

TESTES DE VIDA EM FRESAMENTO COM REDUÇÃO DO NÚMERO DE FERRAMENTAS

André Richetti

Jovani Panato

Márcio Bacci da Silva

Álisson Rocha Machado

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, 38.400-902, Uberlândia, MG, Brasil. E-mail mbacci@mecanica.ufu.br ou arichett@mecanica.ufu.br

Resumo

Os testes de vida são ensaios de usinabilidade que são realizados para otimizar a relação entre custo e produtividade em usinagem. Em fresamento, estes testes apresentam custos elevados e, na prática, são feitos utilizando parte da capacidade de ferramentas da fresa. Os objetivos deste trabalho são verificar o efeito do número de ferramentas no fresamento frontal e avaliar a aplicabilidade destes testes na determinação da vida da ferramenta. Foram levantadas as curvas de desgaste de flanco para os aços ABNT 1045 e 8640 para 1, 2, 3 e 6 ferramentas, sendo a capacidade da fresa de 6 ferramentas. Os resultados mostraram que os testes realizados com redução do número de ferramentas na fresa, para o mesmo avanço por dente, tendem a aumentar a vida da ferramenta e podem ser considerados como índices de comparação entre duas ou mais condições, porém não devem ser utilizados para determinação da vida da ferramenta.

Palavras chaves: Usinabilidade, Fresamento, Vida da ferramenta.

1. INTRODUÇÃO

A procura pelas melhores condições de usinagem passa por uma série de considerações a respeito da ferramenta, peça, equipamentos, ambiente, condições de corte e, finalmente, por testes de usinabilidade. Este processo seletivo se justifica pela dificuldade de se fazer uma determinada escolha em função do grande número de ferramentas atualmente disponíveis no mercado. As recomendações dos fabricantes podem ser utilizadas como ponto de referência, pois podem ser encontradas situações mais satisfatórias para outras condições ou ferramentas. Desta forma, os testes de usinabilidade são de grande importância, considerando o ganho econômico, principalmente em empresas que demandam altas quantidades de operações de usinagem (Machado & Silva, 1999).

No fresamento, a utilização de fresas com pastilhas intercambiáveis como ferramentas de corte é comum em setores de fabricação. As fresas disponíveis comercialmente apresentam uma capacidade de ferramentas bastante variada, podendo ser 4, 6, 8, 10, 64 ou mais ferramentas. Os custos dos testes para a determinação da vida da ferramenta podem ser significativos quando envolvem um grande número de ferramentas por fresa. Isto ocorre não apenas pela perda de uma grande quantidade de ferramentas mas, principalmente porque um

grande volume de material deve ser retirado para que o critério de fim de vida de uma das ferramentas seja atingido. O custo relativo destes ensaios se torna ainda mais significativo quando se analisa a usinagem aplicada à materiais nobres, tais como ligas de níquel e titânio e aços inoxidáveis entre outros (Boehs, Borges & Neto, 1994, Strolberg, 1994 e Panato *et al.*, 1995).

A adoção de técnicas alternativas para os ensaios de determinação da vida da ferramenta no fresamento é justificada pelo alto custo dos testes convencionais. Na prática, muitos destes ensaios são feitos com a utilização de uma quantidade de ferramentas menor do que a capacidade da fresa, mantendo o mesmo avanço por dente da condição real. Desta forma, procura-se simular a condição real utilizada na fabricação, porém com custos bem mais acessíveis (Bohes, Borges & Neto, 1994).

Entretanto, há ainda restrições quanto à aceitação destes testes, pois a dinâmica do processo pode ser alterada pela variação do número de ferramentas na fresa. Os mecanismos de desgaste, as tensões de impacto, a fadiga mecânica e a formação de trincas térmicas podem não seguir o mesmo comportamento da operação real (Chandrasekaran & Thoors, 1994 e Tlustý, 1984).

Este trabalho verifica a influência da variação do número de ferramentas nos resultados dos testes de usinabilidade para o fresamento frontal e sua aplicabilidade para a determinação da vida da ferramenta.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste trabalho, foram feitos testes de usinabilidade em aço ABNT 1045 com dureza média de 229 HB e em aço ABNT 8640 com dureza média de 299 HB. Os testes foram realizados em uma fresadora CNC com 16,16 kW de potência. Para cada condição de usinagem, o avanço por dente (f_z) foi mantido constante ajustando-se a velocidade de avanço (V_f) em função do número de ferramentas na fresa. Em todos os testes a profundidade de corte foi mantida constante em 1 mm.

O aço ABNT 1045 foi usinado com uma fresa de topo de 100 mm de diâmetro e capacidade para 6 ferramentas. O ângulo de saída da fresa foi ajustado em 40° , fora da faixa crítica (-45° a 20°) onde o fenômeno de formação do pé promove avarias na ferramenta (Machado & Silva, 1999). Os testes foram conduzidos com 1, 2, 3 e 6 ferramentas igualmente espaçadas na fresa, velocidades de corte (V_c) de 300, 325 e 350 m/min e avanços por dente (f_z) de 0,075, 0,100 e 0,125 mm. Foram utilizadas ferramentas de metal duro sem revestimento SPUN 12 03 08 da classe ISO P30, com geometria final:

$$\gamma_o (\text{ângulo de saída}) = 2^\circ, \alpha_o (\text{folga}) = 9^\circ, \lambda_s (\text{inclinação}) = 7^\circ \text{ e } \chi_r (\text{posição}) = 75^\circ.$$

O aço ABNT 8640 foi usinado com uma fresa de topo de 80 mm de diâmetro com capacidade para 6 ferramentas. A usinagem foi feita de tal forma que o ângulo de saída da fresa foi de 90° . Estes testes foram feitos com 1, 2, 3 e 6 ferramentas na fresa, velocidade de corte de 200 m/min e avanço por dente de 0,150 mm. Foram utilizadas ferramentas de metal duro revestidas SEMN 12 04 AZ da classe ISO P45, com geometria final:

$$\gamma_o = 9^\circ, \alpha_o = 20^\circ, \lambda_s = 17^\circ \text{ e } \chi_r = 45^\circ.$$

A medição do desgaste foi feita em um microscópio ferramenteiro, com um suporte móvel para a fresa montado em uma mesa de coordenadas XY controlada por relógio comparador. Este equipamento permite a medição do desgaste sem que as ferramentas sejam retiradas da fresa. O conjunto de lentes do microscópio permite a visualização do desgaste

com uma ampliação de 20 vezes. O critério de fim de vida adotado foi de 0,7 mm para o desgaste de flanco.

3. RESULTADOS

Em uma primeira etapa, foram levantadas as curvas de desgaste de flanco no fresamento do aço ABNT 1045, variando-se o número de ferramentas na fresa, velocidade de corte e avanço por dente. As Figuras 1 a 3 mostram alguns dos resultados obtidos, neste caso para avanço por dente de 0,100 mm. Os resultados para as demais condições de corte (avanços) foram similares. Estas curvas foram levantadas a partir do maior valor de desgaste observado dentre todas as ferramentas de corte utilizadas em cada teste.

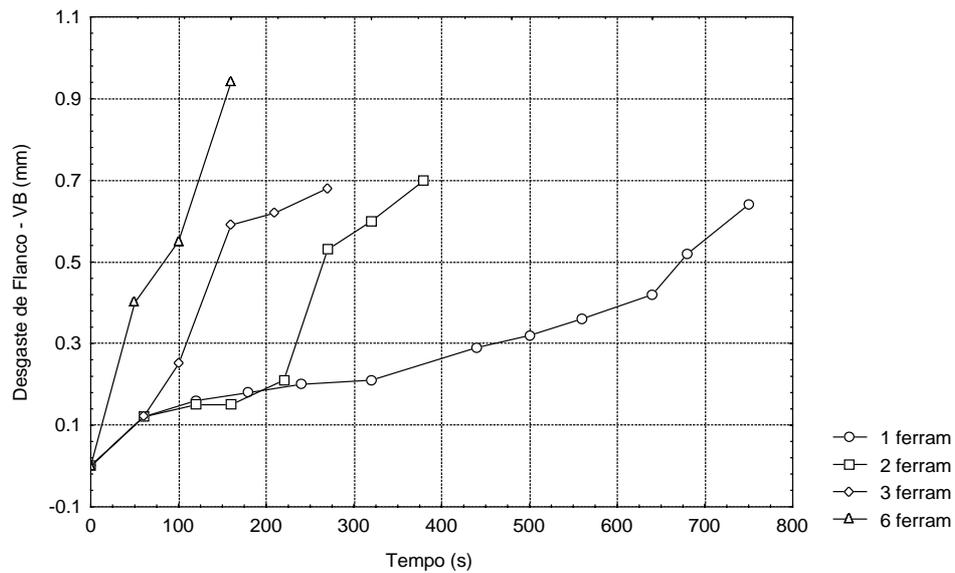


Figura 1- Desgaste de flanco para o aço ABNT 1045 com $V_c = 300$ m/min e $f_z = 0,100$ mm.

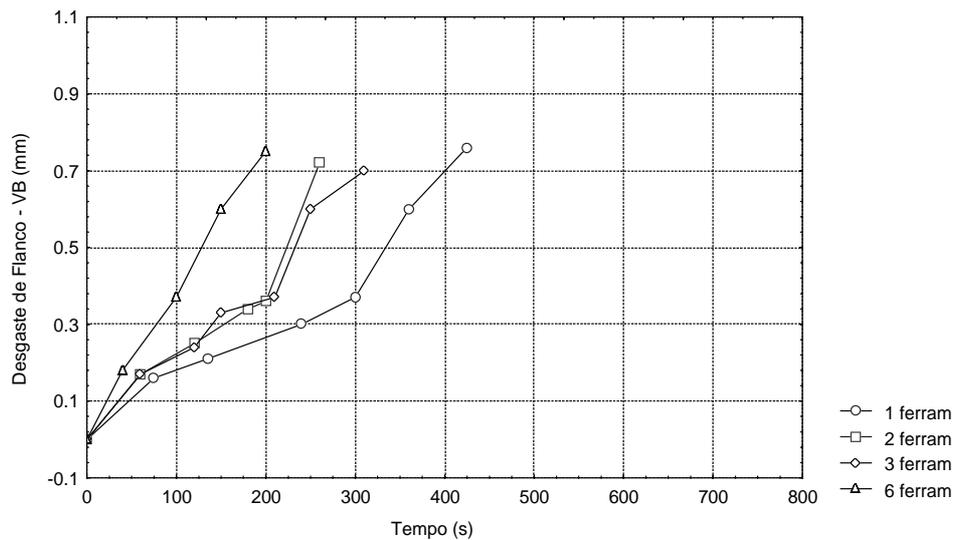


Figura 2- Desgaste de flanco para o aço ABNT 1045 com $V_c = 325$ m/min e $f_z = 0,100$ mm.

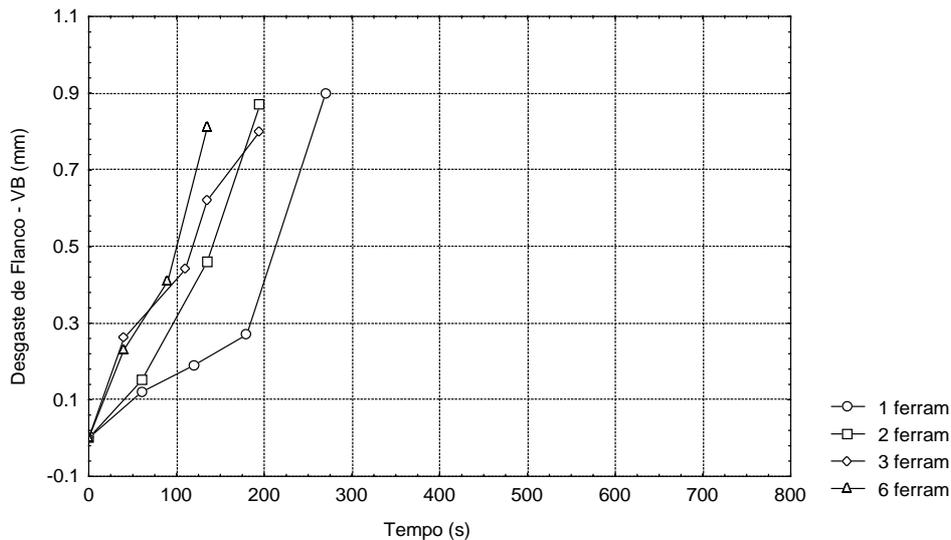


Figura 3- Desgaste de flanco para o aço ABNT 1045 com $V_c = 350$ m/min e $f_z = 0,100$ mm.

O comportamento diferente na progressão do desgaste para 1, 2, 3 e 6 ferramentas na fresa é provavelmente o resultado da combinação de dois efeitos térmicos, assumindo que as temperaturas tanto da peça quanto da ferramenta aumentam com o aumento do número de ferramentas. O primeiro efeito é a redução da resistência do material, que facilita o corte e o segundo é o efeito causado pelo aparecimento dos mecanismos de desgaste termicamente ativados, os quais tendem a reduzir a vida da ferramenta.

As menores vidas de ferramenta foram obtidas para 6 ferramentas na fresa. Nesta situação, o material é usinado com maior frequência, produzindo na peça usinada maiores temperaturas devido ao calor gerado por todos os dentes, podendo reduzir a resistência do material. Entretanto, o aumento na temperatura de corte tende a reduzir a vida da ferramenta devido ao aparecimento dos mecanismos de desgastes termicamente ativados. A utilização de uma velocidade de avanço maior do que as outras condições (1, 2 e 3 ferramentas), para manter o mesmo avanço por dente, pode também ter aumentado o efeito da temperatura no desgaste da ferramenta. A análise das Figuras 1 a 3 indica que, para 6 ferramentas na fresa, o efeito devido ao aumento do desgaste foi maior do que o efeito de redução da resistência do material da peça, resultando em menores vidas de ferramenta.

No outro extremo, as maiores vidas de ferramenta foram obtidas quando se utilizou somente uma ferramenta na fresa. Nesta condição, o ciclo ativo é menor do que o ciclo inativo (menor frequência de corte), proporcionando menor aquecimento da peça do que as outras condições. Desta forma, não se tem uma redução significativa na resistência do material da peça. No entanto, a velocidade de avanço utilizada nesta condição é menor, ajudando a manter a temperatura de corte a níveis mais baixos, inibindo o aparecimento dos mecanismos de desgaste térmicos. O efeito da redução do desgaste devido às menores temperaturas de corte produziu maiores vidas de ferramenta.

As condições com 2 e 3 ferramentas apresentaram resultados intermediários para a vida da ferramenta. Entretanto, foi verificada a tendência da vida da ferramenta ser maior para 3 ferramentas na fresa, quando pela lógica do processo, deveria ser maior para 2 ferramentas (menores temperaturas de corte). Este efeito provavelmente ocorreu devido ao fato de que a maior temperatura gerada na usinagem com 3 ferramentas não foi suficiente para gerar um aumento expressivo no desgaste das ferramentas, mas foi suficiente para melhorar a usinabilidade do material pela redução de sua resistência mecânica.

Uma comparação dos resultados para o mesmo avanço por dente e diferentes velocidades de corte mostram a importância do efeito da temperatura de corte. Para 1 ferramenta na fresa, a vida da ferramenta diminui consideravelmente com o aumento da velocidade de corte (vide Figuras 1 a 3). Isto indica que os mecanismos de desgaste começam a aparecer depois de alcançada uma velocidade de corte crítica. Por outro lado, para 2, 3 e 6 ferramentas na fresa, a redução da vida da ferramenta como função da velocidade de corte ocorreu em menor escala, sugerindo que, para estes casos, os mecanismos termicamente ativados sempre estiveram presentes devido à maior frequência de corte.

Entretanto, a complexidade do processo não é limitada a uma análise de desgaste e aquecimento da peça. Isto fica evidente porque em quase todos os testes foram observados lascamentos na aresta de corte de algumas ferramentas. Este tipo de fratura, também citada no trabalho de Panato *et al.* (1995), tem influência no desempenho das ferramentas, ajudando estas a atingir o critério de fim de vida mais rápido. A geração de trincas térmicas e a conseqüente fragilização da ferramenta pode ser um dos principais fatores responsáveis pela ocorrência de lascamentos na aresta de corte.

O uso de maiores velocidades de avanços a medida que se aumenta o número de ferramentas na fresa, para manter o mesmo avanço por dente, pode sugerir um aumento equivalente no percurso de corte conforme é mostrado esquematicamente na Figura 4. Este aumento no percurso de corte poderia contribuir para a redução da vida das ferramentas. Entretanto, uma análise da condição referente à Figura 3 mostra, para uma revolução na fresa, que o percurso de corte de uma ferramenta é 0,00000011 mm maior quando se usa 6 ferramentas em relação a 1 ferramenta na fresa. Após 20 minutos de usinagem, a diferença entre estas duas condições é da ordem de 0,025 mm, não afetando a vida das ferramentas.

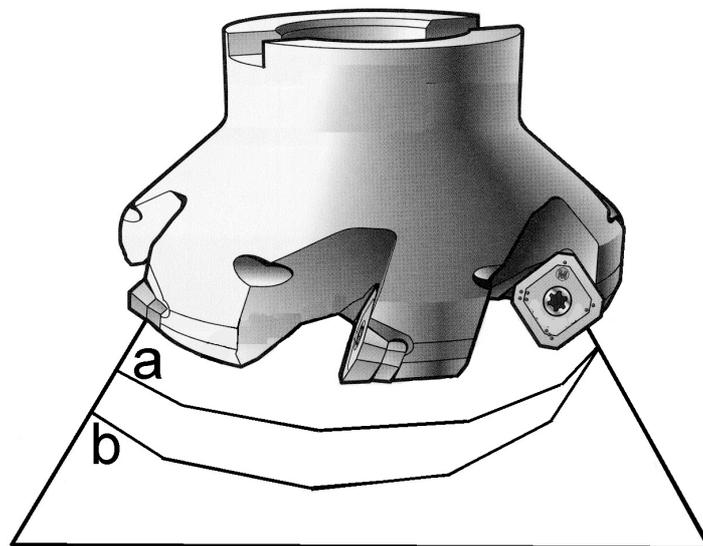


Figura 4- Percurso de corte de uma ferramenta para 1 (a) e 6 (b) ferramentas na fresa.

A Tabela 1 mostra a vida da ferramenta e o volume de material removido em cada uma das condições de corte empregadas para o aço ABNT 1045. Nota-se através desta tabela, que a vida da ferramenta também tende a reduzir com o aumento da velocidade de corte e do avanço por dente. Segundo Eldem & Barrow (1976), o aumento destes parâmetros, além de gerar choques mecânicos mais intensos, aceleram o aparecimento dos mecanismos de desgaste pelo aumento da temperatura de corte. Bathia, Pandey & Shan (1979) citam que este

efeito também produz um aumento no gradiente térmico, tendendo a aumentar taxa de geração de trincas térmicas.

Tabela 1- Vida da ferramenta e volume de material removido para o aço ABNT 1045.

Condição de usinagem	Vida da ferramenta para VB = 0,7 mm (min)			
	Volume de material removido para VB = 0,7 mm (cm ³)			
Vc (m/min) f _z (mm)	1 ferramenta	2 ferramentas	3 ferramentas	6 ferramentas
1 300	12,7	9	9,3	4,3
0,075	69,3	98,2	155,2	141
2 300	12,7	6,3	4,5	2,2
0,100	92,4	91,7	98,1	96
3 300	8,7	5,6	4,3	1,8
0,125	79,2	102	117,3	98,4
4 325	8	5	5,8	3,2
0,075	47,3	59,2	102,9	113,4
5 325	6,5	4	5	3
0,100	51,3	63,2	118,2	142,2
6 325	5,8	3,5	4	2,5
0,125	57,2	69	118,2	147,6
7 350	5	4	4,3	2,8
0,075	31,9	51	82,2	107,4
8 350	3,5	3	2,8	2
0,100	29,7	51	71,4	102
9 350	4	1,8	2	1,5
0,125	42,5	38,2	63,6	95,4

O volume de material removido também é influenciado pelo número de ferramentas na fresa. Pela Tabela 1, verifica-se que, apesar da vida da ferramenta diminuir, o volume de material removido apresentou a tendência de aumentar com o aumento do número de ferramentas na fresa. Isto ocorreu porque o efeito do aumento da velocidade de avanço, para manter o mesmo avanço por dente, supera o efeito de redução da vida da ferramenta, compensando a maior taxa de desgaste. Entretanto, alguns testes (teste 1, com 6 ferramentas; teste 2, com 2 e 6 ferramentas; teste 3, com 6 ferramentas e teste 9, com 2 ferramentas) não apresentaram resultados coerentes com esta análise. Este problema provavelmente foi influenciado pela ocorrência de lascamentos na aresta de corte.

Por outro lado, se for analisado o volume de material removido por ferramenta (relação entre o volume total retirado e o número de ferramentas), verifica-se que este diminui com o aumento do número de ferramentas na fresa. Isto indica que individualmente, cada ferramenta retira uma menor quantidade de material da peça a medida que se aumenta o número de ferramentas na fresa, embora o volume total tenda a aumentar.

Para verificar estes resultados, foram realizados testes em aço ABNT 8640. Nestes testes, foi feito um mapeamento da progressão do desgaste em cada ferramenta individualmente e também a determinação do volume de material removido até que uma das ferramentas atingisse o critério de fim de vida. Estes dados são apresentados nas Tabelas 2 a 5.

Tabela 2- Vida da ferramenta e volume de material removido para o aço ABNT 8640 usando 1 ferramenta.

T(s)	171	182	292	358	378	439	469	499	535	585
VB(mm)	0,00	0,08	0,11	0,18	0,20	0,21	0,24	0,26	0,28	0,97
Vida da ferramenta até VB = 0,7 mm	9,42 min									
Volume de material removido até VB = 0,7 mm	60,074 cm ³									

Tabela 3- Vida da ferramenta e volume de material removido para o aço ABNT 8640 usando 2 ferramentas.

T(s)	15	45	63	88	118	148	196	221	236	251
VB1(mm)	0,07	0,10	0,11	0,12	0,13	0,16	0,18	0,18	0,47*	0,72
VB2(mm)	0,07	0,09	0,09	0,09	0,10	0,12	0,15	0,16	0,53*	0,54
Vida da ferramenta até VB = 0,7 mm	4,18 min									
Volume de material removido até VB = 0,7 mm	48,400 cm ³									

* Lascamento da aresta de corte.

Tabela 4- Vida da ferramenta e volume de material removido para o aço ABNT 8640 usando 3 ferramentas.

T(s)	67	89	136	178	225	235	245	255	267	283
VB1(mm)	0,00	0,00	0,07	0,08	0,14	0,16	0,38*	0,49	0,55	0,69
VB2(mm)	0,10	0,12	0,16	0,22	0,26	0,32	0,43	0,48	0,55	0,65
VB3(mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,04	0,04	0,22	0,25
Vida da ferramenta até VB = 0,7 mm	4,72 min									
Volume de material removido até VB = 0,7 mm	89,174 cm ³									

* Lascamento da aresta de corte.

Tabela 5- Vida da ferramenta e volume de material removido para o aço ABNT 8640 usando 6 ferramentas.

T(s)	13	18	29	34	44	73	89	97	102	112
VB1(mm)	0,08	0,10	0,11	0,13	0,13	0,15	0,15	0,35*	0,50	0,70
VB2(mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	0,35	0,41*	0,41	0,49
VB3(mm)	0,09	0,10	0,10	0,12	0,12	0,12	0,15	0,15	0,15	0,18
VB4(mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,03	0,03	0,09
VB5(mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
VB6(mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,09
Vida da ferramenta até VB = 0,7 mm	1,87									
Volume de material removido até VB = 0,7 mm	72,124 cm ³									

* Lascamento da aresta de corte.

Pode ser observado que a progressão do desgaste para o aço ABNT 8640 apresenta uma região de crescimento aproximadamente constante e lento até 0,2 mm. Na usinagem do aço ABNT 1045, este comportamento não foi observado. Provavelmente, este efeito foi devido à utilização de ferramentas de metal duro revestidas, cuja resistência ao desgaste é maior.

Valores de desgaste acima deste valor aumentam as forças e as temperaturas de corte, acelerando o desgaste das ferramentas. Este efeito pode ser causado pelo aumento do atrito

entre a superfície de folga da ferramenta e a peça com o aumento do desgaste. Como consequência, a ferramenta atinge rapidamente o fim de vida a partir deste ponto. O desgaste final foi, em certos casos, acelerado pela ocorrência de lascamentos na aresta de corte, provavelmente devido ao aparecimento de trincas térmicas provocadas pela variação cíclica da temperatura. As ferramentas que determinaram o fim de vida nos testes foram aquelas que sofreram lascamento (Tabelas 2 a 5).

Os resultados obtidos com o aço ABNT 8640 apresentaram a mesma tendência dos resultados obtidos com o aço ABNT 1045. De uma forma geral, a vida da ferramenta tende a diminuir e o volume de material removido tende a aumentar com o aumento do número de ferramentas na fresa.

Todos os resultados obtidos indicam que a utilização de um menor número de ferramentas na fresa em testes de usinabilidade pode ser feito, porém com o objetivo de comparar duas ou mais condições de usinagem. A viabilidade econômica destes testes alternativos deve ser analisada em termos de custos e tempo (hora/máquina/operador, sendo que quanto menor o número de ferramentas na fresa, maior tende a ser a vida da ferramenta), custos de material (menores números de ferramentas na fresa tendem a remover menor quantidade de material) e custo com as ferramentas de corte. A determinação da vida da ferramenta só pode ser feita nas próprias condições que se quer analisar, pois a alteração do número de ferramentas na fresa altera completamente as condições de desgaste das ferramentas de corte.

5. CONCLUSÕES

- 1- Os resultados dos testes utilizando-se um número menor de ferramentas do que a capacidade da fresa podem ser utilizados como índices de comparação de usinabilidade entre duas ou mais condições de usinagem.
- 2- Ensaios de usinabilidade feitos utilizando fresa com menos ferramentas do que a sua capacidade não podem ser considerados para a determinação da vida da ferramenta.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem ao Laboratório para o Estudo dos Processos de Usinagem da Universidade Federal de Uberlândia (LEPU/UFU) pelos equipamentos e materiais cedidos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bhatia, S.M., Pandey, P.C. and Shan, H.S., 1979, "Failure of Cemented Carbide Tools in Intermittent Cutting", Precision Engineering, IPC Business Press, pp. 148-152.
- Bohes, L., Borges, R. and Neto, E.D.S., 1994, "Fresamento de Superligas Constituídas de Alta Percentagem de Níquel e Outros Elementos", VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Chile, pp. 365-370.
- Chandrasekaran, H. and Thoors, H., 1994, "Tribology in Interrupted Machining: Role of Interruption Cycle and Work Material", Wear, 179, pp. 83-88.
- Eldem, S. and Barrow, G., 1976, "Tool Life in Interrupted Turning Operations", Israel Journal of Technology, Vol. 14, pp. 172-178.
- Machado, A.R. e Silva, M.B., 1999, "Usinagem dos Metais", Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil.

- Panato, J., Da Silva, M.B. e Machado, A.R., 1995, “Efeito do Número de Ferramentas Utilizado nos Testes de Usinabilidade no Processo de Fresamento”, XIII COBEM – Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, CD-ROM.
- Strolberg, J., 1994, “Fresamento: É Bom Reciclar os Conhecimentos sobre os Princípios do Processo”, Máquinas e Metais, Junho, pp. 36-55.
- Thusty, J. 1984, “Dynamics of High Speed Milling”, The Winter Annual Meeting of ASME, New Orleans, Louisiana, USA, 9-14 December, pp. 101-126.