



8º CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECANICA
Cusco, 23 a 25 de Outubro de 2007

INFLUÊNCIA DO TIPO DE INTERPOLAÇÃO NA VIDA DA FERRAMENTA DE CORTE NO FRESAMENTO DE ACABAMENTO DE SUPERFÍCIES COMPLEXAS EM TiAl6V4

Guilherme Oliveira de Souza*, Jefferson de Oliveira Gomes°, Rolf Bertrand Schroeter†

* SENAI CIMATEC, Salvador-BA, Brasil; ° ITA, São José dos Campos-SP, Brasil; † UFSC, Florianópolis-SC, Brasil

e-mail: * guilhermeos@cimatec.fieb.org.br; ° gomes@ita.br; † rolf@imp.ufsc.br

RESUMO

A usinagem de ligas de titânio é caracterizada pelo baixo tempo de vida das ferramentas de corte, inclusive em operações de acabamento. Um dos fatores que podem levar a uma piora desta condição é a variação do avanço durante o corte. O uso de interpolações lineares na usinagem de superfícies complexas leva freqüentemente a essa situação, uma vez que as linhas de comando do programa NC só fornecem os dados do ponto subsequente, fazendo com que a máquina muitas vezes não consiga acelerar até o avanço programado, tornando a usinagem truncada. Porém, se o CNC realiza interpolações avançadas, como polinomial ou por NURBS, a usinagem será muito mais suave, uma vez que cada linha de programação contém informações de um grande trecho da curva a ser descrita pela ferramenta, poupando a máquina de desacelerações e re-acelerações desnecessárias. Neste trabalho, uma superfície complexa de Ti6Al4V foi usinada com interpolações linear e polinomial e foram medidas a vida das ferramentas e a rugosidade das superfícies geradas.

PALAVRAS-CHAVE Interpolações complexas, titânio, CAM, fresamento.

INTRODUÇÃO

O titânio e suas ligas são materiais cujas propriedades físicas e mecânicas permitem que componentes fabricados a partir destes possam operar em ambientes hostis, e com severas exigências de confiabilidade e redução de massa.

Sua principal aplicação se dá nas indústrias aeronáutica e aeroespacial, pelo fato de aliarem uma alta resistência mecânica a uma baixa densidade, o que os confere um excelente valor estrutural, como também por serem capazes de manter essa boa resistência a elevadas temperaturas, e por terem boa resistência à fadiga, tornando-os ideais para peças de propulsores de aeronaves [1, 2]. Mas, seu uso também se dá em outros segmentos, como o químico, petroquímico e naval, para os quais o titânio se mostra atraente devido à sua ótima resistência à corrosão, assim como no campo da biomedicina, em próteses e instrumentos, que são beneficiados por sua biocompatibilidade e boas propriedades criogênicas [3, 4].

No entanto, apesar do vasto uso e produção do titânio, ele é caro com relação aos aços devido à complexidade do seu processo de extração, dificuldade de fusão e problemas que apresenta durante a fabricação. Por outro lado, as vidas de operação mais longas e operações mais econômicas de equipamentos contrabalanceiam os altos custos de produção [2].

Usinabilidade do titânio e suas ligas

Materiais à base de titânio têm a sua usinabilidade classificada como péssima, e isso se deve não apenas a uma característica específica, mas sim a um conjunto de fatores cuja interação incorre em um desgaste acelerado da ferramenta de corte, caracterizado principalmente por desgastes de flanco e cratera, acompanhados frequentemente por deformação plástica, entalhes, lascamentos e falha catastrófica [3, 5, 6]. Dentre estes fatores podemos destacar:

- ✓ capacidade do titânio de manter sua resistência mecânica a elevadas temperaturas – segundo Machado e Wallbank [2], apenas a partir de 800°C é observado um decréscimo considerável desta;
- ✓ baixa condutividade térmica, fazendo com que o calor gerado se acumule na região de corte e acelerando o desgaste e podendo levar à deformação plástica do gume [2, 3, 7, 8, 9, 10];
- ✓ alta resistência ao cisalhamento dinâmico, resultando em tensões de cisalhamento localizadas, e no surgimento de arestas abrasivas em forma de dentes de serra, o que estimula o desgaste por entalhe [3];
- ✓ baixo módulo de elasticidade, tornando a usinagem de ligas de titânio propensa a vibrações regenerativas da ferramenta, e fazendo com que geometrias esbeltas tendam a defletir pela ação das forças de corte, o que provoca vibrações na peça, “roçamento” da ferramenta e problemas de sobre ou sub-medidas [2, 7];
- ✓ cavaco formado muito junto ao gume, o que implica em uma pequena área de contato na face da ferramenta, que associada a forças de usinagem semelhantes às observadas para aços, provoca tensões elevadas na face da ferramenta, e tende a potencializar problemas relacionados com altas temperaturas [2, 7, 11, 12];
- ✓ intensa reatividade química a maiores temperaturas com os materiais de corte disponíveis no mercado, incluindo-se cerâmicas, diamante e CBN [12, 13];
- ✓ intenso desgaste por adesão, podendo sugerir até a existência de gume postiço, o que aceleraria ainda mais o desgaste e poderia prejudicar o acabamento das superfícies. No entanto, não há um consenso com relação à ocorrência deste fenômeno [2, 3, 11];

Por fim, Machado e Wallbank [2] recomendam precauções com respeito à tendência de ignição do titânio às altas temperaturas envolvidas. O que concorda com a observação de König apud Schroeter e Weingaertner [8], segundo a qual a reação do pó de titânio com o oxigênio do ar pode levar à crepitação ou à inflamação.

Interpolação de trajetórias de ferramenta no fresamento

Devido ao problema de excessivo consumo de ferramentas, diversas recomendações para a usinagem de titânio são encontradas na literatura. Uma delas é de especial interesse para esse trabalho, a de que é aconselhável manter o avanço o mais constante possível [14, 15].

Na usinagem de superfícies complexas com o auxílio de sistemas CAM, tradicionalmente as trajetórias de ferramenta são geradas pelo método de interpolação linear. Neste, a trajetória da ferramenta é definida pelo concatenamento de uma série de segmentos de reta que melhor representam o contorno da superfície a ser usinada, como ilustra a fig. 1. Este método é caracterizado por sua simplicidade matemática, o que o faz ser o mais comum na geração de trajetórias de ferramentas.

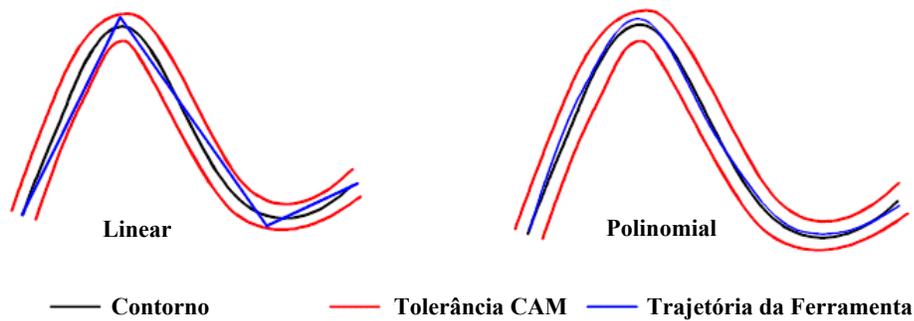


Figura 1: Tipos de interpolação para geração da trajetória da ferramenta.

A preocupação com relação à manutenção da constância da velocidade do avanço nestes casos se justifica pelo fato de que fresamento de superfícies complexas com interpolação linear é caracterizado por ser truncado. Trajetórias de ferramentas baseadas em segmentos de retas têm transições não contínuas e mudanças bruscas de direção. Para garantir a precisão geométrica da peça, é preciso que o CNC desacelere a ferramenta quando passa de um segmento para outro com direção distinta, situação comum em superfícies complexas, reduzindo a velocidade de avanço dos eixos. Além disso, uma vez que as linhas de comando do programa NC só fornecem os dados do ponto subsequente, muitas vezes a máquina não consegue acelerar até o avanço programado.

Isto pode ser amenizado se o CNC possuir um bom *look ahead* e um baixo tempo de processamento de bloco (TPB). Porém, se este consegue ler programas com funções de interpolação avançada como polinomial ou por NURBS, a usinagem será muito mais suave, uma vez que cada linha de programação contém informações de um grande trecho da curva a ser descrita pela ferramenta, poupando a máquina de desacelerações e re-acelerações desnecessárias [16].

O método de interpolação polinomial determina a trajetória da ferramenta através de uma sucessão de polinômios de mesmo grau, suavizando as transições e consequentemente aprimorando a qualidade superficial e a fidelidade de forma.

Interpolação linear x Interpolação polinomial

Com base nesses fatores, foi definido um experimento em que são comparados os efeitos na duração da vida das ferramentas quando se usina uma superfície complexa por fresamento com interpolação linear e com interpolação polinomial.

Especulava-se que o caráter oscilatório do avanço na usinagem com interpolação linear, em que a ferramenta acelera e desacelera com frequência, pudesse reduzir a vida da ferramenta, quando comparada com a vida de uma ferramenta usada em um fresamento com interpolação polinomial.

Acredita-se que, com um movimento mais suave, a ferramenta ficaria menos suscetível à vibração, e que, além disso, com o avanço mais constante, poder-se-ia conseguir, além da já comprovada economia de tempo, um ganho na vida da ferramenta, uma vez que os dois fatores citados são problemáticos na usinagem de titânio.

Fundamentou este experimento um outro realizado por Silva [17], em que é analisado o comportamento dinâmico dos eixos de um centro de usinagem durante o fresamento com três diferentes tipos de interpolação, linear, circular e polinomial.

MATERIAIS

O material da peça usinada foi obtido a partir de um retalho de placas laminadas da liga TiAl6V4.

A usinagem foi realizada no centro de usinagem em 5-eixos, Hermle C600U, cuja velocidade máxima de fuso é de 15000 rpm e velocidade de avanço máxima programável de 35 m/min. É equipado com o CNC Siemens Sinumerik 840D e seu acoplamento de ferramenta é do tipo HSK 63. A modelagem e programação da peça foram executadas com o auxílio do UGS Unigraphics NX 3.0.

Foi utilizada uma fresa de topo esférico e pastilha intercambiável, de 16 mm de diâmetro, dois dentes e haste cônica de metal-duro, fabricada pela Sandvik Coromant, código R216F-16A20C-100. Os insertos foram do tipo R216F-1640E-L de metal-duro microgrão classe P10A recoberto com TiAlN pelo método PVD. A ferramenta foi fixada por um mandril de arraste de precisão do tipo Corogrip, de código 392.410HM-63 20 083, também fabricado pela Sandvik Coromant.

Para as medições de rugosidade foi empregado o rugosímetro Mitutoyo SJ-201P, e para as de desgaste de ferramenta foi utilizado um microscópio Wild M3C, Type-S, da Heerburg Switzerland, capaz de ampliações de até 40x, com uma câmera de vídeo colorida JVC TK-C1380 acoplada. Esta está ligada a um computador com placa de captura de vídeo, com o qual são tiradas as fotografias para posterior medição. Através do programa Leica Qwin Pro V2.2, as imagens foram obtidas e as medições procedidas.

MÉTODOS EXPERIMENTAIS

A geometria complexa da Fig. 2 foi desenvolvida por Silva para possibilitar seu estudo comparativo dos diferentes tipos de interpolação, e foi adotada também neste trabalho para os experimentos de medição de vida de ferramenta.

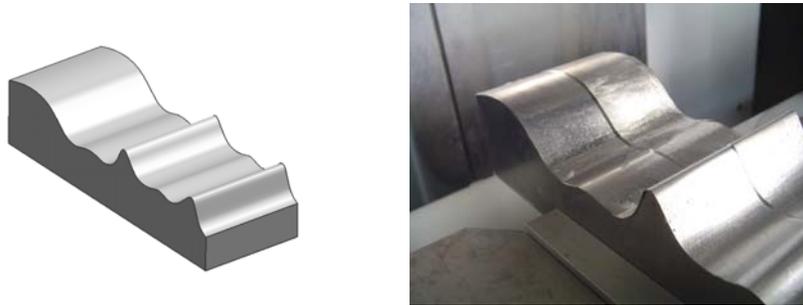


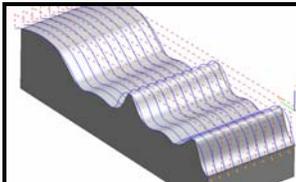
Figura 2: Superfície complexa desenvolvida para comparar tipos de interpolação.

Silva [17], em seus testes realizados em alumínio, encontrou que o pior caso, do ponto de vista da cinemática, foi o de interpolação linear com uma tolerância CAM de 0,025 mm, enquanto o melhor ocorreu para a interpolação polinomial com uma tolerância de 0,001 mm. A disparidade de suavidade de movimentos e evolução de avanços foi tamanha, que a primeira condição levou a um tempo 1,88 vezes maior que a segunda para usinar o mesmo comprimento de trajetória. Se fosse levada em conta uma mesma tolerância, ainda assim a interpolação polinomial seria consideravelmente célere, com um tempo 20 % menor que a linear, para uma tolerância de 0,001 mm.

No entanto, como o intuito era avaliar uma possível redução de vida da ferramenta que seria imposta por um fresamento “travado”, considerou-se uma comparação entre a pior e a melhor condição a decisão mais sensata.

Assim, uma peça em titânio TiAl6V4 foi usinada com passes paralelos na direção indicada na Tab.1, e com sentido de corte concordante. Na mesma tabela encontram-se expostos também os parâmetros de corte.

Tabela 1: Direção do avanço da ferramenta e parâmetros de corte.

	Parâmetros de Corte	
	N (rpm)	15000
f_z (mm)	0,1	
a_p (mm)	0,2	
a_e (mm)	0,2	

Estes parâmetros foram definidos tomando-se como base a literatura [8, 14] e testes de fresamento de titânio realizados em oportunidades anteriores [5]. Foi utilizada a maior velocidade de rotação do fuso, o que implicou em uma v_c efetiva máxima de 193 m/min. Apesar dessa velocidade estar muito acima do recomendado, constatou-se em pré-testes que o aumento até o ponto definido não alterou o mecanismo de desgaste da pastilha de metal-duro, se limitando a acelerá-lo. A aplicação dos valores recomendados implicaria em ensaios prolongados, requerendo uma disponibilidade de máquina além do possível.

Durante todo o experimento foi utilizado fluido de corte em abundância, devido ao risco de ignição imposto pelo cavaco de titânio. Apenas uma repetição foi executada para este ensaio.

Para a avaliação da vida das ferramentas foram realizadas sessões de medição de desgaste de flanco ao final da usinagem de cada meia face, ou seja, a cada 42,9 m de comprimento de fresamento. Os critérios de fim de vida foram

de $VB = 0,2$ mm e $VB_{máx} = 0,3$ mm, e em cada seção de medição, uma amostra de três medições de desgaste de flanco era coletada na região de maior desgaste, para cada um dos gumes da ferramenta. Os valores usados para comparação e para descarte do inserto foram sempre os do gume que apresentava o maior desgaste. A ampliação utilizada no microscópio foi de 25x.

Medições de rugosidade também foram feitas, no início e no fim da vida de cada inserto. O parâmetro para avaliar a qualidade das superfícies usinadas foi a rugosidade média aritmética R_a . O perfil medido foi o R, tratado pelo filtro gaussiano PC50, ISO 11562 de 1996. Os comprimentos de amostragem e de avaliação foram definidos segundo a norma ISO, que estabelece que, para uma faixa de $0,1 < R_a \leq 2$ μm , estes devem ser 0,8 mm e 4 mm, respectivamente. Amostras de três medições em distintas regiões da superfície foram coletadas em cada sessão de medição.

No que diz respeito às análises estatísticas e comparações entre valores, foi utilizado o teste de hipóteses para desvio padrão σ da população desconhecido, para confiabilidade de 95%. Os gráficos da seção de resultados contêm um traço vertical correspondente ao seu intervalo de confiança para a mesma confiabilidade.

RESULTADOS

O uso da interpolação linear resultou, como esperado, em uma usinagem truncada. Prova disso é o fato do avanço programado não ter sido atingido em momento algum durante todo o percurso.

Mas, para as condições programadas, os resultados mostram que não se pode afirmar que isto trouxe prejuízos à vida da ferramenta. A Fig. 3 expõe os valores médios de vida encontrados associados aos seus intervalos de segurança.

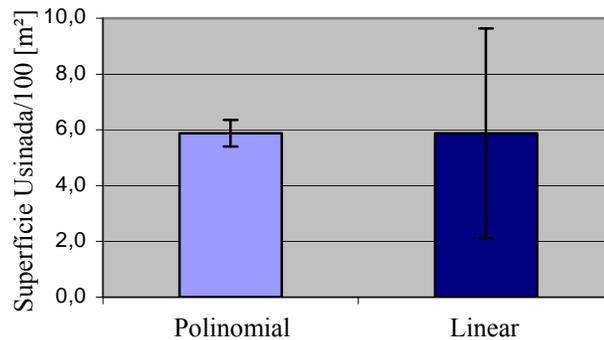


Figura 3: Vida da ferramenta para as interpolações linear e polinomial, em termos de superfície usinada total.

Entretanto, se a aplicação da interpolação polinomial na usinagem de superfícies complexas em titânio for analisada pelo quesito acabamento da superfície obtido, percebe-se um ganho com relação ao tipo de interpolação utilizado tradicionalmente. Esta melhora se torna ainda maior na medida em que a ferramenta vai ficando desgastada. Isto é o que se pode concluir do gráfico da Fig. 4.

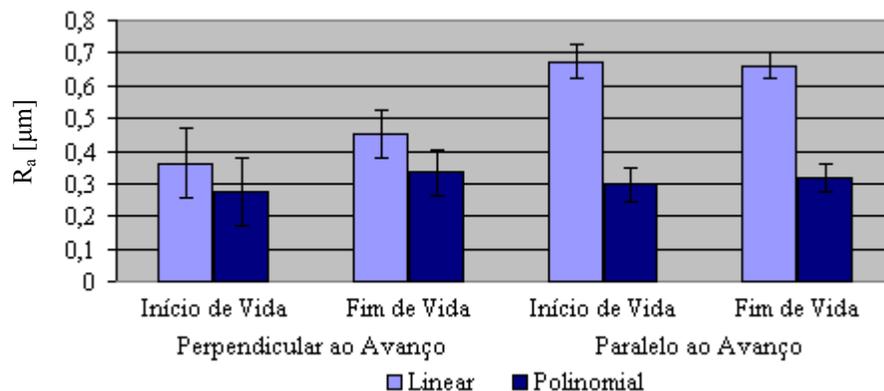


Figura 4: Rugosidade média aritmética R_a da superfície usinada na comparação dos tipos de interpolação.

Já quando os valores de R_a medidos no início e no fim da vida da ferramenta, para um mesmo tipo de interpolação, são confrontados, não se pode afirmar que houve diferenças na qualidade da superfície usinada.

A Tab. 2 apresenta os valores de rugosidade encontrados neste experimento. Há nela uma referência à existência de adesão. Durante o ensaio, a superfície apresentou intensa adesão de cavaco à peça, mas não ao longo de toda a superfície, apenas nas regiões em que a fresa descrevia um movimento ascendente. Devido a isso, as medições foram executadas em ambas as áreas.

Tabela 2: Rugosidade média aritmética R_a da superfície usinada na comparação dos tipos de interpolação.

	Linear						Polinomial					
	Perpendicular				Paralelo		Perpendicular				Paralelo	
	sem adesão		com adesão		Início	Fim	sem adesão		com adesão		Início	Fim
	Início	Fim	Início	Fim			Início	Fim	Início	Fim		
1	0,49	0,45	1,76	0,45	0,67	0,64	0,23	0,26	0,38	0,83	0,27	0,33
2	0,25	0,37	1,54	0,63	0,68	0,62	0,23	0,42	1,40	1,70	0,34	0,34
3	0,26	0,37	1,49	0,93	0,66	0,73	0,31	0,28	2,73	1,31	0,28	0,30
4	0,35	0,51	1,06	1,03	0,68	0,66	0,36	0,34	0,96	0,53	0,30	0,27
5	0,46	0,52	0,58	0,70	0,65	0,68	0,31	0,33	1,03	0,41	0,31	0,34
6	0,37	0,50	0,58	0,75	0,69	0,64	0,20	0,37	0,49	0,97	0,29	0,32
σ	0,099	0,069	0,509	0,209	0,021	0,039	0,062	0,059	0,853	0,485	0,025	0,027
Média	0,36	0,45	1,17	0,75	0,67	0,66	0,27	0,33	1,17	0,96	0,30	0,32

Valores em μm

A rugosidade nas regiões onde houve caldeamento de cavaco foi consideravelmente maior que nas outras e, inclusive, não se pode afirmar que há diferenças entre a qualidade das superfícies obtidas no início e no fim da vida da ferramenta, para os dois tipos de interpolação, como mostra a Fig. 5.

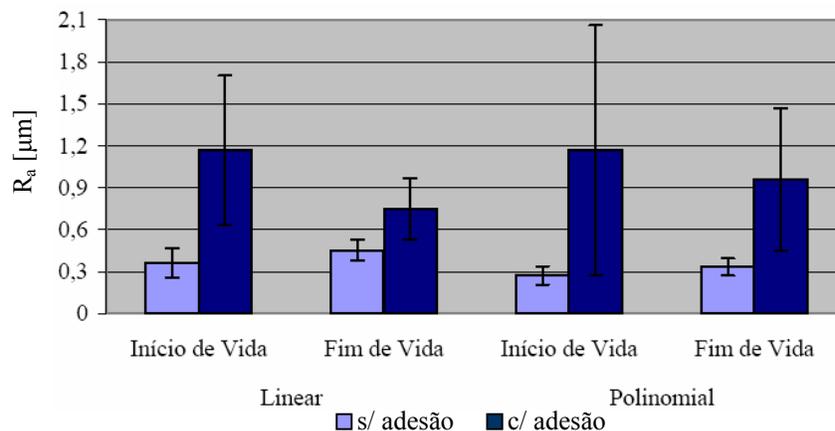


Figura 5: Rugosidade média aritmética R_a nas regiões onde houve adesão e onde não.

Apesar da rugosidade para a interpolação linear ter sido maior, os dois tipos de interpolação apresentaram resultados satisfatórios, com R_a sempre abaixo de $1 \mu\text{m}$, excetuando-se as regiões em que houve adesão.

CONCLUSÕES

Conclui-se, a partir deste trabalho, que para o acabamento de peças de titânio com fresas de topo esférico, a interpolação linear se mostra tão adequada quanto a polinomial. As maiores suavidade e constância de avanço providas não trouxeram os esperados benefícios à vida da ferramenta. No que diz respeito à rugosidade, os valores obtidos para este tipo de interpolação foram de fato menores, porém o acabamento das superfícies usinadas com a interpolação linear se manteve em um nível satisfatória, com R_a nunca atingindo $1 \mu\text{m}$.

Desta forma, a única vantagem que a interpolação polinomial poderia prover seria a possibilidade de ganhos de produtividade, uma vez que a velocidade de avanço apresenta uma maior constância, eliminando tempos perdidos com acelerações e desacelerações desnecessárias. Porém seria necessário um estudo de viabilidade para checar se os ganhos de tempo compensariam o investimento em um comando com esta função, principalmente se forem levadas em conta as baixas velocidades normalmente envolvidas na usinagem de titânio.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à EMBRAER por gentilmente ceder os retalhos da liga de titânio usinada e à Sandvik Coromant pelo fornecimento da ferramenta, mandril e insertos utilizados.

NOMENCLATURA

a_e	penetração de trabalho (mm)
a_p	profundidade de corte (mm)
f_z	avanço por dente (mm)
N	velocidade de rotação da ferramenta (rpm)
R_a	rugosidade média aritmética (μm)
VB	desgaste de flanco (mm)
$VB_{\text{máx}}$	desgaste de flanco máximo (mm)
v_c	velocidade de corte (m/min)

REFERÊNCIAS

1. C.A.A. Cairo, C.R.M. Silva, e V.A.R. Henriques, Produção de Titânio Metálico no Brasil, *Anais do XVI Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, [S.l. : s.n], 2004.
2. A.R. Machado, J. WALLBANK, Machining of titanium and its alloys – a review, *Journal of Engineering Manufacture*, [S.l.]: Proc. Instn. Mech. Engrs., vol. 204, Part B, pp. 53-60, 1990.
3. E.O. Ezugwu, J. Bonney, Y. Yamane, An overview of the machinability of aeroengine alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, [S.l.]: Elsevier, vol. 134, pp. 233-253, 2003.
4. N. Narutaki, A. Murakoshi, Study on machining of titanium alloys, *Annals of the 33th CIRP*, vol. 32/1/1983, pp. 65-69, 1983.
5. G.O. Souza, Fresamento em 5-eixos Simultâneos de Pás de Compressores de Turbinas a Gás em TiAl6V4, mestrado, dissertação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2006.
6. R. Komanduri, M. Lee, M. High-speed machining of titanium alloys with a new cutting tool insert: the ledge tool, *Proceedings of The 1984 ASME Winter Annual Meeting*, [S.l. : s.n], 1984.
7. Sandvik Coromant, Titanium machining – application guide, Sandviken: AB Sandvik Coromant, 2004.
8. H. Hong, A.T. Riga, J.M. Cahoon, C.G. Scott, Machinability of steels and titanium alloys under lubrication, *Wear*, vol. 162-164, pp. 34-39, 1993.
9. A.R. Machado, J. Wallbank, Usinagem de Ti6Al4V com um sistema de aplicação do fluido de corte a alta pressão, *Revista Brasileira de Ciências Mecânicas*, vol. 16, n.1, pp. 75-93, 1992.
10. L.V. Colwell, W.C. Truckenmiller, Cutting characteristics of titanium and its alloys, *Mechanical Engineering*, vol. 75, pp. 461-466, 1953.
11. P.A. Deanrley, A.N. GREARSON, Evaluation of principal wear mechanisms of cemented carbides and ceramics used for machining titanium alloy IMI 318, *Materials Science and Technology*, vol. 2, pp. 47-58, 1986.
12. R. Komanduri, W.R. Reed Jr., Evaluation of carbide grades and a new cutting geometry for machining titanium alloys, *Wear*, vol. 92, pp. 113-123, 1983.
13. R.B. Schroeter, W.L. Weingaertner, Tecnologia da usinagem com ferramentas de corte de geometria definida – parte 1, apostila, 352p, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, 2002.
14. Hanita, Take a bit out of titanium, *página eletrônica*, disponível em <http://www.hanita.com/hanita_protected/hanita-art3.htm>, Acesso em 2 out, 2005.
15. RTI International Metals Inc., Machining titanium, *página eletrônica*, disponível em <<http://www.rtiintl.com/tag/machine.htm>>, Acesso em 2 out, 2005.

16. A.F. Souza, Contribuições ao fresamento de geometrias complexas aplicando a tecnologia de usinagem em altas velocidades, Tese, doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2004.
17. A.S.A. Silva, Desenvolvimento Integrado CAD/CAM de componentes para turbinas a gás, mestrado, dissertação, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, São Paulo, 2006.