

7. CONCLUSÕES

Apesar deste trabalho ter características específicas inerentes ao processo, material e ferramenta, é possível estabelecer algumas considerações importantes que contribuem de um modo mais genérico ao tema estudado. Desta maneira, algumas conclusões podem ser listadas:

1. O processo de usinagem a seco é a condição ideal de trabalho do ponto de vista ecológico, contudo neste experimento o comportamento da ferramenta de aço-rápido no fresamento a seco mostra que a marca de desgaste na face e no flanco da ferramenta cresce rapidamente em função do volume de material usinado, ocasionando a elevação dos esforços de usinagem e atingindo assim mais rapidamente o fim de vida da fresa;
2. A utilização de emulsão como fluido de corte é bastante difundida no meio produtivo, porém pode-se observar neste experimento que a vida da ferramenta é bastante curta devido à alta taxa de refrigeração, que ocasiona severos choques térmicos nos gumes de corte;
3. O emprego da quantidade mínima de fluido de corte apresentou bons resultados. Nos dois ensaios com minimização de fluido a ferramenta usinou o volume planejado e o comportamento da ferramenta em relação à força e ao desgaste foi bastante próximo, contudo a usinagem utilizando óleo vegetal como fluido de corte apresentou uma tendência a melhores resultados.

Sendo assim, a proposta da utilização de mínima quantidade de fluido de corte no processo de fresamento com fresas de topo de aço-rápido mostra-se eficiente. Assim sendo, estudos nesta área devem ser continuamente realizados para proporcionar novas informações que possam beneficiar as indústrias de usinagem.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às empresas TITEX PLUS, I. Terstegen da Alemanha, Rubens Moreira/BARDAHL e GERDAU S/A.

9. REFERÊNCIAS

- Stemmer, C.E., 1995, “Ferramentas de Corte I”, Ed. da UFSC, Florianópolis, Brasil, 249p.
- König, W., Klocke, F., 1997, “Fertigungsverfahren 1, Drehen, Fräsen, Bohren”, Ed. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 471p.
- Teixeira, 1997, “Minimização de Fluido de Corte no Processo de Usinagem com Ferramenta de Geometria Definida”, Exame de Qualificação para Doutorado, UFSC, Florianópolis, Brasil, 42p.
- Klocke, F., Gerschwiler, K., 1996, “Usinagem a Seco - Fundamentos, Limites e Perspectivas”, Aachen, 21p.
- Schroeter, R. B., Teixeira, C. R., 2000, “Proposta de Metodologia para Medição do Desgaste em Ferramentas de Corte de Geometria Definida”, Submetido ao CONEM 2000, Rio Grande do Norte, Brasil, 8p.
- Ferraresi, D., 1995, “Fundamentos da Usinagem dos Metais”, Ed. Edgard Blücher, São Paulo, Brasil, 751p.

Na tabela 4 mostram-se as rugosidades R_a referente a cada superfície usinada nas diferentes condições. Pode ser observado que na usinagem a seco os valores são menores que os obtidos na usinagem com emulsão ou com MQFC.

Tabela 3. Especificações para medição da rugosidade em cada superfície.

<i>Cut off</i>	0,8 mm
Raio do apalpador	10 μm
Comprimento total de medição	5,6 mm
Comprimento efetivo de medição	4,0 mm
Largura de medição	2,0 mm
Número de medições	4

Tabela 4. Rugosidade nas superfícies concordante e discordante para cada ensaio.

Superfície \ Fluido	Seco	MQFC 1	MQFC 2	Emulsão (A4)	Emulsão (A5)
Concordante (μm)	0,8	1,4	1,8	1,4	1,5
Discordante (μm)	1,5	1,3	1,2	1,4	1,4

A medição da rugosidade foi realizada longitudinalmente ao corte, ou seja, na direção de avanço da fresa. Todas as superfícies analisadas foram geradas com a ferramenta nova, ainda sem apresentar desgaste (no ponto da 1^o aquisição das forças).

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Através de uma análise do comportamento das forças apresentada na figura 5, observa-se nos ensaios com emulsão (ferramentas A4 e A5) que a força resultante máxima cresce rapidamente no início da vida, dobrando seu valor no primeiro ponto de medição. Isto ocorre devido à diminuição da temperatura na região de corte, causando assim um incremento na força necessário para remover o material. Outro aspecto importante é o fato que as duas ferramentas quebraram por colapso catastrófico antes de completar o segundo intervalo de medição provavelmente devido ao grande aumento nas forças na usinagem. No caso dos ensaios com minimização (ferramentas A2 e A3) as forças apresentam um comportamento bastante semelhante.

Uma análise da figura 6 mostra que os níveis de desgaste na face da ferramenta se comportam de maneira semelhante, mas com uma nítida tendência para um desgaste mais acentuado no ensaio a seco (ferramenta A1). Nos ensaios com minimização de fluido a evolução do desgaste nos dois casos é bastante parecida, sendo que os resultado do óleo vegetal mostram a tendência a serem menores ao longo da vida da ferramenta. Todavia o ensaio com emulsão apresentou o menor nível de desgaste para as duas ferramentas ensaiadas, porém atingiu o colapso prematuramente.

Na figura 7 é possível observar que o desgaste no flanco da ferramenta que trabalhou a seco é maior já no início dos testes. Este desgaste é o principal responsável pela quebra prematura da ferramenta no terceiro intervalo de trabalho. Os ensaios com minimização apresentaram o menor nível de desgaste no flanco ao longo da vida, e novamente o ensaio com óleo de origem vegetal mostrou a tendência de uma menor evolução.

Pode-se observar, através das imagens registradas, que o desgaste no flanco secundário em todas as ferramentas é desprezível, enquanto que o flanco principal e a face das ferramentas apresentaram defeitos bastante significativos. A figura 6 mostra o comportamento da marca de desgaste máxima na face das ferramentas ($KB_{m\acute{a}x}$) para todas as condições ensaiadas, e a figura 7 a marca de desgaste máxima no flanco principal ($VB_{m\acute{a}x}$). Como critério na avaliação dos desgastes, adotou-se o gume que apresenta a maior marca de desgaste em cada ponto de medição como o valor representativo para o desgaste da fresa.

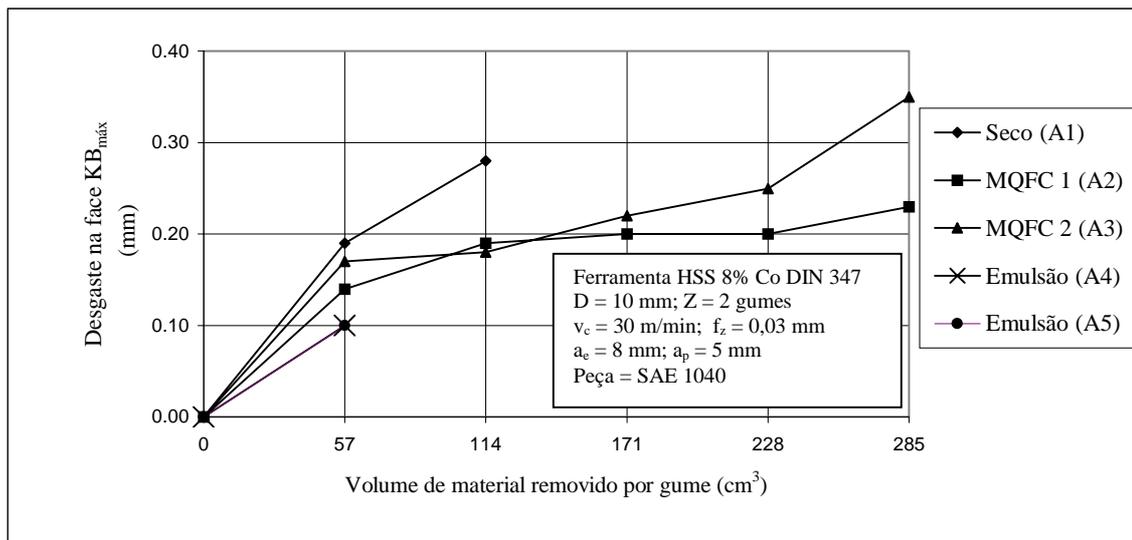


Figura 6. Comportamento da marca de desgaste na face ($KB_{m\acute{a}x}$).

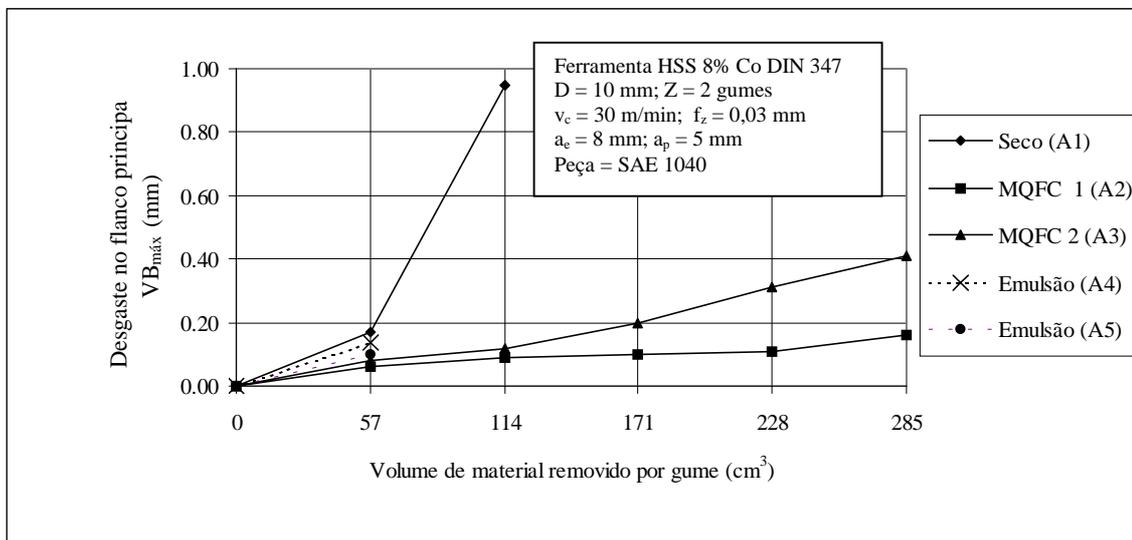


Figura 7. Comportamento da marca de desgaste no flanco principal ($VB_{m\acute{a}x}$).

5. MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE

A rugosidade das superfícies concordantes e discordantes geradas foram medidas através do rugosímetro PERTHOMETER-SP8 com as especificações apresentadas na tabela 3.

planejado, sendo que o motivo da interrupção do experimento foi o colapso catastrófico (quebra) da fresa.

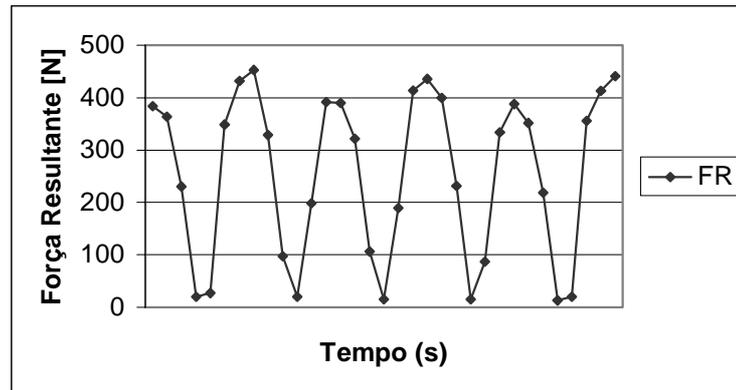


Figura 4. Comportamento da força resultante.

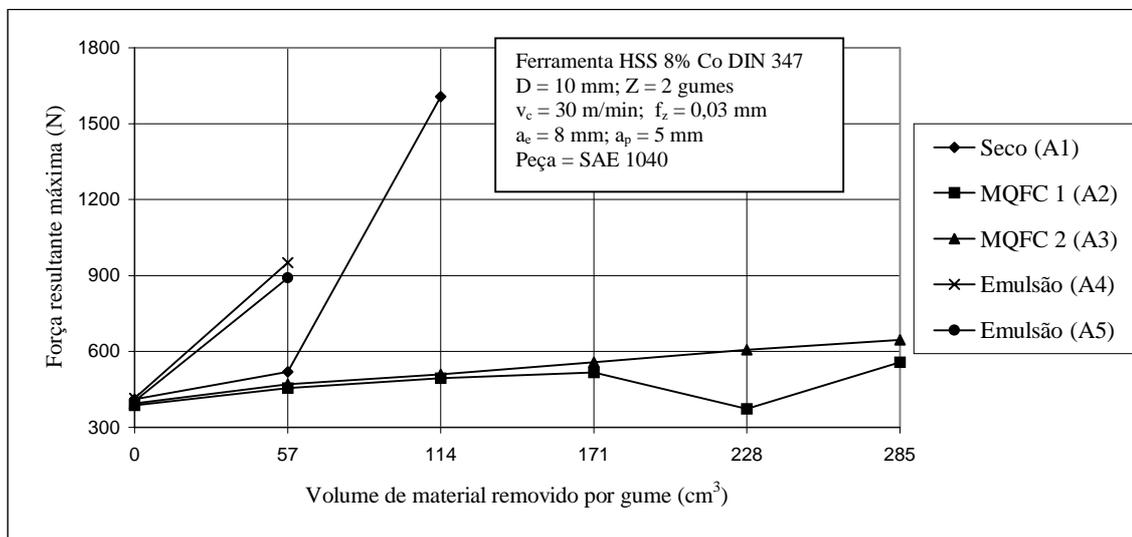


Figura 5. Comportamento da força resultante máxima nos diversos tipos de fluido.

Conforme comentado no item 2, a ferramenta A5 foi utilizada para repetir o ensaio com emulsão, devido ao pequeno volume de material removido pela ferramenta A4. No ensaio com MQFC 1 o ponto com 228 cm³ de material removido por gume foi adquirido com a velocidade de corte 45 m/min, devido uma falha operacional. Assim deve-se considerar que a força resultante máxima referente a este ponto sofre uma redução, pois com o aumento da velocidade de corte a espessura de material removido por rotação da fresa diminui. Logo, a força necessária para remover um volume menor de material tende a diminuir também, comprovando a teoria de Kienzle (Ferraresi, 1995).

4. MEDIÇÃO DO DESGASTE

Para a quantificação do desgaste ocorrido em cada região da ferramenta, foi empregada a metodologia de medição proposta por Schroeter e Teixeira, 2000, na qual registram-se os defeitos ocorridos na face, no flanco principal e no flanco secundário da ferramenta através de uma câmera CCD em intervalos pré-determinados, conforme o planejamento do experimento. Estas imagens são arquivadas e posteriormente analisadas através de um *software* adequado para a medição dos respectivos desgastes.

AG 5006 KISTLER, placa de aquisição de sinais, microscópio de ferramentaria Nikon Measurescope, sistema de aquisição de imagem digital, rugosímetro PERTHOMETER S8P com unidade de avanço PERTHOMETER PRK e outros acessórios para facilitar a execução dos ensaios.

2.4 Planejamento experimental

Com o objetivo de sistematizar os intervalos de aquisição dos dados e garantir a repetibilidade das medições, elaborou-se um plano de trabalho para os experimentos (tabela 2). A primeira etapa desta planilha visa comprovar a qualidade geométrica das ferramentas, sendo feita para isto uma avaliação de algumas dimensões principais, como o ângulo de hélice e o afastamento (radial e axial) do gume em relação ao seu eixo de rotação. As dimensões verificadas não apresentaram valores fora da margem de erro.

Tabela 2. Planilha esquemática para execução do ensaio.

Etapa	Descrição
1	Verificação da qualidade geométrica da fresa
2	1° Aquisição dos dados de desgaste e força (fresa nova)
3	Abrir canal para avaliação da rugosidade (fresa nova)
4	Usinagem para desgaste da ferramenta (57 cm ³ /gume)
5	2° Aquisição dos dados de desgaste e força
...	...
n	Repetem-se as etapas 4 e 5 até atingir-se 285 cm ³ /gume de material removido

Sendo assim, tem-se 6 pontos de aquisição dos dados em intervalos constantes de 57 cm³ de material removido por gume, totalizando 285 cm³.

3. MEDIÇÃO DA FORÇA

Para adquirir o sinal de força utilizou-se a plataforma piezelétrica 9443 KISTLER, onde o sistema de aquisição foi ajustado para gravar 200 medições por segundo (0,2 kHz) durante todo o período de execução do rasgo de 10 mm. Como critério para comparação dos esforços de usinagem em cada ponto de medição, adotou-se a média dos valores de pico da força resultante determinada pela equação 1 dentro do intervalo de usinagem estabilizada. Para a comparação entre os fluidos foi utilizado o módulo desta resultante.

$$FR = \sqrt{Fx^2 + Fy^2} \quad (1)$$

Na figura 4 pode ser visto o comportamento da força resultante FR no plano XY, onde a frequência de variação é definida pelo trabalho dos gumes durante o corte.

A figura 5 mostra a evolução da força resultante máxima para os 5 ensaios, sendo que o eixo da abscissa corresponde ao volume de material retirado por gume da ferramenta. Este parâmetro foi empregado com o propósito de facilitar outras comparações entre ferramentas com número de gumes diferente da utilizada neste experimento. Nos ensaios a seco e com emulsão usinou-se um volume inferior ao

para o desgaste da ferramenta de modo a favorecer a análise das forças. Os eixos de movimentação da ferramenta coincidem com os eixos da plataforma piezelétrica.

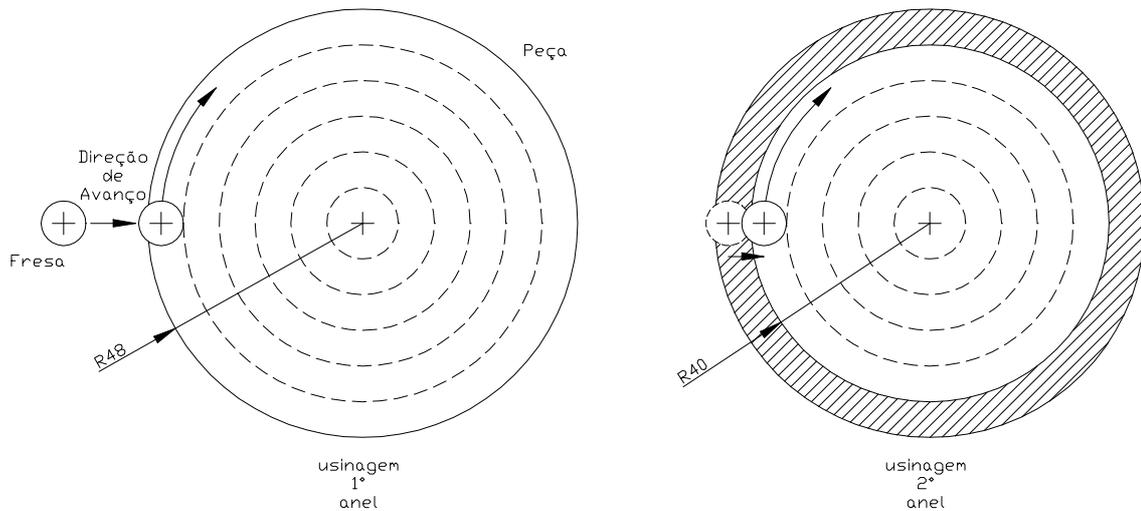


Figura 2. Estratégia de usinagem utilizada para desgaste da ferramenta (vista superior).

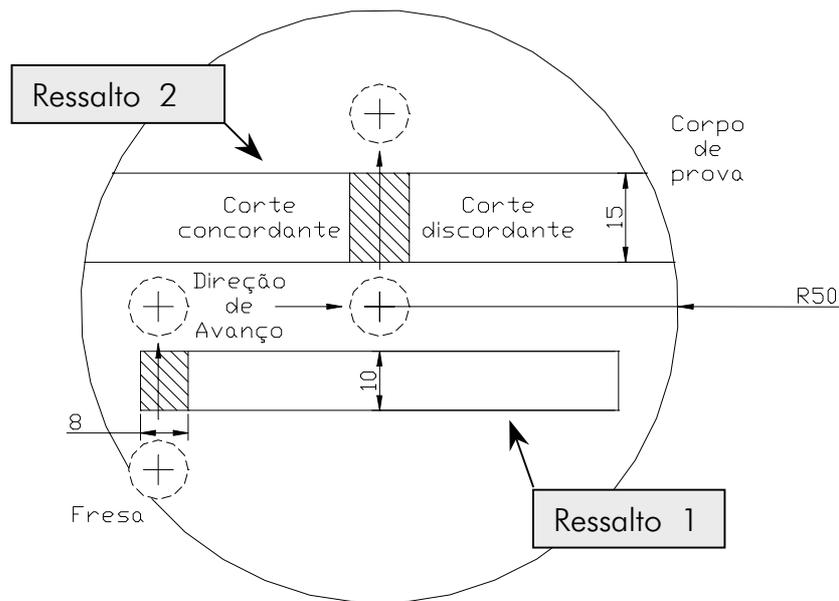


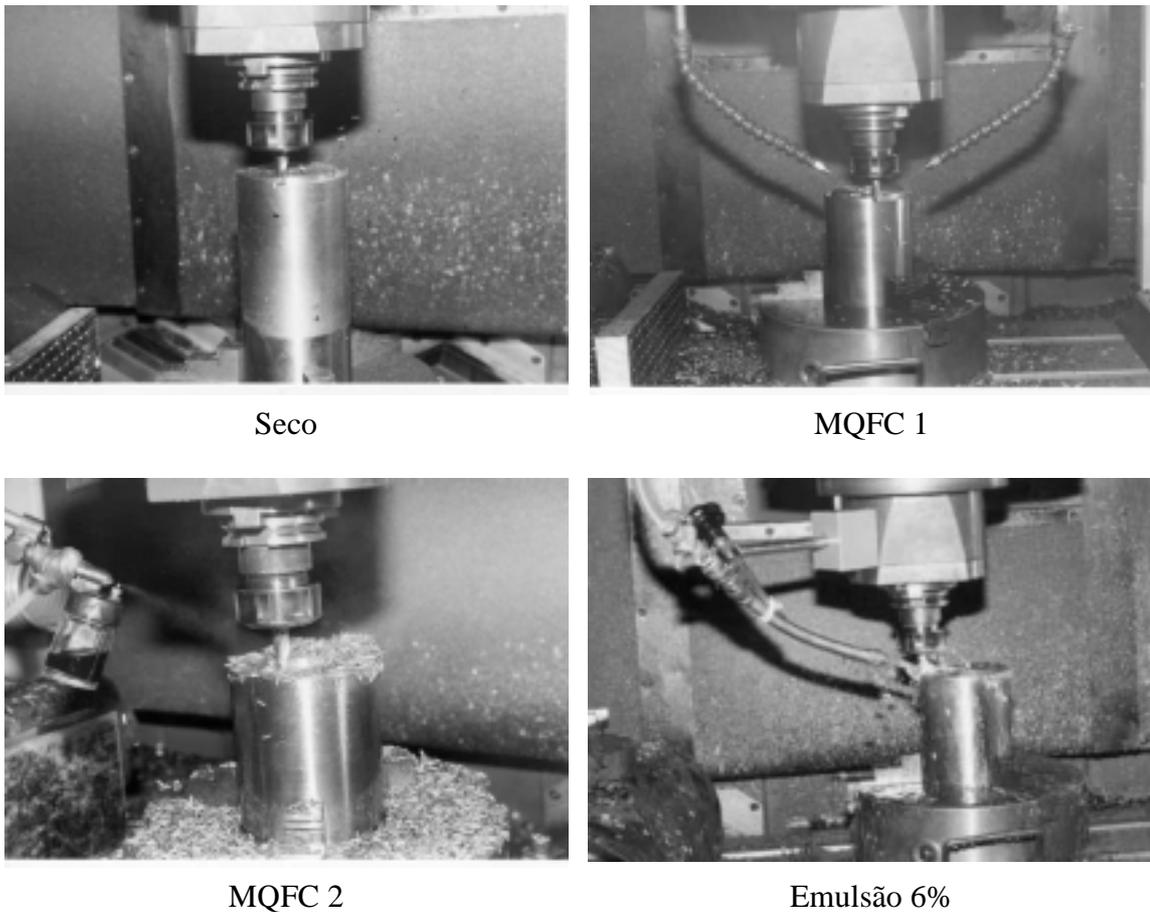
Figura 3. Croqui do corpo de prova para medição das forças e rugosidade (vista superior)

Os canais abertos no ressalto 1 (de 10 mm de largura) são para efetuar as medições e aquisições das forças de usinagem em cada estágio do desgaste. Os canais abertos no ressalto 2 (de 15 mm de largura) são para gerar as superfícies onde são avaliadas as rugosidades produzidas pelas ferramentas nos respectivos estágios de desgastes. A movimentação da ferramenta entre os corpos de prova foi feita através de um programa CNC previamente testado.

2.3 Equipamentos utilizados

Para realizar os experimentos utilizou-se uma fresadora CNC ROMI Polaris F400, uma plataforma piezelétrica para fresamento 9443 KISTLER com amplificador de sinais

superiores a este valor (50 ml/h) são consideradas aplicações reduzidas de fluido de corte.



Seco

MQFC 1

MQFC 2

Emulsão 6%

Figura 1. Formas de aplicação do fluido de corte.

2.2 Material ensaiado e estratégia de usinagem

O material usinado foi o aço SAE 1040 em forma barra redonda laminada, sem tratamento e sem acabamento com diâmetro bruto de 4 polegadas (101,6 mm), fornecido pela empresa GERDAU S.A. De modo a otimizar o volume de material usinado e favorecer os experimentos definiu-se a estratégia de usinagem em círculos (figura 2), com profundidade de corte radial (a_e) de 8 mm. Logo, optou-se por um raio de 48 mm para o corpo de prova de desgaste, proporcionando assim 6 anéis para usinagem, percorrendo um comprimento total de 942 mm por superfície usinada. A altura do corpo de prova para desgaste foi determinada em função do comprimento total planejado para o ensaio, que é de aproximadamente 15 m.

O corpo de prova para medição das forças e da rugosidade tem uma geometria mais complexa para facilitar a aquisição dos dados. A ferramenta usina dois canais no primeiro ponto de medição, o primeiro com 10 mm de comprimento para aquisição das forças e o segundo com 15 mm de comprimento para geração dos dados de rugosidade. Apartir do segundo ponto de medição somente monitoraram-se as forças. Na figura 3 pode-se observar o rasgo para medição da rugosidade gerado, sendo a superfície esquerda discordante e a superfície direita concordante. O corpo de prova para medição das forças e da rugosidade foi planejado de maneira a otimizar os tempos secundários de usinagem. Na medição das forças no plano XY foi adotada uma estratégia diferente da utilizada

produtos, podendo vir a desenvolver várias doenças de pele, pulmão e alguns tipos de câncer (Teixeira, 1997).

Sendo assim, com as crescentes pressões dos órgãos ambientais para reduzir o impacto da produção industrial no meio ambiente e o surgimento de leis cada vez mais severas contra os infratores, fica evidente a importância do desenvolvimento de novas tecnologias para minimizar o impacto ambiental dos processos de usinagem. Face a esta realidade, as informações geradas por este trabalho têm como principal função fomentar esta nova tendência dos processos de usinagem.

2. METODOLOGIA DOS ENSAIOS

Neste experimento utilizaram-se cinco ferramentas de aço-rápido com 8% de cobalto (A1, A2, A3, A4 E A5), com mesmas características técnicas e com especificação D3141, conforme a norma DIN 327. As condições de usinagem para cada ferramenta são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1. Condições de usinagem para cada ferramenta.

Ferramenta	Fluido de Corte	v_c (m/min)	f_z (mm)	a_e (mm)	a_p (mm)	Z	D (mm)
A1	Seco	30	0,03	8	5	2	10
A2	MQFC 1	30	0,03	8	5	2	10
A3	MQFC 2	30	0,03	8	5	2	10
A4	Emulsão	30	0,03	8	5	2	10

Os parâmetros de corte foram determinados pelo fabricante, contudo a profundidade de corte axial (a_p) e a profundidade de corte radial (a_e) foram selecionadas de acordo com a faixa de operação da ferramenta. A ferramenta A5 permaneceu como reserva para eventual repetição de ensaios que apresentassem problemas.

2.1 Fluidos de corte

Os fluidos de corte empregados nos ensaios possuem as seguintes características:

- Seco - Sem introdução de fluido de corte;
- MQFC 1 - Óleo de origem vegetal com especificação IT-MICRO 4300, fornecido pela empresa I. Terstegen da Alemanha, aplicado por dois bicos injetores com uma pressão de 3 bar, a uma inclinação de 45° entre a superfície da peça e a ferramenta e vazão de 25 ml/h cada bico, totalizando 50 ml/h;
- MQFC 2 - Óleo de origem mineral com especificação MAXLU B5G725, fornecido pela empresa BARDAHL, aplicado a uma pressão de 3 bar com inclinação de 45° entre a superfície da peça e a ferramenta, através de um bico com vazão de 50 ml/h;
- Emulsão - Solução com 6% de MAXLUB RECUT 2, fornecido pela empresa BARDAHL, aplicado a uma inclinação de 45° entre a peça e a ferramenta e com uma vazão de aproximadamente 230 l/h.

A figura 1 mostra as formas de aplicação do fluido de corte nos ensaios realizados.

Segundo Klocke e Gerschwiler, 1996, quantidade mínima de fluido de corte refere-se a vazões de até 50 ml/h e onde o fluido é aplicado em forma de névoa. Vazões

ASPECTOS TECNOLÓGICOS DO PROCESSO DE FRESAMENTO DE TOPO COM UTILIZAÇÃO DE MÍNIMA QUANTIDADE DE FLUIDO DE CORTE

Rolf Bertrand Schroeter

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Eng. Mecânica, Laboratório de Mecânica de Precisão, 88010-970, Florianópolis, SC, Brasil. E-mail: rolf@emc.ufsc.br

Cleiton Rodrigues Teixeira

Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Departamento de Materiais e Construção, 96200-900, Rio Grande, RS, Brasil. E-mail: dmcrt@super.furg.br

Pablo Deivid Valle

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Eng. Mecânica, Laboratório de Mecânica de Precisão, 88010-970, Florianópolis, SC, Brasil. E-mail: pablo@lmp.ufsc.br

Resumo:

Este trabalho tem como principal objetivo analisar o comportamento das forças de usinagem e da vida da ferramenta no processo de fresamento com fresas de topo reto DIN 327. Neste estudo foi empregada a usinagem a seco, a usinagem com emulsão e a usinagem com mínima quantidade de fluido de corte (MQFC), obtendo-se assim informações tecnológicas que possibilitem uma comparação entre as situações atuais de produção e a usinagem com minimização de fluido de corte. Nos experimentos foi monitorada a evolução do desgaste na face e nos flancos de cada gume da ferramenta. A rugosidade gerada na superfície concordante e discordante também foi avaliada.

Palavras-chave: Minimização de fluido de corte, Fresamento, Fresas de topo.

1. INTRODUÇÃO

Apenas a otimização de ferramentas e de máquinas-ferramentas não é suficiente para que um processo de usinagem torne-se mais rentável. Para que isso ocorra há a necessidade de se determinar parâmetros de corte e controlar o processo de maneira a resolver os problemas específicos, devido às particularidades geométricas de cada ferramenta de corte (Stemmer, 1995, König, 1997).

Além da otimização de ferramentas, máquinas e parâmetros de corte, outra crescente tendência mundial é a preocupação das empresas quanto aos aspectos ecológicos da produção. Os processos de usinagem estão dentro deste contexto, e o uso de fluidos de corte vem sendo reavaliado. A usinagem a seco, a minimização do uso de fluidos e o desenvolvimento de produtos menos nocivos têm se tornado tema constante nas empresas e institutos de pesquisa (Teixeira, 1997).

Atualmente a maioria das indústrias nacionais utiliza fluidos de corte convencionais na sua produção, o que comprovadamente provoca danos ao ser humano e ao meio ambiente. Neste contexto, o operador é diretamente afetado pela toxicidade destes