passou por uma degradação térmica, fazendo com que haja a adesão de resíduo e cavacos na superfície da peça.

A ampliação (Figura 5.24) nos mostra como a superfície do material foi degradada mesmo sendo com o menor valor de h_{eq} . Nota-se que já uma grande quantidade de vazios, assim como também vários fragmentos de matriz e fibras. É possível perceber que a superfície passou por uma degradação térmica durante o processo. Com isso sofreu a adesão de resíduo e cavacos de novo na superfície do material diminuindo sua qualidade superficial.

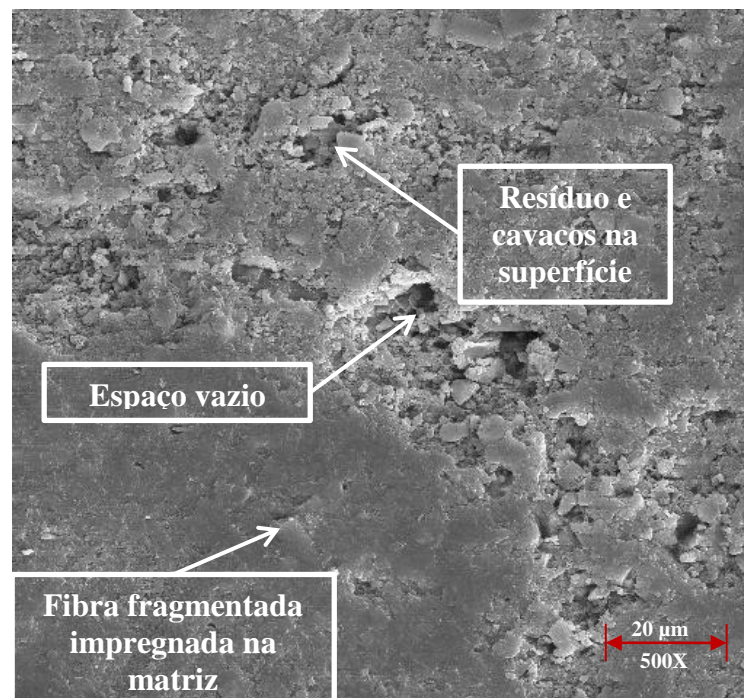


Figura 5.23 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio sem lubrificação e h_{eq1} (ampliação de 500 vezes)

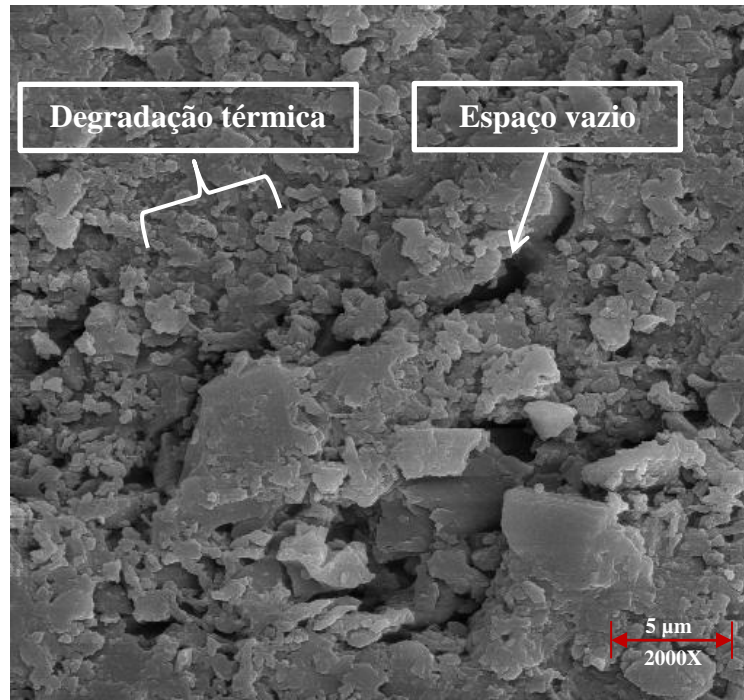


Figura 5.24 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio sem lubrificação e h_{eq1} (ampliação de 2.000 vezes)

Na Figura 5.25 nota-se que uma quebra irregular das fibras ocasionando em vários vazios devido à remoção das mesmas. Porém como não há lubrificação nota-se que há pedaços de fibras e matriz de todos os tamanhos que vão se alojando nos vazios vazios criados pela retificação. Algum desses cavacos e resíduos acabam se realocando na matriz, isso por causa da temperatura.

A Figura 5.26 nos mostra a ampliação e evidencia o que foi dito anteriormente. A superfície do material é composta por fibras quebradas e pedaços de matriz, esses pedaços que deveriam ter sido removidos com o lubrificante tentam se alojar nos vazios criados pela remoção das fibras. Nota-se uma desordenação das fibras e um entupimento dos espaços vazios criados durante a retificação

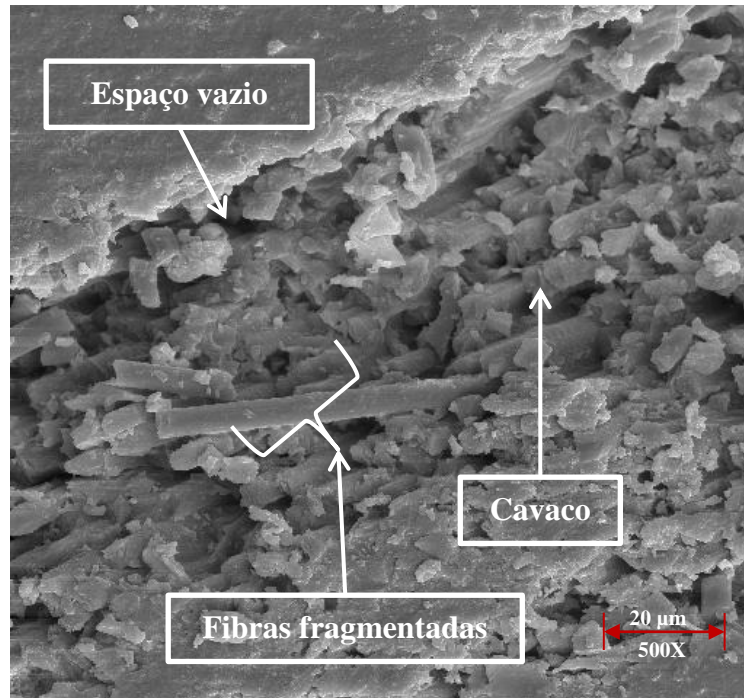


Figura 5.25 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio sem lubrificação e h_{eq2} (ampliação de 500 vezes)

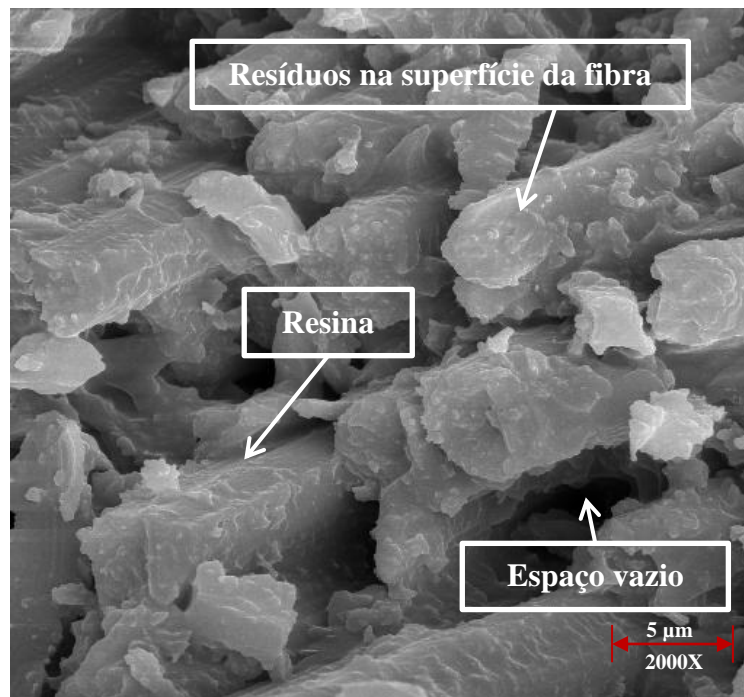


Figura 5.26 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio sem lubrificação e h_{eq2} (ampliação de 2.000 vezes)

Analisando a Figura 5.27 nota-se uma quebra das fibras de forma irregular além de resíduo sobre a superfície do material. A remoção do material foi feita de forma bastante irregular, pois pode-se perceber camadas diferentes de fibras. Observa-se que a remoção dos cavacos foi de forma ineficiente, pois há muitos pedaços pequenos desses na superfície do

material. Observa-se que há muita matriz e fibras fragmentadas de volta na superfície do material devido a temperatura do processo.

A ampliação (Figura 5.28) mostra a fragmentação irregular das fibras além de que o material sofreu uma degradação térmica. Nota-se também uma grande variação de tamanho quanto aos pedaços de fibras e matriz junto à superfície. Grandes partes desses pedaços acomodam-se junto aos vazios feitos durante o processo de retificação do material.

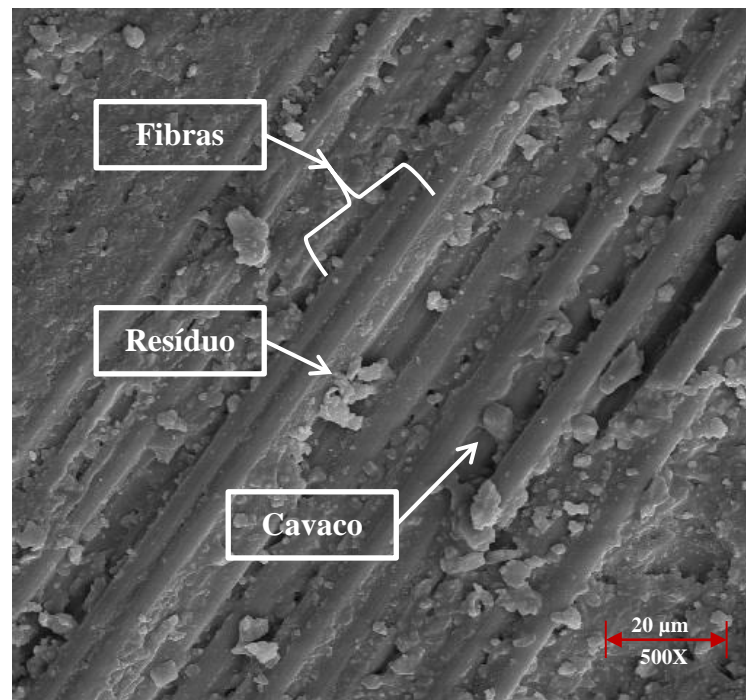


Figura 5.27 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio sem lubrificação e h_{eq3} (ampliação de 500 vezes)

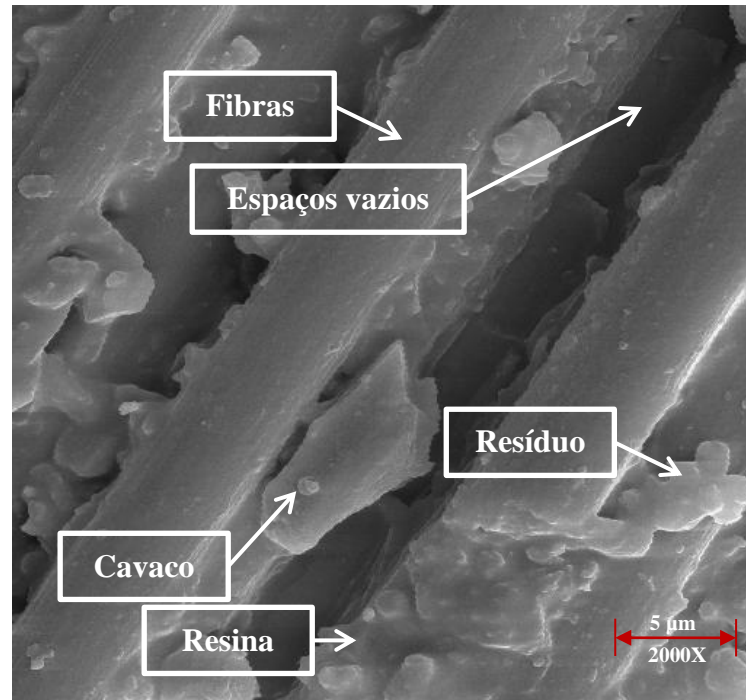


Figura 5.28 - Microscopia de um corpo de prova submetido a ensaio sem lubrificação e h_{eq3} (ampliação de 2.000 vezes)

6. CONCLUSÃO

Analisando os dados obtidos nos ensaios realizados com o compósito de resina epóxi reforçados com fibra de carbono, pode-se observar o comportamento da retificação tangencial plana utilizando-se rebolo de carbetto de silício com ligante vitrificado, quando da aplicação da lubri-refrigeração convencional, técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL), retificação a seco e da aplicação otimizada.

- Os melhores resultados de rugosidade foram obtidos com as técnicas de retificação com lubrificação convencional e otimizada. Esses valores foram em média 69,2% e 61,8% menores que os resultados do MQL e da retificação a seco, respectivamente.
- As menores forças de corte e energias específicas de corte foram obtidas pelos métodos de lubrificação MQL e a seco, isso se deve às condições severas de usinagem aos quais esses são submetidos, com isso há pouca auto afiação dos grãos abrasivos e uma maior degradação do rebolo. Consequentemente os menores valores de G foram obtidos para esses tipos de métodos. Enquanto que quando lubrificados pelos sistemas convencional e otimizado foram obtidos maiores forças de corte e energia específica, pois há maior auto afiação dos grãos abrasivos e uma menor degradação do rebolo fazendo com que tenha maiores valores de relação G.
- As técnicas otimizada e convencional demonstraram ser fundamentais para se obter peças mais precisas comparada às outras técnicas utilizadas, sendo desta forma uma opção de obter peças com maior qualidade sem fazer mudanças de rebolos, fluidos de corte, condições de dressagem e corte.
- As técnicas otimizada e convencional demonstraram serem as melhores alternativas para a retificação desse tipo de compósitos, pois, além de melhor acabamento no material ainda gerou-se um melhor ambiente de trabalho visto que no MQL gerou-se uma cortina de névoa (fluido + cavaco) e na retificação a seco uma cortina de pó. Isso é um importante fator, pois esse material pode causar danos a equipamentos elétricos e assim como a saúde dos funcionários devido ao tamanho da partícula gerada durante essa operação.
- Os resultados para a refrigeração convencional e otimizada foram similares e considerando ainda que a vazão da otimizada pode ser até 1/8 da convencional,

portanto a refrigeração otimizada é uma boa alternativa tecnológica de redução de fluido de corte.

- Analisando as imagens obtidas com a microscopia eletrônica de varredura (MEV), pode-se perceber que durante a retificação o compósito com o aumento da profundidade de corte, e assim aumento da espessura equivalente de corte, ocorre uma maior degradação da matriz epóxi assim como das fibras de carbono. Além de mostrar que durante as técnicas de MQL e retificação a seco há uma degradação térmica da matriz do material. E essa degradação térmica foi um agravante na qualidade superficial obtida, pois, junto com ela eram aderidos cavacos e resíduos na superfície do material.

Enfim, pode-se afirmar dentro dos objetivos previstos, que este trabalho apresenta importantes contribuições no sentido de entender e compreender os efeitos das diferentes formas de aplicação e fluido de corte, da utilização de rebolos de carbeto de silício para a retificação de compósitos reforçados com fibra de carbono.

Com os resultados apresentados, o meio científico e industrial será favorecido usando os resultados obtidos de forma a utilizarem estas quatro possibilidades de lubri-refrigeração dependendo dos parâmetros de qualidade necessários aos componentes a serem fabricados.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com intuito de aprimoramento do tema discutido nesse trabalho e para que haja uma continuidade nas pesquisas desse tipo de material faz-se necessário as seguintes sugestões para a retificação de compósitos assim como os métodos de aplicação de fluido de corte:

- Verificar o comportamento da retificação de plásticos reforçados com fibra de carbono para menores espessuras equivalentes de corte, afim de se atingir um valor mínimo de rugosidade;
- Analisar o sinal obtido ao longo do tempo a fim de identificar com maior precisão quando ocorre o empastamento do rebolo;
- Variar a velocidade de corte e da mesa, para diferentes tipos de rebolo, para um maior conhecimento do processo;
- Variar diversos tipos de pressões, maiores e menores, na lubrificação otimizada a fim de maximizar seu uso;
- Analisar a influência no MQL para maiores vazões e diferentes velocidades de ar comprimido;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, M. C. S. ; BIANCHI, E. C. ; AGUIAR, P. R. . **Grinding of hardened steels using optimized cooling.** Ingeniare. Revista Chilena de Ingenieria, v. 16, p. 195-202, 2008.
- ALVES, S. M., OLIVEIRA, J. F. G. **Development of new cutting fluid for grinding process adjusting mechanical performance and environmental impact.** Journal Of Materials Processing Technology, USA, p. 185-189. 2006.
- ANSI B74.13-1977. **Markings for Identifying Grinding Wheels and Other Bonded Abrasives.** New York: American National Standards Institute, 1977.
- BARROS, J. A. O.. **Materiais compósitos no reforço de estruturas.** In: Jornadas De Engenharia Civil 2004, Minho. Proceedings... . Minho: Finalistas do Curso de Engenharia Civil da Universidade do Minho, 2004.
- BIANCHI, E. C. **O comportamento da vida de rebolos na retificação: Sua importância em máquinas CN/CNC.** In: X Seminário de comando numérico no Brasil, 1990, São Paulo. São Paulo, 1990. p. 23.
- BIANCHI, E. C. **Grinding of brittle and ductile steels: how to act on the grinding parameters in order to get the best results?.** Abrasives Magazine, v. 1, p. 22-27, 1999.
- CALLISTER, W. D.. **Materials Science and Engineering: An Introduction.** 8. ed. Nova York: Ed. John Wiley & Sons. Inc, 2010.
- CAMPBELL, J. D. **Optimized Coolant Application.** In: 1st International Machining and Grinding Conference, Technical Paper, MR95-211, Society of Manufacturing Engineers, 12-14 September, Dearborn, Michigan, p. 895-904, 1995.
- CARPINETTI, L. C. R. **“Planejamento e análise de experimentos.”** EESC -USP, São Carlos - SP, p.205, 2000.
- CARVALHO, R. M. de; KUBOTA, L. T.; ROHWEDDER, J. J.. **Fibras de carbono: aplicações em eletroanalítica como material eletródico.** Química Nova, São Paulo, v. 22, n. 4, 1999.
- CATAI, R. E., BIANCHI, E. C., AGUIAR, P. R., ALVES, M. C. S., Sousa, R. M. **Effect of cutting fluid type on tangencial cutting force, surface roughness and diametric wear when grinding VC131 steel.** Industrial Diamond Review. , v.1, p.04 - 08, 2008

- CATAI, R. E., BIANCHI, E. C., AGUIAR, P. R., ALVES, M. C. S. **Influence of grinding on the roundness, residual stresses and microstructure of VC131 steel analyzed by varying the type of cutting fluid.** Industrial Diamond Review. , v.1, p.43 - 48, 2008.
- CHEN, X.; ROWE, W.B.; MILLS, B.; ALLANSON, D.R. Analysis and simulation of the grinding process. Part IV: effects of wheel wear. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 38, n. 1-2, p. 41-49, 1998.
- COPPINI, N. L. ; FERREIRA, J. R. . **Custo de usinagem na seleção de ferramentas no torneamento de compósitos PRF.** Máquinas e Metais, São Paulo-SP, v. 375, p. 270-277, 1997.
- DESTRO, R. S., BIANCHI, E. C., OIKAWA, M. H., SOUSA, R. M., DAMASCENO, R. F., AGUIAR, P.R., ALVES, M. C. S.. **Analysis of the viability of the minimum quantity of lubricant (mql) technique in surface grinding of steel.** In: 20th International Congress of Mechanical Engineering, ABCM, 2009.
- DI ILIO, A., PAOLETTI, A., **A Comparison Between Conventional Abrasives and Superabrasives in Grinding of SiC-aluminum Composites**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, v.40, p. 173-184, 2000.
- DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais.** Artiliber Editora Ltda, Campinas, SP, Brasil, 4ª Edição, 2003.
- EBBRELL, S.; WOOLLEY, N. H.; TRIDIMAS, Y. D.; ALLANSON, D. R.; ROWE, W. B. **The effects of cutting fluid application methods on the grinding process.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, School of Engineering, Liverpool, Reino Unido, Vol. 40, p. 209-223, 1999.
- GIBSON, R. F.. **A review of recent research on mechanics of multifunctional composite materials and structures.** Composite Structures, Usa, n. , p.2793-2810, 2010.
- GRAF, W. **Cylindrical Grinding.** Copyright WST Winterthur Schleiftechnik AG, Schweiz, 2004.
- GUU, Y. H., HOCHENG, H., TAI, N. H., LIU, S. Y. **Effect of electrical discharge machining on the characteristics of carbon fiber reinforced carbon composites.** Journal Of Materials Science, Netherlands, p. 2037-2043. 23/04/2001 .
- HASSUI, A.; DINIZ A. E. **Correlating surface roughness and vibration on plunge cylindrical grinding of steel.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, p. 855-862, 2003.
- HECKER, R. L.; LIANG S. Y. **Predictive modeling of surface roughness in grinding.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, p. 755-761, 2003.

- HEISEL, U.; LUTZ, M.; SPATH, D.; WASSMER, R.; WALTER, U. **A técnica da quantidade mínima de fluidos e sua aplicação nos processos de corte.** Revista Máquinas e Metais, Ano XXXIV, nº 385, p. 22-38, 1998.
- HU, N. S.; ZHANG, L. C.. **A study on the grindability of multidirectional carbon fibre-reinforced plastics.** Journal Of Materials Processing Technology, USA, p. 152-156. 2003.
- IRANI, R.A., BAUER, R.J., WARKENTIN, A., **A review of cutting fluid application in the grinding process,** International Journal of Machine Tools & Manufacture. v. 45, p. 1696-1705. 2005.
- JIA, J., CHEN, J., ZHOU, H., HU, L., CHEN, L. **Comparative investigation on the wear and transfer behaviors of carbon fiber reinforced polymer composites under dry sliding and water lubrication.** Composites Science and Technology, v. 65, p. 1139-1147, 2005.
- KIM, P. J.; LEE, D. G.; CHOI, J. K.. **Grinding Characteristics of Carbon Fiber Epoxy Composite Hollow Shafts.** Journal Of Composite Materials, S.i., p. 2016-2035. 2000.
- KLOCKE, F., EISENBLÄTTER, G. **Dry Cutting.** Annals of the CIRP, Vol. 46, No.2, p. 519-526, 1997.
- KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen. Bohren.** Band 1. 2º Ed. VDI-Verlag GmbH. Düsseldorf, 1980.
- KOPAC J., KRAJNIK P. **High-performance grinding - A Review.** Journal of Materials Processing Technology, Vol 175, p. 278-284, 2006.
- KOVACEVIC, R; MOHAN, R. 1995, **Effect of high speed grinding fluid on surface grinding performance.** SME Technical paper MR95-213, p. 919-931.
- KRAR, S. F. **Grinding Technology,** 2 ed, Delmar Publisher Inc., Albany, NY, 1995, 334p.,
- LUO, S. Y.; LIU, Y. C.; CHOU, C. C.; CHEN, T. C.. **Performance of powder filled resin-bonded diamond wheels in the vertical dry grinding of tungsten carbide.** Journal of Materials Processing Technology, USA, v. 118. p.329-336, 2001.
- MALISKA, A. M. **Microscopia Eletrônica de Varredura. Laboratório de Caracterização Microestrutural e Análise de Imagens.** Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.
- MALKIN, S. **“Grinding mechanisms e grinding temperatures and thermal damage, In: Grinding Technology: theory and applications of machining with abrasives.”** 1.ed. Chichester, Ellis Horwood Limited, Cap. 5 e 6, p.108-171, 1989.
- MALKIN, S. **Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives,** 1ª edição, Chichester, Ellis Horwood Limited, 1989.

- MARINESCU, I; ROWE, W.; DIMITROV, B.; INASAKI, I. **Tribology of abrasive machining process**, NY, Willian Andrew Publishing, 2004.
- MARINESCU, I. D.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E. W.; ROWE, B.; INASAKI, I. **Handbook of Machining with Grinding Wheels**. Wakefield: Taylor & Francis Group, 2007.
- MARTINS, F. R. **Uma Contribuição à Usinagem do Compósito Carbono Reforçado com Fibras de Carbono**. 125 f. Dissertação (Mestre) - Unicamp, Campinas, 2000.
- MONICI, R. D.; BIANCHI, E. C.; CATAI, R. E.; AGUIAR P. R. **Analysis of the different forms of application and types of cutting fluid used in plunge cylindrical grinding using conventional and superabrasive CBN grinding wheels**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 46, p. 122-131, 2005.
- NUSSBAUM, O. H. C. **Rebolos e Abrasivos - Tecnologia Básica**. Ícone Editora Ltda, 1988.
- PAPARGYRIS, D. A., DAY, R. J., NESBITTA, A., BAKAVOS, D.. **Comparison of the mechanical and physical properties of a carbon fibre epoxy composite manufactured by resin transfer moulding using conventional and microwave heating**. Composites Science And Technology, USA, Vol. 68, p.1854-1861, 01 jun. 2008.
- RAMESH K.; YEO S. H.; GOWRI S.; ZHOUL L.; **Experimental Evaluation of Super High Speed Grinding of Advanced Ceramics**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001.
- SHACKELFORD, J. F.. **Introduction to Materials Science for Engineers**. 7. ed. Usa: Prentice Hall, 2008.
- SHAW, M. C. **Principles of abrasives processing**. Oxford Science on Advanced Manufacturing, New York, USA, 574 p, 1996.
- SILVA, L. R., BIANCHI, E. C., FUSSE, R. Y., CATAI, R. E., FRANÇA, T. V., AGUIAR, P. R. **Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant—MQL in grinding**. International Journal Of Machine Tools & Manufacture, USA, 2006.
- SOUTIS, C. **Carbon fiber reinforced plastics in aircraft construction**. Materials Science And Engineering, USA, n. 412, p.171-176, 2005.
- SOUZA, A. G. O. **Monitoramento da dressagem no processo de retificação**. 2009. 70 p. Dissertação (Mestre) - Unesp, Bauru, 2009.
- RAMBO, C. R. **Materiais avançados inspirados na natureza: Estruturas celulares, fibras e compósitos**. Exacta, São Paulo, p.95-103, jun. 2006
- ROWE, W. B.; MORGAN, M. N., **The effect of deformation on the contact area in grinding**. In: Annals of the CIRP, 1993.

- TAWAKOLI, T., WESTKÄMPER, E., RABIEY, M., RASIFARD, A. **Influence of the type of coolant lubricant in grinding with CBN tools.** International Journal of Machine Tools & Manufacture 47, 2007.
- TÖNSHOFF, H. K., FRIEMUTH, T., BECKER, J. C. **Process monitoring in grinding.** In: Annals of the CIRP, vol. 51, nº 2, 2002.
- United State Of America. Department Of Defense. **Composite Materials Handbook: Polymer Matrix Composites Materials Usage, Design, And Analysis.** Philadelphia: Distribution Statement, 2002.
- WANG, D. H., RAMULU, M. e AROLA, D. **Orthogonal Cutting Mechanism of Graphite/Epoxy Composite.** Int. Journal Machine Tools Manufact, p. 1623-1638, 1995.
- WEINGAERTNER, W. L., TABORGA, A. R. M., TABORGA, J. D. M. **Análise dos danos térmicos na retificação.** In: XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, ABM, vol. 14, 2001.
- WEN, J., XIA, Z., CHOY, F. **Damage detection of carbon fiber reinforced polymer composites via electrical resistance measurement.** Composites: Part B, New Orleans, p.01-10, 06 ago. 2010.
- WEBSTER, J. A. **Selection of coolant type and application technique in grinding.** Supergrind, University of Connecticut, USA, p. 205-220, 1995.
- WEBSTER J. A., CUI C. **Flow rate and jet velocity determination for design of a grinding cooling system.** Presented at 1st International Machining and Grinding Conference, Dearborn, p.12-14, MI, 1995.
- WIEBECK H., HARADA J. **Plásticos de Engenharia: Tecnologia e Aplicações.** São Paulo: Ed Artliber, 2005.
- WINTER-GRUPO SAINT GOBAIN. **Retificação. Apostila de treinamento da Empresa Winter,** Jundiaí, SP, Brasil, 2004.
- YANG, C.; HUH, H; HAHN, T. H.. **Comparison of the mechanical and physical properties of a carbon fibre epoxy composite manufactured by resin transfer moulding using conventional and microwave heating.** Composites Science And Technology, Usa, n. , p.1854-1861, 01 jun. 2008.
- ZHONG, Z.W., **Grinding of Aluminum-Based Metal Matrix Composites Reinforced with Al₂O₃ or SiC Particles,** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 21 2003.