



Notas Técnicas do Laboratório Nacional de Astrofísica

**Parâmetros de Corte para o Fresamento da Liga de
Titânio Ti-6Al-4V**

Josimar Aparecido Rosa

LNA/NT/2024-25

FEV/2024

Parâmetros de Corte para o Fresamento da Liga de Titânio Ti-6Al-4V

Josimar Aparecido Rosa

Laboratório Nacional de Astrofísica, japarecido@lna.br

Resumo: Este trabalho apresenta o desenvolvimento do processo de fresamento da liga de titânio Ti-6Al-4V. O processo de usinagem foi desenvolvido pelo autor na oficina de usinagem mecânica do Laboratório Nacional de Astrofísica e as peças usinadas foram utilizadas no projeto PFS. Os parâmetros calculados e definidos no processo de usinagem em questão podem ser utilizados em trabalhos futuros na Instituição.

Abstract: This work presents the development of the milling process for the Ti-6Al-4V titanium alloy. The machining process was developed by the author in the mechanical machining shop of the National Astrophysics Laboratory and the machined parts were used in the PFS project. The parameters calculated and defined in the machining process may be used in future work at the Institution.

Palavras-chave/keywords: Parâmetros de corte , Fresamento, Liga de titânio Ti-6Al-4V

Revisado por:

Revisor 1 – Décio Ferreira

Revisor 2 – Leandro Henrique dos Santos

Revisor 3 – Márcio Vital de Arruda

Sumário

1. Introdução.....	4
2. Considerações sobre os parâmetros de corte envolvidos no fresamento	5
2.1 Velocidade de corte	5
2.1.1 Avanço e avanço por dente	5
2.1.2 Profundidade de usinagem	6
3. Procedimento experimental.....	6
3.1 Material.....	6
3.2 – Máquina CNC	7
3.3- Ferramentas de corte.....	8
3.4 - Fluido de corte	8
3.5– Software para modelagem e programação.....	9
3.6- Parâmetros de corte	10
5– Conclusões.....	11
6 – Referências	12

Lista de Figura

Figura 1: Centro usinagem DIPLOMAT PETRUS 80130R	7
Figura 2: Fresas de Metal Duro	8
Figura 3: Imagem da programação no Software Solidcam	9

Acrônimos e definições

- PFS – Prime Focus Spectrograph
- LNA – Laboratório Nacional de Astrofísica

1. Introdução

O titânio é considerado um material difícil de ser usinado, porém atualmente já há uma grande quantidade de estudos sobre o seu comportamento e consegue-se chegar a bons resultados seguindo os procedimentos corretos [1,2].

Devido à sua resistência mecânica a altas temperaturas, baixa condutividade térmica, baixo módulo de elasticidade e alta reatividade química, a usinagem desse material leva a uma alta temperatura de corte e alta vibração. Assim, o sucesso na usinagem das ligas de titânio depende em grande parte da superação dos principais problemas associados às propriedades inerentes a estes materiais [3].

Uma das características do titânio que afeta sua usinabilidade é a baixa condução de calor. Quando submetido a uma operação de usinagem, o calor gerado demora mais para ser dissipado, o que leva a um maior desgaste da ferramenta e conseqüentemente a um maior custo devido às trocas dessas ferramentas [1,2].

Uma grande porcentagem (cerca de 80%) do calor gerado na usinagem da liga de titânio Ti- 6Al-4V é conduzida para a ferramenta, pois não pode ser removido com o cavaco ou dissipado para a peça devido à baixa condutividade térmica do material. Esta característica torna praticamente inviável sua usinagem a seco [3].

A utilização de fluido de corte em abundância ajuda a dissipar o calor e assim contornar a má condução de calor do titânio, além disso ajuda a remover os cavacos e diminuir a força de corte [1,2]. Manter a ferramenta de corte sempre bem afiada melhora o acabamento de superfície.

Tendo em vista que a usinagem do titânio necessita de material e geometria da ferramenta específicos, bem como de uma máquina-ferramenta com características diferenciadas, isso exige parâmetros de corte particulares para a execução do processo. Devido ao fato de o material possuir um custo elevado provocado pelas dificuldades em sua extração, beneficiamento e usinagem [4], a otimização de processos de usinagem destas ligas é necessária para reduzir perdas e erros durante o processo. No caso, os parâmetros de corte tornam-se as variáveis independentes de entrada de maior flexibilidade e adaptação, pois controlam diretamente as variáveis dependentes de saída (variáveis de resposta) do processo tais como força de usinagem e rugosidade da superfície usinada [5].

2. Considerações sobre os parâmetros de corte envolvidos no fresamento

No fresamento, assim como nos demais processos de usinagem, existe uma série de importantes parâmetros de corte a considerar. Eles descrevem quantitativamente os movimentos, as dimensões e outras características da operação de corte.

2.1 Velocidade de corte

No fresamento, onde os movimentos de corte e de avanço ocorrem concomitantemente, a velocidade de corte (v_c) consiste na velocidade tangencial instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido do corte, sendo resultante da rotação da ferramenta em torno da peça [6]. A velocidade de corte, em m/min, é calculada pela Equação 1, em que d é o diâmetro da fresa, em mm, e n é a rotação da ferramenta, em rpm.

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (1)$$

2.1.1 Avanço e avanço por dente

O percurso de avanço em cada volta ou em cada curso da ferramenta é definido como avanço (f), dado em mm [6]. Para ferramentas de corte que possuem mais de um dente, como as fresas, surge o avanço por dente (f_z), dado em mm, que consiste no percurso de avanço de cada dente e é medido na direção de avanço da ferramenta, correspondendo à distância entre duas superfícies em usinagem consecutivas. O avanço por dente é calculado pela Equação 2, em que z é o número de dentes da ferramenta.

$$f_z = \frac{f}{z} \quad (2)$$

2.1.2 Profundidade de usinagem

A profundidade de usinagem (a_p), dada em mm, representa a profundidade ou largura de penetração da ferramenta de corte na peça, sendo medida perpendicularmente ao plano de trabalho [6].

3. Procedimento experimental

Todas as informações necessárias para a metodologia experimental são descritas visando-se obter como resultado os melhores parâmetros para fresamento da liga de titânio Ti-6Al-4V. As usinagens das peças e os testes dos parâmetros foram realizados na oficina de usinagem mecânica do Laboratório Nacional de Astrofísica.

3.1 Material

Como já citado, o material utilizado para fabricação do conjunto é liga de titânio Ti-6Al-4V que contém alumínio e vanádio em sua composição apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química do Ti-6Al-4V (% massa em valores máximos)

N	H	O	C	Fe	Al	V	Ti
0,015	0,006	0,180	0,040	0,130	6,000	4,000	Bal.

Fonte: Donachie Jr. (2000)

3.2 Máquina CNC

Para usinagem das peças utilizamos um centro de usinagem vertical do modelo DIPLOMAT PETRUS 80130R, BT 40 com 3 eixos, comando heidenhain diadur 615, magazine com 20 ferramentas, rotação máxima da árvore é igual a 6000 RPM e motor principal 15HP, curso de trabalho 1270 x 705 x 610mm, velocidade máxima de trabalho de 5.000 mm/min e avanço rápido em X/Y/Z de 10.000 mm/min, conforme a Figura 1.



Figura 1: Centro usinagem DIPLOMAT PETRUS 80130R

3.3 Ferramentas de corte

Foram utilizadas ferramentas de metal duro Inteiriças ISCAR® revestida com e AlTiN, pelo processo de PVD. O processo PVD (*Physical Vapour Deposition*) promove maior resistência ao desgaste, resistência a oxidação e baixa condutividade térmica.



Figura 2: Fresas de Metal Duro

3.4 Fluido de corte

Foi utilizado um fluido sintético de base vegetal, ME-3 da BETIM QUIMATIC®, com uma condição básica, emulsionado em abundância, na proporção em volume de uma parte de óleo para vinte partes de água (1:20), bombeado com uma vazão de aproximadamente 40 l/min, pelo próprio sistema de aplicação de fluido de corte da máquina-ferramenta.

3.5 Software para modelagem e programação

Os softwares Solidworks® e Solidcam® foram utilizados para a geração dos programas para usinagem das peças usinadas. Uma vez que uma peça tenha sido projetada no software Solidworks®, o software Solidcam® é utilizado para gerar caminhos da ferramenta, parâmetros que orientam a movimentação da máquina de CNC.

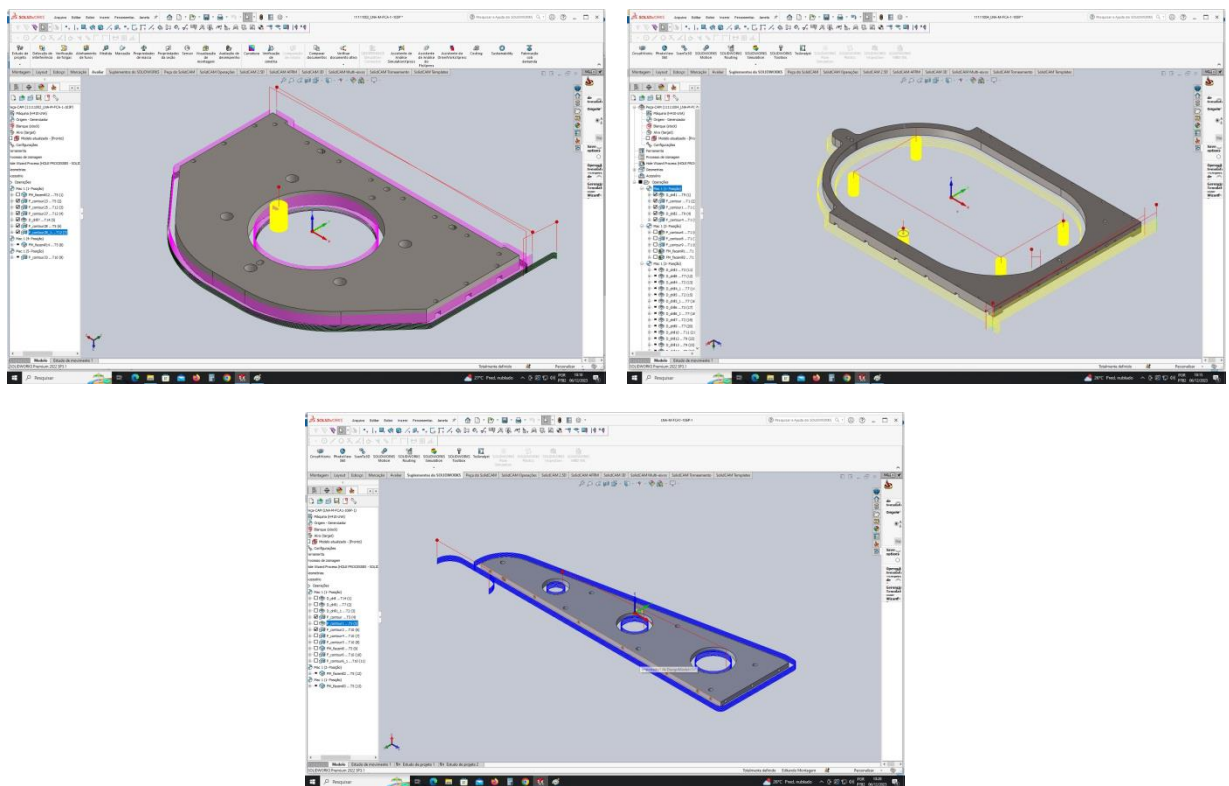


Figura 3: Imagem da programação no software Solidcam®

3.6 Parâmetros de corte

Os parâmetros controláveis de entrada escolhidos foram velocidade de corte (V_c), profundidade de corte (a_p) e avanço (f). Os valores máximos e mínimos de velocidade de corte seguiram as especificações do fabricante das ferramentas (Tabela 2).

Tabela 2 – Níveis dos parâmetros de corte

Fatores Controláveis	Níveis	
	Mínimo	Máximo
Velocidade de corte (V_c)[m/min]	30	80
Profundidade de corte (A_p) [mm]	0.4	1,5
Avanço (f) [mm/volta]	0.03	0.09

Fonte: Adaptado de <https://www.iscardobrasil.com.br>

Foram testadas várias combinações experimentais dos parâmetros de corte (V_c, f, A_p), para todas ferramentas que foram utilizadas na usinagem das peças.

4. Resultado

Como resultado obtiveram-se as melhores combinações dos parâmetros de cortes para cada diâmetro de ferramentas, conforme descritos na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros cortes usados para usinagem das peças em Ti-6Al-4V

Ferramenta ISCAR® (PVD)	Diâmetro [mm]	Fatores Controláveis		
		V_c [m/min]	A_p [mm]	f [mm/volta]
EC-A4-14-25C14E83 IC 900	14	43	0,6	0,075
EC-A4-12-22C12E73 IC 903	12	45	0.6	0,083
EC-A4-10-22C10E72 IC 900	10	45	0.5	0,083
EC-A4-08-22C08E63 IC 900	8	48	0.5	0.072
EC-A4-06-16C06E50 IC 900	6	50	0.5	0.065
EC-A4-04-12C04E50 IC 900	4	50	0.4	0.065

Fonte: O autor

5. Conclusões

Com o resultado obtido dos parâmetros de corte para cada diâmetro ferramenta, durante a usinagem das peças da liga titânio Ti-6Al-4V, concluiu-se:

- A alta resistência e dureza do titânio requerem ferramentas de fresamento resistentes. Nesse caso a fresa de metal duro Inteiriças ISCAR® revestida com AlTiN, pelo processo de PVD utilizada nos testes são uma opção para o processo de fresamento da liga de titânio em questão.

- A refrigeração da ferramenta deve ser feita de forma contínua, evitando o superaquecimento das ferramentas.

- A velocidade de corte de usinagem pode ser reduzida se isso não limitar os requisitos finais, como acabamento e tolerância.

- A vibração é outro resultado do fresamento da liga titânio. A alta resistência e dureza do material causa vibração nas ferramentas de corte, podendo encurtar a vida útil da ferramenta caso os parâmetros de corte e lubrificação não forem bem definidos.

6. Referências

- [1] Leyens, C.; Peters, M. Titanium and Titanium Alloys. Fundamentals and Applications. Weinheim: WILEY-VCH, 2003.
- [2] Donachie Jr, M. TITANIUM: a technical guide. Materials Park: ASM International, 2000.
- [3] Pedroso, P. H. Análise da usinabilidade da liga Ti-6Al-4V produzida por manufatura aditiva (SLM) no fresamento . Tese (Graduação) em Engenharia Mecânica, CEFET/RJ. Rio de Janeiro, 2019.
- [4] Zlatin, N.; Field, M. Procedures and precautions in machining titanium alloys. In: Jaffee, R. I.; Burte, H. M. (eds) Titanium Science and Technology. Boston: Springer, p. 489-504, 1973.
- [5] Souza, A. J. Aplicação de Multisensores no Prognóstico da Vida da Ferramenta de Corte em Torneamento. Tese (Doutorado) em Engenharia Mecânica, UFSC. Florianópolis, 2004.
- [6] Diniz, A. E.; Marcondes, F. C.; Coppini, N. L. Tecnologia da usinagem dos materiais. 8 ed., São Paulo: Editora Artliber, 2013.