

ESTRATÉGIAS DE USINAGEM PARA FRESAMENTO EM 5-EIXOS SIMULTÂNEOS DE PÁS DE TURBINAS A GÁS EM TiAl6V4

Guilherme Oliveira de Souza

ITA/CCM (Centro de Competência em Manufatura), Praça Marechal Eduardo Gomes, 50
12228-900 - São José dos Campos - SP
golsouza@ita.br

Jefferson de Oliveira Gomes

ITA/CCM (Centro de Competência em Manufatura), Praça Marechal Eduardo Gomes, 50
12228-900 - São José dos Campos - SP
gomes@ita.br

Rolf Bertrand Schroeter

LMP – Laboratório de Mecânica de Precisão, UFSC. Campus Universitário, Trindade, EMC
Caixa Postal: 476, 88010-970 - Florianópolis - SC
rolf@lmp.ufsc.br

Resumo. *Este trabalho aborda a aplicação do fresamento em 5-eixos simultâneos à fabricação de pás de rotores monolíticos (BLISK) de turbinas a gás. Usinou-se uma peça-teste, uma seção de um BLISK de compressor real de TiAl6V4 contendo cinco pás, buscando-se encontrar a melhor estratégia de usinagem para o acabamento de peças como estas. Foi utilizado um sistema CAM comercial para a geração de trajetórias de ferramentas seguindo cinco diferentes estratégias. Os critérios para avaliar a efetividade de cada uma das trajetórias geradas foram o tempo de usinagem, a qualidade das superfícies obtidas, a integridade da geometria e a rigidez de processo. Concluiu-se que fresar uma pá contornando-a, seguindo suas curvas paramétricas na direção axial do disco, é a melhor estratégia.*

Palavras-chave: *fresamento em 5-eixos, ligas de titânio, usinagem, BLISK, CAM*

1. INTRODUÇÃO

Rotores de turbinas a gás para geração de energia, assim como de propulsores aeronáuticos, são componentes caracterizados por sua complexidade de geometria e, conseqüentemente, de fabricação. Suas características geométricas, e materiais de que são compostos podem variar, mas, de maneira geral, tratam-se de discos com diversas pás agregadas à sua periferia.

Originalmente são fabricados decompostos em um disco e suas pás, e depois esses componentes são acoplados mecanicamente⁽¹⁾, no entanto, há a possibilidade de se fabricar peças semelhantes, na forma de peça monolítica, são os chamados BLISK's. O termo BLISK é um acrônimo da expressão em inglês *bladed disk*, ou disco de pás. As maiores vantagens dessa forma de construção são redução de peso, aumento da resistência e durabilidade, além do aprimoramento da eficiência aerodinâmica e da redução de perdas no sistema de ar⁽¹⁾. A dificuldade de fabricação destas peças inteiriças é ainda maior, devido a apresentarem regiões de difícil acessibilidade e problemas de estabilidade. Os processos tradicionalmente aplicados para este fim são a usinagem eletroquímica e o fresamento em 5-eixos simultâneos⁽²⁾.

A depender do estágio da turbina em que se encontram os rotores, eles podem ser submetidos a altos carregamentos mecânicos e térmicos, fazendo com que eles devam ser fabricados a partir de

materiais resistentes a essa condição de operação, dentre os quais, se destacam para este fim as ligas de titânio e as ligas a base de níquel, caracterizadas por uma difícil usinabilidade⁽³⁾.

As ligas de titânio, especificamente, são utilizadas, em turbinas, nos compressores de alta e baixa pressão, em componentes sujeitos a altos carregamentos centrífugos como rotores e pás. Tomando como referência a aviação, atualmente estas ligas correspondem a 30% da massa total dos propulsores em aeronaves comerciais e a 40% em aviões militares⁽⁴⁾.

Na manufatura de BLISK's de titânio, os maiores desafios se encontram na usinagem das pás, que impõem problemas de acessibilidade e rigidez, e na matéria-prima que apresenta peculiaridades em sua usinagem que resultam em um rápido desgaste de ferramenta e riscos de vibrações.

Assim, o objetivo deste trabalho foi definir a melhor estratégia de acabamento para o fresamento em 5-eixos simultâneos das pás de rotores inteiriços, em TiAl6V4. Os critérios para avaliar a efetividade das trajetórias geradas por cada estratégia foram o tempo de usinagem, a qualidade das superfícies obtidas, a integridade da geometria e a rigidez de processo.

2. MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Uma peça-teste contendo cinco pás foi definida tomando-se como base as pás de um BLISK de um compressor real, com 353 mm de diâmetro. A Figura 1 apresenta a peça acompanhada de um detalhamento das curvas de origem das pás.

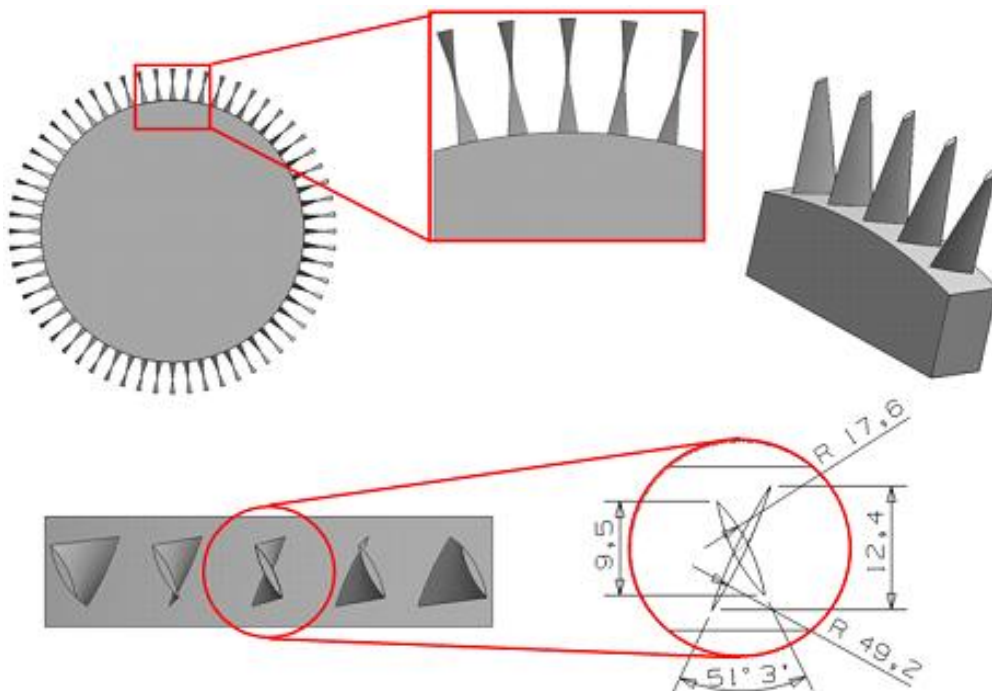


Figura 1. Peça-teste contendo 5 pás

Objetivando uma aproximação ainda maior da situação real, um dispositivo especial de fixação foi construído. Para o fresamento em 5-eixos simultâneos de um disco de pás, o disco foi montado na mesa de modo a coincidir seu centro com o centro de rotação da mesa rotatória (Figura 2).

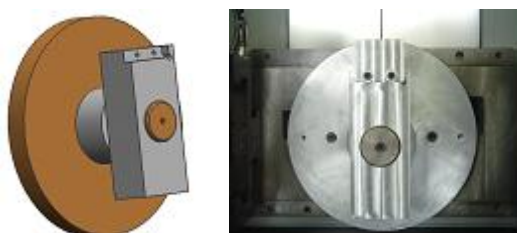


Figura 2. Dispositivo de fixação para a usinagem da peça-teste.

A máquina-ferramenta em que a peça foi usinada é o centro de usinagem em 5-eixos HSM modelo C 600 U, fabricado pela empresa alemã Hermle, com CNC Siemens 840D.

A fresa utilizada para o acabamento das pás foi uma inteiriça de metal-duro classe 1610 da Sandvik Coromant e código de fabricante R216.42-08030-AP08G.

O sistema CAD/CAM no qual as peças foram modeladas e as usinagens programadas foi o Unigraphics NX3 da empresa UGS.

Definidas as ferramentas e as condições de fixação da peça passou-se à etapa de programação CAM. As cinco estratégias que seriam comparadas foram determinadas em um pré-teste em que a peça em questão foi usinada em alumínio. Várias alternativas de programação foram consideradas, geradas, simuladas e, algumas, testadas na peça de alumínio, e então cinco foram classificadas como plausíveis para o fim determinado. Em três delas, a usinagem foi dividida em etapas. Por esta divisão entenda-se que o fresamento da pá foi seccionado em porções iguais na direção da cabeça para o pé. As escolhidas foram:

- 1) Desbaste e pré-acabamento de todo um lado da pá seguido do seu acabamento, para depois desbastar, pré-acabar e acabar todo o lado oposto.
- 2) Acabamento direto, dispensando o desbaste e o pré-acabamento, em quatro etapas, com os dois lados da pá sendo fresados alternadamente;
- 3) Fresamento das pás dividido em duas etapas. Na primeira os dois lados da metade superior da pá são desbastados, pré-acabados e acabados. Na segunda, o mesmo processo é repetido para a metade restante da pá;
- 4) Semelhante ao anterior, porém a pá é dividida em três partes para serem usinadas em três etapas;
- 5) Desbaste e pré-acabamento de ambos lados da pá, e acabamento com a ferramenta contornando a mesma.

A comparação entre as estratégias foi feita confrontando-se a rugosidade das superfícies usinadas, o tempo de usinagem e a rigidez de processo, através da observância de possíveis marcas de vibração e ocorrência de rebarbas.

O desbaste de todos os vãos em que este foi requerido foi feito em 3+2 eixos e no pré-acabamento foram utilizadas as mesmas estratégias adotadas para o acabamento, modificando-se apenas a ferramenta utilizada, e aumentando-se os valores de incremento entre passadas e tolerância CAM. O sobremetal deixado por esta operação foi de 0,5 mm para todas as pás, excluindo-se a 2.

Para a geração de todas as trajetórias de acabamento, o método utilizado para a sua distribuição foi o isoparamétrico, ao passo que o método de orientação foi o da ferramenta inclinada. As curvas isoparamétricas escolhidas para nortear o processo de geração foram as curvas que seguem a direção u da Figura 3.

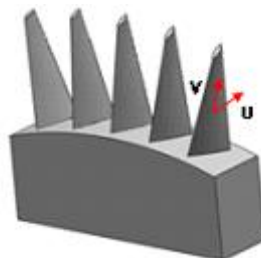


Figura 3. Direção das curvas u e v das superfícies das pás no campo paramétrico.

Foi utilizada a mesma estratégia CAM da primeira à quarta pá. As diferenciações se ativeram ao número de subdivisões estipulado, à ordem que as operações seguiram e, para a segunda pá, ainda houve uma mudança nos parâmetros de corte por sua estratégia global adotar a etapa de acabamento como única. O modelo das trajetórias geradas pode ser conferido na Figura 4. Para possibilitar a

usinagem das pás por completo, e de maneira uniforme, foi necessário criar uma superfície auxiliar para cada lado desta, e estendê-las nas direções u e v .

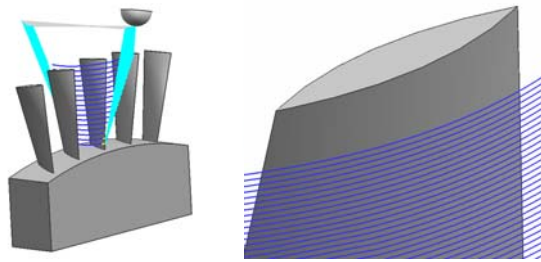


Figura 4. Modelo das trajetórias de ferramenta utilizadas da primeira à quarta pá.

Esta superfície auxiliar foi utilizada como superfície guia (*drive surface*) para a geração das trajetórias. Imagens do percurso da ferramenta no fresamento da pá 1 podem ser conferidas na Figura 5.

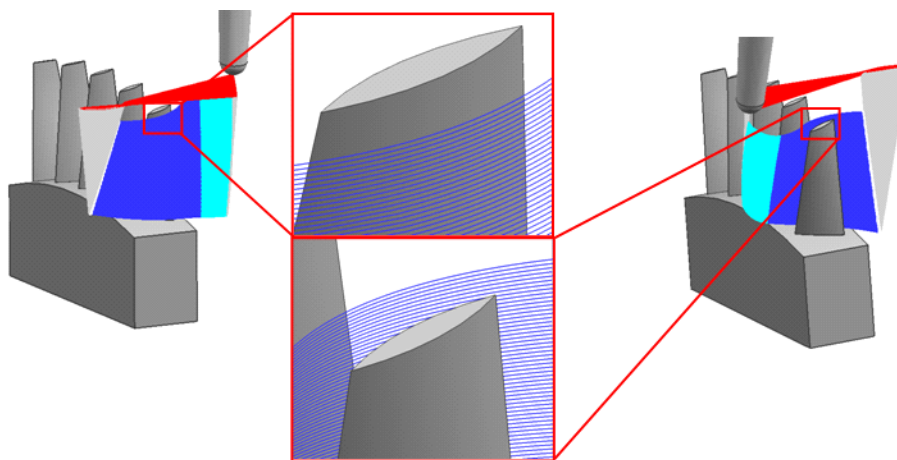


Figura 5. Trajetórias de ferramenta da pá 1.

Todas as trajetórias geradas foram submetidas à edição. Apesar do CAM respeitar a integridade das superfícies de verificação definidas, ao se aproximar do pé da pá, trajetórias desnecessárias eram geradas, e, portanto, foram removidas.

Edição de trajetórias também foi o artifício utilizado para se obter os programas em que houve subdivisão da usinagem de acabamento em etapas. Copiar as trajetórias e cortá-las se mostrou mais confiável que dividir as superfícies, uma vez que estas apresentavam movimentos confusos e marcas nas regiões de transição de superfícies. A Figura 6 mostra trajetórias para a usinagem das pás 2, 3 e 4, após a edição.

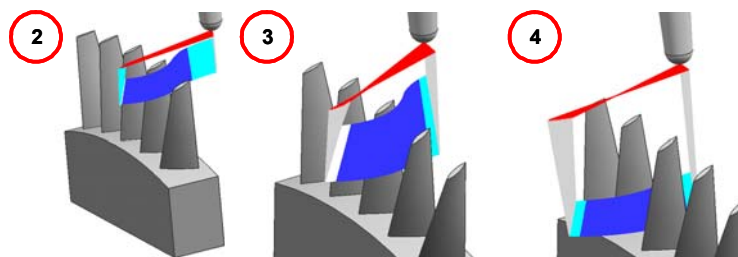


Figura 6. Trajetórias de ferramenta utilizadas na usinagem das pás 2, 3 e 4.

A estratégia CAM aplicada à quinta pá foi semelhante à descrita, porém uma outra superfície auxiliar foi modelada, contendo os dois lados da pá, e foi utilizada como guia. A Figura 7 mostra a trajetória em questão.

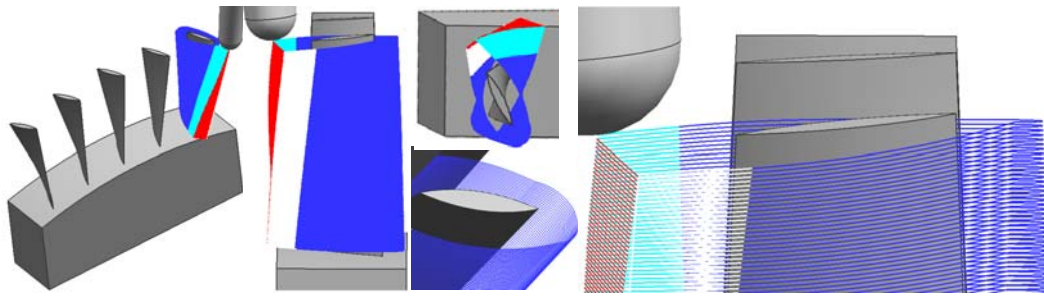


Figura 7. Trajetória de ferramenta para a usinagem da pá 5.

Em todas as ocasiões a distância entre passadas adjacentes foi de 0,2 mm, e os ângulos β e α foram 0° e 70° respectivamente. Estes ângulos são os parâmetros que definem a orientação do eixo da fresa com relação à peça a ser usinada, ambos são medidos a partir do vetor normal local da superfície. O ângulo de avanço β é medido no plano formado pela direção de avanço da ferramenta e o vetor normal da superfície, enquanto o ângulo de ataque α é medido no plano definido por este mesmo vetor e a direção perpendicular a de avanço⁽⁵⁾. A Figura 8 mostra as inclinações que podem ser programadas.

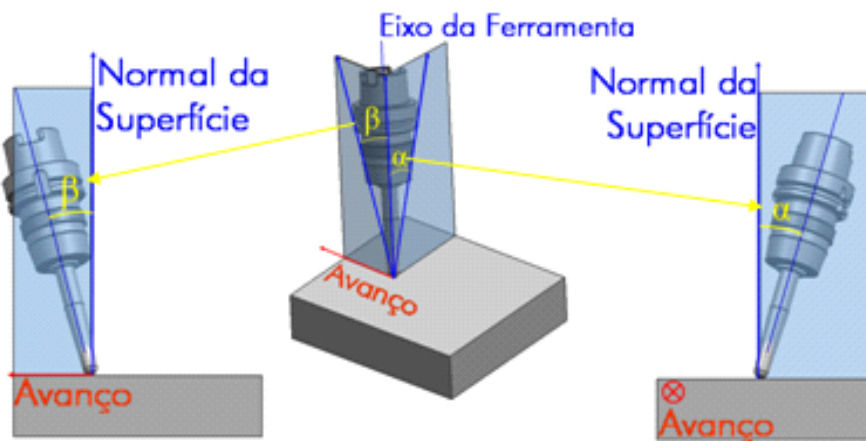


Figura 8. Inclinações da ferramenta no fresamento em 5-eixos simultâneos.

Quanto menores forem os ângulos, maior o risco de interferência de corte, mas em contrapartida, quanto maiores forem estes, maiores cristas serão geradas, aumentando a necessidade de passes adicionais⁽⁶⁾.

A velocidade de corte v_c foi de 65 m/min para a pá 2 e de 120 m/min para as restantes, o avanço por dente f_z foi de 0,1 mm e o sentido de corte concordante em todos os casos. Reduções de avanço de 30% foram programadas para os movimentos de entrada e saída da ferramenta.

O acabamento do pé das pás foi feito da mesma forma para todas. O método foi o de acabamento de superfície de fundo (*floor surface*), neste caso a região cilíndrica do disco localizada onde a pá está ancorada, com a periferia da ferramenta sendo guiada pelas superfícies de parede (*wall surfaces*), no caso, as superfícies da pá, como indica a Figura 9. Nesta ainda há uma imagem do resultado da verificação gráfica desta usinagem em duas pás vizinhas.

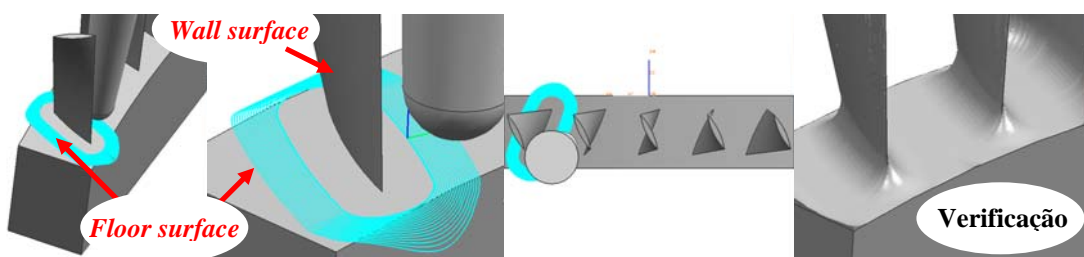


Figura 9. Trajetória de acabamento do pé das pás.

Por fim, as medições de rugosidade foram tomadas em seis pontos de cada pá, sendo um na região superior, outro na central, e outro na região do pé, de cada lado da pá, como ilustrado na Figura 10.

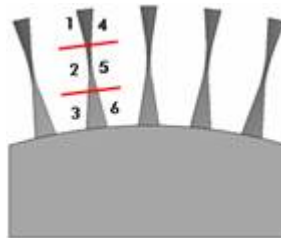


Figura 10. Pontos de medição de rugosidade e montagem da peça para medições.

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.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As rugosidades R_a e R_z alcançadas nas superfícies das pás são apresentadas na Tabela 1, e a rugosidade média aritmética R_a destas pás está disposta em forma de gráfico de barras, associada ao seu intervalo de confiança, na Figura 11, para possibilitar uma melhor comparação entre os resultados.

Tabela 1. Rugosidades R_a e R_z das pás da seção de BLISK.

	Pá 1		Pá 2		Pá 3		Pá 4		Pá 5	
	R_a	R_z	R_a	R_z	R_a	R_z	R_a	R_z	R_a	R_z
1	0,50	2,66	0,65	2,81	0,64	4,00	0,72	4,32	0,66	3,83
2	0,46	2,44	0,54	2,55	0,58	3,65	0,74	3,81	0,45	2,72
3	0,74	4,00	0,80	4,26	0,71	3,79	0,96	4,85	0,80	4,39
Esquerda	0,57	3,03	0,66	3,21	0,64	3,81	0,81	4,33	0,64	3,65
1	0,74	3,69	0,50	2,53	0,74	4,22	0,87	4,89	0,69	3,90
2	0,50	3,11	0,46	2,37	0,95	5,30	0,60	3,56	0,76	3,99
3	1,04	6,05	0,80	4,12	0,80	4,64	1,39	6,62	0,66	3,47
Direita	0,76	4,28	0,59	3,01	0,83	4,72	0,95	5,02	0,70	3,79
σ	0,223	1,313	0,150	0,852	0,130	0,614	0,279	1,093	0,122	0,571
Média	0,66	3,66	0,63	3,11	0,74	4,27	0,88	4,68	0,67	3,72

Valores em μm

Fazendo o confronto entre as pás, através de teste de hipóteses para desvio padrão σ da população desconhecido, e confiabilidade de 95%, é possível afirmar apenas que a rugosidade da pá 2 foi menor que a da pá 4.

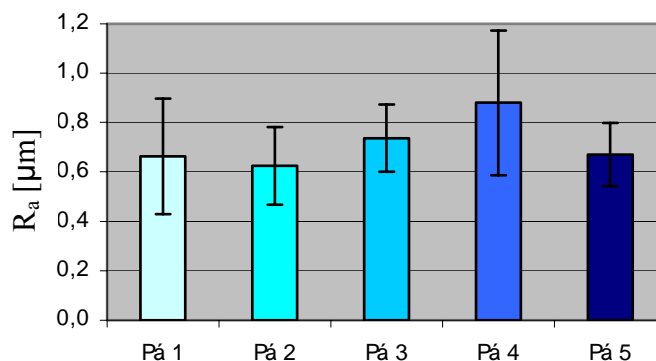


Figura 11. Rugosidade média aritmética R_a das pás da peça-teste.

A pá 1, para qual todas as três etapas, desbaste, pré-acabamento e acabamento, foram realizadas em um dos lados, para depois serem realizadas do outro lado, apresentou um bom acabamento. Entretanto, esta superfície apresentou marcas de interferência de corte, cuja provável origem foram as trajetórias geradas no CAM (Figura 12).



Figura 12. Lado esquerdo da pá 1 após o seu acabamento.

Já durante a usinagem da superfície oposta desta mesma pá, ruídos ocorreram durante a usinagem, devido à falta de rigidez da geometria esbelta que estava sendo fresada, resultando em marcas de vibração presentes na região superior da superfície gerada. Houve também a remanescência de rebarbas. Neste caso, paredes finas devem ser fresadas com passes alternando-se os lados entre uma passada e outra, com incrementos de 0,5 a 2 vezes o diâmetro da fresa⁽⁷⁾.

As estratégias aplicadas às pás 3 e 4 foram alternativas que seguiram esta linha de raciocínio. Na terceira a usinagem foi dividida em duas etapas, enquanto para a quarta as subdivisões foram três, o que possibilitaria um aumento de rigidez pela diminuição do comprimento da forma esbelta. O uso do artifício de divisão da usinagem apenas diminuiu o nível de ruído e a quantidade de rebarba, quanto à rugosidade não se pode afirmar que houve melhoras (Figura 13).



Figura 13. Rebarba e marcas de vibração deixadas nas pás.

Para a pá 2, cuja rugosidade foi a menor encontrada, a estratégia utilizada desconsiderou as recomendações de se aplicar no mínimo uma etapa de desbaste antes da usinagem de acabamento⁽⁸⁾, realizando esta última diretamente.

Como esperado, este fresamento se mostrou muito severo, fazendo com que o dispositivo que fixava a peça à máquina sofresse uma leve rotação. Este problema só foi percebido quando a integridade de forma das pás 2 e 3 já haviam sido comprometidas. Assim, apenas para a pá 2 não há valores da rugosidade do topo da pá, a região com o acabamento mais deteriorado para todas, em virtude da menor rigidez. É importante registrar que, antes da ocorrência do fato citado, a pá 2 não apresentava marcas de vibração nesta região.

A quinta pá teve ambos os vãos adjacentes desbastados por completo, para depois ser acabada com a ferramenta contornando-a, seguindo então tanto a recomendação de se aplicar uma etapa de desbaste⁽⁸⁾, quanto a de se usinar paredes finas de titânio alternando-se os lados e com pequenos incrementos⁽⁷⁾. Isto, porém não impediu o surgimento marcas de vibração em seu topo, mas resultou

em um bom acabamento, além da vantagem de ter sido a pá que apresentou a menor quantidade de rebarba. O acabamento do pé das pás também apresentou boa qualidade superficial, como mostra a Figura 14.

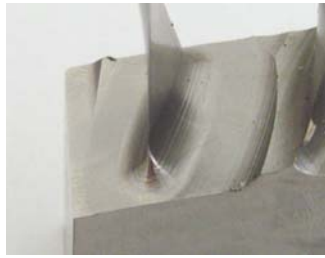


Figura 14. Pé da pá 5 após o seu acabamento.

Quanto aos tempos de usinagem, a pá 5 foi a que apresentou o melhor resultado, quando considerado apenas o tempo de acabamento, com 10,5 min. Esta é seguida pelas pás 1, 3 e 4, com pouco mais de 23 min, enquanto a segunda teve um tempo de 42,5 min, justificado pela menor velocidade de corte aplicada.

Portanto, considera-se que a estratégia utilizada para acabar a pá 5 foi a que mais satisfaz os requisitos envolvidos, apresentando uma das menores rugosidades, usinagem estável, e um tempo relativamente reduzido.

3. CONCLUSÕES

Tomando como base a usinagem de uma peça-teste, constituída por uma seção de um rotor monolítico de compressor de turbina contendo 5 pás, concluiu-se que, para a fabricação de pás de BLISK's em TiAl6V4, a melhor opção é realizar as etapas de desbaste e pré-acabamento de todos os vãos para, em seguida, executar o acabamento com uma fresa de topo esférico contornando a pá (estratégia usada na pá 5 da peça-teste), seguindo as curvas da direção u do campo isoparamétrico (Figura 3), e utilizando o método da ferramenta inclinada.

O ângulo de ataque α foi o menor possível que não incorreu em colisão da ferramenta com a pá avizinhada, definido pelo método da tentativa e erro em pré-testes, e o ângulo de avanço β programado foi de 0° , cuja escolha se baseou nos resultados dos mesmos pré-testes.

Com a estratégia definida, a rugosidade média R_a foi de $(0,67 \pm 0,13) \mu\text{m}$, para uma confiabilidade de 95%, e o tempo total de acabamento para cada pá foi de 10,5 min.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa EMBRAER, pelo fornecimento da matéria-prima utilizada nos ensaio, à empresa Sandvik pelo fornecimento das ferramentas de corte, e principalmente à CAPES pela concessão de uma bolsa de estudos, nível mestrado. Estas colaborações foram de fundamental importância para a realização do trabalho.

5. REFERÊNCIAS

1. ZHAN, H.; ZHAO, W.; WANG, G. Manufacturing turbine blisks. **Aircraft Engineering and Aerospace Technology**, [S.l.]: Emerald, v. 72, n. 3, p. 247-251, 2000.
2. SOUZA, Guilherme O. **Fresamento em 5-eixos simultâneos de pás de compressores de turbinas a gás em TiAl6V4**. 2006. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
3. KLOCKE, F.; MARKWORTH, L; MESSNER, G. Modeling of TiAl6V4 machining operations. **Fraunhofer Institute of Production Technology**, Aachen, 2004.

4. EZUGWU, E. O.; BONNEY, J.; YAMANE, Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, [S.l.]: Elsevier, v. 134, p. 233-253, 2003.
5. GRAY, P.; BEDI, S.; ISMAIL, F.; RAO, N.; MORPHY, G. Comparison of 5-axis and 3-axis finish machining of hydroforming die inserts. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S.l.]: Springer-Verlag, v. 17, p. 562-569, 2001.
6. ALTMÜLLER, S. **Fünf-Achs-Fräsen von Freiformflächen aus Titan**. Aachen, 2001. 198 f. Dissertation, Rheinisch-Westfälischen Hochschule Aachen, 2001.
7. SANDVIK COROMANT. **Titanium machining – application guide**. Sandviken: AB Sandvik Coromant, 2004.
8. ARONSON, R. B. What's different about manufacturing for aerospace? - quality and reliability are more important. **Manufacturing Engineering Magazine**, [S.l.]: SME, n.128, n. 3, 2002. Disponível em: <<http://www.sme.org/cgi-bin/get-mag.pl?m050&000007&2002/02m050&ARTME&SME>>. Acesso em: 2 out. 2005.

MACHINING STRATEGIES FOR SIMULTANEOUS 5-AXES MILLING OF TiAl6V4 GAS TURBINE BLADES

Guilherme Oliveira de Souza

ITA/CCM (Manufacturing Competence Center), Praça Marechal Eduardo Gomes, 50
12228-900 - São José dos Campos - SP
golsouza@ita.br

Jefferson de Oliveira Gomes

ITA/CCM (Manufacturing Competence Center), Praça Marechal Eduardo Gomes, 50
12228-900 - São José dos Campos - SP
gomes@ita.br

Rolf Bertrand Schroeter

LMP – Laboratório de Mecânica de Precisão, UFSC. Campus Universitário, Trindade, EMC
Caixa Postal: 476, 88010-970 - Florianópolis - SC
rolf@lmp.ufsc.br

Abstract. *This paper presents an application of simultaneous 5-axes milling to the manufacturing of gas turbine BILSK blades. A five-bladed TiAl6V4 test-piece, part of a real compressor rotor, was machined looking for the best milling strategy for the finishing of the blades. Using a commercial CAM system, tool paths were generated following five distinct machining strategies. The evaluation criteria were machining time, surface roughness, geometry integrity and process stiffness. Milling the blade by contouring it was found to be the best choice.*

Keywords. *5-axes milling, titanium alloys, machining, BLISK, CAM*