



Oscar Sousa Costa

Microfresagem de ligas de titânio



Oscar Sousa Costa

Microfresagem de ligas de titânio

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica do Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

Esta dissertação teve o apoio dos projetos FAMASI – Fabrico por Maquinagem Sustentável e Inteligente (POCI-01-0145-FEDER-031556), UIDB/00481/2020 e UIDP/00481/2020 – FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia e CENTRO-01-0145-FEDER-022083 - Programa Operacional Regional do Centro (Centro 2020), através do Portugal 2020 e do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional.

O júri / The jury

Presidente / President

Prof. Doutor Rui António da Silva Moreira
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Prof. Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro (orientador)

Prof. Doutor Arnaldo Manuel Guedes Pinto
Professor Adjunto do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP)

Agradecimentos / Acknowledgements

Aqui ficam os agradecimentos que eu quero fazer, começar por agradecer ao Professor Doutor João Paulo Davim, por toda a disponibilidade e ajuda neste trabalho. Agradecer à Engenheira Sílvia Carvalho, pelo apoio e tempo prestado para a realização da dissertação. Ao Engenheiro António Festas, pela colaboração na realização do prático. E por último agradecer aos meus pais pela paciência, dedicação e oportunidade de realizar todo este período. Agradecer também a empresa Tifast pelo material fornecido.

Palavras-chave

Microfresagem; Titânio; Rugosidades; Rebarba

Resumo

As operações de micromaquinagem têm-se revelado essenciais no fabrico de componentes miniaturizados, em diversos sectores industriais, incluindo a microeletrónica e o setor biomédico. Estes processos são frequentemente selecionados por estas indústrias devido à alta precisão dimensional e integridade superficial, incluindo baixa rugosidade, menor propensão à formação de rebarbas e de defeitos superficiais nos componentes obtidos. No presente trabalho, desenvolveram-se estudos em microfresagem em duas ligas de titânio com aplicação biomédica, a liga Ti-6Al-4V e a Ti-6Al-7Nb. O intuito principal do trabalho foi entender se nas mesmas condições de micromaquinagem seria possível produzir superfícies maquinadas com características semelhantes em termos de acabamento superficial (Ra e Rt), micro textura e formação de rebarbas. Esta necessidade prendeu-se com o fato da liga Ti-6Al-4V apresentar na sua composição química o elemento Vanádio que é altamente tóxico para o corpo humano, como a liga Ti-6Al-7Nb apresenta uma microestrutura e propriedades mecânicas comparáveis à liga Ti-6Al-4V poderá ser um potencial candidato no fabrico de componentes biomédicos. Assim, foram realizados ensaios em microfresagem nas duas ligas, utilizando 3 níveis de avanço por dente (0,001, 0,003, 0,006 mm/dente) e 2 dois níveis de incremento radial (0,1 e 0,05 mm) e comparou-se a superfície maquinada em termos de acabamento superficial, que foi avaliado através de um rugosímetro que permitiu extrair dois descritores (Ra e Rt) do perfil de rugosidades, mas também através de microscopia ótica, de forma a avaliar a morfologia os canais que foram maquinados. Para as condições testadas o Ra variou entre 0,12 μm (incremento 0,05 mm) e 0,73 μm (incremento 0,1 mm) para a liga Ti-6Al-4V e entre 0,16 μm (incremento 0,05 mm) e 0,76 μm (incremento 0,1 mm) para a liga Ti-6Al-7Nb. Para as duas ligas a existência de rebarba e o desgaste da ferramenta foi quase inexistente.

Keywords

Micromilling; Titanium, Roughness; Burr

Abstract

Micro-machining operations have proven essential in the manufacture of miniaturized components in several industrial sectors, including microelectronics and the biomedical sector. These processes are frequently selected by these industries due to their high dimensional accuracy and surface integrity, including low roughness, less proneness to burr formation and surface defects in the components obtained. In the present work, micromilling studies were developed in two titanium alloys with biomedical application, the Ti-6Al-4V alloy and the Ti-6Al-7Nb alloy. The main purpose of the work was to understand if under the same micromachining conditions it would be possible to produce machined surfaces with similar characteristics in terms of surface finish (Ra and Rt), micro texture and burr formation. This need was linked to the fact that the Ti-6Al-4V alloy has in its chemical composition the Vanadium element, which is highly toxic to the human body, as the Ti-6Al-7Nb alloy has a microstructure and mechanical properties comparable to the Ti-6Al-4V alloy, it may be a potential candidate in the manufacture of biomedical components. Thus, micromilling tests were performed on the two alloys, using 3 levels of feed per tooth (0.001, 0.003, 0.006 mm/tooth) and 2 two levels of radial increment (0.1 and 0.05 mm) and compared to machined surface in terms of surface finish, which was evaluated through a rugosimeter that allowed extracting two descriptors (Ra and Rt) from the roughness profile, but also through optical microscopy, in order to assess the morphology of the channels that were machined. For the conditions tested, Ra varied between 0.12 μm (increment 0.05 mm) and 0.73 μm (increment 0.1 mm) for the Ti-6Al-4V alloy and between 0.16 μm (increment 0.05 mm) and 0.76 μm (increment 0.1 mm) for the Ti-6Al-7Nb alloy. For both alloys, the existence of burr and tool wear was almost non-existent.

Índice

I	Enquadramento	1
1	Introdução	3
1.1	Pergunta de investigação	4
1.2	Objetivos	4
1.3	Estrutura da dissertação	4
2	Microfresagem - Estado da Arte	7
2.1	Microfresagem	7
2.2	Material (Titânio)	8
2.3	Parâmetros de corte	10
2.3.1	Forças de corte	12
2.3.2	Temperatura de corte	13
2.3.3	Espessura mínima de apara	15
2.3.4	Formação de rebarba	16
2.3.5	Qualidade de acabamento superficial	19
2.4	Síntese	23
II	Métodologia experimental	25
3	Procedimento experimental	27
3.1	Provetes	27
3.1.1	Desenho	27
3.1.2	Material	28
3.2	Ensaio de maquinagem	29

3.2.1	CNC	29
3.2.2	Bucha de aperto	29
3.2.3	Ferramenta (R216.42-00830-AE08G 1620)	30
3.2.4	Parâmetros de corte	30
3.2.5	Estratégia de corte	31
3.3	Avaliação do estado da superfície maquinada	32
3.3.1	Análise por microscopia ótica	32
3.3.2	Rugosidade superficial	33
III	Resultados	35
4	Resultados Experimentais	37
4.1	Análise Superficial através de microscopia ótica	37
4.2	Rugosidade superficial	40
4.3	Análise da ferramenta	44
4.3.1	Tempo de maquinagem	44
4.3.2	Desgaste de ferramenta	45
IV	Conclusão	47
4.4	Conclusão	49
4.4.1	Trabalhos futuros	49

Lista de Tabelas

2.1	Composição química das ligas de titânio (% por peso)	10
2.2	Parâmetros de corte	11
2.3	Parâmetros de corte (Continuação)	12
3.1	Composição química das ligas de titânio (cortesia: Tifast Itália) [19].	28
3.2	Características físicas e mecânicas das ligas de titânio utilizadas (cortesia: Tifast) [19].	28
3.3	Parâmetros de corte utilizados	31
3.4	Parâmetros de medição para avaliar a rugosidade	33
4.1	Valores médios da rugosidade média aritmética (Ra em μm) em função do material, avanço (mm/dente) e incremento. É também apresentada a diferença em percentagem e a variação percentual	42
4.2	Valores médios da rugosidade (Rt em μm) em função do material, avanço (mm/dente) e incremento. É também apresentada a diferença em percentagem e a variação percentual	44
4.3	Tempos de maquinagem	44

Lista de Figuras

2.1	Geometria de corte em a) macroescala e b) microescala [5].	8
2.2	Variáveis de entrada envolvidas no processo de microfresagem [6].	8
2.3	Microestrutura de: a) EBM Ti6Al4V e b) Ti6Al4V obtido por extrusão [7].	9
2.4	Forças exercidas na microfresagem [17].	13
2.5	Influência das velocidades de corte e espessura de apra para a) EBM, b) Ti6Al4V obtido por extrusão e c) comparação entre EBM e Ti6Al4V [7]. .	14
2.6	Temperaturas de corte em a) microfresagem b) macrofresagem [1].	15
2.7	Formação de apra relativamente à espessura mínima de corte [18].	16
2.8	Comparação de rebarba obtida nas peças EBM (a-c) e Ti6Al4V por ex- trusão (d-f) [7].	17
2.9	Formação de apra para diferentes raios de aresta das ferramentas[13]. . .	19
2.10	Comparação de acabamento superficial [7].	21
2.11	Comparação de ondulação [7].	22
3.1	Desenho do provete	27
3.2	Microestrutura obtida por microscopia eletrónica das ligas: a)Ti-6Al-4V b)Ti-6Al-7Nb [20].	28
3.3	Microestrutura obtida por microscopia eletrónica das ligas: Mapa de com- posição química superficial obtido por EDS [20].	29
3.4	CNC - MIKRON VCE 500	29
3.5	<i>Chuck</i>	30
3.6	Posicionamento do provete na CNC	30
3.7	Ferramenta para microfresagem	31
3.8	Exemplo da estratégia de maquinagem	31
3.9	Exemplo do provete.	32
3.10	Nikon Eclipse LV150	32

3.11	Hommel Tester T1000 E	33
4.1	Exemplo de ensaio realizado	37
4.2	Exemplos de provetes finais de ambas as ligas: a)Ti-6Al-4V b)Ti-6Al-7Nb	38
4.3	Microcopia ótica para incremento 0,1 mm e avanço 0,001 mm/dente: a)Ti-6Al-4V b)Ti-6Al-7Nb	38
4.4	Microcopia ótica para incremento 0,1 mm e avanço 0,003 mm/dente: a)Ti-6Al-4V b)Ti-6Al-4V c)Ti-6Al-7Nb	39
4.5	Microcopia ótica para incremento 0,05 mm e avanço 0,003 mm/dente: a)Ti-6Al-4V b)Ti-6Al-4V c)Ti-6Al-7Nb	40
4.6	Rugosidade média aritmética (Ra em μm) em função do avanço (mm/dente) para todos os ensaios realizados	41
4.7	Rugosidade (Rt em μm) em função do avanço (mm/dente) para todos os ensaios realizados	43
4.8	Ferramenta nova	45
4.9	Ferramenta após 6 utilizações	45

Lista de Abreviaturas

DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
EBM	<i>Electron Beam Melting</i>
AM	<i>additive manufacturing</i>
UE	União Europeia
CNC	Controlo Numérico Computorizado
FEM	Método dos Elementos Finitos
Vc	Velocidade de corte
fz	Avanço por dente
ap	Profundidade do corte axial
n	Velocidade de rotação
ae	Profundidade radial de corte
D	Diâmetro
hcu	Espessura de apara não cortada
rb	Raio de aresta
Bt	Largura total da rebarba
W apara	largura da apara
t apara	grossura da apara
h apara	altura da apara
Ra	Rugosidade média
Rt	Rugosidade média entre picos da superfície

Lista de Unidades

HV	Dureza <i>Vickers</i>
°C	Temperatura em graus <i>celsius</i>
s	Segundo
min	Minuto
h	Hora
g	Gramma
kg/m	Kilograma por metro
m	Metro
μm	Micrometro
m/s^2	Metro por segundo quadrado
<i>MPa</i>	Megapascal
<i>GPa</i>	Gigapascal
$\mu\text{m}/\text{dente}$	Micrometro por dente
rpm	Rotação por minuto
m/min	Metro por minuto

Parte I

Enquadramento

Capítulo 1

Introdução

A procura pelos processos micro está bem estabelecida nos setores industriais, muito por parte das recomendações e legislações dos governos nacionais e da União Europeia (UE). Estes processos diminuem os efeitos negativos dos processos industriais sobre as mudanças climáticas, diminuindo a energia específica dos processos, e aumenta por sua vez o número de sistemas e equipamentos inteligentes. Portanto, a procura pelos componentes miniaturizados tem aumentado significativamente nas áreas industriais, especialmente na aeroespacial, bioengenharia, automóvel, etc. Estes componentes podem ser fabricados por maquinagem de eletroerosão, microfabrico a laser, moldação, ou técnicas de micromaquinagem mecânica. Se por um lado os componentes fabricados através destes processos apresentem uma excelente precisão dimensional e geométrica, por outro lado, o seu tempo de produção e custos são elevados quando comparados com a maquinagem convencional [1].

A micromaquinagem mecânica é dos métodos mais eficazes e mais utilizados, devido à redução do tempo de fabrico e ao custo para a maquinagem de componente 3D, principalmente devido à remoção de material reduzida. Os seus processos são caracterizados com base na maquinagem convencional, ou seja, microfresagem, microfuração, microtorneamento, etc. [1].

A formação de rebarba na microfresagem é um grande desafio, isto porque, reduz a qualidade superficial da superfície maquinada devido à presença de rebarba na frente da ferramenta o que causa um arrasto da mesma pela face da ferramenta, o que torna as técnicas de minimização e remoção, temas de bastante investigação. Nos processos de maquinagem mecânica sempre existiu rebarba, mas no processo de micromaquinagem é significativamente menor em comparação com a maquinagem convencional [2].

Relativamente ao controlo da integridade superficial, a medição da rugosidade superficial pode apresentar diferentes faixas de valores de rugosidade média, tendo em conta os parâmetros de corte selecionados, pois para o mesmo processo podem ocorrer grandes diferenças de acabamento superficial. A redução da escala dos componentes aumenta a dificuldade do controlo da qualidade, isto devido a fatores como, a correta interpretação do contato entre a peça e a ferramenta, baixas forças de corte, montagem inadequada, etc. [3].

A microfresagem de alta velocidade é mais investigada, pois promove uma melhor qualidade superficial e alta taxa de remoção de material. Por outro lado, a baixa velocidade existe uma maior estabilidade do processo de corte, assim é possível maquirar maiores profundidades, comparativamente à alta velocidade, sem comprometer o acabamento superficial. Sendo que as características dos micro produtos incluem alta precisão, com boas tolerâncias e rugosidades de superfície com menos de $0,5 \mu\text{m}$ de rugosidade média (Ra). Para tal ocorrer, na microfresagem tem de se efetuar a seleção correta, tal como, ferramenta de corte, avanço, velocidade de rotação e profundidade de corte, pois destes depende totalmente a qualidade do processo [4].

1.1 Pergunta de investigação

Como avaliar e comparar a precisão dimensional e acabamento superficial obtido na microfresagem de duas ligas de titânio (Ti-6Al-4V & Ti-6Al-7Nb)?

1.2 Objetivos

De acordo com a pergunta de investigação definida para esta dissertação, o principal objetivo deste trabalho é a avaliação e comparação do estado da superfície de duas ligas de titânio maquinadas através de microfresagem. As duas ligas de titânio utilizadas são a Ti-6Al-4V e a Ti-6Al-7Nb.

Um dos aspetos mais relevantes da caracterização da integridade superficial é a rugosidade superficial e precisão dimensional de forma a garantir a qualidade e durabilidade dos componentes e assim aumentar a sua vida útil. Assim, nesta dissertação foi analisado o estado da superfície através de:

- Caracterização das superfícies maquinadas através da rugosidade superficial;
- Observação da possível existência de rebarba;
- Comparação entre os acabamentos obtidos em ambas as ligas.

Foram definidos e utilizados diversos parâmetros de corte nos ensaios de microfresagem de forma a comparar os aspetos enumerados anteriormente para ambas as ligas, procurando obter as condições de corte otimizadas. Os parâmetros de corte mais importantes a ser considerados são a velocidade de corte e o avanço.

1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação encontra-se separada em 4 capítulos:

- Primeiro capítulo apresenta o tema da dissertação e os objetivos do trabalho.
- Segundo capítulo é composto pela revisão do estado de arte onde se descreve o que foi estudado por outros autores tendo em conta o tema da dissertação e os objetivos propostos.
- Terceiro capítulo aborda a metodologia e os ensaios realizados para obtenção e discussão de resultados.

- Quarto capítulo sumariza os resultados obtidos com este trabalho e possíveis oportunidades para trabalhos futuros apresentadas por este estudo e as quais merecem investigação.

Capítulo 2

Microfresagem - Estado da Arte

2.1 Microfresagem

Microfresagem, tal como o nome indica é um processo de maquinagem à microescala, utilizando ferramentas de diâmetros reduzidos entre 1 e 999 μm que, com a sua alta precisão e movimentos cíclicos cria peças com paredes perfeitamente verticais, superfícies com rugosidade baixa, cantos exteriores vivos e com alguma capacidade de criar geometrias complexas. A microfresagem contem várias características que a aproximam da macrofresagem, porem utiliza dimensões reduzidas, onde varia o tamanho dos componentes e a escala utilizada nas operações, que não são tão relevantes no processo tradicional de fresagem, mas na microfresagem tem um efeito mais significativo nos resultados obtidos. Existem diferenças entre a macro e a microfresagem que vem influenciar os fatores utilizados nos processos, tais como a temperatura de corte, força de corte e velocidade de deformação, tendo estes fatores originando a criação de um revestimento nas arestas das ferramentas de forma a proteger as mesmas de um maior desgaste ou quebra [5].

Entre macro e microescala, percebemos que há uma diversidade de opiniões. Aramcharoen et al. [5] identificaram-nos de acordo com o método utilizado ou o tipo de produto. Inicialmente identificam a micromaquinagem como sendo um corte mecânico que utiliza ferramentas de diâmetro reduzido, posteriormente, é reconhecida a micromaquinagem como sendo um processo para criar componentes à microescala utilizando recursos com alguns milímetros de tamanho. Por fim escreve que entre macro e microescala existem fatores mais abrangentes que influenciam o mecanismo de corte, como o tamanho deste, etc.

Um dos grandes problemas observados por Aramcharoen et al. [5] neste processo é a taxa de remoção do material, isto porque, na microfresagem a espessura da apara não deformada é comparável ao raio da aresta de corte (Figura 2.1(b)). Ao contrário do que acontece na fresagem convencional (Figura 2.1(a)), na microfresagem a espessura da apara não deformada (h) é menor que o raio da aresta de corte (r_e) e existirá um ângulo de ataque ($-\alpha$) o que cria efeitos de deformação, o que torna esta comparação um importante parâmetro do controlo da microfresagem. Seria melhor, no entanto, obter um ângulo de ataque positivo favorecendo a remoção e escoamento do material, pois a aresta de corte é mais afiada. Mas o titânio é muitas vezes maquinado com ângulo de

ataque negativo, pois estas ferramentas favorecem uma maior resistência ao desgaste que se gera devido à forças e à temperatura.

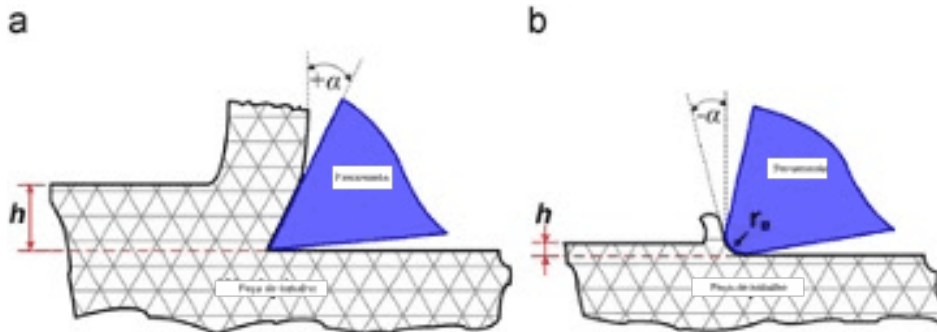


Figura 2.1: Geometria de corte em a) macroescala e b) microescala [5].

Câmara et al. [6] apresentam-nos alguns aspetos importantes a ter na microfresagem, com maior importância o material de trabalho, e as ferramentas a utilizar (Figura 2.2).

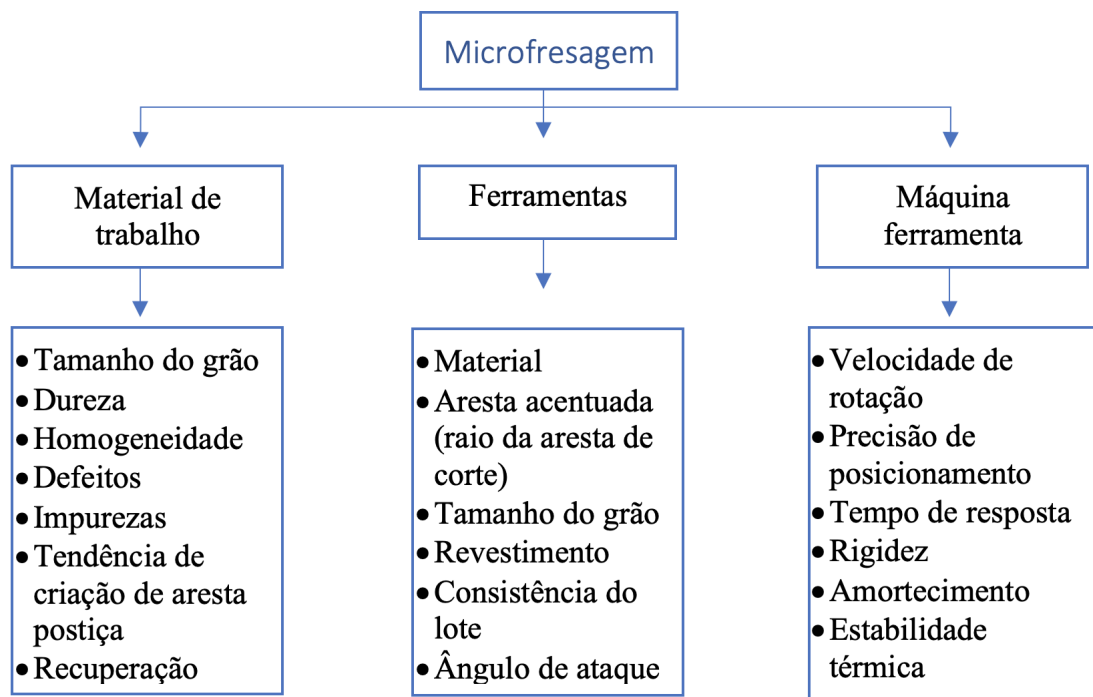


Figura 2.2: Variáveis de entrada envolvidas no processo de microfresagem [6].

2.2 Material (Titânio)

Tendo como assunto desta tese a microfresagem de ligas de titânio, será discutido o material utilizado nos provetes a ser maquinados. As ligas de titânio são geralmente utilizadas na indústria aeroespacial, aeronáutica, química e médica devido em grande parte à suas propriedades mecânicas, contando também com a baixa condutividade térmica, a sua

alta reatividade química e a capacidade de manter a resistência a elevadas temperaturas. Mas por vezes o processo de corte na maquinagem destes materiais pode ser complicado, devido à possibilidade de transformação de fase das ligas de titânio durante o processo.

A produção de peças de titânio durante muitos anos derivava da conformação do material, mas com um maior interesse no fabrico de diferentes componentes, começou a existir novas técnicas, como a *additive manufacturing* (AM), etc. O método de fabrico da liga tem influência na sua resposta à maquinagem, pois a microestrutura e conseqüentemente as propriedades mecânicas são alteradas, então, Hojati et al. [7] investigaram a liga de titânio Ti6Al4V (Tabela 2.1), obtida por dois processos de fabrico distintos, extrusão e *Electron Beam Melting* (EBM). Nesta investigação as amostras foram polidas antes de serem maquinadas, depois compararam a microestrutura do Ti6Al4V com o EBM, e concluiu-se que o convencional tem uma microestrutura mais grosseira (Figura 2.3).

Em relação à dureza dos mesmos, obtém-se que o EBM apresenta mais dureza do que o Ti6Al4V, sendo estas de 450HV e 350HV, respetivamente. Apresentam também uma relação entre a microdureza e as propriedades mecânicas do EBM, este que possui mais dureza graças à microestrutura de material mais fina, e concluem que se espera que as propriedades mecânicas do EBM em termos de resistência à tração final sejam maiores do que os possíveis no Ti6Al4V obtido a partir da extrusão. No entanto o tratamento térmico aplicado no EBM teve influência nas forças de corte, sendo estas mais elevadas para o Ti6Al4V apesar de este apresentar menor dureza [7].

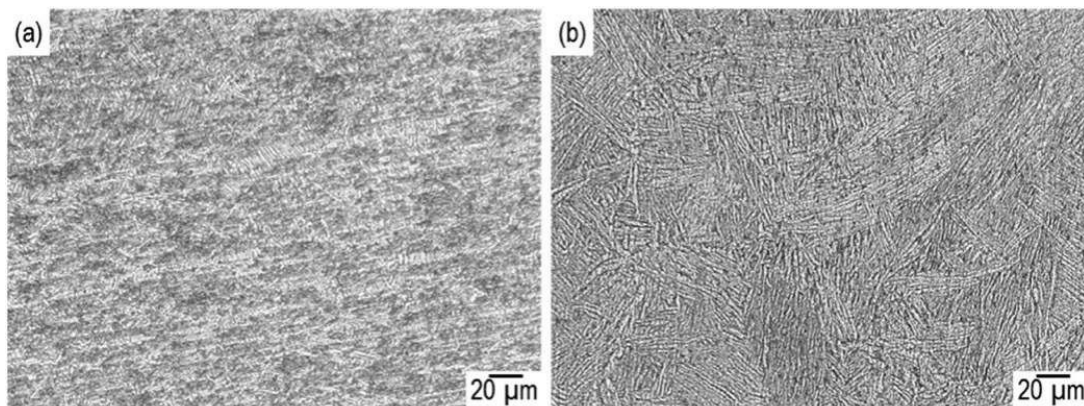


Figura 2.3: Microestrutura de: a) EBM Ti6Al4V e b) Ti6Al4V obtido por extrusão [7].

O outro titânio utilizado, neste caso o Ti-6Al-7Nb (Tabela 2.1), não tão comum como o anterior, mas sendo este mais utilizado para dispositivos médicos inseridos cirurgicamente no corpo humano, tais como implantes, que servem para substituir ou apoiar a função de uma estrutura biológica [8].

O Ti é ligado com muitos elementos biocompatíveis como por exemplo o nióbio (Nb) para reduzir o valor do módulo de Young e melhorar a compatibilidade óssea. A diferença entre este e o que utiliza vanádio (V) é devido à natureza tóxica, que para estas utilizações tem de ser substituído. Kumar and Avinash [8] investigaram o desempenho da liga à base de Ti-Nb contra a corrosão, e revela que estes aumentam a resistência à corrosão pela formação de TiO₂. Esta liga possui resistência superior à corrosão, e o tratamento da superfície melhora o contato direto entre o osso humano e o implante. Como os

implantes são geralmente complexos em forma e tamanho micro, a micromaquinagem é a tecnologia chave para fabricar estes componentes. As condições de corte influenciam significativamente as características da superfície, e no caso desta liga, a velocidade de corte ao ser aumentada melhorou a sua qualidade.

Tabela 2.1: Composição química das ligas de titânio (% por peso)

Liga	Al	V	C	Fe	O	N	H	Ti
Ti-6Al-4V [7]	6	4	0,03	0,1	0,15	0,01	0,003	Restante
	Al	Nb	C	Fe	Zr	N	Mg	Ti
Ti-6Al-7Nb [8]	5,57	7,10	0,07	0,1	0,02	0,05	0,16	Restante

2.3 Parâmetros de corte

Na Tabela 2.2 apresenta-se um levantamento de parâmetros de trabalho em microfresagem de ligas de titânio, apresentam-se as condições de corte e as diversas respostas de maquinagem adquiridas.

Tabela 2.2: Parâmetros de corte

Autores	Parâmetros	Material	Observações	Resultados
Hojati et al. [7]	Vc= 35 m/min hcu= 0,9 - 37,3 μm	Ti-6Al-4V	-	Ra= 1,2 - 1,8 μm Rz= 6 - 12 μm
		EBM Ti-6Al-4V	-	Ra= 0,75 - 1,4 μm Rz= 7 - 13,5 μm
	Vc= 80 m/min hcu= 0,9 - 3,7 μm	Ti-6Al-4V	-	Ra= 1,3 - 1,35 μm Rz= 8,5 - 13 μm
		EBM Ti-6Al-4V	-	Ra= 0,7 - 1,25 μm Rz= 6 - 13,5 μm
Kumar e Avinash et al. [8]	Vc= 31,4 m/min	Ti-6Al-7Nb	-	Formação contínua de apara, Pobre acabamento superficial
	Vc= 47 m/min	Ti-6Al-7Nb	-	Melhor acabamento superficial
	ap= 200 μm	Ti-6Al-7Nb	-	Elevada formação de rebarba
Thepsonthi e Ozel et al. [9]	ω = 16000 rpm	Ti-6Al-4V	-	Ra= 0,135 μm
Pratap et al. [10]	ω = 25000 rpm Vc= 31,415 m/min fz= 0,5 - 1,5 μm /dente ap= 30 μm	Ti-6Al-4V	Simulacoes FEM	Tmax= 845,3 $^{\circ}\text{C}$
Mamedov e Lazoglu et al. [11]	Vc= 25,1 m/min ap= 100 μm	Ti-6Al-4V	fz= 5 μm /dente	T1= 31,6 $^{\circ}\text{C}$ T2= 54,7 $^{\circ}\text{C}$
			fz= 10 μm /dente	T1= 35,3 $^{\circ}\text{C}$ T2= 61,5 $^{\circ}\text{C}$
			fz= 15 μm /dente	T1= 40,4 $^{\circ}\text{C}$ T2= 71,1 $^{\circ}\text{C}$
	Vc= 25,1 m/min ap= 150 μm	Ti-6Al-4V	fz= 5 μm /dente	T1= 32,8 $^{\circ}\text{C}$ T2= 57,0 $^{\circ}\text{C}$
			fz= 10 μm /dente	T1= 38,9 $^{\circ}\text{C}$ T2= 67,8 $^{\circ}\text{C}$
			fz= 15 μm /dente	T1= 41,9 $^{\circ}\text{C}$ T2= 79,5 $^{\circ}\text{C}$
Thepsonthi e Ozel et al. [12]	ω = 48000 rpm fz= 4,2 μm /dente ap= 100 μm	Ti-6Al-4V	-	Bt= 0,21 mm Ra= 0,165 μm
	ω = 32000 rpm fz= 3 μm /dente ap= 100 μm	Ti-6Al-4V	-	Bt= 0,22 mm Ra= 0,115 μm
	ω = 16000 rpm fz= 4,2 μm /dente ap= 90 μm	Ti-6Al-4V	-	Bt= 0,05 mm Ra= 0,135 μm
Ozel et al. [13]	Vc= 50 m/min fz= 4,5 μm /dente	Ti-6Al-4V	rb= 3 μm	W apara=113,7 \pm 5,1 μm t apara=21,1 \pm 1,9 μm
			rb= 6 μm	W apara=88,9 \pm 8,7 μm t apara=17,9 \pm 3,5 μm
			rb= 12 μm	W apara=111,7 \pm 4,6 μm t apara=10,6 \pm 0,8 μm

Tabela 2.3: Parâmetros de corte (Continuação)

Autores	Parâmetros	Material	Observações	Resultados
Bajpai et al. [2]	$\omega = 10000$ rpm $V_c = 16$ m/min $f = 5$ mm/s $a_p = 50$ μm	Ti-6Al-4V	Concordante Entrada	h apara= 44 μm W apara= 20 μm
			Concordante Saida	h apara= 400 μm W apara= 100 μm
			Discordante Saida	h apara= 50 μm W apara= 30 μm
	$\omega = 90000$ rpm $V_c = 141$ m/min $f = 5$ mm/s $a_p = 50$ μm	Ti-6Al-4V	Concordante Saida lateral	h apara= 120 μm W apara= 60 μm
Kuram e Ozcelik et al. [14]	$\omega = 28000$ rpm $f = 75$ mm/min	Ti-6Al-4V	Concordante	$R_a = 0,1825$ μm
	$\omega = 28000$ rpm $f = 150$ mm/min	Ti-6Al-4V	Discordante	$R_a = 0,165$ μm
Baldo et al. [3]	$V_c = 31,4$ m/min $a_p = 50$ μm $f = 0,001$ mm/rev.	Ti-6Al-4V	Ferramenta Nova / Usada	$R_a = 3,33 / 1,92$ μm $R_z = 12,2 / 8,1$ μm
	$V_c = 70,7$ m/min $a_p = 50$ μm $f = 0,005$ mm/rev.	Ti-6Al-4V	Ferramenta Nova / Usada	$R_a = 2,07 / 3,27$ μm $R_z = 8,6 / 11,6$ μm
Gozu e Karpas et al. [15]	$\omega = 28000$ rpm $V_c = 35$ m/min $a_p = 40$ μm $f_z = 2$ μm /dente		-	$R_a = 0,06$ μm
Kiswanto et al. [16]	$\omega = 30000$ rpm $f = 7$ mm/s $a_p = 10$ μm	Ti-6Al-4V	-	$R_a = 0,2355$ μm
	$\omega = 50000$ rpm $f = 7$ mm/s $a_p = 10$ μm	Ti-6Al-4V	-	$R_a = 0,1176$ μm
	$\omega = 80000$ rpm $f = 7$ mm/s $a_p = 10$ μm	Ti-6Al-4V	-	$R_a = 0,0968$ μm
Kiswanto et al. [4]	$\omega = 3000$ rpm $a_p = 10$ μm	Ti-6Al-4V	$f = 0,4$ mm/s	$R_a = 0,1522$ μm
			$f = 0,8$ mm/s	$R_a = 0,2594$ μm
			$f = 1,6$ mm/s	$R_a = 0,4496$ μm
	$\omega = 7000$ rpm $a_p = 10$ μm	Ti-6Al-4V	$f = 0,4$ mm/s	$R_a = 0,1155$ μm
			$f = 0,8$ mm/s	$R_a = 0,1546$ μm
			$f = 1,6$ mm/s	$R_a = 0,1647$ μm
	$\omega = 10000$ rpm $a_p = 10$ μm	Ti-6Al-4V	$f = 0,4$ mm/s	$R_a = 0,0972$ μm
			$f = 0,8$ mm/s	$R_a = 0,1058$ μm
			$f = 1,6$ mm/s	$R_a = 0,1446$ μm

2.3.1 Forças de corte

As forças de corte medidas na microfresagem são muito pequenas e Alhadeff et al. [17] explicam que é importante analisar as forças usando dois métodos, a medição da força média de corte e medição da amplitude da força de corte, isto porque para obter um bom acabamento não podem existir erros significativos nem demasiado desgaste da ferramenta, portanto, é útil analisar a assinatura da força para cada dente da ferramenta. O primeiro método é usado para obter uma generalidade das forças de corte na direção de avanço (Figura 2.4) e correspondente média do valor do sinal sobre o tempo de corte adequado.

O segundo torna-se um pouco mais complexo pois estuda a amplitude das forças de corte ao longo do tempo.

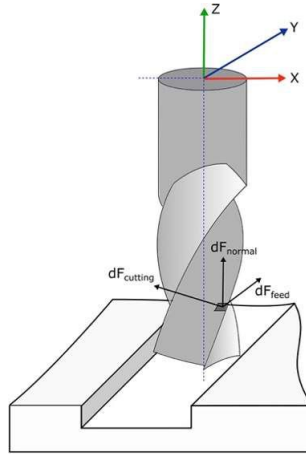


Figura 2.4: Forças exercidas na microfresagem [17].

Na maquinagem de titânio a velocidade de corte tem certa influência nas forças de corte, como foi investigado por Hojati et al. [7] e apresenta-se na Figura 2.5, onde também apresentam a equação para calcular a espessura de apra não cortada (h_{cu}),

$$h_{cu} = 2f_z \frac{\sqrt{a_e D - a_e^2}}{D}. \quad (2.1)$$

Onde a_e , D e f_z corresponde à profundidade radial de corte, diâmetro da ferramenta e avanço por dente, respetivamente. Podemos ver na Figura 2.5(a) e Figura 2.5(b) as diferenças entre as forças de fresagem para EBM e Ti6Al4V obtido por extrusão, e observa-se diferenças reduzidas nas forças de corte entre ambas, mesmo o EBM sendo mais duro.

No seguimento da investigação apontam que o diferente tratamento térmico aplicado na microestrutura tem influência na maquinagem, alterando as forças de corte e a dureza do material. Alguns tratamentos térmicos podem vir a influenciar o aumento das forças de corte, mesmo apresentando menor dureza [7].

2.3.2 Temperatura de corte

A temperatura de corte apresenta alguma relevância na maquinagem, e Câmara et al. [6] explicam que tanto na precisão da peça como na vida útil da ferramenta. Na microfresagem espera-se valores de temperatura inferiores comparando com a fresagem convencional pois esta apresenta menores espessuras de apra não cortada, mas a expansão térmica da peça durante a maquinagem é muito importante e pode resultar numa falta de precisão do componente final.

Thepsonthi and Özel [9] utilizaram um processo de microfresagem de titânio para estudar o comportamento de ferramentas com diferentes revestimentos, sendo esta ferramenta composta por carboneto de tungstênio de grão fino em uma matriz de cobalto (WC/Co)

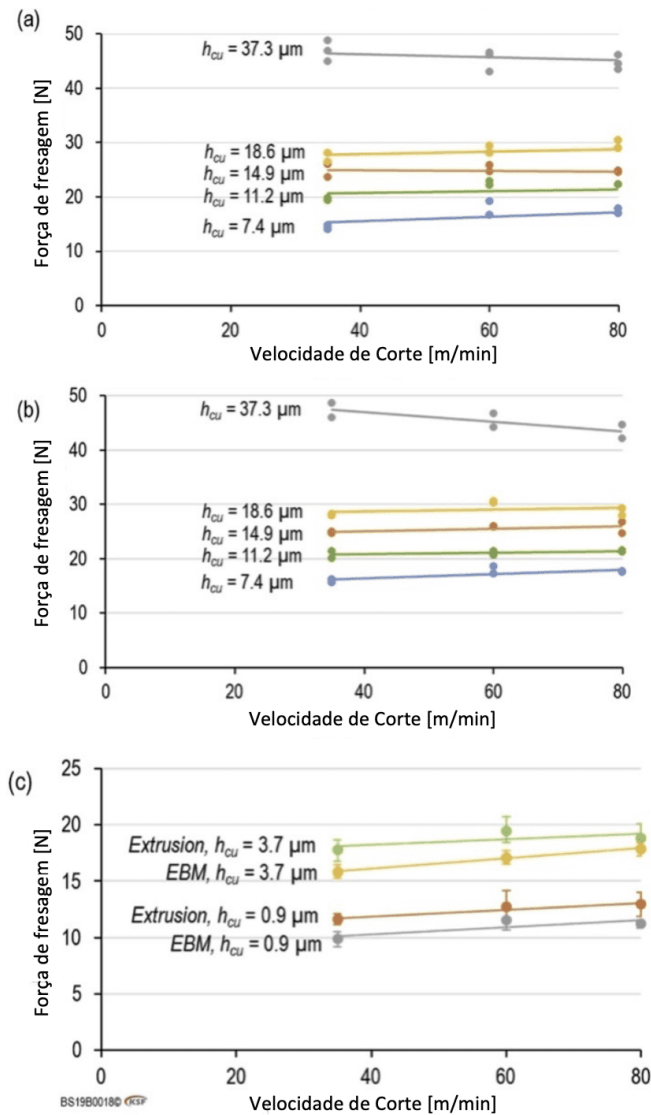


Figura 2.5: Influencia das velocidades de corte e espessura de apra para a) EBM, b) Ti6Al4V obtido por extrusão e c) comparação entre EBM e Ti6Al4V [7].

e um revestimento de Nitrito Cúbico de Boro (cBN). Apresentaram que ao comparar a temperatura média das experiências obtidas com o ângulo de rotação da ferramenta, observam que existem revestimentos que são mais resistentes à temperatura do que outros, neste caso, a ferramenta com revestimento de Nitrito Cúbico de Boro (cBN) apresenta temperaturas inferiores. Além disso, a temperatura média obtida aumenta com o aumento da velocidade de corte e com o avanço por dente, ou seja, aumenta a temperatura com o aumento da remoção de material.

Pratap et al. [10] realizaram simulações FEM para obter o comportamento de um processo de fresagem de uma liga Ti-6Al-4V, utilizando os valores apresentados na Tabela 2.2 para as condições de corte, resultando em temperaturas demasiado elevadas e até comparadas com as obtidas numa fresagem convencional, sendo a mais elevada $845,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, temperaturas

estas que obtidas num processo de microfresagem aceleram o desgaste da ferramenta.

Balázs et al. [1] esclarecem a importância da temperatura de corte na maquinagem, pois afeta significativamente o desgaste da ferramenta, a formação de rebarba, a qualidade superficial. Numa das suas investigações, ele aborda simulações realizadas em titânio, obtendo várias temperaturas dependendo da simulação. Nos resultados apresentados houve temperaturas máximas de $845,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ utilizando certos parâmetros de corte ($v_c = 32,415\text{ m/min}$, $f_z = 1\text{ }\mu\text{m}$ e $a_p = 30\text{ }\mu\text{m}$), sendo que também foram obtidos valores de temperaturas de $420\text{ }^{\circ}\text{C}$. As temperaturas de corte na microfresagem são mais baixa do que na macrofresagem, como apresentado na Figura 2.6, e geralmente a temperatura da micro ferramenta é abaixo dos $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

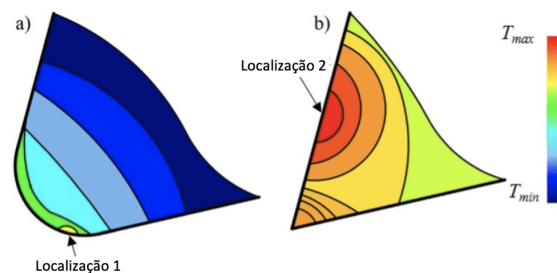


Figura 2.6: Temperaturas de corte em a) microfresagem b) macrofresagem [1].

2.3.3 Espessura mínima de apara

A espessura mínima de apara é um atributo essencial na microfresagem, juntamente com a alta precisão, para se obter um bom acabamento superficial. Para conseguirmos obter um bom acabamento superficial e cumprir os requisitos necessários é essencial fazer uma seleção das condições de corte ideais, para assim controlar e melhorar a capacidade do processo. Na microfresagem a remoção do material é consideravelmente inferior em comparação à fresagem convencional, pois neste caso, a espessura da apara não deformada pode ser comparável em tamanho ao raio da aresta de corte da ferramenta [5].

Aramcharoen and Mativenga [18] investigaram então a espessura mínima de apara obtida na microfresagem, e introduzem que uma apara não será formada se a espessura da apara não deformada for menor que um valor crítico, ou como se trata neste caso, espessura mínima da apara. Eles sugerem que, como mostrado na Figura 2.7, se a espessura da apara (h) for menor que a espessura mínima da apara (h_m), o material será comprimido pela ferramenta (Figura 2.7(a)). Neste caso o material recupera após a passagem da ferramenta, ou seja, deformação elástica, logo não há material removido sob forma de apara. Na Figura 2.7(b) a espessura da apara é igual à espessura mínima da apara, e aqui a apara começa a aparecer, mas ainda tem uma pequena ação de deformação plástica e recuperação, obtendo assim material removido inferior ao desejado. Por último, a Figura 2.7(c) mostra que quando a espessura da apara é maior que a espessura mínima da apara, o material começa a ser removido.

É então importante determinar a relação entre a espessura mínima da apara e o raio da aresta de corte, para então obtermos a remoção de material desejada. A relação entre a espessura de apara e o raio da aresta da ferramenta influencia então, o ângulo de

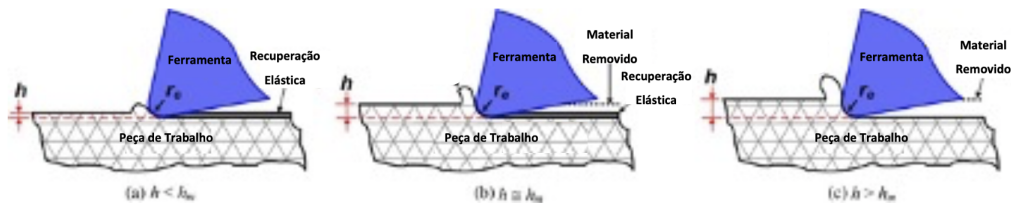


Figura 2.7: Formação de apra relativamente à espessura mínima de corte [18].

saída efetivo, a espessura da apra e a energia de corte específica. Como investigaram Aramcharoen and Mativenga [18] se a relação for igual a 1, o ângulo efetivo torna-se negativo, logo o raio da aresta da ferramenta é importante para o controlo da espessura mínima da apra. Dependendo do material existem várias razões entre a espessura de apra e o raio da aresta de corte da ferramenta, para determinar a espessura mínima da apra.

2.3.4 Formação de rebarba

A formação de rebarba quando se trata de microfresagem pode ser considerado o principal dano da superfície maquinada devido à dificuldade de remoção de material, sendo que este, quanto mais elevada for a sua dureza maior será a presença de rebarba devido a maiores taxas de desgaste.

Na maquinagem de aços, Câmara et al. [6] investigaram sobre o uso de um avanço correspondente aos valores da espessura de apra não cortada variando entre 20% e 80% do raio da aresta da ferramenta. Como conclusão a rebarba não foi formada satisfatoriamente usando a menor espessura como explicação, gerando rebarbas excessivas na parede da ranhura. Aumentando a espessura o tamanho da rebarba foi diminuindo devido à diminuição da contribuição do efeito de deformação.

Também foi observado que o lubrificante pode gerar maior formação de rebarba, sendo que o uso mínimo de lubrificante diminui a formação da mesma. Assim como a altura da rebarba pode variar periodicamente ao longo da rotação da ferramenta e ser afetada pela direção do fresamento, tornando a influência da orientação de maquinagem relevante como a velocidade de corte e o avanço [6].

Na maquinagem entre dois tipos de titânio, o EBM e o Ti6Al4V obtido por extrusão, Hojati et al. [7] apresentaram uma investigação entre a espessura de apra não cortada, a energia de corte específica e a formação de rebarba. Obtiveram uma rebarba considerável quando a espessura de apra era baixa e a energia de corte específica era maior, e por outro lado a rebarba não podia ser observada na espessura de apra mais elevada. Foi então investigada a formação de rebarba, sendo que o principal fator para a formação de rebarba é a quantidade de deformação na zona de corte, quanto mais elevada for a deformação isto cria rebarbas mais largas e mais espessas. Ou seja, concluíram que nas peças de EBM a rebarba seria mais estreita e mais fina, uma vez que a deformação plástica é menor na maquinagem destes.

A Figura 2.8 mostra a comparação entre a formação de rebarba das peças estudadas, a uma $vc=35$ m/min e $h_{cu}=0,9$ μ m, e de acordo com o apresentado observaram que a

rebarba da peça Ti6Al4V convencional é do tipo ondulada, e por outro lado, a rebarba da peça de EBM Ti6Al4V é descontínua e muito menor que a anterior, estas explicadas pelas irregularidades da peça EBM [7].

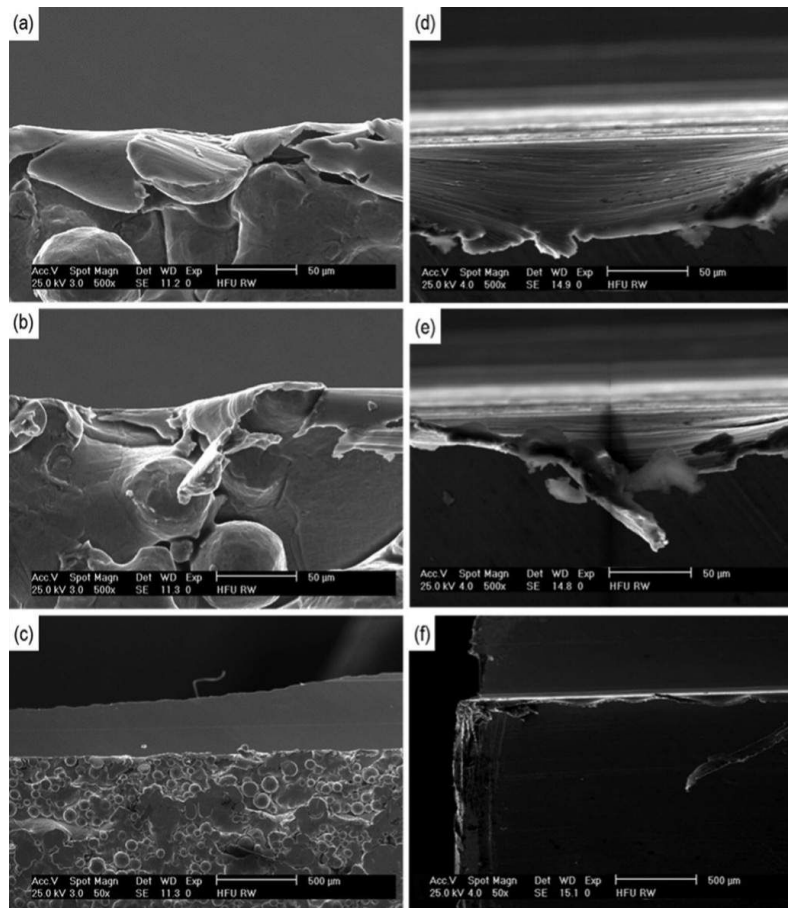


Figura 2.8: Comparação de rebarba obtida nas peças EBM (a-c) e Ti6Al4V por extrusão (d-f) [7].

Para melhor observar as rebarbas a peça EBM foi facejada para retirar as irregularidades, obtendo-se então uma rebarba mais contínua e com um formato também este ondulado, com a comparação que este seria mais pronunciado do que as peças de Ti6Al4V convencional. Conclui-se que para além da dureza, também outro fator associado à microestrutura do material pode influenciar na formação da rebarba [7].

Segundo Pratap et al. [10], a bibliografia sugere que na maquinagem de ligas de titânio, devido à baixa sua condutividade térmica, ocorre a geração de elevadas temperaturas e o efeito do amaciamento e endurecimento por deformação reduzem com o aumento da temperatura. Como na maquinagem de ligas de titânio ocorre elevada taxa de deformação e elevada temperatura, a resistência à deformação plástica do material não será muito afetada pelo fenómeno de amaciamento

Noutra investigação foram observadas três abordagens obtidas por Thepsonthi and Özel [12], chegando no final aos valores apresentados na Tabela 2.2. Na primeira abordagem

apenas a rugosidade da superfície e a largura de rebarba superior foram consideradas, a segunda abordagem inclui também o desgaste da ferramenta, e a terceira abordagem foi incluído tanto o desgaste da ferramenta como as forças de corte. A primeira e a segunda abordagem obtiveram valores demasiado altos para a quantidade de rebarba tendo como comparação os valores previstos, ou seja, soluções insatisfatórias. O principal motivo para a primeira abordagem ser insatisfatória pode ser relacionado com o desgaste da ferramenta, já que o mesmo não está incluído no esquema de otimização. Para a segunda abordagem também indicam o desgaste da ferramenta como a maior causa, indicando assim que o desgaste da ferramenta deve ser limitado ao ponto de não ter um efeito significativo na formação da rebarba. Já a terceira abordagem apresenta o melhor resultado, obtendo quase nenhuma rebarba no fresamento. Nesta já foi limitado o desgaste da ferramenta obtendo-se assim melhores resultados, concluindo-se então que para reduzir a formação de rebarba no fresamento do titânio, deve ser controlado o desgaste da ferramenta e as forças de corte.

Dependendo do raio da aresta da ferramenta obtêm-se diferentes rebarbas, como foi apresentado por Özel et al. [13] onde investigaram a espessura e a largura da apanha dependendo do raio da aresta da ferramenta, obtendo os resultados apresentados na Tabela 2.2. O menor raio usado foi de $3 \mu\text{m}$ sendo esta uma ferramenta não usada, que resultou num menor dano do que ao usar as ferramentas com raio de aresta de $6 \mu\text{m}$ e $12 \mu\text{m}$, ferramentas estas já usadas. As medições para a largura e a espessura foram obtidas com uma rotação de 180° da ferramenta. Na Figura 2.9 é apresentado o resultado destas experiências com os diferentes raios de arestas das ferramentas e as aparas obtidas.

Bajpai et al. [2] investigaram também a formação da rebarba, neste caso, a altura e largura máximas da rebarba, em velocidade convencional (10000 rpm) e a uma velocidade mais alta (90000 rpm), e em maquinagem concordante (ferramenta avança na direção da rotação), sendo as que criam menor quantidade de rebarba. Em velocidade convencional e maquinagem discordante ou convencional (direção de avanço da ferramenta é oposto à rotação), a altura e largura da rebarba estaria entre $200\text{-}300 \mu\text{m}$ e $100\text{-}200 \mu\text{m}$, respetivamente, o que em comparação com os valores da Tabela 2.2, que indicam os valores da maquinagem concordante, que são de $44 \mu\text{m}$ e $20 \mu\text{m}$ para a altura e a largura máxima, respetivamente. Ou seja, conclui-se que a maquinagem ascendente produz uma menor rebarba. Estes valores retratam a zona de entrada de maquinagem, já que na rebarba de saída acontece o contrário, e a rebarba na maquinagem concordante é maior do que na discordante, isto explicado devido à articulação plástica da superfície livre na saída da ferramenta.

Posteriormente investigou os resultados obtidos a uma velocidade mais elevada, na zona de entrada gerou-se uma maior rebarba na maquinagem discordante, tal como aconteceu na velocidade convencional, devido à acumulação da rebarba. Na região de saída de maquinagem, a rebarba na maquinagem discordante foi muito menor do que na maquinagem concordante, tal como aconteceu na velocidade convencional, mas neste caso, a rebarba obtida na maquinagem concordante foi muito menor do que a obtida na velocidade convencional, tal como indica a Tabela 2.2, isto explicado pelas menores cargas em velocidades de corte mais elevadas [2].

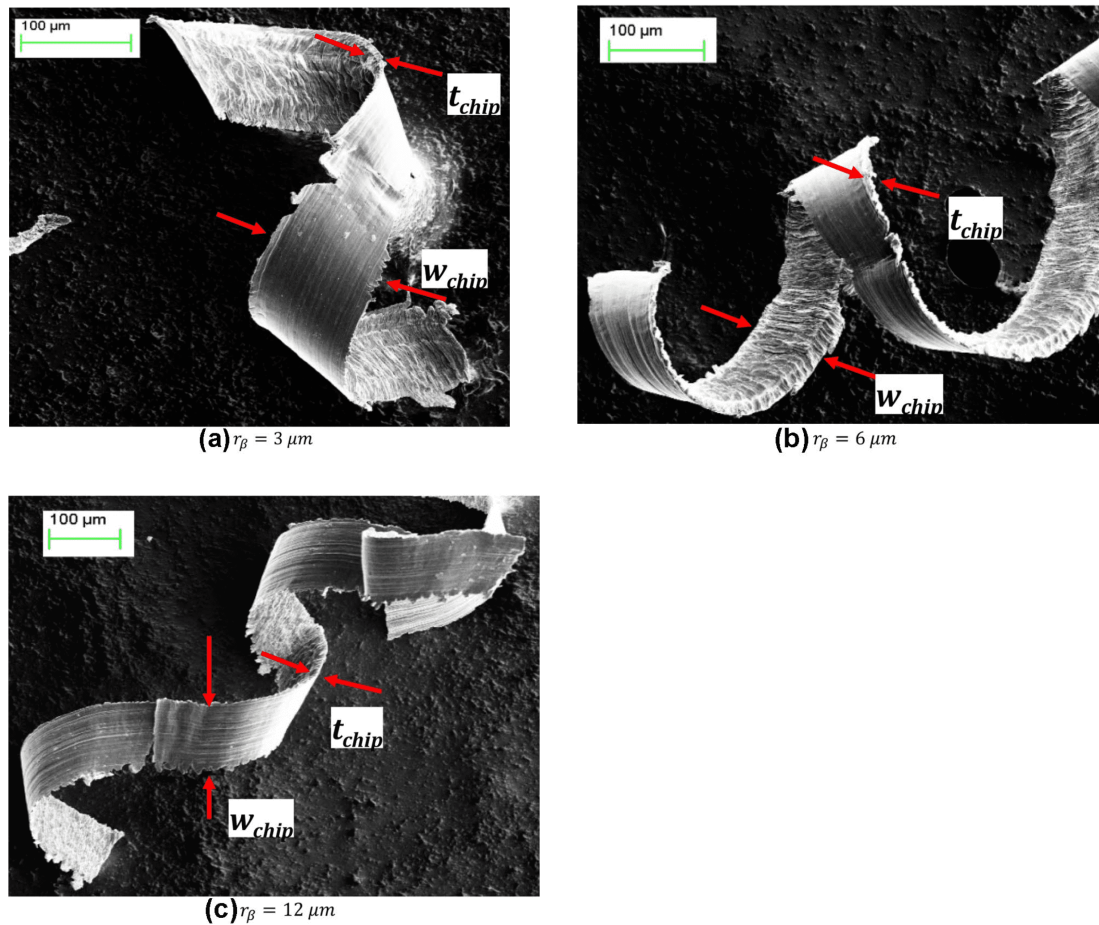


Figura 2.9: Formação de apara para diferentes raios de aresta das ferramentas[13].

2.3.5 Qualidade de acabamento superficial

Através da investigação do desgaste da ferramenta em microfresagem é possível definir estratégias de fabrico que favoreçam o acabamento superficial e geométrico da peça, especialmente em industrias de fabrico de componentes de alto valor acrescentado.

Câmara et al. [6] afirmam que um aspeto crítico do acabamento superficial deriva da fresagem de uma superfície por passagens paralelas sem sobreposição das mesmas, sendo a repetibilidade de passagens um erro que fornece uma elevada rugosidade na superfície. Para além disso observa que uma fresagem por meio de ferramentas de ponta esférica é caracterizada por ondulações mais altas do que o fresamento convencional, e por último a recuperação elástica aumenta também a rugosidade sendo que quanto mais afiada for a ferramenta melhor será o acabamento superficial. Como conclusão a rugosidade superficial mais baixa (em Rz) foi obtida por uma estratégia de passagem espiral de sobreposição, seguida por passagem espiral paralela e ziguezague paralelo.

Em outra investigação, Hojati et al. [7] compararam o acabamento superficial de maquiagem entre peças EBM Ti6Al4V e Ti6Al4V obtidas por extrusão, como demonstrado na Figura 2.10, as peças EBM obtêm uma superfície mais fina na maioria dos casos, isto

porque possui uma maior dureza. Isto é explicado pelo material na frente da aresta de corte move-se em direção à face de saída para formar a apra ou então mover-se sobre a face do flanco, este porem degrada a superfície maquinada. Ao ocorrer a separação do material, e no caso das peças em Ti6Al4V convencional este ser mais elevado do que as peças em EBM, contribui para uma maior condução de material sob a ferramenta produzindo mais abrasão.

Na continuação da investigação Hojati et al. [7] concluíram que com velocidades de corte de $v_c=35$ m/min e $v_c=80$ m/min, a rugosidade da superfície diminui com o aumento da espessura da apra de $h_{cu}=0,9$ μm para $h_{cu}=3,7$ μm nas peças de EBM Ti6Al4V, e se a espessura da apra for aumentando ainda mais a rugosidade começa a aumentar até uma espessura de $h_{cu}=37,3$ μm . Se por outro lado a espessura de apra não cortada for maior do que o raio da aresta de corte da ferramenta utilizada, o comportamento de corte é semelhante ao da macro fresagem e resulta numa maior rugosidade superficial.

Balázs et al. [1] investigaram a microfresagem de titânio e apresentam que o aumento da velocidade de corte não melhora a qualidade superficial, mas que um material com tamanho de grão mais fino tem uma qualidade superficial ligeiramente melhor. Outra melhoria obtida foi no valor da largura de corte, sendo que com valores mais baixos da largura de corte obtiveram rugosidade mais baixas. Posteriormente estudam estratégias de microfresagem concordante (up-milling) e discordante (down-milling), chegando a conclusão de que resultaram texturas diferentes. No caso do fresamento discordante ocorreu uma maior deformação compressiva em comparação com o concordante. Também se estudou diferentes estágios de desgaste da ferramenta, sendo que os maiores defeitos neste caso seriam, algumas marcas de alimentação, resíduos de material e manchas no material, sendo que à medida que o desgaste vai aumentando torna-se mais evidente e significativo os detritos do material.

Também foi estudada uma comparação entre as duas peças, a uma velocidade de corte de $v_c=35$ m/min e espessura de apra de $h_{cu}=0,9$ μm , $3,7$ μm e $37,3$ μm . Entre as duas primeiras espessuras não houve uma mudança notável na superfície maquinada, mas na maior espessura de apra houve uma significativa alteração, aparecendo marcas de avanço na superfície que estão associadas ao aparecimento de maior rugosidade [7].

Posteriormente foi investigada a ondulação existente neste estudo, e como mostra na Figura 2.11, as peças de Ti6Al4V convencional obtêm uma maior ondulação sendo esta mais representada na espessura de apra de $h_{cu}=37,3$ μm devido à menor dureza [7].

Em outras investigações, como Kuram and Ozelik [14] demonstraram, a velocidade de rotação resulta na diminuição da rugosidade da superfície, com uma diminuição de 26,2% para microfresagem concordante e de 28,4% quando a microfresagem é feita em ziguezague com um aumento da velocidade de rotação. Como se pode ver na (Tabela 2.2) para um avanço de 75 mm/min, eles obtiveram a menor rugosidade com uma velocidade de rotação de 28000 rpm, esta que foi aumentada desde 12000 rpm até representar um decréscimo de 59,1% na rugosidade. Posteriormente o avanço foi aumentado para 150 mm/min, e neste caso a melhor rugosidade foi encontrada na microfresagem discordante, reduzindo 6,7% em comparação com a microfresagem concordante e 14,5% comparando com a microfresagem em ziguezague. Na diminuição da velocidade de rotação para 20000 rpm a rugosidade também diminui, neste caso 12,5% no caso da microfresagem

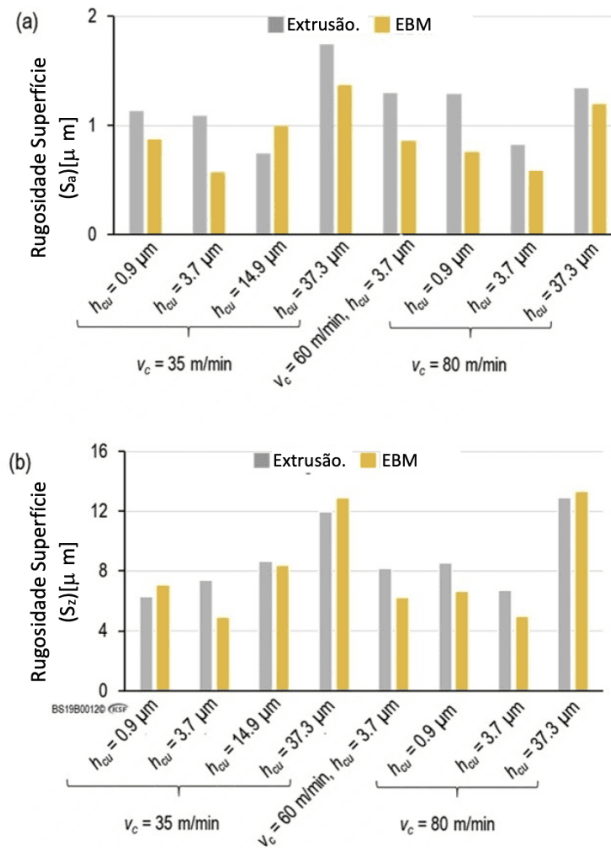


Figura 2.10: Comparação de acabamento superficial [7].

discordante em comparação com a menor velocidade de rotação estudada. Chegando a conclusão de que com um aumento da velocidade de rotação, a rugosidade da superfície vai diminuir para qualquer caminho utilizado na microfresagem, mas também concluem que o avanço ao ser aumentado vai prejudicar a rugosidade obtida, mesmo não havendo grandes diferenças entre as duas estudadas.

Baldo et al. [3] realizaram uma investigação de comparação entre ferramentas novas e usadas, chegando a conclusão de que as ferramentas desgastadas geram menores valores de rugosidade superficial, demonstrados na Tabela 2.2. Mesmo assim existe um comportamento aleatório e os valores mostraram-se bastante próximos para ambas as ferramentas, mas afirmam que os valores da rugosidade tendem a diminuir com o uso da ferramenta. Posteriormente analisou a influência da velocidade de corte e do avanço na rugosidade superficial, e neste caso, o aumento da velocidade de corte demonstrou uma diminuição da rugosidade superficial. Já em sentido oposto se encontra o avanço, que neste caso, o aumento do avanço apresentou um aumento da rugosidade, indo de acordo com o fresamento convencional, onde o maior avanço também gera pior rugosidades.

A condição da aresta de corte da ferramenta e o valor do avanço, como já referido, influenciam as propriedades da superfície maquinada, Gözü and Karpaz [15] investigaram a influência do avanço, de certo modo que conclui que conforme o avanço é aumentado,

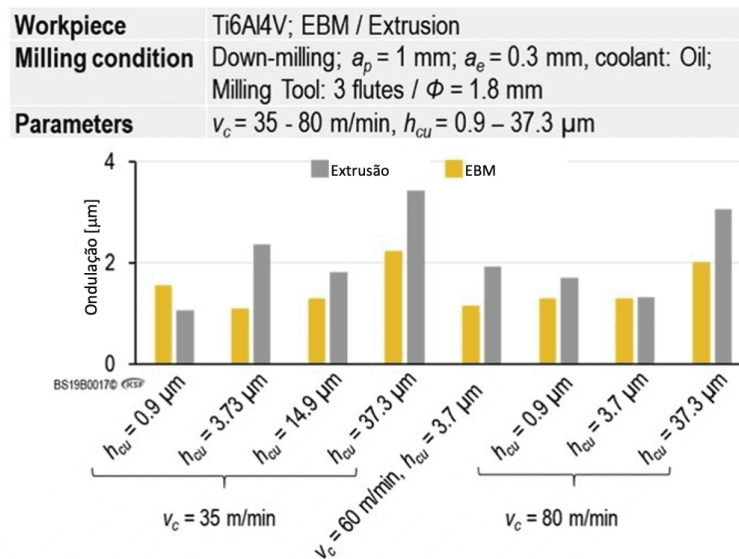


Figura 2.11: Comparação de ondulação [7].

as marcas do mesmo começam a ser mais visíveis na superfície. A principal investigação foi o Desvio da rugosidade média aritmética (R_a), mas também incluem a assimetria superficial (R_{sk}). A assimetria superficial descreve a forma de distribuição da topografia, ou seja, se este for >0 existe picos na superfície e se for <0 então por sua vez existem vales na superfície. Como apresentado na Tabela 2.2, o melhor valor de rugosidade superficial foi de $0,6 \mu\text{m}$. No entanto como já foi dito, com o aumento do avanço, a rugosidade da superfície também aumenta. Posteriormente, com o aumento do avanço também se conclui que deixa marcas mais visíveis na superfície, o que vai aumentar a rugosidade nessa área, e pode chegar a comportar-se como um processo de fresagem idêntico ao convencional, onde o avanço é o parâmetro mais influente na rugosidade superficial.

Numa investigação de diferentes velocidades de maquinagem, Kiswanto et al. [16] investigaram a rugosidade da superfície obtida com velocidades altas, onde os resultados obtidos se encontram na Tabela 2.2. No caso das velocidades elevadas, foram usadas três velocidades de rotação, 30000 rpm, 50000rpm e 80000rpm, avanço de 7 mm/s e 10 μm de profundidade. Nesta investigação a melhor rugosidade obtida ($0,0968 \mu\text{m}$) corresponde a velocidade mais elevada. Foi observado que a partir da velocidade de 30000 rpm, as cargas de apra produzidas eram menores e isto resultava numa rugosidade melhor.

Nas velocidades baixas, Kiswanto et al. [4] utilizaram as velocidades de 3000 rpm, 7000 rpm e 10000 rpm (Tabela 2.2), com uma profundidade de 10 μm e com um avanço de 0,4 mm/s, 0,8 mm/s e 1,6 mm/s. Nesta investigação a rugosidade mais baixa foi obtida no avanço mais baixo e na velocidade de rotação mais alta, e no sentido contrário a rugosidade mais alta foi encontrada no avanço mais alto e na velocidade mais baixa. Tal como observado anteriormente, também neste caso o melhor resultado para a rugosidade foi aparecendo com o aumento da velocidade, o que faz com que as forças de corte

diminuam e ainda se obtenha uma melhor vida útil da ferramenta. Nesta investigação observou-se que com avanço mais baixo ocorre uma melhor remoção do material, e com a ajuda da velocidade a remoção do material seja feita de forma mais perfeita. Se por sua vez for usada um alto avanço com uma velocidade mais baixa, então, observa-se uma grande carga de corte, o que leva a calor excessivo e desgaste mais rápido da ferramenta e até possível quebra. Também é possível observar marcas de corte mais finas na rugosidade mais baixa, sendo que a rugosidade mais alta contém marcas devido ao avanço mais elevado. Conclui-se então que a diferença obtida entre as altas e baixas velocidades não tem uma diferença significativa, o que significa que a microfresagem a baixas velocidades pode significar uma economia de custo de ferramentas de corte e menor orçamento sem sacrificar a qualidade da superfície.

2.4 Síntese

Após o investigado neste estado de arte sobre a microfresagem de ligas de titânio, descrevemos um pouco os fatores mais importantes tendo em conta o nosso objetivo final para a microfresagem.

Tendo em conta a espessura mínima da aparas, compreendemos que, é um atributo essencial para obter um bom acabamento superficial, mas para tal é necessário prever uma boa seleção das condições de corte a utilizar. É importante também determinar uma boa relação entre a espessura mínima da aparas e o raio da aresta de corte da ferramenta, isto para se obter uma remoção de material desejada, e uma melhor rugosidade superficial.

A velocidade de corte tem influência nas forças de corte, e juntamente com o avanço por dente pode também influenciar a temperatura de corte, sendo que esta apresenta relevância na maquinagem de titânio, e tem de ser mais baixa do que as temperaturas na maquinagem convencional. As velocidades de rotação mais elevadas correspondem também a um maior desgaste da ferramenta, desgaste este que ao ser controlado pode reduzir a produção de rebarba.

Na parte da formação da rebarba, esta é muito importante pois é o principal fator que causa dano na superfície, quanto maior for a dureza da peça a maquinar, existe maior presença de rebarba e quanto maior for a deformação obtida, a rebarba torna-se mais larga e espessa.

Para um bom acabamento superficial, sabemos que a velocidade de rotação pode melhorar a rugosidade superficial, mas o avanço por outro lado prejudica a rugosidade obtida, assim como a repetição de passagens da ferramenta.

Parte II

Métodologia experimental

Capítulo 3

Procedimento experimental

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos adotados neste trabalho, onde se detalha a forma do provete e o seu material bem como, todas as etapas experimentais, incluindo a estratégia, ferramenta de corte, parâmetros de corte definidos, etc. apresentados nas secções seguintes.

Todos os ensaios foram realizados no laboratório de tecnologia mecânica (DEM), e no laboratório MACTRIB (DEM) da Universidade de Aveiro (UA).

3.1 Provetes

3.1.1 Desenho

Para obtenção dos resultados de rugosidade e acabamento superficial nestes ensaios foi utilizado um provete cujo diâmetro era de 12mm, que se encontra representado na Figura 3.1. Partindo deste material foi desenhada uma zona plana a ser maquinada com o propósito de medir a rugosidade. Na sua parte superior, foram projetados seis cortes verticais com a largura igual à da ferramenta e com diferentes distâncias entre eles (de 0,2 mm a 0,6 mm), para possível visualização de rebarba nas paredes.

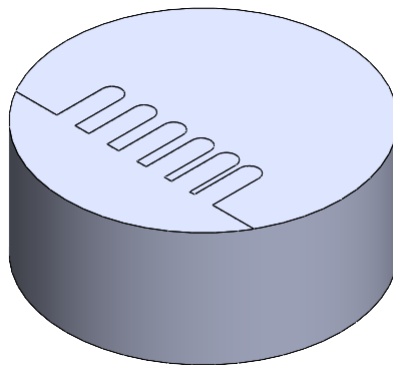


Figura 3.1: Desenho do provete

3.1.2 Material

O material utilizado é o titânio, sendo que aqui, recorre-se a duas das ligas distintas. Uma delas Ti-6Al-4V, que é a liga de titânio mais utilizada, destacando-se pela sua alta resistência à corrosão, e a outra Ti-6Al-7Nb, que, ao ser constituída por nióbio, permite melhorar a compatibilidade óssea. Na Tabela 3.1 encontra-se detalhada a composição de cada liga de acordo com as informações do fornecedor deste material (Tifast).

Tabela 3.1: Composição química das ligas de titânio (cortesia: Tifast Itália) [19].

Liga	Al	V	C	Fe	O	N	H	Y
Ti-6Al-4V	6,75	4,5	0,08	0,35	0,20	0,05	0,0125	0,005
	Al	Nb	C	Fe	O	N	H	Ta
Ti-6Al-7Nb	6,50	7,50	0,08	0,25	0,20	0,05	0,009	0,50

Tabela 3.2: Características físicas e mecânicas das ligas de titânio utilizadas (cortesia: Tifast) [19].

Características físicas e mecânicas	Ti-6Al-4V	Ti-6Al-7Nb
Tensão Nominal Máxima	1091 MPa	974 MPa
Tensão Limite de Elasticidade	1007 MPa	906 MPa
Coefficiente de estrição	48,2 %	41,6 %
Extensão após rutura	15,5 %	18,8 %
Massa Volúmica	4430 Kg/m ³	4520 Kg/m ³
Micro dureza [20]	360 HV	340HV

De acordo com a informação da Tabela 3.2, a liga Ti-6Al-4V apresenta uma resistência mecânica e dureza superior relativamente à liga Ti-6Al-7Nb, que certamente são consequência das diferenças microestruturais das duas ligas, que apesar de serem do tipo $\alpha + \beta$ apresentam uma fração volumétrica e distribuição da fase β diferentes de acordo com as micrografias apresentadas na Figura 3.2. Importa referir que no caso da liga Ti-6Al-7Nb a fase β é rica em Nióbio, enquanto que na liga Ti-6Al-4V em Vanádio, de acordo com o que se apresenta na Figura 3.3.

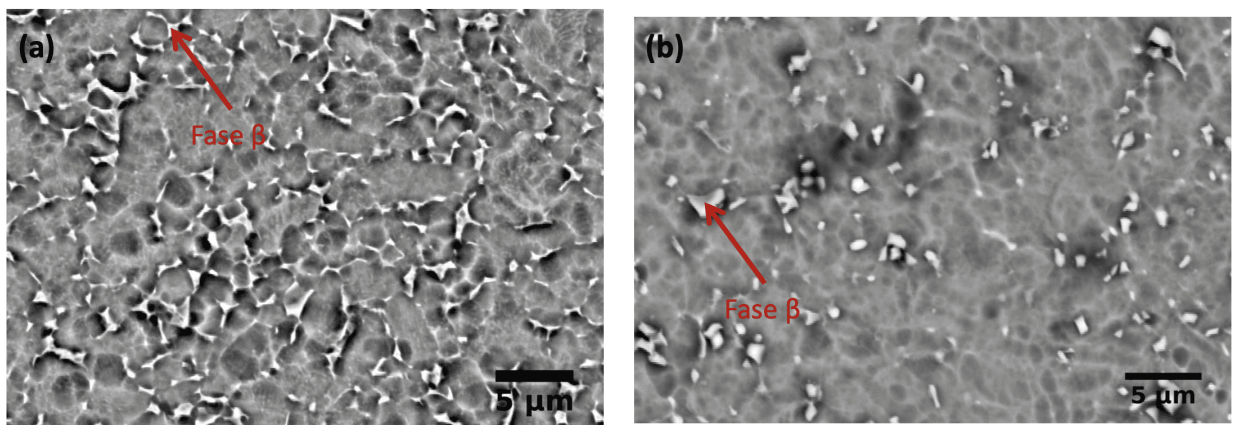


Figura 3.2: Microestrutura obtida por microscopia eletrónica das ligas: a)Ti-6Al-4V b)Ti-6Al-7Nb [20].

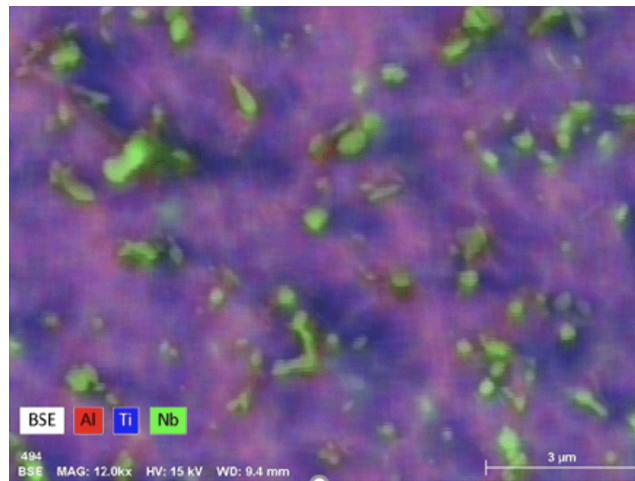


Figura 3.3: Microestrutura obtida por microscopia eletrônica das ligas: Mapa de composição química superficial obtido por EDS [20].

3.2 Ensaios de maquinagem

3.2.1 CNC

Para a maquinagem dos provetes foi utilizado um centro de maquinagem CNC - Mikron VCE 500. Este centro é constituído por três eixos (X,Y,Z), com uma área de trabalho de 500 x 400 x 500 mm, uma velocidade de rotação de 7500 rpm e uma capacidade de armazenamento de 20 ferramentas.



Figura 3.4: CNC - MIKRON VCE 500

3.2.2 Bucha de aperto

De modo a segurar o provete desenhado, de 12mm, para posterior maquinagem, foi utilizado um fixador, com 80mm de diâmetro e 3 *jaw-chuck*. Na Figura 3.5 podemos ver o fixador, juntamente com a base que permite estabiliza-lo na CNC (Figura 3.6).

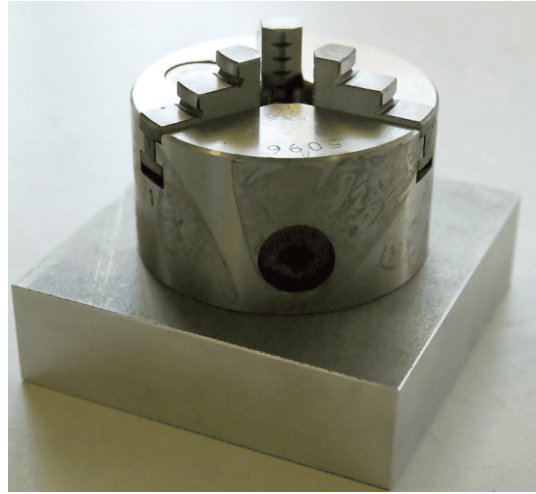


Figura 3.5: *Chuck*

Todos os ensaios foram realizados com emulsão, como demonstrado na Figura 3.6.



Figura 3.6: Posicionamento do provete na CNC

3.2.3 Ferramenta (R216.42-00830-AE08G 1620)

A ferramenta utilizada para a maquinagem foi uma fresa *Sandvik® CoroMill® Plura* ([21]) de ponta esférica de metal duro, constituída por carboneto de tungstênio revestido com TiAlN, com um diâmetro de 0,8 mm e com duas navalhas de corte, demonstrada na Figura 3.7.

3.2.4 Parâmetros de corte

Neste trabalho foram maquinados 4 provetes, 2 por liga. Relativamente aos parâmetros de corte variou-se o avanço e o incremento entre passagens, de acordo com os dados da Tabela 3.3. Os restantes parâmetros mantiveram-se constantes, entre eles uma velocidade



Figura 3.7: Ferramenta para microfresagem

de rotação de 3500 rpm, que com uma ferramenta de 0,8 mm resulta numa velocidade de corte de 8,796m/min, e a profundidade de 50 μm .

Para obter uma ampla gama de resultados nestes ensaios, foram usadas três estratégias de avanço e duas de incremento. A Tabela 3.3 mostra os valores utilizados. De referir que os parâmetros utilizados foram estabelecidos de acordo com sugestões do fabricante da ferramenta.

Tabela 3.3: Parâmetros de corte utilizados

Incremento (mm)	Avanço (mm/dente)
0,1	0,001
	0,003
	0,006
0,05	0,001
	0,003
	0,006

3.2.5 Estratégia de corte

A estratégia de maquinação a utilizar foi constante e mantida para todos os ensaios, alterando apenas o incremento entre passagens (profundidade radial de corte), estes de 0,1 mm e de 0,05 mm. Na Figura 3.8 podemos observar o percurso da ferramenta.

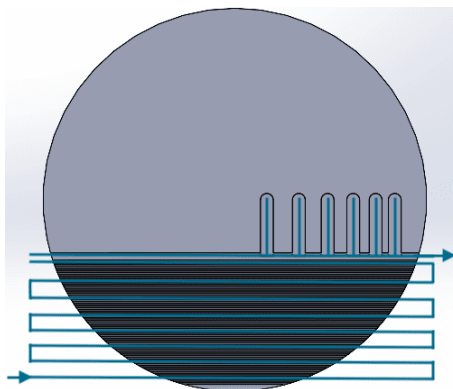


Figura 3.8: Exemplo da estratégia de maquinação

Na Figura 3.9 vemos um exemplo do resultado final e também podemos ver uma Seta a indicar o sentido de medição de rugosidade.

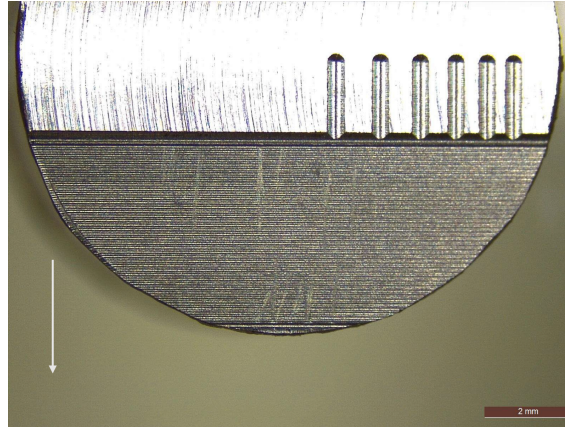


Figura 3.9: Exemplo do provete.

3.3 Avaliação do estado da superfície maquinada

3.3.1 Análise por microscopia ótica

Para observar a qualidade da superfície, foi usado um microscópio ótico. O modelo utilizado foi o Nikon Eclipse LV150, com uma ampliação máxima de 1000x. Nas análises realizadas foi usada a ampliação de 100x e também em alguns casos a de 200x para obter uma melhor visualização de certos pormenores na superfície.

A Figura 3.10 mostra o microscópio utilizado.



Figura 3.10: Nikon Eclipse LV150

3.3.2 Rugosidade superficial

Com o objetivo de caracterizar a rugosidade da superfície, utilizou-se um rugosímetro, modelo Hommel T1000 E demonstrado na Figura 3.11. Este equipamento é capaz de obter um perfil filtrado que representa a topografia da superfície e através desse perfil extraem-se diversos parâmetros quantitativos, entre eles Ra, Rz, Rt, etc.).

Selecionaram-se dois dos parâmetros de amplitude mais reportados na literatura para a caracterização da rugosidade, que são o Ra e Rt. O Ra sendo a área entre o perfil de rugosidade e a sua média ou o valor absoluto da rugosidade ao longo do comprimento medido, e o Rt é a distância vertical do vale mais profundo ao pico mais alto [22].

Para cada ensaio foram retiradas três medidas (direção paralela a maquinagem) com o objetivo de obter uma média destes valores de qualidade superficial. Os parâmetros utilizados para obter estas medições podem ser vistos na Tabela 3.4, dos quais, Lt refere-se ao comprimento total de medição, Lc é o comprimento de *cut-off* e Lm é o comprimento de avaliação.

Tabela 3.4: Parâmetros de medição para avaliar a rugosidade

Parâmetro	Unidade (mm)
Lt	1,5
Lc	0,25
Lm	1,25



Figura 3.11: Hommel Tester T1000 E

Parte III

Resultados

Capítulo 4

Resultados Experimentais

4.1 Análise Superficial através de microscopia ótica

Com a finalidade de analisar a qualidade superficial obtida nestes ensaios, todas as amostras maquinadas foram analisadas num microscópio ótico, de forma a entender o impacto do avanço e do incremento na topografia superficial obtida. Na Figura 4.1 podemos observar o resultado final de um ensaio.

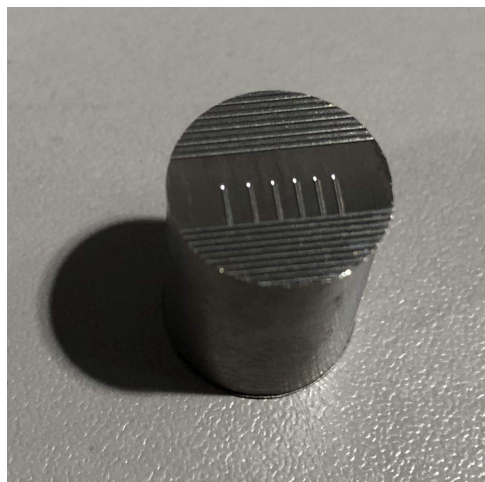


Figura 4.1: Exemplo de ensaio realizado

Neste capítulo mostramos as diferenças obtidas entre os ensaios realizados, em que foram alterados os incrementos e também o avanço. Começamos por mostrar alguns exemplos de ensaios realizados (Figura 4.2) em ambas as ligas de titânio.

Em seguida vamos ver em mais detalhe a observação de rebarbas, e as paredes obtidas.

Na Figura 4.3 mostramos o resultado da microfresagem com um incremento de 0,1 mm e um avanço de 0,001 mm/dente. No avanço mais baixo não se obteve qualquer rebarba, e observa-se que as paredes estão em perfeito estado, como se pode observar na imagem Figura 4.3b), referente ao titânio Ti-6Al-7Nb. Na Figura 4.3a), do titânio Ti-6Al-4V,

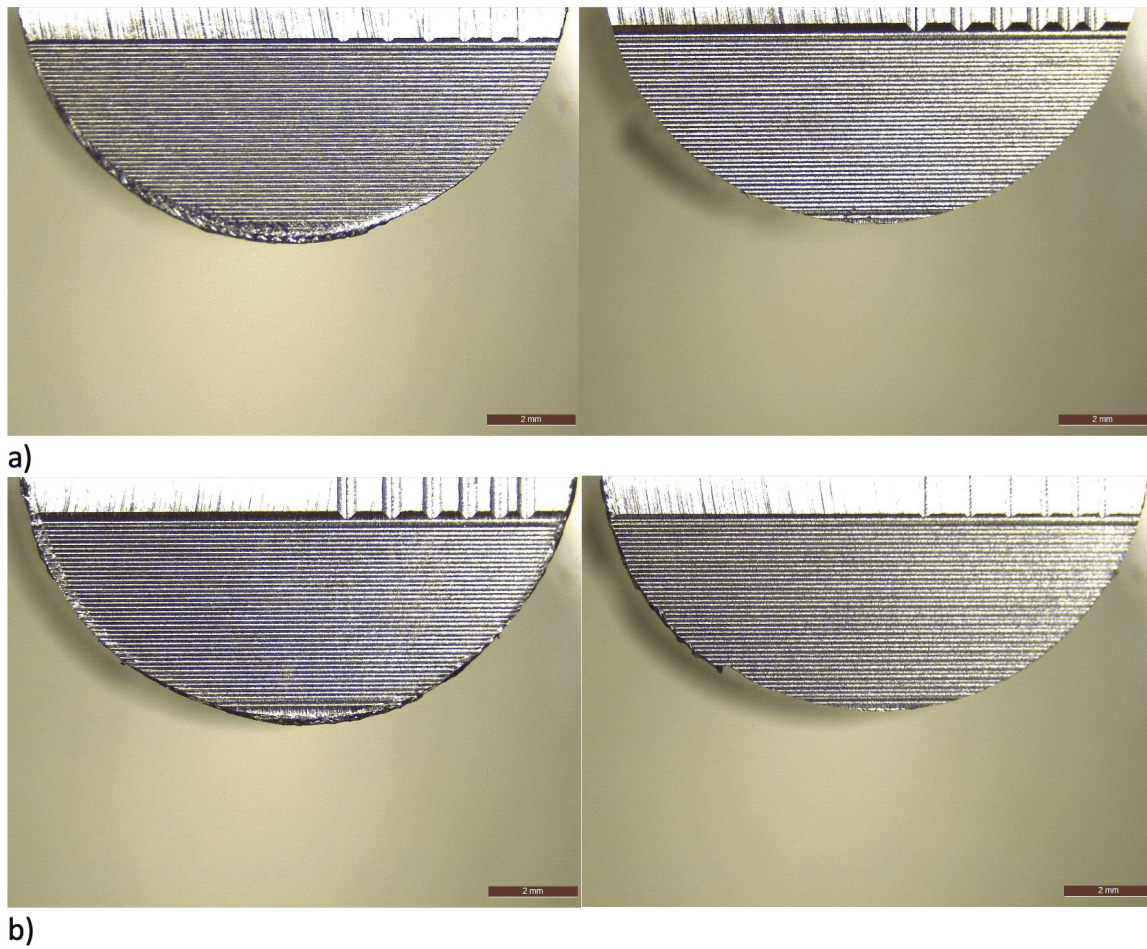


Figura 4.2: Exemplos de provetes finais de ambas as ligas: a)Ti-6Al-4V b)Ti-6Al-7Nb

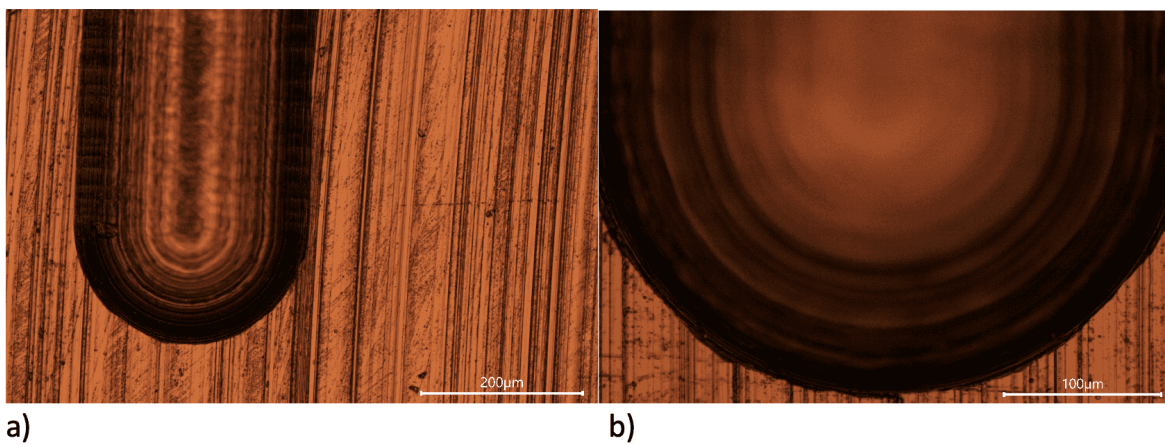


Figura 4.3: Microcopia ótica para incremento 0,1 mm e avanço 0,001 mm/dente: a)Ti-6Al-4V b)Ti-6Al-7Nb

conseguimos observar mais a parede e pode-se observar que não existem irregularidades.

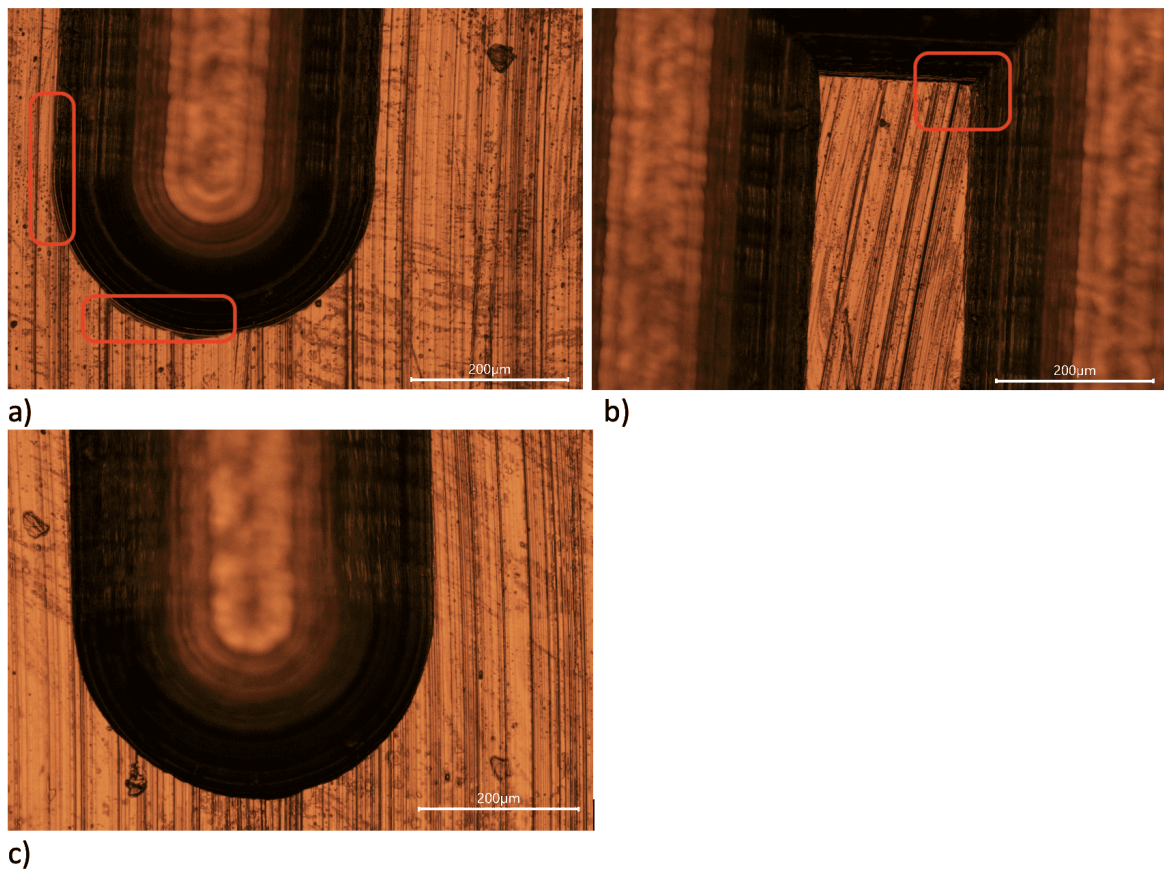


Figura 4.4: Microcopia ótica para incremento 0,1 mm e avanço 0,003 mm/dente: a)Ti-6Al-4V b)Ti-6Al-4V c)Ti-6Al-7Nb

Com o mesmo incremento de 0,1 mm e com um avanço de 0,003 mm/dente, a Figura 4.4 demonstra os resultados obtidos para ambas as ligas. Na Figura 4.4a), para o titânio Ti-6Al-4V, vemos a zona de saída da ferramenta e podemos observar alguns desvios geométricos nesta parte da parede. A Figura 4.4b) também para o titânio Ti-6Al-4V, mostra a zona de entrada da ferramenta na zona das paredes, e também é possível observar uns pequenos desvios geométricos. O contrario acontece na Figura 4.4c), para o titânio Ti-6Al-7Nb, onde não foi possível observar qualquer desvio geométrico, nem rebarba nos ensaios realizados.

Com um incremento de 0,05 mm e um avanço de 0,006 mm/dente, observamos uma maior presença de rebarba (Figura 4.5). Mesmo a rebarba sendo de um tamanho muito reduzido, a sua presença também o era, mas na Figura 4.5a), do titânio Ti-6Al-4V, podemos reparar que existe pequenos indícios de rebarba na parede criada. Na Figura 4.5b), também para o titânio Ti-6Al-4V, existe indícios de rebarba na zona de entrada da ferramenta para a criação das paredes, e as paredes estão mais irregulares do que com o avanço menor. Por fim, na Figura 4.5c), mostramos uma imagem para comparação, esta do titânio Ti-6Al-7Nb, onde parece não existir qualquer rebarba nas paredes na zona de saída da ferramenta. Mesmo com um avanço mais elevado o titânio Ti-6Al-7Nb apresenta

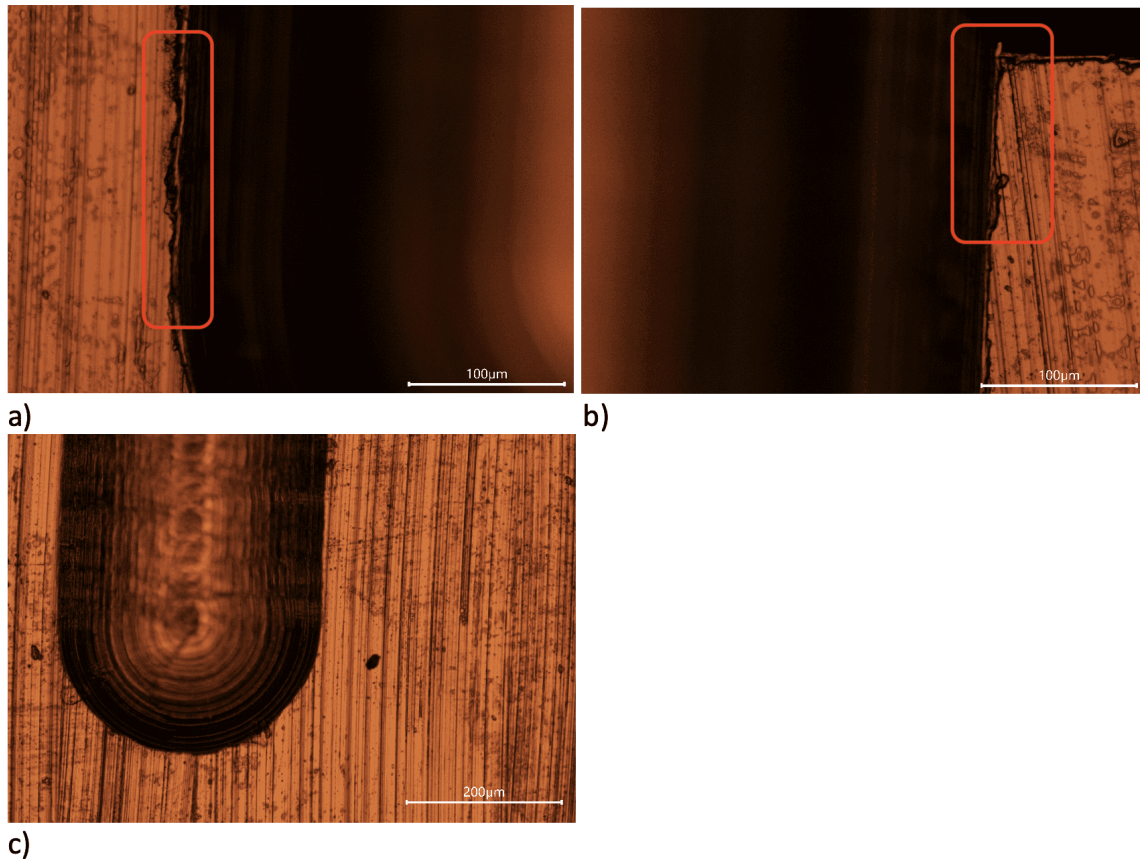


Figura 4.5: Microcopia ótica para incremento 0,05 mm e avanço 0,003 mm/dente: a)Ti-6Al-4V b)Ti-6Al-4V c)Ti-6Al-7Nb

menor presença de rebarba.

4.2 Rugosidade superficial

Como já foi descrito anteriormente, as medições para a rugosidade superficial foram obtidos num perfilômetro. Com os diferentes valores de rugosidade obtidos, foram criados gráficos de comparação entre os valores do avanço e os valores de Ra e Rt.

Na Figura 4.6 são apresentados os resultados da rugosidade média aritmética, Ra em μm para as duas ligas de titânio em função do avanço (mm/dente) e do incremento utilizado nos ensaios. As cores dos marcadores distinguem as ligas, isto é, a laranja encontram-se os resultados para a liga Ti6Al4V, em azul as medições para a liga Ti6Al7Nb, a forma dos marcadores serviu para distinguir os incrementos utilizados nos ensaios, sendo que os círculos representam o incremento 0,1 mm e os triângulos o menor incremento, 0,05 mm (esta codificação foi também usada na Figura 4.7). Da análise do gráfico de dispersão podem retirar-se as seguintes conclusões:

- O menor incremento (0,05 mm) promoveu uma redução do Ra em ambas as ligas. Essa redução é mais evidente a baixo avanço, para ambas as ligas e vai diminuindo

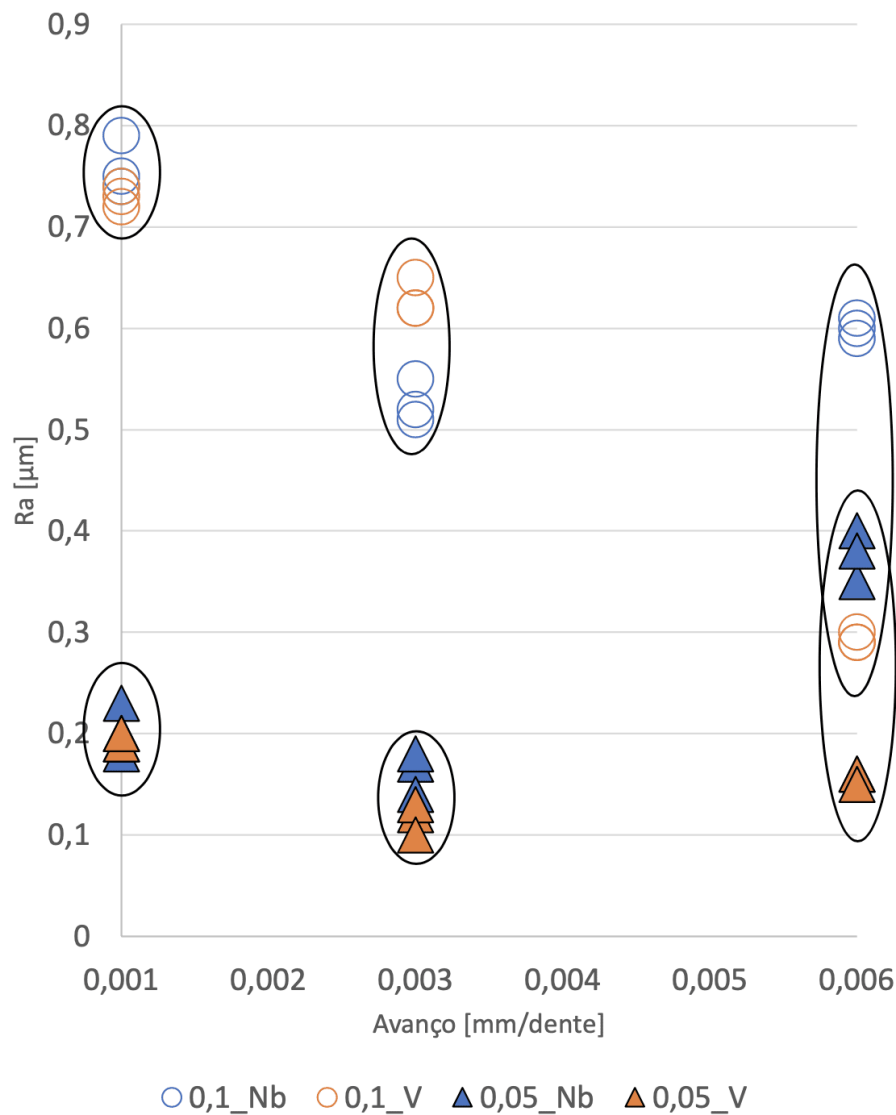


Figura 4.6: Rugosidade média aritmética (Ra em μm) em função do avanço (mm/dente) para todos os ensaios realizados

com o aumento do avanço;

- Com menor avanço, o comportamento das ligas em termos de Ra é semelhante, com o aumento desta variável começam a surgir diferenças mais significativas, especialmente a 0,006 mm/dente, como demonstram as regiões seleccionadas na Figura 4.6 e os dados da Tabela 4.1 (coluna das diferenças). O fenómeno descrito anteriormente é ainda mais evidente para o incremento de 0,1 mm (as diferenças são maiores Tabela 4.1);
- A condição que promoveu um Ra menor, sem comprometer a taxa de remoção de material (e o tempo de maquinagem Tabela 3.4) em ambas as ligas (0,12 μm para Ti-6Al-4V e 0,16 μm para Ti-6Al-7Nb) foi obtida com menor incremento e

um avanço intermédio (0,003 mm/dente). Para a liga Ti-6Al-4V seria possível aumentar o avanço 0,003 para 0,006 mm/dente sem prejudicar fortemente o Ra (0,12 μm para 0,16 μm), contudo para a liga com nióbio isso provocaria um aumento do Ra de 0,16 μm para 0,38 μm (138%);

- Quando maquinados com menor incremento (0.1 mm) existe uma inversão do comportamento em termos de Ra para as duas ligas, quando o avanço é intermédio, a liga Ti-6Al-7Nb apresenta menor rugosidade que a liga Ti6Al4V (0,53 < 0,63 μm), com o aumento do avanço a liga com vanádio comporta-se melhor em relação à liga Ti-6Al-7Nb (0,29 < 0,60 μm).

Tabela 4.1: Valores médios da rugosidade média aritmética (Ra em μm) em função do material, avanço (mm/dente) e incremento. É também apresentada a diferença em percentagem e a variação percentual

Incremento (mm)	0,1			
Liga (mm/dente)	Ti6Al4V	Ti6Al7Nb	Variação percentual	Diferença
0,001	0,73	0,76	4,11 %	0,03
0,003	0,63	0,53	-15,87 %	-0,1
0,006	0,29	0,60	106,90 %	0,31
Incremento (mm)	0,05			
Liga (mm/dente)	Ti6Al4V	Ti6Al7Nb	Variação percentual	Diferença
0,001	0,19	0,20	5,26 %	0,01
0,003	0,12	0,16	33,33 %	0,04
0,006	0,16	0,38	137,50 %	0,22

Os valores da variação percentual e da diferença foram obtidos a partir das seguintes equações:

$$\text{Variação percentual} = \frac{\text{Diferença}}{Ra_v}; \quad (4.1)$$

$$\text{Diferença} = Ra_{Nb} - Ra_v; \quad (4.2)$$

Onde Ra(Nb) é o valor da rugosidade média aritmética do nióbio e Ra(v) é o valor da rugosidade média aritmética do vanádio.

No gráfico da Figura 4.7 são apresentados os resultados da rugosidade Rt em μm em função do avanço (mm/dente) para todos os ensaios realizados.

- Assim como para o Ra, o Rt apresenta grupos bem definidos quer em função do incremento, quer em função do material maquinado;
- Contudo em alguns casos existe uma maior dispersão relativamente às 3 medidas que se extraiu por condição (Tabela 4.2), isto é facilmente explicado pelo facto de

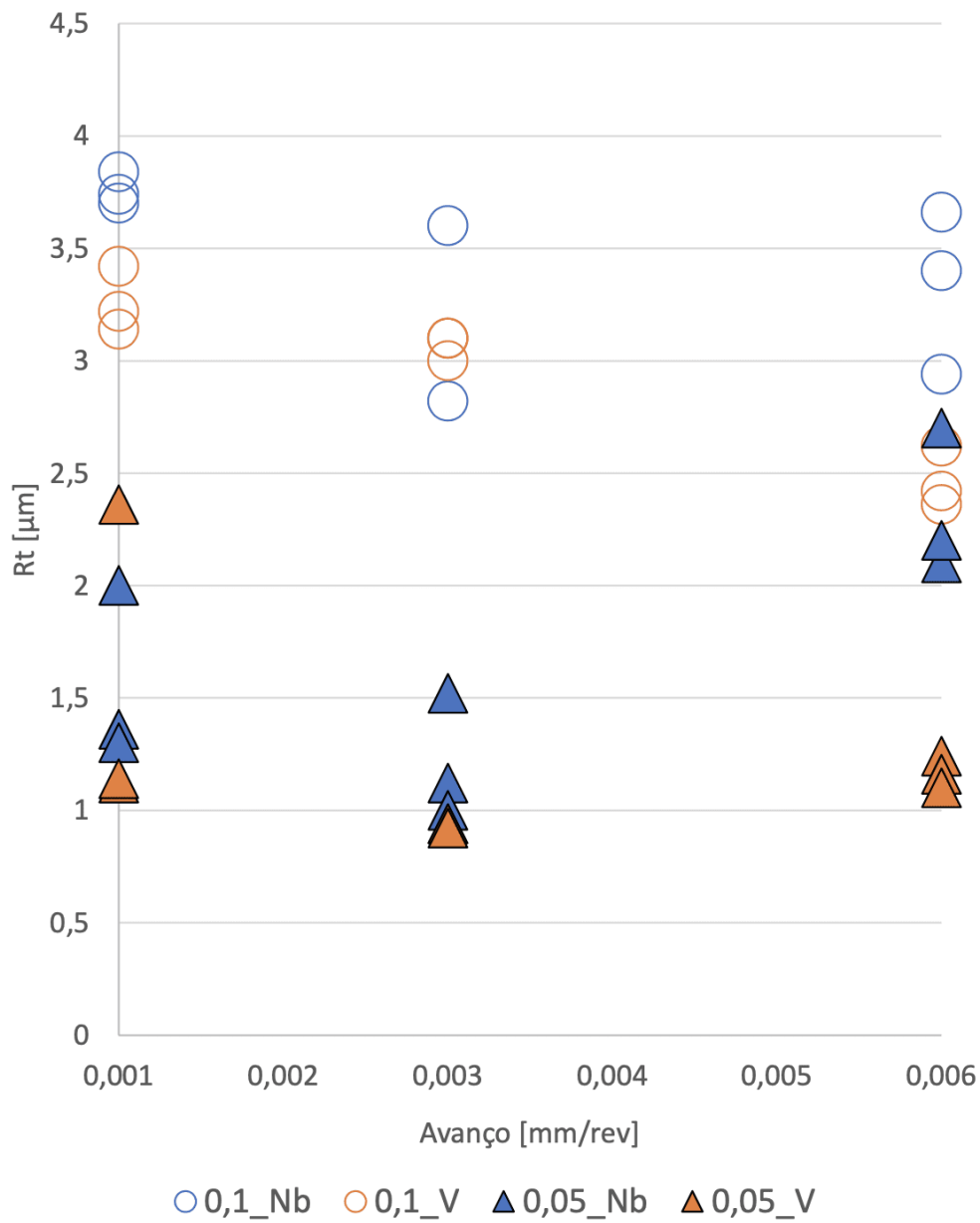


Figura 4.7: Rugosidade (R_t em μm) em função do avanço (mm/dente) para todos os ensaios realizados

que o R_a (parâmetro estatístico) é menos sensível às modificações abruptas que podem ocorrer no perfil de rugosidades ao contrário do R_t que é um parâmetro geométrico.

Tabela 4.2: Valores médios da rugosidade (R_t em μm) em função do material, avanço (mm/dente) e incremento. É também apresentada a diferença em percentagem e a variação percentual

Incremento (mm)	0,1			
Liga / (mm/dente)	Ti6Al4V	Ti6Al7Nb	Variação percentual	Diferença
0,001	3,26	3,76	15,33 %	0,5
0,003	3,07	3,17	3,26 %	0,1
0,006	2,47	3,33	34,82 %	0,86
Incremento (mm)	0,05			
Liga / (mm/dente)	Ti6Al4V	Ti6Al7Nb	Variação percentual	Diferença
0,001	1,54	1,55	0,65 %	0,01
0,003	0,93	1,21	30,11 %	0,28
0,006	1,17	2,33	99,14 %	1,16

4.3 Análise da ferramenta

4.3.1 Tempo de maquinagem

Sobre os tempos de maquinagem, todos foram cronometrados e apontados para cada ensaio e ferramenta. Em cada incremento e avanço, independentemente da liga de titânio, os ensaios demoravam o mesmo tempo, sendo que o que altera o tempo de ensaio são esses dois fatores.

Tendo em conta os tempos de maquinagem apresentados na Tabela 4.3 e de acordo com o gráfico da Figura 4.6, que contém os resultados do Ra para ambas as ligas. De forma a minimizar o tempo de maquinagem, de 43 para 15 minutos, no caso da liga Ti-6Al-4V, até se poderia optar por maquina-la com um avanço de 0,006 invés de 0,003 mm/dente visto que o Ra e R_t são muito semelhantes em ambas as condições (0,12 e 0,16 μm para Ra e 0,93 e 1,21 μm para R_t).

Tabela 4.3: Tempos de maquinagem

Ensaio	Parâmetros	Tempo (minutos)
1º	Incremento = 0,1 Avanço = 0,001	61
2º	Incremento = 0,1 Avanço = 0,003	20
3º	Incremento = 0,1 Avanço = 0,006	12
4º	Incremento = 0,05 Avanço = 0,001	128
5º	Incremento = 0,05 Avanço = 0,003	43
6º	Incremento = 0,05 Avanço = 0,006	15

4.3.2 Desgaste de ferramenta

Posteriormente ao tempo de maquinagem foi observado o estado e desgaste da ferramenta ao longo dos ensaios realizados. Na Figura 4.8 podemos ver uma ferramenta nova, sem qualquer trabalho realizado, e na Figura 4.9 uma ferramenta que foi usada nos 6 ensaios e não demonstrava nenhuma falha quando comparada com a ferramenta inicial. De referir que os 6 ensaios resultam em 279 minutos de trabalho da ferramenta, e a ferramenta ainda estava em boas condições.

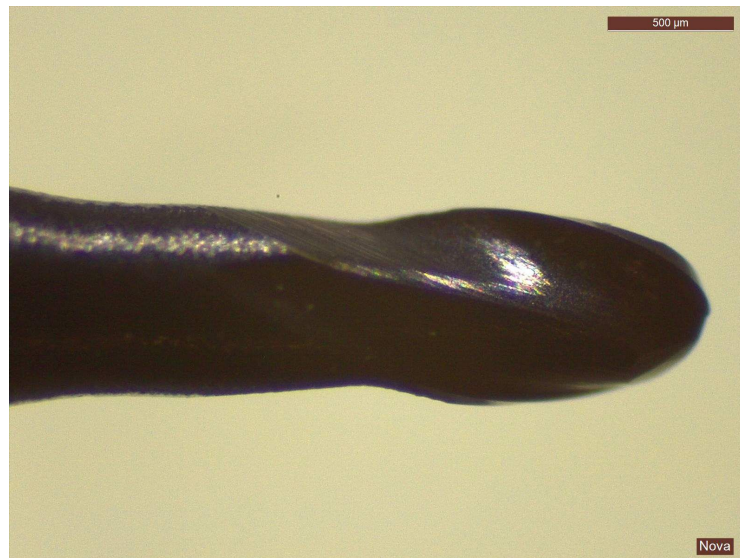


Figura 4.8: Ferramenta nova

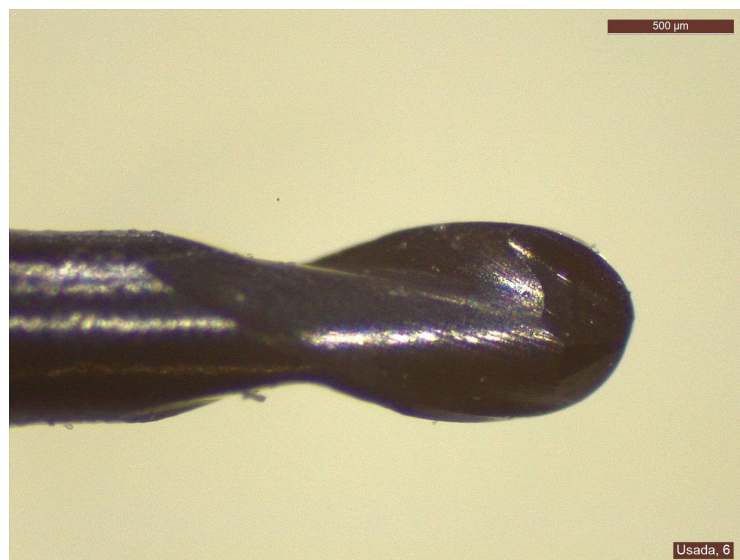


Figura 4.9: Ferramenta após 6 utilizações

Parte IV

Conclusão

4.4 Conclusão

Esta dissertação tinha como objetivo a comparação entre o estado da superfície entre duas ligas de titânio maquinadas através de microfresagem.

Na resposta à pergunta de investigação podemos afirmar que as superfícies apresentavam uma rugosidade baixa de $0,29 \mu\text{m}$, sendo a melhor a da liga de titânio Ti-6Al-4V, e a formação de rebarba era quase inexistente em ambos os materiais.

Com este trabalho concluímos a possibilidade de obter uma boa precisão dimensional em microfresagem de ligas de titânio, e que os fatores mais importantes para tal estão no avanço e no incremento entre passagens. Também concluir que o desgaste da ferramenta foi muito reduzido.

Para as condições testadas, os resultados da rugosidade (Ra e Rt) indicam que a liga com vanádio apresenta uma melhor qualidade superficial. Contudo, com o controlo do incremento e do avanço/dente é possível atingir acabamento superficial equivalente em ambas as ligas.

4.4.1 Trabalhos futuros

Para um futuro trabalho seria interessante testar até que ponto se consegue obter melhores resultados com um avanço maior e também com uma velocidade de rotação mais elevada, e qual seria o ponto de quebra das ferramentas. Também seria interessante diminuir o incremento das passagens e ver até que valores ele continuava a melhorar o acabamento da superfície.

No caso desta ferramenta também seria interessante trabalhar com superfícies mais complexas e ver o comportamento e qualidade de superfície que esta conseguiria apresentar.

Bibliografia

- [1] Barnabás Zoltán Balázs, Norbert Geier, Márton Takács, and J. Paulo Davim. A review on micro-milling: recent advances and future trends. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112(3-4):655–684, January 2021. ISSN 0268-3768, 1433-3015. doi: 10.1007/s00170-020-06445-w. URL <http://link.springer.com/10.1007/s00170-020-06445-w>.
- [2] Vivek Bajpai, Ajay K. Kushwaha, and Ramesh K. Singh. Burr Formation and Surface Quality in High Speed Micromilling of Titanium Alloy (Ti6Al4V). In *Volume 2: Systems; Micro and Nano Technologies; Sustainable Manufacturing*, page V002T03A017, Madison, Wisconsin, USA, June 2013. American Society of Mechanical Engineers. ISBN 978-0-7918-5546-1. doi: 10.1115/MSEC2013-1216. URL <https://asmedigitalcollection.asme.org/MSEC/proceedings/MSEC2013/55461/Madison,%20Wisconsin,%20USA/267703>.
- [3] Denison Baldo, Sergio Luiz Moni Ribeiro Filho, Carlos Henrique Lauro, Andrea Cristiane dos Santos Delfino, and Lincoln Cardoso Brandao. Analysis of Surface Roughness in Micro Milling of Ti-6Al-4V Titanium Alloy. *Advanced Materials Research*, 1079-1080:3–6, December 2014. ISSN 1662-8985. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1079-1080.3. URL <https://www.scientific.net/AMR.1079-1080.3>.
- [4] Gandjar Kiswanto, A Mandala, M Azmi, and T. J. Ko. The Effects of Cutting Parameters to the Surface Roughness in Low Speed Machining of Micro-milling of Titanium Alloy Ti-6Al-4V. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 654:012013, October 2019. ISSN 1757-899X. doi: 10.1088/1757-899X/654/1/012013. URL <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/654/1/012013>.
- [5] A. Aramcharoen, P.T. Mativenga, S. Yang, K.E. Cooke, and D.G. Teer. Evaluation and selection of hard coatings for micro milling of hardened tool steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(14):1578–1584, November 2008. ISSN 08906955. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2008.05.011. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695508001119>.
- [6] M.A. Câmara, J.C. Campos Rubio, A.M. Abrão, and J.P. Davim. State of the Art on Micromilling of Materials, a Review. *Journal of Materials Science & Technology*, 28(8):673–685, August 2012. ISSN 10050302. doi: 10.1016/S1005-0302(12)60115-7. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1005030212601157>.
- [7] F. Hojati, A. Daneshi, B. Soltani, B. Azarhoushang, and D. Biermann. Study

- on machinability of additively manufactured and conventional titanium alloys in micro-milling process. *Precision Engineering*, 62:1–9, March 2020. ISSN 01416359. doi: 10.1016/j.precisioneng.2019.11.002. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141635919307871>.
- [8] S. P. Leo Kumar and D. Avinash. Experimental biocompatibility investigations of Ti-6Al-7Nb alloy in micromilling operation in terms of corrosion behavior and surface characteristics study. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(9):364, September 2019. ISSN 1678-5878, 1806-3691. doi: 10.1007/s40430-019-1858-9. URL <http://link.springer.com/10.1007/s40430-019-1858-9>.
- [9] Thanongsak Thepsonthi and Tuğrul Özel. Experimental and finite element simulation based investigations on micro-milling Ti-6Al-4V titanium alloy: Effects of cBN coating on tool wear. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(4): 532–542, April 2013. ISSN 09240136. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.11.003. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013612003287>.
- [10] Tej Pratap, Karali Patra, and A.A. Dyakonov. Modeling Cutting Force in Micro-Milling of Ti-6Al-4V Titanium Alloy. *Procedia Engineering*, 129:134–139, 2015. ISSN 18777058. doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.021. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705815039053>.
- [11] Ali Mamedov and Ismail Lazoglu. Thermal analysis of micro milling titanium alloy Ti-6Al-4V. *Journal of Materials Processing Technology*, 229:659–667, March 2016. ISSN 09240136. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.10.019. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013615301722>.
- [12] Thanongsak Thepsonthi and Tuğrul Özel. An integrated toolpath and process parameter optimization for high-performance micro-milling process of Ti-6Al-4V titanium alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75(1-4):57–75, October 2014. ISSN 0268-3768, 1433-3015. doi: 10.1007/s00170-014-6102-2. URL <http://link.springer.com/10.1007/s00170-014-6102-2>.
- [13] Tuğrul Özel, Alaa Olleak, and Thanongsak Thepsonthi. Micro milling of titanium alloy Ti-6Al-4V: 3-D finite element modeling for prediction of chip flow and burr formation. *Production Engineering*, 11(4-5):435–444, October 2017. ISSN 0944-6524, 1863-7353. doi: 10.1007/s11740-017-0761-4. URL <http://link.springer.com/10.1007/s11740-017-0761-4>.
- [14] Emel Kuram and Babur Ozcelik. Effects of tool paths and machining parameters on the performance in micro-milling of Ti6Al4V titanium with high-speed spindle attachment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84(1-4): 691–703, April 2016. ISSN 0268-3768, 1433-3015. doi: 10.1007/s00170-015-7741-7. URL <http://link.springer.com/10.1007/s00170-015-7741-7>.
- [15] Erman Gözü and Yiğit Karpaz. Uncertainty analysis of force coefficients during micromilling of titanium alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(1-4):839–855, October 2017. ISSN 0268-3768, 1433-

3015. doi: 10.1007/s00170-017-0567-8. URL <http://link.springer.com/10.1007/s00170-017-0567-8>.
- [16] Gandjar Kiswanto, Adrian Mandala, Maulana Azmi, and Tae Jo Ko. The Effects of Cutting Parameters to the Surface Roughness in High Speed Cutting of Micro-Milling Titanium Alloy Ti-6Al-4V. *Key Engineering Materials*, 846:133–138, June 2020. ISSN 1662-9795. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.846.133. URL <https://www.scientific.net/KEM.846.133>.
- [17] L.L. Alhadef, M.B. Marshall, D.T. Curtis, and T. Slatter. Protocol for tool wear measurement in micro-milling. *Wear*, 420-421:54–67, February 2019. ISSN 00431648. doi: 10.1016/j.wear.2018.11.018. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164818310433>.
- [18] A. Aramcharoen and P.T. Mativenga. Size effect and tool geometry in micro-milling of tool steel. *Precision Engineering*, 33(4):402–407, October 2009. ISSN 01416359. doi: 10.1016/j.precisioneng.2008.11.002. URL <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141635908001529>.
- [19] Tifast – Titanium Producer. URL <https://www.tifast.com/pt-pt/>.
- [20] Sílvia Carvalho, Ana Horovistiz, and J. Paulo Davim. Surface topography in machining Ti alloys for biomedical applications: correlative microscopy approach for qualitative and quantitative analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114(3-4):683–694, May 2021. ISSN 0268-3768, 1433-3015. doi: 10.1007/s00170-021-06824-x. URL <https://link.springer.com/10.1007/s00170-021-06824-x>.
- [21] r216.42-00830-ae08g 1620. URL <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/products/pages/productdetails.aspx>.
- [22] Salman Pervaiz, Amir Rashid, Ibrahim Deiab, and Mihai Nicolescu. Influence of Tool Materials on Machinability of Titanium- and Nickel-Based Alloys: A Review. *Materials and Manufacturing Processes*, 29(3):219–252, March 2014. ISSN 1042-6914, 1532-2475. doi: 10.1080/10426914.2014.880460. URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10426914.2014.880460>.