



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Maquinação da liga de titânio Ti6Al4V

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Sistemas de Produção

Autor

Nelson Francisco Mendes

Orientadores

Professor Altino Jesus Loureiro

Engenheiro António Baptista

Júri

Presidente	Professora Doutora Ana Paula Bettencourt Martins Amaro Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Vogal	Professor Doutor José Domingos Moreira da Costa Professor Associado c/ Agregação da Universidade de Coimbra
Orientador	Engenheiro António Baptista Engenheiro de Produto e Processo do Centimfe.

Colaboração Institucional



Coimbra, 10 Fevereiro, 2014

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento:

Ao Eng.º António Baptista pelo acolhimento e disponibilidade durante o período de desenvolvimento do estudo no Centimfe,

Ao Professor Altino Loureiro pelo planeamento e acompanhamento do projeto desde o seu início até à apresentação de resultados,

Ao Eng.º Bruno Martins do Instituto Pedro Nunes no fornecimento de parte da informação necessária ao estudo,

Ao Eng.º Joel Filipe e aos colegas do Centimfe pela ajuda durante as maquinações e em todo o período de estágio e,

Aos meus pais, irmão e amigos pelo carinho e motivação de sempre.

RESUMO

As ligas de titânio têm inúmeras aplicações na indústria aeroespacial, aeronáutica, petroquímica e médica. Contudo, a maquinação destas ligas apresenta diversas dificuldades relacionadas com as suas propriedades físicas, em particular no fabrico de paredes finas.

Este estudo analisa a influência da geometria de ferramentas na precisão dimensional e acabamento superficial de peças fresadas na liga de titânio Ti6Al4V, neste caso peças de paredes finas. Para o efeito considerou-se um conjunto de 12 ferramentas com geometrias diferentes, onde se variou o número de arestas de corte, o raio de canto, o ângulo de hélice, o espaçamento entre arestas de corte e os ângulos de ataque e saída da aresta de corte. A qualidade das peças maquinadas foi verificada através da precisão dimensional e da qualidade superficial destas. Foram realizadas operações de desbaste, semi-acabamento e acabamento para as várias ferramentas, todas sujeitas a análise dos esforços na árvore e do ruído provocado pelas maquinações.

Verificou-se que a utilização de fresas com maior número de arestas de corte provoca maior ruído e requer maior binário durante a maquinação da liga de titânio e que a utilização de ferramentas com raios de canto maiores permite reduzir o ruído e os esforços, além de melhorar o acabamento superficial. Um ângulo de hélice maior provoca maiores esforços no eixo dos $z\text{'s}$, e a utilização de fresas com espaçamento variável entre arestas de corte provoca menor ruído, traduzindo-se num maior rigor dimensional e num melhor acabamento superficial. Foi perceptível a influência do ângulo de ataque e de saída da aresta de corte durante a maquinação.

Palavras-chave: Fresagem; Fresas; Liga Ti6Al4V; Paredes finas; Precisão dimensional; Acabamento superficial.

Abstract

Titanium alloys have numerous applications in aerospace, aeronautic, petrochemistry and medical industry. However, the machinery of these alloys shows several difficulties related to its physical properties, especially at the making of thin walls.

This study analysis the influence of tools geometry on dimensional precision and superficial finishing on milled pieces on titanium alloy Ti6Al4V involving low thickened pieces. For the study was considered a setting of twelve tools, all of them with different geometries, in which the number of cutting edges, corner radius, helices angle, space between cutting edges, attack angles and exiting cutting edges angle were a variable. The quality of all tested pieces was verified through dimensional precision and superficial quality. Roughing, semi-finishing and finishing were the operations made on all tools, both under analysis of the efforts made on spindle and the noise provoked by the machinery.

The use of mills with a bigger number of cutting edges provokes a louder noise and have the need for a bigger torque during the machining of titanium alloy and that the usage of tools with bigger corner radius allows to reduce the noise and the efforts, as well as improve the superficial finishing. A bigger helices angle gives rise to bigger efforts on z-z' axis and the usage of mills with variable space between cutting edges stimulates a lower noise therefore increasing dimension precision and better superficial finishing. It was noticeable the influence of attack and exiting angles of cutting edge during machining.

Keywords Milling; Tools; Alloy Ti6Al4V; Thin Walls; Dimensional Precision; Superficial Finishing.

Índice

Resumo	ii
Índice de Figuras	vi
Índice de Tabelas	viii
Simbologia e Siglas	ix
Simbologia.....	ix
Siglas	ix
1. Introdução.....	1
2. Estado da arte.....	3
2.1. Maquinabilidade	3
2.1.1. Conceito de maquinabilidade	3
2.1.2. Maquinação por corte por arranque de apara	3
2.1.3. Fresadoras.....	5
2.1.4. CNC (<i>Computer numerical control</i>)	5
2.1.5. Estratégias de maquinação.....	7
2.2. Ferramentas.....	8
2.2.1. Aspetos a considerar	8
2.2.2. Material da ferramenta.....	9
2.3. Fluidos de corte.....	10
2.4. Maquinação do Titânio	12
2.4.1. Breve resumo sobre o Titânio e ligas e sua maquinação.....	12
2.4.2. Maquinação do Titânio e suas ligas.....	12
2.4.3. A liga Ti6Al4V.....	14
2.5. Apara.....	14
2.6. Acabamento superficial	15
2.7. Vibrações e ruído	17
2.8. Considerações finais	18
3. Material e método experimental.....	19
3.2. Ferramentas.....	21
3.2.1. Ferramentas utilizadas nos testes.....	21
3.3. Fluido de corte	22
3.4. Centro de maquinação OKK-VB53	23
3.5. Sistemas de aperto	24
3.5.1. Sistema de aperto da ferramenta à máquina	24
3.5.2. Sistema de aperto da peça à máquina	25
3.6. Provete a maquinar	25
3.7. Estratégia e tipo de maquinação	26
3.8. Ensaios de maquinação	27
3.9. Recolha de dados	27
3.9.1. Dinamómetro rotativo	27
3.9.2. Decibelímetro	28
3.9.3. Medições da parede fina com o micrómetro	28

3.9.4. Rugosímetro Perthen <i>Fododyn</i>	28
3.9.5. Microscópio <i>Alicona</i>	29
4. Apresentação e discussão dos resultados.....	30
4.1. Decibelímetro.....	30
4.2. Apara resultante	31
4.3. Dinamómetro	32
4.3.1. Esforços segundo ZZ's	32
4.3.2. Momento torçor durante as maquinações.....	35
4.3.3. Análise dos resultados do dinamómetro.....	39
4.4. Relação entre o binário e o ruído	41
4.5. Variação da espessura de parede.....	42
4.6. Relação entre o momento torçor e o desvio.....	44
4.7. Rugosímetro.....	45
4.8. Relação do momento torçor com a rugosidade.....	46
4.9. Microscópio	47
4.10. Rugosidade total Rt em função de Mz	50
4.11. Aspeto final das ferramentas	51
5. Conclusões e Sugestões	53
5.1. Sugestões para trabalhos futuros.....	54
Referências bibliográficas	55
Anexo A.....	58
Microestrutura analisada.....	58
Anexo B.....	59
Superfícies maquinadas	59
Anexo C.....	61
Resultados microscópio Alicona	61
Anexo D.....	65
Ferramentas após maquinações	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Processo de fresagem frontal concordante.....	4
Figura 2.2. Ângulos de incidência e de saída.....	8
Figura 2.3. Passagem de alfa a beta (Smith, 1981).....	12
Figura 2.4. Percurso de uma fresa na remoção de material (Davim, 1995).....	15
Figura 2.5. Acabamento superficial.....	16
Figura 3.1. Microestrutura da liga Ti6Al4V utilizada no estudo.....	20
Figura 3.2. Microdurómetro de durezas.....	21
Figura 3.3. Medição de diagonais.....	21
Figura 3.4. Exemplos de fresas utilizadas: a) Fresa com ângulo de hélice fixo, b) Fresa com ângulo de hélice variável e c) Fresa com ângulo de hélice e espaçamentos entre arestas variável.....	21
Figura 3.5. Emulsómetro.....	23
Figura 3.6. Centro de maquinação OKK-VB53.....	23
Figura 3.7. Sistema de aperto ferramenta.....	24
Figura 3.8. Esquema do aperto da ferramenta utilizada nos testes.....	24
Figura 3.9. Prensa com o provete para estudo.....	25
Figura 3.10. Forma dos provetes utilizados durante o estudo.....	25
Figura 3.11. Esquema de fixação do provete para maquinação.....	25
Figura 3.12. Passagens realizadas no provete.....	26
Figura 3.13. Esquema da movimentação da fresa durante a maquinação.....	26
Figura 3.14. Dinamómetro rotativo e esforços medidos pelo instrumento.....	27
Figura 3.15. Medição com um micrómetro.....	29
Figura 3.16. Rugosímetro <i>Perthen</i>	29
Figura 3.17. Microscópio <i>Alicona</i>	29
Figura 3.18. Esquema da foto tirada pelo microscópio <i>Alicona</i>	29
Figura 4.1. Aparas resultantes com uma ampliação de 2x: a) Conjunto de aparas, b) apara de maior espessura (desbaste), c) apara de menor espessura e maior comprimento (semi-acabamento) e d) apara de menor espessura e menor comprimento (acabamento).....	32
Figura 4.2. Esforços em ZZ na operação de desbaste.....	33
Figura 4.3. Esforços em ZZ na operação de semi-acabamento.....	34
Figura 4.4 Esforços em ZZ na operação de acabamento.....	35

Figura 4.5. Momentos torçores na operação de desbaste.	36
Figura 4.6. Momentos torçores na operação de semi-acabamento.	37
Figura 4.7. Momentos torçores na operação de acabamento.	38
Figura 4.8. Ruído em função do Momento torçor.	41
Figura 4.9. Desvio em função do momento torçor.	44
Figura 4.10. Rugosidade das superfícies no lado 1 e 2 do provete.	45
Figura 4.11. Ra em função do momento torçor.	46
Figura 4.12. Imagem da foto no microscópio <i>Alicona</i>	47
Figura 4.13. Perfil da secção seleccionada.	48
Figura 4.14. Diferença entre picos e vales do perfil.	49
Figura 4.15. Relação entr o binário e a rugosidade Rt.	50
Figura 4.16. Fresas com raio 0.5 no final da maquinação: a) Fresa 1; b) Fresa 4; c) Fresa 7; aa) desgaste da fresa1; bb) desgaste da fresa4; cc) desgaste da fresa7.	51
Figura A.1. Imagem da microestrutura do material com várias ampliações.	58
Figura B.1. Provetes maquinados pelas várias fresas.	60
Figura C.1. Resultados do microscópio <i>Alicona</i> para as várias fresas.	64
Figura D.1. Imagem de topo das fresas após as maquinações.	66

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Composição química nominal da liga Ti6Al4V.....	19
Tabela 3.2. Propriedades mecânicas da liga Ti6Al4V (Machado e Wallbank, 1990 e Donachie, 1998).	19
Tabela 3.3. Ferramentas utilizadas nos testes.....	22
Tabela 4.1. Resultados registados no decibelímetro.	30
Tabela 4.2. Medições da espessura da parede com o micrómetro.....	42
Tabela 4.3. Valores de Ra medidos pelo rugosímetro de <i>Perthen</i>	45
Tabela 4.4. Diferença entre picos do perfil.	49

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

Fz – esforço segundo o eixo dos ZZ's

La – percurso de avanço

Lc – percurso de corte

Lec – percurso efetivo de corte

Mz – momento torçor

Ra – rugosidade média

Rt – rugosidade dada por picos e vales

S – velocidade de rotação

α – ângulo de saída

γ – ângulo de ataque

Ae – deslocamento radial

Ap – deslocamento axial

E – módulo de elasticidade

Siglas

CAD - *Computer aided design*

CAM – *Computer aided manufacturing*

CNC – *Computer numerical control*

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

MQF – Mínima quantidade de fluido

PVD – *Physical vapor deposition* (deposição física de vapor)

RPM – Rotações por minuto

1. INTRODUÇÃO

A diversidade de aplicações das ligas de titânio nas indústrias aeroespacial, automóvel, médica e química têm inerente o crescimento do interesse das ligas no mercado, nomeadamente da liga de titânio Ti6Al4V: a sua baixa densidade, elevada relação resistência/peso, biocompatibilidade e resistência à corrosão tornam esta liga a mais versátil para a indústria.

As exigências do mercado requerem o aumento de requisitos quanto a geometrias mais complexas, muitas vezes obtidas por processos de maquinação. Contudo, a maquinação eficiente do titânio e suas ligas é difícil, devido às características deste metal, como por exemplo a baixa condutividade térmica, dureza elevada e baixo coeficiente de elasticidade, que ao interagirem com a ferramenta de corte, dificultam a extracção da apanha e de calor, causando desgaste na ferramenta e defeitos superficiais na peça.

O conhecimento das características específicas de cada tipo de maquinação nomeadamente quanto às ferramentas de fixação, programação CNC, ferramentas de corte, materiais, desenho técnico e princípios de maquinação é fundamental para o aumento da eficiência da maquinação das ligas de Ti.

Este trabalho teve por objectivo estudar o efeito da geometria das ferramentas de corte na obtenção de peças com paredes finas por fresagem na liga de titânio Ti6Al4V. Nas ferramentas estudadas alteraram-se diversas características geométricas: ângulos de hélice, raio de canto, espaçamento entre arestas de corte e ângulos de ataque e saída da aresta de corte e número de arestas de corte.

O estudo é o resultado da cooperação entre o Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra e o Centro Tecnológico da Indústria de Moldes, Ferramentas Especiais e Plásticos da Marinha Grande (Centimfe). O primeiro disponibilizou o *know-how* e o segundo os meios e recursos necessários ao projeto (maquina, material e ferramentas).

Durante cinco meses o aluno integrou-se na dinâmica do centro tecnológico e colaborou no projeto *Tooling Edge*, fruto da cooperação do centro com o Instituto Pedro Nunes, e cujas conclusões apresentadas ao longo deste estudo o integram.

Durante o estudo realizaram-se e monitorizaram-se maquinações em 12 provetes, registando os valores do ruído provocado durante a maquinação, os esforços segundo o eixo axial e o binário da árvore, a espessura final da parede fina, assim como a rugosidade das superfícies maquinadas.

No capítulo 2 apresenta-se o estado da arte relativamente à maquinabilidade dos materiais, técnicas de maquinação por corte por arranque de apra em operações de fresagem, tipos de ferramentas e suas características, entre outros conceitos necessários para a fresagem do titânio e suas ligas. Faz-se também um breve resumo das propriedades do Ti e suas ligas e das suas dificuldades de maquinação.

Posteriormente, no capítulo 3 descreve-se o material usado para o estudo, bem como as técnicas e instrumentos utilizados para a obtenção de resultados. No capítulo 4 faz-se a apresentação e discussão dos resultados obtidos, em particular os valores de ruído, esforços na árvore, rugosidade das superfícies e rigor dimensional das superfícies geradas.

No capítulo 5 faz-se a apresentação das principais conclusões extraídas do trabalho realizado.

2. ESTADO DA ARTE

Neste capítulo expõem-se conceitos teóricos e resultados já existentes em artigos e estudos realizados com o intuito de nos situarmos com a actualidade da maquinação com especial atenção para as ligas de titânio.

2.1. Maquinabilidade

O estudo da maquinabilidade do material envolve a medição e análise de vários fatores e a seleção do tipo de maquinação mais adequado.

2.1.1. Conceito de maquinabilidade

A maquinabilidade de um material é o fator que indica a capacidade que o material tem de ser modificado e trabalhado com uma ferramenta de corte. É estudada considerando vários fatores, tais como a vida útil da ferramenta, a taxa de remoção do material, as forças geradas durante o corte, o consumo de energia necessária, o tipo de acabamento, a integridade da superfície maquinada, a aparência do corte e as características da apara.

A maquinabilidade é afetada de acordo com a técnica e o tipo de maquinação a efetuar, as propriedades do material a ser maquinado, o tipo de ferramenta a utilizar, a eficácia e a resistência dos sistemas de aperto, a rigidez e idade da máquina e o tipo de refrigeração e lubrificação, estes são exemplos de fatores que poderão influenciar, antes e durante uma maquinação, segundo Jasinevicius, (1994).

2.1.2. Maquinação por corte por arranque de apara

De entre os vários processos de maquinação (electroerosão, ultrassons, bombardeamento eletrónico, corte por arranque de apara, entre outros), o selecionado para a investigação foi o corte por arranque de apara, uma vez que a sua utilização na indústria é vasta e é um entre os dois disponíveis no centro tecnológico Centimfe.

Jawahir e Lutervelt (1993) afirmam que o corte por arranque de apara consiste em alterar a forma inicial de uma peça, chegando a uma forma final através da remoção sob a forma de aparas de material em excesso.

A remoção do excesso de material pode ser realizada através de diferentes técnicas de maquinação. De entre as várias técnicas de maquinação atualmente disponíveis na indústria o torneamento, a fresagem, a furação, a retificação e a electroerosão são as mais utilizadas.

2.1.2.1. Fresagem

A fresagem é a forma mais comum de maquinação dos materiais. O objetivo da técnica é modelar ou acabar uma peça com uma pré-forma removendo o material em bruto. O material da peça é trabalhado conciliando o movimento rotativo de uma fresa com o movimento linear da peça.

As superfícies geradas na fresagem podem ser paralelas ou perpendiculares ao eixo da fresa, e correspondem a dois tipos de fresagens distintas: a fresagem cilíndrica e a fresagem frontal (Kalpakjian, 2009). A fresagem é a técnica de maquinação mais versátil, uma vez que permite produzir formas de contorno plano, formas com superfícies tridimensionais e formas cilíndricas.

A alta capacidade de remoção do material, o bom acabamento superficial, a exatidão nas dimensões a obter, a flexibilidade e versatilidade em gerar múltiplas formas geométricas inclusive na formação de peças com geometria complexa e a precisão em peças produzidas repetidamente constituem as principais vantagens da fresagem (Sandvick, 1994).

Contudo deverá ter-se especial cuidado com a fixação da peça de forma a evitar vibrações que poderão afetar o resultado final e com a remoção das aparas que caem na frente da fresa, podendo voltar a ser incluídas no processo de fresagem levando a uma menor qualidade da superfície de acabamento e um aumento dos esforços exercidos na árvore da máquina (Completo *et al.*, 2009). A Figura 2.1 ilustra uma operação de fresagem frontal concordante.

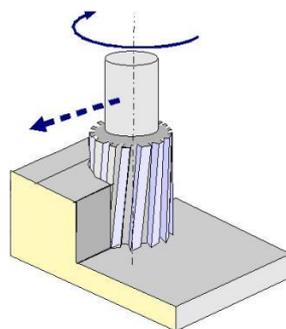


Figura 2.1. Processo de fresagem frontal concordante.

2.1.3. Fresadoras

As fresadoras são responsáveis pela rotação da ferramenta e translação da peça, e podem ser de controlo manual ou controlo numérico CNC (*Computer numerical control*), método atualmente mais utilizado e abaixo descrito.

Existem fresadoras de 3 eixos, horizontais ou verticais. Permitem trabalhar em simultâneo nos 3 eixos (x,y,z) ou então, segundo algumas estratégias de programação CAM (*Computer aided manufacturing*) trabalham apenas em 2,5 eixos. No último caso a ferramenta posiciona-se fora do corte em dois eixos mas durante o corte trabalha apenas em um dos eixos. Existem também fresadoras de 5 eixos, que além dos três eixos lineares normais, têm mais dois eixos rotativos geralmente dedicados à mesa de trabalho da máquina, segundo indicam Completo *et al.* (2009).

2.1.3.1. Requisitos gerais de uma fresadora

As fresadoras têm como requisitos mínimos:

- Alta rigidez em solicitação estática ou dinâmica, tanto no deslocamento da árvore como no deslocamento da mesa;
- Posicionamento e acionamento da árvore sem folgas, reduzindo vibrações e aumentando a precisão dimensional;
- Sincronização da ação da árvore com os movimentos da mesa, refletindo-se um ganho na velocidade de trabalho;
- Automação de movimentos em código CNC;
- Acessórios disponibilizados para fixação da peça e da ferramenta conduzem a um aumento da versatilidade da fresadora;
- Capacidade de carga durante a maquinação;
- Capacidade de produção de peças com geometria complexa e em repetição;
- Volume útil de trabalho da fresadora;

2.1.4. CNC (*Computer numerical control*)

O controlo numérico computadorizado corresponde a códigos de leitura que controlam os movimentos de posicionamento e de trabalho de uma ferramenta a partir de informações numéricas, fornecidas manualmente ou geradas automaticamente através de um *software* CAM (Slack *et al.*, 1996).

2.1.4.1. **CAM (*Computer aided manufacturing*)**

Através de modelos matemáticos oriundos de CAD (*Computer aided design*) os programas CAM geram um arquivo que descreve o caminho da ferramenta durante a maquinação.

Através de um desenho CAD, seleciona-se a superfície do desenho e alteraram-se os parâmetros necessários para a maquinação, como por exemplo a ferramenta de trabalho, a velocidade de rotação e de avanço da ferramenta, o incremento de penetração e as estratégias de maquinação (Relvas, 2002).

O *software* CAM, permite simular o percurso da ferramenta e visualizar o processo, observando previamente o resultado final da maquinação, sem necessidade de realizar protótipos, diminuindo o desperdício de material e de tempo e conseqüentemente os custos do processo. O código gerado é depois introduzido na fresadora ou centro de maquinação para a sua leitura.

Depois de obtido o ficheiro CNC referencia-se a posição do bloco em bruto na fresadora, através de um apalpador (aparelho que define o valor dos *xx*, *yy* e *zz*'s da árvore da máquina). Este processo indica a posição do bloco em bruto e a relaciona-o com o programa CAM. Uma vez que a superfície ou a forma a maquinar é selecionada através de uma construção geométrica CAD, não é necessário realizar cálculos complexos para a trajetória da ferramenta, sendo estes realizados automaticamente pelo CAM.

2.1.4.2. **A máquina com funcionamento CNC**

As máquinas com funcionamento CNC podem ser usadas continuamente, 24 horas por dia e apenas precisam de parar para manutenção e alimentação de material.

Cada produto fabricado é igual ao inicialmente definido pelo programa de CAD, independentemente da quantidade. As máquinas com funcionamento CNC permitem o fabrico de produtos de complexidade elevada que não podem ser realizados por máquinas manuais (Marcondes e Santos 2003). A simplicidade das máquinas permite que pessoas menos qualificadas possam operar com tornos ou fresadoras CNC, desde que devidamente formada para a tarefa. Um operador pode supervisionar várias máquinas CNC, uma vez que após a sua programação estas atuam de forma autónoma necessitando apenas de substituição das ferramentas de corte e de serem alimentadas com material (Krar *et al.*, 2001). A atualização das máquinas CNC é realizada, apenas, pela atualização dos *softwares* de CAD e CAM utilizado para controlar as máquinas.

Contudo, as máquinas CNC são mais caras do que as máquinas manuais convencionais e com a sua utilização tendem a perder as condições iniciais de fresagem diminuindo a sua precisão e necessitando que o utilizador proceda a frequentes manutenções, condições estas que têm de ser avaliadas antes de adquirir qualquer equipamento, uma máquina de menor custo pode vir a ser mais dispendiosa (Relvas, 2002).

2.1.5. Estratégias de maquinação

A técnica correta na máquina correta aumenta a produtividade, reduzindo o tempo de ciclo na maquinação de uma nova peça. A definição de estratégias adequadas de maquinação dos materiais permite economizar o processo de fresagem, maximizando a eficiência do conjunto máquina\ferramenta. Essa definição considera a geometria da peça, os tratamentos térmicos e superficiais, o número de peças a produzir e as tolerâncias dimensionais e geométricas (Completo *et al.*, 2009).

Os programas CAM atualizados consideram técnicas de maquinação que maximizam o processo de fresagem através de cálculos precisos de trajetória da ferramenta, minimizando o percurso da ferramenta e o tempo de maquinação.

Nas estratégias de maquinação deverão também ser considerados os sistemas de aperto da peça e da ferramenta e o tipo de ferramenta que se irá utilizar na maquinação. A ferramenta deve aproveitar o máximo de potência disponível cedida pela máquina e deve compensar possíveis limitações de rigidez que a máquina possa ter. O desgaste da fresa é outro fator a considerar na seleção da estratégia de maquinação; o tempo de vida da fresa aumenta quando esta se encontra sujeita a choques moderados (Davim, 2008). As paragens durante a maquinação deverão de ser evitadas, mesmo que para mudar de direção. Ao parar há geração de calor, que vai ser transferido para a ferramenta de corte, podendo danificar a ferramenta e/ou provocar empenos na superfície maquinada (Sandvick, 2013). O desbaste bidirecional, com base na fresagem dinâmica, é uma técnica para cavidades e contornos que monitoriza constantemente a dinâmica da ferramenta e ajusta a trajetória para manter uma carga constante na ferramenta, realizando um corte mais rápido e eficiente (Ferraresi, 1970).

As relações entre velocidade de corte, de avanço e profundidades de corte devem também, ser consideradas. Para Ferraresi (1970) o sentido do corte é outro fator que influencia uma maquinação: verifica-se menor desgaste na fresa quando o sentido de rotação desta é o mesmo ao do avanço da peça, sentido de corte concordante.

2.2. Ferramentas

2.2.1. Aspectos a considerar

A ferramenta tem diversos requisitos técnicos determinados pelo material a maquinar, pela geometria da peça, tolerância dimensional da peça e a qualidade da superfície pretendida.

A ferramenta deverá oferecer uma boa resistência à compressão, à flexão, elevada tenacidade e dureza a quente e uma resistência mecânica elevada das arestas de corte. A ferramenta deverá ainda resistir a altas temperaturas, à oxidação e à abrasão e ter uma boa condutibilidade térmica. As características da fresa deverão oferecer ao seu utilizador versatilidade e confiabilidade (Rahman, Wong e Zareena, 2003; Narutaki e Murakoshi, 1983 e Machado e Wallbank, 1990).

O tipo de fresa, o tipo de centro, as dimensões da fresa, a velocidade máxima, a rigidez em desbaste, o número de arestas de corte, o material da peça, o acabamento desejado e a potência da máquina são os principais critérios a considerar aquando da seleção da fresa. Outros fatores a considerar na seleção de uma fresa são o tipo de material desta (aço rápido, carboneto de tungstênio, nitreto de boro cúbico policristalino), o revestimento (TiAlN, AlCrN, CrN, diamante), a tolerância do ângulo de hélice, o raio de canto, a profundidade de corte e a geometria da aresta de corte (o ângulo de inclinação da aresta, o ângulo de ataque γ e o ângulo de saída α), Figura 2.2.

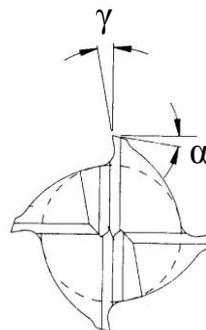


Figura 2.2. Ângulos de incidência e de saída.

A utilização de ângulos de incidência mais baixos, considerando a secção de corte constante, permite que a peça saia da zona de corte com maior facilidade, tornando a ferramenta mais robusta, baixa as temperaturas de corte e torna a vida útil da ferramenta maior.

Para a mesma vida da ferramenta, é possível trabalhar com maiores profundidades de corte, maiores avanços e/ou velocidades de corte; a fresagem realiza-se com menor vibração, uma vez que existe diminuição da força radial e aumento da força axial (Komanduri, 1982). Em contrapartida, a utilização deste método têm tendência a flectir peças finas e a diminuir a precisão do corte.

Com o aumento do número de arestas de corte a força fletora, a rigidez da ferramenta e o acabamento superficial aumentam mas a velocidade de saída da apara diminui. A capacidade da ferramenta de corte, as técnicas de fresagem, a programação e os sistemas de fixação são aspetos que mais influenciam na performance da máquina; com uma fresa adequada poderá maximizar-se a produção com custo mínimo por unidade e diminuição do tempo de produção (Completo *et al.*, 2009).

As novas técnicas de programação CAM, as ferramentas de corte específicas com materiais personalizados e geometria especial (ângulos de hélices e distancias de arestas de corte variáveis) para melhor controlo da apara e amortecimentos das vibrações, assim como as novas técnicas de revestimento têm auxiliado no desenvolvimento da indústria de moldes, permitindo o processamento de geometrias de peça cada vez mais complexas, como sugeriam Komanduri e Turkovich (1981).

2.2.2. Material da ferramenta

O material da ferramenta depende do material da peça a maquinar, da velocidade de rotação da árvore e da velocidade de avanço da peça (Diniz, 2001).

Nabhani (2001) diz que as ferramentas sofrem solicitações de compressão, flexão e corte pelo que lhe é exigida uma elevada resistência mecânica. As ferramentas estão também sujeitas a um elevado impacto e por isso necessitam de ter elevada tenacidade, resistência à abrasão, erosão e adesão, têm de ter dureza elevada e coeficiente de atrito baixo, boa condutibilidade térmica, resistência à fadiga mecânica e térmica e baixo coeficiente de dilatação.

As ferramentas podem ser construídas em metais duros, aço rápido ou carbonetos. Quando construídas em aço rápido a sua superfície é revestida a TiN, TiC, WC, Al₂O₃, HfN, de modo a aumentar a vida útil da ferramenta, a velocidade de corte e diminuir o atrito entre a ferramenta e a peça a maquinar (Hong *et al.*, 2001).

Atualmente grande parte das ferramentas é construída por sinterização de carbonetos e pós metálicos que lhes conferem as especificações técnicas necessárias ao material a ser maquinado (Gomes, 2001).

As ferramentas são constituídas por dois constituintes chave: um carboneto extremamente duro, com alta resistência ao desgaste, como por exemplo o carboneto de tungstênio puro ou agregado com outros carbonetos, como o de titânio e um elemento ligante que liga as várias partículas de carbonetos. Os dois constituintes são misturados e posteriormente submetidos a ações de compressão, sinterização e retificação. Posteriormente as ferramentas de metal duro, são revestidas por deposição física por vapor – PVD (*Physical vapor deposition*), como por exemplo TiAlN, AlTiN, TiCN e ZrN (Diniz, 2001) As ferramentas de corte revestidas por PVD podem ser executadas mais rapidamente, reduzindo os tempos de ciclo e aumentando o volume de produção, porque permitem velocidades de corte e avanço mais elevadas.

Os revestimentos PVD são resistentes a todas as formas de desgaste, aumentando a vida útil da ferramenta de corte e a redução dos custos de manutenção da ferramenta.

Os revestimentos PVD reduzem a necessidade de utilização de fluidos de corte. Estes fluidos têm associados custos elevados para as empresas, até 15% do orçamento total de produção. Os revestimentos PVD permitem, ainda, a fresagem de alta velocidade a seco que envolve temperaturas extremamente elevadas na ponta (Wolfe e Quinto, 1986).

Revestimentos PVD, como TiAlN, têm elevada estabilidade térmica, dureza a quente e resistência à oxidação para que possam ser usados a seco ou com quantidades limitadas de fluido de corte. Estes revestimentos podem cortar materiais extremamente duros. As ferramentas podem ser re-afiadas e re-revestidas para cortar como novo, economizando custos em comparação com a compra de outra ferramenta (Castanho *et al.*, 2003; Neves *et al.*, 2004).

2.3. Fluidos de corte

Os fluidos de corte podem ser sólidos, líquidos ou gasosos. Os sólidos são constituídos por pós (grafite) ou aditivos metalúrgicos, os líquidos por fluidos de corte puros, emulsionáveis ou químicos, fluidos com agentes de molhabilidade e os meios gasosos por ar, azoto ou dióxido de carbono.

O fluido de corte é utilizado para facilitar a lubrificação e refrigeração do processo de corte. A utilização de fluidos de corte conduz a melhorias tanto a nível funcional como a nível económico.

A nível funcional, aumenta o tempo de vida útil da ferramenta, reduz a força que é exercida na peça baixando assim a potencia de corte, melhora o acabamento da superfície maquinada, ajuda na remoção da aparado da zona de corte, reduz o risco de distorção da peça e evita a ocorrência de oxidação na máquina, na ferramenta e na peça. Economicamente, com a utilização de fluido de corte consegue-se uma redução do consumo de energia durante o corte e a utilização de ferramentas menos dispendiosas (CIMM, 2013).

Para velocidades de corte superiores, o fluido tem dificuldade em chegar à zona de contacto entre a ferramenta e a peça, pelo que é exigida maior eficiência na refrigeração. Quando as velocidades de maquinação são menores, é preferível utilizar fluido de corte, uma vez que este reduz significativamente o atrito entre a ferramenta e a peça. Em caso de ausência de fluido de corte, poderá verificar-se o aquecimento excessivo da peça, e poderão ocorrer deformações, apresentação de cores de revenido e alterações dimensionais na superfície maquinada.

Atualmente, segundo Shashidhara e Jayaram (2010) utiliza-se no processo de fresagem a técnica MQF (mínima quantidade de fluído), que consiste na utilização reduzida do fluido de corte. Este processo tem-se revelado vantajoso em relação à normal lubrificação abundante uma vez que apenas se pulveriza óleo lubrificante através de ar comprimido sobre a peça, reduzindo assim a quantidade de fluido de corte. A técnica MQF foi desenvolvida e estudada para evitar o contacto do operador com quantidades de fluido abundantes, uma vez que são classificados como prejudiciais para a saúde, e facilitar a observação do trabalho executado pela ferramenta. Na técnica MQF as forças de corte necessárias são menores e a rugosidade e o desgaste da peça são semelhantes à técnica de fluido abundante, o que viabiliza a aplicabilidade da MQF (Correia e Davim, 2003).

2.4. Maquinação do Titânio

2.4.1. Breve resumo sobre o Titânio e ligas e sua maquinação

As exigências entre a relação peso/resistência dos materiais aumentaram: O titânio e suas ligas surgem para responder a estes requisitos uma vez que estes materiais têm apenas cerca de 55% da densidade de um aço comum e uma relação resistência/peso superior à do aço (Wang, 2000).

O titânio puro é um material alotrópico com uma estrutura cristalina hexagonal compacta (fase alfa) em baixas temperaturas e uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (fase beta) acima de 882°C, conforme demonstra ilustra a Figura 2.3 (Donachie, 1988). A adição de elementos de liga melhora as propriedades mecânicas do material e alteram a temperatura de transformação alotrópica, nomeadamente o alumínio e o oxigênio que estabilizam a fase α assim como o vanádio e o molibdênio que estabilizam a fase β .

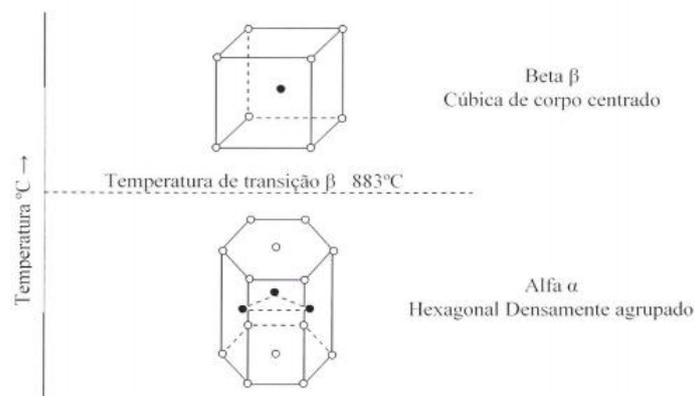


Figura 2.3. Passagem de alfa a beta (Smith, 1981).

2.4.2. Maquinação do Titânio e suas ligas

O titânio e suas ligas são materiais de difícil maquinação (Wang, 2000). No processo de fresagem de titânio verifica-se o risco de acumulação de calor devido à sua baixa condutividade térmica, o que exige um maior cuidado com a velocidade de corte (Rahman; Wong e Zareena, 2003). O titânio conserva a sua resistência à tração e ao escoamento mesmo a altas temperaturas, dificultando a formação da apra e obrigando a grandes esforços durante a maquinação, com elevado atrito entre a ferramenta e a peça. O titânio tem grande facilidade em encruar o que aumenta as forças de trabalho (Komanduri, 1982).

Como o titânio é um metal de dureza elevada e com baixo coeficiente de elasticidade (Hong *et al.*, 2001) a ocorrência de vibrações é elevada pelo que é necessário utilizar sistemas de fixação da ferramenta adequados e uma máquina robusta. Se estas condições não estiverem presentes aquando da maquinação, a ocorrência de micro-vibrações é muito provável, causando danos na ferramenta e na peça por fadiga.

Devido às altas temperaturas de fresagem o titânio pode reagir quimicamente com o material da ferramenta, danificando-a por descamação, soldagem e adesão deteriorando a ferramenta de corte.

Para Dearnley e Grearson (1986) durante a fresagem do titânio acumula-se na ferramenta cerca de 80% do calor gerado e 20% na apara, podendo inclusive verificar-se a existência de formação de chama, quando a ponta da ferramenta atinge os 1100°C,

Os parâmetros de fresagem devem ser selecionados adequadamente uma vez que a atuação da ferramenta na peça altera a sua resistência à fadiga e a formação da apara. Verifica-se correntemente a formação de aparas finas que escoam a alta velocidade, serrilhadas e não uniformes, influenciando a qualidade da superfície da ferramenta e o desgaste, quando os parâmetros são deficientemente selecionados. A ferramenta com má qualidade superficial provoca trepidações e baixa a qualidade superficial da peça. Durante a maquinação deverá adotar-se uma velocidade de avanço significativa e constante e evitar interrupções (Machado e Wallbank, 1990).

A seleção do material adequado para a ferramenta de corte é crucial para a maquinação de ligas de titânio. A ferramenta tem de ter boa resistência ao desgaste e à fratura a temperaturas altas, devido à capacidade do titânio em resistir às elevadas tensões envolvidas no processo de fresagem e à sua elevada resistência ao lascamento, e também porque a formação da apara durante a maquinação é segmentada. A ferramenta tem de ter boa tenacidade e resistência à fadiga, baixa reatividade com o titânio, alta resistência à compressão e boa condutividade térmica, para minimizar os gradientes e o choque térmico da ferramenta (Rahman *et al.*, 2003).

As ferramentas de metal duro revestidas por PVD (TiAlN, AlTiN, TiCN, ZrN, AlCron) são as mais utilizadas para a maquinação das ligas de titânio. A utilização de fresas com ângulo de ataque de 45° de modo a aumentar o efeito de afinamento da apara, geometria da ferramenta positiva e com a aresta cortante arredondada para a apara não aderir.

A utilização de fresas com número de arestas de corte e ângulos de hélice elevados e a utilização de fluido de corte abundante e direcionado para a zona de corte a alta pressão e sem íons cloreto para não reagir com as ligas de titânio, são recomendações para a maquinação da liga de titânio (Komanduri, 1982).

2.4.3. A liga Ti6Al4V

A liga Ti6Al4V é a liga (alfa-beta) mais usada na indústria, cerca de 50% da indústria de titânio é desenvolvida com esta liga (Polmear, 1989).

A liga de Ti6Al4V tem como propriedades a sua alta resistência mecânica, baixa densidade, boa ductilidade e resistência à corrosão. Tem excelentes propriedades mecânicas a elevadas temperaturas.

A liga Ti6Al4V é utilizada na produção de peças e protótipos para o desporto motorizado e indústria aeroespacial, nomeadamente em peças sujeitas a elevadas temperaturas como discos, pás de turbinas, flanges de compressores, elementos de transmissão, reservatórios, assim como no campo biomédico em próteses e também no mundo dos desportos como o ciclismo ou golf por exemplo (Machado e Wallbank 1990; Donachi, 1988).

A seleção do material adequado para a maquinação das ligas de titânio é difícil. Os fabricantes de ferramentas alertam que a utilização dos materiais convencionais para ferramentas, como os carbonetos de tungsténio sinterizados, estão comprometidos com o rápido e prematuro desgaste da aresta de corte ou com a utilização de baixas velocidades de corte (Komanduri, 1982).

2.5. Apara

O estudo da apara resultante de uma maquinação é de extrema importância. O modo como é formada influencia as forças de corte geradas durante uma maquinação influenciando o acabamento da superfície maquinada devido à possível existência de vibrações. Esta formação da apara é influenciada pelas condições de corte, velocidade de avanço e rotação da ferramenta. Um entendimento do processo de corte pode melhorar a vida da ferramenta, o acabamento superficial e o rigor dimensional segundo afirmam Sheikh-Ahmad e Bailey (1997) e se observa na Figura 2.4.

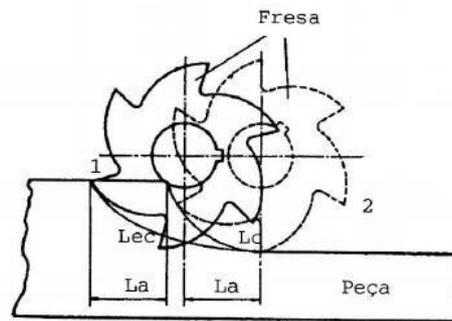


Figura 2.4. Percurso de uma fresa na remoção de material (Davim, 1995).

Em que L_c indica o percurso de corte, L_a o percurso de avanço e L_{ec} o percurso efetivo de corte, ou seja o percurso de corte e avanço juntos, trajetória real do dente.

Na maquinação de titânio e suas ligas a apra resultante é cíclica e serrilhada, devido à deformação grosseira e não homogênea na zona de corte, tornando o processo de formação de apra instável (Komanduri, 1982).

Segundo Machado e Wallbank (1990); Rahman; Wong e Zareena (2003) a apra do titânio é muito fina e conseqüentemente produz um contato entre a apra e a ferramenta muito pequeno. Dizem ainda que se verificam temperaturas altas e alta sollicitação de modo concentrado próximo à aresta de corte, prejudicando o tempo de vida da ferramenta.

Hong *et al.* (2001) mencionam que na maquinação de Ti6Al4V existe uma formação de aparas serrilhadas e não uniformes, indicando assim que durante a maquinação destas ligas as forças sentidas pela ferramenta são alternadas, podendo levar esta à fadiga.

2.6. Acabamento superficial

O Titânio é um material geralmente usado em partes que requerem grande confiabilidade e por esta razão a qualidade da superfície deve ser controlada (Machado e Wallbank, 1990).

O acabamento superficial é um parâmetro usado correntemente para caracterizar a qualidade das superfícies maquinadas, é frequentemente caracterizado pela rugosidade e imperfeições da superfície maquinada, a qual é influenciada pelos parâmetros de maquinação, geometria da peça e da ferramenta e os parâmetros de fresagem.

Com o aumento do raio de canto da ferramenta, a rugosidade superficial diminui até certo ponto; após esse momento surgem vibrações que interferem no acabamento da peça, pelo que a seleção do raio de canto correto melhora a maquinabilidade da peça e conseqüentemente o acabamento superficial (Schulz *et al.*, 2001).

Outro aspecto que influencia a qualidade da superfície é o estado da ferramenta, nomeadamente o desgaste que esta possa ter, que quanto maior, maiores dificuldades tem a ferramenta de maquinar o material nas condições devidas, uma vez que o atrito ferramenta\peça aumenta. A utilização de fresas integrais, embora mais caras, como são mais rígidas, a sua durabilidade é maior melhorando o acabamento superficial.

Segundo Schulz *et al.*, (2001) durante a maquinação é notória muitas vezes a existência de vibrações, essas vibrações influenciam o acabamento superficial, com o intuito de reduzir estas vibrações é aconselhável verificar a rigidez dos sistemas de fixação da ferramenta e verificar se as ferramentas não se encontram desequilibradas. A existência destas vibrações leva a uma superfície ondulada e deficiente.

Groove (2001) menciona que estudar a integridade de uma superfície maquinada é um fator de extrema importância, por razões estéticas, aspecto de segurança, atrito para com outras superfícies e pelas propriedades mecânicas ou físicas, uma falha ou fenda pode ser um centro de tensões.

O acabamento superficial considera fatores subsuperficiais (mecânicos ou metalúrgicos) ou superficiais (rugosidade, ondulação, marcas ou falhas) como sucintamente explicado na Figura 2.5.

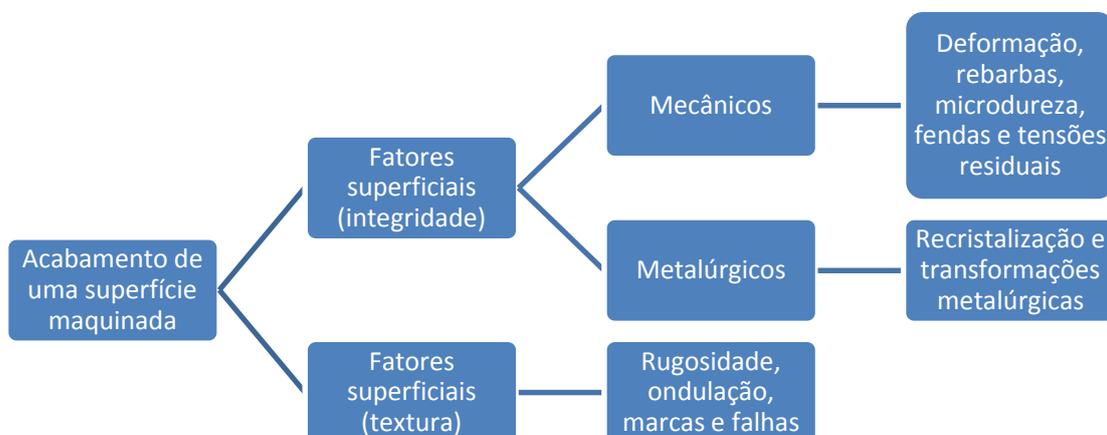


Figura 2.5. Acabamento superficial.

Para analisar o acabamento superficial de uma superfície é mais utilizado a análise dos valores R_t , rugosidade de pico a vale e os valores de R_a , rugosidade aritmética. A rugosidade de pico a vale, R_t , exige maior atenção pois a altura relativa da microtopografia é mais representativa para o acabamento superficial. Tem-se especial cuidado para componentes sujeitos a alta tensão mecânica, pois qualquer pico-vale de grande dimensão pode propagar uma fenda por fadiga, pode acumular fragmentos propícios a desgaste danificando a superfície (Chiffre *et al.*, 2000).

A rugosidade aritmética é utilizada mais para parâmetro de controle, ou seja se o valor de R_a se alterar conclui-se que o processo também sofreu alterações. A análise deste valor é muito utilizado para estabelecer parâmetros de maquinação estáveis uma vez que o seu resultado não é influenciado por acontecimentos casuais, falsos picos ou arranhões (Hobson, 2000).

2.7. Vibrações e ruído

A ocorrência de vibrações descontroladas entre a máquina, ferramenta e peça pode provocar um desgaste prematuro e avarias nas ferramentas, ruídos indesejáveis e aumenta o consumo de energia elétrica com o aumento dos esforços durante a maquinação (Smith e Tlusty 1990). Dependendo da ação a ser executada a vibração pode ou não ter maiores consequências/interferências no acabamento superficial da peça. Na operação de desbaste o nível de vibração não é tão preocupante porque não influencia o acabamento, embora interfira no período de vida útil da ferramenta. Na ação de acabamento o valor das vibrações deverá tender para zero para que no fim da operação resulte o melhor acabamento superficial possível e a precisão dimensional desejada (Metals Handbook, 1989).

O material da peça é um dos principais contribuintes para a existência de vibrações, se o material tiver baixo coeficiente de elasticidade, este pode provocar trepidação e deflexão na peça. Na maquinação das ligas de titânio recorre-se à maquinação de paredes finas, com o objetivo de investigar este aspeto (Trent, 1984).

A profundidade de corte também influencia a produção de vibrações na maquinação; para maior profundidade maiores vibrações, porque a remoção de material é maior e conseqüentemente o atrito entre a ferramenta e a peça. Este pode ser incrementado pelo mau estado da ferramenta; quanto maior o desgaste na ferramenta maior será a vibração durante o processo de maquinação (Budak, 1996).

A haste da ferramenta não deve também ultrapassar cinco vezes o diâmetro da mesma, a fim de reduzir a vibração (Sandvik, 1994).

2.8. Considerações finais

O estudo da maquinabilidade de um material é um fator importante, uma vez que aumenta as possibilidades deste ser utilizado em múltiplas aplicações que requerem formas geométricas atingíveis apenas por processos de maquinação. Uma das maquinações mais usuais é o processo de fresagem em máquinas com comando CNC, que ajudam na complexidade e produtividade de várias peças.

Para a maquinação da liga Ti6Al4V é recomendado o uso de ferramentas de metal duro revestidas por PVD, que conferem os requisitos necessários para a maquinação desta liga uma vez que tem como propriedades a sua alta resistência mecânica, baixa densidade, boa ductilidade e resistência à corrosão.

Na maquinação de titânio e suas ligas a apra resultante é cíclica e serrilhada, devido à deformação grosseira e não homogênea na zona de corte, tornando o processo de formação de apra instável, o que torna as forças exercidas durante a maquinação alternadas, levando à fadiga da ferramenta e a um aumento das vibrações durante a maquinação.

Estas vibrações originam uma superfície ondulada e com defeitos levando a um mau acabamento superficial.

O estudo da influência da geometria da ferramenta em maquinações de Ti6Al4V é um fator determinante para conseguir otimizar e aperfeiçoar a maquinação desta liga.

3. MATERIAL E MÉTODO EXPERIMENTAL

Neste capítulo abordam-se parâmetros e cuidados a ter antes e durante a maquinação. Uma maquinação tem de ser pensada e estudada antes de ser realizada de modo a que não ocorram danos nas máquinas, possíveis gastos excessivos durante as maquinações ou outros problemas relativos à precisão ou acabamento superficial das peças maquinadas.

3.1.1.1. Composição do material base

A liga utilizada neste trabalho foi a Ti6Al4V, cuja composição e características nominais são apresentadas nas Tabela 3.1 e Tabela 3.2.

Tabela 3.1. Composição química nominal da liga Ti6Al4V.

Material	Elementos químicos, %							
	Ti	Al	V	Fe	O	N	H	C
Ti-6Al-4V	87.725 - 91.0	5.50 - 6.75	3.50 - 4.50	Max. 0.4	Max. 0.2	Max. 0.05	Max. 0.125	Max. 0.1

Tabela 3.2. Propriedades mecânicas da liga Ti6Al4V (Machado e Wallbank, 1990 e Donachie, 1998).

Propriedade	Valor
Densidade (g/cm ³)	4.43
Dureza, HRc	340
Extensão de rotura (%)	14
Tensão de cedência (MPa)	1480
Módulo de elasticidade (GPa)	113.8
Módulo de elasticidade Transversal (GPa)	44.0
Condutividade Térmica (W/m-K)	6.70
Calor específico (J/g-°C)	0.5263
Ponto de fusão (°C)	1604 - 1660

Para melhor perceber o material a maquinar estudou-se a sua microestrutura. O primeiro desbaste foi obtido passando o material em lixas de carboneto de silício com granulometrias de 320, 600, 1000 e 2500 e polimento com suspensões de diamante de 6, 3 e 1 μm ; posteriormente foi feito um polimento em solução de alumina e peróxido de hidrogénio a 3%.

Para conseguir observar a microscópio, recorreu-se a um ataque químico com uma solução contendo 50 ml de água com 10% de ácido oxálico e 50 ml de água com 0.5% de ácido fluorídrico. O resultado obtido está ilustrado na Figura 3.1.

A estrutura é constituída pelas fases α a cor clara e β a cor escura, com alinhamento segundo a direção de laminagem, com algumas zonas com as fases orientadas segundo diversas direções, morfologicamente idênticas a uma estrutura de Widmanstätten. Outras imagens podem ser encontradas no Anexo A.

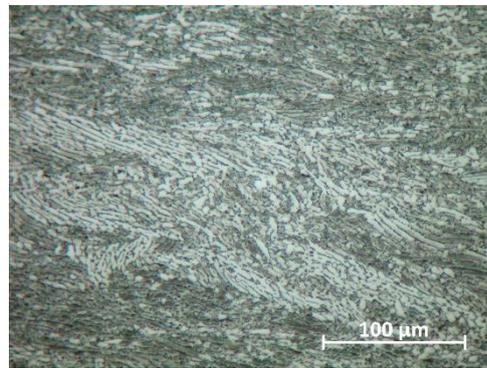


Figura 3.1. Microestrutura da liga Ti6Al4V utilizada no estudo.

3.1.1.2. Dureza do Material base

Foi medida a dureza do material com o auxílio de um microdurómetro Shimadzu. Este equipamento força um indentador *Vickers* a penetrar na superfície do provete e, com o auxílio de um *software* associado a um microscópio *AxionVision LE*, mede-se as diagonais da pirâmide demarcada no provete, e calcula-se a dureza através da expressão 3.1, em que P é a carga aplicada durante o teste (500g) e d_1^2 as dimensões das diagonais da indentação. A Figura 3.2 identifica o microdurómetro e a Figura 3.3 a medição das diagonais da indentação.

$$NDV = \frac{1,854 \cdot P}{d_1^2} \quad 3.1$$



Figura 3.2. Microdurómetro de durezas.

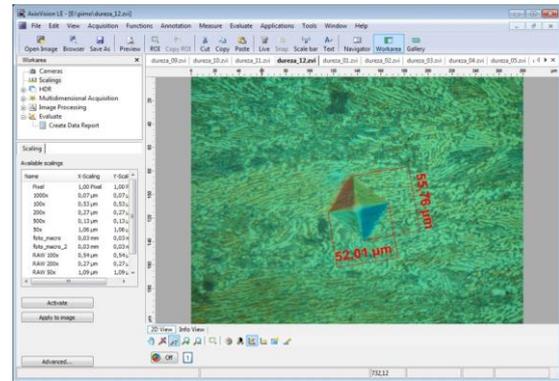
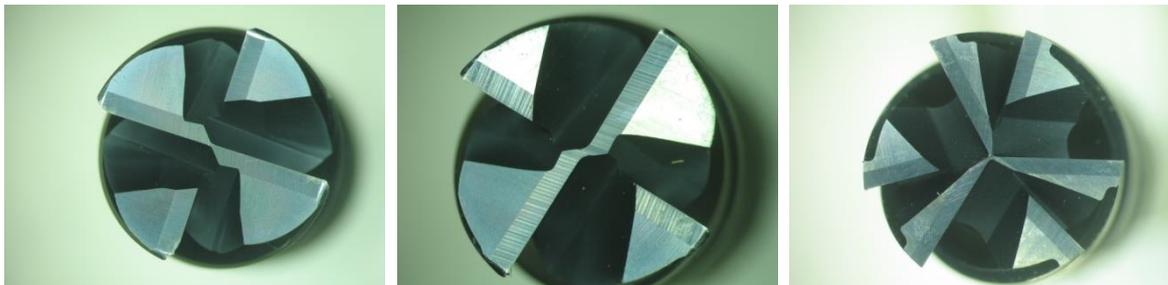


Figura 3.3. Medição de diagonais.

A dureza foi avaliada com base em 12 indentações, obtendo-se o resultado médio de 337 *Vickers* com um desvio padrão de 18 *Vickers*.

3.2. Ferramentas

Para a realização do estudo selecionou-se um conjunto de ferramentas com características diferentes, variando os parâmetros que mais influenciam na maquinação, como por exemplo o raio de canto, o ângulo de hélice, o espaçamento entre arestas de corte e o número de arestas de corte. A Figura 3.4 ilustra alguns exemplos de fresas utilizadas nas maquinações.



a)

b)

c)

Figura 3.4. Exemplos de fresas utilizadas: a) Fresa com ângulo de hélice fixo, b) Fresa com ângulo de hélice variável e c) Fresa com ângulo de hélice e espaçamentos entre arestas variável.

3.2.1. Ferramentas utilizadas nos testes

Foram usadas 12 fresas de metal duro, com 12mm de diâmetro e revestidas a AlCron (crômio e alumínio) (Beltrão e Marmentini), onde se alterou apenas o raio de canto, os ângulos de hélice, o número de arestas de corte, o tipo de espaçamento entre arestas de corte, fixo ou variável e o ângulo de ataque e de saída da aresta de corte. As especificações das ferramentas estão descritas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Ferramentas utilizadas nos testes.

N.º fresa	Nº Dentes	Espaçamento entre arestas de corte	Ângulo de inclinação das arestas de corte	Raio de canto	Ângulos de ataque e de saída
1	4	Fixo	50º	0.5	6º
2	4	Fixo	50º	1	6º
3	4	Fixo	50º	2	6º
4	6	Fixo	42º	0.5	6º
5	6	Fixo	42º	1	6º
6	6	Fixo	42º	2	6º
7	4	Variável	40\42º	0.5	6º
8	4	Variável	40\42º	1	6º
9	4	Variável	40\42º	2	6º
10	4	Variável	40\42º	2	>6
11	6	Variável	35\38º	0	8º
12	4	Fixo	42º	2,5	>6

As fresas de 1 a 9 foram desenvolvidas especificamente para esta investigação numa empresa de ferramentas local, para que todas as ferramentas estivessem sujeitas às mesmas condições de fabrico. As ferramentas 7, 8, 9, 10, têm ângulos 40\42º, quer dizer-se com isto que das quatro arestas de corte, duas têm ângulo de hélice de 40º e duas de 42º. A fresa 11, adquirida a um fornecedor diferente, tem ângulos de hélice variáveis entre 35\38º, e um espaçamento variável entre as arestas de corte; estas encontram-se ordenadas duas a duas como ilustra a Figura 3.4, c). A ferramenta 10 e 9 têm as mesmas especificações contudo, como a primeira foi adquirida a um fornecedor diferente, apresenta pequenas diferenças; é visível que a fresa 10 têm ângulos de ataque e de saída maiores que a fresa 9, embora não se saiba o valor exacto uma vez que não foi fornecido pelo fabricante. A fresa de 12 foi adquirida a um fornecedor diferente das fresas 10 e 11.

3.3. Fluido de corte

Para a realização dos testes foi utilizado o método do fluido abundante, uma vez que nenhuma das máquinas disponíveis no centro tecnológico dispunha do mecanismo de MQF. O fluido utilizado foi a água com cerca de 10% de concentração de óleo de corte; o óleo utilizado foi o *Castrol Hysol XF*. A concentração do fluido de corte foi verificada antes da maquinação utilizando o emulsómetro mostrado na Figura 3.5.



Figura 3.5. Emulsómetro.

3.4. Centro de maquinação OKK-VB53

Foi utilizado o centro de maquinação OKK-VB53 em todos os testes realizados neste trabalho, conforme Figura 3.6. Este centro é basicamente uma fresadora de três eixos X,Y e Z bastante compacta e robusta.

A fresadora revela um bom desempenho na remoção do material, uma vez que consegue atingir na árvore cerca de 20000 RPM, com potência até 15 KW. Outra grande vantagem é a área de trabalho, considerada de excelentes dimensões para um centro de maquinação com cabine fechada. As dimensões da zona de trabalho são eixo dos XX 's de 1050mm, eixo dos YY 's de 530mm e o eixo dos ZZ 's de 510mm.



Figura 3.6. Centro de maquinação OKK-VB53.

3.5. Sistemas de aperto

3.5.1. Sistema de aperto da ferramenta à máquina

Existem vários tipos de fixação da ferramenta, uns mais robustos e com maior eficácia que outros. Para a maquinação de titânio e suas ligas é preferível a seleção do melhor sistema disponível, evitando vibrações.

Para a realização dos testes foi utilizado o sistema tipo BT40, ou seja uma fixação à árvore da máquina em cone, visível no lado direito da Figura 3.7. Como o ajustamento é realizado em cone garante-se a sua concentricidade com a árvore, além de que a área de contacto entre um e outro é aproveitada ao máximo.

No sistema de aperto da ferramenta, do lado direito da Figura 3.7 tem-se o acoplamento à máquina e do lado oposto, o sistema de fixação da ferramenta.

No estudo foi utilizado um sistema de aperto por pinças que consiste num sistema ranhurado e em cunha que posteriormente é apertado por meio de uma porca que o obriga a ajustar-se à ferramenta. Quanto maior o aperto da porca mais fixa fica a ferramenta; as pinças têm cerca de 50mm o que revela uma área de contacto suficiente entre elas e a ferramenta.

Na Figura 3.8 apresenta-se o esquema de aperto da ferramenta utilizada nos testes, com a ferramenta 40mm fora das pinças de aperto (distância suficiente para as maquinações previstas).



Figura 3.7. Sistema de aperto ferramenta.

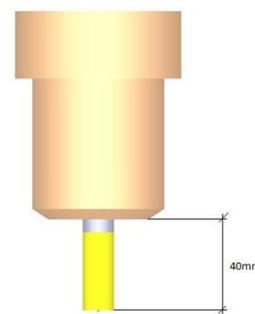


Figura 3.8. Esquema do aperto da ferramenta utilizada nos testes.

Com comprimento livre maior é provável a ocorrência de vibrações da ferramenta no processo de maquinação visto que o comprimento disponível pela fresa no exterior não deve exceder até um máximo de cinco vezes o diâmetro desta (Sandvick, 1994).

3.5.2. Sistema de aperto da peça à máquina

O sistema de aperto da peça à máquina é de igual importância ao sistema de aperto da ferramenta, ainda que na maioria das vezes a sua seleção seja mais difícil, pois o sistema de aperto da peça é influenciado pela forma e dimensões da peça e também pelo tipo de operações de maquinação a realizar.

Para as maquinações realizadas no Centimfe utilizou-se uma prensa com o sistema de aperto da peça ilustrado na Figura 3.9, considerando a geometria da peça e as maquinações a serem realizadas. Selecionou-se este mecanismo porque dentro dos disponíveis no centro tecnológico é o mais eficaz para as maquinações previstas.



Figura 3.9. Prensa com o provete para estudo.

3.6. Proвете a maquirar

O provete a maquirar foi selecionado face à geometria final a obter. Se o objetivo dos testes era estudar a maquinabilidade de ligas de titânio na produção de elementos de paredes finas, o provete mais próximo seria uma barra, como selecionada. As barras foram cedidas pelo Centimfe e tinham dimensões de 101x51x7mm, como se mostra na Figura 3.10.

A barra foi encastrada na prensa, ficando apenas 38mm fora desta, conforme a Figura 3.11. Este valor tem extrema importância uma vez que quanto maior for, mais proporciona a deflexão da barra, e conseqüentemente maiores vibrações, influenciando diretamente a maquinação, e principalmente o acabamento superficial pretendido.



Figura 3.10. Forma dos provetes utilizados durante o estudo.

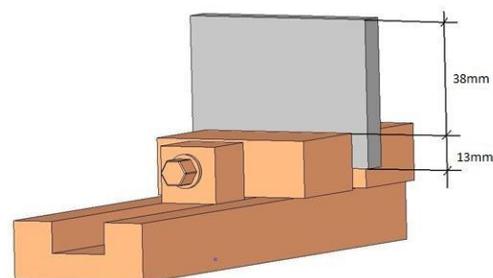


Figura 3.11. Esquema de fixação do provete para maquinação.

3.7. Estratégia e tipo de maquinação

Para a maquinação foi selecionado um formato para os provetes em forma de barra para que fosse realizada uma maquinação lateral. A maquinação lateral permite estudar o comportamento da ferramenta, as vibrações e o acabamento da peça para a penetração da ferramenta pretendida. Esta pareceu a estratégia de maquinação mais aconselhada para a obtenção de paredes finas num determinado material. O teste dividiu-se em 12 passagens, representadas esquematicamente na Figura 3.12:

- A vermelho, seis passagens de desbaste, com um deslocamento axial (A_p) de 10mm e um deslocamento radial (A_e) de 1.5mm;
- Duas de semi-acabamento (7 e 8) a azul, com um A_p de 24mm e um A_e de 0.5mm
- Quatro passagens de acabamento (9,10,11 e 12) a azul claro com uma penetração axial A_p de 12mm e uma penetração radial A_e de 0.75mm.

Para a seleção destes valores nas passagens de semi-acabamento e de acabamento garantiu-se a regra de $1/8$ que define um A_p igual a 8 vezes a espessura final da parede após a passagem dos dois lados do provete.

Para a realização de cada passagem a ferramenta realiza o mesmo movimento: desce até à cota final desejada, a barra movimenta-se e faz o avanço da ferramenta sobre a peça e no final a ferramenta sobe. Em seguida, faz a mesma operação no lado oposto do provete. Desta forma, a ferramenta mantém-se a rodar no sentido direto do avanço ou seja, no sentido concordante de maquinação, conforme a Figura 3.13.

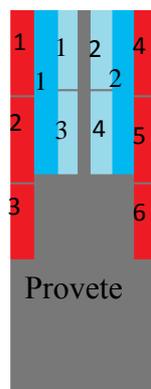


Figura 3.12. Passagens realizadas no provete.

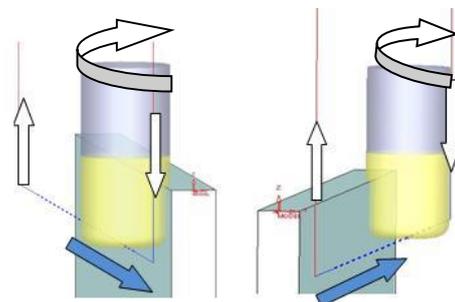


Figura 3.13. Esquema da movimentação da fresa durante a maquinação.

3.8. Ensaios de maquinação

Depois de realizada a análise dos parâmetros necessários à maquinação realizaram-se os testes nos provetes. As maquinações foram realizadas com os parâmetros de maquinação fixos, ou seja com a mesma rotação, a mesma velocidade de avanço e a mesma velocidade de corte para todos os testes. A seleção dos parâmetros de maquinação considerou o levantamento bibliográfico referente à maquinação de titânio e suas ligas, assim como os testes realizados anteriormente no Centimfe. A rotação utilizada foi de 1800 RPM, a velocidade de avanço de 720mm/min e velocidades de corte de 67 m/min. Os parâmetros foram fixados durante as maquinações realizadas com o objetivo de analisar a interferência das alterações das características das ferramentas no aspeto final da peça.

3.9. Recolha de dados

Durante a maquinação dos provetes procedeu-se à recolha dos dados necessários, utilizando-se vários instrumentos. Com o auxílio de um dinamómetro rotativo acoplado à árvore e de um decibelímetro e posterior análise com um micrómetro, um rugosímetro e um microscópio ótico, com *software* apropriado para o estudo da integridade da superfície, recolheram-se os dados necessários à análise dos resultados.

3.9.1. Dinamómetro rotativo

O processo de fresagem foi monitorizado com recurso a um dinamómetro HS-RCD (*High Speed Rotating Cutting Force Dynamometer*) da marca Kistler, com capacidade para analisar os esforços de corte segundo o eixo dos z 's e os momentos torçores associados ao processo de corte, conforme se apresenta na Figura 3.14.



Figura 3.14. Dinamómetro rotativo e esforços medidos pelo instrumento.

Procurou-se estudar a variação dos esforços segundo o eixo dos ZZ 's (F_z) e o momento torçor da árvore (M_z), associados ao corte, com o objetivo de encontrar as condições adequadas de funcionamento das ferramentas, e evitar possíveis esforços que limitam a sua durabilidade e comprometem a qualidade do corte.

3.9.2. Decibelímetro

Com o intuito de analisar o ruído provocado pela maquinação dos provetes de titânio recorreu-se a uma aplicação “*Android*” de análise da intensidade de ruído sentido pelo equipamento.

Apesar de o equipamento não estar sujeito a controlo de qualidade regular, podendo comprometer a sua precisão de medida optou-se pela sua utilização, face à inexistência de equipamento sujeito a verificação. O objetivo da medição é a comparação do ruído produzido durante a maquinação entre as várias ferramentas de corte e, sendo todos os testes medidos com o mesmo equipamento, e na ausência de outro método, considerou-se uma solução viável.

3.9.3. Medições da parede fina com o micrómetro

A análise da espessura da parede fina resultante da maquinação foi analisada com recurso a um micrómetro representado na Figura 3.15, realizando a medição da diferença de espessura entre a parte superior e inferior do provete.

3.9.4. Rugosímetro Perthen *Fododyn*

A integridade da superfície maquinada foi estudada com recurso a um rugosímetro, da marca *Perthen*, como ilustrado na Figura 3.16.

O rugosímetro utiliza um laser inserido na ponta de um analisador e fornece a rugosidade média (R_a) das superfícies analisadas. O laser varre a superfície, anula a média das imperfeições de maiores dimensões (R_t), e apresenta apenas o valor da rugosidade da superfície (R_a).



Figura 3.15. Medição com um micrômetro.

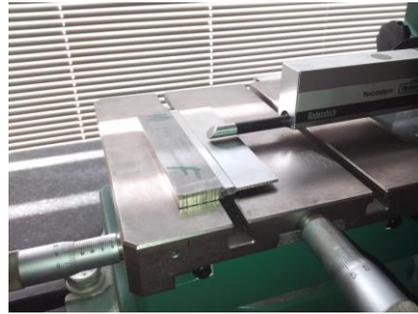


Figura 3.16. Rugosímetro *Perthen*.

3.9.5. Microscópio *Alicona*

O microscópio *Alicona*, Figura 3.17, é utilizado para analisar superfícies: retira uma fotografia de um ponto da superfície e analisa-a disponibilizando um conjunto de resultados associados a um *software* próprio. O perfil da superfície da secção selecionada, a rugosidade, o desnível e as irregularidades dessa secção e da superfície fotografada, Figura 3.18, são exemplos de valores que podem ser analisados com recurso a este instrumento.

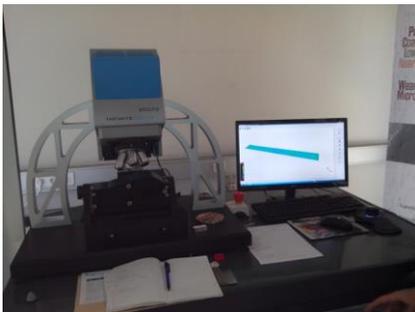


Figura 3.17. Microscópio *Alicona*.

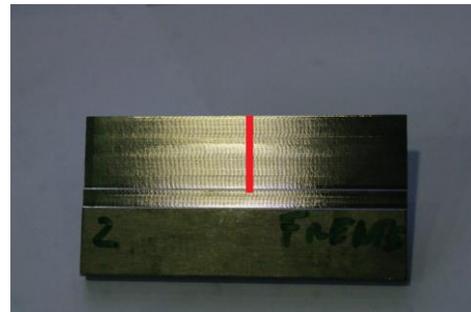


Figura 3.18. Esquema da foto tirada pelo microscópio *Alicona*.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O presente capítulo pretende expor e analisar os resultados obtidos durante a maquinação da liga de titânio. No Anexo B encontra-se as imagens da superfície de todos os provetes maquinados.

4.1. Decibelímetro

Durante a maquinação com as ferramentas registou-se a intensidade de ruído provocado, tanto na operação de desbaste como na operação de acabamento. Segundo, Smith e Tlusty (1990), os valores de ruído são de extrema importância pois indicam em primeira instância a possibilidade de observar qual a fresa com melhor desempenho, pois o ruído é muitas vezes provocado pela existência de vibrações da peça provocadas pela maquinação.

Os resultados registados estão os apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Resultados registados no decibelímetro.

Ruído (dB)		
Fresa	Desbaste	Acabamento.
1	85	83
2	83	81
3	82	81
4	87	84
5	86	83
6	82	80
7	83	81
8	82	80
9	84	81
10	85	81
11	81	79
12	83	81

Com base na análise da tabela, verifica-se que a fresa 4 foi a que produziu maior ruído e a fresa 11 a que produziu menor. As fresas 4 e 11 têm ambas seis arestas de corte embora a fresa 4 tenha espaçamento fixo entre as várias arestas e a fresa 11 variável.

A fresa 4 com ângulo de inclinação da aresta de corte de 42° e raio de 0.5, e a fresa 11 com ângulos variáveis entre $35\backslash 38^\circ$ e raio de canto a tender para zero.

Estes dois parâmetros podem contribuir para a redução de ruído, mas o facto da ferramenta 11 ter espaçamento entre arestas de corte variável também deve influenciar.

Comparando as ferramentas 1, 2 e 3 ou 4, 5 e 6, onde só varia o raio de canto verifica-se que com o aumento do raio de canto o valor do ruído diminui, uma vez que a entrada da ferramenta na peça é menos agressiva.

Comparando as fresas 1, 2 e 3, que têm 4 arestas de corte, com as fresas 4, 5 e 6, que têm seis arestas de corte, observa-se que para um maior número de arestas de corte, é ligeiramente maior o ruído, possivelmente porque são mais arestas de corte e um maior número de vezes a entrar sobre a peça.

Para fresas com espaçamento entre arestas de corte variável, ferramentas 7, 8, 9, 10 e 11, obteve-se uma menor produção de ruído que as fresas com espaçamento entre arestas de corte fixo, por induzirem modos vibratórios diferentes, conforme referem Komanduri e Turkovich (1981).

4.2. Apara resultante

Na Figura 4.1 apresentam-se alguns exemplos de aparas que resultaram da maquinação dos provetes em estudo. Na generalidade tem-se três condições de corte com penetrações de 1.5, 0.5 e 0.75 mm com entregas de 10, 24 e 12 mm, respetivamente.

Na generalidade a morfologia da apara é interrompida; a Figura 4.1 a) ilustra exemplos de várias aparas resultantes da maquinação. Na Figura 4.1 b), apresenta-se o aspeto para as operações de desbaste, de semi-acabamento na Figura 4.1 c), e de acabamento na Figura 4.1 d).

O método experimental deveria ter previsto inicialmente uma recolha de apara para todas as maquinações, com o objetivo de estudar cada uma delas, contudo tal não foi realizado.

Na Figura 4.1 a) à direita, temos a apara de desbaste, ao centro três de semi-acabamento e à esquerda a de acabamento.

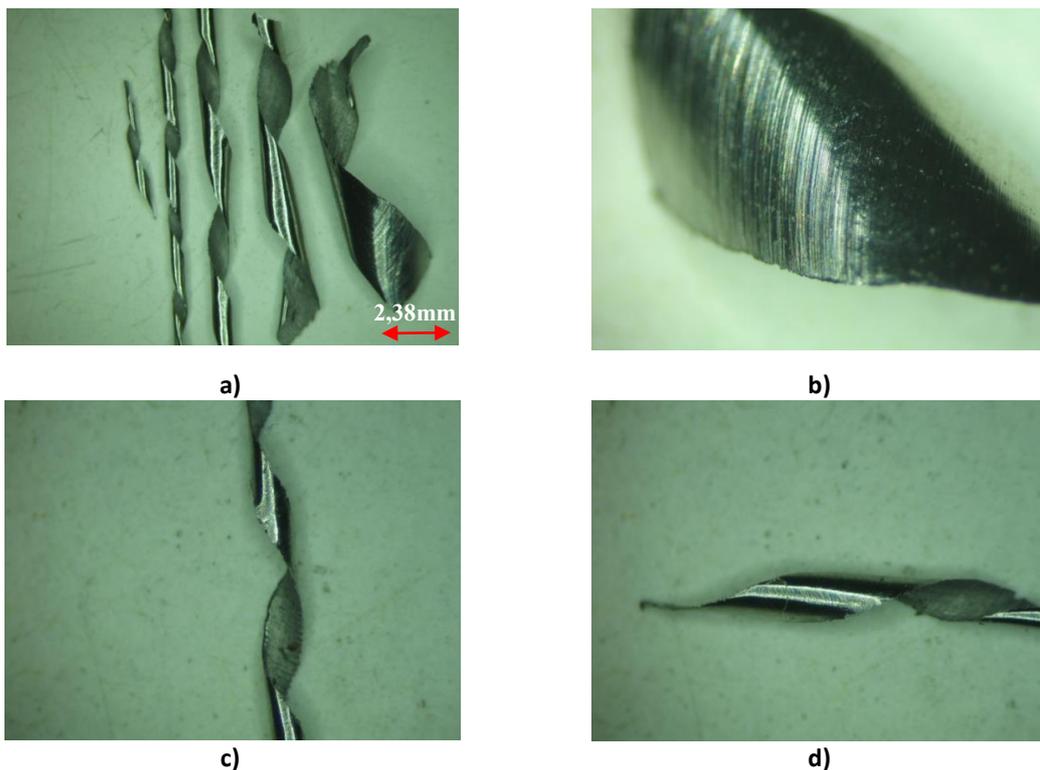


Figura 4.1. Aparas resultantes com uma ampliação de 2x: a) Conjunto de aparas, b) apara de maior espessura (desbaste), c) apara de menor espessura e maior comprimento (semi-acabamento) e d) apara de menor espessura e menor comprimento (acabamento).

4.3. Dinamómetro

Analisando os resultados obtidos pelo dinamómetro separaram-se os valores das diversas passagens nomeadamente os esforços verificados no eixo dos ZZ's e os momentos torçores sentidos pela árvore da máquina durante a maquinação. Os resultados são apresentados em baixo.

4.3.1. Esforços segundo ZZ's

4.3.1.1. Esforços Segundo ZZ's na operação de desbaste

A Figura 4.2 indica as ferramentas com maiores ou menores esforços segundo o eixo dos ZZ's durante a operação de desbaste, ou seja com incremento segundo zz de 10mm e uma penetração radial de 1.5mm.

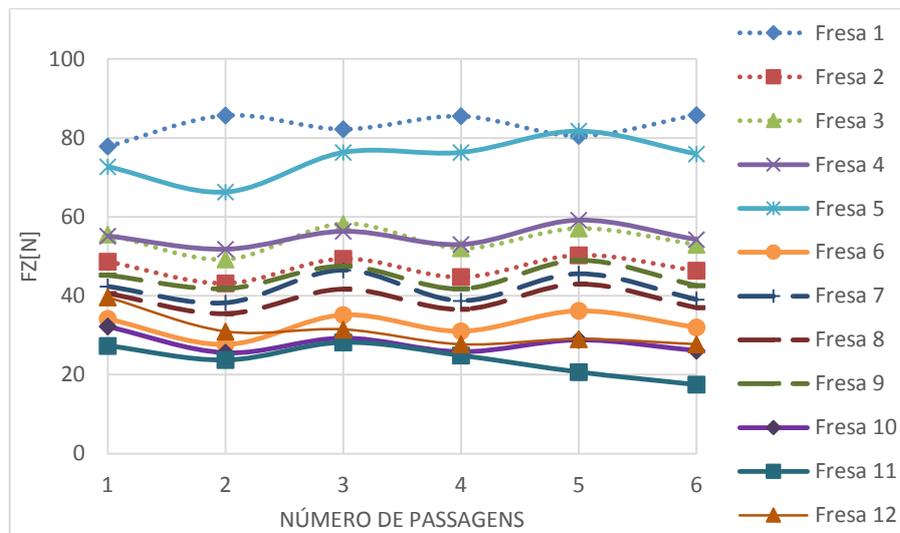


Figura 4.2. Esforços em ZZ na operação de desbaste.

A fresa 1 com quatro arestas de corte, ângulo de hélice de 50° e raio de canto de 0.5 e a fresa 5 com seis arestas de corte, ângulo de hélice de 42° e raio de canto 1, foram as que necessitaram de maiores esforços para a maquinação, enquanto que a fresa 10 com quatro arestas de corte, ângulo de hélice de $40/42^\circ$ e raio de canto de 0.5 e a fresa 11 com seis arestas de corte, ângulo de hélice de $35/38^\circ$ e raio de canto a tender para zero, obtiveram menores esforços. A mudança significativa entre as fresas 1 e 5 com as fresas 10 e 11 é o facto de as segundas terem um espaçamento entre arestas de corte variável. Conclui-se então que esse fator ajuda no corte da peça, reduzindo os esforços durante a maquinação.

A inclinação do ângulo de hélice segundo Zatarain *et al.* (2006) altera os esforços segundo o eixo dos ZZ's. As fresas com ângulo de hélice maior fresas 1, 2 e 3, têm maior Fz porque têm maior inclinação 50° , em relação ao eixo da fresa. Durante a maquinação este aumento de inclinação leva a ferramenta a entrar mais na peça, exigindo maiores esforços Fz da árvore. As ferramentas com ângulo de hélice variável, fresas 7, 8, 9, 10, com $40/42^\circ$ e a fresa 11 com $35/38^\circ$ exigem menores esforços ainda que entre as fresa 7, 8, 9 e 10, o aumento do raio de canto de 0.5 para 1 e 2, acentua os esforços sentidos pela máquina. Entre conjuntos em que as fresas têm ângulos de hélice iguais nomeadamente 1, 2 e 3 com 50° , 4, 5 e 6 com 42° e 7, 8 e 9 com $40/42^\circ$, a ordem da ferramenta melhor para a pior não é uniforme aumentando o raio de canto. Conclui-se que para um determinado ângulo de hélice, corresponde um raio de canto ótimo. Com o aumento do número de arestas, fresas 4, 5 e 6 com seis arestas de corte, Fz aumenta pois são mais arestas a cortar material, o que resulta num aumento dos esforços Fz.

A fresa 11 tem menor esforço F_z porque tem menor ângulo de hélice $35\backslash38^\circ$ e um raio de canto a tender para zero: este efeito impede significativamente o enterro da ferramenta na peça.

4.3.1.2. Esforços Segundo ZZ's na operação de semi-acabamento

A Figura 4.3 indica as ferramentas com maiores ou menores esforços segundo o eixo dos ZZ's durante a operação de semi-acabamento, ou seja com incremento segundo zz de 24mm e uma penetração radial de 0.5mm.

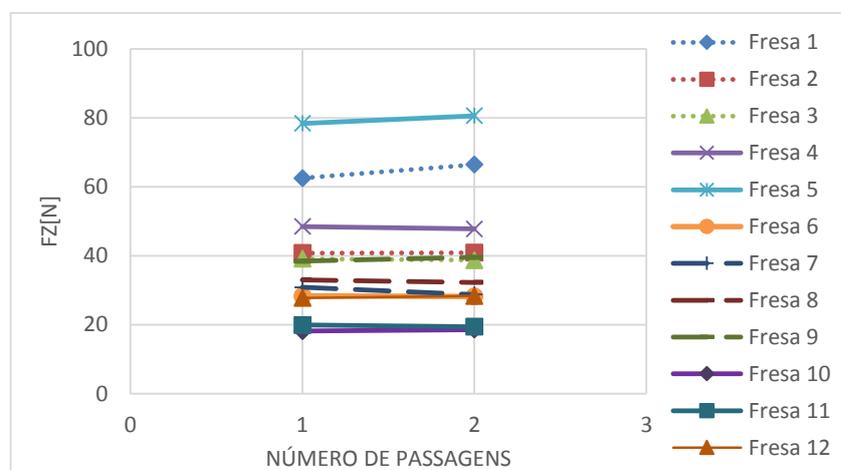


Figura 4.3. Esforços em ZZ na operação de semi-acabamento.

Em cópia da maquinação de desbaste, as fresas 1 e 5 foram as que necessitaram maiores esforços para a maquinação e a fresa 10 e 11 as que necessitaram de menores.

Os resultados nesta operação são semelhantes à operação de desbaste, embora se verifique que a fresa 5 provoca maior esforço que a fresa 1. Estas diferem essencialmente no número de arestas de corte em que a fresa 1 tem quatro e a fresa 5 tem seis. Este aumento das arestas de corte origina um aumento dos esforços, visto que a fresa nesta operação de semi-acabamento se encontra com um incremento segundo ZZ's de 24mm, aumentando assim o comprimento da secção maquinada. Um maior número de arestas de corte a maquinar uma maior secção origina maiores esforços durante a maquinação.

4.3.1.3. Esforços Segundo ZZ's na operação de acabamento

A Figura 4.4 indica as ferramentas com maiores ou menores esforços segundo o eixo dos ZZ's durante a operação de acabamento, ou seja com incremento segundo zz de 12mm e uma penetração radial de 0.75mm.

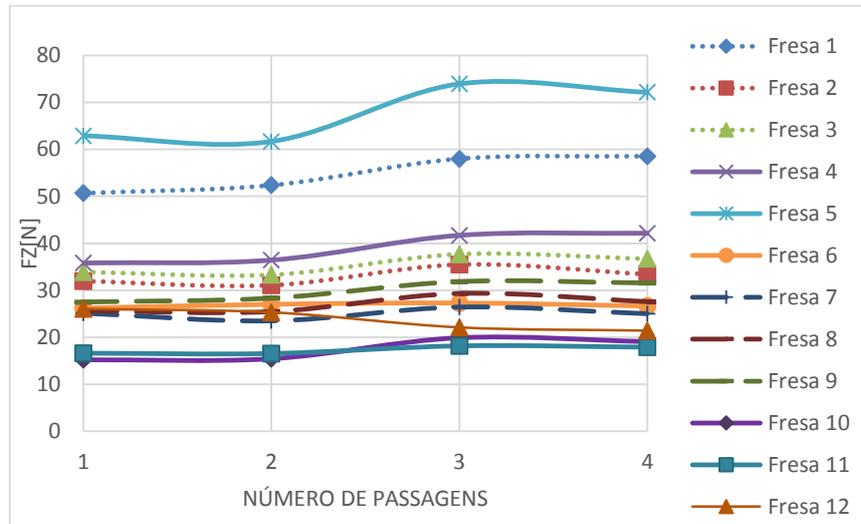


Figura 4.4 Esforços em ZZ na operação de acabamento.

Como verificado nas operações de desbaste e semi-acabamento, as fresas 1 e 5 foram as que necessitaram de maiores esforços para a maquinação e as fresas 10 e 11 as que necessitaram de menores.

Nesta operação de acabamento, a variação dos esforços F_z sentidos pela árvore é igual à registada na operação de desbaste e de semi-acabamento. Conclui-se que independentemente da operação, desbaste, semi-acabamento ou acabamento, os esforços F_z verificados pela árvore têm a mesma variação em ambos os casos. Conclui-se que os esforços F_z , variam com a geometria da ferramenta, ou seja, com a alteração do raio de canto, ângulo de hélice e espaçamento entre arestas de corte mas ao longo das várias operações desbaste, semi-acabamento e acabamento as alterações nos esforços são semelhantes ou mesmo iguais para ambos os casos.

4.3.2. Momento torçor durante as maquinações

4.3.2.1. Momento torçor na operação de desbaste

A Figura 4.5 indica as ferramentas com maiores ou menores momentos torçores durante a operação de desbaste, ou seja com incremento segundo z de 10mm e uma penetração radial de 1.5mm.

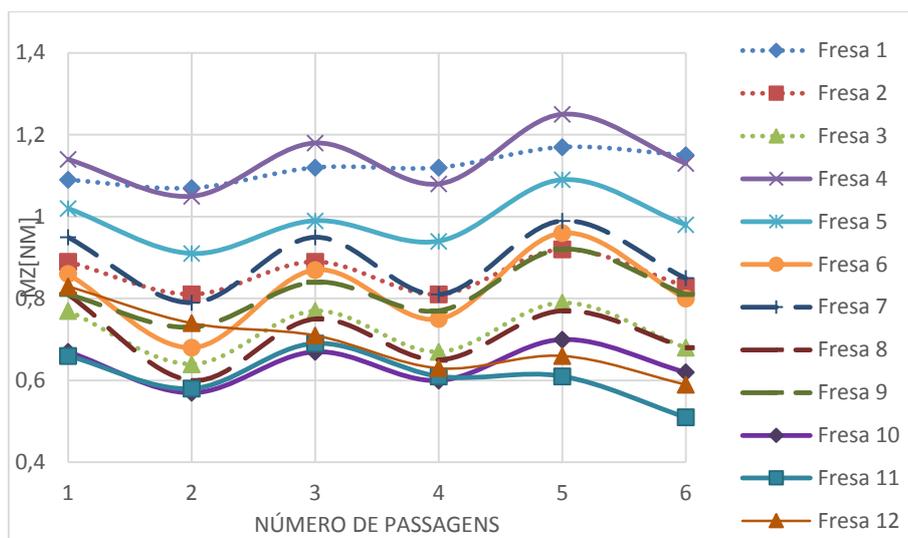


Figura 4.5. Momentos torçores na operação de desbaste.

A fresa 1 e 4 foram as que necessitaram de maiores momentos para a maquinação, em que a fresa 1 tem quatro arestas de corte, ângulo de hélice de 50° e raio de canto 0.5 e a fresa 4 tem seis arestas de corte, ângulo de hélice de 42° e também raio de canto de 0.5. A fresa 10 com quatro arestas de corte, ângulo de hélice $40/42^\circ$, raio de canto 2 e a fresa 11 com seis arestas de corte, ângulo de hélice $35/38^\circ$ e raio de canto a tender para zero necessitaram de menores momentos. Entre estas fresas a principal diferença é o espaçamento entre arestas de corte variável que as fresas 10 e 11 têm e as fresas 1 e 4 não.

A Figura 4.5 ilustra a variação de M_z com as alterações na geometria da ferramenta: comparando as fresas 1, 2 e 3, em que a única diferença entre elas é o raio de canto 0.5, 1 e 2, é notória a diminuição dos momentos com o aumento do raio de canto, este fator ajuda a fresa a entrar no material, resultando numa diminuição dos momentos torçores.

Comparando as fresas 1, 2 e 3 com as fresas 4, 5 e 6, que diferem essencialmente no número de arestas de corte entre quatro e seis, para um maior número de arestas de corte os momentos torçores registados foram superiores.

Entre as fresas de passo variável feitas na empresa local, 7, 8 e 9, em que as suas características são iguais exceto o raio de canto que varia entre 0.5, 1 e 2, o valor dos momentos para a fresa 8, com raio 1 são menores. Leva a concluir de novo que existe um raio de canto ótimo para um determinado ângulo de hélice.

As vibrações sentidas durante a maquinação alteram o valor de M_z entre as várias ferramentas, tal é observável entre fresas 10 e 11 por exemplo que iniciam a operação na parte superior do provete onde as vibrações são maiores com valores de M_z idênticos, e terminam junto do encastramento onde as vibrações são menores com valores distantes.

Analisando as várias fresas é visível um aumento de M_z ao longo das maquinações até junto do encastramento. Conclui-se que as fresas na parte superior do provete, cortam menor volume de material devido ao facto de empurrarem a peça levando esta a fletir e a fugir da fresa. No encastramento a peça tem os movimentos mais restringidos e os esforços são imputados à fresa aumentando os momentos torçores sentidos pela árvore durante a operação de desbaste.

4.3.2.2. Momento torçor na operação de semi-acabamento

A Figura 4.6 indica as ferramentas com maiores ou menores momentos torçores durante a operação de semi-acabamento, ou seja com incremento segundo z de 24mm e uma penetração radial de 0.5mm.

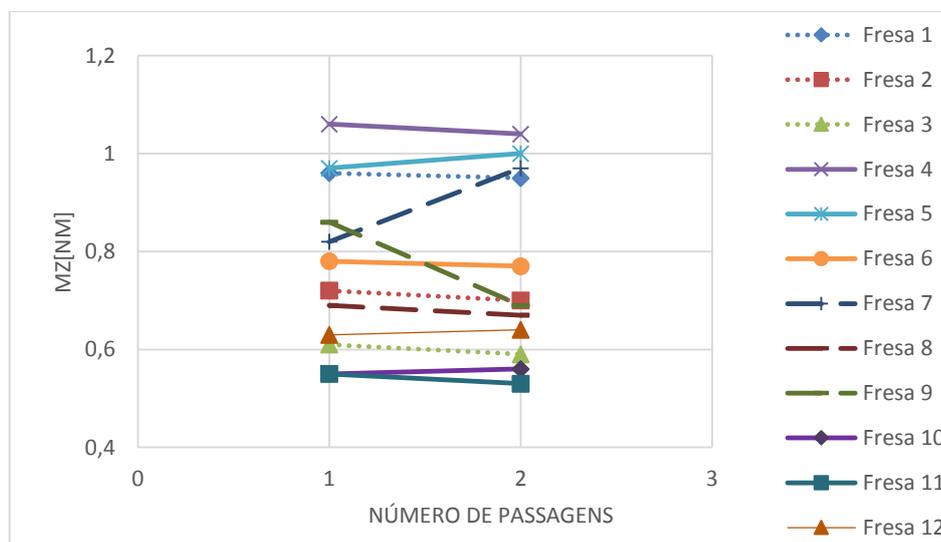


Figura 4.6. Momentos torçores na operação de semi-acabamento.

As fresas 4 e 5 com ângulo de hélice 42° , diferem apenas no raio de canto 0.5 e 1, e têm um número de arestas de corte seis em vez de quatro como às restantes fresas, registaram maiores momentos. Conclui-se que para um maior número de arestas de corte é necessário maiores momentos torçores.

A fresa 10 com quatro arestas de corte, ângulo de hélice $40\backslash 42^\circ$, raio de canto 2 e a fresa 11 com seis arestas de corte, ângulo de hélice $35\backslash 38^\circ$ e raio de canto a tender para zero necessitaram de menores momentos para a maquinação, assim como se verificou também na operação de desbaste.

Outro aspeto verificado na operação de desbaste e agora de novo evidente é a diminuição do valor dos momentos envolvidos durante a maquinação com o aumento do raio de canto, fresas 1, 2 e 3, em que a única diferença entre elas é o raio de canto 0,5, 1 e 2.

Os resultados obtidos são semelhantes aos valores dos momentos torçores da operação de desbaste, embora as fresas de espaçamento entre hélices variável, fresas 7, 8, 9, 10 e 11, mostrarem uma discrepância acentuada nos resultados. Como nesta operação de semi-acabamento, a maquinação é feita com um incremento segundo ZZ's de 24mm, este incremento origina maiores vibrações, com influência mais significativa nas fresas de espaçamento variável.

As fresas 9 e 10 que são semelhantes exceto no ângulo de ataque e saída da aresta de corte, fator que facilita o corte da peça.

4.3.2.3. Momento torçor na operação de acabamento

A Figura 4.7 indica as ferramentas com maiores ou menores momentos torçores durante a operação de acabamento, ou seja com incremento segundo zz de 12mm e uma penetração radial de 0.75mm.

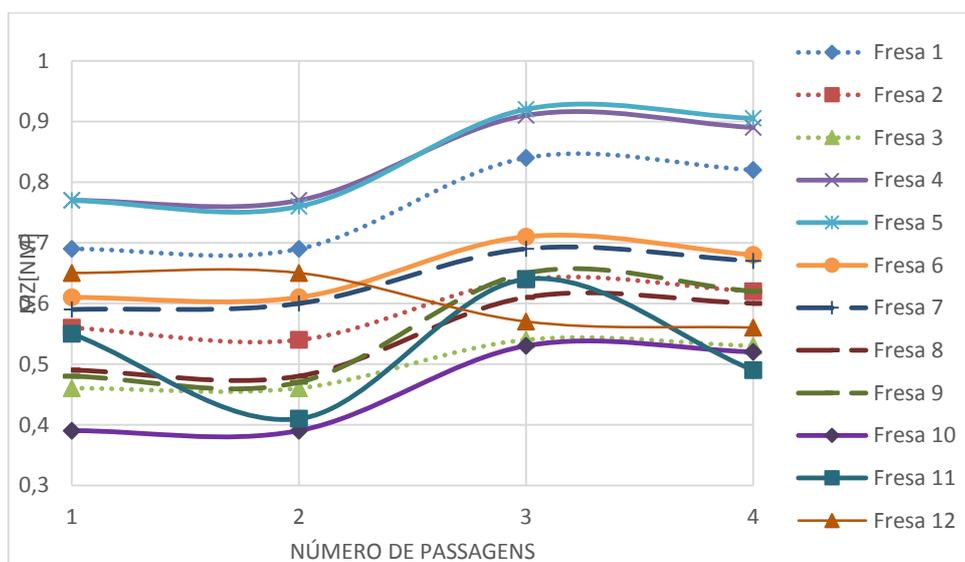


Figura 4.7. Momentos torçores na operação de acabamento.

As fresas 4 e 5 com ângulo de hélice 42° , diferem apenas no raio de canto 0.5 e 1 e têm um número de arestas de corte seis em vez de quatro como às restantes fresas, registaram maiores momentos. Conclui-se, como na operação de semi-acabamento que para um maior número de arestas de corte é necessário maiores momentos torçores.

As fresas 3 e 10 obtiveram menores momentos torçores. Estas fresas diferem uma da outra apenas no espaçamento entre arestas de corte, em que a fresa 3 tem espaçamento fixo e a fresa 10 espaçamento variável.

Os resultados registados na operação de acabamento são em tudo muito idênticos aos obtidos nas operações de desgaste e semi-acabamento.

As fresas com raio de canto igual a 2, fresas 3, 6 e 10, têm os menores valores de M_z ao contrário da fresa 9, também com raio de canto 2 mas com seis arestas de corte. Deste dado conclui-se que o aumento do número de arestas de corte leva a um aumento dos momentos torçores.

4.3.3. Análise dos resultados do dinamómetro

Analisando os diferentes figuras conclui-se que as fresas 1, 4 e 5 são as que envolvem maiores momentos durante as maquinações, a fresa 1 e 4 por terem ambas raio de canto 0.5, ou seja um raio de baixo valor, o que aumenta M_z e a fresa 5 por ter um aumento no número de arestas de quatro para seis arestas de corte.

Na operação de desbaste tanto na análise de F_z como de M_z é perceptível um aumento destes valores ao longo das várias passagens de cada lado do provete, que vão descendo até ao encastramento: tal deve-se ao facto da maquinação ser realizada em alturas diferentes e quanto mais próximo do encastramento maiores são os esforços uma vez há menor flexão do provete. Esta discrepância é mais notória em M_z pois as vibrações do provete provocam uma maior variação nos esforços radiais do que nos esforços axiais.

As passagens 2, 4 e 6 são feitas no lado dois do provete e neste lado apresenta-se uma ligeira diminuição no valor dos esforços e momentos do que os registados nas passagens 1, 3 e 5 feitas na lado 1. Esta diminuição acontece porque o provete é mais fino no lado 2 devido à remoção de material que é feita primeiro no lado 1.

Nas passagens de semi-acabamento os valores do lado 1 não apresentam diferenças significativas dos do lado 2. Esta variação não é muito perceptível porque a maquinação foi realizada apenas com uma passagem de cada lado, com um A_p de 24mm ou seja com a fresa significativamente enterrada no provete.

Nas passagens de acabamento é perceptível um aumento nos esforços das passagens 1 e 2 feitas a 12 mm da parte superior do provete, para as passagens 3 e 4 feitas após os 12mm, ou seja a 24mm.

Como as passagens 3 e 4 são realizadas à cota final das passagens de semi-acabamento os 24mm, o topo da fresa maquina com chão, ou seja fica a cortar também de topo aumentando os esforços e os momentos.

A maquinação destas duas passagens 3 e 4 é mais próxima do encastramento, conseqüentemente é exigido um esforço maior devido à ausência de flexão do provete como a verificada nas passagens 1 e 2.

Generalizando, é possível concluir que o aumento do raio de canto da ferramenta auxilia na obtenção de um melhor acabamento superficial e no desempenho da fresa.

As ferramentas de espaçamento entre arestas de corte variável com a mudança entre si do raio de canto têm um funcionamento mais linear e com alterações menores durante as maquinações do que as fresas com espaçamento entre arestas de corte fixo. Este parâmetro altera significativamente as condições de maquinação.

Conclui-se que para um ângulo de hélice maior as forças F_z são maiores uma vez que o corte se torna mais agressivo.

4.4. Relação entre o binário e o ruído

A Figura 4.8 compara o valor do ruído gerado em função do momento, registrado durante as maquinações.

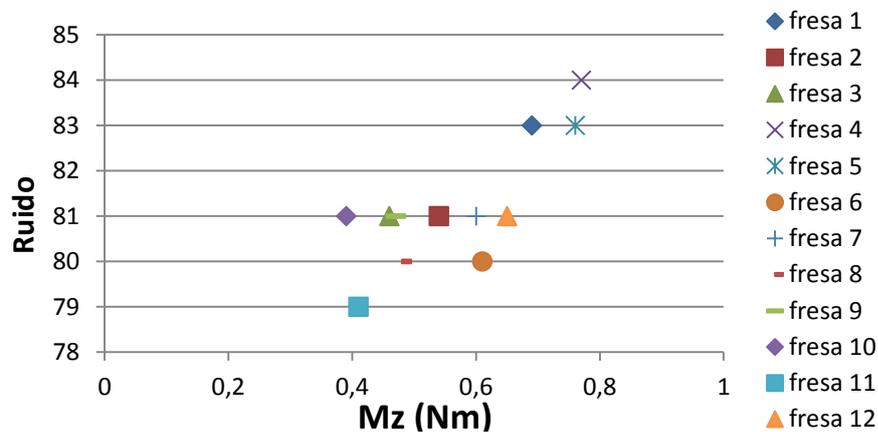


Figura 4.8. Ruído em função do Momento torçor

Ao longo da Figura 4.8 é notório que a variação do momento torçor influencia o ruído registrado na maquinação. Como é perceptível, o momento torçor demonstrou ser maior para valores de ruído superiores, fresas 1, 4 e 5.

As fresas com espaçamento entre arestas de corte variável, fresas 8, 9, 10 e 11, demonstraram requerer menores momentos que as restantes mesmo no caso das fresas 10 e 9 que têm valor de ruído igual às fresas 3, 2, e 12, ambas com espaçamento entre arestas de corte fixo.

As fresas 1 e 4 têm valores de ruído superiores às restantes tendo como semelhança o raio de canto igual a 0,5.

As fresas com seis arestas de corte, fresas 4, 5 têm valores de ruído e momento torçor altos ao contrário da fresa 6 também com seis arestas de corte, que continua a ter valores de momento altos mas valores de ruído baixos. Conclui-se que para fresas de seis arestas é aconselhável utilizar um raio de canto maior que 1mm, uma vez que é o único fator que difere a fresa 6 das fresas 4 e 5.

4.5. Variação da espessura de parede

Os resultados obtidos através da medição da espessura da parede com um micrómetro estão descritos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Medições da espessura da parede com o micrómetro.

Nº Fresa	Medições (mm)		Diferença (mm)	Desvio (mm)
	Medida Superior	Medida Inferior		
1	2.031	1.881	0.15	0.381
2	1.966	1.802	0.164	0.302
3	1.973	1.821	0.152	0.321
4	2.309	2.171	0.138	0.671
5	2.217	2.061	0.156	0.561
6	2.107	1.958	0.149	0.458
7	2.002	1.812	0.19	0.312
8	1.912	1.772	0.14	0.272
9	1.914	1.810	0.104	0.310
10	1.837	1.686	0.151	0.186
11	1.840	1.728	0.112	0.228
12	1.852	1.741	0.111	0.241

Na coluna das medições estão apresentados os valores medidos na parte superior e inferior do provete. Esta medição permite identificar a fresa com maior rigor dimensional na maquinação.

A coluna que menciona a diferença indica-nos a diferença de espessura entre a parte superior e a parte inferior do provete sendo desejável a obtenção de um valor tão pequeno quanto o possível. Na coluna que descreve o desvio indica-se a diferença entre a cota final desejada (1,5mm) e a cota fornecida pela maquinação. Estes dois últimos resultados devem de ser seleccionados face à peça que se pretende produzir e ao rigor dimensional requerido. Em algumas situações a diferença entre a cota superior e inferior pode ser desprezada nomeadamente quando a peça estiver as cotas próximas da cota desejada. Por exemplo, a fresa 9 que tem ângulos de hélice variáveis $40\text{--}42^\circ$ é a que tem menor diferença entre as duas dimensões mas tem um elevado desvio da cota desejada.

Por outro lado, a fresa 10, com as mesmas características mas com maior ângulo de ataque que a fresa 9 é a que tem um desvio menor da cota desejada mas a diferença entre medições é maior que na maioria fresas.

A fresa 11, com ângulos de hélice menores, $35\backslash 38^\circ$, e espaçamento entre arestas de corte variável, têm menor diferença entre a cota superior e a cota inferior. Tal facto deve-se a esta ter um ângulo de hélice baixo, assim como um raio de canto a tender para zero, originando menores esforços durante a maquinação, esforços estes que não obrigam a peça a fletir e a fugir da fresa resultando um corte mais preciso e paralelo com a peça.

Fresas com maior ângulo de hélice (50°) ou seja, fresas 1, 2 e 3, têm maior diferença entre a espessura superior e inferior. Entre as fresas com ângulos de hélice fixos, 1, 2, 3, 4, 5, e 6 revela-se um aumento da diferença das espessuras superior e inferior com o aumento do raio de canto.

Fresas 4, 5 e 6 com seis arestas de corte, revelam num maior desvio da cota final desejada, devido ao facto de que com mais arestas, exercerem maiores esforços durante a maquinação afastando assim a peça da fresa.

As ferramentas com espaçamento entre arestas de corte variável, fresas 7, 8, 9, 10 e 11 são mais eficazes no corte devido à sua excentricidade que ajuda na penetração da ferramenta com a peça.

As fresas 9 e 10 são semelhantes, ângulo de hélice variável $40\backslash 42^\circ$, Rc 2, distância entre aresta igual, exceto no ângulo de ataque: a fresa 10 tem maior ângulo de ataque, e conseqüentemente o espaço de saída da aparta torna-se maior facilitando assim a saída desta, daí a fresa 10 ter resultados de desvio da cota final inferiores à fresa 9.

A diferença do ângulo de ataque ajuda na penetração da ferramenta com a peça facilitando assim o corte removendo o material necessário para chegar à cota final desejada.

As fresas 4, 5 e 6 têm maior número de arestas, e provocam um menor volume de material extraído, isto porque o espaço entre arestas diminui, dificultando a saída da aparta resultante. Este constrangimento da saída da aparta origina mais esforços durante a maquinação obrigando ao afastamento da peça em vez do corte desta.

Segundo a norma DIN4760 (1982), este conjunto de parâmetros observados ao longo da utilização das várias ferramentas provocam então o desvio da cota final.

Verifica-se uma diferença entre as duas espessuras, devido essencialmente ao facto da parede fletir enquanto ocorre a maquinação. Na parte superior da peça a espessura difere em maior valor da cota desejada, para qualquer uma das fresas, veja-se Tabela 4.2. Tal sugere, uma vez mais a flexão do provete.

A flexão do provete na parte superior é maior, uma vez que este oferece menor resistência à força exercida pela maquinação, o que origina um afastamento da peça relativamente à fresa, ao contrário da parte inferior que está próxima da zona de encastramento que restringe o movimento de flexão.

Com base nestas informações, conclui-se que a relação usada $1/8$ foi excessiva demonstrando forças excessivas para a maquinação: este fator originou numa parede com maior espessura do que a desejada para todas as ferramentas utilizadas assim como diferenças entre a espessura superior e inferior.

4.6. Relação entre o momento torçor e o desvio

A Figura 4.9 indica a relação entre o momento torçor medido em cada fresa e o desvio da cota final da peça.

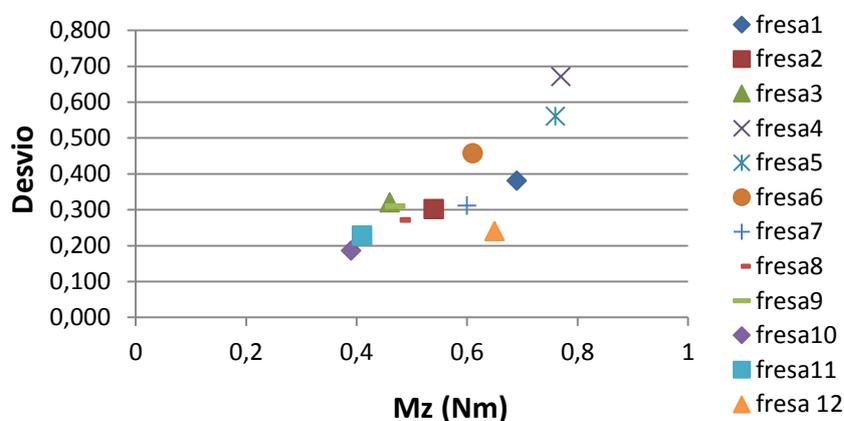


Figura 4.9. Desvio em função do momento torçor.

A Figura 4.9 mostra que com o aumento do momento torçor a parede tende a ficar mais distante da cota final desejada. Este facto deve-se essencialmente à flexão da peça, que para maiores valores de momento têm maior tendência a fletir, impedindo a obtenção da cota desejada. Conclui-se portanto que as fresas 4, 5 e 6, com seis arestas de corte ocasionam maiores binários e maiores desvios nas cotas finais, As fresas 10 e 11, que têm maior ângulo de ataque, ocasionam os menores binários e desvios.

4.7. Rugosímetro

Na Figura 4.10 apresenta-se a comparação de rugosidade entre os dois lados do provete.

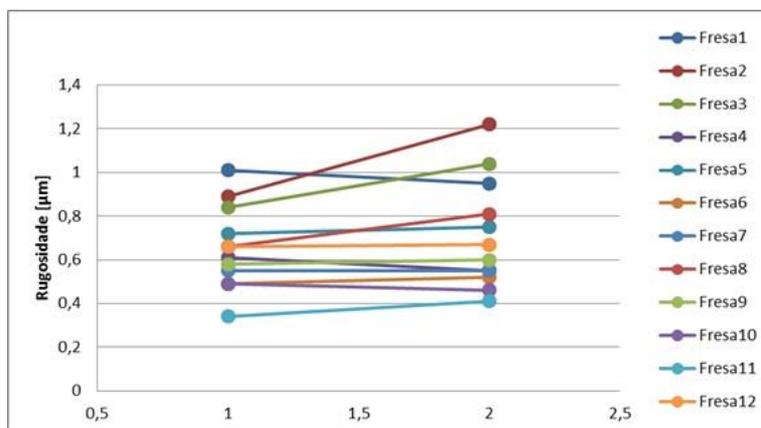


Figura 4.10. Rugosidade das superfícies no lado 1 e 2 do provete.

No ponto 1 (eixo dos XX's), o valor da rugosidade do lado 1 e no ponto 2 os valores da rugosidade do lado 2 do provete.

A fresa 11 com ângulos de hélice 35\38°, raio de canto a tender para zero e espaçamento entre arestas de corte variável tem menor valor de rugosidade e as fresas 1 e 2 ambas com ângulo de hélice 50°, raio de canto 0.5 e 1 e espaçamento entre arestas de corte fixo têm maior rugosidade, uma no lado 1 e outra no lado 2 do provete.

Para a análise dos dados da Figura 4.10 apresentam-se os mesmos dados na Tabela 4.3, que indica os valores de Ra obtidos pelo rugosímetro.

Tabela 4.3. Valores de Ra medidos pelo rugosímetro de *Perthen*.

	Rugosidade [µm]	
	Frente (1)	Verso (2)
Fresa1	1.01	0.95
Fresa2	0.89	1.22
Fresa3	0.84	1.04
Fresa4	0.61	0.55
Fresa5	0.72	0.75
Fresa6	0.49	0.52
Fresa7	0.55	0.55
Fresa8	0.66	0.81
Fresa9	0.58	0.6
Fresa10	0.49	0.46
Fresa11	0.34	0.41
Fresa12	0.66	0.67

Analisando a Figura 4.10 e a Tabela 4.3 observa-se que as fresas com ângulo de hélice de 50° , fresas 1, 2 e 3, têm pior valor de Ra uma vez que necessitam de maiores esforços o que origina vibrações durante o corte e prejudicam o acabamento superficial (Boothroyd, 1985).

A fresa 11 com ângulos de hélice $35/38^\circ$ obteve valores de esforços menores o que origina menores vibrações e um corte mais linear, diminuindo o valor de Ra.

Nas fresas com o mesmo ângulo de hélice a de raio de canto 1 obtém piores resultados que as restantes. Para fresas com raio de canto 0.5, fresas 1, 4 e 7, o lado 1 do provete tem melhores valores de Ra que o lado 2. O contrário verifica-se com as fresas de raio de canto 1 e 2. Conclui-se que a existência de vibrações da parede da peça após esta se encontrar mais fina, lado 2, não está diretamente relacionada com o mau acabamento superficial como está mencionado na norma DIN4760 (1982).

As fresas 10 e 11 apresentam menores valores de Ra uma vez que são resultantes de uma maquinação com menor ruído, mais uniforme e com menores vibrações ao longo dos vários resultados. Ambas têm um espaçamento entre arestas de corte variável. Este espaçamento ajuda no corte da peça e varia os modos de vibração, tornando a maquinação mais eficaz.

4.8. Relação do momento torçor com a rugosidade

A Figura 4.11 mostra a relação entre o valor do momento torçor registado e a rugosidade Ra das superfícies finais.

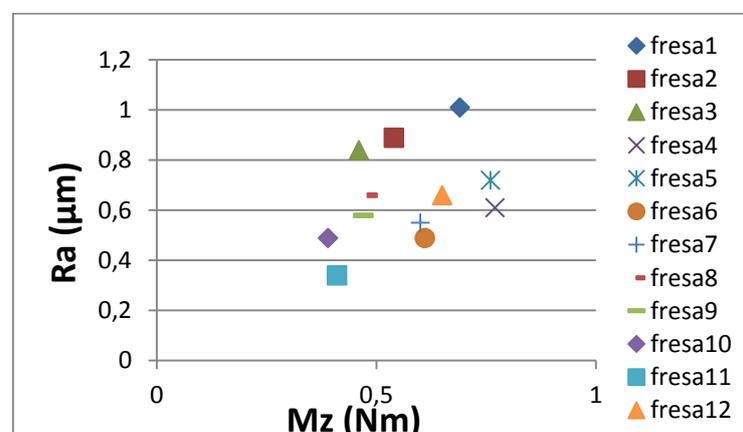


Figura 4.11. Ra em função do momento torçor.

Os valores escolhidos para a Figura 4.11 são da operação de acabamento. Em primeira análise conclui-se que o valor da rugosidade é influenciado pelo momento registado que, como observado no subcapítulo 4.4, um momento torçor elevado provoca maior ruído, ruído esse proveniente de vibrações sentidas durante a maquinação, as quais influenciam a qualidade da superfície maquinada. Estas observações estão de acordo com os resultados de Palanisamy (2007), que refere que para menor momento torçor tem-se um menor valor de Ra.

Ferramentas com espaçamento entre arestas de corte variável, fresas 7, 8, 9, 10 e 11 têm menores valores de Ra. Este facto deve-se essencialmente às vibrações sentidas durante a maquinação, que no caso destas fresas são menores.

As fresas 1, 2 e 3, com quatro arestas de corte, ângulo de hélice 50° e espaçamento entre arestas de corte fixo, como já observado, proporcionam maior rugosidade.

4.9. Microscópio

A Figura 4.12 apresenta a fotografia da superfície da peça retirada pelo microscópio representada pela faixa a vermelho da Figura 3.18.

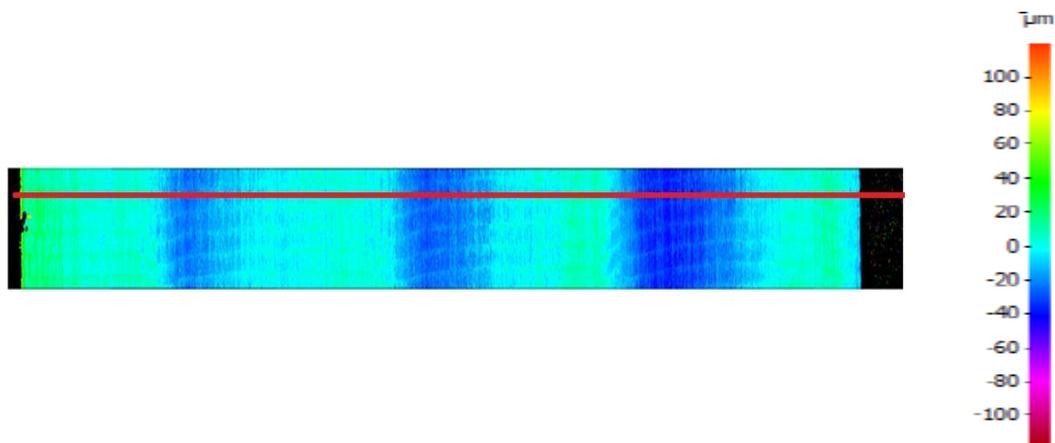


Figura 4.12. Imagem da foto no microscópio *Alicona*.

A imagem foi tratada pelo *software* do microscópio, transformando as irregularidades da superfície num degradê de cores.

O *software* estabelece um plano médio e a partir desse plano, representado a azul claro, relaciona os picos, a verde e os vales a azul-escuro. Os picos e vales para maiores ou menores dimensões sofrem alteração de cor conforme a escala apresentada à direita da Figura 4.12.

Na Figura 4.13 descreve o perfil de uma secção da superfície e é uma funcionalidade do microscópio.

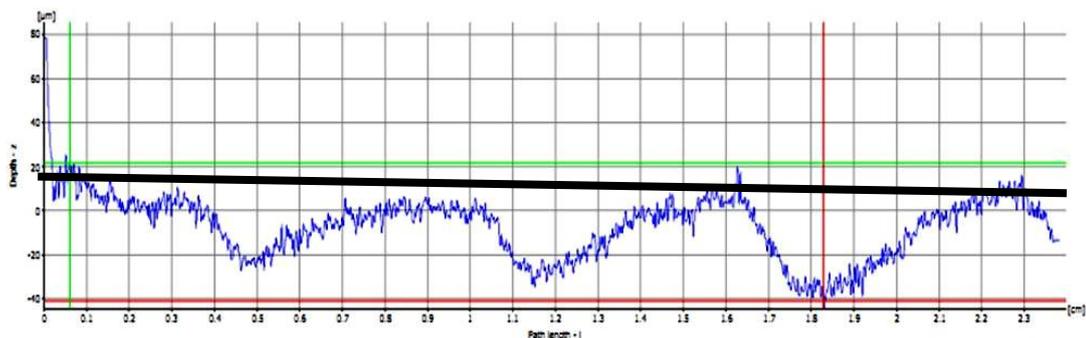


Figura 4.13. Perfil da secção selecionada.

As Figura 4.12 e a Figura 4.13 são ambas, o resultado da análise feita ao provete maquinado pela fresa 1. Os restantes encontram-se no Anexo C.

Esse perfil reflete a imagem de topo de um corte feito na superfície. No caso desta amostra a imagem é da secção que está a vermelho na Figura 4.12.

Na Figura 4.13 a azul representa-se uma cópia do perfil da secção, onde é possível visualizar os picos e vales com maiores dimensões, os mesmos que no degradê de cores ou seja defeito superficial e visualizar também a rugosidade Ra dessas imperfeições.

O microscópio permite ainda medir a diferença entre dois pontos, linhas a verde e a vermelho. Na Figura 4.13 selecionou-se o pico maior e o vale menor com o intuito de observar a diferença entre eles.

Traçando uma linha a preto, do primeiro ao último pico é visível a existência do desnível já antes mencionado no subcapítulo 3.9.3 entre a parte superior e inferior do provete, valores visíveis na Tabela 4.4 e graficamente na Figura 4.14.

Tabela 4.4. Diferença entre picos do perfil.

Avaliação da irregularidade da superfície ΔZ [μm]	
Fresa1	62.7
Fresa2	56.3
Fresa3	45.5
Fresa4	36.9
Fresa5	52.3
Fresa6	29.9
Fresa7	63.2
Fresa8	27.2
Fresa9	53.0
Fresa10	39.1
Fresa11	23.0
Fresa12	51.7

**Figura 4.14.** Diferença entre picos e vales do perfil.

Gráficamente é mais perceptível avaliar a diferença entre as várias superfícies maquinadas. A fresa 11 deixou defeitos menores na maquinação do provete e as fresas 1 e 7 defeitos mais acentuados. Estas fresas diferem essencialmente no número de aresta de corte em que um maior número leva a um melhor acabamento superficial.

Para maiores ângulos de hélice, fresas 1, 2 e 3 com 50° de ângulo de hélice, a existência de picos e vales é maior: ângulos de hélice maiores levam a um entorro da fresa na peça deixando marcas mais evidentes.

Para as ferramentas com seis arestas de corte, fresas 4, 5 e 6, R_t tem menores valores, uma vez que os picos e vales são disfarçados por haver um maior número de arestas de corte a passar numa dada secção, o mesmopico ou vale é cortado por mais que uma aresta de corte, resultando numa superfície mais homogénea.

O mesmo fator pode ser observado pela fresa 11 igualmente com seis arestas de corte. Além dessa vantagem, a fresa 11 tem menores ângulos de hélice $35\backslash 38^\circ$ que favorecem o acabamento superficial. Como tem espaçamento entre arestas de corte variável, a passagem da fresa na peça é incerto e variado, aumentando o número de arestas de corte a passar numa dada secção. Esta fresa como já foi observado corta melhor deixando assim um corte mais regular e uma superfície com maior qualidade.

Entre a fresa 9 e 10, fresas com o mesmo ângulo de hélice, raio de canto e espaçamento entre hélices é notável melhor valor de R_t para a fresa 10: deve-se ao facto desta ter um ângulo de ataque superior à fresa 9 o que ajuda no corte e facilita a saída da aparas uma vez que esta tem mais garganta.

4.10. Rugosidade total R_t em função de M_z

A Figura 4.15 apresenta a relação entre o valor da rugosidade R_t , rugosidade dada por picos e vales e os valores do momento torçor ocasionado por cada ferramenta (Palanisamy, 2007).

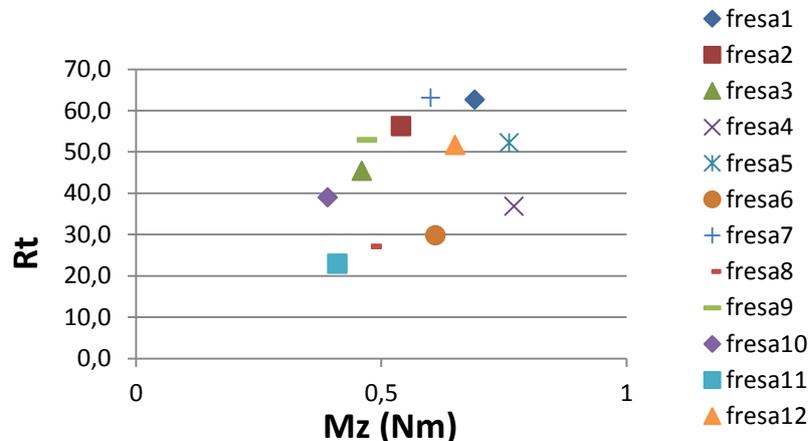


Figura 4.15. Relação entr o binário e a rugosidade R_t .

A Figura 4.15 mostra que R_t aumenta com o binário, contudo observa-se que para o mesmo valor de binário se obtêm diversos valores de R_t , o que sugere que diversos factores geométricos devem influenciar R_t .

O raio de canto influência o valor de R_t e o momento torçor, como é perceptível nas fresas 1, 2 e 3 que são semelhantes entre si exceto no raio de canto; com o aumento deste é necessário menor valor do momento e resulta menor R_t .

4.11. Aspeto final das ferramentas

A análise pós-maquinação é recomendada e um dos métodos que ajudam a estudar a maquinabilidade de um dado material. Face ao desgaste que a ferramenta possa ter sofrido, tem-se ideia se a ferramenta é adequada à tarefa. Na Figura 4.16 representam-se exemplos de ferramentas e seus desgastes.

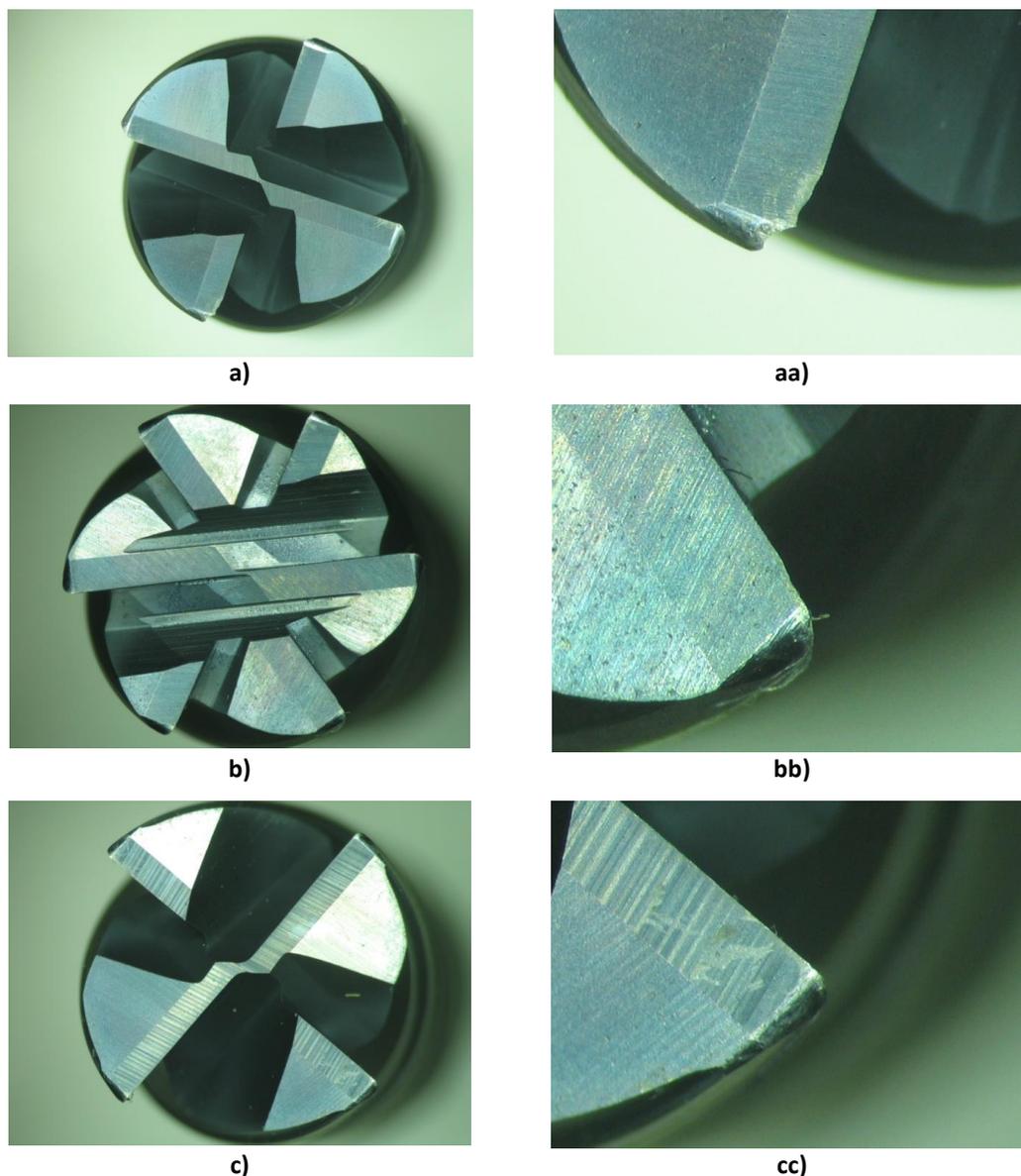


Figura 4.16. Fresas com raio 0.5 no final da maquinação: a) Fresa 1; b) Fresa 4; c) Fresa 7; aa) desgaste da fresa1; bb) desgaste da fresa4; cc) desgaste da fresa7.

As fresas da Figura 4.16 têm raio de canto 0.5. Estas fresas apresentam um desgaste mais acentuado que as restantes fresas. Nas restantes fresas o desgaste não se considera significativo, comprovando que o raio de 0.5 não é ideal para maquinação da liga de titânio Ti6Al4V.

A última fresa, Figura 4.16 c) difere das primeiras, tem espaçamento entre arestas de corte variável. Tal permite concluir que ferramentas de ângulo variável, fresas 7, 8, 9, 10 e 11, têm melhor desempenho na maquinação do titânio.

As fresas 4, 5 e 6, têm maior resistência ao desgaste uma vez que têm seis arestas de corte e este aumento do número de arestas de corte torna a fresa mais resistente e compacta. O aspecto do desgaste é importante pois Che-Haron et Jawaid (2005) mostraram que para maquinações da liga Ti6Al4V, ocorrem maiores deformações plásticas na superfície do material quando maquinado com ferramentas em fim de vida.

No Anexo D apresentam-se as restantes fresas utilizadas nas maquinações.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

A análise da influência da geometria das ferramentas no processo de maquinação por fresagem de paredes finas da liga Ti6Al4V foi o objeto de estudo. As características definidas para o sistema de fixação da ferramenta e da peça à máquina mostraram-se adequadas e capazes de satisfazer os requisitos da maquinação.

Através dos resultados obtidos no estudo retiram-se as seguintes conclusões:

- Para fresas com espaçamento entre arestas de corte fixo, o aumento do número de arestas de corte da ferramenta aumenta o ruído e o momento torçor necessário durante a maquinação, conforme os resultados das fresas 4, 5 e 6, e fresas com espaçamento entre arestas de corte variável, fresas 7, 8, 9, 10 e 11, produzem menor ruído que origina menores vibrações, resultando um melhor acabamento superficial e rigor dimensional;
- O aumento do raio de canto da ferramenta, em ferramentas idênticas, oferece menores esforços, menor ruído e melhor acabamento superficial; exemplo disso são as fresas 1, 4 e 7, com raio de canto de 0.5mm, que não se mostraram apropriadas para a maquinação da liga.
- As ferramentas com maior ângulo de ataque e saída, ferramentas 10 e 11, proporcionaram melhor precisão dimensional;
- Quanto maior o ângulo de hélice, para igual número de dentes, maior a força no eixo dos $z\text{'s}$ e maior a ondulação registada na superfície maquinada; ao contrário, a fresa 11, tem menor valor de ângulo de hélice e obteve menores esforços e um melhor acabamento superficial.

A estratégia de maquinação não se mostrou adequada, resultando no final da maquinação paredes de maior espessura do que a desejada.

Pelo presente estudo conclui-se que a eficiência de maquinação da liga Ti6Al4V pode ser maximizada pela utilização de ferramentas com ângulo de ataque superiores a 6° , ferramentas de quatro arestas, com espaçamento entre aresta de corte variável, ângulo de hélice maior e raio de canto de 1 a 2 mm, em operações de desbaste. Ferramentas de seis arestas, com ângulo de ataque superior a 6° , espaçamento entre arestas de corte variável e ângulo de hélice menor que 40° são recomendáveis para operações de acabamento.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Seleção de novas geometrias para completar os testes feitos de modo a conseguir identificar a influência concreta de cada parâmetro e não de um modo abstrato como foi feito.

Utilizar fresas com parâmetros diferentes para a operação de desbaste do que para operação de acabamento

Durante a maquinação realizar uma análise às vibrações que se fazem sentir entre a fresa e a peça.

Uma recolha mais cuidada da apara resultante, nomeadamente recolher no final de cada operação seria o mais apropriado com o intuito de se conseguir analisar a apara.

Comparar os resultados obtidos com os admissíveis na indústria aeronáutica visto ser o principal consumidor desta liga e deste tipo de maquinações que envolvem paredes finas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Boothroyd, G. (1985), "Surface roughness", Fundamentals of metal machining and machine tool, ed. Scripta Book Company, Washington D.C., USA.
- Budak, E. (1996), "Prediction of Milling Force Coefficients from Orthogonal Cutting Data", Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering.
- Castanho, J. M.; Vieira, M. T. (2003), "Effect of ductile layers in mechanical behavior of TiAlN thin coatings", Journal of Materials Processing Technology.
- Chiffre, L., Lonardo, P., Trumpold, H., Lucca, D. A., Goch, G., Brown, C. A., Raja, J. e Hansen, H. N. (2000), "Quantitative characterization of surface texture", Annals of the CIRO.
- CIMM, Material Didático: Usinagem, Fluidos de Corte e Meio Ambiente, Acedido em 13 de Setembro de 2013, <http://www.cimm.com>.
- Completo, A., Festas, A., Davim, J. P. (2009), "Tecnologia de fabrico", Publindústria.
- Correia, E. A., Davim, J. P. (2006), "Efeito da lubrificação mínima (MQL - minimal quantity of lubricant) na maquinação de uma liga de alumínio", Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões.
- Davim, J. P. (2008), "Machining: fundamentals and recent advances", Springer-Verlag, London.
- Dearnley, P. A., Grearson, A. N. (1986), Mater. Sci. Technol. 2.
- DIN 4760 (1982), "Gestaltabweichungen technischer Oberflächen".
- Diniz, A. E. (2001). "Tecnologia da Usinagem dos Materiais", 3ªed., Artliber Editora, São Paulo.
- Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, Nivaldo L., (1999), "Tecnologia da Usinagem dos Materiais", MM Editora, São Paulo.
- Donache, M. J. (1988), "Titanium – A Technical Guide", ASM International.
- Ferraresi, D. (1970), "Fundamentos de usinagem dos metais", 1ª ed., Editora Edgard Blüncher Ltda, São Paulo.
- Gomes, J. O. (2001), "Fabricação de superfícies de forma livre por fresamento no aço temperado ABNT420, na liga de alumínio AMP8000 e na liga de cobre Cu-Be", Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Groover M. P. (2001), "Fundamentals of Modern Manufacturing-Materials", 2 ed., IE-WILEY, Prentice-Hall.
- Hong, S., Markus, I. e Jeong, W. (2001), "New Cooling Approach and Tool Life Improvement in Cryogenic Machining of Titanium Alloy Ti-6Al-4V", International Journal of Machine Tools & Manufacture.

- Jasinevicius, R. G. (1994), “Caracterização da usinabilidade de ultraprecisão em ligas de alumínio fabricadas no Brasil”, Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Jawahir, I. S. e Luttermelt, C. A. (1993), “Recent developments in chip control research and applications”, *Annals of the CIRP*.
- Kalpakjian, S. (2009), “Manufacturing Processes For Engineering Materials”, 4ª ed., Pearson Education.
- Kalss, W., Reiter, A., Derflinger, V., Gey, C. e Endrino, J.L. (2006), “Modern coatings in high performance cutting applications”, *Int. J. Refract, Metals Hard Mater*.
- Komanduri, R. (1982), “Some clarifications on the mechanics of chip formation when machining titanium alloys”, *Wear*.
- Komanduri, R. e Turkovich, B. F., (1981), “New observations on the mechanism of chip formation when machining titanium alloys”. *Wear*, v.69, n. 2.
- Krar, P., Gill, A. e Smid, P. (2001), “CNC Simplified”, Industrial Press Inc.
- Machado, A. e Wallbank, J. (1990), “Machining of Titanium and Its Alloys - a review”, *Processing of the institution of mechanical engineering*.
- Metals Handbook (1989), Machining, Ed. 9, ASME International.
- Nabhani, F. (2001), “Machining of aerospace titanium alloys”. *Robots and computer integrated manufacturing*.
- Narutaki, N. & Murakoshi, A. (1983), “Study on Machining of Titanium”, *Annals of the Cirp*.
- Palanisamy, S., Dargusch, M. S., McDonald S.D. e StJohn D.H. (2007), “The Influence of Process Parameters during Machining of Ti6Al4V Alloy”, School of Engineering, The University of Queensland, St. Lucia, Queensland, Australia.
- Polmear, L. J. (1989), “Light Alloy”, Edward Arnold Publisher, London.
- Rahman, M., Wong, Y. S. e Zareena, A. R. (2003), “Machinability of titanium alloys”, *JSME International Journal*.
- Ramesh, S., Karunamoorthy, L. e Palanikumar, K. (2008) “Fuzzy Modeling and Analysis of Machining Parameters in Machining Titanium Alloy”, *Materials and Manufacturing Processes*.
- Relvas, C. (2002), “Controlo Numérico Computorizado – Conceitos Fundamentais”. Publindustria.
- Sandvik Coromant (1994), “Milling, In: Modern Metal Cutting”, 1ª English ed., Tofters Tryckery AB, Suíça.
- Sandvik Coromant. Acedido em 17 de Agosto de 2013, em <http://www.sandvik.coromant.com/>.
- Schulz, H., Würz, T., Bohner, S. (2001), “O balanceamento adequado das ferramentas. Máquinas e Metais”.
- Shashidhara, Y.M., Jayaram, S.R. (2010), “Vegetable oils as a potential cutting fluid-an evolution”, *Tribol. Int.* 43.

- Sheikh-Ahmad, J. e Bailey, J. A. (1997), “Flow instability in the machining of Cp titanium”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*.
- Smith, S. e Tlustý, J. (1990), “Update on High Speed Dynamics”, *Transactions of the ASME*.
- Smith, W. F. (1981), “Structure of Engineering Alloys”, McGraw-Hill publisher, New York.
- Souza, G., Gomes, J. e Schroeter, R. (2007), “Influência do tipo de interpolação na vida da ferramenta de corte no fresamento de acabamento de superfícies complexas em TiAl6V4”, 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica.
- Taylor Hobson Precision (2000), “The parameter tree of surface roughness”, Taylor Hobson Centre of Excellence. Acedido em 03 de Outubro de 2013 em www.taylorhobson.com.
- Trent, E. M. (1984), *Metal cutting*, 2ª ed., Edition Butterworths.
- Wang, S. H. (2000), “Investigation into the grinding of Titanium alloys”, PhD Tesis, Cranfield Institute of Technology, School of Industrial and Manufacturing Science.
- Wolfe, G. J., Petrosky, C. J. e Quinto, D. T. (1986), *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*.
- Zatarain, M., Muñoa, J., Peigné, G. e Insperger, T. (2006), “Analysis of the Influence of Mill Helix Angle on Chatter Stability”, *CIRP Annals –Manufacturing Technology*.

ANEXO A

Microestrutura analisada

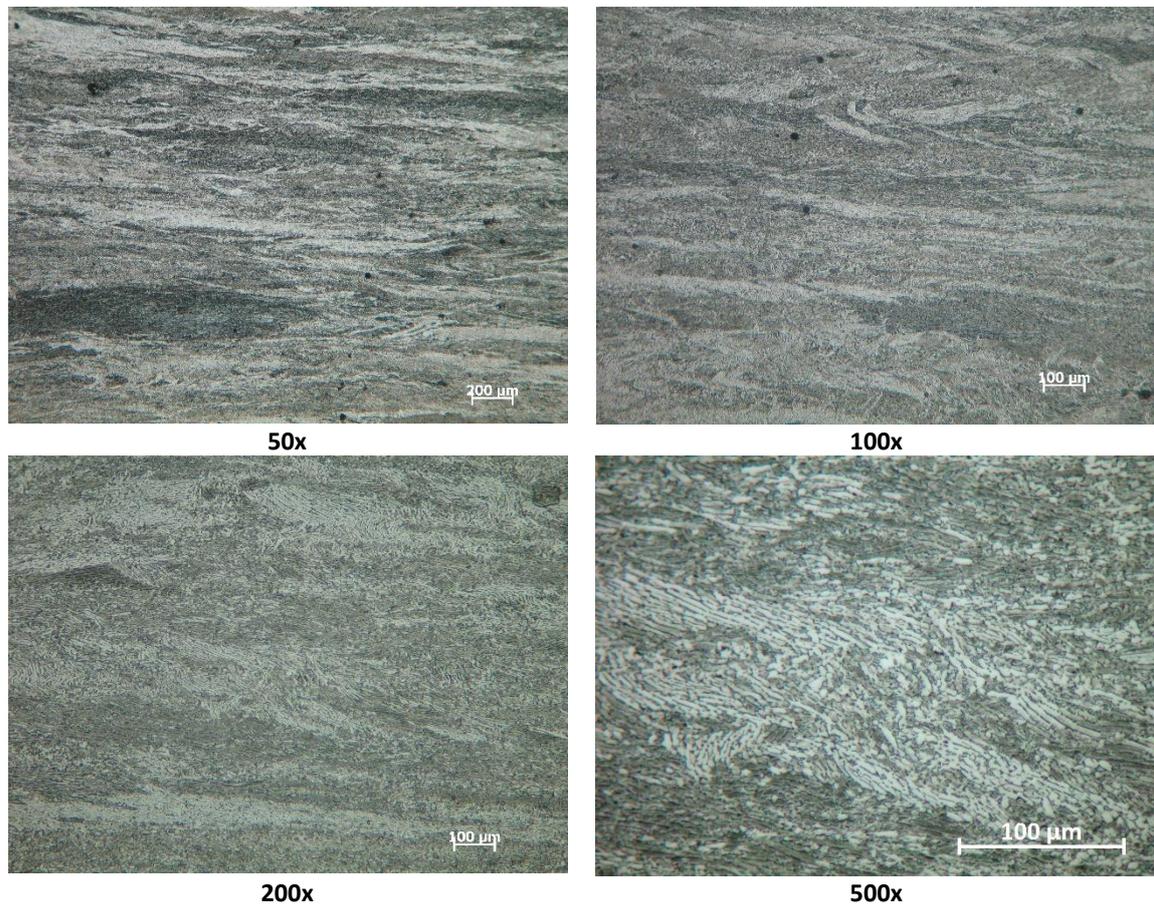
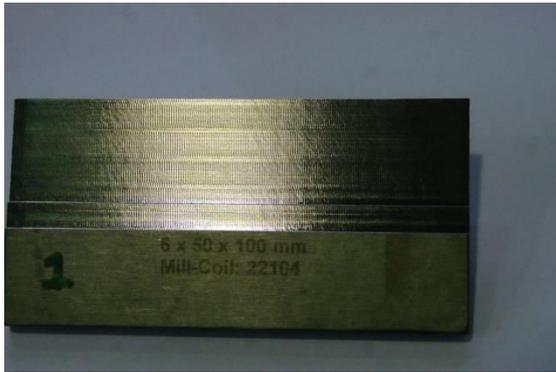


Figura A.1. Imagem da microestrutura do material com várias ampliações.

ANEXO B

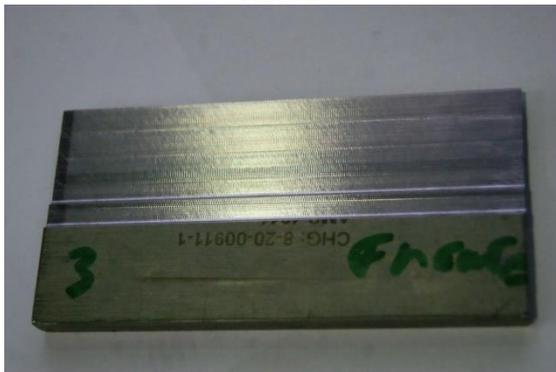
Superfícies maquinadas



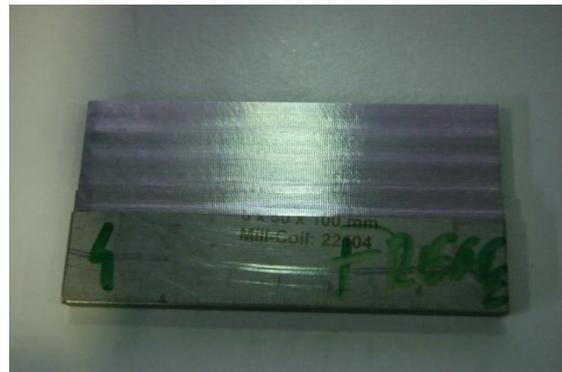
Fresa 1



Fresa 2



Fresa 3



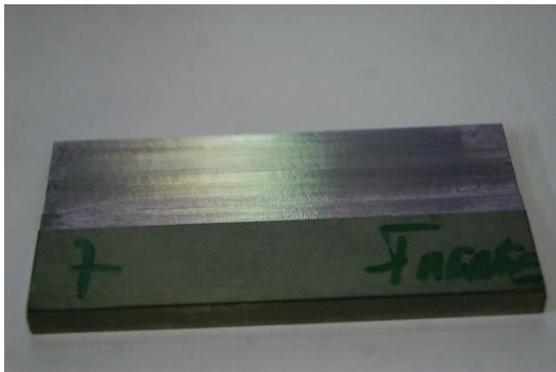
Fresa 4



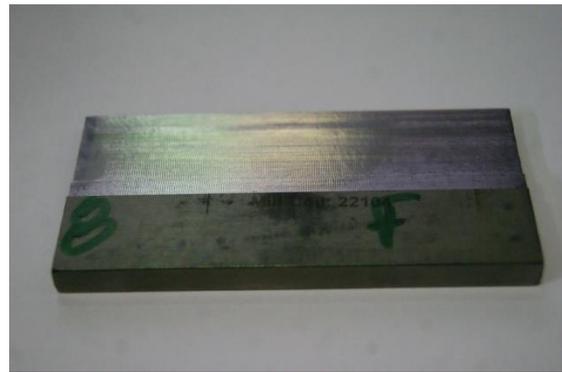
Fresa 5



Fresa 6



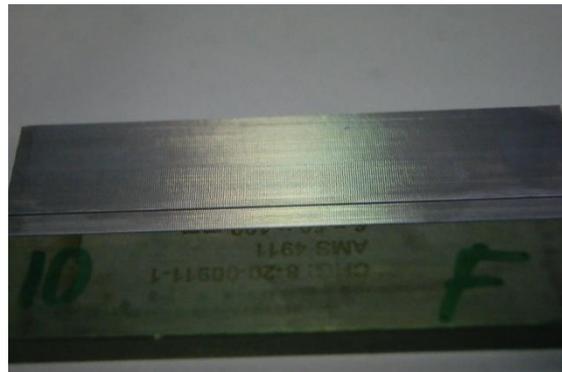
Fresa 7



Fresa 8



Fresa 9



Fresa 10



Fresa 11

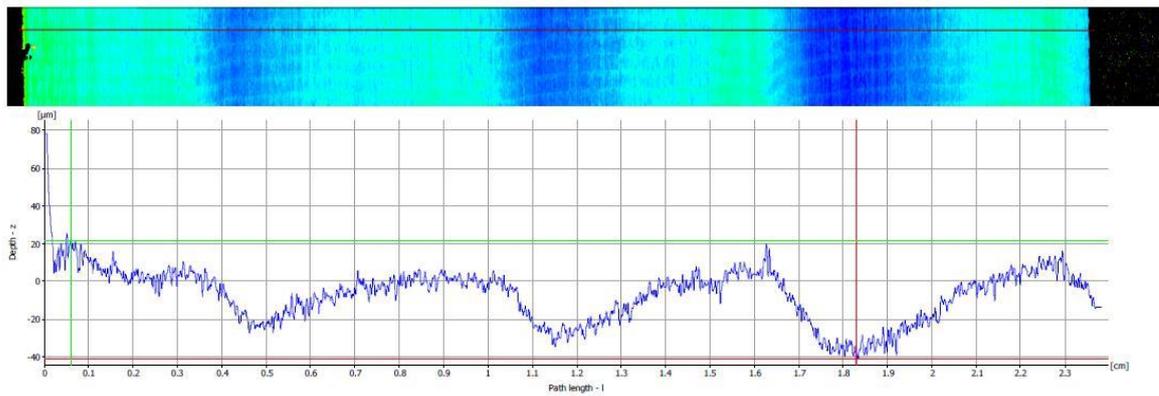


Fresa 12

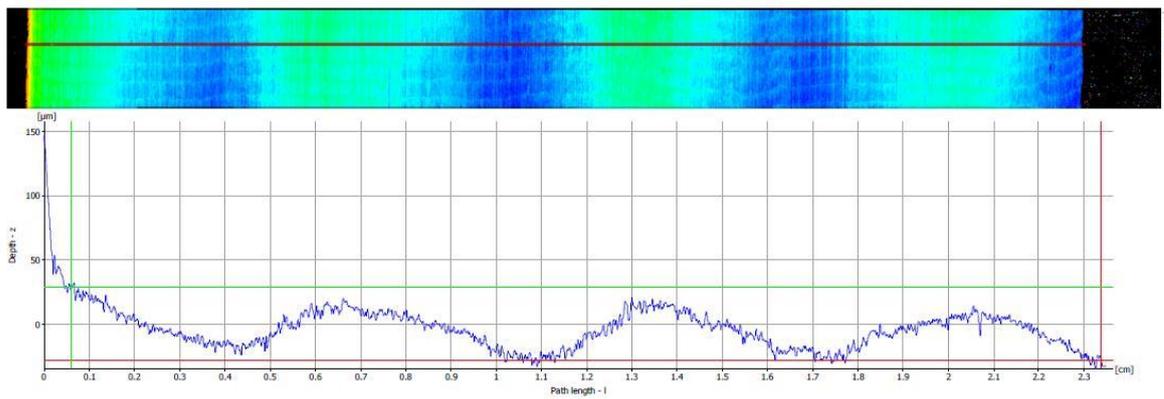
Figura B.1. Provetes maquinados pelas várias fresas.

ANEXO C

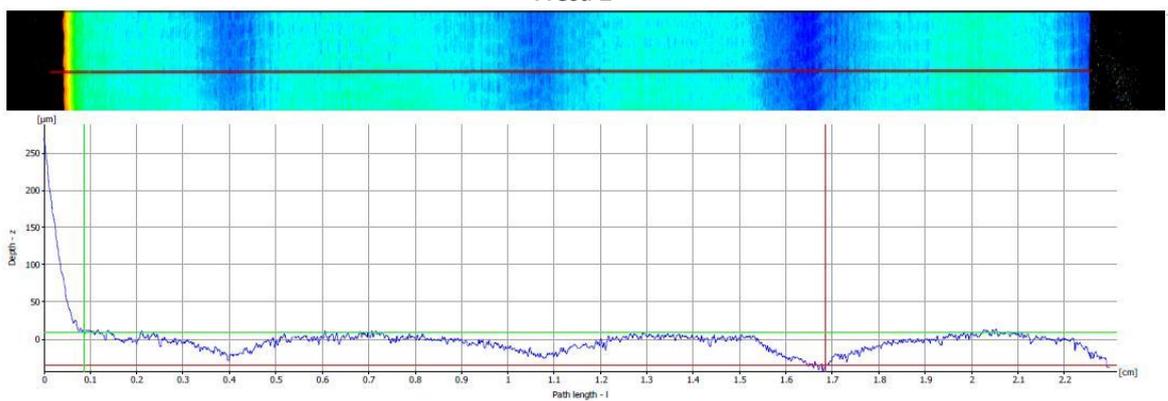
Resultados microscópio Alicona



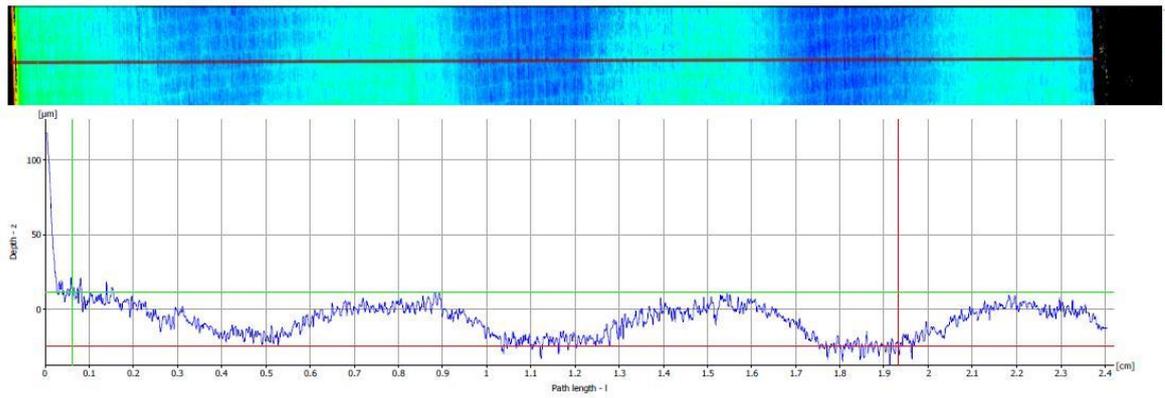
Fresa 1



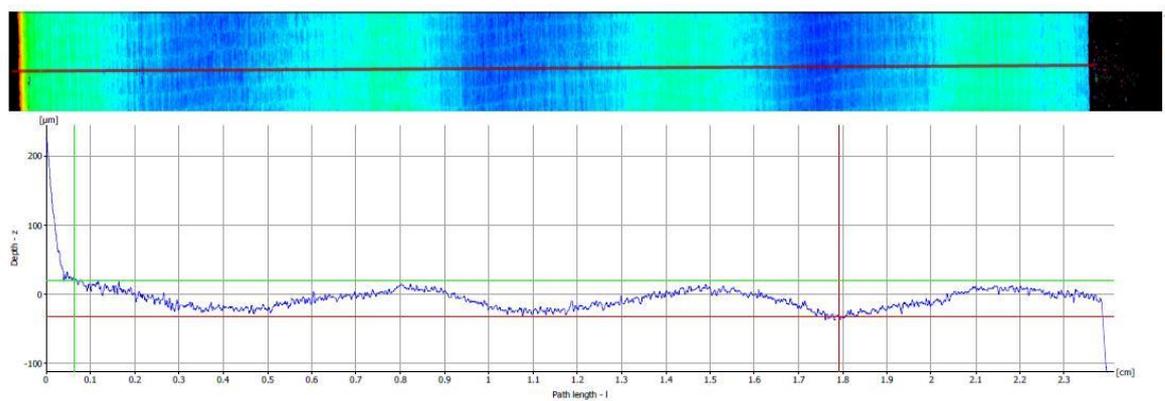
Fresa 2



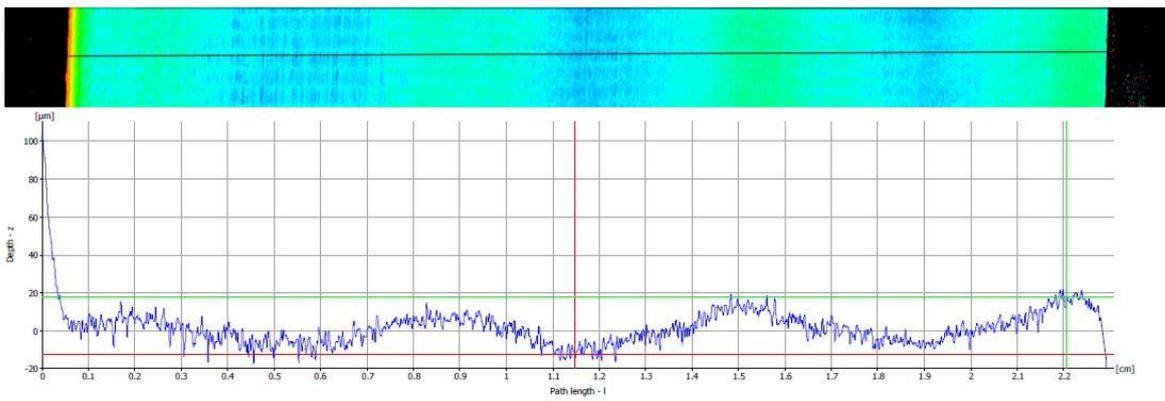
Fresa 3



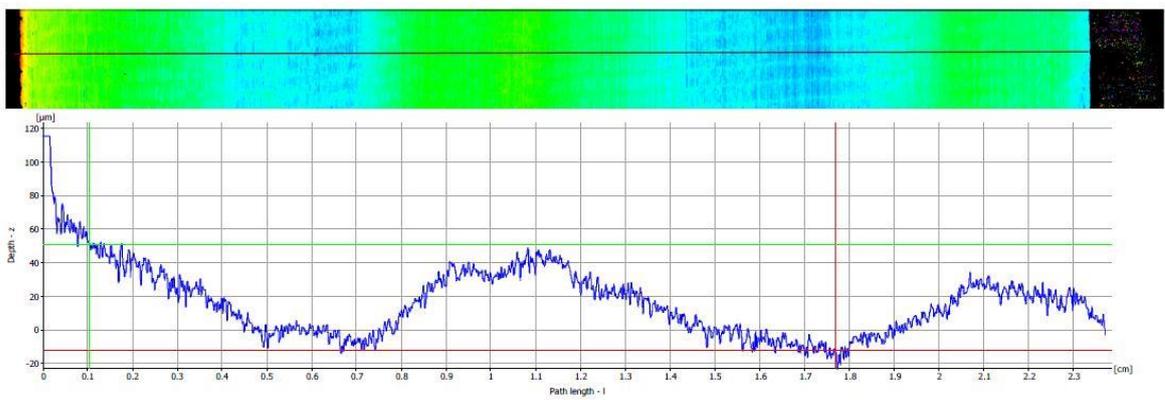
Fresa 4



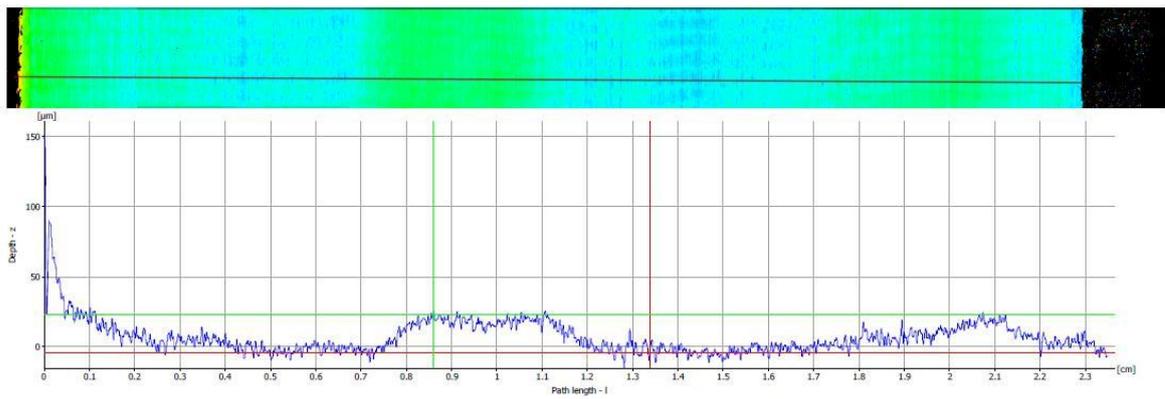
Fresa 5



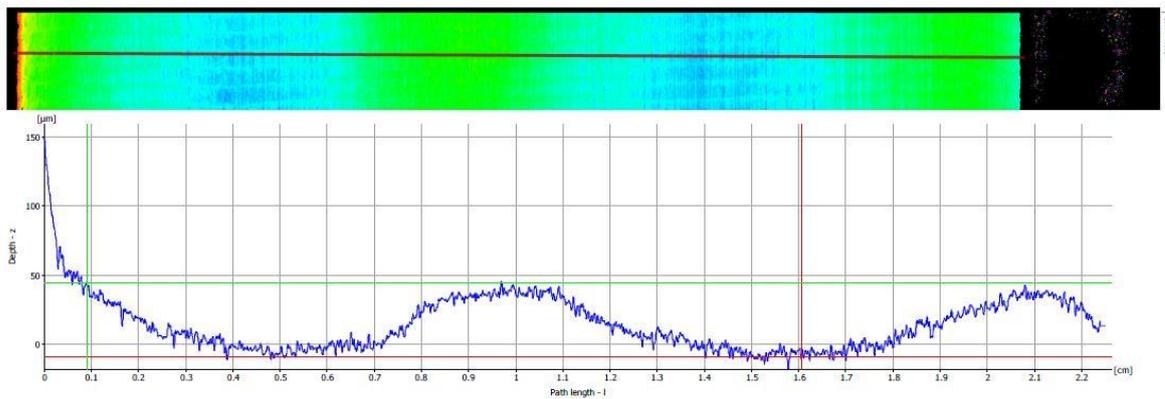
Fresa 6



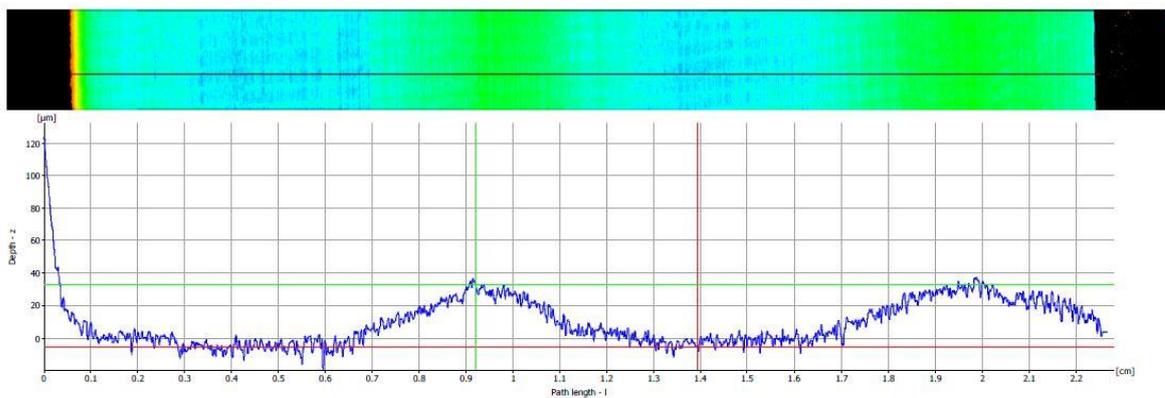
Fresa 7



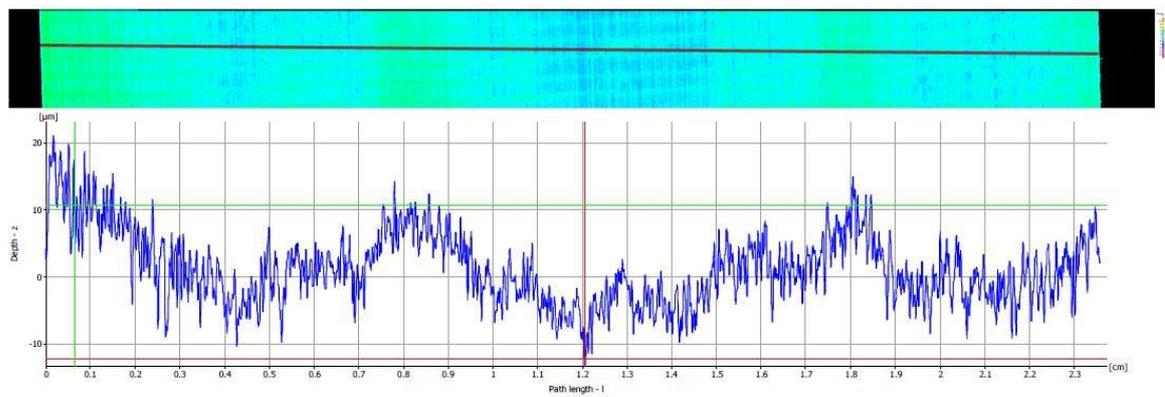
Fresa 8



Fresa 9



Fresa 10



Fresa 11

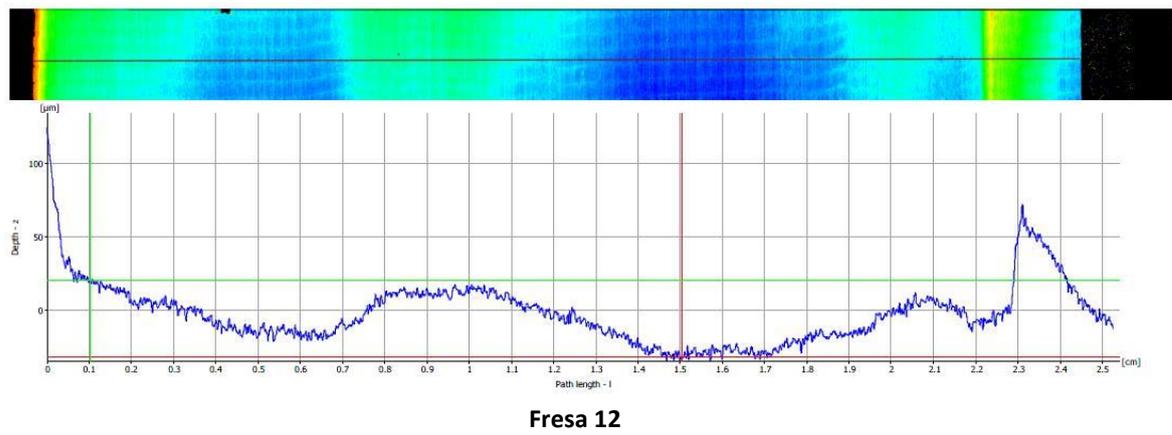
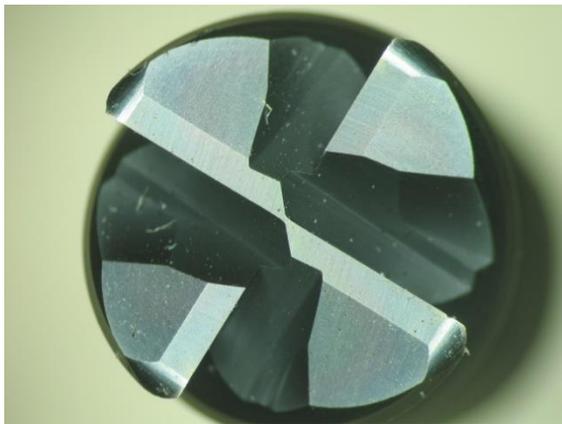


Figura C.1. Resultados do microscópio *Alicona* para as várias fresas.

ANEXO D

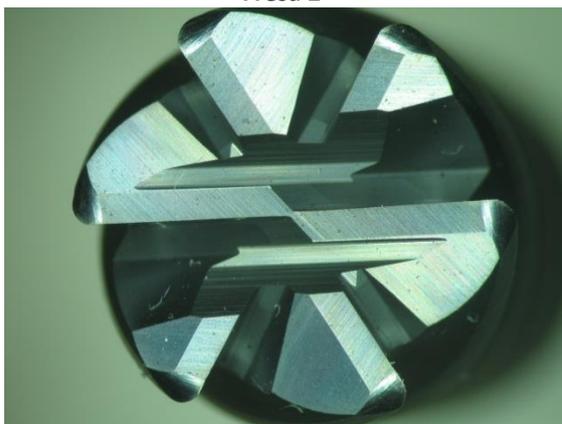
Ferramentas após maquinações



Fresa 2



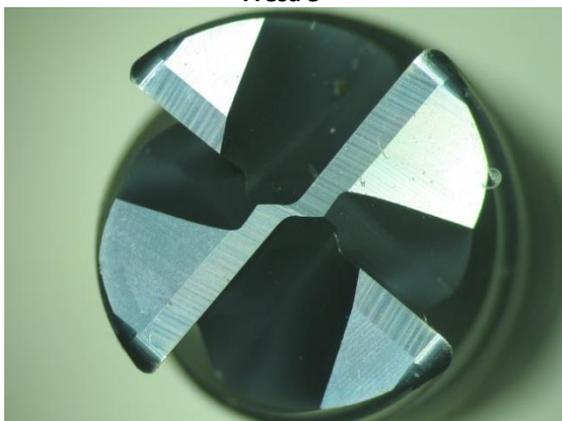
Fresa 3



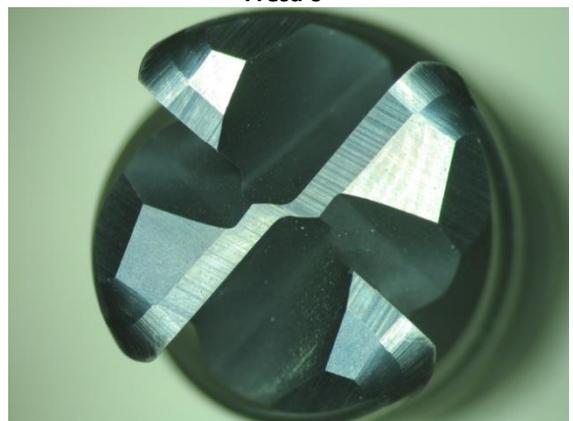
Fresa 5



Fresa 6



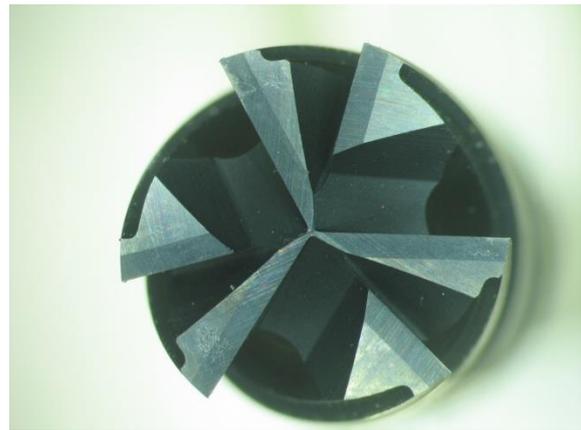
Fresa 8



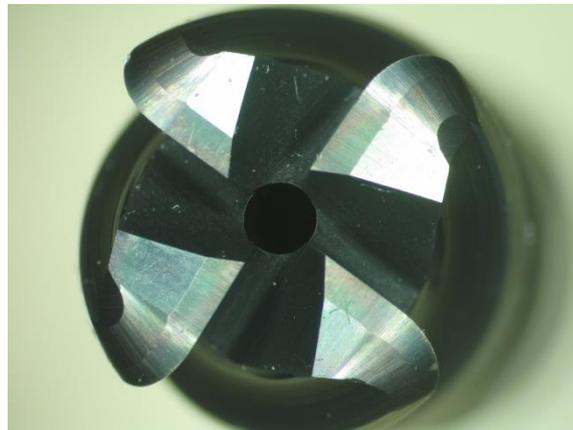
Fresa 9



Fresa 10



Fresa 11



Fresa 12

Figura D.1. Imagem de topo das fresas após as maquinações.