



## **OTIMIZAÇÃO DA RETIFICAÇÃO PLANA DE COMPÓSITOS PLÁSTICOS REFORÇADOS COM FIBRA DE CARBONO**

**Francisco Mateus Faria de Almeida Varasquim, mateus1985@uol.com.br<sup>1</sup>**

**Bruno Bastos Gonçalves, ra711446@feb.unesp.br<sup>2</sup>**

**Rubens Chinali Canarim, rubenscanarim@hotmail.com<sup>2</sup>**

**Paulo Roberto Aguiar, aguiarpr@feb.unesp.br<sup>3</sup>**

**Francisco Romeo Martins, franciscorm@iae.cta.br<sup>4</sup>**

**Manoel Cleber Sampaio Alves, manoel@itapeva.unesp.br<sup>5</sup>**

**Eduardo Carlos Bianchi, bianchi@feb.unesp.br<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Estadual Paulista - UNESP - *Campus* de Bauru. Faculdade de Ciências de Bauru, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, CxPostal 473, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Estadual Paulista - UNESP - *Campus* de Bauru. Faculdade de Engenharia de Bauru. Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, CxPostal 473, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil

<sup>3</sup>Universidade Estadual Paulista - UNESP - *Campus* de Bauru. Faculdade de Engenharia de Bauru. Departamento de Engenharia Elétrica, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, CxPostal 473, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil

<sup>4</sup>Centro Tecnológico da Aeronáutica - CTA. Avenida Brigadeiro Faria Lima, 1.941 - Parque Martim Cererê – CEP 12.227-000, São José dos Campos - SP - Brasil.

<sup>5</sup>Universidade Estadual Paulista - UNESP - *Campus* de Itapeva. Faculdade de Engenharia Industrial Madeireira. Rua Geraldo Alckmin, 519 18409-010 - Itapeva - SP, Brasil.

**Resumo:** *Os materiais compósitos estão se tornando essenciais e amplamente utilizados na indústria moderna, principalmente na indústria aeronáutica e aeroespacial. A razão para sua larga utilização é a composição de sua estrutura, que provém da junção de dois materiais diferentes, resultando numa matriz leve, altamente resistente e rígida. Devido à anisotropia o material tende a apresentar ao final do seu processamento, tensões residuais ou distorções estruturais. Assim, tem-se uma dificuldade no controle efetivo das tolerâncias de forma e posição da peça. Pesquisas recentes mostram que o processo de usinagem de acabamento denominado retificação é o mais recomendado para se eliminar estes problemas estruturais. Porém, ao se retificar estes materiais, há a necessidade da utilização de grande quantidade de fluido de corte (refrigeração abundante) e o desgaste da superfície de corte é elevado. A utilização destes fluidos em grandes quantidades tem se tornado um problema para a indústria mecânica atual, devido à preocupação mundial ao que diz respeito à preservação do meio ambiente e saúde dos trabalhadores, por se tratar de substâncias tóxicas. Referente a essas preocupações, surge uma metodologia denominada como refrigeração otimizada, uma técnica que procura reduzir substancialmente a quantidade de fluido de corte utilizada no processo de retificação e melhora seu desempenho em comparação ao processo convencional de aplicação de fluidos. Assim, este trabalho pretende analisar o comportamento da retificação de compósitos plásticos reforçados com fibras de carbono juntamente com a técnica de refrigeração otimizada, como alternativa a retificação abundante, visando à minimização da utilização dos fluidos de corte no meio industrial. Essa análise será feita através da avaliação das variáveis de saída do processo de retificação plana como o comportamento de força tangencial de corte, rugosidade, emissão acústica, energia específica, relação G e microscopia eletrônica de varredura. Com os resultados obtidos pretende-se avaliar o processo, visando inseri-lo no contexto da indústria atual, além de contribuir para a literatura sobre materiais compósitos, a qual é muito escassa.*

**Palavras-chave:** *Materiais compósitos, retificação, fluido de corte, refrigeração otimizada, fibras de carbono.*

### **1. INTRODUÇÃO**

Segundo Lee *et. al.* (2000), nas últimas décadas tem sido observado um relevante crescimento na aplicação dos materiais compósitos em geral, em substituição aos materiais convencionais, como por exemplo, os metais, plásticos, etc.. As razões da sua crescente utilização estão ligadas às suas propriedades, tais como o seu baixo peso, a sua elevada resistência e a sua rigidez.

Entre as desvantagens na sua utilização pode-se citar o seu elevado custo de produção e a necessidade de proteção específica dos trabalhadores, além dos potenciais custos associados à sua reciclagem.

Conforme Kim *et. al.* (2000), embora o desenvolvimento destes materiais tenha sido efetuado pelas indústrias de defesa e aeroespacial, observa-se recentemente a extensão do uso dos mesmos em outras áreas. A retificação de materiais compósitos é complexa devido à sua heterogeneidade, registrando-se diferentes comportamentos do mesmo material devido à distribuição e orientação das fibras, sensibilidade ao calor e ao fato de os reforços serem extremamente abrasivos. Os métodos mais tradicionais de usinagem, embora possam ser utilizados, devem ser adaptados de forma a reduzir a geração de danos por meios térmicos ou mecânicos.

Não é possível obter um acabamento comparável ao das peças metálicas devido a não homogeneidade e anisotropia própria dos compósitos. Por outro lado, a operação de usinagem, em geral, pode causar diversos defeitos nas peças, tais como delaminação, fissuras intralaminares, descolamento fibra/matriz e danos térmicos. Estes defeitos provocam uma deterioração das propriedades mecânicas das peças, podendo mesmo afetar a sua confiabilidade. Sua utilização em componentes considerados críticos, do ponto de vista da segurança das estruturas, tem sido feita com cautela, devido à falta de informações técnicas sobre a retificação do mesmo. Outro aspecto que deve também ser levado em conta é o desgaste das ferramentas utilizadas, que contribui também para a extensão dos defeitos encontrados nas peças.

Segundo Zhong (2003), os materiais compósitos plásticos reforçados com fibra de carbono vêm sendo largamente utilizados na indústria atual, pois possuem excelentes propriedades físicas e mecânicas. No seu uso como um elemento importante, geralmente é necessário usinar este componente para se atingir precisão dimensional e geométrica, como furos para juntas e extremidades para encaixe com outras peças. De acordo com Tso & Chang (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 o único processo viável para a melhoria da rugosidade superficial deste componente

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. Segundo Kovacevic & Mohan (1995), 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.

A não utilização desses fluidos poderá ocasionar a queda de rendimento do rebolo devido ao aumento da temperatura no processo, provocando a perda de qualidade geométrica, dimensional e acabamento superficial das peças, além do entupimento das porosidades do rebolo. Por outro lado, exigências referentes ao impacto ambiental no descarte desses fluidos possibilitaram que novas formas de aplicação fossem desenvolvidas de forma a otimizar a lubri-refrigeração com a diminuição do volume de fluido gasto durante o processo. Uma técnica que vem sendo empregada para diminuir este impacto é a de refrigeração otimizada (que possibilita a quebra da barreira aerodinâmica da periferia do rebolo), que consiste da utilização de uma quantidade menor de fluido de corte aplicada com elevada velocidade na interface entre o rebolo e a peça. Assim, de acordo com Monici *et. al.* (2005), a barreira aerodinâmica é quebrada e o fluido penetra nesta região, minimizando a geração de calor

Assim, este trabalho tem como objetivo aplicar esta técnica de refrigeração otimizada na retificação de compósitos plásticos reforçados com fibras de carbono, procurando analisar a sua viabilidade e introduzi-la nos processos de fabricação modernos. Além disso, tem-se como objetivo uma contribuição à leitura e à revisão bibliográfica sobre materiais compósitos, a qual é muito escassa.

## 1.1. Materiais Compósitos

De acordo com Martins (1999), 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.

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).

## 1.2. Retificação de Compósitos

De acordo com Zhong & Hung (2000), os compósitos, os quais vêm despertando recente interesse por pesquisas relacionadas à sua usinagem são conhecidos como materiais avançados por sua alta força específica, alta resistência ao desgaste e notável leveza. Métodos para produzir estes compósitos e estudos sobre suas propriedades mecânicas

ganham popularidade nos últimos anos. Estes materiais são utilizados principalmente nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, naval, militar e automobilística.

Segundo Takeshita & Wehara (1985), atualmente, com a frequência do uso e aplicação de materiais compósitos (PRFC e CRFC) e analisando seu processo de obtenção, verifica-se a necessidade de aplicação de processos de manufatura e operações de usinagem, visto que as configurações de peças nem sempre são possíveis de serem obtidas pelos processos convencionais para atender as especificações dos produtos.

De acordo com Martins (1999) e Ferreira *et. al.* (1997), 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. Conforme Di Ilio & Paoletti (1999), na retificação houve melhores resultados com a utilização de rebolos constituídos por grãos abrasivos convencionais.

### 1.3. Espessura Equivalente de Corte ( $h_{eq}$ )

Segundo Peters & Decneut (1975) *apud* Oliveira (1988), a espessura da camada de material removida pelo rebole numa volta completa denomina-se de espessura equivalente de corte  $h_{eq}$ , e é um parâmetro que permite quantificar uma condição de trabalho, sendo ainda definido como a relação entre a taxa de remoção específica do material  $Q_w'$  e a velocidade de corte. Desta forma, de acordo com Graf (2004), a espessura equivalente de corte para o processo de retificação cilíndrica externa pode ser representada pela Eq. (1).

$$h_{eq} = \frac{Q_w'}{V_s} = \frac{a \cdot V_w}{V_s} \quad (1)$$

Sendo  $Q_w'$  a taxa de remoção específica de material, que é dada pelo produto entre a penetração do rebole na peça ( $a$ ) em milímetros (mm) e a velocidade de peça ( $V_w$ ), e  $V_s$  a velocidade de corte do rebole, ambas as velocidades são medidas em metros por segundo.

Segundo Malkin (1989), a espessura equivalente de corte está diretamente relacionada com o comportamento do processo de retificação em função das variáveis envolvidas como: forças de corte, rugosidade, vida da ferramenta etc. Diniz *et. al.* (2000) afirma que um aumento do  $h_{eq}$  reflete no respectivo aumento das forças de corte, rugosidade e diminuição da vida do rebole. Deste modo, busca-se sempre utilizar rebolos cujas ligas suportem elevadas rotações de trabalho a fim de se melhorar a rugosidade, aumentar a vida útil da ferramenta e diminuir os esforços de corte.

### 1.4. A Técnica da Refrigeração Otimizada

A técnica da lubri-refrigeração otimizada consiste na utilização de um bocal otimizado, diferente dos bocais convencionais, e de outros acoplamentos a fim de proporcionar uma nova forma de aplicação de fluido de corte na região de interface entre peça e ferramenta.

Segundo Campbell (1995) existem alguns fatores que afetam diretamente a eficiência da aplicação do fluido de corte, incluindo-se o tipo e a velocidade do fluido utilizado, o posicionamento do bocal, o ângulo de abertura do bocal, o projeto do bocal, a utilização de um dispositivo para quebrar a barreira de ar envolta do rebole e o tamanho dos grãos abrasivos do rebole.

De acordo com Guo & Malkin (1992), a aplicação de fluidos de corte é pouco eficiente nos métodos convencionais, especialmente sob condições de aplicação severas, já que a energia armazenada durante a sua aplicação não é suficiente para vencer a força centrífuga do rebole ou penetrar na barreira de ar que o circunda o mesmo em movimento.

Segundo Webster (1995) a otimização do processo de retificação implica não só na adoção do tipo mais efetivo de fluido de corte e sua mais adequada forma de aplicação.

A qualidade da peça e o custo estão intimamente relacionados com a forma de aplicação do fluido de corte na região de interface rebole-peça. Um jato de fluido incidindo de forma direta sobre a região de corte é capaz de reduzir de forma significativa a temperatura nessa região, porém altas velocidades do jato de fluido são necessárias para a penetração do fluido de maneira efetiva, na região de corte. Também deve ser levada em consideração a abertura geométrica do bocal 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). O bocal deve ser projetado de forma a causar a menor ocorrência de turbulência possível durante a saída do fluido.

Segundo pesquisas realizadas por Webster (1995), velocidade com que o fluido penetra na região de corte deve compreender determinado valor, minimizando 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 rebole. 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 fluido durante a remoção de material.

Os bocais devem ser projetados de forma a ocasionarem a menor ocorrência possível de turbulência durante a saída do fluido. Muita importância é atribuída ao raio de contração, que expressa a razão entre os diâmetros de entrada e saída do bocal, onde tal razão apresenta de maneira significativa a possibilidade da ocorrência de turbulência no bocal. A FIGURA 1 ilustra o como deve ser o projeto do bocal da técnica de refrigeração otimizada.

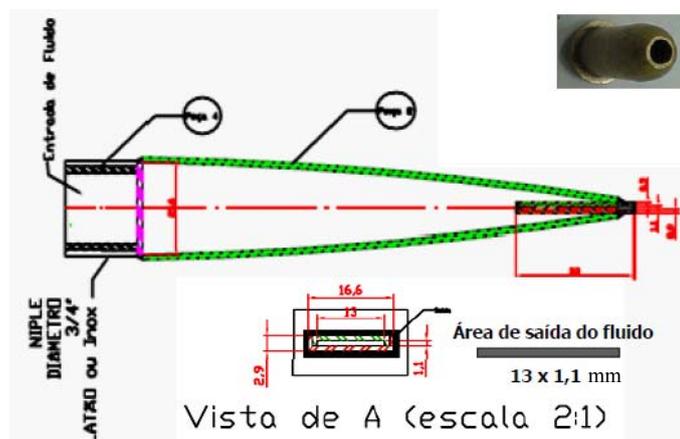


Figura 1. Projeto do bocal da refrigeração otimizada.

Irani et. al. (2005) listou alguns tópicos sobre o melhor design de construção do bocal:

- O acabamento da superfície do bocal deve ser liso e côncavo.
- O bocal deve ter bordas afiadas na saída.
- O bocal deve ter uma elevada relação de contração, da entrada à saída.
- Quinas e mudanças bruscas no diâmetro do bocal devem ser evitadas.
- A performance não é muito sensível ao ângulo do bocal, contanto que o jato seja direcionado à região de corte.
- Pode-se não haver necessidade de um bocal perfilado desde que haja um grande bocal redondo eficiente ou vários bocais redondos eficientes pequenos. Se um bocal retangular precisar ser usado, uma razão de aspecto de 5 para 8 é recomendada.
- Uma tubulação reta colocada entre o condicionador de fluxo e a saída do bocal é necessária para provocar uma condição de velocidade e fluxo uniforme.
- Quanto mais baixo o número de Reynolds, mais eficiente é o jato.
- Rebolos de alta porosidade apresentam uma maior taxa de remoção de material quando usados fluídos à base de água em relação aos óleos integrais. Entretanto, quando se usa rebolos densos, o contrário é verificado.

### 1.5. Rugosidade das peças retificadas

De acordo com Ali & Zhang (1999), a retificação é um processo de acabamento, e a rugosidade da superfície é um dos fatores mais importantes para se obter um componente com qualidade. No entanto, não há um modelo de compreensão do comportamento dessa variável. A dificuldade em se prever tal parâmetro vem do fato de este ser influenciado por muitas variáveis do processo, como as propriedades do material da peça, a composição do rebolo, as condições de dressagem, os parâmetros de operação, a forma de aplicação e o tipo do fluido de corte, vibrações da máquina, entre outros tantos.

Conforme Hecker & Liang (2003), a qualidade da superfície gerada no processo de retificação é capaz de avaliar características da peça e da operação, tais como mínimas tolerâncias, eficácia do método de lubrificação, condições da ferramenta, transmissão de calor e vibração da máquina. Uma superfície típica do processo de retificação é isenta de sinais de corte e ranhuras. No entanto, vários micro-defeitos podem ser constatados fazendo-se uma análise minuciosa da superfície do material usinado. Os principais defeitos verificados são trincas ocasionadas por bruscas variações térmicas e crateras provocadas pelas fraturas dos grãos abrasivos.

Hecker & Liang (2003) ainda afirmam que um método eficiente de se mensurar a qualidade da superfície produzida é por meio da rugosidade. Então, as rugosidades podem ser definidas como micro-irregularidades geométricas decorrentes do processo de fabricação. A medição é feita em função da distância entre os picos e vales existentes na superfície produzida. Assim, pode-se obter a rugosidade pela média dos valores dessa distância (rugosidade  $R_a$ ), pelo valor quadrático médio dessa distância (rugosidade  $R_q$ ) ou ainda pelo valor máximo da mesma (rugosidade  $R_t$ ). Os índices de rugosidade medidos longitudinalmente em relação à direção de corte, apresentam valores mais baixos do que os medidos transversalmente. No entanto, na indústria aplica-se preferencialmente o método de medição transversal. Em vista disso, neste projeto também será aplicada a medição transversal.

Ali & Zhang (1999) afirmam que a qualidade superficial é diretamente dependente da profundidade de corte empregada e da dureza do material que está sendo usinado. Assim, para um mesmo tipo de material, espera-se que maiores profundidades de corte gerem superfícies com valores de rugosidade também maiores.

Segundo Malkin (1989), o comportamento da rugosidade em função do tempo de retificação está diretamente relacionado com o crescimento da área plana do topo dos grãos abrasivos, que provoca sulcos mais largos nas peças. Além disso, o aumento da área de contato do topo do grão provoca uma elevação da temperatura local, fazendo com que o material da peça se torne mais mole, aderindo-se mais facilmente aos poros do rebolo. Este material aglutinado à ferramenta gera vários riscos na peça, prejudicando o acabamento superficial e aumentando os valores de rugosidade

Neste trabalho utilizar-se-á a rugosidade média ( $R_a$ ), expressa em  $\mu\text{m}$ , que segundo Hecker & Liang (2003) pode ser matematicamente definida de acordo com a Eq. (2).

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y - y_{CL}| . dl \quad (2)$$

Em que 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, todas as variáveis em  $\mu\text{m}$ .

## 1.6. Emissão Acústica

De acordo com Kim *et al.* (2001), a retificação é um processo de precisão muito utilizado quando se busca qualidade dimensional e superficial em uma peça. No entanto, este é um processo complexo que pode ser afetado por muitas variáveis, como as condições de dressagem, o rebolo, as características da máquina, entre outras. Com o desenvolvimento da tecnologia de sensores, e o avanço do conhecimento sobre inteligência artificial novos métodos de monitoramento foram criados, utilizando diversas fontes de sinais, como a força de retificação, vibrações, emissões ultra-sônicas, emissões acústicas. Dentre as formas de sinais utilizados, a emissão acústica se destaca diante as outras formas por apresentar uma particularidade: sua faixa de frequência está bem além de vibrações mecânicas e ruídos elétricos, o que permite que estas interferências sejam facilmente filtradas do processo.

Durante a deformação plástica de um sólido, uma porção da energia de deformação é armazenada em um campo residual de tensão de discordâncias, sendo o restante desta energia responsável pelo aumento da energia térmica. O deslocamento transversal de discordâncias através da estrutura cristalina do material agrega-se ao movimento de vibração dos átomos. Como resultado, uma pequena porção de energia, cerca de um décimo da energia total do processo, é direcionada à ampliação do número de discordâncias e de outros defeitos da estrutura cristalina. Estas discordâncias possibilitam a existência de deslocamentos a um nível de tensão abaixo da tensão de cisalhamento. Esta movimentação de discordâncias durante a fase de deformação plástica é responsável pela geração de ondas de emissão acústica, e pode ser detectada por sensores que a transformam em sinais elétricos.

Ainda segundo Kim *et al.* (2001), a técnica de emissão acústica tem sido utilizada com diferentes objetivos de detecção, como desgaste, colisão e queima do rebolo, verificação das condições de dressagem, queimas superficiais na peça, entre outros. No entanto, a desvantagem do sinal de emissão acústica refere-se à sua variação de sensibilidade, a qual varia de acordo com o posicionamento do sensor. Assim, para que se obtenha boa sensibilidade e menores interferências, o sensor deve ser posicionado o mais próximo possível da zona de retificação.

As elevadas faixas de frequência do sinal de emissão acústica são desvantajosas no que diz respeito ao armazenamento das informações, necessitando de placas analógico-digital com frequências de amostragem 1000 vezes maior, além de computadores com maiores capacidades de memória. Para evitar este inconveniente, sugere-se que se faça uso da faixa de baixa frequência contida na ampla banda de frequência do sinal bruto de emissão acústica. Isto é conseguido retificando-se o sinal bruto em intervalos de tempo determinados, aplicando-se a chamada voltagem RMS (*root means square*), reduzindo, desta forma, a frequência do sinal de saída. O sinal RMS da emissão acústica é definido como o valor quadrático médio do sinal de entrada.

Conforme Susic & Grabec (2000), a técnica de emissão acústica pode ser empregada para vários propósitos, pelo fato de captar informações referentes a micro-fenômenos, como desgaste, queima e colisão da ferramenta, monitoramento e diagnóstico do desempenho da máquina e do processo de dressagem, controle relativo à afiação dos grãos abrasivos, monitoramento da peça, no que diz respeito à geometria, dimensões, qualidade superficial e tolerâncias. Possibilita ainda a verificação do processo em si, na formação de cavaco, temperatura e consumo de energia.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados na retificadora plana fabricada pela empresa *SULMECÂNICA*, modelo 1055E.

Os corpos de prova, que foram doados pelo Centro de Tecnologia da Aeronáutica (CTA), consistem de chapas de compósito plástico reforçado com fibra de carbono com 650mm de espessura, 100mm de altura e 5mm de espessura.

O rebolo utilizado foi um rebolo convencional de carbetto de silício com 355mm de diâmetro externo, 127mm de diâmetro interno e 25mm de altura. O ligante é do tipo vitrificado e a especificação do rebolo é 39C 60 K VK. O mesmo foi fabricado e doado pelo Grupo Saint Gobain.

O fluido de corte utilizado foi uma emulsão de 2,5 % em água do óleo solúvel semi-sintético, ME-1, concentrado, da marca TAPMATIC. Neste fluido de corte já há, na sua composição, anticorrosivos, biocidas, fungicidas, alcalinizantes, antiespumantes, tensocínicos não iônicos, alcanolomidas, entre outros.

O equipamento de lubrificação otimizada consiste na utilização do mesmo fluido usado na refrigeração convencional, mas com a utilização de uma bomba mais potente, um medidor de vazão, e um bocal de metal soldado projetado especialmente para este fim.

Para cada ensaio foi utilizado 1 corpo de prova, totalizando 9 ensaios para cada método de lubri-refrigeração. Foram utilizadas 3 espessuras equivalente de corte distintas para cada tipo de refrigeração.

Os valores de rugosidade apresentados são médias de 5 medições de rugosidade em posições diferentes, para cada um dos 9 ensaios realizados para cada condição de lubri-refrigeração. Para a análise também foram incluídos os seus respectivos desvios padrões. A captação da rugosidade superficial foi obtida através de um rugosímetro Surtronic 3+ da marca Taylor Hobson, que fez a medição direta do parâmetro  $R_a$ .

O sinal de emissão acústica (EA) foi monitorado em tempo real, pelo seu valor médio quadrático (RMS ou *Root Mean Square*), utilizando um aparelho da marca Sensis, modelo DM42. O sensor acústico foi acoplado à morça em que a peça a ser retificada estava apoiada, sendo esta morça fixa na mesa da máquina retificadora. Este sensor detecta as variações nas emissões acústicas, enviadas para o módulo de EA, o qual as transforma em tensões elétricas. O módulo envia o sinal destas tensões elétricas até a placa de aquisição de dados instalada no microcomputador de maneira direta, sem a necessidade de nenhum tipo de equacionamento. A regulagem final do aparelho de medição de emissão acústica foi: ganho de sinal - 5dB; ganho de entrada - 10dB; constante de tempo - 5ms. Com essa configuração, observou-se que o sinal não era saturado e que se obtinha a melhor resposta do sinal RMS de EA.

Para os ensaios foram estabelecidas as seguintes condições de usinagem: velocidade de corte ( $V_s$ ) de 30 m/s, velocidade da mesa ( $V_w$ ) de 0,08 m/s, a velocidade de saída do fluido na refrigeração otimizada de 26,3 m/s, vazão de saída do fluido de corte na refrigeração convencional (ou também denominada abundante) de 27,5 l/min e a vazão de saída do fluido de corte na refrigeração otimizada de 20,5 l/min.

As três profundidades de corte escolhidas foram: 100 $\mu$ m, 300 $\mu$ m e 600 $\mu$ m.

Desse modo, de acordo com a Eq. (1), as três espessuras equivalentes de corte, denominadas apenas por  $h_{eq1}$ ,  $h_{eq2}$  e  $h_{eq3}$  foram:  $h_{eq1}=0,267 \mu\text{m}$ ,  $h_{eq2}=0,8 \mu\text{m}$  e  $h_{eq3}=1,6 \mu\text{m}$ .

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

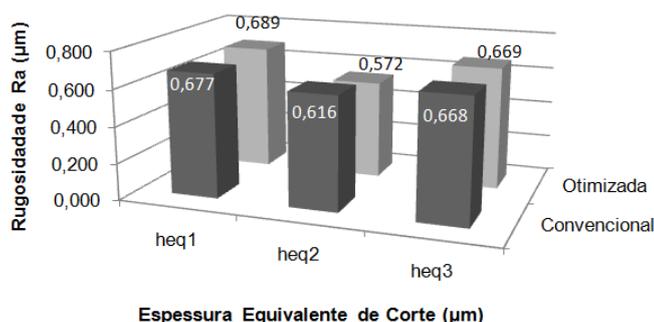
Nesta seção serão apresentados os resultados, para cada condição de retificação realizada, das variáveis de saída: rugosidade e emissão acústica.

Ressalta-se que para as variáveis analisadas, mediante a construção de figuras de barra, calcularam-se os valores médios reais nas repetições executadas.

#### 3.1. Rugosidade

Como os valores de  $V_w$  e  $V_s$  foram mantidos constantes, o aumento do  $h_{eq}$  foi realizado pela elevação da taxa de remoção de material, a qual produz um aumento da penetração do rebolo na peça. Assim, inicialmente, para a menor penetração do rebolo na peça, um número reduzido de grãos atuam para a remoção de material. Progressivamente, com a elevação dos valores de penetração do rebolo na peça, a taxa de remoção de material aumenta, na mesma proporção do número de grãos na região de contato. Assim, teoricamente, os cavacos deveriam ter geometrias substancialmente diferentes, o que deveria proporcionar valores significativamente distintos de rugosidade. No entanto, devido à facilidade na remoção do material, os cavacos arrancados em todos os ensaios eram gerados com geometrias extremamente pequenas (na forma de pó) e o fluido de corte, principalmente na refrigeração convencional, retirava estes pequenos cavacos, os quais eram levados para o reservatório da máquina. Devido à menor densidade, estes cavacos ficavam flutuando no reservatório; ou seja, não se diluíam no fluido.

A Figura (2) apresenta a média dos resultados (para cada ensaio, a rugosidade foi medida cinco vezes) obtida para a rugosidade média  $R_a$ , referentes à comparação entre as condições de lubri-refrigeração convencional e otimizada. Tais valores foram calculados através da Eq. (2).

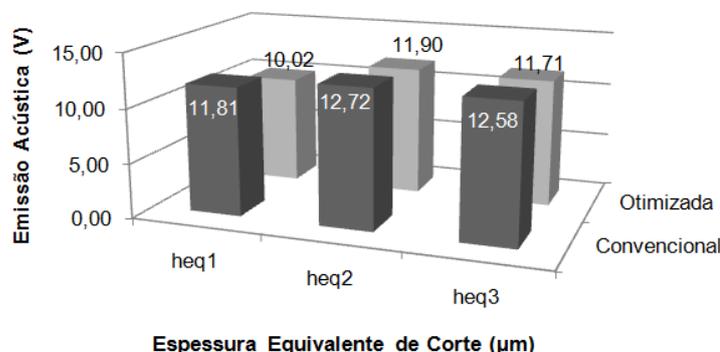


**Figura 2. Rugosidade para refrigeração convencional e otimizada.**

Analisando-se os resultados obtidos observa-se que os valores de rugosidade foram bastante próximos para a lubri-refrigeração convencional e otimizada e, dentre estes, os mais próximos foram os valores obtidos para  $h_{eq1}$  e  $h_{eq3}$ . No caso onde foi utilizado  $h_{eq2}$ , notou-se a maior diferença com relação aos anteriores. Percebe-se que para os dois tipos de refrigeração a melhor rugosidade ( $R_a$ ) foi obtida com o  $h_{eq2}$  e o pior valor de rugosidade para o  $h_{eq1}$ . Inicialmente, havia a expectativa de que a refrigeração otimizada iria proporcionar menores valores de rugosidade considerando que, por ser introduzida na região de corte e devido a elevada velocidade do jato de fluido, haveria uma melhor refrigeração se comparada a refrigeração convencional. No entanto, devido às características do material, pode-se notar que, em geral, isso não ocorreu devido à excelente usinabilidade do compósito; ou seja, a retificação deste material é de fácil realização não sendo influenciada pelo tipo de refrigeração utilizada. A única exceção ocorreu quando se utilizou  $h_{eq2}$ ; neste caso, a refrigeração foi cerca de 7,14% menor quando utilizou-se a refrigeração otimizada. Assim, a refrigeração otimizada, que utiliza menor vazão do que a refrigeração convencional proporcionou resultados muito próximos as da convencional e em um dos valores ensaiados ( $h_{eq2}$ ) menor valor de rugosidade devido a sua capacidade de penetrar na região de corte e efetivamente na refrigeração e lubrificação durante o corte.

### 3.2. EMISSÃO ACÚSTICA

A Figura (3) apresenta a média dos resultados obtidos de emissão acústica (EA) durante os ensaios.



**Figura 3. Emissão acústica para refrigeração convencional e otimizada.**

Os resultados obtidos de EA foram sempre menores quando foi utilizada refrigeração otimizada, justamente pela melhor penetração do fluido na região de corte.

Segundo estudos realizados por Junior (1996) onde se comparou sinais de EA e as forças de corte em processo de retificação interna, a emissão acústica durante os ensaios aumentava com as forças de corte, provando que os sinais de EA podem ser utilizados para monitoramento dos valores de forças obtidos ao longo do processo.

Assim, baseado nos resultados obtido por Junior (1996), pode-se inferir que no presente trabalho a redução dos valores de EA foram devidos a melhor capacidade de refrigeração pelo método otimizado que, efetivamente, penetra na região de corte, pela quebra da barreira aerodinâmica da periferia do rebolo, e foi responsável pela redução da rugosidade da peça.

### 4. CONCLUSÕES

Deste trabalho pode-se concluir que:

Nos métodos de refrigeração convencional e otimizado utilizados neste trabalho, os valores de rugosidade obtidos foram, em geral, próximos; no entanto, houve a possibilidade da redução de 7,14% em um dos ensaios quando foi utilizada a refrigeração otimizada.

Apesar de outros processos de usinagem demonstrar dificuldades no processamento de compósitos reforçados com fibra de carbono na retificação o material se mostrou com uma excelente usinabilidade e os cavacos arrancados são extremamente pequenos (na forma de pó).

Os resultados de EA foram sempre menores quando foi utilizada a refrigeração otimizada.

## 5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos especiais ao CNPQ/PIBIC e ao CTA (Centro de Tecnologia Aeronáutica) pelos recursos financeiros e corpos de prova disponibilizados para esta pesquisa.

## 6. REFERÊNCIAS

- ALI, Y.M., ZHANG, L.C. "Surface roughness prediction of ground components using fuzzy logic approach." *Journal of Materials Processing Technology* 89-90, p. 561-568, 1999.
- 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, 1995, p. 895-904.
- 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.
- DI ILIO, A., PAOLETTI, A., "A Comparison Between Conventional Abrasives and Superabrasives in Grinding of SiC-aluminum Composites". June 1999.
- DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. Artiliber Editora Ltda, Campinas, SP, Brasil, 2ª Edição, p.225-244, 2000.
- FEREIRA, J.R., MIRANDA, N.L., "Machining Optimization in Carbon Fibre Reinforced Plastics". In: AMP'97, *Advances in Materials and Processing Technologies*, Portugal, 1997.
- GRAF, W. *Cylindrical Grinding*. Copyright WST Winterthur Schleiftechnik AG, Schweiz, 87p., 2004.
- Guo, C., Malkin, S. "Analysis of Fluid Flow Through the Grinding Zone". *Asme Journal of Engineering for Industry*, Vol. 104, 1992, P.427.
- 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.
- IRANI R.A., BAUER R.J., WARKENTIN A., "A review of cutting fluid application in the grinding process", *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45 (2005) 1696-1705.
- JUNIOR, J. F., "Contribuição para implementação de funções de retificação inteligente (R.I.) utilizando técnicas de monitoramento por emissão acústica". Tese (Doutorado) - USP, São Carlos, SP, Brasil, 1996, 138p.
- KIM, H. Y.; KIM, S. R.; AHN, J. H.; KIM, S. H. "Process monitoring of centerless grinding using acoustic emission". *Journal of Materials Processing Technology*, nº 111, p. 273-278, 2001.
- KIM, P.J., LEE, D.G., CHOI, J.K. "Grinding characteristics of carbon fiber epoxy composite Hollow shafts". *Journal of Composite Materials*, 2000.
- KOVACEVIC, R., MOHAN, R., "Effect of high speed grinding fluid on surface grinding performance". *SME Technical paper*, MR95-213, 1995, p. 919-931.
- LEE, D.G., KIM, P.J., CHOI, J.K. "Temperature rise and surface roughness of carbon fiber epoxy composites during cut-off grinding". *Journal of Composite Materials*, 2000.
- MALKIN S., HWANG T. W., "Grinding mechanism for ceramics", *Annals CIRP*, 45(2), pp. 569, 1996.
- MALKIN, S. "Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives", 1ª edição, Chichester, Ellis Horwood Limited, 1989.
- MARTINS, F.R., "Uma contribuição à Usinagem do Compósito Carbono Reforçado com Fibras de Carbono". 1999.
- MONICI, R.D., BIANCHI, E.D., 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 Superabrasives CBN Grinding Wheels". May 2005.
- OLIVEIRA, J. F. G. (1998). "Tópicos avançados sobre o processo de retificação", Reimpressão em setembro de 1998.
- STRONG, A.B., "Fundamentals of Composites Manufacturing Materials, Methods and Applications". 1989.
- SUSIC, E.; GRABEC, I. "Characterization of the grinding process by acoustic emission". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 40, Issue 2, pp. 225-238, January 2000.
- TAKESHITA, H., WEHARA, K., "Cutting Mechanism of some Composite Materials". In: *Second International Metal Cutting Conference*, Tokyo University, Japan, 1985.
- WEBSTER, J. A. "Selection of coolant type and application technique in grinding. *Supergrind*", University of Connecticut, USA, 1995, p. 205-220.
- ZHONG, Z., HUNG, N.P., "Grinding of Alumina/Aluminum Composites". October 2000.

## 7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## **OPTIMIZATION OF THE SURFACE GRINDING OF COMPOSITES WITH CARBON FIBER REINFORCED PLASTIC**

**Francisco Mateus Faria de Almeida Varasquim, mateus1985@uol.com.br<sup>1</sup>**

**Bruno Bastos Gonçalves, ra711446@feb.unesp.br<sup>2</sup>**

**Rubens Chinali Canarim, rubenscanarim@hotmail.com<sup>2</sup>**

**Paulo Roberto Aguiar, aguiarpr@feb.unesp.br<sup>3</sup>**

**Francisco Romeo Martins, franciscorm@iae.cta.br<sup>4</sup>**

**Manoel Cleber Sampaio Alves, manoel@itapeva.unesp.br<sup>5</sup>**

**Eduardo Carlos Bianchi, bianchi@feb.unesp.br<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Estadual Paulista - UNESP - *Campus* de Bauru. Faculdade de Ciências de Bauru, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, CxPostal 473, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Estadual Paulista - UNESP - *Campus* de Bauru. Faculdade de Engenharia de Bauru. Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, CxPostal 473, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil

<sup>3</sup>Universidade Estadual Paulista - UNESP - *Campus* de Bauru. Faculdade de Engenharia de Bauru. Departamento de Engenharia Elétrica, Av. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, CxPostal 473, CEP 17033-360, Bauru, SP, Brasil

<sup>4</sup>Centro Tecnológico da Aeronáutica - CTA. Avenida Brigadeiro Faria Lima, 1.941 - Parque Martim Cererê – CEP 12.227-000, São José dos Campos - SP - Brasil.

<sup>5</sup>Universidade Estadual Paulista - UNESP - *Campus* de Itapeva. Faculdade de Engenharia Industrial Madeireira. Rua Geraldo Alckmin, 519 18409-010 - Itapeva - SP, Brasil.

**Abstract.** *Composite materials are becoming essential and largely used in modern industry, mainly in aeronautics and aerospace industries. The reason for its large use it is their structural composition, which comes from the fusion of two different materials, resulting into a soft matrix, highly rigid and resistant. Due to the material anisotropy, it tends to present at the end of its manufacturing, residual stresses or structural distortions. This way, there is a difficulty in the effective control of the piece's form and position tolerances. Recent researches show that the finishing machining process called grinding is the most recommended to eliminate these structural problems. But when grinding these materials, there is the necessity for a great quantity of cutting fluid (conventional grinding) and the surface wear is high. The use of these fluids in large quantities has become a problem for the modern mechanical industry, due to the world concern about the workers health and the environment, because of the toxic substances. In reference to these concerns, arises a methodology called optimized cooling, a technique which searches to reduce substantially the quantity of fluid used in the grinding process and improves its performance in comparison to the conventional process of fluid application. This way, this work intends to analyze the behavior of the grinding of plastic composites reinforced with carbon fiber and the optimized cooling, as an alternative to the conventional grinding, aiming the minimization of the cutting fluids in the industrial environment. This analysis will be done through the exit variables of the grinding process like the behavior of the tangential force, roughness, acoustic emission, specific energy, G relation and electronic microscopy scan. With the results obtained it is intended to evaluate the process, aiming to insert it into the modern industry context and contribute to the literature about composite materials, which is too scarce.*

**Keywords:** *Composite materials, grinding, cutting fluid, optimized cooling, carbon fiber.*

### **8. RESPONSIBILITY NOTICE**

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.