



Instituto Superior de Engenharia

Politécnico de Coimbra

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075. Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica

Especialização em Construção e Manutenção de Equipamentos
Mecânicos

Autor

Luís Henrique Fonseca Pardal

Orientador

Prof. Doutor Fernando António Gaspar Simões

Co-Orientadores

Prof. Doutora Patrícia Sofia Simões Santos

Prof. Doutor Pedro Miguel Soares Ferreira



INSTITUTO POLITÉCNICO
DE COIMBRA

INSTITUTO SUPERIOR
DE ENGENHARIA
DE COIMBRA

Coimbra, dezembro de 2023

RESUMO

O trabalho aqui apresentado teve como objetivo de estudar estratégias de maquinagem com fresas integrais de topo plano revestidas a diboreto de titânio na maquinagem de ligas de alumínio AW 7075 – T6, usando várias técnicas como a avaliação do desgaste através de microscopia, a análise de vibrações, a análise do acabamento superficial e a análise dimensional.

Inicialmente, começou-se por introduzir o tema e enunciar os objetivos do presente trabalho, bem como o mesmo se apresenta estruturado. Posteriormente, foi preciso fazer um enquadramento teórico do já existente na literatura que se achou pertinente para o desenvolvimento do trabalho. Foram apresentados a seguir os equipamentos que foram necessários e aplicados para a realização do trabalho experimental, assim como uma explicação sucinta dos mesmos e também os métodos experimentais associados. Na parte do trabalho desenvolvido foram seguidos dois rumos. Primeiramente, seguiu-se no sentido de avaliar o comportamento da ferramenta nas estratégias de maquinagem de corte lateral e de rampas de blocos e chapas de alumínio 7075 – T6, respetivamente, com o objetivo de avaliar o desgaste da ferramenta, as vibrações desenvolvidas durante a maquinagem e o acabamento superficial do material maquinado, para um certo tipo de parâmetros definidos. O segundo grande trabalho desenvolvido foi o de avaliar o comportamento destas ferramentas na estratégia de maquinagem de paredes finas, não focando no desgaste das mesmas, mas sim no limite ótimo de paredes finas para duas geometrias, para um certo grupo de parâmetros definidos. Por fim, foram tecidas as considerações globais sobre todo o trabalho desenvolvido, bem como algumas orientações para trabalhos futuros que possam complementar o que foi desenvolvido.

Palavras – Chave: Fresagem de Al 7075 – T6; Fresa revestida a TiB₂; Desgaste; Vibrações; Rugosidade; Toleranciamento dimensional

ASBTRACT

The objective of this work described was to study machining strategies with integral flat endmills coated with titanium diboride in the machining of AW 7075 – T6 aluminum alloys, using various techniques such as wear evaluation through microscopy, vibration analysis, surface finish analysis and dimensional analysis.

Initially, the theme was introduced, and the objectives of the work were stated, as well as how the work is structured. Subsequently, it was necessary to make a theoretical framework of what already existed in the literature that was found to be relevant for the development of the work. The equipment that was needed and applied to carry out the experimental work was listed below, as well as a brief explanation of the same and the experimental methods related. In the part of the work developed, two directions were followed. Firstly, to evaluate the behavior of the tool in the strategies of lateral milling and milling of ramps of blocks and plates of 7075 – T6 aluminum respectively, with the objective of evaluating the tool wear, the vibrations associated with the machining and the surface finish of the material machined, for a certain type of defined parameters. The second major work carried out was to evaluate the behavior of these tools in the strategy of cutting thin walls, not focusing on their wear, but on the optimal limit of thin walls for two geometries, for a certain group of defined parameters. Finally, global considerations were made about all the work carried out, as well as some guidelines for future work that could complement what was developed.

KeyWords: Al 7075 – T6 milling; TiB₂ coated endmill; Wear; Vibrations; Roughness; Dimensional tolerance

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e à minha avó.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de deixar aqui o meu agradecimento a todas as pessoas que contribuíram para o presente trabalho e no percurso que culminou no mesmo.

Ao Senhor Professor Doutor Fernando Simões, meu orientador, por toda a orientação, motivação e ajuda prestada para o possível desenvolvimento e conclusão do trabalho, por todas as discussões e partilha de opiniões pertinentes, disponibilidade e dedicação ao meu percurso.

À Senhora Professora Doutora Patrícia Santos, minha co-orientadora, por toda a ajuda prestada no desenvolvimento do trabalho e partilha de opiniões, em particular na área das vibrações e na programação.

Ao Senhor Professor Doutor Pedro Ferreira, meu co-orientador, pela partilha de opiniões no âmbito e fora do trabalho, discussões e disponibilidade permanente para a ajuda no trabalho experimental e outras situações.

Ao Senhor Professor Paulo Amaro, pela ajuda cedida para o trabalho experimental.

Ao meu colega Dinis Caeiro, o qual esteve presente em grande parte do desenvolvimento deste trabalho por toda a partilha de ideias.

Ao Senhor Professor Vítor Maranha, pela ajuda na aquisição de dados, sem a qual não era possível o desenvolvimento do trabalho.

Ao Senhor Professor Doutor Luis Roseiro, pela disponibilização de muitos dos equipamentos necessários à aquisição dos dados experimentais.

Na impossibilidade de citar todos, aos meus colegas e professores do meu percurso de Engenharia Mecânica.

À empresa Palbit[®], pela colaboração na investigação que deu origem a este trabalho e pelo fornecimento do material imprescindível ao mesmo. Dentro da empresa um agradecimento especial ao Daniel Figueiredo e ao João Marouvo, pelo contínuo acompanhamento do trabalho e discussões dos resultados obtidos.

A todos os meus amigos pelo contínuo apoio na minha jornada e motivação para a conclusão da mesma e pelos momentos de amizade e diversão.

À minha namorada, Daniela Silva, por todo o apoio nesta caminhada, o qual foi determinante nos momentos de maior desânimo para a continuação da mesma, bem como pelo apoio incondicional nos mais diversos aspetos da minha vida.

À minha família, por todo o apoio na minha vida, em particular aos meus pais, Luís Pardal e Carla Fonseca, pelos valores que me transmitiram e que fazem de mim a pessoa que sou hoje.

A todos, o meu mais sincero obrigado.

ÍNDICE

| | |
|--|------|
| Resumo | i |
| Asbtract..... | ii |
| Dedicatória | iii |
| Agradecimentos | iv |
| Índice..... | v |
| Índice de Figuras | viii |
| Índice de Tabelas | xiii |
| Lista de Abreviaturas..... | xv |
| Lista de Símbolos..... | xvii |
| 1 – Introdução | 1 |
| 1.1 – Objetivos..... | 2 |
| 1.2 – Estrutura da Dissertação..... | 3 |
| 2 – Enquadramento do Trabalho Experimental e Revisão Bibliográfica | 5 |
| 2.1 – Caracterização e Classificação de Ligas de Alumínio | 5 |
| 2.2 – Maquinagem / Corte por Arranque de Apara | 12 |
| 2.2.1 – Estratégias de Maquinagem: Corte Lateral, Corte de Rampas e Corte de Paredes Finas..... | 14 |
| 2.2.2 – Maquinagem de Ligas de Alumínio | 18 |
| 2.3 – Desgaste e Vida das Ferramentas | 23 |
| 2.4 – Conceitos da Análise de Vibrações..... | 27 |
| 2.4.1 – Parâmetros de Avaliação da Vibração | 30 |
| 2.4.2 – Análise do Sinal no Domínio do Tempo e no Domínio da Frequência..... | 32 |
| 2.4.3 – Frequência Usada na Aquisição do Sinal de Vibração | 35 |
| 3 – Equipamentos e Métodos Experimentais | 37 |
| 3.1 – Centro de Maquinagem..... | 37 |
| 3.2 – Ferramenta de Corte e Sistema de Fixação | 38 |
| 3.3 – Equipamentos de Aquisição de Dados de Vibração | 41 |
| 3.4 – Equipamento para Avaliação da Rugosidade | 48 |
| 3.5 – Equipamento de Microscopia Ótica..... | 50 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.6 | – Equipamento de Microscopia Eletrónica de Varrimento..... | 51 |
| 4 | – Trabalho Experimental Desenvolvido..... | 54 |
| 4.1 | – Sistema de Aquisição e Processamento de Vibrações..... | 54 |
| 4.1.1 | – Aplicação em LabVIEW® | 54 |
| 4.1.2 | – Aplicação em MATLAB® | 58 |
| 4.2 | – Ensaios de Corte Lateral..... | 61 |
| 4.2.1 | – Materiais, Ferramentas e Procedimento..... | 61 |
| 4.2.2 | – Parâmetros de Corte..... | 64 |
| 4.2.3 | – Desgaste das Ferramentas..... | 65 |
| 4.2.4 | – Análise de Vibrações..... | 70 |
| 4.2.5 | – Rugosidade..... | 75 |
| 4.3 | – Ensaios de Corte em Rampa..... | 77 |
| 4.3.1 | – Materiais, Ferramentas e Procedimento..... | 77 |
| 4.3.2 | – Parâmetros de Corte..... | 79 |
| 4.3.3 | – Desgaste das Ferramentas..... | 80 |
| 4.3.4 | – Análise de Vibrações..... | 83 |
| 4.3.5 | – Rugosidade..... | 87 |
| 4.4 | – Ensaios de Corte de Paredes Finas..... | 91 |
| 4.4.1 | – Materiais, Ferramentas e Procedimento..... | 91 |
| 4.4.2 | – Parâmetros de corte..... | 94 |
| 4.4.3 | – Análise de Vibrações..... | 95 |
| 4.4.4 | – Estabilidade Dimensional..... | 98 |
| 4.4.5 | – Rugosidade..... | 104 |
| 5 | – Conclusões e Trabalhos Futuros..... | 106 |
| 5.1 | – Conclusões Globais..... | 106 |
| 5.2 | – Trabalhos Futuros..... | 108 |
| | Referências..... | 109 |
| | Apêndices..... | 114 |
| | Apêndice A – Características de Algumas Janelas Usadas na FFT..... | 115 |
| | Apêndice B – Características dos Equipamentos Usados no Trabalho Experimental..... | 116 |
| | Apêndice C – Programação das Aplicações em LabVIEW®..... | 119 |
| | Apêndice D – Programação da Aplicação em MATLAB®..... | 120 |

*Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075.
Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem*

Apêndice E – Tabelas das Medições de Espessuras e Rugosidades das Paredes
Finas147

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 – Produção de alumínio primário mundialmente (International Aluminium , 2023)..... | 6 |
| Figura 2.2 – Evolução da resistência mecânica de uma liga de Al em função do tempo de envelhecimento a uma temperatura fixa (Radutoiu, Alexis, Lacroix, & Petit, 2012). | 9 |
| Figura 2.3 – Maquinagem lateral (Sandvik, Coromant, 2023)..... | 15 |
| Figura 2.4 – Maquinagem de rampas: a) rampa linear. b) rampa circular (Sandvik, Coromant, 2023)..... | 15 |
| Figura 2.5 – Estratégia de maquinagem de paredes finas com relação altura/espessura da parede até 15:1 (Sandvik, Coromant, 2023)..... | 16 |
| Figura 2.6 – Estratégia de maquinagem de paredes finas com relação altura/espessura da parede entre 15:1 e 30:1: a) estratégia <i>waterline</i> ; b) estratégia de passes apoiados (Sandvik, Coromant, 2023)..... | 17 |
| Figura 2.7 – Estratégia de maquinagem de paredes finas de relação >30:1. (Sandvik, Coromant, 2023)..... | 17 |
| Figura 2.8 – Tipos de desgaste: a) representação esquemática do desgaste; b) desgaste de flanco; c) desgaste de cratera (Groover, 2010). | 24 |
| Figura 2.9 – Ondas sinusoidais de diferentes características..... | 29 |
| Figura 2.10 – Amplitude de vibração em função da frequência para o deslocamento, velocidade e aceleração (Girdhar, 2004). | 31 |
| Figura 2.11 – Espectro de vibração: a) domínio do tempo e da frequência; b) domínio do tempo; c) domínio da frequência (Girdhar, 2004). | 33 |
| Figura 2.12 – Dispersão espectral na FFT (Pérez, E.T, 2015)..... | 34 |
| Figura 2.13 – Janela Hann na FFT (Girdhar, 2004)..... | 34 |
| Figura 2.14 – Aquisição do sinal: a) sinal real; b) sinal captado a baixa frequência; c) sinal captado pelo teorema de Nyquist (Pérez, E.T, 2015). | 36 |
| Figura 3.1 – Fresadora vertical de 5 eixos Haas UMC 750SS (Haas, 2023)..... | 38 |
| Figura 3.2 – Fresa de topo plano usada nos trabalhos experimentais. | 38 |
| Figura 3.3 – Nomenclatura de uma fresa integral de topo plano (Mitsubishi Materials, 2023)..... | 39 |
| Figura 3.4 – Sistema de fixação: a) cone térmico; b) desenho técnico do cone térmico (Kemmler, 2023)..... | 40 |

*Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075.
Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem*

| | |
|--|----|
| Figura 3.5 – Acelerómetro triaxial 356B08, montado no <i>spindle</i> da máquina..... | 41 |
| Figura 3.6 – Limites de frequência de um acelerómetro (Brüel & Kjaer, 2023)..... | 43 |
| Figura 3.7 – Influência da montagem na frequência de ressonância (PCB Piezotronics)..... | 44 |
| Figura 3.8 – Esquema da variação da sensibilidade em função da temperatura do acelerómetro (PCB Piezotronics). | 45 |
| Figura 3.9 – <i>Shaker</i> : a) sem acelerómetro; b) com acelerómetro. | 46 |
| Figura 3.10 – Aplicação em LabVIEW® para calibração do acelerómetro (eixo X a vermelho, eixo Y a amarelo e eixo Z a branco)..... | 46 |
| Figura 3.11 – Componentes de aquisição de dados: a) placa de aquisição; b) chassi; c) montagem da placa e do chassi. | 47 |
| Figura 3.12 – Rugosímetro SJ 201P, na medição das rugosidades laterais de um bloco de Al 7075 – T6. | 48 |
| Figura 3.13 – Calibração do rugosímetro: a) material de rugosidade padrão. b) Ra antes da calibração; c) processo de calibração; d) Ra após a calibração. | 49 |
| Figura 3.14 – Equipamento de avaliação visual do desgaste: a) microscópico ótico; b) <i>software</i> de aquisição de imagens (Marouvo, 2022)..... | 50 |
| Figura 3.15 – Equipamento MEV disponível no IPN..... | 51 |
| Figura 3.16 – Interação dos elétrons com a amostra (Dedavid, Gomes , & Machado , 2007)..... | 52 |
| Figura 4.1 – Interface de aquisição de dados: a) bloco de programação <i>DAQ – Assistant</i> ; b) parâmetros a configurar no bloco <i>DAQ – Assistant</i> | 55 |
| Figura 4.2 – Interface de representação gráfica do sinal no domínio do tempo. | 56 |
| Figura 4.3 – Interface de representação gráfica do sinal no domínio da frequência. | 56 |
| Figura 4.4 – Opções da aplicação: a) opções gerais; b) filtro <i>lowpass</i> ; c) opção de guardar dados. | 57 |
| Figura 4.5 – Representação gráfica de dados no domínio do tempo..... | 59 |
| Figura 4.6 – Representação gráfica de dados no domínio da frequência. | 59 |
| Figura 4.7 – Opções da aplicação: a) parâmetros da FFT; b) escolha da unidade de amplitude; c) opções para a filtragem; d) guardar dados. | 60 |
| Figura 4.8 – Opção de remoção de frequências: a) valores das frequências a remover; b) tabela com intervalo de frequências removidas. | 61 |
| Figura 4.9 – Ferramenta e bloco usados: a) montagem cone e ferramenta; b) bloco fixado à mesa da máquina..... | 62 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.10 – Tipos de refrigeração: a) refrigeração interna por fluido de corte; b) refrigeração externa por ar comprimido..... | 63 |
| Figura 4.11 – Ciclo usado em ambos os ensaios de corte lateral..... | 63 |
| Figura 4.12 – Evolução do bloco ao longo da maquinagem..... | 64 |
| Figura 4.13 – Representação esquemática de cada ciclo de corte e tempos e distâncias associados. | 65 |
| Figura 4.14 – Desgaste no gume de corte mais afetado (fluido de corte). Ampliação de 20X..... | 66 |
| Figura 4.15 – Desgaste dos gumes de corte (fluido de corte): a) aresta de corte mais desgastada; b) marca de compressão da apara na superfície de ataque. Ampliação de 50X. | 66 |
| Figura 4.16 – Desgaste no gume de corte mais afetado (ar comprimido). Ampliação de 20X..... | 66 |
| Figura 4.17 – Desgaste no gume de corte mais afetado (ar comprimido). Ampliação de 50X..... | 67 |
| Figura 4.18 – Orientação das ferramentas para a incidência do feixe de elétrons na análise no MEV. | 68 |
| Figura 4.19 – Detalhe da aresta de corte de uma ferramenta antes de ser utilizada: a) ampliação de 125X; b) ampliação de 635X; c) ampliação de 3000X. | 68 |
| Figura 4.20 – Detalhe da aresta de corte da ferramenta utilizada no corte lateral com ar comprimido: a) ampliação de 60X; b) ampliação de 500X; c) ampliação de 1000X. | 69 |
| Figura 4.21 – Espectro EDS obtido em área na superfície da ferramenta nova. | 69 |
| Figura 4.22 – Picos característicos da refrigeração interna representados no domínio da frequência: a) eixo X; b) eixo Y; c) eixo Z; d) Resultante..... | 71 |
| Figura 4.23 – Evolução do valor de RMS ao longo do corte. | 73 |
| Figura 4.24 – Zonas de medição de rugosidade. | 75 |
| Figura 4.25 – Sistema de fixação das placas à mesa. | 77 |
| Figura 4.26 – Desfasamento das rampas produzidas nas faces da placa de alumínio: a) rampas de 1° de inclinação; b) rampas de 2° e 3° de inclinação. | 78 |
| Figura 4.27 – Ciclo usado nos ensaios de corte em rampas..... | 78 |
| Figura 4.28 – Evolução das rampas. | 79 |
| Figura 4.29 – Desgaste de topo na fresa usada nas rampas com 3° de inclinação. Ampliação de 50X. | 81 |

*Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075.
Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem*

| | |
|--|----|
| Figura 4.30 – Morfologia da aresta da ferramenta utilizada no corte em rampa com 3° de inclinação: a) canal de escoamento da apara e desgaste de flanco da aresta de corte – ampliação de 74X; b) topo da ferramenta – ampliação de 1500X..... | 82 |
| Figura 4.31 – Espectro EDS obtido em área no topo da ferramenta que efetuou o corte em rampa com 3° de inclinação..... | 82 |
| Figura 4.32 – Espectro de vibração durante a maquinagem da última rampa com 1° de inclinação (domínio do tempo): a) eixo X; b) eixo Y; c) eixo Z; d) Resultante.. | 83 |
| Figura 4.33 – Evolução da resultante da vibração ao longo da rampa de 1° de inclinação..... | 84 |
| Figura 4.34 – Evolução da resultante da vibração ao longo da rampa de 2° de inclinação..... | 84 |
| Figura 4.35 – Evolução da resultante da vibração ao longo da rampa de 3° de inclinação..... | 85 |
| Figura 4.36 – Amplitude resultante no domínio da frequência no corte de rampas: a) 1° de inclinação; b) 2° de inclinação; c) 3° de inclinação..... | 86 |
| Figura 4.37 – Análise do corte em rampa: a) esquema de maquinagem de uma rampa; b) marcas da apara na parede lateral do corte discordante..... | 87 |
| Figura 4.38 – Marcas da ferramenta na base das rampas de 3° de inclinação, sendo mais acentuada nas rampas produzidas na zona central..... | 89 |
| Figura 4.39 – Estratégia de maquinagem adotada para paredes finas: a) passes sucessivos; b) remoção de material..... | 91 |
| Figura 4.40 – Geometrias de paredes finas adotadas: a) reta; b) curva..... | 92 |
| Figura 4.41 – Sistema de fixação da placa e da ferramenta..... | 92 |
| Figura 4.42 – Ciclo usado na maquinagem das paredes finas: a) geometria reta; b) geometria curva..... | 93 |
| Figura 4.43 – Evolução da espessura das paredes ao longo do corte: a) geometria reta; b) geometria curva..... | 93 |
| Figura 4.44 – Sequência de operações de redução de espessura da parede maquinada..... | 95 |
| Figura 4.45 – Espectro de vibração em paredes de geometria reta no domínio do tempo: a) parede de maior espessura; b) parede de menor espessura..... | 96 |
| Figura 4.46 – Espectro de vibração em paredes de geometria curva no domínio do tempo: a) parede de maior espessura; b) parede de menor espessura..... | 96 |
| Figura 4.47 – Espectro de vibração em paredes de geometria reta no domínio da frequência: a) parede de maior espessura; b) parede de menor espessura..... | 97 |
| Figura 4.48 – Espectro de vibração em paredes de geometria curva no domínio da frequência: a) parede de maior espessura; b) parede de menor espessura..... | 97 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.49 – Zonas de medição da espessura das paredes..... | 98 |
| Figura 4.50 – Zona 2 nas paredes de geometria curva de maior rigidez. | 98 |
| Figura 4.51 – Espessuras medidas nas paredes de geometria reta..... | 99 |
| Figura 4.52 – Espessuras medidas nas paredes de geometria curva..... | 100 |
| Figura 4.53 – Espessuras medidas nas paredes de geometria reta na zona com deflexão apreciável..... | 101 |
| Figura 4.54 – Espessuras medidas nas paredes de geometria curva na zona com deflexão apreciável..... | 101 |
| Figura 4.55 – Condições do estudo por elementos finitos: a) parede de geometria reta; b) parede de geometria curva. | 102 |
| Figura 4.56 – Deflexões nas simulações numéricas: a) parede de geometria reta; b) parede de geometria curva..... | 103 |
| Figura 4.57 – Zona de medição do Pz..... | 104 |
| Figura 4.58 – Evolução do Pz ao longo da maquinagem das paredes com geometria reta. | 105 |
| Figura 4.59 – Evolução do Pz ao longo da maquinagem das paredes com geometria curva. | 105 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1 – Séries de ligas de alumínio para fundição..... | 7 |
| Tabela 2.2 – Séries de alumínio para trabalho mecânico..... | 8 |
| Tabela 2.3 – Tipos de tratamentos das ligas de alumínio. | 9 |
| Tabela 2.4 – Ligas de alumínio mais comuns..... | 11 |
| Tabela 2.5 – Principais expressões matemáticas usadas na fresagem. | 13 |
| Tabela 2.6 – Séries de alumínio e respectivas classes de maquinabilidade – global.. | 18 |
| Tabela 2.7 – Avaliação do desgaste das ferramentas em vários ensaios..... | 19 |
| Tabela 2.8 – Parâmetros de corte e intervalos de valores utilizados..... | 22 |
| Tabela 2.9 – Modos de falha das ferramentas de corte. | 23 |
| Tabela 2.10 – Desgaste de um fresa de topo plano..... | 25 |
| Tabela 2.11 – Equações de uma onda harmónica..... | 27 |
| Tabela 2.12 – Parâmetros de análise de vibrações de acordo com a frequência de trabalho..... | 30 |
| Tabela 3.1 – Especificações do cone térmico..... | 40 |
| Tabela 3.2 – Sensibilidade dos vários eixos do acelerómetro 356B08..... | 46 |
| Tabela 4.1 – Propriedades do alumínio 7075 – T6. | 61 |
| Tabela 4.2 – Parâmetros de corte usados no corte lateral..... | 64 |
| Tabela 4.3 – Comparação do antes e depois da remoção das frequências de 248Hz e 496Hz..... | 72 |
| Tabela 4.4 – Espectro de vibração nos eixos X e Y durante a maquinagem lateral para o 4º ciclo (domínio do tempo)..... | 72 |
| Tabela 4.5 – Espectro de vibração nos eixos X e Y durante a maquinagem lateral para o 4º ciclo (domínio da frequência). | 74 |
| Tabela 4.6 – Comparação dos parâmetros de rugosidade das superfícies maquinadas..... | 75 |
| Tabela 4.7 – Distâncias lineares e tempos de corte na maquinagem de rampas. | 79 |
| Tabela 4.8 – Desgaste nas fresas após o corte de 20 rampas..... | 80 |
| Tabela 4.9 – Parâmetros de rugosidade para as rampas de 1º de inclinação..... | 88 |
| Tabela 4.10 – Parâmetros de rugosidade para as rampas de 2º de inclinação..... | 88 |
| Tabela 4.11 – Parâmetros de rugosidade para as rampas de 3º de inclinação..... | 89 |

| | |
|--|----|
| Tabela 4.12 – Largura de corte conforme a espessura da parede..... | 94 |
| Tabela 4.13 – Distâncias lineares e tempos de corte na maquinagem de paredes finas. | 94 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|-----------------------|--|
| 2D | Duas dimensões |
| AA | <i>Aluminum Association</i> (Associação de Alumínio) |
| ANSI | <i>American National Standard Institute</i> |
| ASM | <i>American Society for Metals</i> (Associação Americana de Metais) |
| CAM | <i>Computer Aided Manufacturing</i> (Produção Assistida por Computador) |
| CMM | <i>Coordinate Measuring Machine</i> (Máquina de Medição por Coordenadas) |
| CNC | <i>Computerized Numeric Control</i> (Controlo Numérico Computorizado) |
| DIN | <i>Deutsches Institut für Normung</i> |
| EDS | <i>Dispersive X-Ray Spectroscopy</i> (Detetor de Energia) |
| Faquirsião e Fs | Frequência de aquisição ou de amostragem (Hz) |
| FESEM | <i>Field Emission Scanning Eletron Microscopy</i> |
| FFT | <i>Fast Fourier Trasnform</i> (Transformada Rápida de Fourier) |
| Fmáx | Frequência máxima de trabalho (Hz) |
| HSS | <i>High Speed Steel</i> (Aço Rápido) |
| ISO | <i>Iternational Organization for Standerization</i> |
| JIS | <i>Japanese Industrial Standards</i> |
| MEV | Microscopia Eletrónica de Varrimento |
| mm.gume ⁻¹ | Milímetro por gume de corte |
| mm.min ⁻¹ | Milímetro por minuto |
| mm.rev ⁻¹ | Milímetro por revolução |
| MQL | <i>Minimum Quantity Liquid</i> (Quantidade Mínima de Líquido) |

| | |
|------|---|
| RMS | <i>Root Mean Square</i> (Valor Eficaz) |
| SEM | <i>Scanning Eletron Microscopy</i> |
| WDS | <i>Wavelength X-Ray Spectroscopy</i> (Detetor de Comprimento de Onda) |
| WIPS | <i>Wireless Intuitive Probing System</i> (Sistema de Sonda sem Fios) |

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto latino

| | |
|----------------|--|
| $\frac{d}{dt}$ | Derivada em ordem ao tempo |
| a | Aceleração |
| A, B, C, D e E | Classes de maquinabilidade das ligas de alumínio (segundo o ASM Handbook, Volume 16) |
| a_e | Largura de corte (mm) |
| a_p | Altura/profundidade de corte (mm) |
| A_x | Amplitude no eixo X |
| A_y | Amplitude no eixo Y |
| A_z | Amplitude no eixo Z |
| D_c | Diâmetro da ferramenta de corte (mm) |
| F, O, H, E e T | Tipos de tratamentos aplicados às ligas de alumínio. |
| f_z | Avanço por gume (mm.gume^{-1}) |
| g | Aceleração gravítica ($1g$ ou $9,81\text{m.s}^{-2}$) |
| HRC | Dureza Rockwell C |
| k_s | Pressão específica (N.mm^{-2}) |
| L | Comprimento da janela (função matemática) |
| M_c | Binário consumido (N.m) |
| N | Rotação da ferramenta (R.P.M) ou número de pontos |
| n_z | Número de gumes de corte |
| P e R | Perfis primário e de rugosidade (respetivamente) |
| P_c | Potência consumida (kW) |

| | |
|--------------|---|
| P_z | Defeito máximo (μm) |
| Q | Taxa de remoção do material ($\text{cm}^3.\text{min}^{-1}$) |
| R_a | Rugosidade média (μm) |
| R_q | Rugosidade média quadrática (μm) |
| R_z | Rugosidade máxima (μm) |
| t | Tempo |
| v | Velocidade |
| v_c | Velocidade de corte ($\text{m}.\text{min}^{-1}$) |
| v_f | Velocidade de avanço ($\text{mm}.\text{min}^{-1}$) |
| x | Deslocamento |
| x_0 | Posição inicial |
| x_i ou n | Ponto |
| X_k | Valor no domínio da frequência |
| x_k | Valor no domínio do tempo |

Alfabeto grego

| | |
|----------|----------------|
| ω | Ângulo de fase |
|----------|----------------|

1 – INTRODUÇÃO

Embora as ligas de alumínio sejam utilizadas industrialmente há bastante tempo, estes materiais são mais recentemente encarados numa nova perspectiva, assumindo atualmente uma importância acrescida para solucionar diversas questões relacionadas com a mobilidade do futuro. Neste contexto, é importante salientar que pelo surgimento de novas políticas de eficiência energética, são cada vez mais levantadas restrições relacionadas com os níveis de poluição e desperdício de recursos.

O desenvolvimento da indústria de transportes no futuro, nomeadamente no transporte automóvel, ferroviário, marítimo e aeronáutico, centrar-se-á em pilares de maior eficiência dos motores, a aposta na motorização elétrica, no armazenamento de energia e necessidade de criar estruturas de suporte para as baterias e motores elétricos. Neste sentido, não só as ligas de alumínio, mas também as tecnologias de fabrico necessitarão num futuro próximo de dar resposta a um conjunto de novos desafios. Nomeadamente, as tecnologias de maquinagem, como são exemplo a fresagem e torneamento, necessitarão de dar resposta a novos paradigmas construtivos, como o fabrico de estruturas com melhor relação resistência/peso, baseadas em componentes mais esbeltos, de paredes finas.

As ligas de alumínio são um tipo de material muito aplicado na fabricação subtrativa (maquinagem), sendo depois posteriormente possíveis de aplicar em várias estruturas de engenharia que requeiram bom compromisso entre integridade estrutural e baixo peso.

O estudo da maquinagem destes tipos de ligas é de extrema importância, uma vez que, os vários parâmetros englobados na maquinagem podem alterar a qualidade final do produto, sendo de interesse então estudar e encontrar os parâmetros ótimos para vários tipos de ligas em conjugação com certas estratégias de maquinagem. A maquinagem a alta velocidade é altamente usada neste tipo de ligas, uma vez que, leva a um melhor acabamento superficial e a uma menor acumulação de alumínio nas arestas de corte (Soren, *et al.*, 2019).

O uso ou não uso de fluido de corte também é um tema de grande importância de estudo, pois pode influenciar drasticamente o acabamento final do produto a maquinar em certas situações, bem como são importantes as questões ambientais relacionadas com a contaminação dos produtos e aparas com os fluídos de corte utilizados.

Outros fatores de interesse de estudo neste tipo de ligas são os tipos de revestimentos usados nas ferramentas de corte e o tamanho das aparas formadas.

Além do estudo de maquinabilidade das próprias ligas em certas situações é também interessante estudar o comportamento da ferramenta de corte usada, uma vez que,

certas ligas são mais danosas para a ferramenta que outras. A exemplo disto e em termos qualitativos, as ligas da série 7000 são classificadas de boa maquinabilidade, enquanto ligas de fundição são consideradas de má maquinabilidade.

Prosseguindo a colaboração com a empresa de fabrico de ferramentas de corte Palbit[®], com a qual no âmbito do mestrado em Engenharia Mecânica do ISEC, têm sido realizados diversos estudos relacionados com necessidades da indústria, foi identificado o interesse em estudar e caracterizar diferentes estratégias de maquinagem aplicadas a ligas de alumínio. Para iniciar este estudo, foi selecionada uma fresa de metal duro revestida a diboreto de titânio (TiB₂), a qual é produzida pela empresa Palbit[®] e que é usualmente utilizada no corte de ligas de alumínio. Assim, para todas as estratégias de corte e para as diferentes condições de corte estudadas neste trabalho, foram sempre utilizadas fresas novas, todas elas com a mesma geometria e com as mesmas condições iniciais.

1.1 – Objetivos

Este trabalho tem como objetivo estudar diversas estratégias de maquinagem com diferentes variantes, as quais são recorrentemente aplicadas ou que são prometedoras para desafios atuais que a indústria enfrenta, no que diz respeito a componentes fabricados em ligas de alumínio.

Foi selecionada a liga de alumínio 7075, com tratamento térmico T6, a qual é considerada uma liga de boa maquinabilidade, amplamente aplicada em trabalhos industriais. A escolha de uma liga conhecida tem a vantagem de ser um material que é espectável numa fase inicial do estudo não trazer complicações adicionais às variantes em estudo. No planeamento inicial deste trabalho, era objetivo numa fase mais avançada aplicar as estratégias de maquinagem agora usadas a outras ligas de alumínio, de menor maquinabilidade, tal como é exemplo as ligas de fundição, de elevado teor em silício, as quais estão em crescente utilização, em grande parte devido à revolução a que se tem assistido na mobilidade do futuro, muito baseada em eletrificação. Contudo, por limitações de tempo e disponibilidade de materiais, não foi possível concretizar este objetivo.

Embora seja analisado o desgaste que a ferramenta apresenta após as diferentes operações de maquinagem realizadas, uma vez que, o estudo foi aplicado a uma liga de boa maquinabilidade, não é expectável nem objetivo prosseguir com o corte até o limite de vida da ferramenta. De facto, a literatura mostra que estudos de vida de ferramentas aplicados a ligas de alumínio, são muito longos e dispendiosos.

Além dos objetivos anteriores enunciados, foi também tido como objeto de estudo e importante objetivo deste trabalho, explorar e aprofundar o conhecimento da técnica de análise de vibrações na maquinagem. De facto, em trabalhos anteriores realizados, o tema da aquisição, tratamento e análise de vibração produzida na maquinagem foi explorada, tendo, no entanto, ficado diversos aspetos pouco consolidados. Nos trabalhos anteriores, a vibração da maquinagem foi

fundamentalmente utilizada para complementar a caracterização do desgaste das ferramentas. Neste trabalho, justifica-se ampliar e aprimorar o estudo da vibração, servindo fundamentalmente neste caso como uma técnica de caracterização das estratégias de maquinagem estudadas. Para concretizar este objetivo, será efetuado um estado da arte dos conceitos de vibração, bem como uma análise mais minuciosa dos equipamentos, acessórios e *softwares* que permitem efetuar a aquisição, análise e tratamento do sinal de vibração. Será então desenvolvido um novo sistema de aquisição e análise de vibração produzida na maquinagem, o qual será baseado no *software* LabVIEW® para aquisição de sinal, e no *software* MATLAB® para tratamento do sinal. Está previsto acrescentar novas funcionalidades ao sistema desenvolvido, tal como é exemplo a utilização de uma maior variedade de filtros aplicado ao sinal de vibração adquirido, entre outras funcionalidades, que permitirão, por exemplo, transformar de forma mais simples o espectro do domínio do tempo para o domínio da frequência.

É esperado que, com este trabalho, se tenha reunido conhecimento suficiente acerca do comportamento das fresas usadas, aplicadas às estratégias de maquinagem de alumínio, englobando os vários aspetos referidos que foram objeto de estudo.

1.2 – Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está dividida em cinco capítulos principais, os quais se subdividem em tópicos relacionados com o tema de cada capítulo. Os capítulos englobam desde uma introdução ao tema da dissertação, à revisão de conceitos considerados importantes para a realização e compreensão deste trabalho, aos métodos e equipamentos experimentais, ao trabalho experimental desenvolvido e resultados obtidos, e uma conclusão final sobre o trabalho realizado. Em seguida é feito um breve resumo de cada capítulo.

No **Capítulo 1** introduz-se o tema da dissertação, os objetivos, a metodologia e a sua organização.

O **Capítulo 2** consiste numa revisão teórica sobre vários temas que foram considerados de grande importância para escrever a presente dissertação. Os temas abordados neste capítulo têm como objetivo apresentar os fundamentos necessários para se desenvolver o trabalho proposto.

Posteriormente, no **Capítulo 3**, foram abordados os métodos e equipamentos experimentais que auxiliaram no desenvolvimento do trabalho prático. Cada equipamento foi descrito, dando ênfase às características mais importantes ainda que de forma sucinta.

O **Capítulo 4** apresenta o trabalho experimental desenvolvido, desde a preparação e desenvolvimento de cada ensaio realizado até à apresentação e discussão dos resultados obtidos.

Por último, no **Capítulo 5**, apresentam-se as ideias mais importantes e as conclusões finais sobre o trabalho desenvolvido.

No fim estão presentes mais dois capítulos respeitantes às referências consultadas e aos apêndices considerados relevantes.

2 – ENQUADRAMENTO DO TRABALHO EXPERIMENTAL E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Sendo todos os temas apresentados neste capítulo âmbito de estudo e aplicação nos trabalhos experimentais desenvolvidos, foi realizada uma pesquisa e estudo sobre cada um dos temas. Todos os temas apresentados e discutidos são relevantes para a compreensão da presente dissertação por parte do leitor e foram imprescindíveis para o possível desenvolvimento da mesma por parte do autor, no entanto são só enunciados os temas estritamente necessários, deixando de fora possíveis assuntos de conhecimento mais geral.

2.1 – Caracterização e Classificação de Ligas de Alumínio

As ligas de alumínio, em termos qualitativos, são caracterizadas pela baixa massa volúmica (cerca de 3 vezes menor que o aço – aproximadamente $2,3\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), boa resistência à corrosão na maioria dos ambientes (ar atmosférico, água doce e salgada), boa condutividade térmica, boa capacidade de conformação, devido ao seu baixo ponto de fusão (aproximadamente 660°C para alumínio puro), boa resistência mecânica e rigidez, o seu baixo peso, a capacidade de serem facilmente recicladas, entre outras. Estas características levam a que estas ligas se apresentem como um ótimo concorrente em aplicações de engenharia, levando a um aumento do seu consumo. É de salientar que não é só em aplicações de engenharia que as ligas de alumínio têm uma elevada aplicabilidade. As aplicações podem ir de situações simples, como utensílios domésticos, a aplicação em componentes eletrónicos (devido a não ser magnético), a embalagens de transporte de comida (por não ser tóxico), a aplicações na indústria automóvel, aeronáutica, entre outras.

Este metal não existe na natureza como o ferro e o cobre (metais em si), devido à reatividade química com o oxigénio, o que faz com que se forme o óxido de alumínio, também designado de alumina (Al_2O_3). O alumínio como um metal pode ser obtido deste óxido por meio de uma redução eletrolítica. Esta reação consiste de forma muito sintetizada em depositar a alumina num banho de sais de forma a esta ser dissolvida. Posteriormente, é induzida corrente elétrica de forma a gerar deposição de alumínio como metal, que é depois removido e processado.

As maiores impurezas que podem estar presentes no alumínio são o ferro e o silício. Outras impurezas que podem aparecer em menores quantidades são o zinco, titânio e vanádio. Mundialmente estabelecem-se limites das impurezas presentes nas ligas de alumínio, podendo ser aplicados processos de refinamento de forma a se obter maiores níveis de pureza.

Certas desvantagens que o alumínio puro pode ter, como baixa resistência mecânica, podem ser melhoradas neste caso com tratamentos térmicos, trabalho de deformação a frio (encruamento) ou com adição de elementos de liga. Os elementos de liga não são exclusivos para melhorar a resistência mecânica, mas qualquer outra propriedade física, química ou mecânica. A resistência à corrosão do alumínio deve-se à camada de óxido formado na sua superfície (alumina), sendo que esta pode formar-se naturalmente ou artificialmente, para se obter uma maior espessura e por sua vez maior resistência à corrosão.

As características descritas das ligas de alumínio fazem este material ser muito versátil e procurado.

A Figura 2.1 mostra a produção à escala global, em toneladas, do alumínio primário (alumínio obtido pelo processo eletrolítico descrito, distinguindo-se este de alumínio secundário o qual resulta da reciclagem de alumínio primário) desde 2010 a 2022, sendo possível concluir o crescimento contínuo da produção, sendo evidente que a China é de longe o maior produtor.

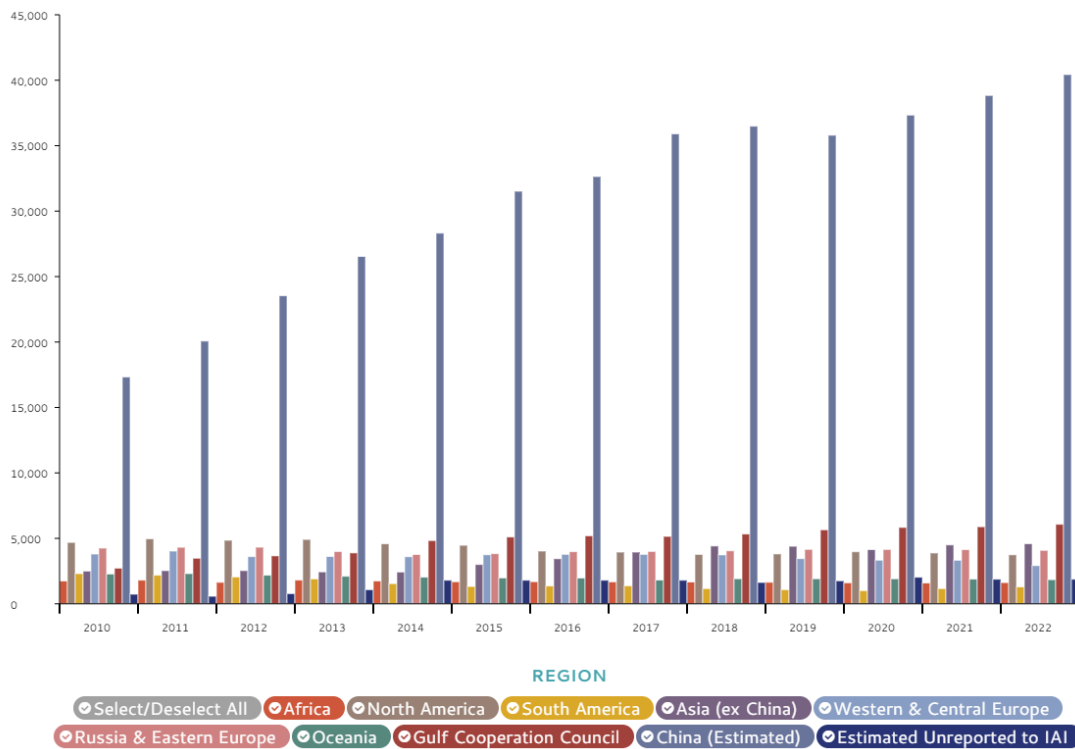


Figura 2.1 – Produção de alumínio primário mundialmente (International Aluminium , 2023).

*Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075.
Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem*

As ligas de alumínio são separadas usualmente em duas categorias, baseadas na forma primária de conformação/fabrico, sendo elas: ligas para fundição e ligas para trabalho mecânico, obtidas por forjamento. Em geral, as ligas para fundição devem possuir maior fluidez e as para trabalho mecânico maior ductilidade. Estas propriedades estão diretamente relacionadas com o tipo de processo de conformação empregue, sendo que ajudam no mesmo (ASM International, 1992).

As ligas de alumínio são classificadas em grupos de acordo com os elementos químicos principais adicionados ao alumínio. Estes grupos são designados séries de ligas de alumínio, sendo que a nomenclatura das séries foi proposta pela *Aluminum Association* (AA) e pela *American National Standard Institute* (ANSI).

As diferentes séries das ligas são classificadas com um número de 4 dígitos e estão inseridas em dois grandes grupos, designados de ligas para fundição e ligas para trabalho mecânico, como já referido. Para as ligas para fundição o número apresenta uma casa decimal, sendo este o quarto algarismo. O primeiro algarismo de cada série indica o elemento de liga principal presente na mesma. A Tabela 2.1 e a Tabela 2.2 apresentam de forma sucinta as séries para as ligas de fundição e trabalho mecânico, bem como o principal elemento de liga de cada série, respetivamente.

Tabela 2.1 – Séries de ligas de alumínio para fundição.

| Séries | Elemento de liga principal |
|--------|----------------------------------|
| 1xx.x | Alumínio (>99%) |
| 2xx.x | Cobre |
| 3xx.x | Silício, com Cobre e/ou Magnésio |
| 4xx.x | Silício |
| 5xx.x | Magnésio |
| 6xx.x | Série não usada |
| 7xx.x | Zinco |
| 8xx.x | Estanho |
| 9xx.x | Outros elementos |

Fonte: Adaptado de (ASM International, 1992).

Nas ligas para fundição o segundo e terceiro algarismo indicam a liga de alumínio em específico para o caso das ligas 2xx.x a 9xx.x (exceção da série 6xx.x que não é usada neste tipo de ligas) e o nível de pureza para o caso das ligas 1xx.x. O algarismo decimal indica em todas as ligas a forma final do produto.

Tabela 2.2 – Séries de alumínio para trabalho mecânico.

| Séries | Elemento de liga principal |
|--------|----------------------------|
| 1xxx | Alumínio (>99%) |
| 2xxx | Cobre |
| 3xxx | Manganês |
| 4xxx | Silício |
| 5xxx | Magnésio |
| 6xxx | Magnésio e Silício |
| 7xxx | Zinco |
| 8xxx | Outros elementos |
| 9xxx | Série não usada |

Fonte: Adaptado de (ASM International, 1992).

Nas ligas para trabalho mecânico da série 1xxx, o segundo algarismo indica o controlo de impurezas e os últimos dois algarismos indicam a percentagem de alumínio existente na liga. Nas séries 2xxx a 8xxx, o segundo algarismo indica a modificação a que a liga foi sujeita. Se o segundo algarismo for zero, indica que nenhuma modificação foi feita, sendo que algarismos de 1 a 9 apresentam uma modificação específica de cada um. Os últimos dois algarismos não têm um significado particular, servindo apenas para identificar a liga.

As ligas de alumínio podem sofrer, ou não, tratamentos após o seu fabrico sendo que estes são geralmente indicados por uma letra maiúscula após a designação das ligas. Certas subdivisões podem ser indicadas com recurso a algarismos posteriores à letra indicativa do tratamento. A Tabela 2.3 enumera os tratamentos mais comuns bem como uma síntese dos mesmos. A letra W e T na Tabela 2.3 indicam uma têmpera instável e estável respetivamente. A letra W pode ser seguida de algarismos de 1 a 3 e a T de 1 a 10.

Dos tipos de tratamento em questão, considera-se mais importante o tratamento T6, sendo este o presente na liga estudada no trabalho experimental, merecendo por isso uma explicação detalhada. O tratamento T6 é indicativo de um tratamento térmico de envelhecimento artificial cujas propriedades mecânicas e estabilidade dimensional devem-se ao envelhecimento artificial. O envelhecimento consiste na decomposição da solução sólida saturada para formar precipitados finos e dispersos, sendo que o envelhecimento pode ser natural ou artificial. Estes precipitados têm grande influência na resistência mecânica das ligas, podendo ainda influenciar outras propriedades. O envelhecimento natural acontece quando a formação de precipitados acontece à temperatura ambiente, podendo a duração de tempo em que o fenómeno acontece ser variável. O envelhecimento artificial acontece quando a formação de precipitados é conseguida a temperaturas superiores à temperatura ambiente (100°C a 200°C), num curto período. Este tipo de envelhecimento é usado para se obter a melhor distribuição, morfologia e tamanho dos precipitados, visto que, são fatores que influenciam as propriedades. O trabalho a frio posterior ao tratamento de envelhecimento pode ajudar em muitos casos a melhorar a resistência mecânica. A Figura 2.2 mostra os vários estágios de envelhecimento onde se pode

*Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075.
Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem*

observar o sub envelhecimento (precipitados pequenos), o envelhecimento ótimo que oferece maior resistência mecânica (precipitados ideais e otimamente distribuídos) e o sobre envelhecimento (precipitados mais grosseiros).

Tabela 2.3 – Tipos de tratamentos das ligas de alumínio.

| Letra | Tratamento | Síntese |
|-------|----------------|--|
| F | Como fabricado | Aplicado a ligas conformadas por trabalho de deformação a frio, trabalho de deformação a quente ou processos de fundição sem qualquer controlo sobre as condições térmicas ou quando nenhum endurecimento é efetuado. |
| O | Recozimento | Aplicado a ligas de trabalho mecânico que são recozidas para melhorar a resistência mecânica e a ligas de fundição que são recozidos de forma a aumentar a ductilidade. A letra O pode ser seguida de um algarismo, desde que diferente de zero. |
| H | Encruamento | Aplicado a ligas de trabalho mecânico, apenas de forma a aumentar a sua resistência mecânica, por encruamento sem ser posteriormente aplicado nenhum tratamento térmico. A letra H é sempre seguida de um ou mais algarismos. |
| W | Térmico | Aplicado a ligas em que a resistência mecânica muda espontaneamente à temperatura ambiente. |
| T | Térmico | Aplicado a ligas cuja resistência mecânica é estável após um curto período após o tratamento. A letra T é sempre seguida de um ou mais algarismos. |

Fonte: Adaptado de: (ASM International, 1992).

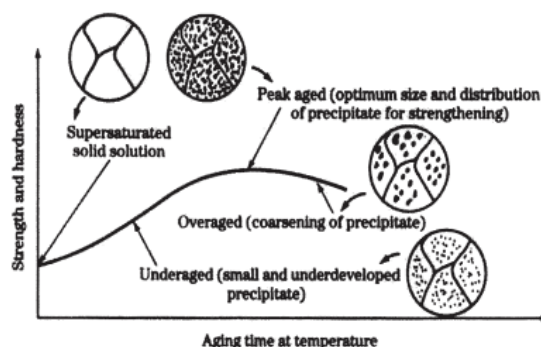


Figura 2.2 – Evolução da resistência mecânica de uma liga de Al em função do tempo de envelhecimento a uma temperatura fixa (Radutoiu, Alexis, Lacroix, & Petit, 2012).

É ainda importante referir os elementos de liga considerados mais importantes para melhorar as propriedades não só mecânicas, mas também físicas e químicas das ligas de alumínio. Os elementos de liga podem dividir-se em elementos de maior aplicação (Si, Cu e Mg), elementos de menor aplicação (Ni e Sn), elementos modificadores da microestrutura (Ti, B, Sr, Be, Mn e Cr) e impurezas (Fe e Zn), sendo que nas ligas 7000 o zinco não é tratado como uma impureza, mas como um elemento adicionado para obter as propriedades desejadas. Uma vez que, o alumínio puro não tem grandes aplicações de engenharia, é importante conhecer o efeito dos elementos de liga. A Tabela 2.4 sintetiza as ligas de alumínio mais importantes bem como o elemento ou elementos de liga principais, sendo assim possível perceber qual a influência dos mesmos na liga.

*Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075.
Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem*

Tabela 2.4 – Ligas de alumínio mais comuns.

| Liga | Abreviação | Síntese |
|-------------------------|------------|--|
| Alumínio-Silício | Al-Si | Apresenta boa fluidez para fundição e alta resistência à corrosão, baixa densidade e coeficiente de expansão térmica. A sua ductilidade e maquinabilidade é baixa (devido às partículas muito duras e abrasivas de silício). Quanto maior o teor em silício, pior a maquinabilidade e melhor fluidez para fundição. Estes aspetos podem ser melhorados aplicando taxas de arrefecimento rápidas na conformação e usando antimónio (Sb) de forma a modificar a fase de Al-Si para lamelar (passa de uma forma de agulha para mais arredondada). |
| Alumínio -Cobre | Al-Cu | Contem cobre até 10%. É uma liga muito usada na fundição. O cobre fornece a vantagem de melhorar a resistência a altas temperaturas, mas diminui a resistência à corrosão. Pode sofrer tratamentos de forma a melhorar a sua resistência mecânica e à corrosão. |
| Alumínio-Magnésio | Al-Mg | Apresenta valores moderados de resistência mecânica e tenacidade. Devido ao magnésio, tem alta resistência à corrosão e pode ser aplicada em ambientes marinhos. Possui excelente soldabilidade e maquinabilidade. Os tratamentos térmicos nesta liga servem mais para estabilizar as propriedades mecânicas do que para as melhorar. |
| Alumínio-Zinco-Manganês | Al-Zn-Mn | Liga que na sua maioria sofre um processo de envelhecimento natural durante 20 a 30 dias, de forma a se conseguir obter a resistência mecânica máxima das mesmas. O envelhecimento artificial é possível caso se queira acelerar o processo. O zinco melhora a liga para posterior tratamento térmico e o manganês a resistência mecânica e à corrosão. |
| Alumínio-Estanho | Al-Sn | Liga que devido ao estanho tem baixo atrito com outros materiais e é por isso muito usada em rolamentos. Podem ser adicionados elementos como o cobre, silício, magnésio e níquel, quando se pretende maior resistência mecânica. |

Fonte: Adaptado de (ASM International, 1992) e (Soares, G, 2022).

2.2 – Maquinagem / Corte por Arranque de Apara

Maquinagem é um termo que cobre um leque amplo de processos de fabrico que servem para remover material e obter a geometria pretendida, geralmente na forma de aparas, a partir de uma geometria inicial, podendo esta ser um bloco maciço ou ter sido obtido uma pré-forma inicial por processos de conformação primários (ASM International, 1995). Este processo é também designado de corte por arranque de apara e insere-se numa tipologia de fabrico que é o fabrico subtrativo.

A maioria das aplicações industriais de maquinagem são destinadas aos materiais metálicos. Os processos de maquinagem podem ser aplicados numa ampla gama de equipamentos, designados de máquinas-ferramenta, as quais englobam desde máquinas-ferramenta manuais (como o torno convencional, furadeiras, máquinas de serrar, fresadores manuais, entre outras) e máquinas-ferramenta CNC. Cada tipo de máquina-ferramenta, e por sua vez processo de corte, exige um tipo de configuração, metodologia de trabalho e ferramentas diferentes (ASM International, 1995).

Alguns dos tipos de maquinagem mais comuns são o torneamento, a fresagem, a furação, a serragem e a maquinagem abrasiva, sendo que, cada um destes grupos se pode subdividir em processos de maquinagem mais específicos, conforme o objetivo final de fabrico (ASM International, 1995).

Uma vez que, o trabalho experimental assenta na operação de fresagem, este será o processo de maquinagem apresentado, com algum detalhe. A fresagem é um processo de maquinagem em que o material é removido por uma ferramenta em rotação, a qual possui em regra múltiplos gumes de corte (Groover, 2010). A ferramenta usada neste tipo de maquinagem é chamada de fresa, sendo que podem existir diferentes tipologias (e.g., topo plano, topo esférico, de facejamento, de chanfros, de bolear, cónica, entre outras). As ferramentas podem ser constituídas na sua totalidade pelo mesmo material, designando-se neste caso por ferramentas integrais, ou possuir pastilhas de corte de diferentes geometrias, as quais são acopladas de forma rígida ao corpo principal da ferramenta (Sandvik, Coromant, 2023). O movimento da ferramenta em relação ao material a cortar pode executar uma trajetória designada de fresagem convencional ou discordante, ou então alternativamente, executar um movimento designado de maquinagem concordante (ASM International, 1995) e (Groover, 2010), sendo estas duas últimas abordadas com maior detalhe no Capítulo 4.3.5.

É importante referir por último as expressões matemáticas mais usadas na fresagem, sendo as mesmas enunciadas nas Equações (2.1) a (2.6) da Tabela 2.5. Na prática, os catálogos de fornecedores de ferramentas já indicam o avanço por gume e a velocidade de corte para o par ferramenta e material a maquinar, sendo os restantes parâmetros calculados com base nestes dados.

*Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075.
Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem*

Tabela 2.5 – Principais expressões matemáticas usadas na fresagem.

| Parâmetro | Equação |
|---|--|
| Velocidade de corte (m.min ⁻¹) | $v_c = \frac{\pi D_c N}{1\ 000}$ (2.1) |
| Velocidade de rotação (R.P.M) | $N = \frac{1\ 000 v_c}{\pi D_c}$ (2.2) |
| Velocidade de avanço (mm.min ⁻¹) | $v_f = f_z N n_z$ (2.3) |
| Taxa de remoção de material (cm ³ .min ⁻¹) | $Q = \frac{a_e a_p v_f}{1\ 000}$ (2.4) |
| Potência consumida (kW) | $P_c = \frac{a_e a_p v_f k_s}{60\ 000\ 000}$ (2.5) |
| Binário consumido (N.m) | $M_c = \frac{30\ 000 P_c}{\pi N}$ (2.6) |

Fonte: Adaptado de (Sandvik, Coromant, 2023).

A maquinagem de componentes é geralmente acompanhada por um fluido de corte, sendo este qualquer tipo de líquido ou gás aplicado diretamente na operação de maquinagem para melhorar a performance de corte. Os fluidos de corte resolvem, ou pelo menos minimizam, muitos dos problemas associados ao processo de maquinagem, como o calor gerado na zona de corte, o atrito excessivo entre a ferramenta e o material, permitem obter melhores tolerâncias dimensionais, diminuem as forças de corte e ajudam na remoção das aparas, evitando a apara aderente (Groover, 2010) e (Marouvo, 2022).

Os fluidos de corte podem-se dividir em refrigerantes e lubrificantes sendo que nos primeiros a função principal é atenuar o calor excessivo gerado no corte, fazendo com que este seja escoado desta zona. A capacidade de um refrigerante ser mais ou menos eficaz vai depender das suas propriedades térmicas. A água possui uma boa condutividade térmica, sendo por isso usada como base em muitos refrigerantes. Os lubrificantes são geralmente formulados à base de óleos, devido a se requerer uma boa lubrificação e diminuição do atrito no par ferramenta e material a cortar. A altas velocidades os fluidos de corte à base de óleos tendem a perder a sua eficácia devido à dificuldade de o fluido chegar à zona de corte, pois o movimento de saída das aparas impede o livre acesso do fluido à zona de corte. Apesar da função principal dos lubrificantes ser de reduzir o atrito, eles também atenuam a temperatura.

Na prática, é comum existir uma mistura destes dois tipos de fluidos de forma a se obter ambas as propriedades (mais refrigerantes ou lubrificantes dependendo da mistura) no fluido de corte.

Alguns modos de aplicação de fluido de corte são diretamente no material a maquinar, ou seja, um jato de fluido é introduzido na zona de corte por via externa (pode ocorrer o problema de a altas velocidades o fluido não ter grande eficácia na remoção das aparas) ou interna (fluido de corte a alta pressão introduzido por canais da ferramenta ou do cone, que pode resolver o problema da aplicação externa de baixa pressão), ou a através do sistema de Quantidade Mínima de Líquido (MQL) em que neste caso o fluido é introduzido na forma de gotículas dispersas num jato de ar. Este último tem benefícios ambientais, devido ao uso mais controlado e mínimo de fluido de corte (Groover, 2010) e (Marouvo, 2022).

O não uso de refrigerante (maquinagem a seco), aplicação incorreta do fluido ou contaminação do mesmo pode levar a problemas como desgaste prematuro da ferramenta, apara aderente, escoamento ineficaz da apara, sobreaquecimento na zona de corte. De forma a estes problemas serem atenuados, nestes casos é necessário usar velocidades de corte mais baixas (Groover, 2010).

2.2.1 – Estratégias de Maquinagem: Corte Lateral, Corte de Rampas e Corte de Paredes Finas

Considera-se importante apresentar alguns tipos de estratégias usadas na maquinagem, nomeadamente na fresagem. Estas estratégias são implementadas através da programação em programas CAM (*Computer Aided Manufacturing*), sendo exemplos destes o Mastercam[®], o PowerMill[®], o Solidcam[®], entre outros. As estratégias de maquinagem apresentadas são só as que foram de interesse ao trabalho experimental.

A **maquinagem lateral** (Figura 2.3) consiste na sua forma mais simples em um ou múltiplos passes de contorno com a ferramenta. As ferramentas geralmente aplicadas nesta estratégia são fresas de topo, variando a profundidade possível de maquinar com o comprimento de corte total da ferramenta. Neste tipo de corte, um fator crítico é o uso de um correto avanço por gume de corte, o qual vai influenciar o comprimento da apara. As ferramentas que realizam este tipo de corte, em particular, quando o corte é feito num único passe, devem ter boa estabilidade, permitir um bom escoamento da apara e estar acopladas a sistemas de fixação adequados. Quando a profundidade de corte é grande a velocidade de corte deve ser baixa a fim de minimizar as vibrações (Sandvik, Coromant, 2023).



Figura 2.3 – Maquinagem lateral (Sandvik, Coromant, 2023).

A **maquinagem de rampas** é uma estratégia que pode ser efetuada de duas formas distintas, sendo elas, as rampas lineares e as rampas circulares. Este tipo de maquinagem é uma forma muito eficiente de aproximar um canal, uma cavidade ou iniciar a abertura de caixas evitando, por exemplo, a furação prévia, a entrada em mergulho e evitando o esforço excessivo na ferramenta no início da maquinagem. Na execução da rampa linear (Figura 2.4 a)) a ferramenta tem movimento contínuo e descendente no eixo vertical Z e, em simultâneo, translação num dos dois eixos horizontais X ou Y. A rampa circular (Figura 2.4 b)) consiste numa interpolação helicoidal com movimento simultâneo nos eixos X e Y associado ao movimento descendente no eixo Z. Na rampa circular o corte é mais suave e existe uma maior garantia do escoamento da avara. É de salientar que a maquinagem de rampas pode ser usada na maquinagem de zonas externas, como por exemplo, de contornos (Sandvik, Coromant, 2023).

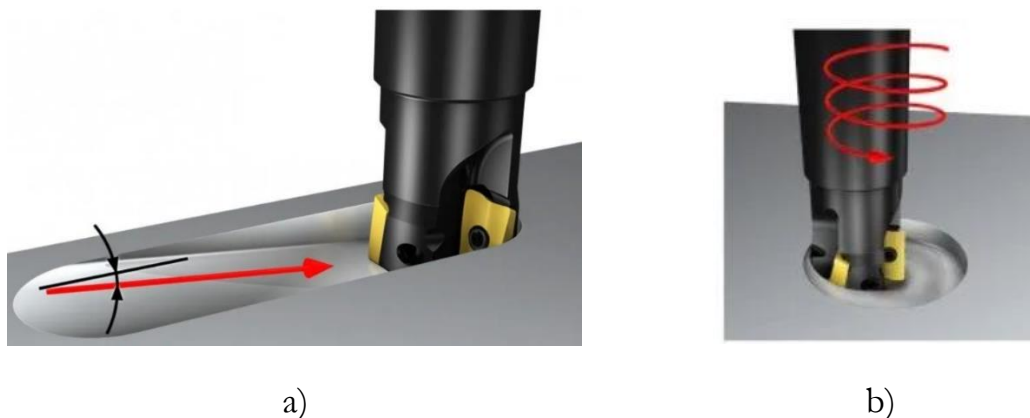


Figura 2.4 – Maquinagem de rampas: a) rampa linear. b) rampa circular (Sandvik, Coromant, 2023).

Na **maquinagem de paredes finas**, existem várias estratégias que vão variar e depender da altura e espessura da parede, sendo que nas várias estratégias deve aplicar-se o corte concordante e a maquinagem a alta velocidade de forma a reduzir o tempo de contacto da ferramenta com a parede a maquinar e com isso minimizar a deflexão da mesma (Sandvik, Coromant, 2023). De acordo com o fabricante de ferramentas Sandvik Coromant, paredes finas com relação de altura/espessura menor que 15:1, devem ser maquinadas com um movimento da ferramenta em *zig-zag*, sendo primeiro maquinado um lado da parede em passes não sobrepostos e posteriormente o segundo lado da mesma forma, como pode ser observado na Figura 2.5.

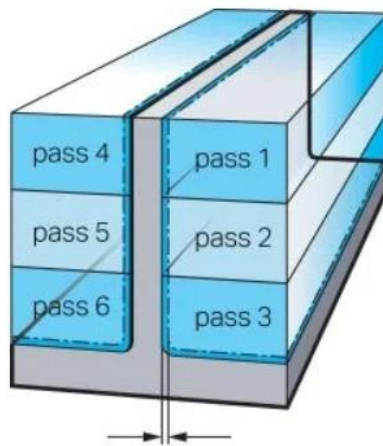


Figura 2.5 – Estratégia de maquinagem de paredes finas com relação altura/espessura da parede até 15:1 (Sandvik, Coromant, 2023).

Paredes finas de relação entre 15:1 e menor que 30:1 devem ser maquinadas usando a estratégia designada de *waterline*, a qual consiste em maquinar a parede de forma alternada sem sobreposição de passes (Figura 2.6 a)). Como alternativa, poderá ser utilizada a fresagem designada por passes apoiados, sendo esta uma abordagem semelhante à anterior, pois também nesta os passes de corte alternam entre um lado e o outro da parede fina. Contudo, neste caso a altura dos passes de corte de um lado e outro da parede estão desfasados de forma a conseguir-se obter maior rigidez na zona de contacto da ferramenta com a parede, visto existir mais material do lado oposto do que o lado em que está a ser efetuado o corte (Figura 2.6 b)).

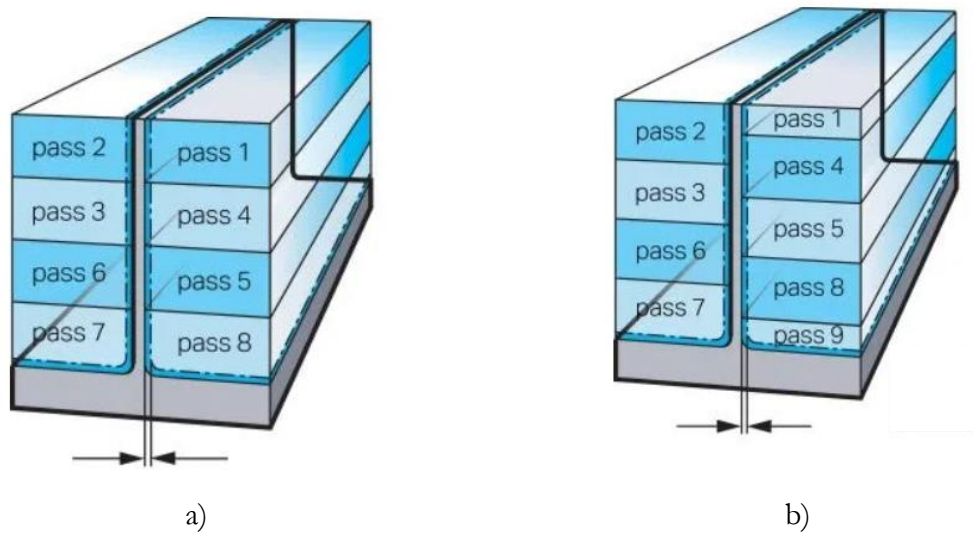


Figura 2.6 – Estratégia de maquinagem de paredes finas com relação altura/espessura da parede entre 15:1 e 30:1: a) estratégia *waterline*; b) estratégia de passes apoiados (Sandvik, Coromant, 2023).

No caso das paredes finas terem uma relação de altura/espessura superior a 30:1, a Sandvik Coromant recomenda que o estilo de maquinagem adotado deve ser de forma a que permaneça uma zona mais rígida na base de maior espessura que apoia a zona mais fina superior, efetuando para se obter este efeito uma maquinagem por escadas, conforme se observa na Figura 2.7 . Os passes da maquinagem devem ser alternados entre os lados da parede.

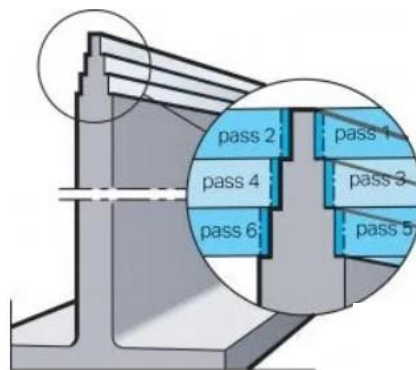


Figura 2.7 – Estratégia de maquinagem de paredes finas de relação $>30:1$. (Sandvik, Coromant, 2023).

Em todos os casos descritos de maquinagem deste tipo de paredes, deve deixar-se sempre uma muito pequena sobre espessura de material nas laterais e na base da parede, para posterior acabamento.

2.2.2 – Maquinagem de Ligas de Alumínio

As ligas de alumínio podem na sua globalidade ser maquinadas com elevadas velocidades de corte e de avanço, de forma económica. Dependendo dos microconstituintes que as ligas de alumínio possuem, a sua maquinabilidade, que representa o valor indicativo de facilidade ou dificuldade de maquinagem das ligas em comparação a um material padrão, vai ser melhor ou pior. Elementos ou compostos químicos não abrasivos tem um efeito benéfico no que diz respeito ao corte destas ligas, enquanto os abrasivos (e.g., silício) afetam de forma negativa o corte, o desgaste das ferramentas de corte e o acabamento superficial do material. Em geral ligas mais macias (e em menos extensão algumas duras), tendem a formar apara aderente durante o corte, sendo este efeito reduzido através do uso de fluidos de corte apropriados. Ligas que contenham teor de silício acima de 10% são difíceis de maquinar devido às partículas de silício se soltarem e desgastarem muito rapidamente a ferramenta de corte.

As ligas de alumínio são classificadas quanto à sua maquinabilidade em grupos de A a E em ordem crescente de tamanho de apara e decrescente de qualidade da superfície maquinada. De acordo com este princípio, as ligas de melhor maquinabilidade pertencem à classe A e as de pior maquinabilidade pertencem à classe E (ASM International, 1995). A Tabela 2.6 apresenta a relação existente entre as séries de ligas de alumínio com a classe de maquinabilidade em que se inserem.

Tabela 2.6 – Séries de alumínio e respetivas classes de maquinabilidade – global.

| Série das ligas de alumínio | Classe de maquinabilidade |
|-----------------------------|---------------------------|
| 1000 | D e E |
| 2000 | A, B e C |
| 3000 | C, D e E |
| 4000 | B |
| 5000 | C, D e E |
| 6000 | B, C e D |
| 7000 | B e D |
| 8000 | A |

Fonte: Adaptado de (ASM International, 1995).

Um estudo de revisão sobre a maquinabilidade das ligas de alumínio realizado por Soren, *et al.* (2019), analisa qual a relação do acabamento superficial, da vida da ferramenta de corte, da temperatura desenvolvida durante o corte e da microestrutura do material cortar, com a maquinabilidade destas ligas.

O **acabamento superficial** possui grande influência na maquinagem de componentes e no custo associado. De forma a obter produtos de maior qualidade, é necessário procurar a rugosidade superficial mínima possível associada ao desgaste mínimo das ferramentas e altas taxas de remoção de material (Soren, *et al.*, 2019).

O **desgaste da ferramenta** é considerado um atributo tribológico que tem tendência a piorar ao longo do corte e vai afetar diretamente, além da vida útil da ferramenta, o acabamento superficial do material a maquinar e por sua vez as tolerâncias dimensionais. Vários estudos realizados em diferentes ligas de alumínio mostram que o desgaste da ferramenta geralmente aumenta com o aumento da profundidade de corte e com o aumento da velocidade de avanço, enquanto um aumento da velocidade de rotação é em certos casos vantajoso (caso de torneamento), conforme pode ser visto na Tabela 2.7 (Soren, *et al.*, 2019).

Tabela 2.7 – Avaliação do desgaste das ferramentas em vários ensaios.

| Autor | Material a cortar | Material da ferramenta | Tipo de maquinagem | Resultados |
|-----------------------------------|-------------------|----------------------------|--------------------|--|
| Okopujie, <i>et al.</i> (2017) | Al 6061 | HSS | Fresagem | Desgaste da ferramenta altamente influenciado pela profundidade de corte seguido da rotação da ferramenta. |
| Martín-Béjar <i>et al.</i> (2017) | Al-Zn | WC-Co revestimento de TiN | Torneamento | Desgaste da ferramenta aumentou com a profundidade de corte e velocidade de avanço. |
| Okopujie, <i>et al.</i> (2018) | Al 1061 | HSS | Torneamento | Desgaste da ferramenta reduzido pelo aumento da rotação. |
| Bhusahn, <i>et al.</i> (2010) | Al 7075 | Carboneto e inserto de PCD | Torneamento | Desgaste da ferramenta reduzido pelo aumento da rotação. |

Fonte: Adaptado de (Soren, *et al.*, 2019).

A **temperatura de corte** é um parâmetro bastante importante na maquinagem. O aumento da velocidade de rotação e de avanço levam a um aumento da temperatura até um certo limite, sendo que depois tem tendência a descer a partir de determinados valores de aumento. Deve ser então encontrada a relação ótima entre a temperatura e os parâmetros de corte, pois é atingida assim uma produtividade maior, com o benefício de que o calor não excessivo não afeta a performance da ferramenta. Aparas maiores levam a maior fricção na zona de corte, o que pode resultar num aumento de temperatura (Soren, *et al.*, 2019).

A **microestrutura do material a cortar** é um aspeto muito importante no processo de corte de um material, uma vez que, durante o processo de conformação do material podem existir vários fatores (e.g., temperatura e trabalhos de deformação)

que conduzem o material a ter uma microestrutura, ou não, mais benéfica para o processo de maquinagem (Soren, *et al.*, 2019).

Para além do trabalho anteriormente mencionado, serão de seguida apresentados diversos trabalhos bastante distintos uns dos outros, no entanto, todos referentes ao estudo da maquinagem de ligas de alumínio.

A maquinagem de ligas de alumínio a alta velocidade é um processo bastante importante na fabricação de componentes desta liga, pois conseguem-se altas taxas de remoção de material em ciclos de trabalho mais curtos quando comparada à maquinagem mais tradicional. A isto junta-se o facto de em muitas circunstâncias não serem necessárias operações de desbaste e posterior acabamento, pois um corte único é suficiente para produzir bom acabamento superficial. As forças de corte durante o processo de maquinagem são menores e a apara aderente característica de algumas ligas de alumínio tende a desaparecer neste estilo de maquinagem (Rao, B e Shin, Y.C, 2001).

Deve ser introduzido um sistema de refrigeração eficiente na maquinagem de ligas de alumínio, em que é necessário produzir cavidades fundas, ou paredes de espessura fina em que é necessário um bom escoamento de apara (e.g., MQL) (L N López De Lacalle, Lamikiz, Sánchez, & Cabanes, 2001).

Yeganefar, *et al.* (2019) realizaram estudos sobre a maquinagem de ligas de alumínio 7075 – T6 e 7050 – T7451 usadas na indústria aeronáutica de forma avaliar forças de corte, desgaste da ferramenta de corte e o acabamento superficial das ligas após a maquinagem. O estilo de maquinagem adotado foi a fresagem de canais (2mm de profundidade por 55mm de comprimento) com fresas de topo plano com três pastilhas de corte revestidas com carbonitreto de titânio (TiCN) em blocos retangulares.

Dos estudos que estes autores realizaram, puderam concluir que o acabamento superficial de ambas as ligas, avaliando rugosidade média (Ra) e rugosidade média quadrática (Rq) é pior quando o corte é realizado a baixas velocidades de corte e por sua vez rotação da ferramenta. A diferença entre as duas rugosidades avaliadas tornou-se mais notória quando foi aumentado o avanço por gume de corte. Ainda foi observado que a rugosidade aumenta com o desgaste progressivo das pastilhas de corte. Observou-se fratura das pastilhas de corte em certas zonas na maquinagem da liga 7075 – T6, fenómeno que os autores atribuem a efeitos térmicos. Ainda nesta liga e devido à geração de aparas pequenas (maquinagem a alta velocidade), estas aderem à superfície das pastilhas levando ao seu rápido desgaste. A apara aderente, no entanto, foi observada em ambas as ligas (Yeganefar, Niknam, & Songmene, 2019).

Rao e Shin (2001) realizaram estudos de maquinagem a alta velocidade, aplicando a operação de facejamento em ligas de alumínio 7075 – T6, utilizando ferramentas com insertos de carbonetos e ferramentas com insertos de diamante, onde avaliaram forças de corte, tensões residuais pós maquinagem e a rugosidade do material. No trabalho experimental a velocidade de corte variou de 527m.min⁻¹ a 1 585m.min⁻¹ e

*Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075.
Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem*

profundidades de corte de 1,27mm e 2,54mm. No que toca às pastilhas de corte, notaram que enquanto a de diamante permanecia intacta devido à sua maior dureza a de carboneto aparecia desgastada para as várias velocidades de trabalho estudadas. A morfologia das aparas foi também avaliada, não tendo sido encontrada diferença quando a velocidade de corte varia, mas sim quando a velocidade de avanço é alterada. Em relação ao acabamento superficial, notaram que este melhora com o aumento da velocidade de corte e por conseguinte quando a rotação da ferramenta aumenta até um ponto ótimo, com posterior tendência a piorar para rotação superior. O aumento da profundidade de corte tem tendência a piorar a rugosidade superficial. Relativamente às tensões residuais, conclui-se que maiores avanços produzem tensões residuais de compressão maiores. Porém, o aumento da velocidade e profundidade de corte atenua este efeito (Rao, B e Shin, Y.C, 2001).

Devido às características das ligas de alumínio, nomeadamente a sua baixa massa volúmica, moderada a alta resistência, dependente da série da liga e do tratamento térmico aplicado à mesma, alta resistência à corrosão, boa conformabilidade e maquinabilidade, bem como relativo baixo custo, estas são muito usadas em aplicações da indústria aeronáutica e aeroespacial em componentes de alta rigidez de paredes finas para se obter a melhor relação de peso e rigidez. Alguns problemas que podem estar relacionados com a maquinagem deste tipo de componentes são o mau acabamento superficial e por sua vez rugosidade e deflexão excessiva da parede fina. Consequentemente, estas características menos abonatórias vão influenciar a resistência à fadiga e à corrosão das peças. Dito isto, maquinar este tipo de geometrias exige alta precisão nos parâmetros envolvidos (Cheng, *et al.*, 2020).

Cheng, *et al.* (2020) estudaram a maquinagem por fresagem deste tipo de geometrias com recurso a uma fresa integral de topo plano de metal duro de 12mm de diâmetro, aplicada a um bloco de alumínio 5083 retangular. O objetivo foi estudar a influência dos parâmetros de corte, nomeadamente a rotação da ferramenta, a velocidade de avanço, a largura de corte e a profundidade de corte, na rugosidade superficial (lateral e longitudinal ao sentido do corte) e a deflexão das paredes finas, avaliando a precisão dimensional com uma sonda numa CMM (Máquina de Medição de Coordenadas). Os parâmetros de corte utilizados para o efeito encontram-se indicados na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Parâmetros de corte e intervalos de valores utilizados.

| Parâmetros de Corte | Símbolos | Unidades | Intervalo de valores | |
|-----------------------|----------|----------------------|----------------------|--------|
| | | | Mínimo | Máximo |
| Rotação | N | R.P.M | 9 000 | 15 000 |
| Velocidade de Avanço | v_f | mm.min ⁻¹ | 3 600 | 9 000 |
| Profundidade de Corte | a_p | mm | 0,1 | 0,3 |
| Largura de Corte | a_e | mm | 3 | 7 |

Fonte: Adaptado de (Cheng, *et al.*, 2020).

Concluiu-se nesse trabalho que a rugosidade avaliada tanto na longitudinal como na transversal é influenciada pelos vários parâmetros estudados de forma similar, enquanto, a deflexão é influenciada na sua maioria pela profundidade de corte.

Numa abordagem diferente Shamsuddin, *et al.* (2013) estudaram a influência de várias estratégias de maquinagem oferecidas pelo *software* Mastercam® na maquinagem de paredes finas de uma liga de alumínio 5083 com tratamento H112, partindo de um bloco retangular. Tendo em vista obter a melhor precisão no que diz respeito à espessura, de todas as estratégias adotadas, o corte em espiral (estratégia *true spiral* do Mastercam®) foi aquela que o melhor resultado alcançou. No entanto, esta não é a estratégia que oferece melhor acabamento superficial no que toca à rugosidade sendo para isto necessário usar um corte paralelo em espiral (estratégia *parallel spiral* do Mastercam®) (Shamsuddin, K.A, A-b Khadir, A.R e Osman, M.H, 2013).

2.3 – Desgaste e Vida das Ferramentas

Todas as ferramentas possuem uma vida útil de trabalho, sendo que existem três modos possíveis de falha das ferramentas de corte, sendo eles enunciados e explicados na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 – Modos de falha das ferramentas de corte.

| Falha por | Explicação |
|------------------------|---|
| Fratura | Falha devido a forças de corte excessivas que levam à fratura frágil das ferramentas de corte. |
| Temperatura excessiva | Falha devido ao aumento excessivo da temperatura de corte para o material da ferramenta em questão. Isto leva ao amaciamento da ferramenta levando subsequentemente a deformação plástica e perda das arestas afiadas de corte. |
| Acumulação de desgaste | Falha devido à acumulação de desgaste na zona de corte das ferramentas, levando à perda da forma original da ferramenta e por sua vez perda de eficiência no corte. |

Fonte: Adaptado de (Groover, 2010).

Dos três modos de falha o menos prejudicial é o por acumulação de desgaste, pois, leva ao uso mais prolongado da ferramenta de corte. Assim, é possível controlar os parâmetros de corte para obter o modo de falha mais favorável. A falha por fratura e por temperatura podem-se enquadrar em falhas abruptas que levam ao fim de vida da ferramenta enquanto a falha por acumulação de desgaste enquadra-se num tipo de falha progressiva por remoção gradual de material da ferramenta.

Existem muitos fatores que influenciam a vida de trabalho da ferramenta. Segundo Davim (2008), esses fatores são o material a cortar, o material da ferramenta, a geometria da ferramenta (ângulos das arestas de corte, da ponta, de ataque, de saída, de inclinação da aresta de corte e raio de curvatura da ponta), as condições de corte e o fluido de corte usado (Davim, 2008).

Os mecanismos de desgaste (adesão, abrasão, oxidação, entre outros) que surgem e se desenvolvem na ferramenta, levam a que ocorram diferentes tipos de desgaste relacionados com a zona da ferramenta onde ocorrem. O desgaste pode então surgir na forma de desgaste de flanco e de cratera (Groover, 2010), os quais podem ser vistos na Figura 2.8.

O **desgaste de flanco** surge na face de incidência da ferramenta (flanco da ferramenta), resultando do contacto entre o material a cortar e a face adjacente à aresta de corte da ferramenta, podendo ser medido em relação à largura da zona desgastada. (Figura 2.8 b)).

O **desgaste de cratera** surge na face de ataque da ferramenta e ocorre devido à reação química entre o material a cortar e a ferramenta de corte, devido à ação tribológica da apra com a ferramenta, podendo ser medido em relação à profundidade ou área da cratera. (Figura 2.8 c)).

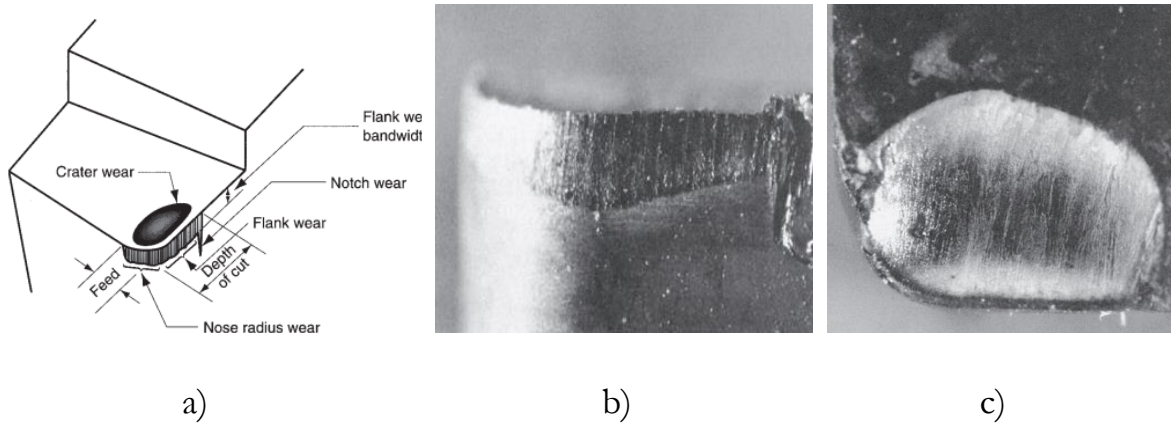
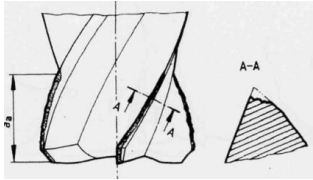
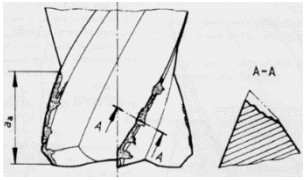
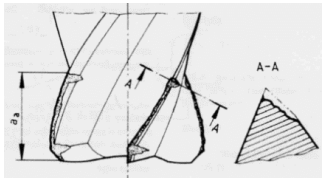
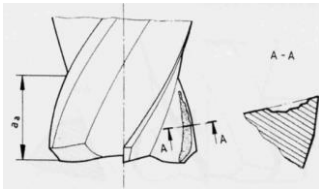
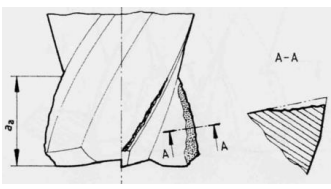
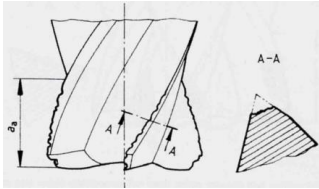
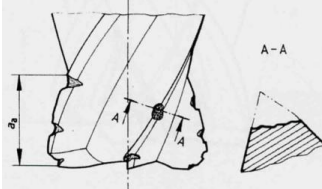
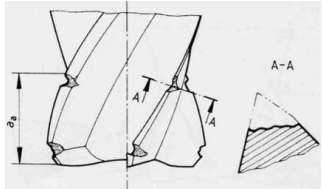
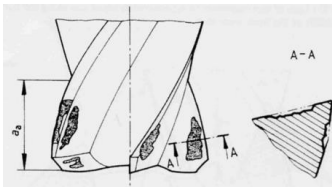
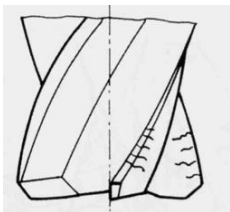
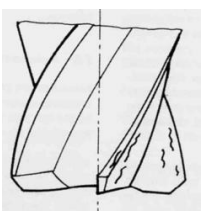
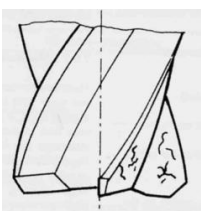


Figura 2.8 – Tipos de desgaste: a) representação esquemática do desgaste; b) desgaste de flanco; c) desgaste de cratera (Groover, 2010).

Uma vez que, no trabalho experimental foi utilizada uma fresa de topo plano, é importante referir os tipos de desgaste associados a este tipo de ferramenta. Segundo a norma ISO 8688 – 2 (1989), uma fresa de topo plano pode sofrer vários tipos de desgaste, classificando a norma os tipos de desgaste enumerados e representados na Tabela 2.10.

Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075.
Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem

Tabela 2.10 – Desgaste de um fresa de topo plano.

| Desgaste de flanco (do inglês, <i>Flank wear</i>) – VB | | |
|---|---|---|
| Uniforme | Não uniforme | Localizado |
|  |  |  |
| Desgaste de face (do inglês, <i>Face wear</i>) – KT | | |
| Cratera | Em escada | |
|  |  | |
| Desgaste de lascamento (do inglês, <i>Chipping</i>) – CH | | |
| Uniforme | Não uniforme | Localizado |
|  |  |  |
| Desgaste de descamação (do inglês, <i>Flaking</i>) – FL | | |
|  | | |
| Desgaste de fissuras (do inglês, <i>Cracks</i>) – CR | | |
| Fissuras de pente | Fissuras paralelas | Fissuras irregulares |
|  |  |  |

Fonte: Adaptado de (International Standard, 1989).

De acordo com Davim (2008), a medição do desgaste pode ser feita de maneira direta ou indireta. Os métodos diretos são baseados na medição da perda de material da ferramenta durante o corte, enquanto os indiretos baseiam-se na medição de parâmetros de controlo relacionados com o desgaste e/ou fratura das ferramentas (Davim, 2008).

São exemplos de alguns métodos diretos a análise ótica e a apalpação mecânica.

A **análise ótica** é a forma mais comum desta análise, recorrendo ao uso de um meio de ampliação, como é o caso de uma lupa, de forma a avaliar o desgaste da ferramenta. Formas mais complexas desta análise e mais eficazes são o uso de microscópicos, sendo que conforme o tipo de microscópio (e.g., ótico ou eletrónico) a análise pode ser mais ou menos detalhada.

Na **apalpação mecânica** o equipamento mais simples para este tipo de operação é o comparador com leitura em centésimas de milímetro que é capaz de medir o desgaste na face de ataque da ferramenta de corte. Para medições mais rigorosas podem ser usados perfilómetros.

No que diz respeito aos métodos de medição do desgaste de forma indireta, é de salientar a avaliação da potência de maquinagem, da força de corte, da evolução da temperatura na zona de corte e da vibração obtidos durante o corte.

A **avaliação da potência de maquinagem** é uma técnica pouco eficaz, devido à pequena variação da potência de maquinagem com o aumento do desgaste da ferramenta. No entanto, é um método de fácil implementação em qualquer máquina ferramenta e aplicável a qualquer tipo de operação.

Na **avaliação da força de corte**, são usadas células de carga ou dinamómetros montados nos *spindles* das máquinas, nos dispositivos de fixação das ferramentas ou nas mesas de trabalho, os quais servem para medir a força exercida durante o corte. Esta força tende a aumentar com o desgaste progressivo da ferramenta.

A **avaliação da temperatura na zona de corte** é feita a medição da temperatura na zona de corte para perceber se a ferramenta está a sofrer desgaste excessivo ou não. A temperatura de corte aumenta com o aumento do desgaste da ferramenta.

Durante a **avaliação da vibração**, são usados acelerómetros, por exemplo, de forma a medir as vibrações resultantes durante o corte. As vibrações tendem a aumentar com o desgaste da ferramenta, podendo ser o espectro de vibração um indicador da evolução do desgaste.

A avaliação indireta do desgaste, embora possa ser menos objetiva do que a avaliação direta, tem a vantagem de poder ser implementada em tempo real, pois não necessita que o processo de corte seja interrompido para a sua avaliação, o que é uma vantagem para ser adotada em processos industriais.

2.4 – Conceitos da Análise de Vibrações

A vibração pode ser entendida como o movimento repetido de um objeto durante um certo intervalo de tempo, em torno da sua posição de equilíbrio/repouso (Aroeira, 2005), (Girdhar, 2004) e (Morais, 2018). Um objeto para se considerar um sistema vibratório deve possuir massa (meio que guarda energia cinética), rigidez (meio guarda energia potencial) e pode possuir amortecimento (meio que serve para reduzir gradualmente a energia) (Morais, 2018). Assim a maior parte dos sistemas vibratórios na sua forma mais simples podem ser representados por um diagrama de massa-mola-amortecedor (Girdhar, 2004).

Quanto ao tipo de vibrações, estas podem ser divididas em três tipos fundamentais, sendo eles as aleatórias, transientes e periódicas. As vibrações aleatórias raramente ocorrem durante o trabalho de máquinas, as transientes, pelo seu caráter momentâneo ocorrem durante o arranque e paragem de equipamentos, sendo as vibrações periódicas as mais importantes, quando se está a realizar estudos envolvendo máquinas. As vibrações periódicas são caracterizadas pela repetição de fenómenos, sendo que um ciclo é suficiente para caracterizar o tipo de onda. No entanto, é comum em vários fenómenos vibratórios o movimento ser um conjunto de várias vibrações periódicas sobrepostas. Neste caso é importante por vezes tentar separar as várias ondas que representam o espectro de vibração, de forma a avaliar cada onda vibratória em separado, sendo esta a análise feita no domínio da frequência (Aroeira, 2005). A Tabela 2.11 mostra as Equações (2.7), (2.8) e (2.9) representantes de uma onda harmónica (caso particular de uma onda periódica que pode ser representada por uma função de sinusoidal), em função do deslocamento, velocidade e aceleração, respetivamente.

Tabela 2.11 – Equações de uma onda harmónica.

| Movimento | Equação |
|---------------------------------|--|
| Deslocamento (m) | $x = x_0 \sin(\omega t)$ (2.7) |
| Velocidade (m.s ⁻¹) | $\frac{dx}{dt} = v = x_0 \omega \cos(\omega t)$ (2.8) |
| Aceleração (m.s ⁻²) | $\frac{dv}{dt} = a = -x_0 \omega^2 \sin(\omega t)$ (2.9) |

Fonte: Adaptado de (Girdhar, 2004).

É importante quando se realiza a análise de vibrações conhecer os termos associados às ondas, ainda que muitas vezes o sinal seja o conjunto de várias ondas, por forma a melhor compreender e analisar o sinal adquirido. Alguns dos termos mais importantes são o de ciclo, período, frequência, amplitude de pico, amplitude pico a pico, valor eficaz, comprimento de onda e fase (Aroeira, 2005), (Girdhar, 2004) e (Morais, 2018), estando na Figura 2.9 a representação de 4 ondas com características diferentes dos vários termos a seguir enunciados.

O **ciclo** é o percurso da onda desde um ponto a outro ponto nas mesmas condições (deslocamento, velocidade ou aceleração iguais e em termos de decréscimo ou aumento).

O **período** é o intervalo de tempo entre dois pontos na mesma onda situados na mesma posição. Tempo que a onda demora a realizar um ciclo completo. Pode ter a sua unidade de medida em segundos. Na Figura 2.9 é possível verificar que as ondas 2, 3 e 4 possuem o mesmo período, sendo este menor do que o período da onda 1.

A **frequência linear** é o inverso do período, definindo a regularidade com que é efetuado cada ciclo. Pode ter a sua unidade em Hertz (ciclos por segundo) ou em radianos por segundo as quais se podem relacionar. Na Figura 2.9, consegue-se verificar que com as ondas 2, 3 e 4 têm uma frequência superior à onda 1.

A **amplitude de pico** é a altura que vai desde a posição de equilíbrio até ao pico da onda. Observa-se na Figura 2.9 que as ondas 1 e 2 são de maior amplitude de pico qua as ondas 3 e 4.

A **amplitude pico a pico** é a altura que vai desde a ponto máximo da onda até ao mínimo. Ao contrário da amplitude de pico, consegue, por exemplo, descrever o descolamento total de um objeto. Verifica-se na Figura 2.9 que as ondas 1 e 2 são de maior amplitude pico a pico qua as ondas 3 e 4.

O **valor eficaz** de uma onda (do inglês, RMS – *Root Mean Square*), é uma medida que indica a energia de uma onda e por sua vez a sua capacidade destrutiva. Esta medida tem em consideração todo o histórico da onda, logo é amplamente usada no estudo das vibrações. Com o RMS, amplitudes (sejam pico a pico ou de pico) muito altas ou baixas que aparecem pontualmente, conseguem ser atenuadas, conseguindo-se uma melhor estimativa da energia real da onda. O valor de RMS é dado pela Equação (2.10). Na Figura 2.9 as ondas 1 e 2 apresentam maior valor de RMS que as ondas 3 e 4.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (2.10)$$

O **comprimento de onda** é a distância linear entre dois pontos na mesma onda com o mesmo valor de amplitude. Pode ser medido nos mesmo pontos que o

*Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075.
Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem*

período, só que invés de uma medida temporal é dada uma medida espacial. Quanto maior a frequência menor será o comprimento de onda. Consegue-se observar na Figura 2.9 que as ondas 2, 3 e 4 de maior frequência têm então menor comprimento de onda que a onda 1.

A **fase** é o ângulo da posição inicial da onda (tempo de medição/análise igual a zero) e é medida em radianos ou graus. Ondas da mesma frequência e amplitude podem ter ângulos de fase diferentes levando a que estas quando representadas no mesmo gráfico apareçam desfasadas. Na Figura 2.9 as ondas 1, 2 e 3 apresentam a mesma fase, tendo a onda 4 uma fase diferente das demais.

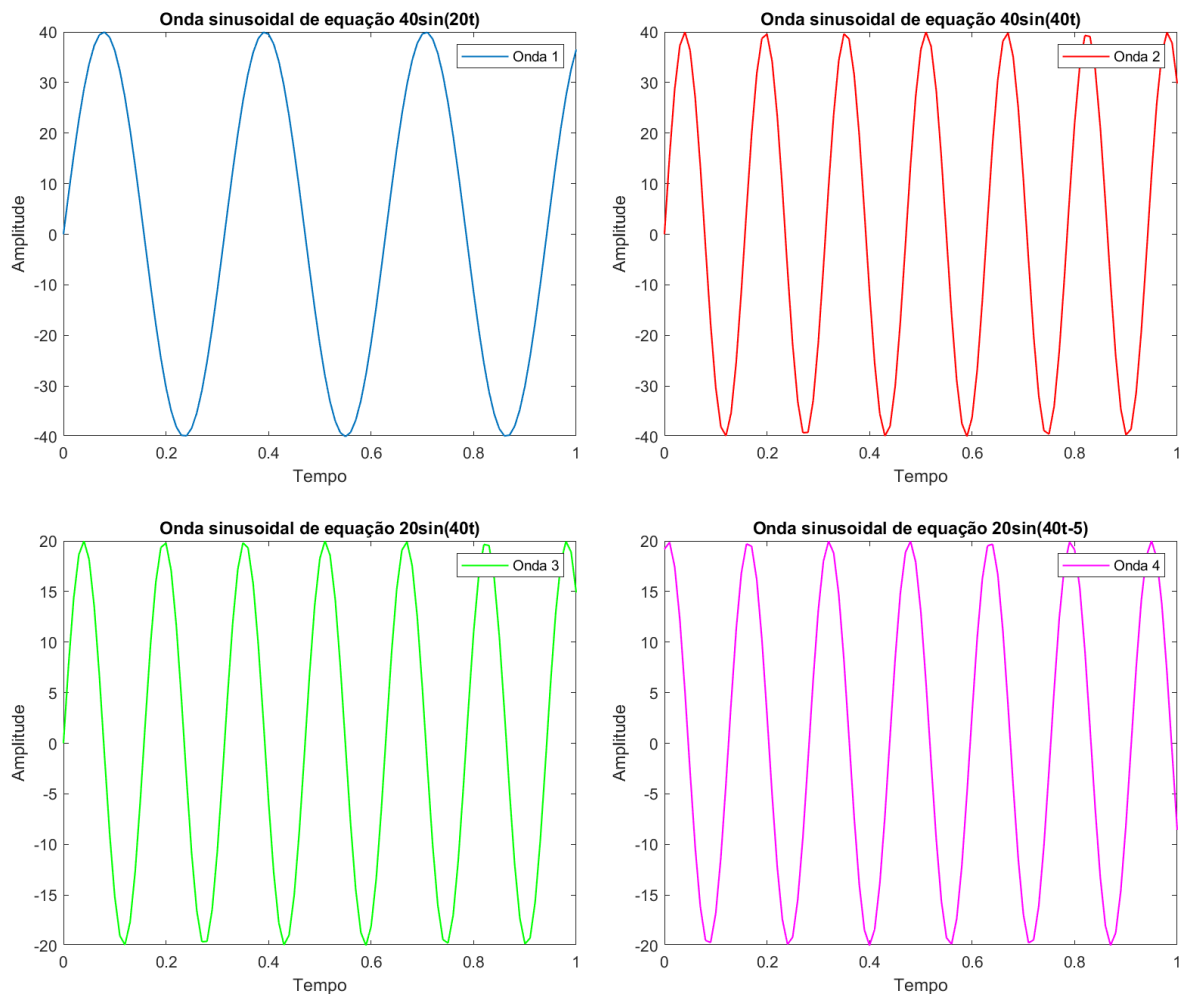


Figura 2.9 – Ondas sinusoidais de diferentes características.

Outra característica importante de enunciar é a **frequência natural** de um sistema. Esta depende da massa e rigidez do sistema, sendo que quando a excitação desse sistema tiver uma frequência igual à frequência natural do sistema, este entra em ressonância. **Ressonância**, significa que o sistema vai vibrar com altas amplitudes podendo mesmo chegar à ruína. Da **frequência natural** podem surgir **harmônicos** que são frequências múltiplas (múltiplos inteiros) da natural, e que em conjunto formam a onda vibratória complexa.

2.4.1 – Parâmetros de Avaliação da Vibração

O espectro de vibração pode ser obtido e analisado em deslocamento, velocidade e aceleração, sendo que a aquisição pode ser feita numa unidade de medida e a análise noutra, por meio de conversão. Dependendo do tipo de análise que se pretende fazer (avaliar o deslocamento, velocidade ou aceleração de um objeto e/ou sistema) a aquisição e análise deve ser feita na unidade de medida respetiva quando possível ou no caso da análise usando métodos de conversão.

Existem, guias que indicam quando se deve avaliar a vibração em termos de deslocamento, velocidade ou aceleração. O parâmetro a escolher depende da frequência de vibração do meio a analisar. Espectros de vibração de baixas frequências estão associados ao uso do deslocamento, de médias frequências estão associados ao uso da velocidade e de altas frequências associados ao uso da aceleração (Aroeira, 2005) e (Girdhar, 2004). A Tabela 2.12 apresenta de forma sucinta as frequências associadas a cada parâmetro de medição e análise, bem como o motivo do seu uso.

Tabela 2.12 – Parâmetros de análise de vibrações de acordo com a frequência de trabalho.

| Frequência | Parâmetro | Explicação |
|----------------|---------------------------------|--|
| < 10Hz | Deslocamento (m) | Nesta gama de frequências, a intensidade das vibrações medidas em deslocamento é mais pronunciada, enquanto, a intensidade das vibrações avaliada em aceleração é muito fraca e em velocidade moderada. |
| 10Hz a 1 000Hz | Velocidade (m.s ⁻¹) | A velocidade é um bom indicador da severidade da vibração nesta gama de frequência. É de salientar que é o parâmetro que dá valores de vibração mais estáveis em toda a gama de frequências, no entanto apresenta valores menores de intensidade que o deslocamento para baixas frequências e que a aceleração para altas frequências, devendo ser usado na gama intermédia. |
| > 1 000Hz | Aceleração (m.s ⁻²) | A altas frequências a aceleração representa melhor o espectro de vibração que o deslocamento e a velocidade (apresentando estes dois parâmetros intensidade de vibração menos pronunciada). |

Fonte: Adaptado de (Girdhar, 2004).

A Figura 2.10 mostra como evolui a resposta da amplitude de vibração em função da frequência para os três parâmetros acima descritos.

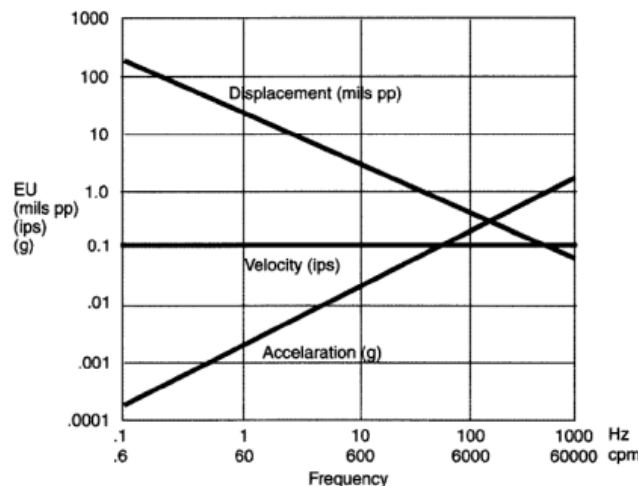


Figura 2.10 – Amplitude de vibração em função da frequência para o deslocamento, velocidade e aceleração (Girdhar, 2004).

A aquisição do sinal de vibração em diferentes unidades pode ser feita com recurso a diferentes equipamentos. De forma a adquirir o espectro de vibração em amplitude de deslocamento são usados transdutores de Eddy (sondas de proximidade) que medem variações no campo magnético e trabalham por comparação. Conseguem medir o espectro de vibração até casos praticamente estacionários, no entanto possuem um limite de frequência superior de cerca de 1 000Hz. Os sensores usados para medir a amplitude de vibração em velocidade são de uma forma muito simplificada constituídos por uma bobine e um íman onde a tensão gerada na bobine é proporcional à velocidade relativa entre os componentes. Estes sensores têm uma frequência limite inferior de cerca de 10Hz e superior de 1 000Hz. Para se medir a vibração em amplitude de aceleração os transdutores mais comuns são os acelerómetros, sendo os mais usuais os do tipo piezoelétrico. Nestes quando o cristal piezoelétrico sofre deformação é produzida uma tensão proporcional à deformação e por sua vez à aceleração. Conseguem medir desde baixas a altas frequências (Aroeira, 2005), (Girdhar, 2004) e (Randall, R.B, 2011). Devido ao acelerómetro ter sido o aparelho usado na aquisição do sinal de vibração no trabalho realizado, este tipo de transdutor vai ser descrito com maior detalhe no Capítulo 3.3.

Quando a aquisição do sinal é feita numa certa unidade de medida e é conveniente que a análise seja realizada em outra unidade é necessário recorrer a métodos de conversão. Visto que, os acelerómetros são dos equipamentos mais comuns para a aquisição do sinal de vibração, de forma a se obter posteriormente os dados adquiridos em velocidade e deslocamento é necessário usar integração numérica. Antes de se proceder à integração é necessário filtrar os dados adquiridos, por forma a obter valores mais precisos após integração. Esta filtragem dos dados adquiridos deve ser feita, pois o sinal adquirido geralmente possui desvios e distorções devido ao *offset* de zero dos transdutores, ao efeito de *drift* (desvio dos valores por efeitos térmicos) e a ruído no sinal. Estas distorções podem aparecer como constantes no sinal e quando é efetuada a integração passam a funções lineares, levando o sinal a

tomar uma forma de rampa e ter um desvio gradual da linha de zero. Han, *et al.* (2019) estudaram vários métodos de filtragem do sinal de vibração para a conversão de amplitude em aceleração para deslocamento, onde chegaram à conclusão de que o método mais eficaz nos estudos realizados é a aplicação de um filtro digital *butterworth* de 4º ordem de *highpass* (Han, Park, Park, Juhyong, & Yong, 2019). Neste filtro é necessário introduzir a frequência de corte desejada. O sinal em forma de vetor é então substituído pelo vetor gerado pelo filtro, em que as frequências abaixo da de corte (ruído não desejado de analisar) são em teoria eliminadas do sinal. Na realidade este filtro não elimina na totalidade as frequências não desejadas, sendo que quanto maior é a ordem do filtro maior é a sua eficácia. Outros métodos que podem ser usados na filtragem do sinal com recurso ao uso de *softwares* como o MATLAB®, são os de aplicar funções que removam o *offset* de zero dos transdutores e removam a tendência polinomial dos dados adquiridos. Após a filtragem dos dados pode recorrer-se à integração numérica para se obter os resultados pretendidos (MathWorks, 2023). É de salientar que a filtragem de dados também pode ser feita em dados adquiridos com a unidade pretendida, de forma a eliminar-se a parte do sinal não desejada

2.4.2 – Análise do Sinal no Domínio do Tempo e no Domínio da Frequência

A análise do sinal de vibração pode ser realizada no domínio do tempo, bem como no domínio da frequência.

O sinal no domínio do tempo pode ser entendido como um conjunto de vários sinais com diferentes frequências que vão criar o espectro de vibração. Os ruídos, harmónicos (múltiplos da frequência fundamental que geram ondas de frequência superior que se sobrepõem a esta) e vibrações provenientes de outras fontes podem dificultar a análise, sendo então útil recorrer à filtragem de dados ou à passagem dos mesmos para o domínio da frequência. O espectro de vibração no domínio do tempo mostra a vibração no seu estado bruto, sendo a análise neste domínio um bom indicador do estado global do componente analisado. Maiores amplitudes da vibração registadas no componente em análise, estão associadas a um pior estado ou maior degradação do componente.

Caso se queira perceber a influência de cada frequência na vibração, a análise terá de ser feita no domínio da frequência. A passagem do domínio do tempo para a frequência é feita aplicando a Transformada Rápida de Fourier (do inglês, FFT – *Fast Fourier Transform*). A análise no domínio da frequência permite identificar os vários fenómenos que antes estavam misturados no domínio do tempo, conforme ilustra a Figura 2.11. O teorema de Fourier diz que um sinal complexo pode ser separado em sinais individuais de senos e cossenos cada um com uma certa frequência. As Equações (2.11) e (2.12) representam a Transformada Rápida de Fourier (passagem do domínio do tempo para a frequência) e a transformada inversa, ou seja, passagem do domínio da frequência para o domínio do tempo respetivamente.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{i2\pi kn}{N}} \quad (2.11)$$

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{\frac{i2\pi kn}{N}} \quad (2.12)$$

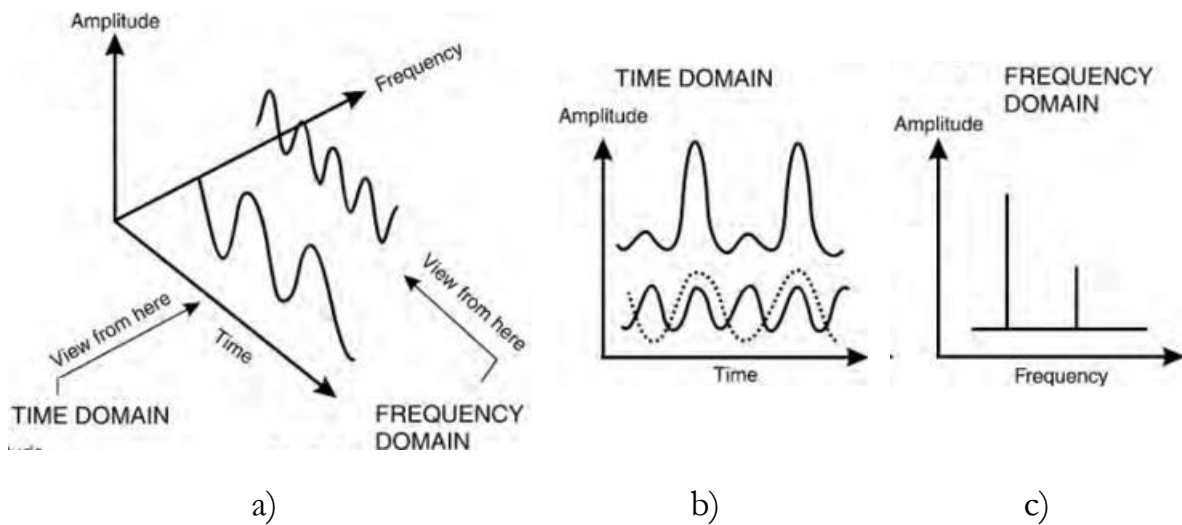


Figura 2.11 – Espectro de vibração: a) domínio do tempo e da frequência; b) domínio do tempo; c) domínio da frequência (Girdhar, 2004).

Apesar de ser difícil interpretar matematicamente a FFT, na prática esta traduz-se em dividir o sinal adquirido (desde x_0 a x_{N-1}) numa soma de sinais sinusoidais. Um dos aspetos importantes a considerar na aplicação da FFT, é o número de pontos da amostra que deve ser uma potência de base 2 ($N=2^n$). Além disso, ao aplicar a FFT assume-se que o sinal está disponível em todo o domínio do tempo, o que nem sempre acontece, sendo necessário escolher um intervalo apropriado para realizar a transformada. Devido a este corte que se faz no sinal, ao escolher um intervalo é quase impossível que o mesmo seja periódico, o que pode levar a que aconteça um fenómeno conhecido como dispersão espectral. Deste fenómeno resulta que uma certa frequência escape e/ou se disperse para frequências adjuntas, o que pode diminuir a sua amplitude e criar picos de frequências não existentes no sinal ou aumentar as laterais já existentes, de tal forma que o pico principal a analisar fique dissimulado pelos restantes, como pode ser visto na Figura 2.12. Estas frequências laterais também são conhecidas como *sidebands*.

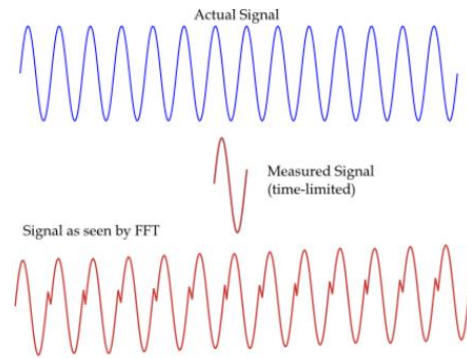


Figura 2.12 – Dispersão espectral na FFT (Pérez, E.T, 2015).

De forma a evitar ou pelo menos mitigar este efeito, no cálculo da FFT é possível estabelecer janelas em que o sinal a transformar seja periódico. Aplicar janelas (*Windowing*) significa multiplicar o sinal a transformar por uma função que obriga o sinal a ser periódico (Girdhar, 2004), (National Instruments, 2023) e (Vibration Research, 2023). A Figura 2.13 mostra o efeito do uso de uma janela num sinal não periódico.

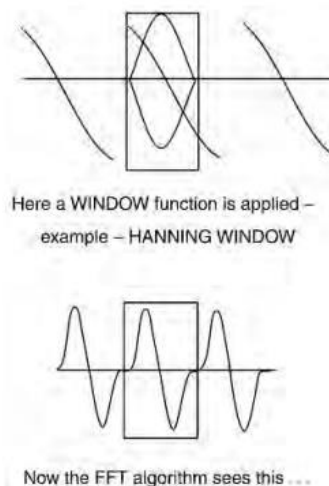


Figura 2.13 – Janela Hann na FFT (Girdhar, 2004).

Existem vários tipos de janelas (funções matemáticas) que podem ser usadas e a sua escolha vai depender se ao converter o sinal do domínio do tempo para a frequência se pretende maior precisão na amplitude do sinal ou no valor da frequência, sendo que todas as janelas têm o objetivo de minimizar a dispersão espectral. Alguns exemplos de janelas são a Retangular (função matemática igual a 1, ou seja, a janela não altera o sinal), Hann (também chamada de Hanning), Hamming, Flat top, Kaiser, Bessel, Blackman, Barlett, entre outras.

As janelas Hann e Hamming dão um bom compromisso em relação à precisão quanto à amplitude e frequência, podendo ser aplicadas para análise de regimes permanentes de vibração/trabalho sendo a janela Flat top preferida quando se

pretende obter maior precisão no pico de amplitude a analisar. No entanto, este tipo de janela leva com que os picos de amplitude das frequências laterais também sejam maiores, o que pode esconder as baixas frequências. A janela Retangular (aplicação da FFT diretamente) é a que oferece maior precisão na leitura da frequência prejudicando a leitura da amplitude. Em geral quando não se conhece bem o tipo de sinal a analisar e o que se pretende retirar do mesmo, a melhor escolha é a janela Hann, sendo satisfatória 95% das vezes (National Instruments, 2023). Outra forma de evitar o vazamento espectral é usar comprimentos para realizar a FFT maiores, visto que, o fenómeno é mais intenso para comprimentos mais curtos. Acima de $2^{12}=4096$ o fenómeno de dispersão já é mínimo e a amplitude do sinal baixa pouco, podendo até ser usada uma janela Retangular.

No Apêndice A é possível visualizar as janelas mais utilizadas neste trabalho, sendo estas as janelas Hann, Hamming, Flat top e Retangular, bem como as funções matemáticas associadas.

Em certas situações a frequência de uma onda calculada pela FFT pode não coincidir na perfeição com frequência real no domínio do tempo. A transformada tenta fazer a melhor estimativa, no entanto, só consegue fornecer valores que estejam o mais próximo possíveis da frequência original para a resolução em questão. A resolução é o quociente da frequência de aquisição pelo comprimento da FFT (Equação (2.13)). A resolução define-se como a variação mínima que pode existir na frequência, podendo nunca conseguir coincidir assim a frequência calculada com a original.

$$\text{Resolução} = \frac{\text{Frequência de aquisição}}{\text{Comprimento da FFT}} \quad (2.13)$$

2.4.3 – Frequência Usada na Aquisição do Sinal de Vibração

De forma a não se perder informação pertinente do sinal de vibração a frequência ou taxa de aquisição usada no sistema de aquisição deve ser no mínimo duas vezes superior à frequência mais alta de trabalho que tenha interesse. Isto é conhecido como o teorema de Nyquist (Equação (2.14)) e pode ser aplicado a qualquer tipo de sinal que se pretende obter e analisar, não sendo obrigatório que este seja de vibração. A razão para a frequência de aquisição necessitar de respeitar o teorema de Nyquist, está relacionada com o facto do sinal analógico a adquirir ser recolhido em certos intervalos de tempo, sendo necessário uma taxa grande o suficiente de forma a não se perder informação do sinal (Pérez, E.T, 2015).

$$F_{\text{aquisição}} = 2F_{\text{máx}} \quad (2.14)$$

Caso não se respeite este teorema irá ser perdida informação que representa realmente o espectro adquirido, conhecido como fenómeno de *aliasing*, onde a onda captada não representa o sinal real devido à baixa taxa de aquisição. A diferença entre

o sinal de uma onda adquirida pelo teorema de Nyquist e uma onda adquirida sem o uso do teorema pode ser vista na Figura 2.14.

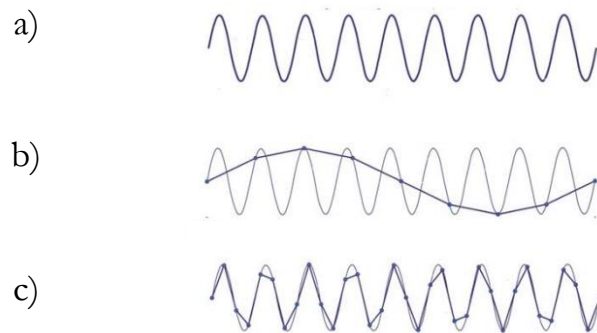


Figura 2.14 – Aquisição do sinal: a) sinal real; b) sinal captado a baixa frequência; c) sinal captado pelo teorema de Nyquist (Pérez, E.T, 2015).

É de salientar que quanto maior a taxa de aquisição, mais fidedigna será a representação do sinal real. No entanto, devido a possíveis limitações dos aparelhos na taxa de aquisição, em vez de usar taxas de aquisição bastante elevadas, na prática é usado muitas vezes valores mais baixos de aquisição, desde que seja respeitada a frequência calculada pelo teorema de Nyquist (Pérez, E.T, 2015).

Na prática, o sinal adquirido não deveria conter nenhuma frequência acima de metade da frequência de aquisição. Porém, na realidade isto não acontece, podendo esta situação ser combatida com recurso a filtros digitais. Uma forma de fazer isto e combater ainda mais o fenómeno de *aliasing* (tentando só mesmo captar todas as frequências de interesse) é usar um filtro *lowpass* (Girdhar, 2004). Este filtro deve ser usado para metade da frequência de amostragem, ou pelos menos para a frequência máxima de interesse, tendo esta de ser inferior ou igual a metade da de amostragem. Ou seja, frequências acima desta não são adquiridas. Assim, usando a conjugação do teorema de Nyquist e o filtro *lowpass* é possível não perder informação do sinal com o teorema de Nyquist e a não se captar informação não requerida com o filtro *lowpass*, estando assim a obter-se na teoria só o sinal real pretendido.

3 – EQUIPAMENTOS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo destina-se a enunciar e explicar sucintamente os equipamentos que foram necessários à realização do trabalho experimental. É importante compreender o funcionamento dos mesmos para posterior uso e obtenção de resultados no trabalho desenvolvido.

3.1 – Centro de Maquinagem

Os ensaios de maquinagem (fresagem), foram efetuados num centro de maquinagem de cinco eixos vertical da construtora de máquinas ferramenta Haas®. A fresadora em questão é a UMC 750SS (Figura 3.1). A máquina possui um curso máximo de movimentação de 762mm no eixo X e de 508mm nos eixos Y e Z, podendo cada eixo ter movimentos rápidos de 30 500mm.min⁻¹ e uma velocidade de avanço máxima de 16 500mm.min⁻¹. Os eixos rotativos são na mesa de trabalho e a sua configuração é eixo B (rotação em torno do eixo Y) e eixo C (rotação em torno do eixo Z). O eixo B permite rotações desde +35° a -110°, sendo que o eixo C tem uma capacidade rotativa de 360°. A árvore da fresadora está equipada com uma transmissão direta em linha, podendo atingir 22,4kW de potência e 122N.m de binário (às 2 000R.P.M), sendo que a velocidade de rotação do *spindle* está limitada às 15 000R.P.M. Os cones usados são do tipo ISO 40, com apoio na zona de contacto SK40, que obedecem à norma DIN 69871. No que diz respeito à capacidade de armazenamento de ferramentas, o carrossel tem a capacidade de armazenar 40 ferramentas, sendo a capacidade total do equipamento de 40+1 (uma ferramenta montada no *spindle*). Este centro de maquinagem tem a capacidade de efetuar operações a 3 eixos, 3+2 (5 eixos por planos) e 5 eixos simultâneos. A refrigeração possível de usar com esta máquina é a refrigeração externa de baixa pressão e interna de alta pressão (com recurso a bomba de alta pressão). Posteriormente foi acoplado um sistema externo de refrigeração por ar comprimido, o qual pode ser usado aquando da maquinagem dinâmica. Relativamente à medição dos zeros peça, do comprimento e do diâmetro das ferramentas este é realizado com recurso ao Sistema de Sonda sem Fios (do inglês, WIPS – *Wireless Intuitive Probing System*) equipado na máquina.



Figura 3.1 – Fresadora vertical de 5 eixos Haas UMC 750SS (Haas, 2023).

3.2 – Ferramenta de Corte e Sistema de Fixação

O tipo de ferramenta de corte usada no trabalho experimental foi uma fresa integral de topo plano com 3 gumes de corte, 8mm de diâmetro de corte revestida a diboreto de titânio (TiB_2) a qual pode ser vista na Figura 3.2. As ferramentas usadas foram fornecidas pela empresa Palbit[®], como já referido.



Figura 3.2 – Fresa de topo plano usada nos trabalhos experimentais.

Este tipo de geometria de ferramenta apresenta uma nomenclatura específica, sendo que, seguidamente, enunciam-se os conceitos mais importantes associados à geometria desta ferramenta (ASM International, 1995), (Global Cutting Tools, 2023) e (Mitsubishi Materials, 2023).

O **diâmetro de corte** é o diâmetro do círculo que tangencia os vários gumes de corte e é usado para calcular a rotação da ferramenta, através da velocidade de corte fornecida pelos fabricantes.

O **dente** é a zona de corte da base da ferramenta.

O **gume** é a continuação do dente da ferramenta através da haste da mesma.

A **aresta de corte** é a aresta principal dos vários gumes da ferramenta que parte dos vários dentes da ferramenta.

O **passo** é a medida entre os vários gumes de corte.

O **canal de escoamento** da aparta situa-se entre os vários gumes de corte e serve para o escoamento da aparta durante o corte.

O **comprimento total** é a medida de ponta a ponta da ferramenta.

O **comprimento dos gumes de corte** é muitas vezes confundido com o comprimento de corte devido à existência de uma zona inserida ainda no comprimento dos gumes, mas não sendo apta para realizar a fresagem.

O **comprimento de corte** é a profundidade máxima que é possível cortar numa só passagem.

O **ângulo de hélice** é o ângulo formado pela linha de centro da ferramenta e a linha tangente a um dos gumes.

O **ângulo de inclinação radial** é o ângulo formado pela face do dente e uma linha radial, que é perpendicular à aresta de corte.

O **ângulo de inclinação axial** é o ângulo formado pela aresta de corte e o eixo da ferramenta, olhando de forma radial para o ponto de origem do ângulo. Numa fresa de dentes helicoidais corresponde ao ângulo de hélice.

A Figura 3.3 mostra visualmente estes conceitos e outros para uma fresa integral de topo plano.

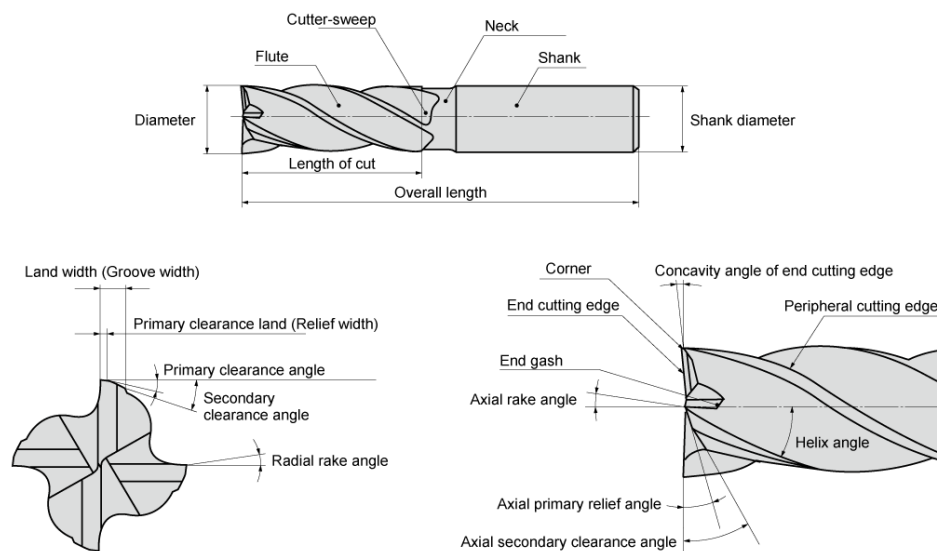


Figura 3.3 – Nomenclatura de uma fresa integral de topo plano (Mitsubishi Materials, 2023).

O material que serve de revestimento para a ferramenta usada (TiB_2) é um cerâmico de elevada resistência e dureza (tendo em certos casos ligas com este constituinte, durezas similares a ligas com diamante na sua constituição). Além disso, ainda possui alta resistência à corrosão (mantendo a mesma até cerca de $1\ 000^\circ C$), elevado ponto de fusão (cerca de $2\ 900^\circ C$), é quimicamente inerte, tem baixa solubilidade em materiais metálicos, baixa resistividade elétrica, baixa resistência ao choque térmico e boa resistência à fratura. É devido a estas características que é então aplicado na maquinagem de componentes metálicos (especialmente em componentes de alumínio de modo a evitar a apara aderente e permitir o bom escoamento da mesma), bem como em outras aplicações tais como: turbinas e bombas, reatores, bicos de

foguetes e câmaras de combustão. Todos os pontos enumerados anteriormente aliados ainda ao baixo atrito gerado pelo diboreto de titânio quando em contacto com outros materiais, levam a que este seja uma escolha bastante vantajosa para revestimento de ferramentas de corte, tendo o uso deste material vindo a expandir no que toca a esta aplicação (Celestino, 2015) e (Ett & Pessine, 1995).

Existem vários processos para se obter o TiB_2 . O mais comum é a sinterização a alta temperatura, sendo este o ideal para o caso de revestimento de ferramentas de corte.

Relativamente ao cone de fixação usado nos trabalhos experimentais a escolha recaiu sobre um cone SK40 de fixação térmica de desbaste para ferramentas com haste de 8mm de diâmetro, com dois canais frontais, os quais permitem o uso de refrigeração interna (Figura 3.4 a)). O cone é da marca Kemmler®, podendo o seu desenho técnico com as dimensões principais ser visto na Figura 3.4 b) e as suas especificações na Tabela 3.1.

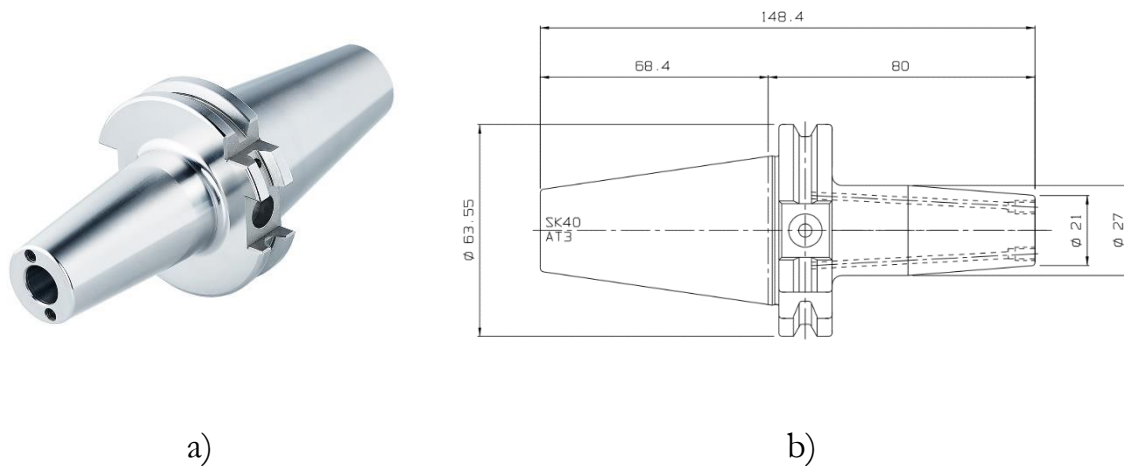


Figura 3.4 – Sistema de fixação: a) cone térmico; b) desenho técnico do cone térmico (Kemmler, 2023).

Tabela 3.1 – Especificações do cone térmico.

| Norma | Dureza superficial | Rugosidade | Tolerância de encaixe | Balanceamento | Modelo |
|--------------------------------|--------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|-------------|
| ISO 7388 – 1 (DIN 69871) | 58 – 60 HRC | $Ra < 0,4\mu m$ | h6 | G2.5 a 25 000R.P.M | 403.70.08.K |

Fonte: Adaptado de (Kemmler, 2023).

Nestes tipos de cones é aconselhável que só se usem ferramentas em que a sua haste tenha o mesmo diâmetro que o diâmetro de corte e não existam entalhes. Importa ainda referir que, este tipo de cone (cone térmico) apresenta uma geometria mais

estável em rotação (baixo valor de *run-out*) que outros tipos de cones como de aperto mecânico com pinças ou hidráulico, conseguindo-se desta forma um acoplamento cone/ferramenta mais estável em rotação, produzindo naturalmente menos vibrações. O tipo de aperto deste sistema (*shrink fit*), em que o diâmetro interior do cone que vai receber a ferramenta é apenas mais pequeno em algumas centésimas de milímetro que o diâmetro da ferramenta promove uma união extremamente rígida entre a ferramenta e o cone.

Para colocar ou retirar as ferramentas no cone térmico, é necessário que se induza calor no cone de forma que, ele expanda dimensionalmente devido ao aquecimento que sofre. Neste cone a fonte de calor foi conseguida à custa de uma pistola de ar quente de forma a dilatar a zona de inserção da ferramenta. Outro aspeto importante neste tipo de acoplamento é o comprimento de ferramenta que é usado dentro do cone térmico, de forma a garantir a união rígida do conjunto cone/ferramenta. Esse valor é dado na ficha técnica e deve estar compreendido entre 26mm e 36mm, para o cone usado em particular.

3.3 – Equipamentos de Aquisição de Dados de Vibração

O acelerómetro usado no trabalho experimental, apresentado na Figura 3.5, para a aquisição do sinal de vibração nos eixos X, Y e Z da máquina durante o corte, foi um acelerómetro triaxial, de alta sensibilidade da marca PCB Piezotronics, modelo 356B08. Para a realização dos ensaios experimentais, garantiu-se que os eixos do acelerómetro estavam alinhados com a direção dos eixos da máquina X, Y e Z em todos os ensaios experimentais. As principais características deste tipo de acelerómetro podem ser consultadas no Apêndice B.

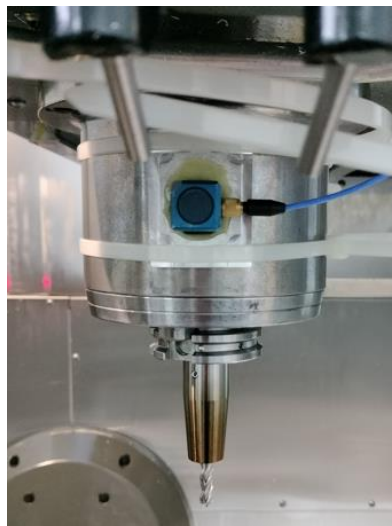


Figura 3.5 – Acelerómetro triaxial 356B08, montado no *spindle* da máquina.

A escolha deste acelerómetro com $100\text{mV}\cdot\text{g}^{-1}$ de sensibilidade em detrimento de outro disponível (acelerómetro triaxial modelo 356A01 da PCB Piezotronics) com

uma sensibilidade de $5\text{mV}\cdot\text{g}^{-1}$, prendeu-se pelo facto que, para sinais com baixas amplitudes de vibração deve ser usado um acelerómetro de alta sensibilidade enquanto para sinais com altas amplitudes de vibração se deve usar acelerómetros de baixa sensibilidade (National Instruments, 2023). Sinais de alta amplitude, são sinais que vêm de impulsos ou choques fortes (por vezes muito rápidos), enquanto sinais de baixa amplitude estão associados a vibrações que se prolongam mais no tempo. O objetivo de usar um acelerómetro de alta sensibilidade para medir amplitudes de vibração mais baixas, advém do facto de que a resposta em tensão do mesmo é superior ao acelerómetro de baixa sensibilidade. Sinais de maior amplitude não precisam de ser amplificados pois já são bem perceptíveis, logo não necessitam de acelerómetros de alta sensibilidade. A título de exemplo, se um sinal tivesse uma amplitude de vibração de 10g e o acelerómetro uma de sensibilidade de $100\text{mV}\cdot\text{g}^{-1}$ a resposta que se iria obter seria de $1\,000\text{mV}$ ou 1V . Esta resposta iria ser mais facilmente lida por uma placa de aquisição do que a resposta de um acelerómetro de sensibilidade de $5\text{mV}\cdot\text{g}^{-1}$, que daria uma resposta de 50mV . Outro objetivo de se usar um acelerómetro de alta sensibilidade, para sinais de menor amplitude, é para que a resposta em tensão não seja confundida com ruído elétrico de baixa amplitude existente no sinal (Fierce Electronics, 2023).

O funcionamento deste tipo de transdutores é bastante simples. Eles fazem a conversão de movimento num sinal elétrico de tensão em que o sinal é proporcional ao movimento, ou seja, neste trabalho está-se a medir a vibração que está a ser induzida no equipamento. Geralmente o interior de um acelerómetro contém um cristal piezoelétrico em conjunto com uma massa que vai exercer uma força no mesmo ao estar sujeita ao movimento vibratório. Esta força pode ser de compressão ou de corte (no caso de o acelerómetro usado é de corte, visto este ser o seu tipo de funcionamento). O cristal piezoelétrico ao sofrer deformação vai então gerar uma tensão elétrica proporcional à força que nele é exercida. Esta força por sua vez é proporcional à aceleração (segunda lei de Newton), sendo que, com estas relações é possível obter a amplitude de vibração em aceleração (Girdhar, 2004) e (Brüel & Kjaer, 2023).

No entanto, existem vários cuidados que devem ser tidos quando se usa um acelerómetro. Os mais importantes são: a frequência de ressonância, o tipo de montagem do acelerómetro e os efeitos da temperatura e de ruídos (Brüel & Kjaer, 2023).

Um acelerómetro vai entrar em **ressonância** quando a frequência de vibração que ele está a medir for igual à sua frequência própria de vibração (que é dependente da sua rigidez e massa). É devido a este fator que um determinado acelerómetro tem um limite de frequência que pode medir (Figura 3.6). Regra geral, é definido um limite de um terço da frequência de ressonância como o limite máximo que o acelerómetro pode medir. Esta imposição advém do facto de que a sensibilidade do acelerómetro aumenta quando a frequência de trabalho aumenta, levando a uma resposta do acelerómetro errada do fenómeno a medir. Caso o acelerómetro entre em ressonância a resposta que ele irá dar é completamente errada do fenómeno a

medir. Analisando a Figura 3.6 verifica-se que, no limite estabelecido de um terço da frequência de ressonância esse erro já seria de 12%.

De forma global, isto não é um problema muito comum, pois os acelerômetros possuem uma ampla gama de medição em que, a sua sensibilidade é estável, sendo só crítico na medição de altas frequências (uso de acelerômetros de alta frequência, com menor massa e sensibilidade e frequência de ressonância maior pode resolver este problema).

Sendo a rotação máxima da máquina 15 000R.P.M o que corresponde a 250Hz mesmo trabalhando à velocidade máxima não se iria obter desvios nos resultados devido à ressonância uma vez que, este valor é muito inferior à frequência de ressonância do acelerómetro usado e está dentro da gama de frequências de uso do mesmo (Apêndice B). Por fim, importa referir que, os limites inferiores para os acelerómetros são geralmente na ordem de 1Hz a 2Hz.

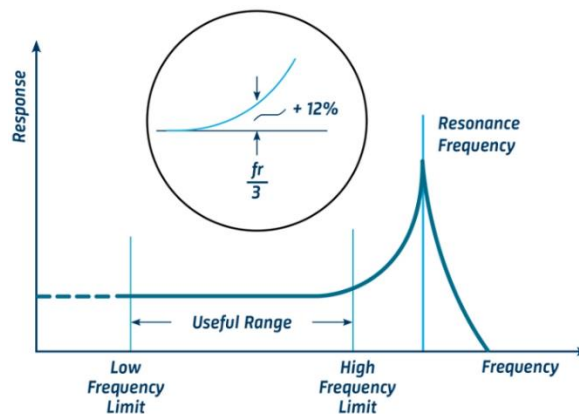


Figura 3.6 – Limites de frequência de um acelerómetro (Brüel & Kjaer, 2023).

O **método de montagem** do acelerómetro vai influenciar a frequência de ressonância, podendo baixar esta para valores que podem influenciar a faixa de uso do acelerómetro e por sua vez a sua precisão. Existem vários tipos de montagem sendo que algumas são realizadas através do apoio de mão, outras através da montagem com íman. Também é possível efetuar a montagem através de colas e adesivos, montagem através de placa e parafusos e montagem através de placa. Este último tipo de montagem (montagem através de placa) foi o usado nos ensaios experimentais. Neste tipo de montagem, o acelerómetro foi roscado numa placa maquinada (com a curvatura do *spindle* da máquina) e posteriormente esta placa foi presa ao *spindle* da máquina por braçadeiras de serrilha. Este tipo de montagem permite que a mesma não seja permanente e de fácil desmontagem. A Figura 3.7 mostra a influência dos vários tipos de montagem no decréscimo da frequência de ressonância. Analisando a figura é possível observar que, para o tipo de montagem usada (3) a frequência de ressonância é muito distante da máxima de trabalho possível (250Hz), fornecendo assim a segurança de que este tipo de montagem não influenciará a precisão dos valores obtidos.

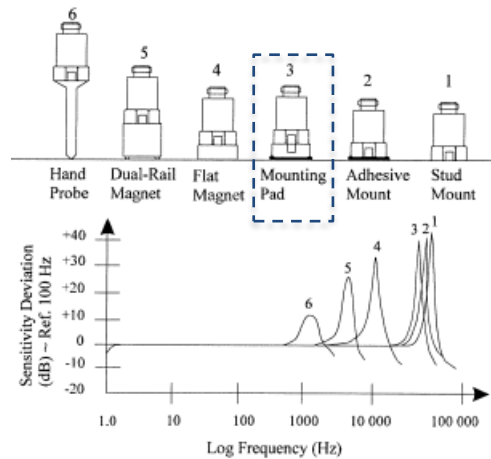


Figura 3.7 – Influência da montagem na frequência de ressonância (PCB Piezotronics).

Quanto à **temperatura e ruído**, estes devem ser controlados de forma a não exercerem uma influência negativa. Os materiais piezoelétricos são muito influenciados pela temperatura, pelo que, uma mudança de temperatura vai alterar a sensibilidade do acelerómetro. A temperatura se chegar a limites extremos pode alterar de forma permanente a sensibilidade do acelerómetro. Para aplicações de temperaturas extremas (negativas e positivas) existem acelerómetros especiais. Geralmente à temperatura ambiente (cerca de 20°C) a sensibilidade do acelerómetro não sofre desvios, tendo, no entanto, cada acelerómetro uma curva da variação da sua sensibilidade em função da temperatura (Figura 3.8). Uma vez que, todos os ensaios experimentais foram realizados à temperatura ambiente é seguro assumir que não ocorreu desvio na sensibilidade do acelerómetro. Quanto ao ruído que possa surgir e modificar o sinal, este deve ser minimizado. O ruído pode ser eletromagnético (campo magnético induzido de outro equipamento), acústico (sons exteriores) e triboelétrico (flexão e torção de cabos). Estes tipos de ruído são evitados com o uso de cabos blindados e sendo a ligação do acelerómetro ao sistema de aquisição o mais suave possível (cabos sem dobras, enrolamentos e curvas apertadas).

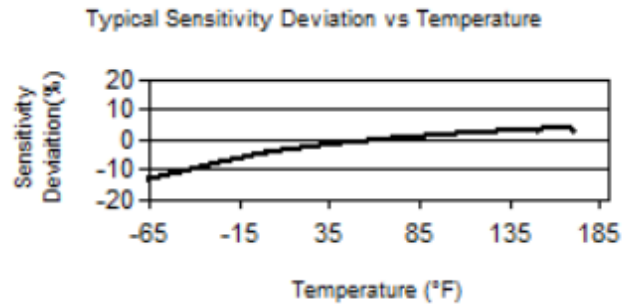


Figura 3.8 – Esquema da variação da sensibilidade em função da temperatura do acelerómetro (PCB Piezotronics).

A calibração é um procedimento bastante importante e deve ser feita num acelerómetro de forma a se obter a sua sensibilidade. A sensibilidade deve ser obtida através da calibração para os vários eixos do acelerómetro, pois, apesar da ficha técnica indicar um valor global de sensibilidade, cada eixo terá um valor próprio muito próximo do indicado, mas não necessariamente igual, daí a importância de se obter o certificado de calibração do acelerómetro. Os acelerómetros desde que não sejam sujeitos a situações extremas (e.g., choques violentos, temperaturas excessivas, radiação), conseguem manter a sensibilidade com mudança inferior a 2% durante vários anos (Girdhar, 2004) e (Brüel & Kjaer, 2023), sendo só necessário a sua calibração em caso de inexistência de valores ou situações de mau uso.

Atendendo que não se tinha o certificado de calibração do acelerómetro usado nos ensaios experimentais, foi obtida a sensibilidade correta de cada eixo através do uso de um aparelho com vibração padrão (*shaker*) de 1g (ou $9,81\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$), também da marca PCB Piezotronics (modelo 394C06), a 159,15Hz (Figura 3.9 a)). A obtenção da sensibilidade em cada eixo foi conseguida ao posicionar o acelerómetro na base vibratória do *shaker* (Figura 3.9 b)), com os vários eixos orientados no sentido do movimento vibratório e ir mudando a sensibilidade nos vários eixos até se obter um erro o mais próximo possível de zero, em relação à vibração padrão de $9,81\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Os valores de vibração e de erro em relação à vibração padrão foram obtidos com recurso a uma aplicação desenvolvida no *software* LabVIEW®, para efetuar a calibração deste tipo de equipamentos (Figura 3.10). No Apêndice C, apresenta-se o código que foi desenvolvido para a referida aplicação.



a)



b)

Figura 3.9 – *Shaker*: a) sem acelerómetro; b) com acelerómetro.

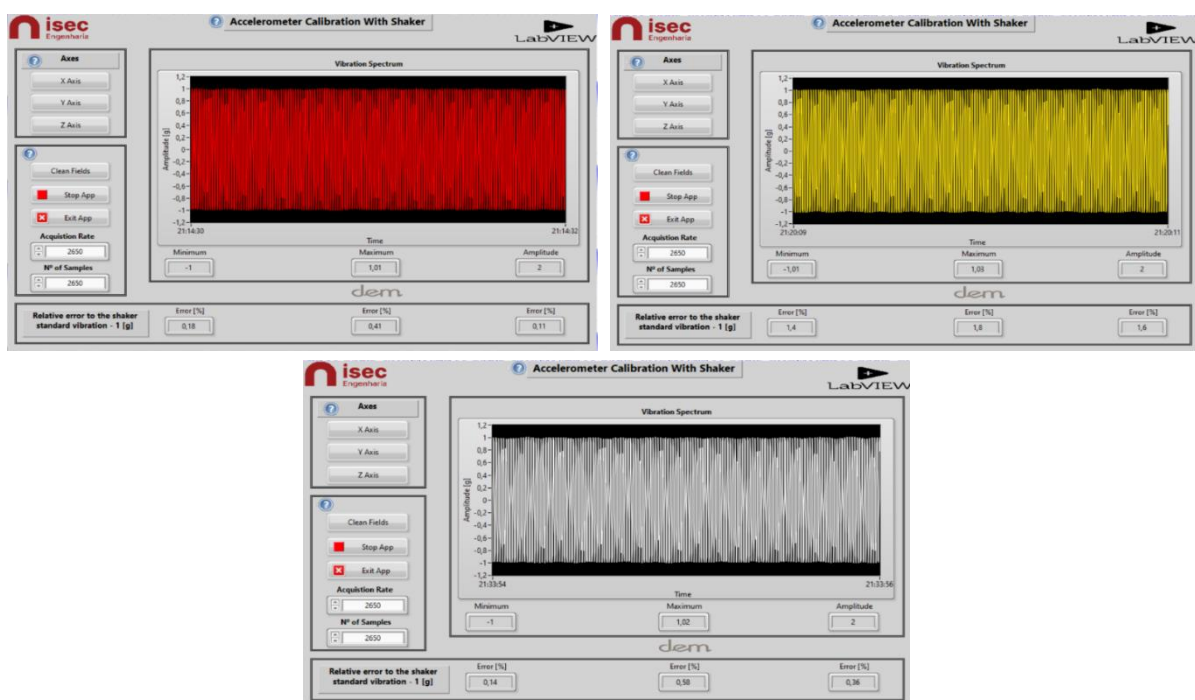


Figura 3.10 – Aplicação em LabVIEW[®] para calibração do acelerómetro (eixo X a vermelho, eixo Y a amarelo e eixo Z a branco).

Com a calibração foram conseguidas as sensibilidades para os vários eixos que deram o erro o mais próximo possível de zero (Tabela 3.2). Importa referir que o erro foi avaliado em relação ao máximo, mínimo e amplitude do espetro de vibração.

Tabela 3.2 – Sensibilidade dos vários eixos do acelerómetro 356B08.

| Eixos | Eixo X | Eixo Y | Eixo Z |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|
| Sensibilidade ($mV \cdot g^{-1}$) | 100,2 | 100,4 | 100,2 |

*Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075.
Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem*

A placa de aquisição usada para obter os dados do acelerômetro foi a placa NI 9234 da National Instruments® (Figura 3.11 a)). Esta placa de aquisição possui incorporados filtros analógicos e digitais que permitem a filtragem do sinal adquirido na própria placa evitando a aquisição de ruído. As características desta placa são mostradas no Apêndice B. O chassi acoplado à placa de aquisição para posterior comunicação com o computador através de um cabo *ethernet* foi o chassi NI WLS/ENET-9163, também da National Instruments (Figura 3.11 b)). A montagem de ambos pode ser observada na Figura 3.11 c).

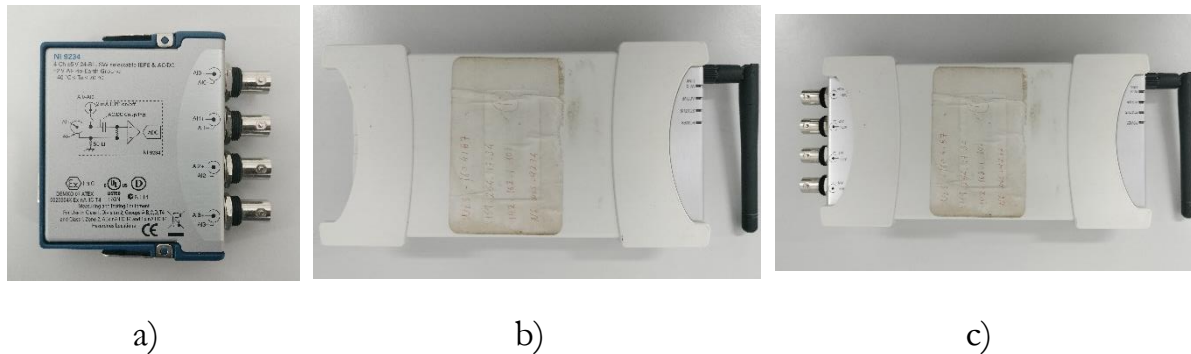


Figura 3.11 – Componentes de aquisição de dados: a) placa de aquisição; b) chassi; c) montagem da placa e do chassi.

A frequência de aquisição que é possível usar com a placa NI 9234 tem uma gama muito ampla, no entanto devem ser escolhidos valores dentro desta gama na forma de $51\,200/n$, onde n é um número inteiro de 1 a 31. A taxa de aquisição que foi usada nos ensaios experimentais foi de 2 048Hz ($51\,200/25$), visto ser um valor que pode também ser usado no comprimento para realizar a FFT, por ser um número do tipo 2^n (2^{11}) e dando assim a resolução de 1 (ver Capítulo 2.4.3). Desta forma, conseguiu-se a maior precisão no valor da frequência, quando se passa do domínio do tempo para a frequência na análise de vibrações. O uso destes valores foi testado usando os mesmos para a aquisição de um sinal de vibração do *shaker* e calculando a FFT desse mesmo sinal. Com a resolução de 1 conseguiu-se um pico de frequência de 159Hz o qual é bastante próximo da frequência de vibração própria do mesmo que é 159,15Hz. Além desta vantagem, outra que vem do uso desta taxa, é que o sinal seja adquirido segundo o teorema de Nyquist.

3.4 – Equipamento para Avaliação da Rugosidade

De forma a medir as rugosidades nas superfícies maquinadas, recorreu-se ao uso do Rugosímetro SJ 201P da marca Mitutoyo®, o qual pode ser visto na Figura 3.12. As características principais do rugosímetro são apresentadas no Apêndice B.

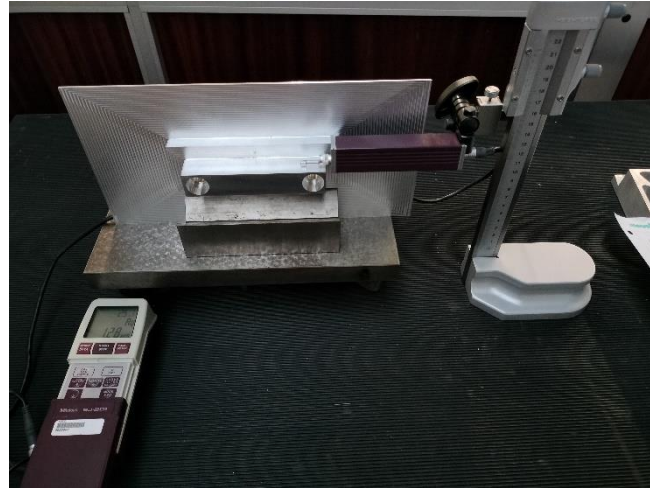


Figura 3.12 – Rugosímetro SJ 201P, na medição das rugosidades laterais de um bloco de Al 7075 – T6.

A rugosidade nas superfícies após os vários ensaios foi avaliada segundo a norma ISO 4287 (1997). O perfil avaliado é o perfil de rugosidade após a filtragem com o filtro PC50 (perfil indicado na ficha técnica do rugosímetro para quando o uso da norma ISO). O que se pretende avaliar, em termos de rugosidade, não é mais do que o conjunto de irregularidades deixadas pela ferramenta durante o corte. Os parâmetros avaliados foram a rugosidade média (R_a), a rugosidade média quadrática (R_q), a rugosidade máxima (R_z). Para além destes parâmetros, também o parâmetro de defeito máximo (P_z) foi estudado, num caso específico em que era preciso dados antes da filtragem.

A **rugosidade média (R_a)** é a média aritmética dos valores de rugosidade em relação à linha média (linha paralela à direção do perfil que separa o perfil em partes superior e inferior de igual soma de áreas).

A **rugosidade média quadrática (R_q)** é a raiz quadrada da média aritmética dos quadrados dos valores de rugosidade em relação à linha média.

A **rugosidade máxima (R_z)** é a média dos vários valores de diferença entre o pico mais alto e vale mais fundo dentro de cada comprimento de amostragem.

O **defeito máximo (P_z)** é semelhante ao R_z , mas medido no perfil primário, antes da aplicação de filtros. Consegue detetar erros de forma e ondulações/deflexões.

Dependo da rugosidade média e máxima das superfícies, a norma ISO 4287 (1997) indica os parâmetros a usar na medição, sendo que esta foi a regra que se adotou no trabalho experimental. Isto pode ser consultado no Apêndice B.

*Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075.
Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem*

Antes da medição da rugosidade nas superfícies maquinadas, foi realizada a calibração do rugosímetro (com os parâmetros indicados na ficha técnica). A calibração é feita com recurso à medição da rugosidade média (R_a) de uma amostra padrão e atualizando o fator de calibração do rugosímetro, caso a rugosidade medida não seja igual ao indicado na amostra padrão de $2,94\mu\text{m}$. A Figura 3.13 mostra a amostra padrão, o valor medido antes da calibração, o processo de calibração e a rugosidade medida após a calibração. Nota-se que, antes da calibração havia um ligeiro desvio nos valores de rugosidade medidos.

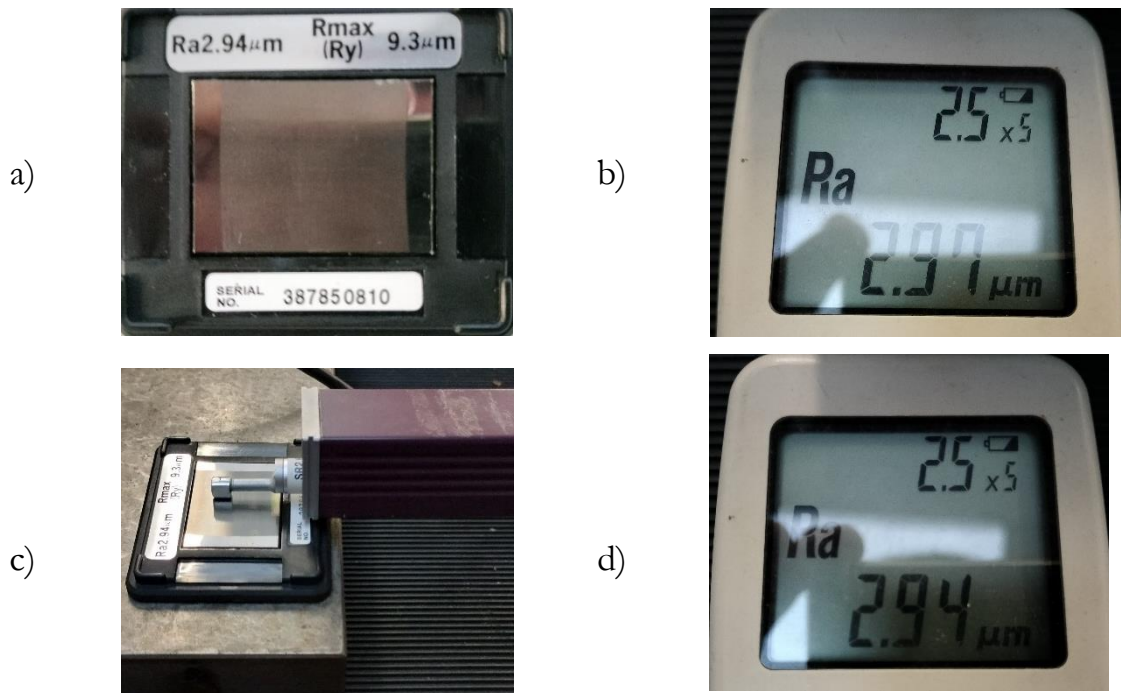


Figura 3.13 – Calibração do rugosímetro: a) material de rugosidade padrão. b) R_a antes da calibração; c) processo de calibração; d) R_a após a calibração.

3.5 – Equipamento de Microscopia Ótica

O desgaste das ferramentas foi avaliado de forma visual durante os ensaios de maquinagem. Para tal, foram definidas pausas regulares em determinados momentos da maquinagem, mas, nunca removendo a ferramenta do cone por forma a manterem-se sempre as condições iniciais do ensaio.

O desgaste foi avaliado visualmente com recurso ao microscópio ótico digital Dino – Lite Basic, com ampliações de 20 e 50 vezes nos vários gumes, canais de escoamento da apara e no topo da ferramenta. O *software* usado para visualizar as imagens adquiridas no microscópio foi o Dino Capture 2.0[®]. Posteriormente as imagens foram guardadas, tratadas (inserção de escala de acordo com as ampliações usadas) e analisadas de forma a perceber a evolução do desgaste da ferramenta. A Figura 3.14 mostra o conjunto microscópico e programa de aquisição das imagens.



Figura 3.14 – Equipamento de avaliação visual do desgaste: a) microscópio ótico; b) *software* de aquisição de imagens (Marouvo, 2022).

3.6 – Equipamento de Microscopia Eletrônica de Varrimento

De forma a avaliar o desgaste de forma mais detalhada foi usada a Microscopia Eletrônica de Varrimento (MEV), do inglês *Scanning Electron Microscopy* (SEM). O equipamento utilizado é um MEV de emissão de campo (Zeiss Merlin/Gemini II), o qual pertence ao Laboratório de Ensaios, Desgaste e Materiais do Instituto Pedro Nunes o qual pode ser observado na Figura 3.15.



Figura 3.15 – Equipamento MEV disponível no IPN.

De uma forma simples e sucinta, o princípio de funcionamento deste tipo de microscopia consiste no uso de um feixe de elétrons altamente focado que vai incidir na superfície da amostra a analisar ponto por ponto e segundo linhas sucessivas. Posteriormente os elétrons refletidos são detetados por detetores de elétrons, sendo este sinal tratado e apresentado segundo a forma de imagem. Importa referir que devido ao princípio de funcionamento deste equipamento, a amostra deve ser condutora elétrica ou pelo menos possuir uma camada de um filme condutor. (Dedavid, Gomes , & Machado , 2007) e (Ferreira, 2016). Existe também a técnica de vácuo reduzido, quando a amostra não é condutora. Os elétrons que são emitidos e captados para a análise derivam dos elétrons primários presentes no feixe principal. (da Silva, 2012).

A profundidade da análise na amostra e a posterior deteção dos elétrons vai depender da energia que os elétrons possuem. Dentro dos tipos de elétrons captados os retro difundidos possuem maior energia que os secundários.

Desta forma, os primeiros são os responsáveis por “penetrar” na amostra a analisar (Dedavid, Gomes , & Machado , 2007). A forma como os elétrons interagem com a amostra tem uma forma de gota e pode ser vista na Figura 3.16, bem como, o tipo de elétrons associados a cada profundidade na zona de análise.

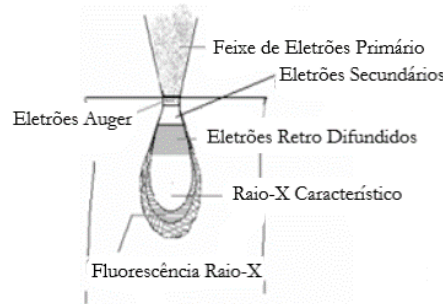


Figura 3.16 – Interação dos elétrons com a amostra (Dedavid, Gomes , & Machado , 2007).

Os constituintes de um equipamento de MEV, são de uma forma geral, um canhão de elétrons (de termo emissão ou de emissão de campo) de forma a acelerar os mesmos, uma câmara de vácuo para criar o meio onde os elétrons seguem sem que exista dispersão (feixe localizado), um conjunto de lentes para focar os elétrons, um sistema de varrimento que permita que o feixe de elétrons percorra a amostra e posteriormente se consiga gerar uma imagem e os detectores de elétrons. A imagem da zona da amostra a analisar, é gerada após um tratamento complexo dos elétrons, onde estes são transformados num sinal elétrico e posteriormente obtêm-se a imagem. (da Silva, 2012).

Os tipos de elétrons, que provêm da divisão do feixe primário gerado e que incide na amostra, são também algo importante de explicar, ainda que de forma resumida. Assim, os elétrons secundários são elétrons de baixa energia e vão produzir imagens de alta resolução, sendo que neste tipo de microscopia apenas os produzidos junto à superfície são detetados. Os elétrons retro difundidos são responsáveis por fornecer imagens a uma profundidade maior que os secundários. Conseguem-se imagens de cerca de metade da profundidade do feixe primário. Esta imagem traduz pouca informação relativa à topografia do material. No entanto, fornece a informação química do mesmo. Outros tipos de elétrons gerados são os transmitidos, os absorvidos e os Auger os quais são muito usados na análise de elementos químicos principalmente de camadas de filmes muito finos, visto estes serem gerados muito superficialmente.

Para além de grandes ampliações possíveis com o MEV, com este tipo de análise é também possível uma identificação dos elementos químicos da zona onde incide o feixe de elétrons, através da análise de Raios-X. Os Raios-X são emitidos pela excitação dos elementos químicos na zona de incidência do feixe de elétrons (da Silva, 2012). O comprimento de onda e energia dos Raios-X emitidos são comparados com os característicos para um certo elemento químico (espectros de Raios-X podem ser obtidos para todos os elementos exceto o hidrogénio) e assim consegue-se distinguir os elementos químicos presentes na amostra. Os detectores de Raios-X usados podem ser de comprimento de onda (*Wavelength X-Ray Spectroscopy* – WDS) e de energia (*Dispersive X-Ray Spectroscopy* – EDS). A diferença entre os detectores surge nas diferenças em relação à concentração mínima do elemento

*Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075.
Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem*

necessária à detecção, à profundidade de detecção, à massa e volume mínimos da amostra entre outros parâmetros (Dedavid, Gomes , & Machado , 2007). Geralmente o EDS é usado em análises semi quantitativas e rotineiras enquanto o WDS é usado em análises quantitativas de maior precisão (da Silva, 2012).

Por último, importa referir que existem equipamentos MEV que são designados por convencional, sendo este essencialmente usado para obter imagens de rotina e possui vários tipos de detetores. O MEV com emissão de campo (do inglês, *Field Emission Scanning Eletron Microscope* – FESEM), tem uma fonte de eletrões diferente e por isso necessita de maior capacidade de vácuo. Por fim, existe ainda MEV ambiental sendo este de baixo vácuo (Ferreira, 2016).

O equipamento que foi usado neste trabalho experimental foi um FESEM com detetores de EDS e de WDS.

4 – TRABALHO EXPERIMENTAL DESENVOLVIDO

Este capítulo apresenta os vários trabalhos experimentais que foram desenvolvidos para a presente dissertação, abordando o procedimento dos mesmos e os resultados obtidos nas áreas estudadas.

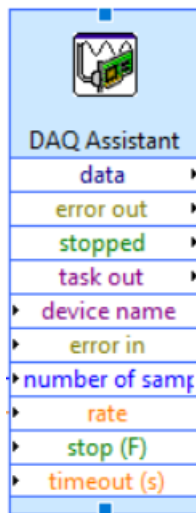
4.1 – Sistema de Aquisição e Processamento de Vibrações

Para adquirir o sinal de vibração durante o trabalho experimental de maquinagem, foi necessário desenvolver uma aplicação de aquisição de dados (aplicação em LabVIEW®) e uma outra aplicação para posterior tratamento e análise dos dados recolhidos (aplicação em MATLAB®). Nesta secção são apresentadas as funcionalidades de cada aplicação desenvolvida. A programação da aplicação em LabVIEW® e da aplicação em MATLAB® pode ser consultada no Apêndice C e no Apêndice D, respetivamente.

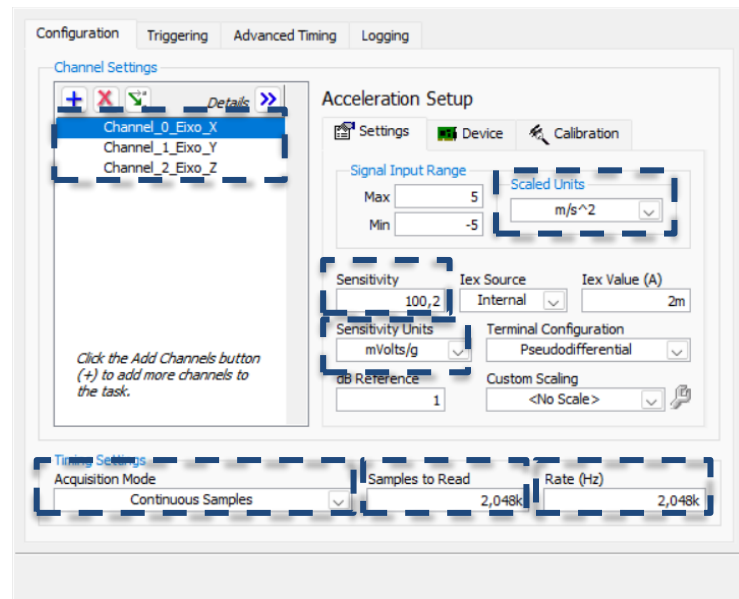
4.1.1 – Aplicação em LabVIEW®

Com recurso ao *software* LabVIEW® foi desenvolvida uma aplicação que permite a aquisição do sinal de vibração através do uso de um acelerómetro triaxial e do equipamento de aquisição de dados associado à placa de aquisição e respetivo chassi. Foi tomada a decisão de criar a aplicação neste *software*, pois tanto o LabVIEW®, como o equipamento de aquisição são da marca National Instruments®, o que facilita a interligação de ambos.

As características do acelerómetro, da placa e do chassi usados no trabalho foram as descritas Capítulo 3.3. É de salientar que é possível usar outro tipo acelerómetro, placa e chassi, no entanto, é necessário configurar um novo *DAQ – Assistant* no programa, sendo este o bloco de programação que faz a interface com o equipamento de aquisição (Figura 4.1 a)). Para a configuração do acelerómetro é necessário definir a sensibilidade correta dos vários eixos, devendo ser inserida dentro dos parâmetros do bloco de programação *DAQ – Assistant*, conforme a correspondência correta de cada eixo aos canais da placa de aquisição. Este bloco permite ainda escolher o tipo de aquisição, estando para o trabalho em questão em modo contínuo de aquisição. Para além destes parâmetros, foi também definida a frequência de aquisição, o número de amostras a adquirir, as unidades de aquisição do sinal e as unidades da sensibilidade introduzida. Estes são os parâmetros mais importantes a definir e podem ser encontrados em destaque na Figura 4.1 b), de forma a se perceber a metodologia adotada.



a)



b)

Figura 4.1 – Interface de aquisição de dados: a) bloco de programação *DAQ – Assistant*; b) parâmetros a configurar no bloco *DAQ – Assistant*.

Na aplicação desenvolvida, durante a aquisição de dados a amplitude de vibração é apresentada em $m.s^{-2}$ nos vários eixos em simultâneo, nos três eixos em separado e a sua resultante, que é dada pela Equação (4.1).

$$Resultante = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2} \quad (4.1)$$

A amplitude de vibração nos eixos de forma independente e a sua resultante é representada graficamente tanto no domínio do tempo (Figura 4.2), como no domínio da frequência (Figura 4.3).

Para o domínio da frequência é necessário aplicar janelas para a realização da FFT, sendo possível escolher de um amplo leque das mesmas, a que melhor se adequa ao pretendido de acordo com o descrito no Capítulo 2.4.2. Isto é feito por forma a evitar a dispersão espectral como já referido. Pode também ser escolhida o tipo de amplitude a visualizar (pico, pico a pico ou RMS). A amplitude de vibração dos três eixos em simultâneo só é apresentada graficamente no domínio do tempo (Figura 4.2).



Figura 4.2 – Interface de representação gráfica do sinal no domínio do tempo.

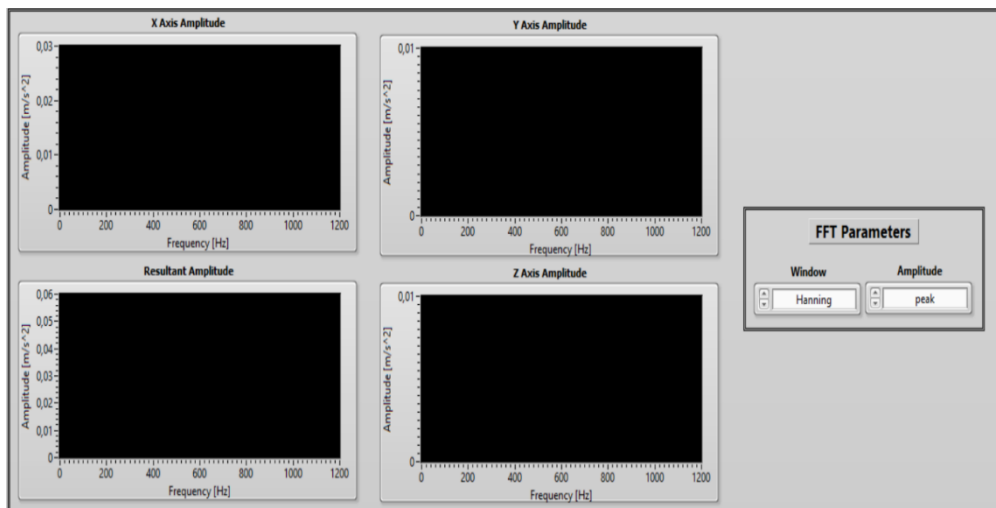


Figura 4.3 – Interface de representação gráfica do sinal no domínio da frequência.

O sinal de vibração é adquirido e representado em amplitude de aceleração, devido ao facto de ser adquirido com recurso a um acelerómetro e não estar sujeito a conversões (integrações). No entanto, ao sinal de vibração adquirido é aplicado um filtro *lowpass*, como referido no Capítulo 2.4.3. O sinal que está a ser adquirido pode ser guardado durante o processo de aquisição para posterior processamento com a aplicação em MATLAB®.

A Figura 4.4 a) mostra as opções disponíveis para aplicação desenvolvida, a Figura 4.4 b) mostra a opção do filtro *lowpass* onde se pode escolher a frequência usada no mesmo e a Figura 4.4 c) a opção de guardar os dados.

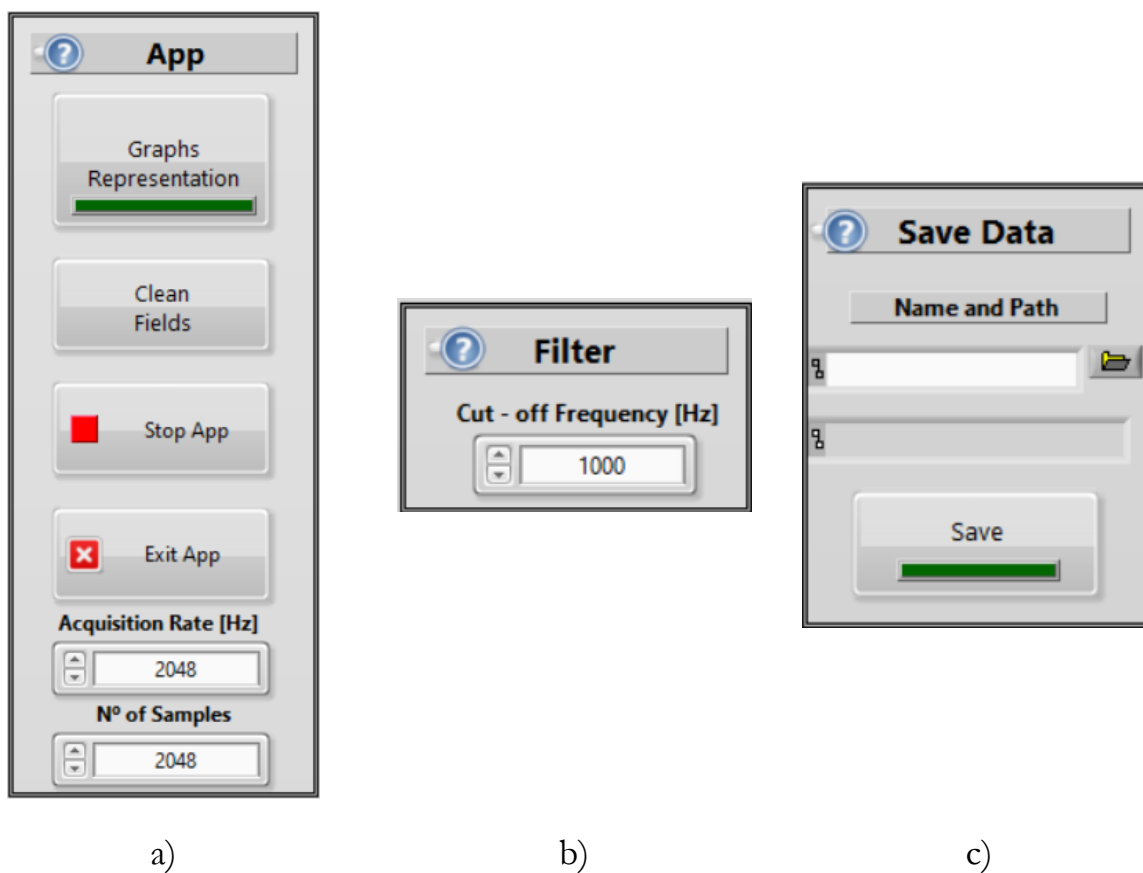


Figura 4.4 – Opções da aplicação: a) opções gerais; b) filtro *lowpass*; c) opção de guardar dados.

4.1.2 – Aplicação em MATLAB®

Com recurso ao *software* MATLAB®, foi desenvolvida uma aplicação que permite a leitura de dados de ficheiros Excel criados com a aplicação em LabVIEW® de forma a estes poderem ser tratados, processados e analisados. Enquanto na aquisição de dados o sinal apresentado pela aplicação é dinâmico, pois está continuamente a variar de acordo com o fenómeno de vibração que está a ser monitorizado, na aplicação de tratamento de dados o sinal apresentado é estático. Ou seja, os dados são aqueles que foram gravados, podendo ser efetuada a representação gráfica de todos os dados de vibração adquiridos, ou então uma porção consoante as opções de visualização.

A aplicação desenvolvida em MATLAB® permite a visualização e tratamento dos dados tanto no domínio do tempo como da frequência (aplicando as técnicas e precauções enunciadas no Capítulo 2.4.2), bem como representar o sinal em unidades de aceleração, velocidade ou deslocamento. É de salientar que, sendo os dados recolhidos por um acelerómetro (dados em amplitude de aceleração), para visualizar os dados em amplitude de velocidade ou deslocamento, é necessário usar um filtro *butterworth* e aplicar integração numérica como descrito no Capítulo 2.4.1. Os dados em aceleração podem ser analisados tal como foram adquiridos, ou então depois de serem sujeitos ao filtro *butterworth*. É importante referir que, deve-se ter o cuidado de aplicar o filtro *butterworth* apenas até uma frequência de metade da frequência de aquisição, visto o sinal só ser representado de forma fidedigna até esta. Os dados são apresentados para os três eixos de forma independente bem como a sua resultante dada pela Equação (4.1). Além da representação gráfica do sinal de vibração, são ainda apresentados os seguintes dados: máximo, mínimo e valor de RMS para o sinal representado no domínio do tempo e o valor máximo para o sinal representado no domínio da frequência. A Figura 4.5 e a Figura 4.6 são representativas dos resultados obtidos no domínio do tempo e da frequência respetivamente, com amplitude de vibração representada em velocidade.

*Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075.
Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem*

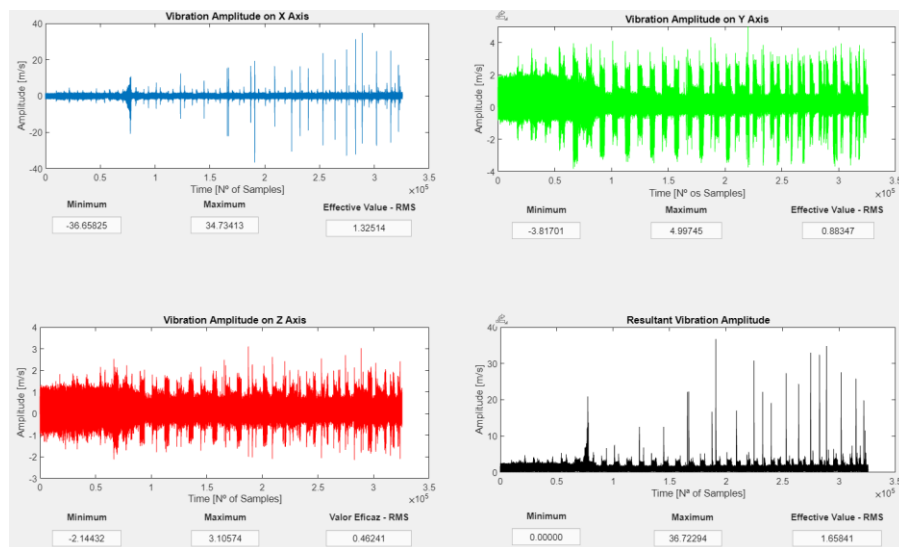


Figura 4.5 – Representação gráfica de dados no domínio do tempo.

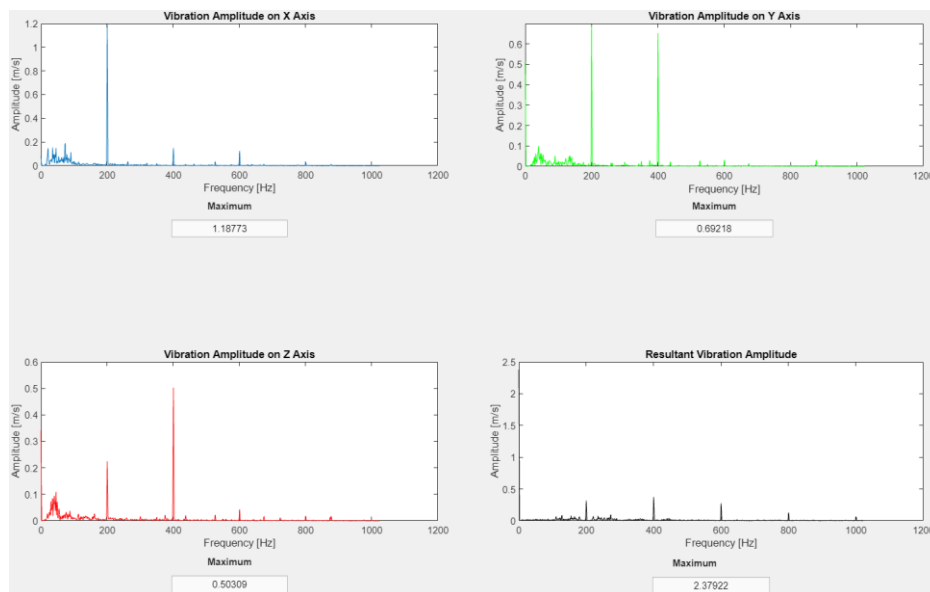


Figura 4.6 – Representação gráfica de dados no domínio da frequência.

A aplicação desenvolvida possui um conjunto de opções de escolha dos parâmetros a introduzir para aplicar a FFT e converter o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência (Figura 4.7 a)). É possível escolher de um amplo leque de janelas a que apresenta melhores resultados de acordo com o pretendido, bem como escolher a unidade de amplitude (Figura 4.7 b)), os parâmetros de filtragem (Figura 4.7 c)) e guardar dados depois de terem sido convertidos da unidade original ou dados da FFT (Figura 4.7 d)).

Além das opções já mencionadas, nesta aplicação foi ainda introduzida a possibilidade de remover uma gama de frequências não desejadas atenuando ou eliminando do espectro de vibração, tanto no domínio do tempo como da frequência, o efeito das ondas associadas a estas frequências (Figura 4.8). Isto é realizado com recurso a um filtro *bandstop*, em que ao se escolher uma certa gama de frequências o filtro faz com que as frequências que estão dentro da gama selecionada sejam removidas do espectro de vibração. O intervalo pode ser qualquer um (sendo mais apertado ou amplo conforme a análise pretendida). No entanto, o limite máximo do intervalo não pode exceder metade da frequência de aquisição pois é até esta que o sinal é representado. A Figura 4.8 a) mostra onde pode ser feita introdução da gama ou gamas de frequências a remover do sinal e a Figura 4.8 b) a tabela onde as mesmas são indicadas, sendo estas posteriormente removidas do sinal.

Data for Fast Fourier Transform

Frequency: 2048

Signal Length: 2048

Start of Reading: 10000

End of Reading: 12048

Window: Hanning

a)

Data and Graphs

Load Data

Corte_3.xlsx

Amplitude representation in:

Acceleration (non-filtered)

Acceleration

Velocity

Displacement

Update Graphs

b)

Butterworth Filter (Highpass)

Order: 4

Acquisition frequency: 2048.0

Cut-off frequency: 200.0

c)

| Menu | |
|-----------------------------|--------|
| Load Data | Ctrl+L |
| Save Table Data - Time | Ctrl+T |
| Save Table Data - Frequency | Ctrl+F |

d)

Figura 4.7 – Opções da aplicação: a) parâmetros da FFT; b) escolha da unidade de amplitude; c) opções para a filtragem; d) guardar dados.

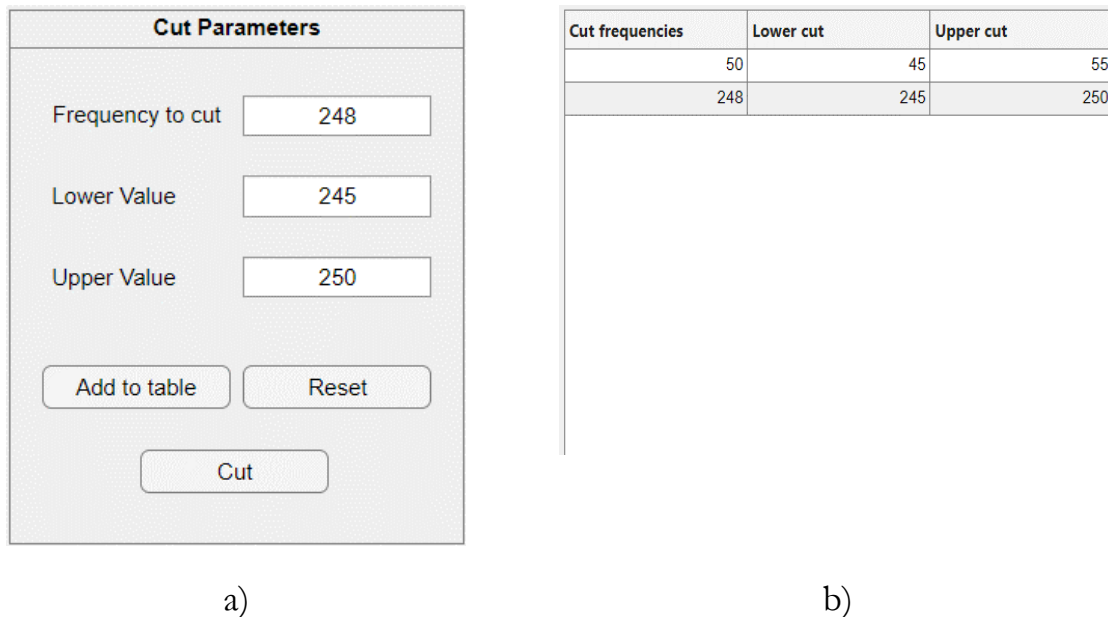


Figura 4.8 – Opção de remoção de frequências: a) valores das frequências a remover; b) tabela com intervalo de frequências removidas.

4.2 – Ensaios de Corte Lateral

4.2.1 – Materiais, Ferramentas e Procedimento

Os ensaios de maquinagem foram realizados em blocos de liga de alumínio 7075 – T6. As propriedades mecânicas desta liga de alumínio são apresentadas na Tabela 4.1. Esta é uma liga de excelente maquinabilidade, alta resistência mecânica, bom polimento, boa estabilidade dimensional e boas características de soldadura sendo muito usada em produtos de engenharia mecânica (PolyLANEMA, 2023).

Tabela 4.1 – Propriedades do alumínio 7075 – T6.

| Módulo de Young (MPa) | Densidade (g.cm ⁻³) | Resistência à tração (MPa) | Tensão de cedência (MPa) | Alongamento na rotura (%) | Coef. de expansão térmica (.K ⁻¹) |
|-----------------------|---------------------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------------|---|
| 72 000 | 2,81 | 530 | 460 | 8 | 23,6*E ⁻⁶ |

Fonte: Adaptado de (PolyLANEMA, 2023).

Foram realizados dois ensaios de corte lateral em blocos de dimensões de 308mm X 154mm X 50mm (comprimento X largura X altura). Os blocos foram fixos à mesa da máquina CNC com recurso a dois parafusos M12, de forma a se obter uma fixação rígida que minimize as vibrações. A Figura 4.9 a) mostra a ferramenta

acoplada ao cone térmico usada nos ensaios e a Figura 4.9 b) mostra a fixação do bloco à mesa.



a)



b)

Figura 4.9 – Ferramenta e bloco usados: a) montagem cone e ferramenta; b) bloco fixado à mesa da máquina.

Dos dois ensaios experimentais realizados, um foi realizado com recurso a fluido de corte (emulsão de óleo em água) por refrigeração interna de alta pressão (21bar), sendo expelido para a zona de corte pelos furos internos do cone térmico (Figura 4.10 a)). O outro ensaio foi realizado com recurso a refrigeração por ar comprimido de 5bar de pressão externa (Figura 4.10 b)). Após a realização de ambos os ensaios, foi avaliado o desgaste das ferramentas, o sinal de vibração registado durante o processo e analisado o acabamento superficial das superfícies maquinadas após o corte. No que diz respeito à aquisição da vibração durante o corte, é de notar que a refrigeração interna tem um efeito significativo no sinal de vibração adquirido, uma vez que, o acelerómetro está montado numa zona onde internamente o fluido passa e, como tal, amplia o sinal adquirido. Para ambos os ensaios, o acelerómetro foi acoplado ao *spindle* da máquina (Figura 3.5).

*Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075.
Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem*

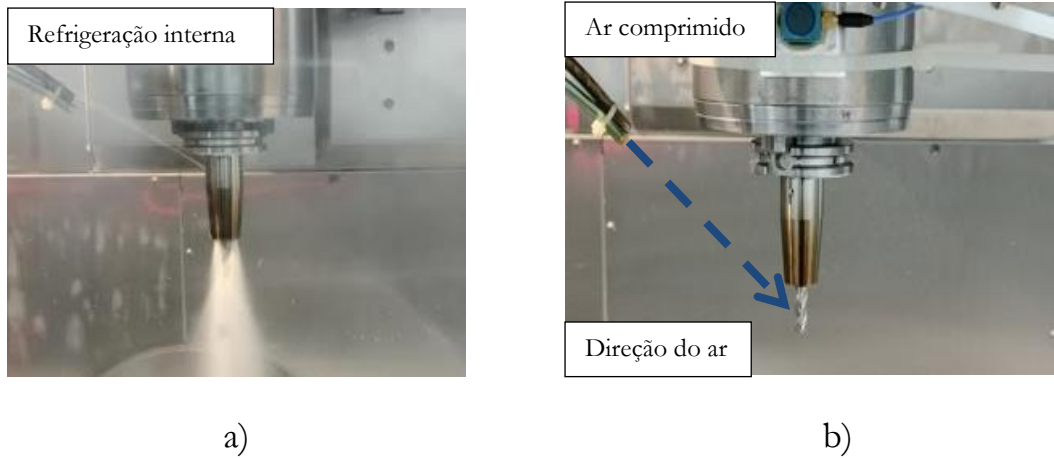


Figura 4.10 – Tipos de refrigeração: a) refrigeração interna por fluido de corte; b) refrigeração externa por ar comprimido.

Ambos os sistemas de refrigeração apresentam metodologias de trabalho diferentes, ou seja, quando se está a usar o fluido de corte, este é usado para arrefecer e limpar a zona de corte. No caso do ar comprimido, este é usado para escoar a apana, sendo que, esta é a responsável por levar o calor da zona de corte (este tipo de metodologia é usado com recurso a parâmetros de corte associados à maquinagem dinâmica e a alta velocidade).

Em ambos os ensaios a maquinagem consistiu em 4 ciclos de corte programados com o *software* Mastercam®. O ciclo adotado para os ensaios experimentais foi o Blend (Figura 4.11). Este é um ciclo do tipo 2D que permite que o corte comece na periferia do bloco e vá progredindo até ao centro (evitando-se a zona dos parafusos de fixação). Desta forma, é possível garantir uma largura e profundidade de corte constantes.

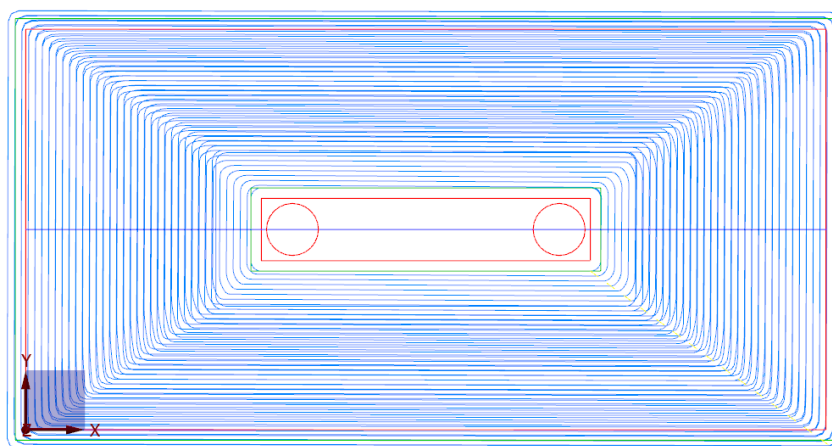


Figura 4.11 – Ciclo usado em ambos os ensaios de corte lateral.

A evolução do bloco em ambos ensaios é apresentada na Figura 4.12.

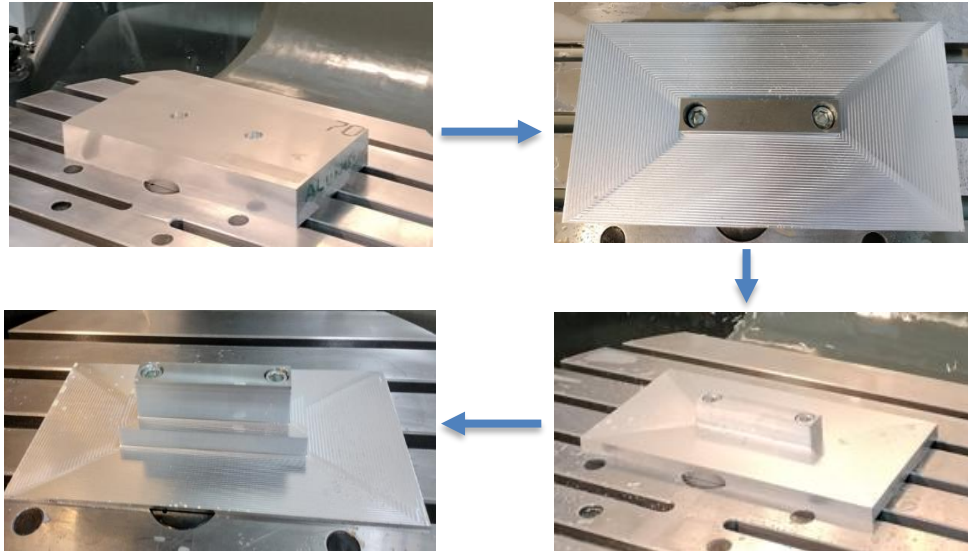


Figura 4.12 – Evolução do bloco ao longo da maquinagem.

4.2.2 – Parâmetros de Corte

Os parâmetros de corte adotados na maquinagem foram os que se apresentam na Tabela 4.2. A decisão do uso destes parâmetros de corte prendeu-se pelo facto de serem parâmetros médios para este tipo de corte adotados nos catálogos de fresagem da Palbit® para fresas integrais de topo plano para alumínio.

Tabela 4.2 – Parâmetros de corte usados no corte lateral.

| Parâmetro | Valor |
|--|--------|
| Largura de corte – a_c (mm) | 3,2 |
| Altura/profundidade de corte – a_p (mm) | 12 |
| Velocidade de corte – v_c (m.min ⁻¹) | 301 |
| Rotação da ferramenta – N (R.P.M) | 12 000 |
| Avanço por gume – f_z (mm.gume ⁻¹) | 0,15 |
| Velocidade de avanço – v_f (mm.min ⁻¹) | 5 400 |

*Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075.
Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem*

Com os parâmetros de corte referidos, foram obtidos os tempos e distâncias lineares de corte indicados na Figura 4.13.

| Representação do bloco (vista lateral) | Distância de corte linear | Tempo de corte |
|--|---------------------------|------------------|
| 1º Ciclo | 23 795,507mm | 4min26s |
| 2º Ciclo | 23 807,507mm | 4min27s |
| 3º Ciclo | 23 819,507mm | 4min27s |
| 4º Ciclo | 22 384,109mm | 4min12s |
| | Total = 93 806,621mm | Total = 17min32s |

Figura 4.13 – Representação esquemática de cada ciclo de corte e tempos e distâncias associados.

Analisando a Figura 4.13, é ainda possível verificar a representação esquemática da vista lateral do bloco, com os vários ciclos de maquinagem apresentados. É de salientar que cada ciclo tem uma profundidade de corte de 12mm, permanecendo na base 2mm do bloco que não é maquinado. Os tempos e distâncias de corte apesar de muito similares não coincidem, pois, cada ciclo teve de ser adaptado ao sistema de aperto e ter em consideração a altura da ferramenta de modo a não existir colisão entre a ferramenta e o sistema de fixação.

4.2.3 – Desgaste das Ferramentas

Atendendo às características da liga de alumínio utilizada nos ensaios de maquinagem, bem como ao comprimento de corte realizado durante os testes, não era expectável logo à partida obter valores de desgaste significativos nas ferramentas utilizadas. De facto, ensaios realizados em ligas de alumínio de boa maquinabilidade, são sempre muito longos e onerosos para obter conclusões para o desgaste da ferramenta. Por isso, o objetivo prendeu-se em obter indicações comparativas sobre o comportamento ao desgaste da ferramenta num estágio inicial, quando a ferramenta executa o corte com um fluido (emulsão líquida) e com ar comprimido.

O desgaste das ferramentas tanto no ensaio com fluido de corte como com ar comprimido foi avaliado após cada ciclo de maquinagem, com recurso ao microscópio ótico. Para ambos os ensaios, é possível afirmar que o desgaste nas ferramentas de forma global foi muito baixo. As zonas mais notórias de desgaste ocorreram nas arestas de corte em ambas as ferramentas, o qual pode ser visto na Figura 4.14 e na Figura 4.15 a) para o caso da maquinagem com fluido de corte e na Figura 4.16 e na Figura 4.17 para o caso da maquinagem com ar comprimido.

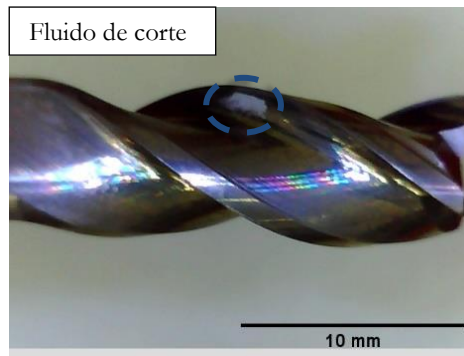
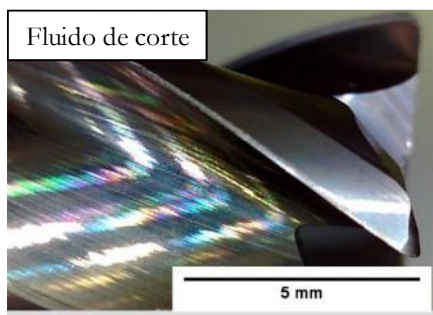
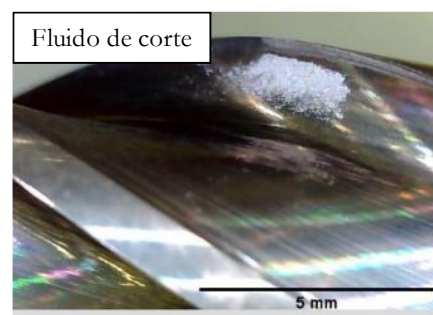


Figura 4.14 – Desgaste no gume de corte mais afetado (fluido de corte). Ampliação de 20X.



a)



b)

Figura 4.15 – Desgaste dos gumes de corte (fluido de corte): a) aresta de corte mais desgastada; b) marca de compressão da apara na superfície de ataque. Ampliação de 50X.



Figura 4.16 – Desgaste no gume de corte mais afetado (ar comprimido). Ampliação de 20X.

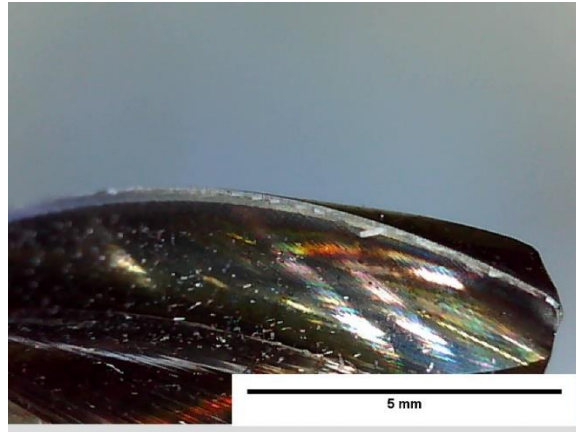


Figura 4.17 – Desgaste no gume de corte mais afetado (ar comprimido). Ampliação de 50X.

Analisando o desgaste que as ferramentas obtiveram e de acordo com a Tabela 2.10 e a norma ISO 8688 – 2 (1989), pode-se afirmar que as ferramentas sofreram um desgaste de flanco uniforme, nos dois tipos de ensaios. No entanto, na ferramenta usada no ensaio com fluido de corte também surgiu nos três canais de escoamento da apara uma marca na transição da zona de corte para a superfície livre de contacto entre a ferramenta e material. Na Figura 4.14 e na Figura 4.15 b) apresenta-se em realce a marca referida. Esta marca, indica uma zona de compressão da apara contra a ferramenta, possivelmente devido ao fluido de corte ser ineficiente na extração da apara, em virtude do efeito de cone provocado pela alta rotação da ferramenta, não incidindo então o fluido diretamente na zona de corte. Este tipo de desgaste pode ser associado ao desgaste de descamação indicado pela Tabela 2.10 e norma ISO 8688 – 2 (1989).

Na ferramenta usada no ensaio com ar comprimido a marca de compressão da apara já não apareceu, indicando uma boa incidência do ar comprimido na zona de corte levando a um melhor escoamento da apara. No entanto, o desgaste das arestas de corte da ferramenta dos ensaios com ar comprimido é ligeiramente superior aos anteriores. Para além disso, registou-se uma maior adesão de pequenas partículas de apara em toda a zona de corte da ferramenta, sendo isto observado na Figura 4.16 e na Figura 4.17, possivelmente pelo facto de a temperatura de corte ser superior, aumentando a propensão à adesão da apara de alumínio à ferramenta.

Como já referido anteriormente, em ambos os ensaios o desgaste não foi muito pronunciado, o que indica que para este tipo de material, os parâmetros de corte podem ser mais agressivos e/ou que o tempo de corte terá de ser mais longo para obter-se resultados mais conclusivos.

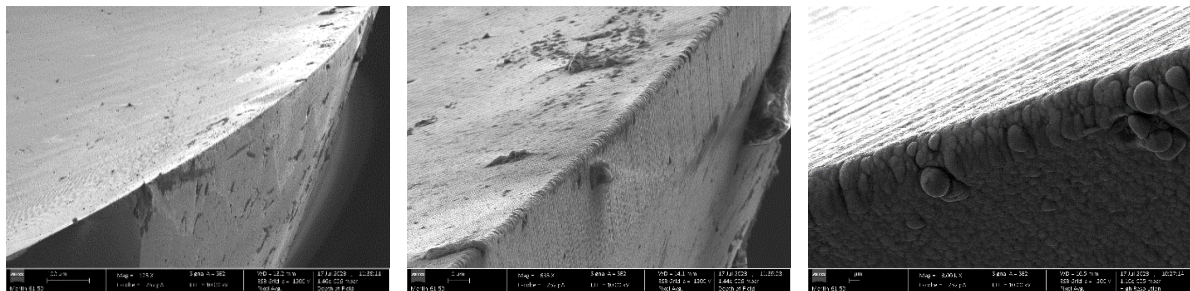
Uma vez que, o desgaste não teve uma evolução muito notória ao longo dos vários ciclos de corte em ambos os ensaios experimentais, importa referir que desde a Figura 4.14 até à Figura 4.17 apenas é apresentado o desgaste avaliado após o término dos ensaios experimentais e as zonas mais afetadas pelo mesmo (gumes de corte com desgaste mais pronunciado).

A análise do desgaste das ferramentas foi também realizada com recurso ao MEV, tendo sido selecionada para o estudo a fresa com maior desgaste, ou seja, a usada na maquinagem com recurso a ar comprimido. A captação de imagens foi feita com a fresa inclinada a cerca de 45°, com o feixe de eletrões a incidir a partir do topo da ferramenta (Figura 4.18), tendo sido dado ênfase na lateral da ferramenta sendo esta a de maior interesse neste caso



Figura 4.18 – Orientação das ferramentas para a incidência do feixe de eletrões na análise no MEV.

A Figura 4.19 apresenta um detalhe da aresta de corte da ferramenta nova, antes de ser utilizada no corte, sendo as imagens obtidas com sucessivas ampliações. A Figura 4.19 c) evidencia a morfologia do revestimento TiB₂ utilizada nestas ferramentas.



a)

b)

c)

Figura 4.19 – Detalhe da aresta de corte de uma ferramenta antes de ser utilizada: a) ampliação de 125X; b) ampliação de 635X; c) ampliação de 3000X.

Relativamente à ferramenta utilizada no corte lateral com recurso a ar comprimido, a Figura 4.20 apresenta as imagens MEV relativas ao desgaste do gume de corte, em resultado do corte lateral executado.

A Figura 4.20 a), a Figura 4.20 b) e a Figura 4.20 c) mostram que simultaneamente com o desgaste de flanco da ferramenta, ocorre alguma acumulação de material na face de escoamento da apara, com ampliações sucessivas.

*Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075.
Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem*

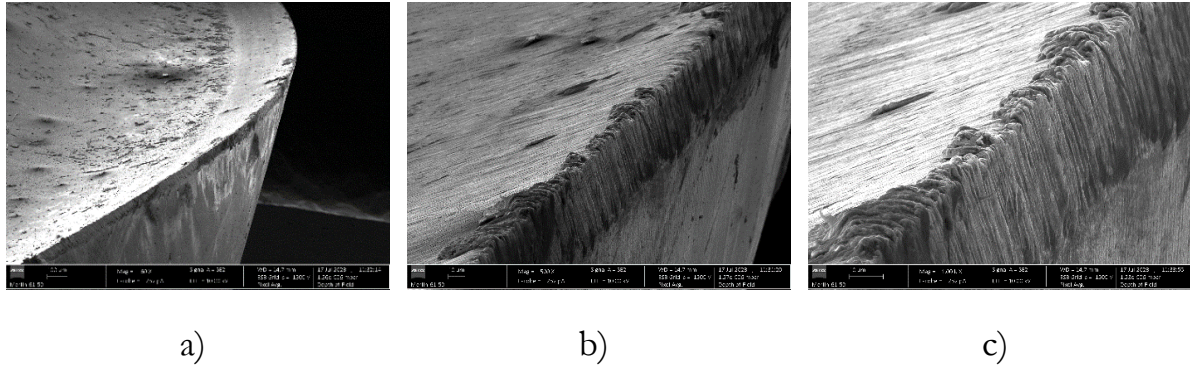


Figura 4.20 – Detalhe da aresta de corte da ferramenta utilizada no corte lateral com ar comprimido: a) ampliação de 60X; b) ampliação de 500X; c) ampliação de 1000X.

A análise química de uma área superficial da ferramenta realizada por EDS indicada na Figura 4.19 c), confirma que o revestimento da ferramenta é TiB₂ (Figura 4.21). Os restantes elementos químicos detetados nesta análise (C, O e Ca) devem-se a impurezas que se encontram sobre a superfície da ferramenta.

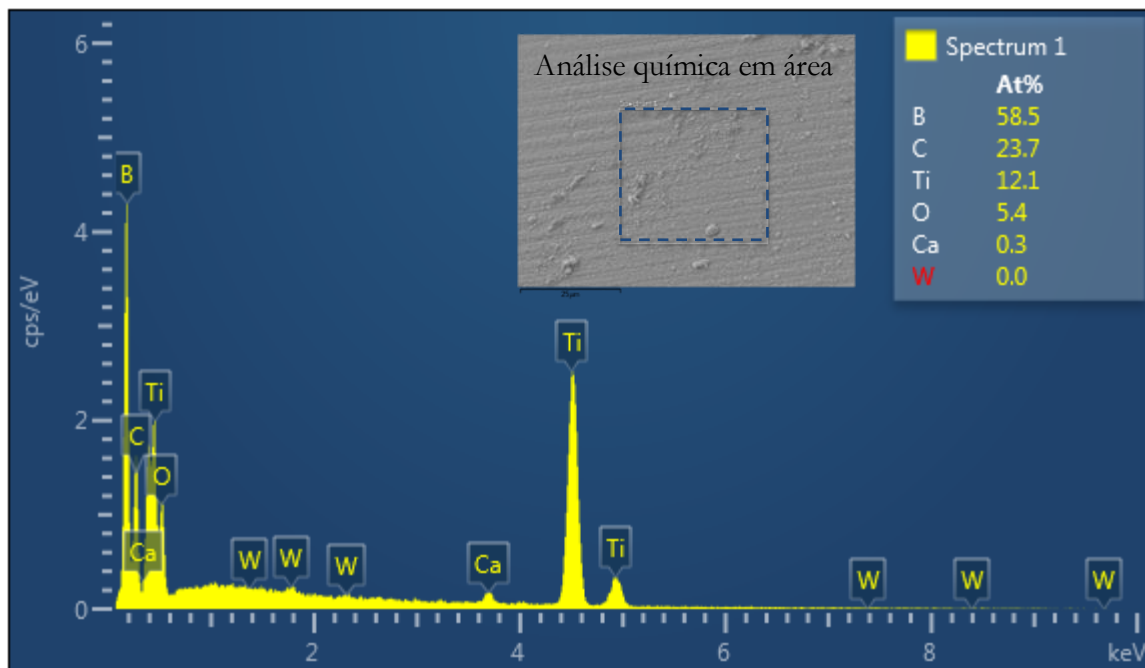


Figura 4.21 – Espectro EDS obtido em área na superfície da ferramenta nova.

4.2.4 – Análise de Vibrações

Para a rotação da ferramenta utilizada no trabalho de corte lateral corresponde uma frequência de 200Hz (12 000R.P.M/60s), logo a análise dos dados de vibração foi realizada em amplitude de velocidade apesar da sua aquisição ter sido realizada em aceleração por meio do acelerómetro triaxial 356B08. A aquisição do sinal foi feita com a aplicação em LabVIEW® (Capítulo 4.1.1) com uma taxa de aquisição de 2 048 Hz, verificando-se assim o teorema de Nyquist e usando um filtro *lowpass* a 1 024Hz (devido ao enunciado no Capítulo 2.4.3). O tratamento, processamento e análise dos dados foram realizados com recurso à aplicação desenvolvida em MATLAB®. A ordem do filtro *butterworth* usado na filtragem de dados foi de quatro e a frequência de corte de 200Hz, fazendo com que frequências abaixo da de trabalho tivessem uma influência nula ou pelo menos mínima no sinal a avaliar.

No sinal de vibração do ensaio com refrigeração interna de alta pressão foi removida a frequência associada a este efeito, sendo esta aproximadamente 248Hz. Esta conclusão foi possível apurar em ensaios prévios, efetuando a aquisição da vibração com o equipamento com a refrigeração interna ativa. Para determinação desta frequência, primeiramente ligou-se o sistema de refrigeração interno com o *spindle* parado e posteriormente a rodar a 12 000R.P.M, sem qualquer movimento nos eixos da máquina. Desta forma, observou-se no domínio da frequência, qual era o primeiro pico característico que aparecia nos vários eixos. É de salientar que, a análise no domínio da frequência foi feita com o uso de uma janela Retangular, de modo a obter a melhor precisão na frequência (tal como referido no Capítulo 2.4.3). Na Figura 4.22, apresenta-se o pico característico da refrigeração interna para os eixos X, Y, Z e a sua resultante com *spindle* sem rotação e máquina sem qualquer movimentação segundo os seus eixos. O pico de vibração que surge nos vários gráficos da Figura 4.22 de 496Hz, diz respeito ao 2º harmónico da frequência característica da refrigeração interna, tendo sido também o 2º harmónico removido como o filtro aplicado. Ambas estas frequências foram retiradas com recurso ao filtro *bandstop*, sendo a gama considerada de 245Hz a 250Hz e de 490Hz a 500Hz, uma vez que, não é possível remover uma frequência fixa.

A Tabela 4.3 mostra a influência da remoção destas frequências no espetro do eixo X tanto no domínio da frequência como no domínio tempo. A decisão de ser retirada estas frequências prendeu-se com o facto de assim se remover a influência destas ondas do sinal, sendo a comparação entre o ensaio com refrigeração interna e ar comprimido mais fácil e mais fidedigna. Analisando as figuras que estão na Tabela 4.3, consegue-se visualizar que o sinal da amplitude de vibração baixa devido à remoção das frequências de 248Hz e 496Hz.

Para o ensaio com recurso a ar comprimido, não houve necessidade de proceder à remoção de qualquer frequência, pois o sinal não apresentou nenhum pico característico. Esta constatação, pode ser explicada provavelmente pelo facto de o ar não incidir diretamente no acelerómetro e não afetar assim muito o sinal de vibração, em contraste com a refrigeração interna, a qual afeta diretamente o

Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075.
Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem

acelerômetro, visto que, o fluido de corte passa pelo interior do *spindle* onde o acelerômetro está montado

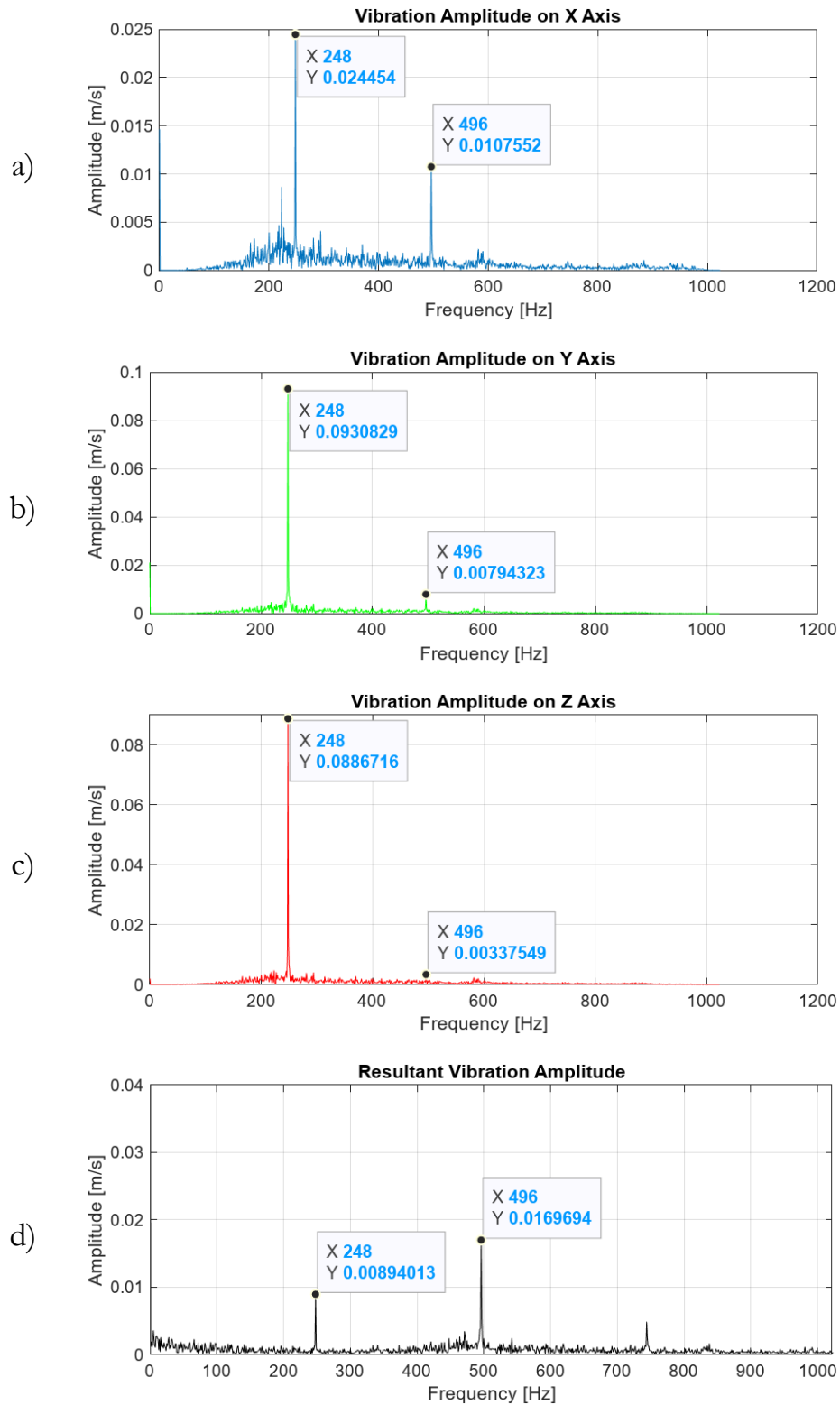


Figura 4.22 – Picos característicos da refrigeração interna representados no domínio da frequência: a) eixo X; b) eixo Y; c) eixo Z; d) Resultante.

Tabela 4.3 – Comparação do antes e depois da remoção das frequências de 248Hz e 496Hz.

| | Antes da remoção dos 248Hz e 496Hz | Após a remoção dos 248Hz e 496Hz |
|-----------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| Domínio do tempo | | |
| Domínio da frequência | | |

No que diz respeito ao sinal de vibração adquirido durante o corte lateral, a Tabela 4.4 mostra uma comparação entre o espectro de vibração nos eixos X e Y (sendo estes onde a vibração se mostra mais notória para este tipo de corte) entre os ensaios realizados, para o último ciclo de corte em ambos.

Tabela 4.4 – Espectro de vibração nos eixos X e Y durante a maquinagem lateral para o 4º ciclo (domínio do tempo).

| | Amplitude de vibração no eixo X | Amplitude de vibração no eixo Y |
|--------|---------------------------------|---------------------------------|
| Fluido | | |
| Ar | | |

Avaliando a vibração no domínio do tempo em ambos os ensaios, é possível distinguir bem as zonas correspondentes ao momento em que a ferramenta está a realizar o corte segundo um determinado eixo, uma vez que, a amplitude do sinal de vibração no eixo de corte é superior durante este período. Por este motivo, atendendo que o corte lateral em redor do contorno vai alternando entre o eixo X e o eixo Y, o espectro de vibração para cada eixo apresenta alternadamente blocos de maior amplitude e blocos de menor amplitude. É de notar que, a amplitude de vibração no eixo X é superior à amplitude de vibração no eixo Y. Esta diferença deve-se ao maior curso de corte na direção do eixo X (o comprimento do bloco está orientado segundo o eixo X e a largura segundo o eixo Y). A amplitude de vibração é substancialmente superior no ensaio com fluido de corte do que no ensaio com ar comprimido, mesmo se tendo eliminado as ondas de 248Hz e de 496Hz associadas à refrigeração interna. Apesar disto, ambos os espectros de vibração apresentam o mesmo comportamento nos dois ensaios.

Quanto ao valor de RMS da vibração, valor eficaz que mostra a capacidade destrutiva do espectro de vibração, este teve uma evolução diferente no ensaio com fluido e no ensaio com ar (Figura 4.23).

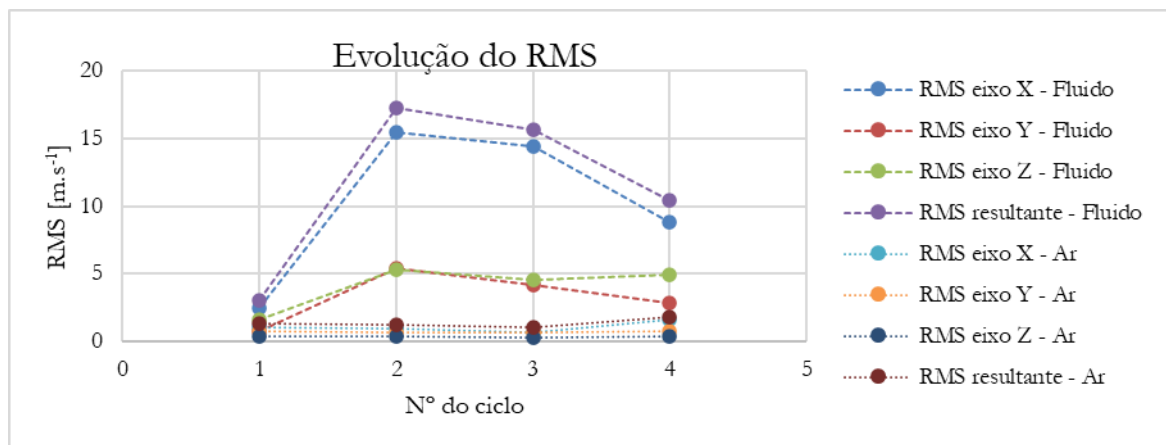


Figura 4.23 – Evolução do valor de RMS ao longo do corte.

No ensaio com fluido de corte, o RMS teve tendência a aumentar nos vários eixos, do primeiro para o segundo ciclo e depois a diminuir até ao último ciclo de corte, enquanto no ensaio com ar comprimido, o RMS teve um comportamento aproximadamente constante em todos os ciclos. Para além do que foi referido anteriormente, é ainda possível visualizar que existe uma grande diferença entre o valor eficaz da onda no ensaio com fluido de corte em comparação com o ensaio com ar comprimido. Esta grande diferença prova que, o sistema de refrigeração interna induz um efeito muito superior no aparecimento de vibrações, do que o ar comprimido. Note-se que foi aplicado ao sinal adquirido um filtro para atenuar o efeito na vibração do fluido a passar no interior do *spindle*. No entanto, o fluido tem outros efeitos na vibração, tais como o impacto do jato na ferramenta, no bloco de alumínio, entre outros efeitos, os quais contribuem decididamente para que o sistema global tenha maior vibração durante o corte.

Analisando os ensaios no domínio da frequência (Tabela 4.5), é possível observar de forma clara o pico associado à rotação da ferramenta de 200Hz, bem como, a frequência de contacto dos gumes com o material (600Hz). Esta frequência é três vezes superior à de rotação da ferramenta, visto a fresa ter 3 gumes e o contacto se estabelecer então 3 vezes por rotação. Os picos observados a 400 e 800 Hz, são provavelmente harmónicos do pico a 200 Hz. Se assim for, existirá também um harmónico a 600 Hz, o qual está sobreposto ao efeito do contacto do gume de corte com o material, dado terem ambos os fenómenos esta frequência comum. A janela, a frequência e o comprimento do sinal para realizar a FFT foram a Hann, 2 048Hz e 2 048 pontos, respetivamente, de forma a obter-se uma dispersão espectral mínima e uma resolução excelente. Por outro lado, e tal como aconteceu na análise no domínio do tempo, também no domínio da frequência se verifica que no ensaio com fluido de corte as vibrações são substancialmente superiores.

Tabela 4.5 – Espectro de vibração nos eixos X e Y durante a maquinagem lateral para o 4º ciclo (domínio da frequência).

| | Amplitude de vibração no eixo X | Amplitude de vibração no eixo Y |
|--------|--|--|
| Fluido | <p>Vibration Amplitude on X Axis</p> <p>Amplitude [m/s]</p> <p>Frequency [Hz]</p> <p>Maximum</p> <p>14.71195</p> | <p>Vibration Amplitude on Y Axis</p> <p>Amplitude [m/s]</p> <p>Frequency [Hz]</p> <p>Maximum</p> <p>14.71201</p> |
| Ar | <p>Vibration Amplitude on X Axis</p> <p>Amplitude [m/s]</p> <p>Frequency [Hz]</p> <p>Maximum</p> <p>2.69801</p> | <p>Vibration Amplitude on Y Axis</p> <p>Amplitude [m/s]</p> <p>Frequency [Hz]</p> <p>Maximum</p> <p>1.45954</p> |

4.2.5 – Rugosidade

O acabamento superficial obtido nas superfícies maquinadas foi avaliado com recurso aos parâmetros de rugosidade média (R_a), rugosidade média quadrática (R_q) e rugosidade máxima (R_z), de acordo com a norma ISO 4287 (1997). A Figura 4.24, apresenta as zonas que foram avaliadas sendo que, os parâmetros foram medidos com o curso da cabeça do rugosímetro perpendicular às marcas de maquinagem.

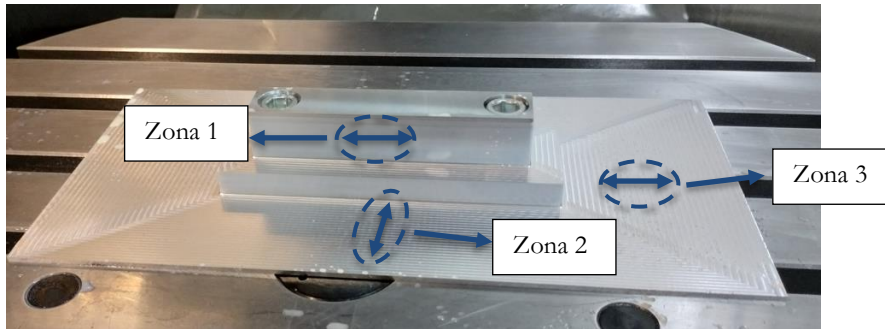


Figura 4.24 – Zonas de medição de rugosidade.

A rugosidade foi avaliada tanto para o bloco do ensaio com fluido de corte como para o bloco do ensaio com ar comprimido, tendo sido selecionado para avaliar a rugosidade uma superfície obtida com corte lateral da ferramenta (zona 1) e duas superfícies obtidas com corte frontal da ferramenta (zonas 2 e 3). O comprimento de amostragem para a zona 1 foi de 0,8mm com comprimento de avaliação de 4mm. Para as zonas 2 e 3 o comprimento de amostragem foi de 2,5mm e avaliação 12,5mm, conforme o apresentado no Apêndice B (foi tomada esta decisão após uma primeira análise dos parâmetros de rugosidade). A comparação entre os valores de rugosidade nas várias zonas pode ser vista na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Comparação dos parâmetros de rugosidade das superfícies maquinadas.

| Zonas | Rugosidade média (R_a) (μm) | | Rugosidade média quadrática (R_q) (μm) | | Rugosidade máxima (R_z) (μm) | |
|--------|--|------|---|------|---|-------|
| | Fluido | Ar | Fluido | Ar | Fluido | Ar |
| Zona 1 | 0,69 | 1,38 | 0,88 | 1,67 | 4,03 | 6,95 |
| Zona 2 | 4,02 | 4,48 | 5,15 | 5,53 | 23,56 | 22,71 |
| Zona 3 | 4,61 | 4,99 | 6,42 | 6,99 | 31,91 | 32,73 |

A rugosidade nas várias superfícies do bloco maquinado com recurso a ar comprimido mostrou ser maior do que no bloco maquinado com fluido de corte, sendo este último preferencial para se obter um melhor acabamento superficial. Isto mostra que a maior vibração obtida no ensaio com fluido de corte não influencia o acabamento superficial, reforçando a ideia de que esta está associada aos diferentes

efeitos que o fluído de corte tem no sinal de vibração. O desgaste ligeiramente superior das arestas de corte da fresa usada no ensaio com ar também está de acordo com o pior acabamento superficial deixado pela fresa em relação à usada no ensaio com fluido. É ainda de salientar que a rugosidade na base das superfícies maquinadas (zonas 2 e 3) apresenta valores mais altos que na zona lateral (zona 1), devido ao facto de o corte preferencial deste tipo de fresas ser o lateral. Da análise comparativa da rugosidade da zona 2 e 3, é possível afirmar que embora estas zonas apresentem rugosidades próximas, os valores são maiores quando o corte é realizado segundo o eixo Y da máquina CNC (zona 3).

4.3 – Ensaios de Corte em Rampa

4.3.1 – Materiais, Ferramentas e Procedimento

Posteriormente aos ensaios de maquinagem de corte lateral, foram efetuados ensaios experimentais de corte de rampas em placas do mesmo material. Os ensaios experimentais consistiram no corte de rampas com três graus de inclinação diferentes (1° , 2° e 3°), sendo efetuadas 20 rampas para cada inclinação testada. Cada rampa partiu da superfície do bloco até ser atingida a profundidade de 8mm. O sistema cone e fresa é o mesmo discutido no Capítulo 4.2.1 (Figura 4.9 a)). As placas usadas têm as dimensões de 550mm X 165mm X 12mm para o caso de rampas de 1° de inclinação e de 360mm X 240mm X 12mm para o caso das rampas de 2° e 3° de inclinação.

A fixação de placas na mesa da máquina foi realizada com recurso a 4 mordentes de forma a garantir-se um aperto rígido e assim diminuir as vibrações produzidas durante o corte. A Figura 4.25 ilustra sistema de fixação usado.

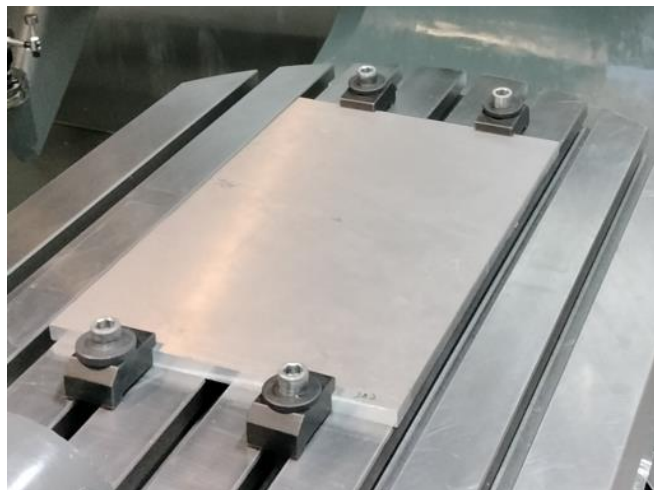


Figura 4.25 – Sistema de fixação das placas à mesa.

Para o caso das rampas de 1° de inclinação, houve a necessidade de se usar uma placa de maior dimensão em virtude de o comprimento de corte necessário para atingir a profundidade de 8mm ser maior do que o caso das rampas de 2° e 3° . No ensaio das rampas com 1° de inclinação, foram realizadas metade das rampas em cada lado do bloco de forma que as mesmas estivessem desfasadas, garantindo-se sempre a máxima rigidez possível no corte (Figura 4.26 a)). Os ensaios das rampas de 2° e 3° de inclinação foram efetuados na mesma placa de material, mas em lados opostos, sendo as rampas produzidas de forma desfasada às rampas que se encontram na face oposta, conforme é ilustrado na vista em corte da simulação de maquinagem (Figura 4.26 b)).

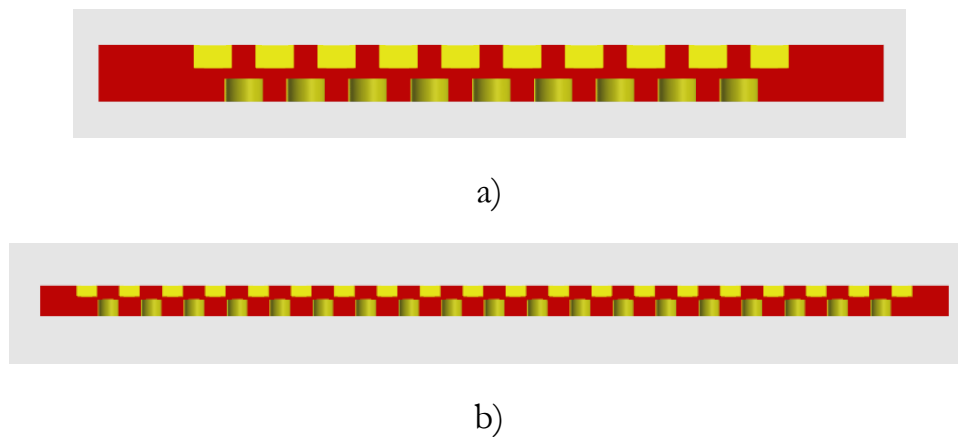


Figura 4.26 – Desfasamento das rampas produzidas nas faces da placa de alumínio: a) rampas de 1° de inclinação; b) rampas de 2° e 3° de inclinação.

Para estes ensaios experimentais de maquinagem com corte em rampa, apenas foi usado o ar comprimido a 5bar como sistema de refrigeração, pois estes ensaios experimentais são os que possivelmente conduzem ao maior desgaste da ferramenta, pelo avaliado no Capítulo 4.2.

A programação das rampas foi efetuada com recurso ao *software* Mastercam® e consistiu no uso do ciclo 2D Contour com a opção de rampa ativa. A Figura 4.27 mostra as trajetórias geradas para as rampas de 2° de inclinação.

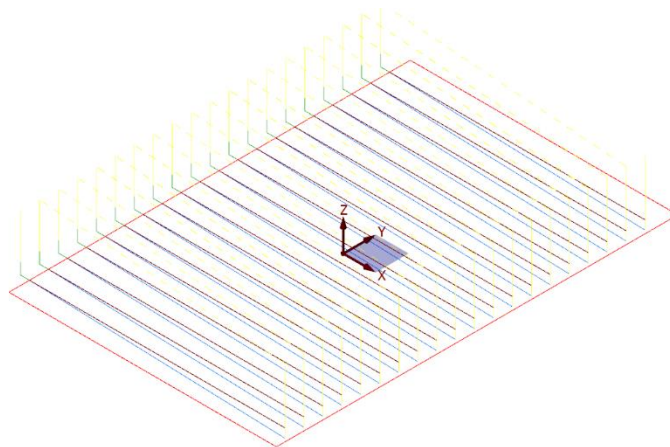


Figura 4.27 – Ciclo usado nos ensaios de corte em rampas.

A sequência de maquinagem das rampas pode ser vista na Figura 4.28 de forma exemplificativa.

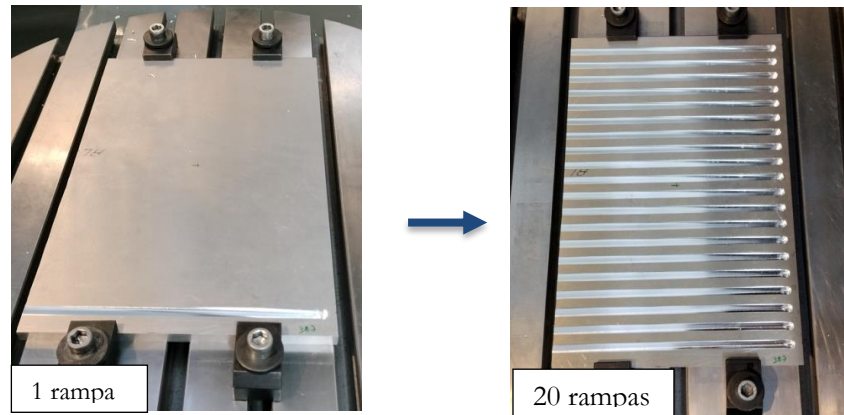


Figura 4.28 – Evolução das rampas.

4.3.2 – Parâmetros de Corte

Os parâmetros de corte adotados para cada ciclo foram os mesmos enunciados no Capítulo 4.2.2 e descritos Tabela 4.2. A Tabela 4.7 apresenta as distâncias lineares percorridas pela ferramenta e tempos de corte obtidos com os parâmetros de corte definidos.

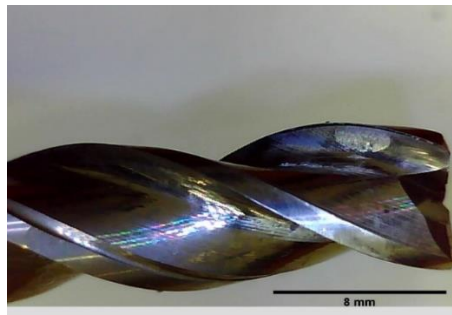
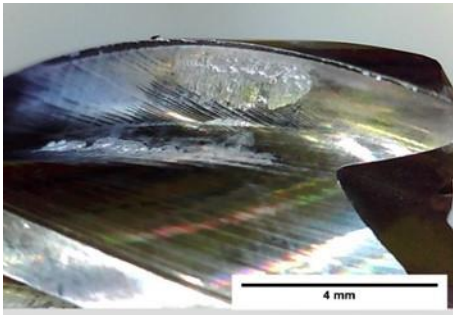
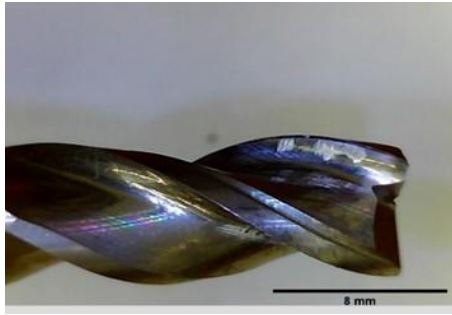
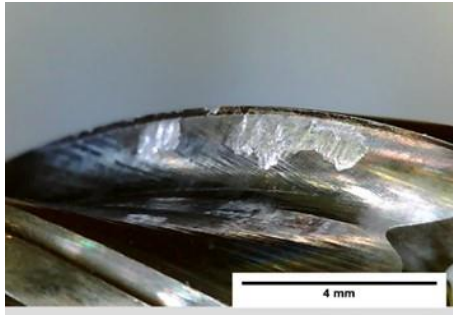
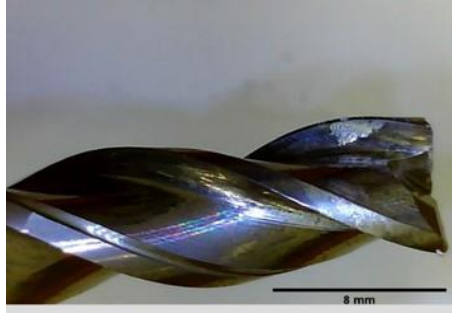
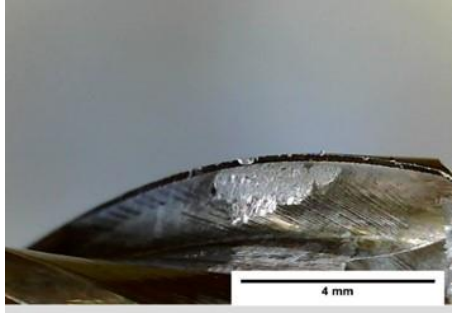
Tabela 4.7 – Distâncias lineares e tempos de corte na maquinagem de rampas.

| | 1° de inclinação | 2° de inclinação | 3° de inclinação |
|---|------------------|------------------|------------------|
| Distância linear de corte (1 rampa) | 476,983mm | 247,23mm | 170,859mm |
| Distância linear de corte total (20 rampas) | 9539,66mm | 4944,6mm | 3417,18mm |
| Tempo de corte (1 rampa) | 6,69s | 4,14s | 3,29s |
| Tempo de corte total (20 rampas) | 133,8s | 82,8s | 65,8s |

4.3.3 – Desgaste das Ferramentas

O desgaste das ferramentas foi avaliado inicialmente no fim do corte de cada rampa, mas como não se observou de forma notória um aumento de desgaste da ferramenta, passou-se a avaliar o desgaste da ferramenta ao fim da produção de quatro rampas. O equipamento usado na avaliação do desgaste foi o mesmo que foi utilizado para os ensaios de corte lateral. Importa referir que, ao contrário dos ensaios de corte lateral apresentados no Capítulo 4.2, nestes ensaios o desgaste da ferramenta é mais notório. Relativamente aos tipos de desgaste que foram observados, estes foram similares aos que aparecerem na fresa usada no corte lateral com fluido de corte. Ou seja, foi observado desgaste de flanco uniforme e desgaste de descamação. Nas rampas com 3° de inclinação, o desgaste de descamação parece mais acentuado, podendo ser interpretado também como desgaste de cratera. A Tabela 4.8 apresenta uma comparação do desgaste no gume de corte e no canal de escoamento da avara, para as ferramentas utilizadas na produção das rampas com diferentes inclinações.

Tabela 4.8 – Desgaste nas fresas após o corte de 20 rampas.

| | Ampliação de 20X | Ampliação de 50X |
|------------------|---|--|
| 1° de inclinação |  |  |
| 2° de inclinação |  |  |
| 3° de inclinação |  |  |

*Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075.
Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem*

Observando as imagens da Tabela 4.8 verifica-se que, o desgaste da ferramenta usada nas rampas com 3° de inclinação foi mais acentuado que as ferramentas usadas nas rampas de 2° e 1° de inclinação. Esta constatação era esperada pois, as condições de corte são mais agressivas à medida que aumenta a inclinação das rampas. No entanto, importa referir que, a distância linear percorrida pela fresa usada com 3° de inclinação é 31% menor que a distância percorrida nas rampas com 2° de inclinação e 65% menor do que a distância linear percorrida com a fresa usada nas rampas com 1° de inclinação. O desgaste no topo da fresa também foi avaliado, sendo este apresentado na Figura 4.29 para a fresa usada no corte de rampas de 3° de inclinação. O desgaste no topo das ferramentas foi similar para as ferramentas utilizadas nas várias inclinações usadas, sendo predominante o fenómeno de desgaste uniforme da aresta de corte com adesão de alumínio.

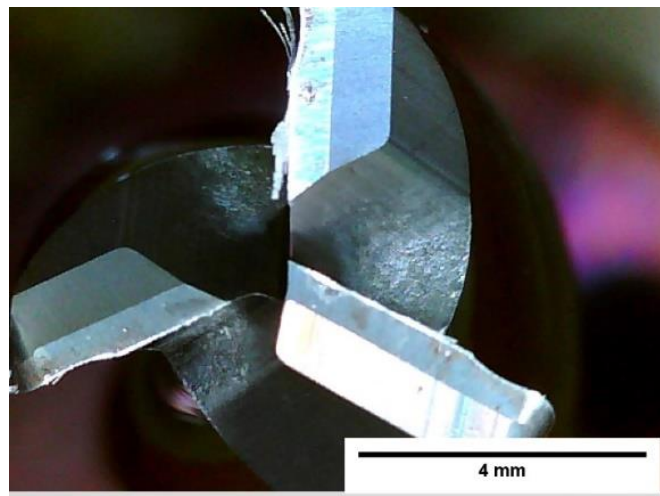
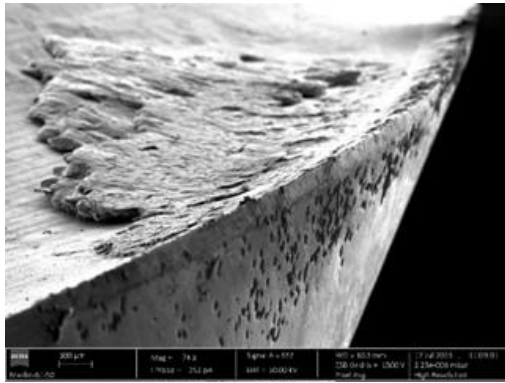


Figura 4.29 – Desgaste de topo na fresa usada nas rampas com 3° de inclinação. Ampliação de 50X.

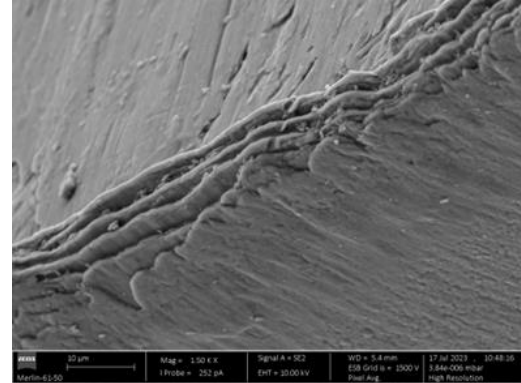
A ferramenta com maior desgaste (fresa utilizada nas rampas de 3° de inclinação) foi avaliada, através do MEV, para melhor compreender e avaliar o seu desgaste.

A Figura 4.30 a) mostra a adesão de alumínio no canal de escoamento da avara, bem como o desgaste de flanco da aresta de corte. Na figura 4.30 b) é possível observar várias camadas de material que foram aderindo sucessivamente ao topo da ferramenta durante o corte, deixando de ser visível a morfologia do revestimento TiB₂ da ferramenta.

A Figura 4.31 mostra a análise de elementos químicos com recurso a EDS na região onde são visíveis múltiplas camadas de material empilhadas (Figura 4.30 b)). É notório que o alumínio é o principal elemento, confirmando que este provem da liga de alumínio na qual foi efetuado o corte em rampa.



a)



b)

Figura 4.30 – Morfologia da aresta da ferramenta utilizada no corte em rampa com 3° de inclinação: a) canal de escoamento da apara e desgaste de flanco da aresta de corte – ampliação de 74X; b) topo da ferramenta – ampliação de 1500X.

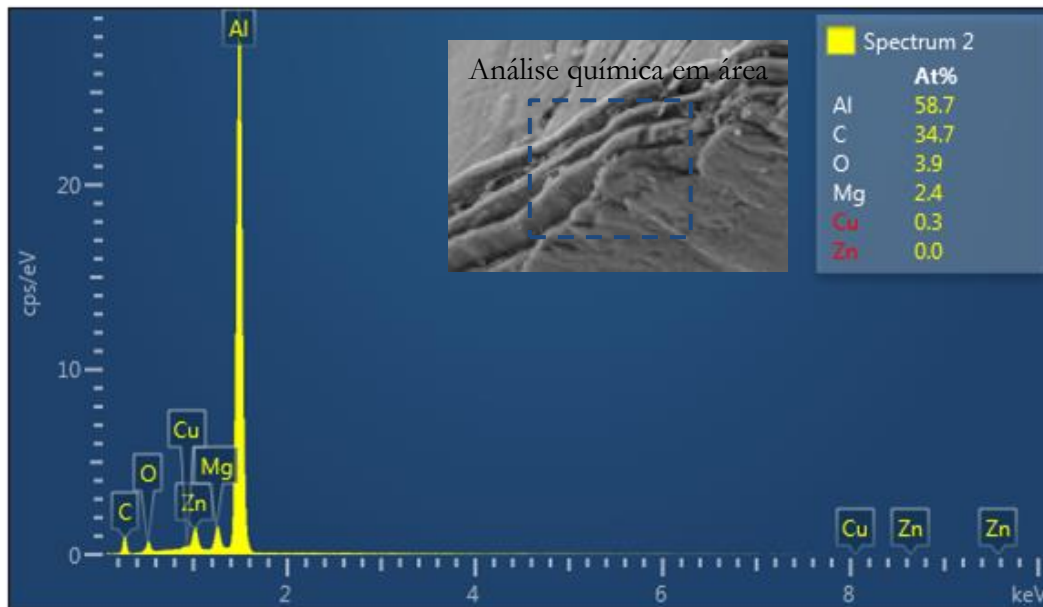


Figura 4.31 – Espectro EDS obtido em área no topo da ferramenta que efetuou o corte em rampa com 3° de inclinação.

4.3.4 – Análise de Vibrações

A aquisição e processamento de dados de vibração foi realizada da mesma forma que a enunciada no Capítulo 4.2.4. A Figura 4.32 mostra o sinal da vibração para o último corte do ensaio experimental com inclinação de 1° , a título de exemplo.

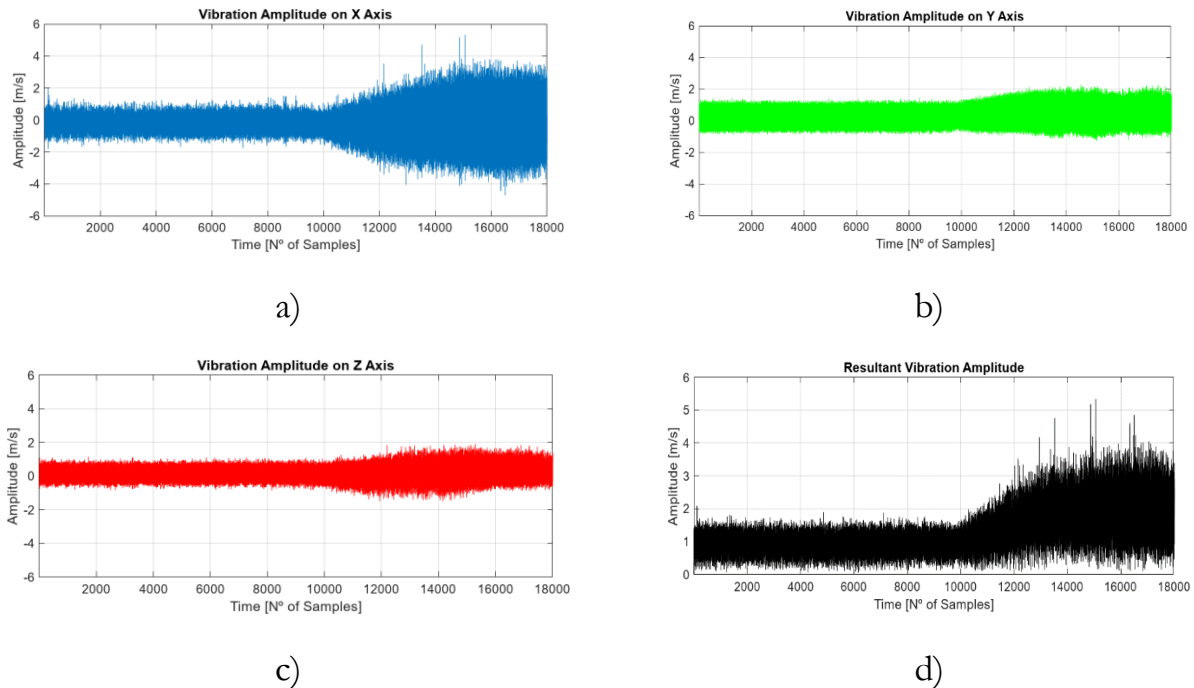


Figura 4.32 – Espectro de vibração durante a maquinagem da última rampa com 1° de inclinação (domínio do tempo): a) eixo X; b) eixo Y; c) eixo Z; d) Resultante.

Avaliando os resultados obtidos na vibração no domínio do tempo é possível perceber que, todas as rampas para os vários graus de inclinação possuem um espectro similar, sendo que a vibração no eixo X é superior à dos restantes eixos, visto, esta ser a direção na qual se efetuou o corte das várias rampas. Consegue-se notar ainda que, existe uma zona inicial em que o espectro e vibração apresenta uma amplitude similar nos vários eixos, de 1 a $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ e posteriormente é notório o aumento significativo de vibração, sendo este maior no eixo X do que nos restantes eixos. Relativamente ao espectro da amplitude resultante, como este depende dos três eixos apresenta sempre uma amplitude de vibração superior. Este fenómeno de aumento de amplitude de vibração deve-se ao facto de, durante o corte, se ir aumentando a profundidade da rampa. A Figura 4.33, a Figura 4.34 e a Figura 4.35 relacionam a distância percorrida pela ferramenta com a vibração registada nas últimas rampas produzidas para a inclinação de 1° , 2° e 3° , respetivamente.

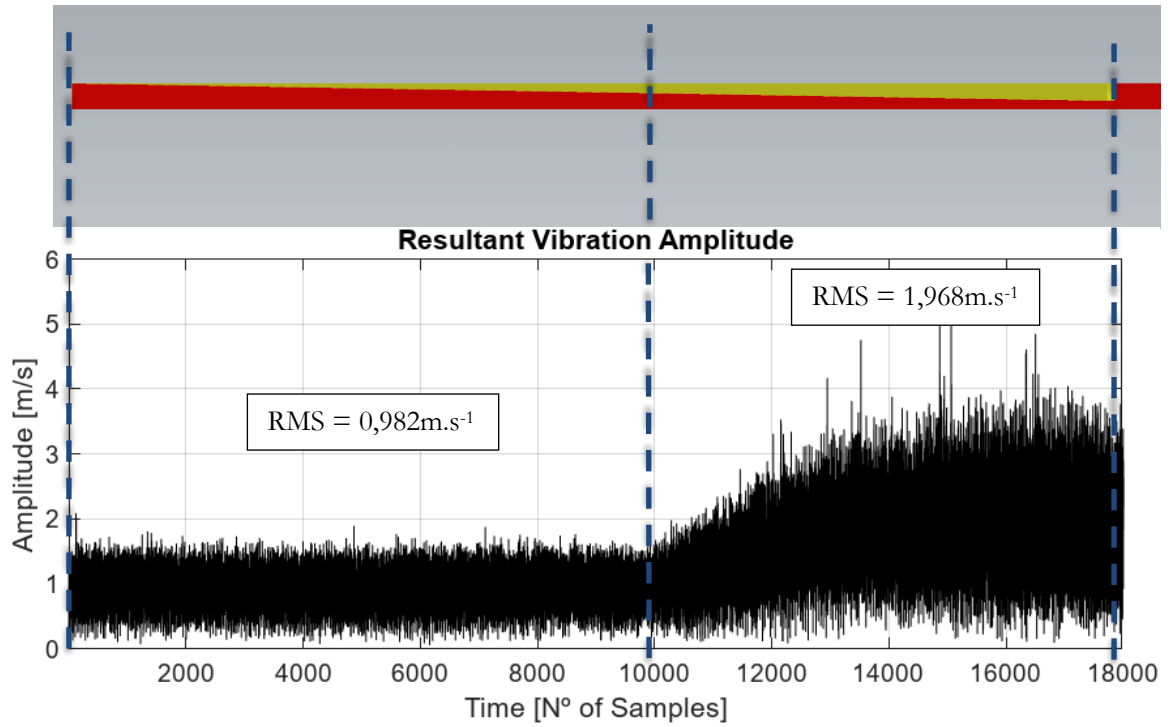


Figura 4.33 – Evolução da resultante da vibração ao longo da rampa de 1° de inclinação.

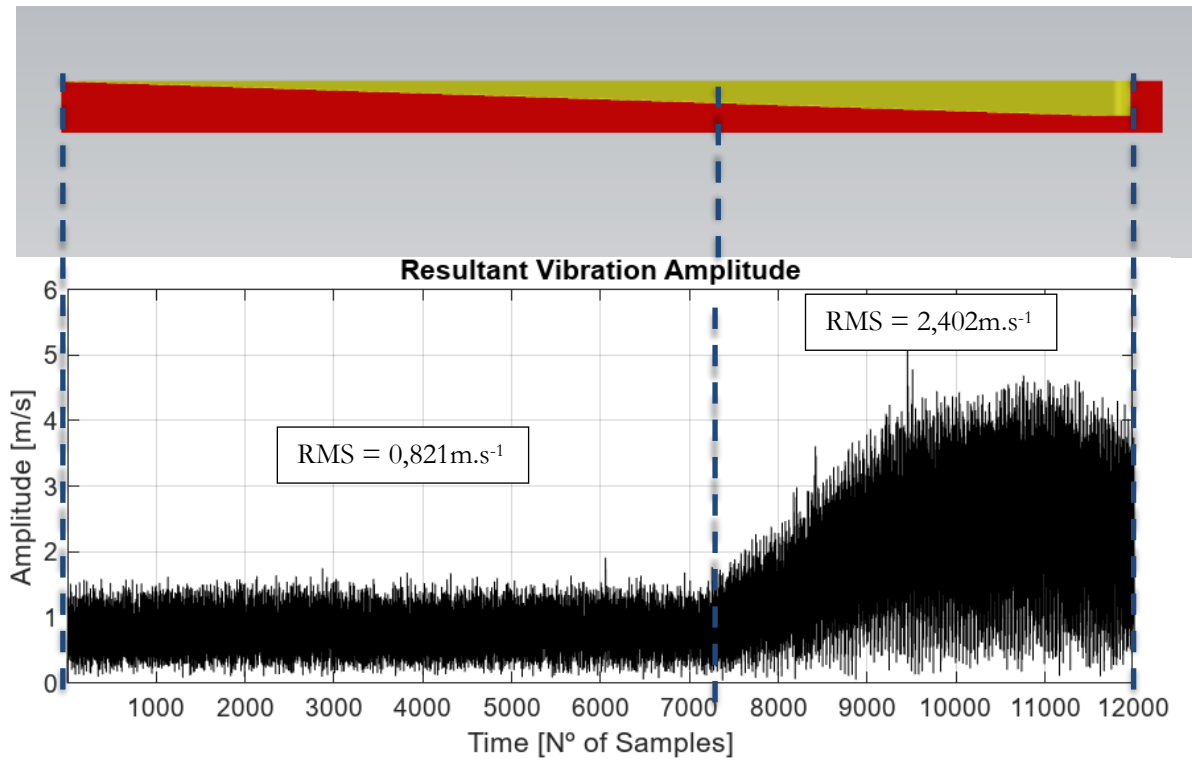


Figura 4.34 – Evolução da resultante da vibração ao longo da rampa de 2° de inclinação.

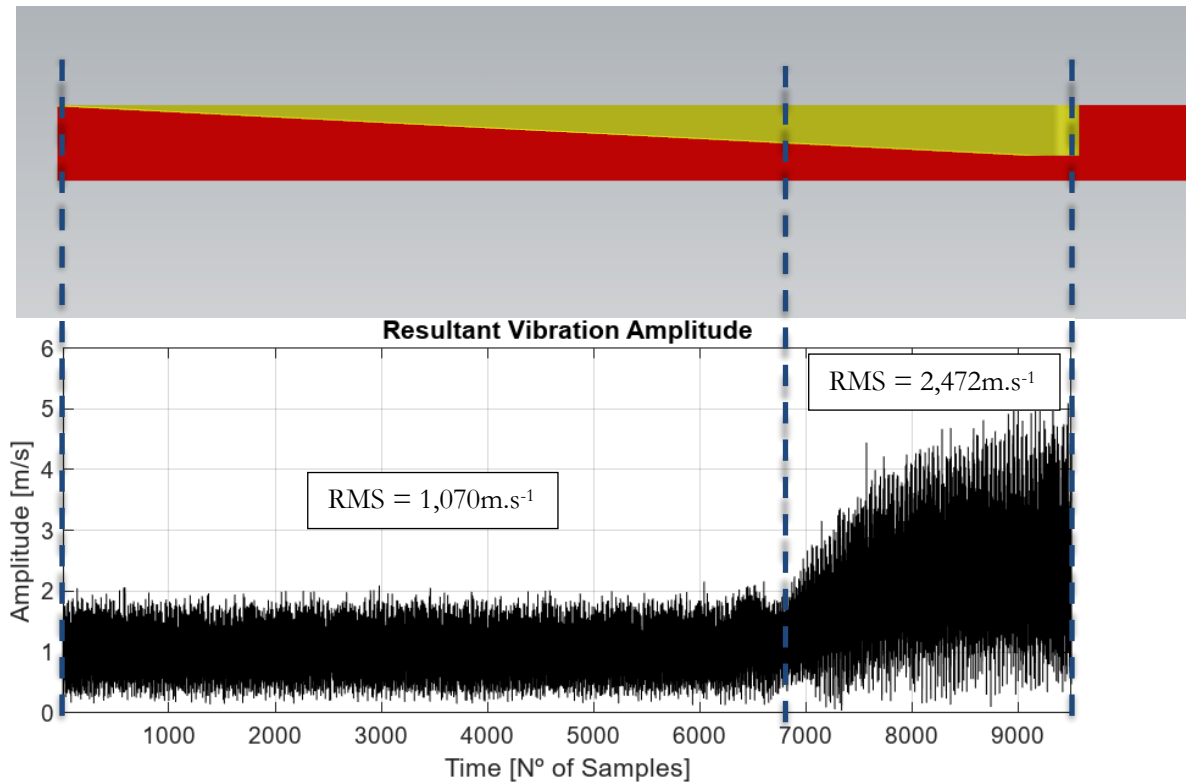
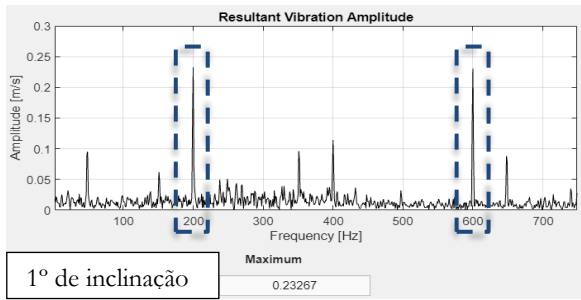


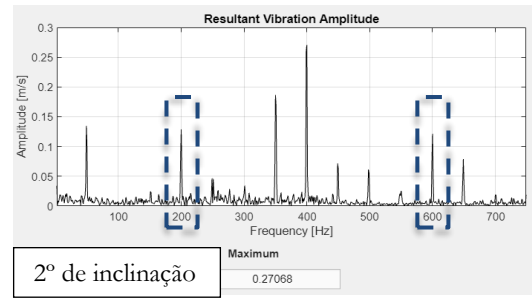
Figura 4.35 – Evolução da resultante da vibração ao longo da rampa de 3° de inclinação.

Analisando a Figura 4.33, a Figura 4.34 e a Figura 4.35 é possível identificar que o aumento significativo da vibração surge mais cedo na rampa com 1° de inclinação (cerca de metade da rampa), enquanto para as rampas de 2° e 3° de inclinação este aumento só surge cerca de dois terços das rampas. Relativamente aos valores de RMS, as figuras mencionadas apresentam o RMS avaliado no espectro de vibração resultante. É de notar que, apesar de na zona inicial da rampa de menor amplitude o RMS ter um decréscimo da rampa de 1° de inclinação para a de 2° de inclinação, na zona final das rampas, onde é registada maior amplitude de vibração, o RMS cresce à medida que aumenta a inclinação, sendo por isso maior na rampa de 3°. Esta constatação está de acordo com o maior desgaste avaliado na fresa usada nas rampas de 3° de inclinação, seguido da fresa usada para 2° de inclinação e por fim a usada para 1° de inclinação. Se este ensaio for comparado, com o ensaio de corte lateral com recurso a ar comprimido, verifica-se que o RMS correspondente à zona final das rampas é superior ao RMS resultante do corte lateral com ar comprimido, onde o RMS nunca ultrapassa os 2m.s^{-1} , nos vários ciclos de corte (Figura 4.23).

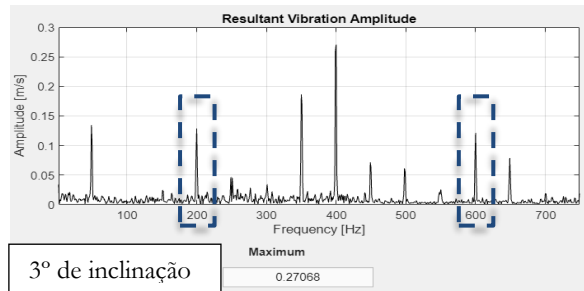
No que diz respeito ao domínio da frequência, para todas as rampas produzidas com as diferentes inclinações, é identificado de forma clara o pico de frequência associado à rotação da ferramenta (200Hz) e o pico de vibração associado ao contacto do gume de corte com o material (600Hz), estando estes realçados na Figura 4.36.



a)



b)



c)

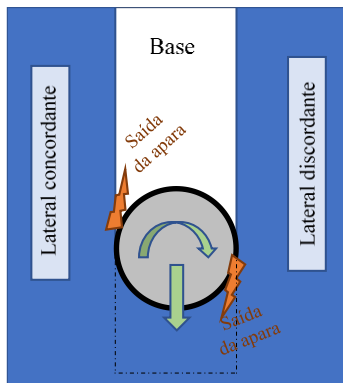
Figura 4.36 – Amplitude resultante no domínio da frequência no corte de rampas: a) 1° de inclinação; b) 2° de inclinação; c) 3° de inclinação.

Outros picos são observados nos espectros apresentados. Embora não seja possível identificar todos os fenómenos associados aos picos apresentados, o pico existente a 50 Hz é associado à frequência da energia elétrica, sendo também possível associar o pico a 400 Hz como correspondente ao 2º harmónico da rotação da ferramenta. Sobreposto ao pico de 600Hz de contacto da ferramenta pode também estar o 3ºharmónico da frequência de rotação.

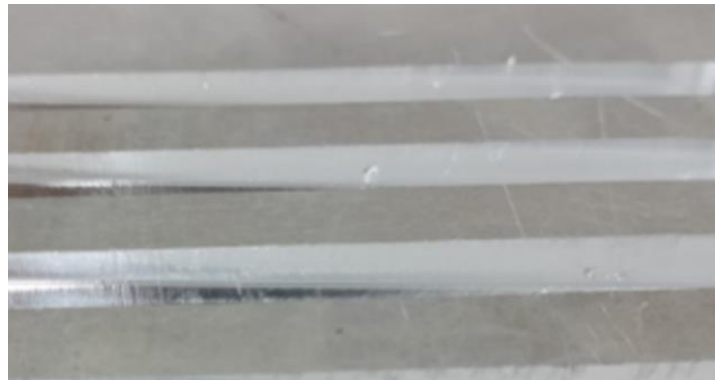
4.3.5 – Rugosidade

A rugosidade foi avaliada na primeira, décima e vigésima rampa produzida para cada inclinação utilizada nos ensaios experimentais. A medição foi efetuada na base das rampas e nas suas laterais. Na configuração dos parâmetros de avaliação da rugosidade, foram usados 5 comprimentos de amostragem de 0,8mm e de 2,5mm, o que significa que os comprimentos de avaliação total foram 4mm e 12,5mm, respetivamente (Apêndice B).

Na maquinagem em rampa, a ferramenta apresenta em simultâneo corte lateral concordante e discordante, conforme se encontra representado no esquema da Figura 4.37 a), tendo este efeito implicações na saída da aparado da zona de corte. Na lateral do corte discordante, devido à aparado ser expelido no mesmo sentido do movimento da ferramenta, surgiu o aparecimento de marcas devido à compressão e re-maquinagem da aparado (Figura 4.37 b)), sendo as marcas mais notórias à medida que o grau de inclinação das rampas aumenta.



a)



b)

Figura 4.37 – Análise do corte em rampa: a) esquema de maquinagem de uma rampa; b) marcas da aparado na parede lateral do corte discordante.

A evolução da rugosidade para as rampas com 1° de inclinação foi aumentando progressivamente na base das rampas e foi diminuindo de um modo geral nas laterais, conforme pode ser observado na Tabela 4.9

Tabela 4.9 – Parâmetros de rugosidade para as rampas de 1° de inclinação.

| Zonas | 1ª rampa (µm) | | | 10ª rampa (µm) | | | 20ª rampa (µm) | | |
|---------------------|---------------|------|------|----------------|------|------|----------------|------|------|
| | Ra | Rq | Rz | Ra | Rq | Rz | Ra | Rq | Rz |
| Base | 1,38 | 1,67 | 7,30 | 1,34 | 1,69 | 7,99 | 1,66 | 1,96 | 8,33 |
| Lateral discordante | 1,88 | 2,24 | 9,24 | 1,62 | 1,96 | 8,61 | 1,36 | 1,63 | 6,94 |
| Lateral concordante | 2,72 | 3,34 | 13,7 | 1,84 | 2,27 | 9,89 | 1,86 | 2,28 | 9,14 |

No caso das rampas com 2° de inclinação (Tabela 4.10.), verifica-se que ocorre um aumento da rugosidade ao longo do corte das rampas de um modo global.

Tabela 4.10 – Parâmetros de rugosidade para as rampas de 2° de inclinação.

| Zonas | 1ª rampa (µm) | | | 10ª rampa (µm) | | | 20ª rampa (µm) | | |
|---------------------|---------------|------|-------|----------------|------|-------|----------------|------|-------|
| | Ra | Rq | Rz | Ra | Rq | Rz | Ra | Rq | Rz |
| Base | 1,46 | 1,82 | 8,58 | 3,87 | 4,73 | 21,36 | 1,57 | 1,94 | 8,41 |
| Lateral discordante | 1,53 | 1,87 | 8,13 | 1,49 | 1,78 | 7,41 | 1,86 | 2,16 | 8,38 |
| Lateral concordante | 3,52 | 4,17 | 15,51 | 2,92 | 3,55 | 15,32 | 1,91 | 2,31 | 10,73 |

A explicação para o aumento maior da rugosidade na base das rampas no décimo corte, está relacionada com a dimensão das placas utilizadas para produzir as rampas. Conforme ilustrado na Figura 4.38 para o caso das rampas de 3° de inclinação, para as rampas produzidas na parte mais central da placa, são visíveis um conjunto de marcas mais profundas que resultam do contacto da ferramenta com a base da rampa, sendo estas provavelmente devido à menor rigidez do sistema de aperto no centro de placa, induzindo desta forma maiores oscilações no contacto peça/ferramenta. Importa referir ainda que, as marcas também surgiram nas rampas produzidas com as outras inclinações, ainda que de forma bastante mais ligeira para as rampas de 1° de inclinação, devido à menor largura do bloco e inclinação da rampa e de forma mais acentuada para as rampas com 3° de inclinação, devido ao corte ser muito mais agressivo.



Figura 4.38 – Marcas da ferramenta na base das rampas de 3° de inclinação, sendo mais acentuada nas rampas produzidas na zona central.

Na Tabela 4.11, apresentam-se os valores dos parâmetros de rugosidade para as rampas com 3° de inclinação. Tal como referido anteriormente, também aqui se verifica que, houve um aumento dos parâmetros de rugosidade inicial e um decréscimo na última rampa. O aumento excessivo dos parâmetros na décima rampa na zona da base deve-se ao mesmo facto enunciado para as rampas de 2° de inclinação.

Tabela 4.11 – Parâmetros de rugosidade para as rampas de 3° de inclinação.

| Zonas | 1ª rampa (μm) | | | 10ª rampa (μm) | | | 20ª rampa (μm) | | |
|---------------------|----------------------------|------|-------|-----------------------------|------|-------|-----------------------------|------|-------|
| | Ra | Rq | Rz | Ra | Rq | Rz | Ra | Rq | Rz |
| Base | 1,67 | 1,99 | 9,26 | 4,35 | 5,29 | 24,94 | 1,6 | 1,9 | 8,33 |
| Lateral discordante | 1,77 | 2,19 | 9,47 | 2,16 | 2,57 | 10,97 | 1,33 | 7,29 | 1,66 |
| Lateral concordante | 2,39 | 3,01 | 13,42 | 3,64 | 4,48 | 18,93 | 1,99 | 2,41 | 10,43 |

Apesar de não ser possível estabelecer relações claras de evolução da rugosidade das rampas dentro do mesmo grau de inclinação, é notório que a rugosidade é maior nas rampas com 3° de inclinação seguindo-se as rampas de 2° e 1° de inclinação, estando estes resultados de acordo com o grau de desgaste que ocorre nas ferramentas e com a amplitude registada das vibrações. É possível ainda verificar que, a rugosidade das paredes laterais é superior à rugosidade da base das várias rampas, excetuando os casos da décima rampa produzidas para 2° e 3° de inclinação, conforme a explicação já avançada. Consegue-se ainda verificar que a rugosidade na parede lateral do corte concordante é superior à rugosidade do corte discordante. Esta constatação pode

ser explicada pelo possível amaciamento da superfície maquinada, devido à compressão da apanha contra a superfície lateral no lado discordante, sendo esta conclusão algo contraditória, uma vez que, o corte concordante está normalmente associado a um melhor acabamento superficial e um menor desgaste da ferramenta em virtude de o escorregamento da apanha ser menor e a temperatura gerada pelo corte também ser menor. Contudo, é preciso não esquecer que o corte em rampa é um caso particular de maquinagem, em que a ferramenta está em contacto com o material a cortar, no qual existe em simultâneo corte concordante e discordante.

4.4 – Ensaios de Corte de Paredes Finas

Neste subcapítulo será estudada a maquinagem de paredes finas, onde foi adotada uma estratégia de corte que minimiza as dificuldades enfrentadas na obtenção destas geometrias esbeltas. O estudo foi conduzido analisando comparativamente 2 geometrias distintas de paredes finas, nas quais foram analisados o espectro de vibração durante o corte o erro dimensional obtido e o acabamento superficial das paredes maquinadas.

4.4.1 – Materiais, Ferramentas e Procedimento

Os ensaios experimentais de corte de paredes finas foram realizados em chapas de alumínio 7075 – T6 com o objetivo de se obter uma parede com 88mm de comprimento e uma altura de 22mm. Relativamente à estratégia de maquinagem, esta foi similar à descrita no Capítulo 2.2.1, para relações de altura/espessura superiores a 15:1 e inferiores a 30:1. Conforme ilustra a Figura 4.39, a estratégia de corte define que o corte seja realizado em passes alternados em ambos os lados da parede, garantindo sempre suporte devido a existir material do lado contrário ao que esta a ser maquinado.

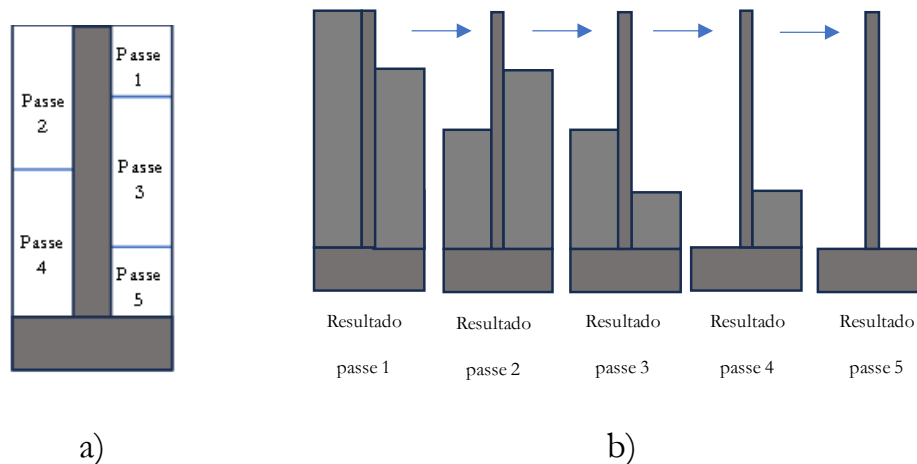


Figura 4.39 – Estratégia de maquinagem adotada para paredes finas: a) passes sucessivos; b) remoção de material.

Partiu-se de blocos de espessura inicial de 11,9mm, reduzindo a espessura da parede gradualmente até à espessura final de 0,5mm.

Foram realizados ensaios com dois tipos de geometria diferentes, como se pode observar na Figura 4.40. Inicialmente, foi maquinada uma parede fina reta (Figura 4.40 a)) e posteriormente foi maquinada uma parede fina, mas de geometria curva (Figura 4.40 b)). Esta diferenciação na forma da parede, tem como objetivo analisar a influência da geometria na rigidez da parede, no processo de maquinagem paredes finas. Ambos os ensaios foram realizados com recurso a refrigeração interna.

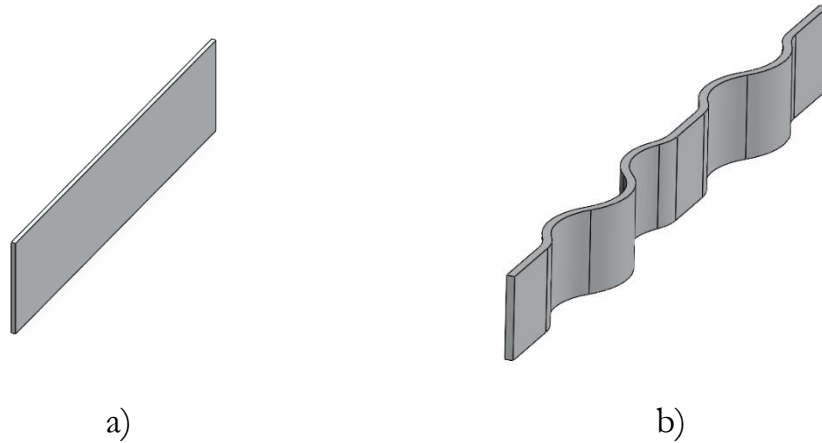


Figura 4.40 – Geometrias de paredes finas adotadas: a) reta; b) curva.

A placa usada para o corte de paredes retas foi a mesma para paredes curvas, sendo ambas realizadas em lados opostos. Relativamente à fixação da placa para execução das operações de corte, esta foi feita com recurso a uma prensa, de forma a garantir a maior rigidez na base do material. O sistema cone/fresa, é o mesmo discutido no Capítulo 4.2.1. Na Figura 4.41, apresenta-se o sistema de fixação da placa e da ferramenta bem como a montagem do acelerómetro no *spindle* da máquina, de forma a ser possível a aquisição de vibrações.



Figura 4.41 – Sistema de fixação da placa e da ferramenta.

A programação das paredes finas foi realizada, com recurso ao *software* Mastercam® e consistiu no uso do ciclo 2D Contour. Para a geração da trajetória de maquinação foi tida em consideração a informação técnica encontrada na literatura para a maquinação de espessuras finas, garantindo sempre a maquinação concordante. Na Figura 4.42 a) e Figura 4.42 b) apresenta-se respetivamente, a trajetória deste ciclo para as paredes de geometria reta e a trajetória para as paredes de geometria curva.

*Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075.
Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem*

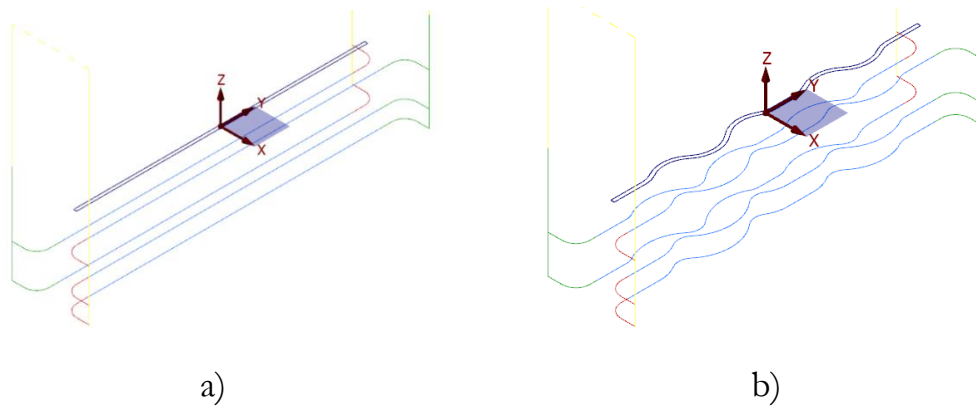


Figura 4.42 – Ciclo usado na maquinagem das paredes finas: a) geometria reta; b) geometria curva.

Na Figura 4.43 apresenta-se a evolução da maquinagem nas duas geometrias estudadas.

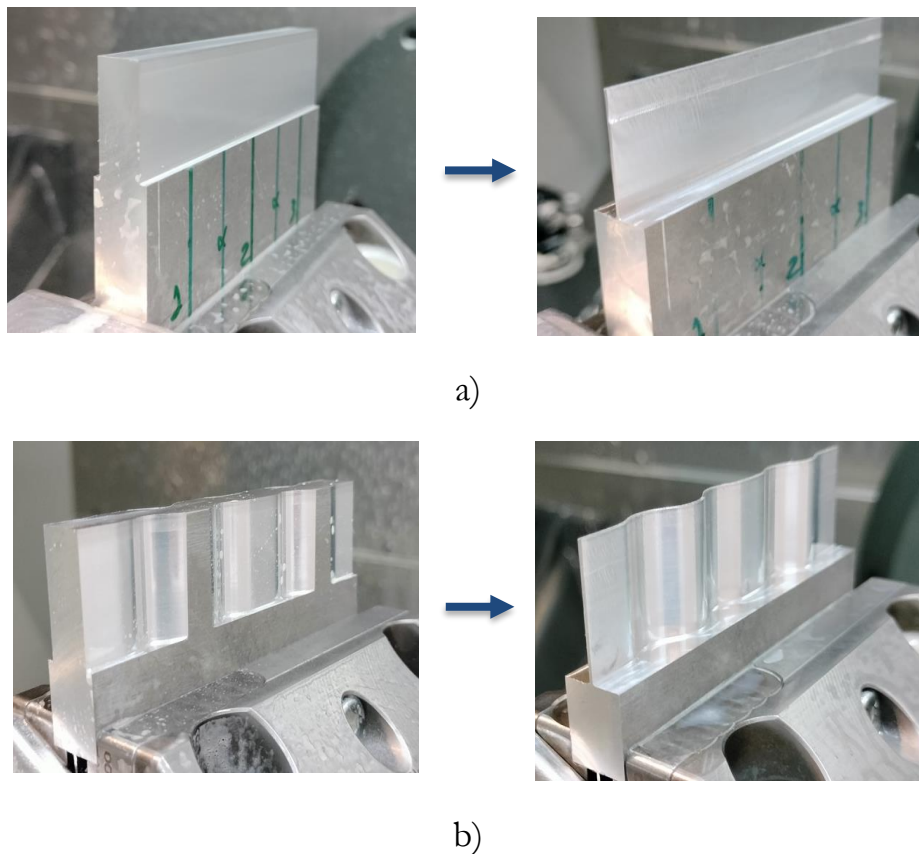


Figura 4.43 – Evolução da espessura das paredes ao longo do corte: a) geometria reta; b) geometria curva.

4.4.2 – Parâmetros de corte

Os parâmetros de corte que foram adotados são os mesmos utilizados nos ensaios experimentais anteriores indicados no Capítulo 4.2.2 na Tabela 4.2, à exceção da largura de corte (a_c) e profundidade de corte (a_p). A largura de corte (a_c) foi alterada conforme o tipo de espessura a atingir em cada ciclo de maquinagem. O motivo da redução da largura de corte à medida que se ia diminuindo a espessura da parede prendeu-se com o fato de em ensaios de teste prévios se ter notado que a largura de corte inicial para baixas espessuras era demasiado agressiva e levava à deformação plástica da base da parede fina. A Tabela 4.12 mostra as diferentes larguras de corte conforme as espessuras tanto para a geometria plana como curva.

Tabela 4.12 – Largura de corte conforme a espessura da parede.

| Espessuras | Largura de corte (a_c) |
|----------------|----------------------------|
| 11,9mm a 2,6mm | 0,8mm |
| 2,6mm a 1mm | 0,2mm |
| 1mm a 0,5mm | 0,05mm |

Relativamente à profundidade de corte, esta teve em conta a estratégia adotada. Ou seja, num dos lados foram feitos 3 passes com 5,5mm, 11mm e 5,5mm, respetivamente, e no lado oposto 2 passes de 11mm cada. Importa referir novamente que os passes de maquinagem são alternados de lado para lado. Com os parâmetros de corte definidos, foram conseguidos as distâncias lineares e tempos de corte apresentados na Tabela 4.13. É de notar que os tempos de corte na parede de geometria curva podem diferir ligeiramente de corte para corte devido à aproximação progressiva à geometria curva.

Tabela 4.13 – Distâncias lineares e tempos de corte na maquinagem de paredes finas.

| | Parede reta | Parede curva |
|--|-------------|--------------|
| Distância linear de corte (1 passe) | 133,487mm | 148,844mm |
| Distância linear de corte total (5 passes) | 667,435mm | 744,22mm |
| Tempo de corte (1 passe) | 2,3s | 3,07s |
| Tempo de corte total (5 passes) | 11,5s | 15,35s |

Face à explicação apresentada relativamente aos valores a_p e a_c adotados, bem como aos 5 passes executados para obter cada uma das espessuras de parede, e ainda tendo em conta que se partiu de uma parede de espessura 11,9mm até atingir 0,5mm de espessura, conclui-se que foi necessário executar 15 operações de redução gradual

de espessura, em que cada uma destas 15 operações consistiu na realização de 5 passes de corte em altura, conforme se encontra ilustrado na Figura 4.44.

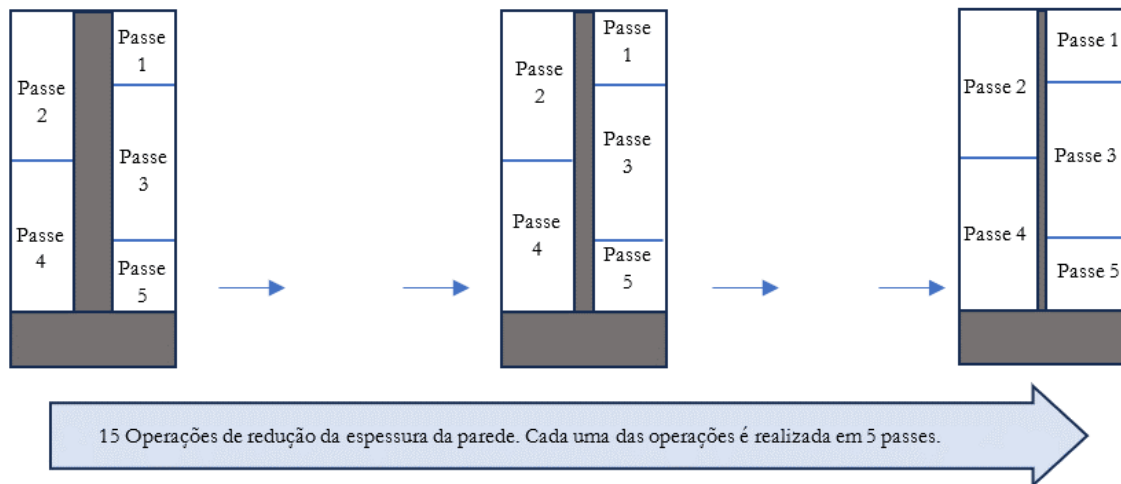


Figura 4.44 – Sequência de operações de redução de espessura da parede maquinada.

4.4.3 – Análise de Vibrações

No que diz respeito à avaliação dos dados de vibração, esta foi realizada de duas formas distintas. Em primeira instância dentro da mesma geometria de parede, foi efetuada a comparação das vibrações numa parede de maior espessura considerada estável e numa parede de menor espessura considerada instável. Em segunda instância procedeu-se à avaliação das vibrações comparando as diferentes geometrias. Importa referir que em ambas as metodologias, a análise das vibrações foi efetuada com a remoção da onda de frequência associada ao sistema de refrigeração interna e o harmónico associado, tal como foi feito no Capítulo 4.2.4.

Em relação ao domínio do tempo, para cada uma das geometrias estudadas, o espectro de vibração apresenta diferenças significativas entre paredes de maior espessura e de menor espessura. Conforme se observa na Figura 4.45 a) e na Figura 4.46 a), nas paredes de maior espessura, verifica-se um espectro de baixa amplitude de vibração interrompido por períodos igualmente espaçados de maior vibração. Isto indica que numa parede de maior espessura, a vibração é mais intensa no início e no fim do corte da parede para cada uma das passagens realizadas, tendo a parede maior rigidez na zona central, zona à qual corresponde uma menor amplitude de vibração. No que diz respeito a paredes de menor espessura, a amplitude de vibração é mais uniforme (Figura 4.45 b) e Figura 4.46 b)), embora apresente maior amplitude de vibração, conforme pode ser constatado pela comparação dos valores de RMS entre as paredes de maior e menor espessura. Esta constatação pode indicar que devido à parede possuir agora uma pequena espessura, a sua rigidez é menor e por isso a vibração manter-se-á em qualquer ponto durante o corte. Em termos de comparação entre a geometria plana e curva, é possível afirmar que a geometria curva é menos suscetível à vibração, pois apresenta menor valor de RMS, quando comparadas as

diferentes geometrias com a mesma espessura de parede. Em conclusão, poder-se-á afirmar que o espectro de vibração é menor no caso da parede de geometria curva, e dentro desta geometria, a vibração é menor quando a espessura da parede é mais elevada, sendo estas constatações mais bem avaliadas pela análise comparativa dos valores RMS de cada espectro de vibração.

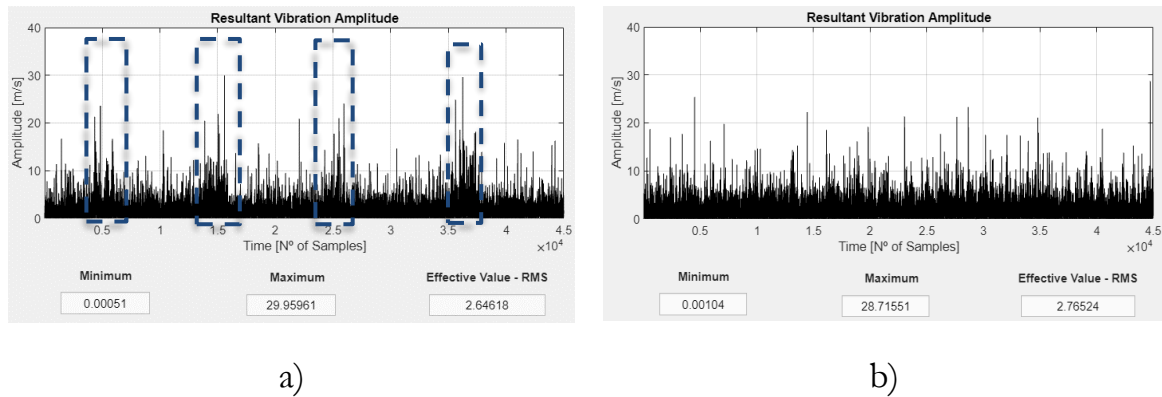


Figura 4.45 – Espectro de vibração em paredes de geometria reta no domínio do tempo: a) parede de maior espessura; b) parede de menor espessura.

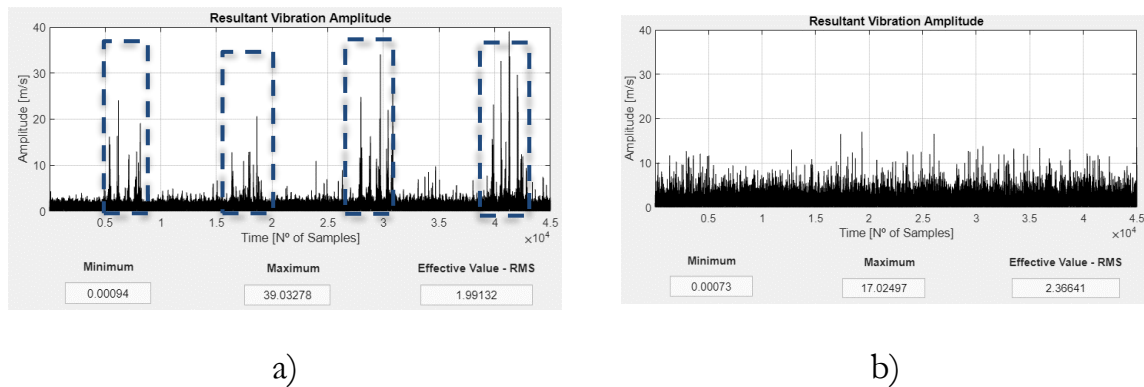
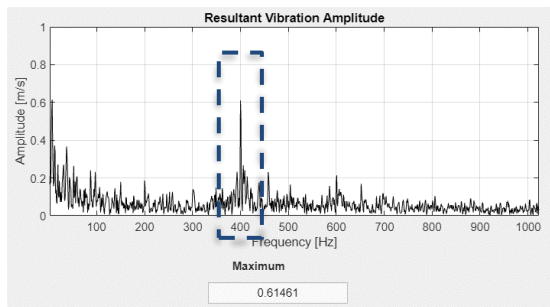


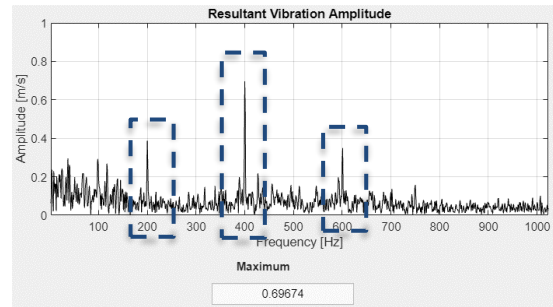
Figura 4.46 – Espectro de vibração em paredes de geometria curva no domínio do tempo: a) parede de maior espessura; b) parede de menor espessura.

Relativamente à análise da vibração no domínio da frequência (Figura 4.47 e Figura 4.48) é possível observar que a frequência que mais contribui para a vibração é a onda de 200Hz, a de 400Hz (harmónico da onda de 200Hz) e a de 600Hz (frequência de contacto), não sendo identificados outros picos relevantes.

*Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075.
Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem*

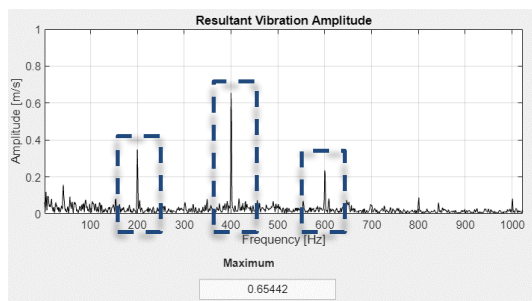


a)

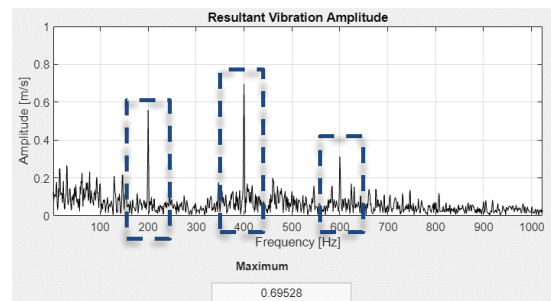


b)

Figura 4.47 – Espectro de vibração em paredes de geometria reta no domínio da frequência: a) parede de maior espessura; b) parede de menor espessura.



a)



b)

Figura 4.48 – Espectro de vibração em paredes de geometria curva no domínio da frequência: a) parede de maior espessura; b) parede de menor espessura.

4.4.4 – Estabilidade Dimensional

As dimensões das várias espessuras da parede foram avaliadas com recurso a um micrómetro, de modo a se obter a sua dimensão em três zonas distintas da parede (início, meio e fim), sendo para cada uma das zonas efetuado o controlo dimensional no topo, no meio e na base da parede, tal como se apresenta esquematizado na Figura 4.49.

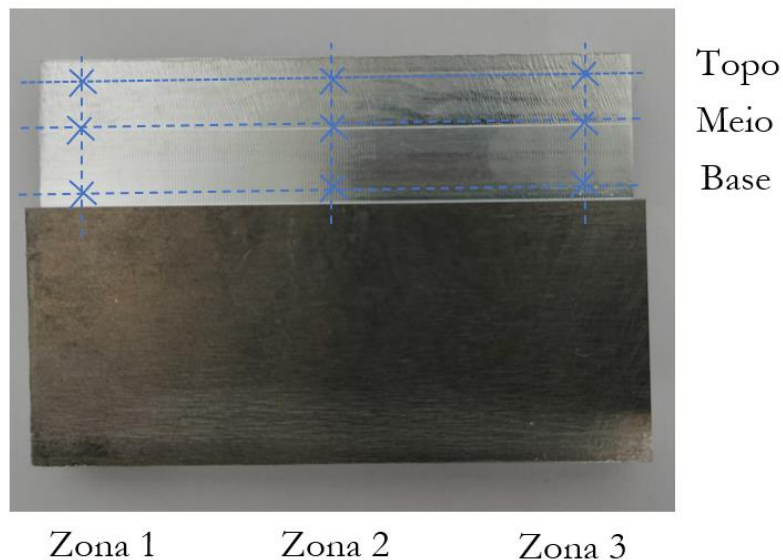


Figura 4.49 – Zonas de medição da espessura das paredes.

Uma zona de interesse de avaliar é a zona 2, visto que nas paredes com geometria curva, é esta zona que está compreendida entre as curvas e possui maior rigidez a qual pode ser vista realçada na Figura 4.50. As zonas 1 e 3 estão no início e fim das paredes e apresentam o mesmo problema de deflexão que nas paredes com geometria reta. Isto também é um indicador que as zonas de entrada e saída da ferramenta são mais críticas no que toca a se obter um bom toleranciamento.

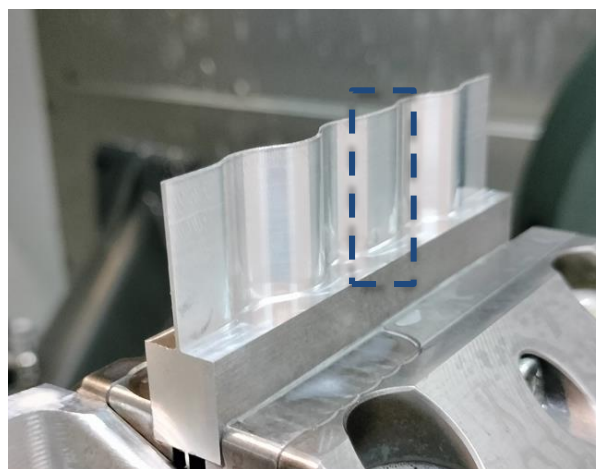


Figura 4.50 – Zona 2 nas paredes de geometria curva de maior rigidez.

A Figura 4.51 e a Figura 4.52 apresentam os resultados do controlo dimensional da parede reta e curva graficamente, obtidos na zona 2 de medição, respetivamente. Em cada uma destas figuras são apresentados os valores referentes à espessura programada e a respetiva espessura medida, tanto na base, como no topo da parede. É também apresentada a diferença em valor absoluto entre o valor de espessura medido no topo e o valor medido na base da parede. No Apêndice E, encontram-se registados todos os valores de espessura determinados para as várias zonas produzidas ao longo da maquinagem para ambas as geometrias.

A Figura 4.51 e a Figura 4.52 permitem desde logo compreender que a diferença entre a espessura no topo e na base máxima se mantém aproximadamente constante num estágio inicial em que a espessura da parede vai sendo reduzida, aumentando depois acentuadamente a diferença quando a espessura da parede se torna mais fina. Foi considerado que a espessura da parede de 1,8mm define a transição de uma parede estável para uma parede com deflexão apreciável.

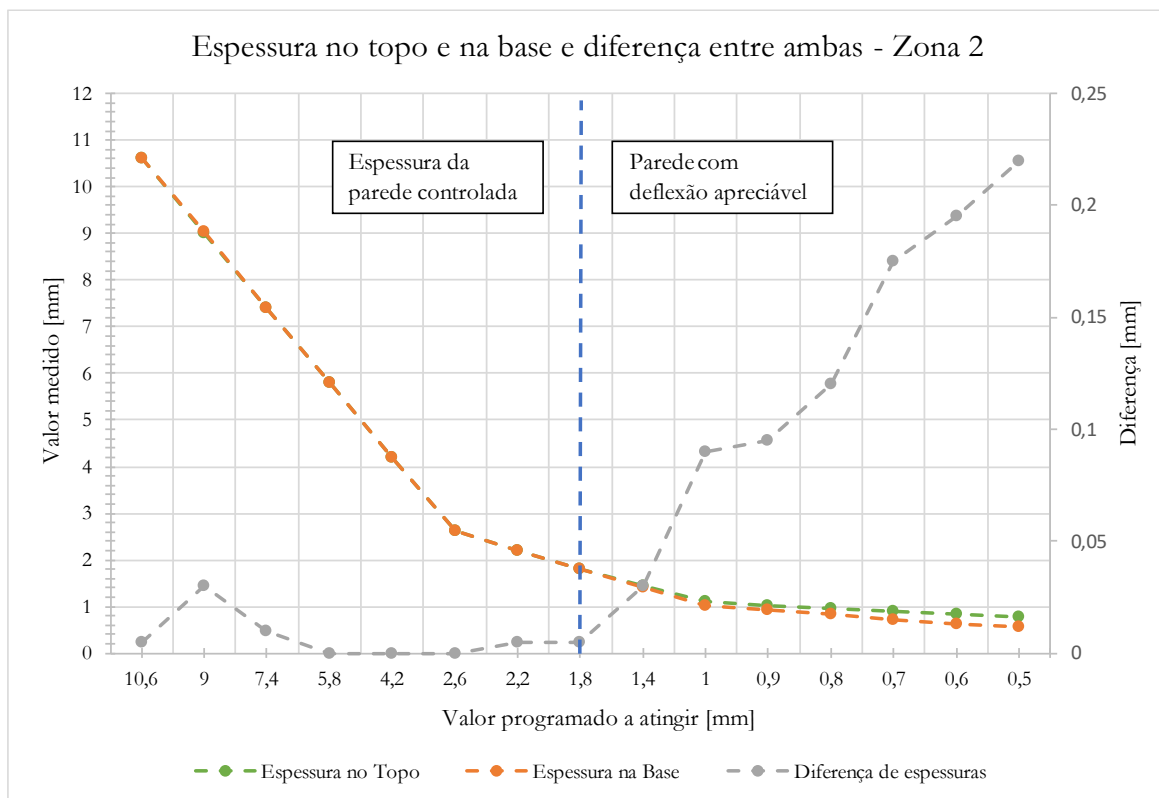


Figura 4.51 – Espessuras medidas nas paredes de geometria reta.

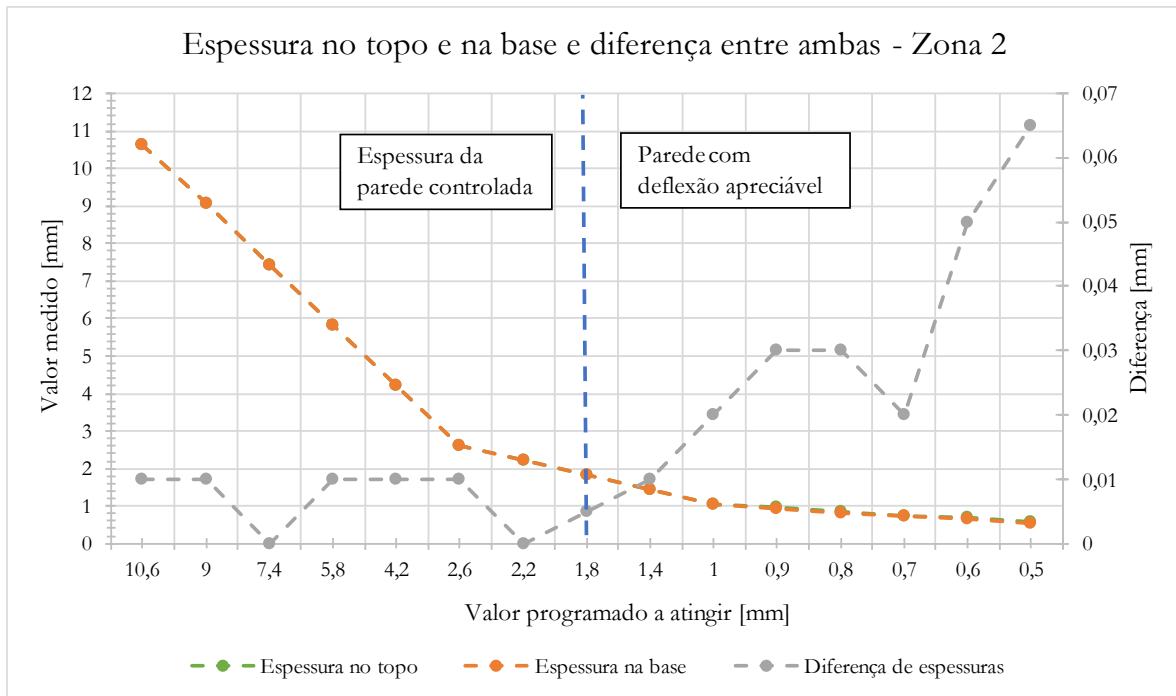


Figura 4.52 – Espessuras medidas nas paredes de geometria curva.

É de salientar que o desvio dimensional é sempre superior no topo das paredes. Esta constatação indica uma deflexão mais pronunciada no topo das paredes, devido à rigidez ser menor do que na base. Relativamente às zonas 1 e 3 concluiu-se que estas apresentam o problema de deflexão semelhante ao registado na zona 2, de forma mais pronunciada. É ainda importante referir que os desvios dimensionais mostram-se ser sempre maiores nas paredes com geometria reta do que na geometria curva. Conclusão esta, que é coerente com os valores RMS da vibração anteriormente analisados.

A Figura 4.53 e a Figura 4.54 mostram com maior detalhe as espessuras medidas quando a espessura da parede programada é menor do que 1,8mm, ou seja, na região onde a deflexão da parede é apreciável. Estas figuras evidenciam de forma mais clara que os desvios dimensionais entre o topo e a base da parede são menos acentuados quando a parede apresenta a geometria curva.

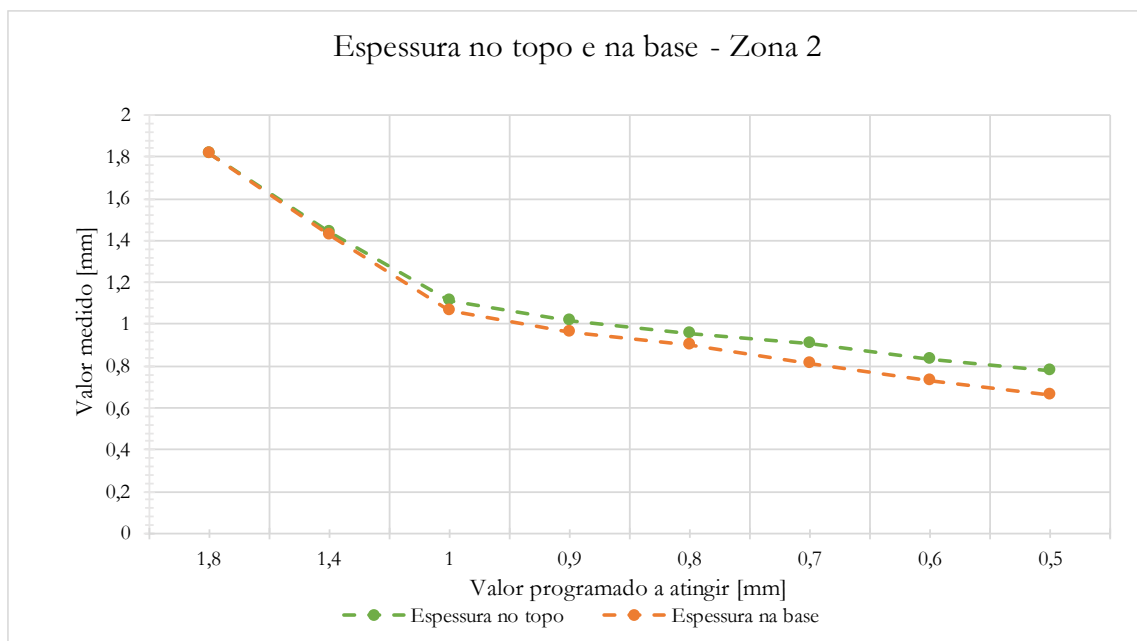


Figura 4.53 – Espessuras medidas nas paredes de geometria reta na zona com deflexão apreciável.

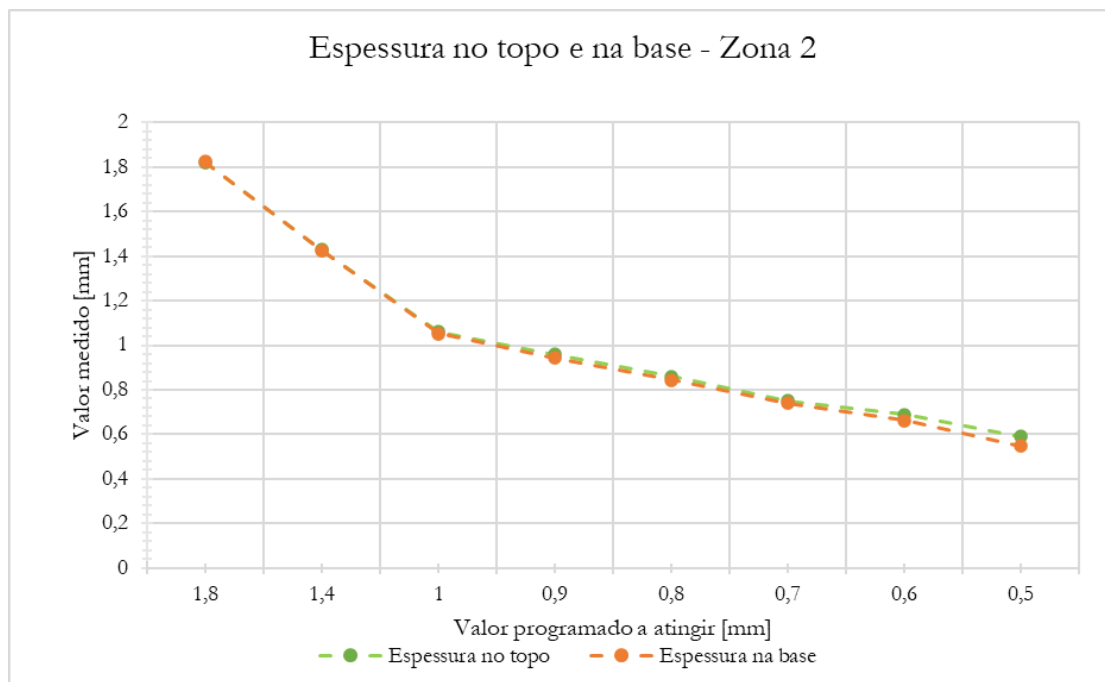


Figura 4.54 – Espessuras medidas nas paredes de geometria curva na zona com deflexão apreciável.

Para a deflexão das paredes finas foi efetuado um estudo de simulação numérica por elementos finitos com recurso ao *software* SolidWorks Simulation®, de modo a confrontar a previsão da simulação com os resultados experimentais obtidos. As simulações foram realizadas para uma etapa intermédia do corte, quando a parede atingiria 1mm de espessura, podendo este comportamento ser extrapolado para outras etapas do trabalho com diferente espessura. Foi estipulado no estudo a fixação da base das paredes com a aplicação de uma carga de 100N na aresta superior, como pode ser observado na Figura 4.55.

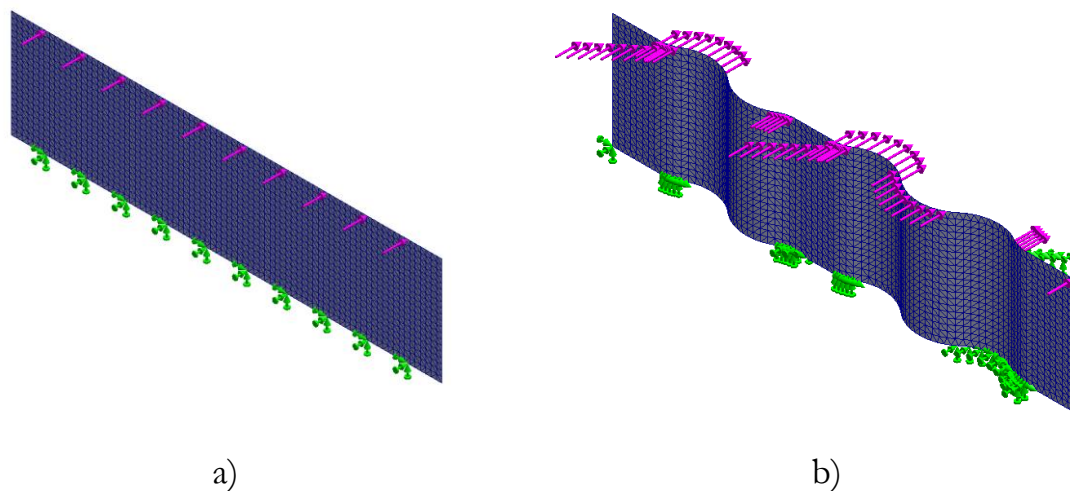


Figura 4.55 – Condições do estudo por elementos finitos: a) parede de geometria reta; b) parede de geometria curva.

A Figura 4.56 a) e a Figura 4.56 b) apresentam os resultados das simulações numéricas em termos de deslocamento segundo o eixo X (eixo com direção e sentido da carga aplicada), para uma parede de geometria reta e uma parede de geometria curva, respetivamente. Consegue-se observar que a geometria curva apresenta vantagens visto ter deflexões máximas de 0,5092mm em contraste com as deflexões máximas na geometria reta de 1,2369mm. Para o caso da geometria curva, a deflexão da parede é muito menos uniforme do que no caso da geometria reta, localizando-se as zonas críticas de maior deflexão nas zonas planas de início e fim do comprimento da parede.

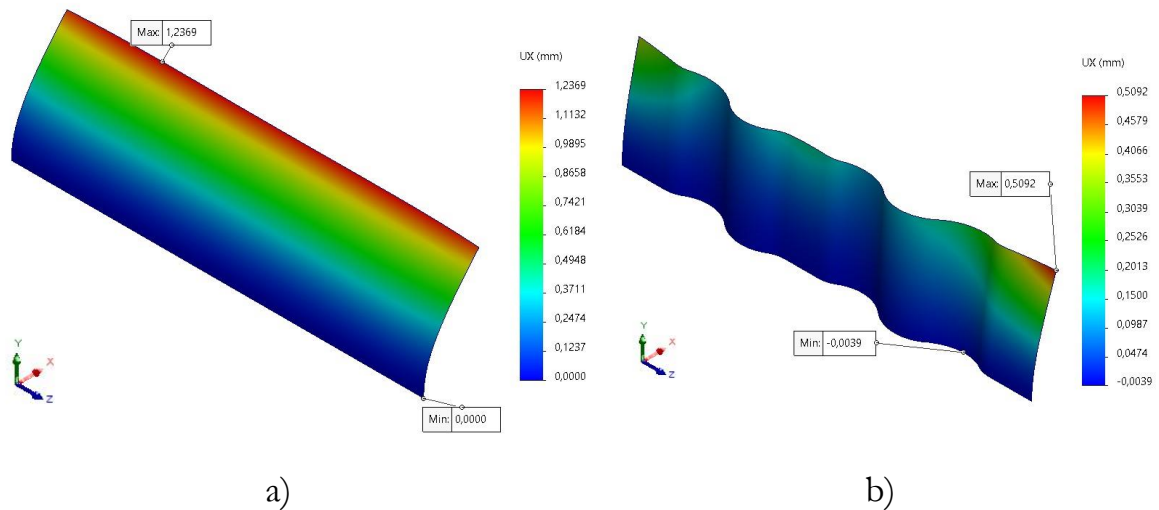


Figura 4.56 – Deflexões nas simulações numéricas: a) parede de geometria reta; b) parede de geometria curva.

Os resultados obtidos nas simulações, ainda que as mesmas sejam simplificadas, apresentam um paralelismo com os resultados experimentais obtidos na vibração, na estabilidade dimensional e na rugosidade (analisada no Capítulo 4.4.5). Consegue-se perceber que as simulações mostram, tal como os resultados experimentais que a geometria curva é vantajosa de forma a minimizar as deflexões, possuindo maior rigidez. Observa-se também, que tal como nos ensaios experimentais as zonas críticas de deflexão na geometria curva são as zonas iniciais e finais de corte, existindo uma zona central compreendida entre as curvas de maior rigidez. A geometria reta apesar de apresentar uma deflexão mais uniforme, tem a desvantagem de a mesma ser maior.

4.4.5 – Rugosidade

No que diz respeito à rugosidade, foi decidido efetuar a avaliação com base no perfil primário, sendo este o perfil real que é medido diretamente pelo rugosímetro, antes da aplicação dos filtros que removem os erros de forma e a ondulação/deflexão. Com esta análise consegue-se detetar todos os defeitos induzidos na superfície, não apenas os causados pelas marcas de maquinagem, mas também por outros fatores. A rugosidade foi avaliada através do parâmetro Pz, sendo este um parâmetro que pode ser comparado à rugosidade máxima, mas avaliado no perfil primário, sem qualquer filtro aplicado. Além do que foi referido anteriormente, este parâmetro foi o único que apresentou uma evolução possível de ser estudada, pois outros parâmetros medidos apresentaram-se bastante aleatórios ao longo das medições efetuadas (ver Apêndice E). O valor Pz foi avaliado conforme o apresentado na Figura 4.57, na zona de transição entre os passes 2 e 4.

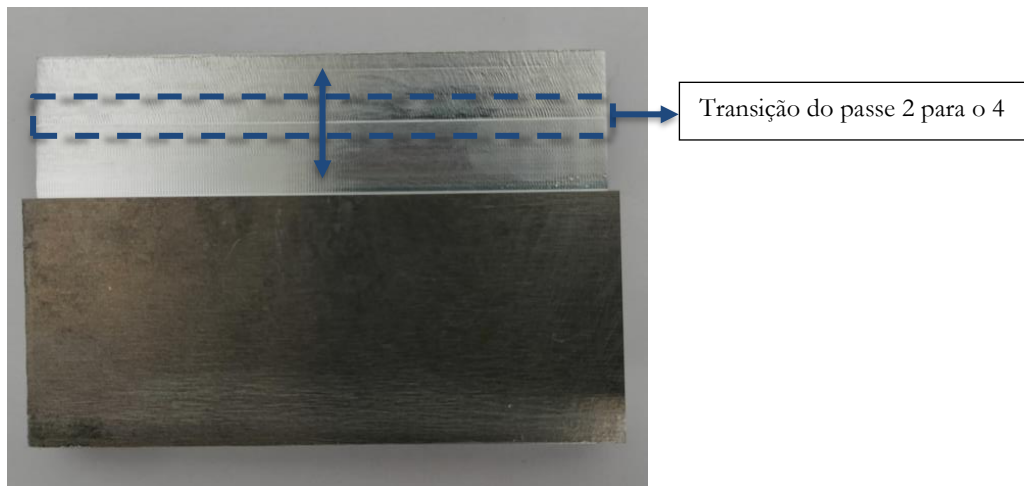


Figura 4.57 – Zona de medição do Pz.

A evolução do parâmetro Pz encontra-se representada na Figura 4.58 e na Figura 4.59 para as paredes de geometria reta e curva, respetivamente.

Ambas as figuras mencionadas permitem concluir que, a partir de 1,8mm de espessura para ambas as geometrias o Pz tem tendência a aumentar gradualmente, ainda que sejam observadas algumas oscilações. Este resultado está de acordo com o aumento de vibrações nas paredes mais finas e no desvio dimensional acentuado que começa a ocorrer também a partir desta espessura. É também possível verificar que, o defeito máximo é em geral superior nas paredes com geometria reta do que nas com geometria curva, estando isto também de acordo com o analisado nas vibrações e nas espessuras medidas. Tal como a Figura 4.51 e a Figura 4.52, a Figura 4.58 e a Figura 4.59 mostram uma zona estável e instável de deflexão, as quais estão associadas a um valor de Pz estável e a um aumento gradual do mesmo, respetivamente. Com base na análise dos resultados obtidos, é possível afirmar que é suficiente avaliar a rugosidade ou a análise dimensional para compreender a relação

*Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075.
Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem*

com a espessura da parede e inferir qual a espessura a partir da qual a parede se torna mais instável.

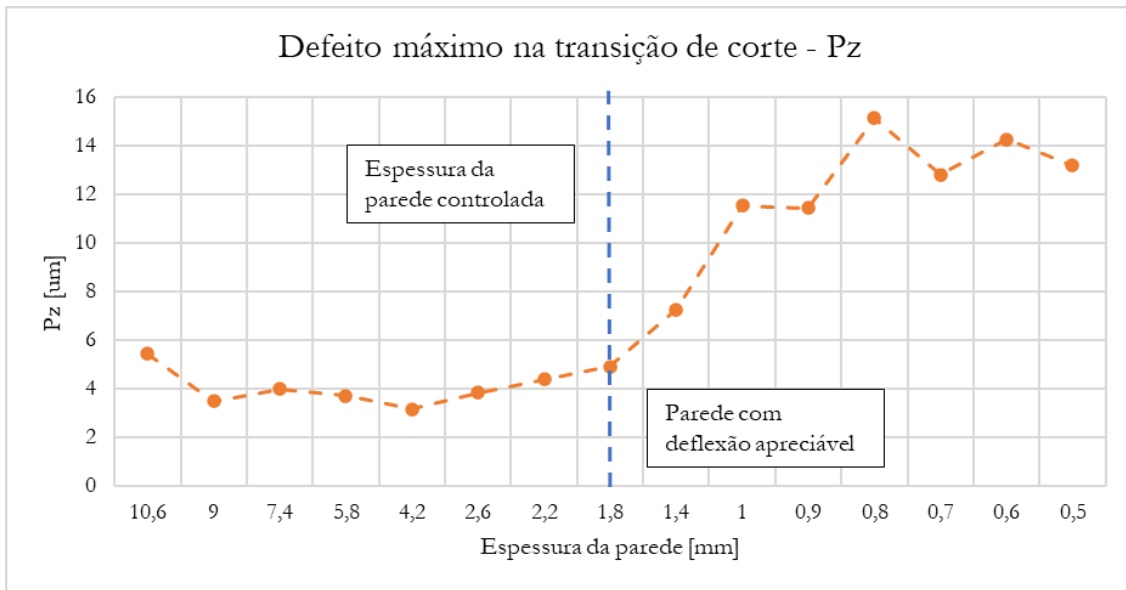


Figura 4.58 – Evolução do Pz ao longo da maquinagem das paredes com geometria reta.

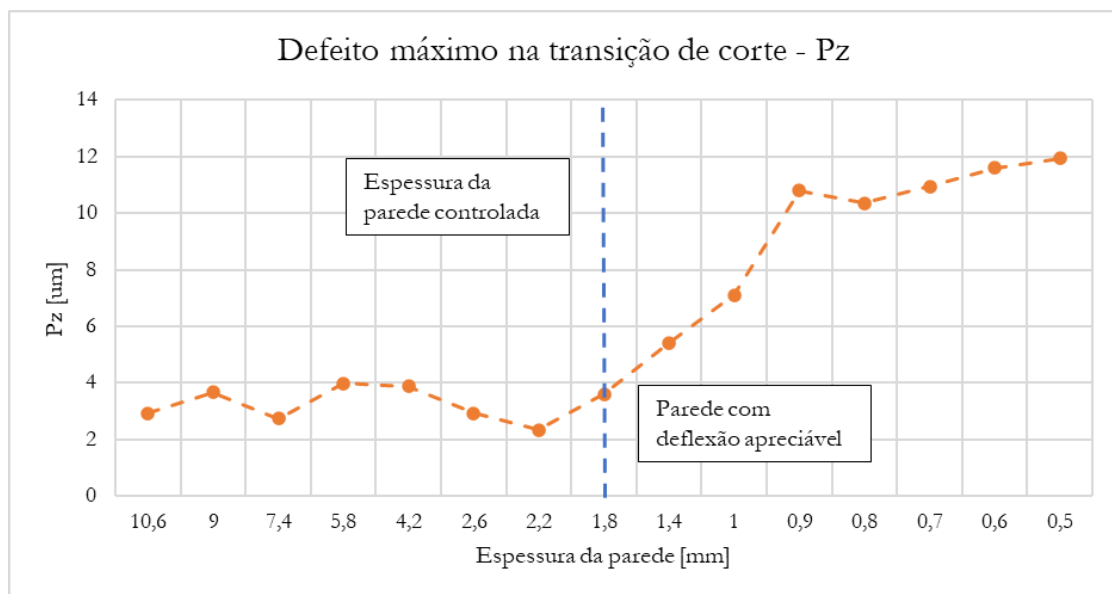


Figura 4.59 – Evolução do Pz ao longo da maquinagem das paredes com geometria curva.

5 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 – Conclusões Globais

Depois de todo o trabalho experimental realizado, é possível agora apresentar em jeito de resumo as considerações de âmbito global obtidas, relativamente à caracterização das estratégias de maquinagem aplicadas à liga de alumínio usada neste trabalho.

Relativamente à estratégia de maquinagem lateral dos blocos de alumínio conclui-se que o desgaste das fresas é mais acentuado quando é usado ar comprimido como refrigeração do que quando foi utilizada refrigeração interna com recurso a fluido de corte. É de salientar que o ar comprimido aparenta ser mais eficaz a escoar a aparta da zona de corte, uma vez que, neste caso não foi observado desgaste nos canais de escoamento. A menor eficiência do escoamento da aparta quando se usa refrigeração interna pode estar relacionada com o efeito de cone devido à rotação da ferramenta e por esse motivo o fluido não incide eficazmente em forma de jato na zona de corte. Em ambos os ensaios de corte lateral, o desgaste da ferramenta mais predominante foi classificado como desgaste de flanco uniforme. Em relação à análise de vibrações, o espetro de vibração no domínio do tempo, permite identificar zonas bem distintas, as quais julga-se estarem associadas a movimentos de corte segundo o eixo X e Y da máquina. O valor de RMS é maior quando é usado fluido de corte de alta pressão do que no caso de utilização de ar comprimido, julgando-se que as características inerentes ao processo de refrigeração interna de alta pressão contribuem para o maior valor de RMS registado neste caso, não estando propriamente o maior valor de RMS associado diretamente ao maior desgaste da ferramenta. A análise da vibração no domínio da frequência permite em ambos os ensaios realizados identificar que a onda de 200Hz está associada à rotação da ferramenta e que a onda de 600Hz está associada ao contacto do gume de corte com o material. Relativamente ao acabamento das superfícies maquinadas do bloco de alumínio, a rugosidade avaliada pelos parâmetros Ra, Rq e Rz é na globalidade pior para o corte com ar comprimido que com fluido de corte, estabelecendo-se assim uma relação direta entre o maior desgaste da ferramenta e pior acabamento superficial provocado pela ferramenta.

Nos ensaios de maquinagem de rampas aplicados a placas de alumínio, conclui-se que o desgaste é mais acentuado na ferramenta à medida que a inclinação das rampas aumenta. Apesar do corte nas rampas de maior inclinação ser efetuado num percurso menor de comprimento, o aumento da exigência sobre a ferramenta afeta o desgaste da mesma de forma negativa. A ferramenta apresenta desgaste de flanco uniforme. Nota-se que a adesão de alumínio à ferramenta é substancial, sendo maior a adesão à medida que a inclinação das rampas aumenta. No que diz respeito às vibrações no

domínio do tempo, é possível observar que o espectro de vibração tende a ser estável até um certo momento do corte das rampas e depois aumenta substancialmente. Este aumento acontece a cerca de metade do comprimento da rampa para 1° de inclinação e cerca de dois terços do comprimento para 2° e 3° de inclinação. O valor registado de RMS é maior nas rampas com maior inclinação, ainda que de forma ligeira, conseguindo-se assim estabelecer uma relação entre o desgaste da ferramenta e o valor de RMS, pois a maquinagem de uma rampa que produza vibrações mais intensas, irá também desenvolver maior desgaste na ferramenta. No domínio da frequência é possível identificar com facilidade as frequências de rotação e de contacto da ferramenta, tendo neste caso ambas as ondas com estas frequências um peso semelhante na intensidade da vibração. Em termos de rugosidade da superfície maquinada, observa-se uma tendência para a rugosidade ser maior no lado concordante do corte, quando comparado com o lado discordante ou comparado com a superfície de base das rampas. No lado discordante do corte, são observadas marcas de compressão de apara contra a parede da rampa, as quais podem explicar os menores valores de rugosidade obtidos, pois este efeito poderá provocar um amaciamento da superfície devido à compressão das aparas.

Por fim, no ensaio experimental do corte de paredes finas é possível notar que o espectro de vibração no domínio do tempo apresenta um valor de RMS superior na parede de geometria reta do que na parede de geometria curva estando este facto relacionado com a rigidez da parede maquinada. Em ambas as geometrias de paredes estudadas, quando a parede apresenta uma maior espessura é possível distinguir no espectro de vibração várias zonas de diferentes amplitudes de vibração, sendo as maiores amplitudes de vibração representativas do corte no início e fim da parede, indicando que as zonas inicial e final apresentam uma menor rigidez, sendo por isso mais suscetíveis à vibração. No caso das paredes de menor espessura não se observa variações significativas no valor da vibração ao longo do comprimento da parede, sendo o espectro de vibração mais homogéneo, mostrando que a rigidez já é baixa em todo o comprimento da parede. No domínio da frequência é possível perceber que a vibração é induzida na sua maioria pela onda de 200Hz. Em termos dimensionais, para ambas as geometrias, conclui-se que a redução de espessura da parede até 1,8mm leva a que o erro entre o valor de espessura programada e o valor de espessura efetivamente obtido seja mínimo. Para espessuras de parede menores a diferença entre o valor de espessura programada e efetivamente obtido, tem tendência a aumentar sucessivamente. No entanto, a geometria de parede curva apresenta vantagens, visto ter menores desvios na espessura obtida, reforçando a ideia de que este tipo de geometria oferece vantagens quando o objetivo é maquinar paredes finas. Em relação ao acabamento superficial, a análise foi efetuada e discutida com base no parâmetro Pz (defeito máximo), sendo este o parâmetro de maior interesse, pois a análise efetuada após aplicação de filtro ao sinal de rugosidade, elimina ou atenua a deteção dos erros dimensionais provocados na parede. Para ambas as geometrias de parede, a redução de espessura até 1,8mm não tem um efeito significativo na variação do valor de Pz, tendo este parâmetro um crescimento

acentuado com a redução da espessura da parede até 0,5mm. Também para esta análise, as paredes de geometria curva apresentam vantagens, visto o defeito máximo ser menor. É possível então concluir que para os parâmetros de maquinagem em questão é possível atingir uma parede de 1,8mm com desvios dimensionais baixos (inferiores a 0,03mm) e que a geometria curva apresenta vantagens visto ser mais rígida e por sua vez ter menor deflexão. É ainda de salientar que basta analisar o parâmetro Pz ou alternativamente medir a espessura das paredes para perceber qual a tendência de evolução do erro provocado na espessura da parede produzida.

5.2 – Trabalhos Futuros

Alguns trabalhos que podem ser desenvolvidos com o objetivo de complementar e/ou continuar o trabalho experimental desenvolvido são os de seguida enunciados.

Para avaliar o desgaste e comportamento da ferramenta:

- Repetição dos ensaios de corte lateral e de rampas com outras ligas de alumínio de mais difícil maquinagem, como por exemplo, ligas de fundição com alto teor de silício;
- Repetição dos ensaios de corte lateral e de rampas com outros parâmetros de corte mais agressivos e no caso das rampas com maiores graus de inclinação;
- Estudo mais aprofundado da influência do uso de ar comprimido ou fluido de corte por refrigeração interna no desgaste das ferramentas;
- Análise de forças de corte desenvolvidas durante a realização das diferentes estratégias de fresagem, sendo um indicador diferente do processo de maquinagem, que conjugado com os indicadores estudados pode clarificar algumas situações que ficaram menos esclarecidas.

Para estudar o comportamento de paredes finas:

- Aprofundamento do estudo da rigidez de paredes finas com geometrias diferentes ou de geometrias curvas com outras variantes;
- Otimização de parâmetros de corte para obter melhor controlo dimensional;
- Estudo de paredes finas com diferentes relações de altura/espessura.

REFERÊNCIAS

- Aroeira, C. (2005). *Conceitos Básicos de Medições de Vibrações*.
- ASM International. (1992). *ASM Handbook, Volume 2. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special - Purpose Materials*.
- ASM International. (1995). *ASM Handbook, Volume 16. Machining*.
- Bhushan, R.K, Kumar, S e Das, S. (2010). Effect of machining parameters on surface roughness and tool wear for 7075 Al alloy SiC composite.
- Brüel & Kjaer. (28 de março de 2023). *Measuring Vibration. Calibrando um acelerômetro*. Obtido de <https://www.bksv.com/pt/knowledge/blog/vibration/accelerometer-calibration>.
- Brüel & Kjaer. (28 de março de 2023). *Measuring Vibration. Efeitos Ambientais nas Medições*. Obtido de <https://www.bksv.com/pt/knowledge/blog/vibration/environmental-effects-on-measurements>.
- Brüel & Kjaer. (28 de março de 2023). *Measuring Vibration. Evitando erros de medição de vibração*. Obtido de <https://www.bksv.com/pt/knowledge/blog/vibration/avoid-errors-using-accelerometers>.
- Brüel & Kjaer. (28 de março de 2023). *Measuring Vibration. O acelerômetro piezoelétrico*. Obtido de <https://www.bksv.com/pt/knowledge/blog/vibration/piezoelectric-accelerometers>.
- Brütsh - Rüegger Tools. (2008). *Mitutoyo Surfjest SJ 201P surface roughness tester*.
- Celestino, V. R. (2015). *Análise Comparativa Do Uso De Ferramentas De Metal Duro Sem Revestimento E Revestidas Com Diboreto De Titânio Na Usinagem De Madeira*. [Dissertação de Mestrado]. Universidade Estadual Paulista.
- Cheng, D.-J., Feng, X., Xu, S.-H., Zhang, C.-Y., Zhang, S.-W., & Kim, S.-J. (2020). Minimization of Surface Roughness and Machining Deformation in Milling of Al Alloy Thin - Walled Parts.
- da Silva, L. F. (2012). *Comportamento Mecânico dos Materiais*.
- Davim, J. P. (2008). *Princípios da Maquinagem*.

- Dedavid, B. A., Gomes, C. I., & Machado, G. (2007). *Microscopia Eletrônica de Varredura. Aplicações e preparação de amostras.*
- Ett, G., & Pessine, E. J. (1995). Produção de Revestimentos de Diboreto de Titânio (TiB₂) em Eletrodos de Cobre e Grafite.
- Ferreira, H. H. (2016). *Importância do estudo em Microscopia Eletrônica de Varrimento de amostras incluídas em parafina para fins de diagnóstico.* Instituto Superior Técnico: Dissertação de Mestrado.
- Fierce Electronics. (28 de março de 2023). *Simple Steps to Selecting the right Accelerometer.* Obtido de <https://www.fierceelectronics.com/components/simple-steps-to-selecting-right-accelerometer>.
- Gaussian Waves. (2 de junho de 2023). *Window functions - a figure of merit.* Obtido de <https://www.gaussianwaves.com/2020/09/window-function-figure-of-merits/>.
- Girdhar, C. S. (2004). *Machinery Vibration Analysis & Predictive Maintenance.*
- Global Cutting Tools. (15 de março de 2023). *End Mill Attributes & Terminology.* Obtido de <https://globalcuttingtools.com/resources/attributes-terminology/>.
- Groover, M. (2010). *Fundamentals of Modern Manufacturing. Materials, Processes and Systems.*
- Haas. (28 de março de 2023). *UMC - 750SS.* Obtido de <https://www.haascnc.com/pt/machines/vertical-mills/universal-machine/models/umc-750ss.html>.
- Han, H., Park, M., Park, S., Juhyong, K., & Yong, B. (2019). Experimental Verification of Methods for Converting Acceleration Data in High - Rise Buildings into Displacement Data by Shaking Table Test.
- International Aluminium . (9 de março de 2023). *Primary Aluminium Production.* Obtido de <https://international-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/>.
- International Standard. (1989). ISO 8688-2. Tool life testing in milling - Part 2: End milling.
- Kemmler. (28 de março de 2023). *Shrink chucks SK 40-08-80 with cooling channels.* Obtido de <https://www.kemmler-shop.de/en/din-69871-iso-7388-1/shrink-chucks-4-50-cooling-channels/iso-40/1432/shrink-chucks-sk-40-08-80-with-cooling-channels?c=1926#>.

*Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075.
Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem*

- L N López De Lacalle, L., Lamikiz, A., Sánchez, J., & Cabanes, I. (2001). Cutting conditions and tool optimization in the high-speed milling of aluminium alloys.
- Marouvo, J. V. (2022). *Estudo Experimental da furação de Aços Inoxidáveis Austeníticos e Duplex com Brocas de 2 e 3 Gumes*. [Dissertação de Mestrado]. Instituto Politécnico de Coimbra.
- Martín-Béjar, S., Trujillo, F., Sevilla, L., & Marcos, M. ((2017)). Indirect adhesion wear parametric analysis in the dry turning of UNS A97075 Alloys.
- MathWorks. (21 de março de 2023). *Integrate acceleration to velocity and displacement*. Obtido de https://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/275484-integrate-acceleration-to-velocity-and-displacement#answer_215063.
- Mitsubishi Materials. (15 de março de 2023). *End Mill Terminology*. Obtido de http://www.carbide.mht.co.th/technical_information/tec_rotating_tools/tec_solid_end_mills/tec_solid_end_mills_technical/tec_solid_end_mills_terminology.
- Morais, R. S. (2018). *Avaliação do Desgaste da Ferramenta e outros trabalhos de Maquinagem CNC. Aplicação do Sinal de Vibração e das Redes Neurais na Previsão do Desgaste da Ferramenta*. [Dissertação de Mestrado]. Instituto Politécnico de Coimbra.
- National Instruments. (28 de março de 2023). *Measuring Vibration with Accelerometers*. Obtido de <https://www.ni.com/pt-pt/shop/data-acquisition/sensor-fundamentals/measuring-vibration-with-accelerometers.html>.
- National Instruments. (28 de março de 2023). *NI 9234 Specifications*. Obtido de <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-9234-specs/page/specs.html>.
- National Instruments. (2023). Understanding FFTs and Windowing.
- Okokpujie, I., Ohunakin, O., Bolu, C., & Okokpujie, K. ((2018)). Experimental data-set for prediction of toolwear during turning of Al-1061 alloy by high speed cutting tools.
- Okokpujie, P. I., Ikumapayi, O., Okonkwo, U., Salawu, E., Afolalu, S., Dirisu, J., . . . Ajayi, O. (2017). Experimental and Mathematical Modeling for Prediction of Tool Wear on the Machining of Aluminium 6061 Alloy by High Speed Tools.
- PCB Piezotronics. (s.d.). Model 356B08 Triaxial, high sensitivity, ceramic shear ICP accel., 100mV/g, 0.5 to 5kHz, Installation and Operating Manual.

- Pérez, E.T. (2015). *Study of vibration severity assessment for Machine Tool spindles within Condition Monitoring*. [Dissertação de Mestrado]. Instituto Real de Tecnologia, KT.
- PolyLANEMA. (05 de abril de 2023). *Liga de Alumínio AW 7075 Retificado*. Obtido de <https://www.polylanema.pt/pt/aw-7075-retificado/>.
- Radutoiu, N., Alexis, J., Lacroix, L., & Petit, J. (2012). Effect of the over-ageing treatment on the mechanical properties of AA2024 aluminium alloy.
- Randall, R.B. (2011). *Vibration - based Condition Monitoring*.
- Rao, B e Shin, Y.C. (2001). Analysis on high-speed face milling of 7075-T6 aluminium using carbide and diamond cutters.
- Sandvik, Coromant. (15 de março de 2023). *Canais ou fresamento de canais*. Obtido de <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/groove-or-slot-milling>.
- Sandvik, Coromant. (15 de março de 2023). *Fórmulas e definições de fresamento*. Obtido de <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/machining-formulas-definitions/milling-formulas-definitions>.
- Sandvik, Coromant. (15 de março de 2023). *Fresamento concordante vs fresamento discordante*. Obtido de <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/down-milling-vs-up-milling>.
- Sandvik, Coromant. (19 de março de 2023). *Fresamento de cantos a 90 graus de paredes finas que sofram deflexão*. Obtido de <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/shoulder-milling>.
- Sandvik, Coromant. (19 de março de 2023). *Usinagem em rampa: linear e circular com dois eixos*. Obtido de <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/milling-holes-cavities-pockets/ramping>.
- Shamsuddin, K.A, A-b Khadir, A.R e Osman, M.H. (2013). A Comparison of Milling Cutting Path Strategies for Thin - Walled Aluminium Alloys Fabrication.
- Soares, G. (2022). *Characterization of Primary and Secondary Al Alloys Injected through Vacuum Assisted HPDC and Influence of T6 Heat Treatment on Mechanical Properties*. [Dissertação de Mestrado]. Universidade do Porto.
- Soren, T.R, *et al.* (2019). Machinability behavior of Aluminium Alloys: A Brief Study.
- Vibration Research. (21 de março de 2023). *Why and How Window Functions are Used*. Obtido de <https://vibrationresearch.com/blog/why-and-how-window-functions-are-used/>.

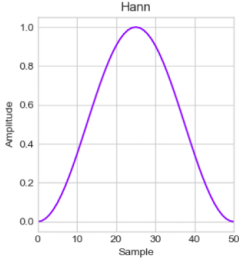
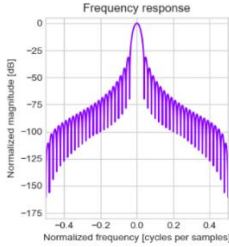
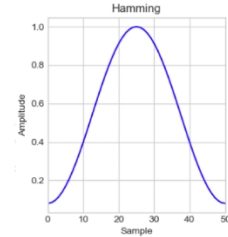
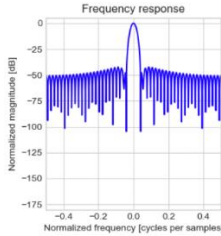
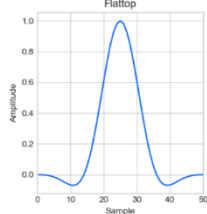
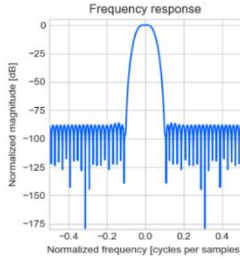
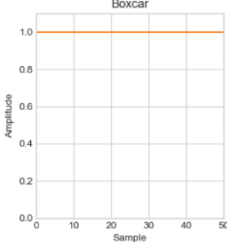
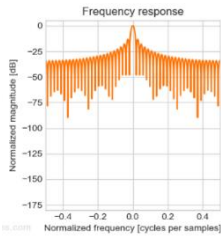
*Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075.
Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem*

Yeganefar, A., Niknam, S. A., & Songmene, V. (2019). Machinability study of aircraft series aluminium alloys 7075-T6 and 7050-T7451.

APÊNDICES

Apêndice A – Características de Algumas Janelas Usadas na FFT

Este apêndice destina-se a mostrar o efeito no espectro de frequência, da aplicação das janelas Hann, Hamming, Flat top e Retangular. Na aplicação das janelas Hann, Hamming e Flat top, o sinal é multiplicado por uma função matemática que o vai transformar num sinal com a mesma amplitude inicial e final, ou seja periódico.

| Janela | Forma da janela | Espectro de frequência | Função matemática |
|------------|---|---|---|
| Hann |  |  | $w(n) = 0,5 - 0,5\cos\left(\frac{2\pi n}{L-1}\right)$ $0 \leq n \leq L-1$ |
| Hamming |  |  | $w(n) = 0,54 - 0,46\cos\left(\frac{2\pi n}{L-1}\right)$ $0 \leq n \leq L-1$ |
| Flat top |  |  | $w(n) = a_0 - a_1\cos\left(\frac{2\pi n}{L}\right) + a_2\cos\left(\frac{4\pi n}{L}\right) - a_3\cos\left(\frac{6\pi n}{L}\right)$ $0 \leq n \leq L-1$ $a_0 = 0,21557895$ $a_1 = 0,41663158$ $a_2 = 0,277263158$ $a_3 = 0,006947368$ |
| Retangular |  |  | $w(n) = 1$ $0 \leq n \leq L-1$ |

Fonte: Adaptado de (Gaussian Waves, 2023).

Apêndice B – Características dos Equipamentos Usados no Trabalho Experimental

Neste apêndice são apresentadas as características consideradas mais importantes dos equipamentos aplicados no trabalho experimental.

Características principais do acelerômetro 356B08.

| Característica | Unidades inglesas | Unidades SI |
|----------------------------------|-----------------------|---|
| Sensibilidade ($\pm 10\%$) | 100mV.g ⁻¹ | 10mV.(m.s ⁻²) ⁻¹ |
| Gama de medição | ± 50 g (pico) | ± 490 m.s ⁻² (pico) |
| Gama de frequência ($\pm 5\%$) | 0,5Hz a 5 000 Hz | 0,5Hz a 5 000Hz |
| Frequência de ressonância | ≥ 20 kHz | ≥ 20 kHz |
| Resolução | 0,0001g (RMS) | 0,001m.s ⁻² (RMS) |
| Limite ao choque | $\pm 7\ 000$ g (pico) | $\pm 68\ 600$ m.s ⁻² (pico) |
| Gama de temperatura | -65°F a 170°F | -54°C a 77°C |
| Tensão de excitação | 20V a 30V | 20V a 30V |
| Corrente de excitação (DC) | 2mA a 20mA | 2mA a 20mA |
| Tipo de cristal | Cerâmico | Cerâmico |
| Forma de operação | Corte | Corte |

Fonte: Adaptado de (PCB Piezotronics).

Características principais da placa de aquisição NI 9234.

| Característica | Valor |
|---|--|
| Tipo de ligação | DC ou AC |
| Canais | 4 canais |
| Resolução | 24 bit |
| Gama de aquisição | $\pm 5V$ |
| Filtros | Filtros anti <i>aliasing</i> |
| Frequência de aquisição (Fs) | 1 652Hz a 51 200Hz |
| Corrente de excitação interna | 2mA (mínimo) \ 2.1mA (típico) |
| Atraso na medição | $\left(40 + \frac{5}{512}\right) \frac{1}{F_s} + 2.6\mu s$ |
| Erro na medição típico (25°C \pm 5°C) | $\pm 0,3mV$ |
| Variação devido à temperatura típica | 19,2 $\mu V/^\circ C$ (típico) \ 118 $\mu V/^\circ C$ (máximo) |
| Temperatura de uso | -40°C a 70°C |

Fonte: Adaptado de (National Instruments, 2023).

Características principais do rugosímetro SJ – 201.

| Característica | |
|----------------------------------|--|
| Gama de medição | -200 μ m a 350 μ m |
| Ponta de medição | Diamante com 5 μ m de diâmetro |
| Medições possíveis | 19 medições, sendo as mais comuns a Ra, Rq e Rz |
| Normas disponíveis | JIS B0601 – 1982, JIS B0601 – 1994, DIN, ISO e ANSI |
| Comprimento de amostragem | 0,25mm, 0,8mm e 2,5mm |
| Nº de comprimentos de amostragem | 1, 3 e 5 |
| Perfis disponíveis | Perfil primário (P) – perfil de aquisição em bruto sem filtros. Perfil de rugosidade (R) e Perfil DIN 4776 – perfis após a aplicação de filtros de forma a remover a ondulação |
| Filtros disponíveis | PC50, PC75 e 2CR |
| Resolução | 0,01 μ m a 0,4 μ m (dependente da amplitude de medição) |

Fonte: Adaptado de (Brütsh - Rüeeggger Tools, 2008).

Padrões a usar conforme a rugosidade – Norma ISO 4287 (1997).

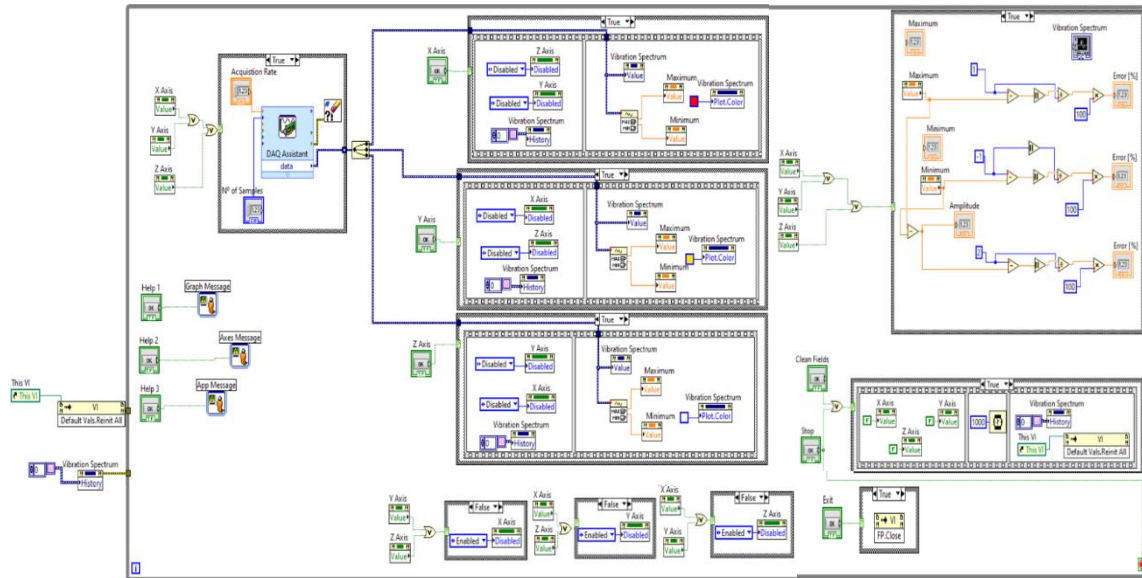
| Ra (μ m) | Rz (μ m) | Comprimento de amostragem (mm) | Comprimento de avaliação (mm) |
|------------------------|-----------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| $0,006 < Ra \leq 0,02$ | $0,025 < Rz \leq 0,1$ | 0,08 | 0,4 |
| $0,02 < Ra \leq 0,1$ | $0,1 < Rz \leq 0,5$ | 0,25 | 1,25 |
| $0,1 < Ra \leq 2$ | $0,5 < Rz \leq 10$ | 0,8 | 4 |
| $2 < Ra \leq 10$ | $10 < Rz \leq 50$ | 2,5 | 12,5 |
| $10 < Ra \leq 80$ | $50 < Rz \leq 200$ | 8 | 40 |

Fonte: Adaptado de (Brütsh - Rüeeggger Tools, 2008).

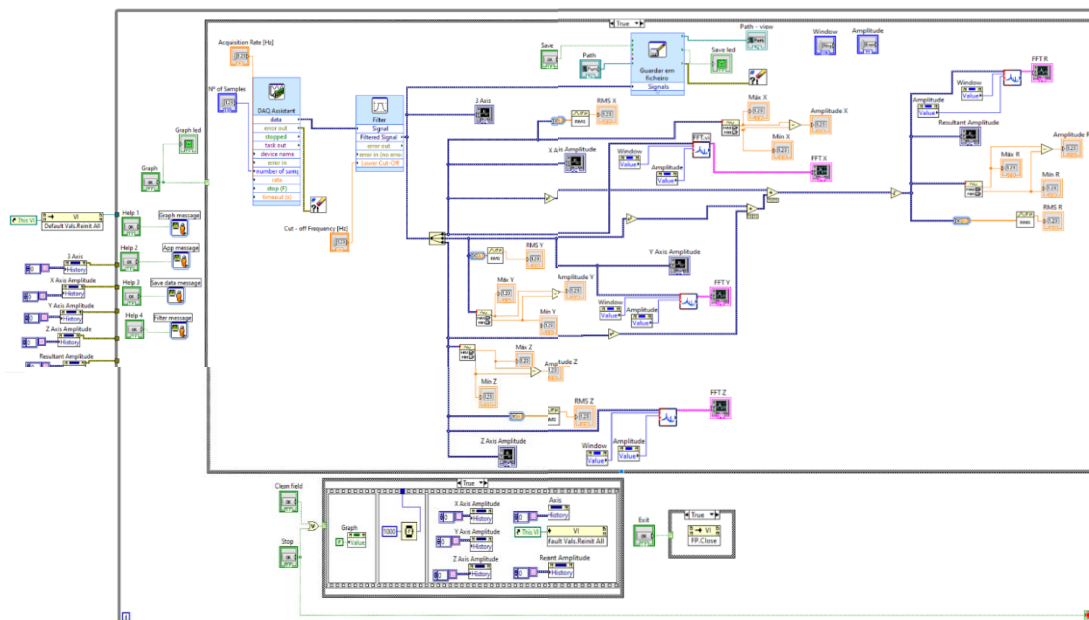
Apêndice C – Programação das Aplicações em LabVIEW®

Neste apêndice é apresentada a programação usada nas aplicações desenvolvidas no *software* LabVIEW®.

Código da aplicação para calibração do acelerómetro.



Código da aplicação para aquisição do sinal de vibração.



Apêndice D – Programação da Aplicação em MATLAB®

Neste apêndice apresenta-se a programação usada na aplicação desenvolvida no *software* MATLAB®.

Código da função de arranque.

```
function startupFcn(app)
    %End of reading of the FFT
    comp_signal_frequency=...
        str2double(app.Drop_down_comp_frequency.Value);
    End_of_reading=...
        app.Edit_field_start_reading_frequency.Value+...
        comp_signal_frequency;
    app.Edit_field_end_reading_frequency.Value=End_of_reading;

    %Options of the graphs
    app.Graph_x_time.Interactions=(dataTipInteraction);
    app.Graph_y_time.Interactions=(dataTipInteraction);
    app.Graph_z_time.Interactions=(dataTipInteraction);
    app.Graph_resultant_time.Interactions=(dataTipInteraction);
    app.Graph_x_frequency.Interactions=(dataTipInteraction);
    app.Graph_y_frequency.Interactions=(dataTipInteraction);
    app.Graph_z_frequency.Interactions=(dataTipInteraction);
    app.Graph_resultant_frequency.Interactions=...
        (dataTipInteraction);
end
```

Código das funções de ajuste dos eixos dos gráficos: a) domínio do tempo; b) domínio da frequência.

```
%Funtion to adjust tme axes
function [xmax_time,xmin_time,ymax_time,ymin_time]...
    = graph_axes_time(app)
    xmax_time=app.Edit_field_axis_horizontal_max_time.Value;
    xmin_time=app.Edit_field_axis_horizontal_min_time.Value;
    ymax_time=app.Edit_field_axis_vertical_max_time.Value;
    ymin_time=app.Edit_field_axis_vertical_min_time.Value;
end
```

a)

```
%Funtion to adjust frequency axes
function [xmax_frequency,xmin_frequency,...
    ymax_frequency,ymin_frequency] =...
    graph_axes_frequency(app)
    xmax_frequency=...
        app.Edit_field_eixo_max_horizontal_frequency.Value;
    xmin_frequency=...
        app.Edit_field_eixo_min_horizontal_frequency.Value;
    ymax_frequency=...
        app.Edit_field_eixo_max_vertical_frequency.Value;
    ymin_frequency=...
        app.Edit_field_eixo_min_vertical_frequency.Value;
end
```

b)

*Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075.
Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem*

Código da função com os vetores de valores no domínio do tempo: a) importação dos vetores; b) filtragem e integração dos vetores; c) corte das frequências e Resultante dos vários eixos.

```

%Function to represent time data
function [time_samples,amplitude_x_time,...
         amplitude_y_time,amplitude_z_time,...
         amplitude_resultant_time] = vectors_with_time_values(app)

%Variable with time data from excel
matrix_data_excel_time=readmatrix(app.data_excel_time);

%Vectors with data (time)for representation
amplitude_x_time=matrix_data_excel_time(:,2);
amplitude_y_time=matrix_data_excel_time(:,3);
amplitude_z_time=matrix_data_excel_time(:,4);
time_samples=(1:1:length(amplitude_x_time));

%Call function with butterworth filter
[b1,a1]=butterworth(app);

%Units to represent the data (use of filters and integration)
if app.Check_box_acceleration.Value==1
    amplitude_x_time=filter(b1,a1,amplitude_x_time);
    amplitude_y_time=filter(b1,a1,amplitude_y_time);
    amplitude_z_time=filter(b1,a1,amplitude_z_time);
elseif app.Check_box_velocity.Value==1
%1st filter and integration: A--V
    amplitude_x_time=filter(b1,a1,amplitude_x_time);
    amplitude_y_time=filter(b1,a1,amplitude_y_time);
    amplitude_z_time=filter(b1,a1,amplitude_z_time);
    amplitude_x_time=cumtrapz(time_samples,amplitude_x_time);
    amplitude_y_time=cumtrapz(time_samples,amplitude_y_time);
    amplitude_z_time=cumtrapz(time_samples,amplitude_z_time);
elseif app.Check_box_displacement.Value==1
%1st filter and integration: A--V
    amplitude_x_time=filter(b1,a1,amplitude_x_time);
    amplitude_y_time=filter(b1,a1,amplitude_y_time);
    amplitude_z_time=filter(b1,a1,amplitude_z_time);
    amplitude_x_time=cumtrapz(time_samples,amplitude_x_time);
    amplitude_y_time=cumtrapz(time_samples,amplitude_y_time);
    amplitude_z_time=cumtrapz(time_samples,amplitude_z_time);
%2nd filter and integration: V--D
    amplitude_x_time=filter(b1,a1,amplitude_x_time);
    amplitude_y_time=filter(b1,a1,amplitude_y_time);
    amplitude_z_time=filter(b1,a1,amplitude_z_time);
    amplitude_x_time=cumtrapz(time_samples,amplitude_x_time);
    amplitude_y_time=cumtrapz(time_samples,amplitude_y_time);
    amplitude_z_time=cumtrapz(time_samples,amplitude_z_time);
end
    
```

a)

b)

```

%Frequencies to remove from the signal
try
if app.Button_cut.Value==1
    freqs_cut=app.Table_cut.Data;
    freqs_cut_min=freqs_cut(:,2);
    freqs_cut_max=freqs_cut(:,3);
    for i=1:length(freqs_cut_max)
        amplitude_x_time=bandstop(amplitude_x_time, ...
        [freqs_cut_min(i) freqs_cut_max(i)], ...
        app.Edit_field_acquisition_freq.Value);
        amplitude_y_time=bandstop(amplitude_y_time, ...
        [freqs_cut_min(i) freqs_cut_max(i)], ...
        app.Edit_field_acquisition_freq.Value);
        amplitude_z_time=bandstop(amplitude_z_time, ...
        [freqs_cut_min(i) freqs_cut_max(i)], ...
        app.Edit_field_acquisition_freq.Value);
    end
end
catch
end

%Resultant amplitude
amplitude_resultant_time=sqrt(amplitude_x_time.^2+...
    amplitude_y_time.^2+amplitude_z_time.^2);
end
    
```

c)

Código da função para realizar a FFT: a) importação de dados e intervalo para a FFT; b) janelas para a FFT; c) aplicação da FFT e ajuste dos vetores.

```

%Function to perform the FFT
function [frequency_samples,...
    amplitude_x_freq_graph,...
    amplitude_y_freq_graph,...
    amplitude_z_freq_graph,...
    amplitude_resultant_freq_graph] = transform_FFT(app)

%Formulas to the FFT algorithm in:
%https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/fft.html

%Call function with time data
[~,amplitude_x_time,...
    amplitude_y_time,amplitude_z_time,...
    amplitude_resultant_time] = vectors_with_time_values(app);

%Interval for the FFT
start=app.Edit_field_start_reading_frequency.Value;
comp_signal_freq=...
    str2double(app.Drop_down_comp_frequency.Value);
End=start+comp_signal_freq;
frequency=app.Edit_field_frequency.Value;
range_amplitude_x_for_FFT=amplitude_x_time(start:End-1);
range_amplitude_y_for_FFT=amplitude_y_time(start:End-1);
range_amplitude_z_for_FFT=amplitude_z_time(start:End-1);
range_amplitude_resultant_for_FFT=...
    amplitude_resultant_time(start:End-1);
comp_signal_FFT=2*nextpow2(comp_signal_freq);

%Selection of windows to contro the spectral leakage
switch app.Drop_down_window.Value
    case 'Hanning'
        window=hann(comp_signal_FFT);
        adjust=4;
    case 'Hamming'
        window=hamming(comp_signal_FFT);
        adjust=4;
    case 'Flat Top'
        window=flattopwin(comp_signal_FFT);
        adjust=9;
    case 'Rectangular (none)'
        window=rectwin(comp_signal_FFT);
        adjust=2;
    case 'Blackman'
        window=blackman(comp_signal_FFT);
        adjust=5;
    case 'Blackman-Harris'
        window=blackmanharris(comp_signal_FFT);
        adjust=6;
    case 'Bartlett'
        window=bartlett(comp_signal_FFT);
        adjust=4;
    case 'Bohman'
        window=bohmanwin(comp_signal_FFT);
        adjust=5;
    case 'Gaussian'
        window=gausswin(comp_signal_FFT);
        adjust=4;
    case 'Kaiser'
        window=kaiser(comp_signal_FFT);
        adjust=2;
    case 'Parzen'
        window=parzenwin(comp_signal_FFT);
        adjust=5;

```

a)

b)

```

%Fast Fourier Transform
FFT_x=fft(window.*range_amplitude_x_for_FFT);
FFT_y=fft(window.*range_amplitude_y_for_FFT);
FFT_z=fft(window.*range_amplitude_z_for_FFT);
FFT_3_eixos=...
    fft(window.*range_amplitude_resultant_for_FFT);

%Horizontal axis in the frequency domain (vector with...
%increments of 1 until half of the sampling rate - Nyquist...
%theorem.
frequency_samples=...
    frequency*(0:(comp_signal_FFT)/2-1)/comp_signal_FFT;

%Vertical axes with the same length of the horizontal axis.
amplitude_x_freq=...
    FFT_x(1:comp_signal_FFT/2);
amplitude_y_freq=...
    FFT_y(1:comp_signal_FFT/2);
amplitude_z_freq=...
    FFT_z(1:comp_signal_FFT/2);
amplitude_3_eixos_freq=...
    FFT_3_eixos(1:comp_signal_FFT/2);

%Adjust because of the use of windows
amplitude_x_freq_graph=...
    abs(amplitude_x_freq)/(comp_signal_FFT/adjust);
amplitude_y_freq_graph=...
    abs(amplitude_y_freq)/(comp_signal_FFT/adjust);
amplitude_z_freq_graph=...
    abs(amplitude_z_freq)/(comp_signal_FFT/adjust);
amplitude_resultant_freq_graph=...
    abs(amplitude_3_eixos_freq)/(comp_signal_FFT/adjust);

end

```

c)

*Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075.
Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem*

Código da função de limpeza: a) limpeza dos gráficos no domínio do tempo; b) limpeza dos gráficos no domínio da frequência; c) limpeza das tabelas e do nome do ficheiro.

```
function [] = clean(app)

%Clean graphs (time)
cla(app.Graph_x_time);
cla(app.Graph_y_time);
cla(app.Graph_z_time);
cla(app.Graph_resultant_time);
xlabel(app.Graph_x_time,'');
xlabel(app.Graph_y_time,'');
xlabel(app.Graph_z_time,'');
xlabel(app.Graph_resultant_time,'');
ylabel(app.Graph_x_time,'');
ylabel(app.Graph_y_time,'');
ylabel(app.Graph_z_time,'');
ylabel(app.Graph_resultant_time,'');
title(app.Graph_x_time,'X');
title(app.Graph_y_time,'Y');
title(app.Graph_z_time,'Z');
title(app.Graph_resultant_time,'Resultant');
app.Edit_field_max_x_time.Value=0;
app.Edit_field_min_x_time.Value=0;
app.Edit_field_RMS_x_time.Value=0;
app.Edit_field_max_y_time.Value=0;
app.Edit_field_min_y_time.Value=0;
app.Edit_field_RMS_y_time.Value=0;
app.Edit_field_max_z_time.Value=0;
app.Edit_field_min_z_time.Value=0;
app.Edit_field_RMS_z_time.Value=0;
app.Edit_field_max_resultant_time.Value=0;
app.Edit_field_min_resultant_time.Value=0;
app.Edit_field_RMS_resultant_time.Value=0;

%Clean graphs frequency
cla(app.Graph_x_frequency);
cla(app.Graph_y_frequency);
cla(app.Graph_z_frequency);
cla(app.Graph_resultant_frequency);
xlabel(app.Graph_x_frequency,'');
xlabel(app.Graph_y_frequency,'');
xlabel(app.Graph_z_frequency,'');
xlabel(app.Graph_resultant_frequency,'');
ylabel(app.Graph_x_frequency,'');
ylabel(app.Graph_y_frequency,'');
ylabel(app.Graph_z_frequency,'');
ylabel(app.Graph_resultant_frequency,'');
title(app.Graph_x_frequency,'X');
title(app.Graph_y_frequency,'Y');
title(app.Graph_z_frequency,'Z');
title(app.Graph_resultant_frequency,'Resultant');
app.Edit_field_max_x_frequency.Value=0;
app.Edit_field_max_y_frequency.Value=0;
app.Edit_field_max_z_frequency.Value=0;
app.Edit_field_max_resultant_frequency.Value=0;
```

a)

b)

```
%Clean tables
app.Table_time.Data=[];
app.Table_time.ColumnName={'1','2','3','4','5'};
app.Table_frequency.Data=[];
app.Table_frequency.ColumnName={'1','2','3','4','5','6'};
app.Edit_field_max_x_table_time.Value=0;
app.Edit_field_max_y_table_time.Value=0;
app.Edit_field_max_z_table_time.Value=0;
app.Edit_field_max_r_table_time.Value=0;
app.Edit_field_samples_time.Value=0;
app.Edit_field_max_x_table_frequency.Value=0;
app.Edit_field_max_y_table_frequency.Value=0;
app.Edit_field_max_z_table_frequency.Value=0;
app.Edit_field_max_r_table_frequency.Value=0;
app.Edit_field_nf_table_frequency.Value=0;
app.Edit_field_max_f_table_frequency.Value=0;

%Clean file name
app.Edit_field_file_name_time.Value='';
app.Edit_field_filename_2.Value='';

%Clean cut table
app.Panel_cut_parameters.Enable='off';
app.Table_cut.Data=[];
app.Table_cut.ColumnName={'1','2','3'};
app.Button_cut.Value=0;
app.Edit_field_cut_frequency.Value=2;
app.Edit_field_upper.Value=3;
app.Edit_field_lower.Value=1;
end
```

c)

Código da função do filtro *butterworth*.

```
% Function with butterworth filter
function [b1,a1] = butterworth(app)
ordem=str2double(app.Drop_down_order.Value);
corte=app.Edit_field_cut_freq.Value/...
(app.Edit_field_acquisition_freq.Value/2);
try
[b1,a1]=butter(ordem,corte,'high');
catch
end
end
```

Código de importação de dados.

```
function Button_load_data_timeButtonPushed(app, event)
%Enable and disable certain parameters
app.Button_update_graphs_time.Enable='on';
app.Button_update_graphs_frequency.Enable='on';
app.Button_default_frequency.Enable='off';
app.Button_default_time.Enable='off';

%Call of clean function
clean(app)

try
%file_time - keep filename
%path_time - keep path of the file
%fullfile - create file
[file_time,path_time]=...
    uigetfile...
    ('.xlsx','Select Data');
app.data_excel_time=fullfile(path_time,file_time);
app.Edit_field_file_name_time.Value=file_time;
app.Edit_field_filename_2.Value=file_time;

%Call of the function with time data
[time_samples,amplitude_x_time,...
    amplitude_y_time,amplitude_z_time,...
    amplitude_resultant_time] = vectors_with_time_values(app);

%Table with time data
app.Table_time.Data=[time_samples , amplitude_x_time ,...
    amplitude_y_time , amplitude_z_time , ...
    amplitude_resultant_time];
app.Table_time.ColumnName={'Time [Nº of Samples]',...
    'Amplitude in X Axis [m/s^2]', 'Amplitude in Y Axis [m/s^2]',...
    'Amplitude in Z Axis [m/s^2]', 'Resultant Amplitude [m/s^2]'};
app.Edit_field_max_x_table_time.Value=...
    max(amplitude_x_time);
app.Edit_field_max_y_table_time.Value=...
    max(amplitude_y_time);
app.Edit_field_max_z_table_time.Value=...
    max(amplitude_z_time);
app.Edit_field_max_r_table_time.Value=...
    max(amplitude_resultant_time);
app.Edit_field_samples_time.Value=length(time_samples);
catch

%Securities
if isempty(app.Edit_field_file_name_time.Value)
    app.Button_update_graphs_time.Enable='off';
    app.Button_update_graphs_frequency.Enable='off';
    warndlg('Select a file.', 'Warning!', 'non-modal');
else
    app.Button_update_graphs_time.Enable='on';
    app.Button_update_graphs_frequency.Enable='on';
end
end
end
```

Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075. Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem

Código da representação dos gráficos no domínio do tempo.

```
% Button pushed function: Button_update_graphs_time
function Button_update_graphs_time(ButtonPushed(app, event)

%Call of the function with time data
[time_samples,amplitude_x_time,...
 amplitude_y_time,amplitude_z_time,...
 amplitude_resultant_time] = vectors_with_time_values(app);

%X axis
plot(app.Grpah_x_time,time_samples,amplitude_x_time);
xlabel(app.Grpah_x_time,'Time [Nº of Samples]');
ylabel(app.Grpah_x_time,'Amplitude [m/s^2]');
title(app.Grpah_x_time,'Vibration Amplitude on X Axis');
axtoolbar(app.Grpah_x_time,{'export'});
%Max, min and RMS
app.Edit_field_max_x_time.Value=max(amplitude_x_time);
app.Edit_field_min_x_time.Value=min(amplitude_x_time);
app.Edit_field_RMS_x_time.Value=rms(amplitude_x_time);

%Y axis
plot(app.Graph_y_time,time_samples,amplitude_y_time,'g');
xlabel(app.Graph_y_time,'Time [Nº of Samples]');
ylabel(app.Graph_y_time,'Amplitude [m/s^2]');
title(app.Graph_y_time,'Vibration Amplitude on Y Axis');
axtoolbar(app.Graph_y_time,{'export'});
%Max, min and RMS
app.Edit_field_max_y_time.Value=max(amplitude_y_time);
app.Edit_field_min_y_time.Value=min(amplitude_y_time);
app.Edit_field_RMS_y_time.Value=rms(amplitude_y_time);

%Z axis
plot(app.Graph_z_time,time_samples,amplitude_z_time,'r');
xlabel(app.Graph_z_time,'Time [Nº of Samples]');
ylabel(app.Graph_z_time,'Amplitude [m/s^2]');
title(app.Graph_z_time,'Vibration Amplitude on Z Axis');
axtoolbar(app.Graph_z_time,{'export'});
%Max, min and RMS
app.Edit_field_max_z_time.Value=max(amplitude_z_time);
app.Edit_field_min_z_time.Value=min(amplitude_z_time);
app.Edit_field_RMS_z_time.Value=rms(amplitude_z_time);

%Resultant
plot(app.Graph_resultant_time,time_samples,...
 amplitude_resultant_time,'black')
xlabel(app.Graph_resultant_time,'Time [Nº of Samples]');
ylabel(app.Graph_resultant_time,'Amplitude [m/s^2]');
title(app.Graph_resultant_time,...
 'Resultant Vibration Amplitude');
axtoolbar(app.Graph_resultant_time,{'export'});
%Max, min and RMS
app.Edit_field_max_resultant_time.Value=max...
 (amplitude_resultant_time);
app.Edit_field_min_resultant_time.Value=min...
 (amplitude_resultant_time);
app.Edit_field_RMS_resultant_time.Value=rms...
 (amplitude_resultant_time);

%Default axes
axis(app.Grpah_x_time,'auto');
xticks(app.Grpah_x_time,'auto');
yticks(app.Grpah_x_time,'auto');
axis(app.Graph_y_time,'auto');
xticks(app.Graph_y_time,'auto');
yticks(app.Graph_y_time,'auto');
axis(app.Graph_z_time,'auto');
xticks(app.Graph_z_time,'auto');
yticks(app.Graph_z_time,'auto');
axis(app.Graph_resultant_time,'auto');
xticks(app.Graph_resultant_time,'auto');
yticks(app.Graph_resultant_time,'auto');

%Labels
if app.Check_box_velocity.Value==1
    ylabel(app.Grpah_x_time,'Amplitude [m/s]');
    ylabel(app.Graph_y_time,'Amplitude [m/s]');
    ylabel(app.Graph_z_time,'Amplitude [m/s]');
    ylabel(app.Graph_resultant_time,'Amplitude [m/s]');
elseif app.Check_box_displacement.Value==1
    ylabel(app.Grpah_x_time,'Amplitude [m]');
    ylabel(app.Graph_y_time,'Amplitude [m]');
    ylabel(app.Graph_z_time,'Amplitude [m]');
    ylabel(app.Graph_resultant_time,'Amplitude [m]');
end

%Update table
if app.Check_box_acceleration.Value==1
    app.Table_time.Data=[time_samples , amplitude_x_time ...
        amplitude_y_time , amplitude_z_time , ...
        amplitude_resultant_time];
    app.Table_time.ColumnName=({'Time [Nº of Samples]',...
        'X Axis Amplitude [m/s^2]', 'Y Axis Amplitude [m/s^2]',...
        'Z Axis Amplitude [m/s^2]', 'Resultant Amplitude [m/s^2]'});
    app.Edit_field_max_x_table_time.Value=...
        max(amplitude_x_time);
    app.Edit_field_max_y_table_time.Value=...
        max(amplitude_y_time);
    app.Edit_field_max_z_table_time.Value=...
        max(amplitude_z_time);
    app.Edit_field_max_r_table_time.Value=...
        max(amplitude_resultant_time);
    app.Edit_field_samples_time.Value=length(time_samples);
elseif app.Check_box_velocity.Value==1
    app.Table_time.Data=[time_samples , amplitude_x_time ...
        amplitude_y_time , amplitude_z_time , ...
        amplitude_resultant_time];
    app.Table_time.ColumnName=({'Time [Nº of Samples]',...
        'X Axis Amplitude [m/s]', 'Y Axis Amplitude [m/s]',...
        'Z Axis Amplitude [m/s]', 'Resultant Amplitude [m/s]'});
    app.Edit_field_max_x_table_time.Value=...
        max(amplitude_x_time);
    app.Edit_field_max_y_table_time.Value=...
        max(amplitude_y_time);
    app.Edit_field_max_z_table_time.Value=...
        max(amplitude_z_time);
    app.Edit_field_max_r_table_time.Value=...
        max(amplitude_resultant_time);
    app.Edit_field_samples_time.Value=length(time_samples);
end

elseif app.Check_box_displacement.Value==1
    app.Table_time.Data=[time_samples , amplitude_x_time ...
        amplitude_y_time , amplitude_z_time , ...
        amplitude_resultant_time];
    app.Table_time.ColumnName=({'Time [Nº of Samples]',...
        'X Axis Amplitude [m]', 'Y Axis Amplitude [m]',...
        'Z Axis Amplitude [m]', 'Resultant Amplitude [m]'});
    app.Edit_field_max_x_table_time.Value=...
        max(amplitude_x_time);
    app.Edit_field_max_y_table_time.Value=...
        max(amplitude_y_time);
    app.Edit_field_max_z_table_time.Value=...
        max(amplitude_z_time);
    app.Edit_field_max_r_table_time.Value=...
        max(amplitude_resultant_time);
    app.Edit_field_samples_time.Value=length(time_samples);
end

%Activate default button
app.Button_default_time.Enable='on';

%Activate cut parameters panel
app.Panel_cut_parameters.Enable='on';
end
```

Código de ajuste dos eixos dos gráficos no domínio do tempo.

```

function Button_adjust_axes_timePushed(app, event)
try
    %Call of the function that contains the limits
    [xmax_tempo,xmin_tempo,ymax_tempo,ymin_tempo]...
    = graph_axes_time(app);
    [~,amplitude_x_time,amplitude_y_time,...
    amplitude_z_time,amplitude_resultant_time] =...
    vectors_with_time_values(app);

    %New vectors with data
    new_amplitude_x_time=...
    amplitude_x_time(xmin_tempo:xmax_tempo);
    new_amplitude_y_time=...
    amplitude_y_time(xmin_tempo:xmax_tempo);
    new_amplitude_z_time=...
    amplitude_z_time(xmin_tempo:xmax_tempo);
    new_amplitude_resultant_time=...
    amplitude_resultant_time(xmin_tempo:xmax_tempo);
catch
end

%Update graphs
%All
if app.CheckBox_amplitude_all_time.Value==1
axis(app.Graph_x_time,[xmin_tempo xmax_tempo...
ymin_tempo ymax_tempo])
axis(app.Graph_y_time,[xmin_tempo xmax_tempo...
ymin_tempo ymax_tempo])
axis(app.Graph_z_time,[xmin_tempo xmax_tempo...
ymin_tempo ymax_tempo])
axis(app.Graph_resultant_time,[xmin_tempo xmax_tempo...
ymin_tempo ymax_tempo])

- - - - -
try
app.Edit_field_max_x_time.Value=...
max(new_amplitude_x_time);
app.Edit_field_min_x_time.Value=...
min(new_amplitude_x_time);
app.Edit_field_RMS_x_time.Value=rms...
(new_amplitude_x_time);

app.Edit_field_max_y_time.Value=...
max(new_amplitude_y_time);
app.Edit_field_min_y_time.Value=...
min(new_amplitude_y_time);
app.Edit_field_RMS_y_time.Value=rms...
(new_amplitude_y_time);

app.Edit_field_max_z_time.Value=...
max(new_amplitude_z_time);
app.Edit_field_min_z_time.Value=...
min(new_amplitude_z_time);
app.Edit_field_RMS_z_time.Value=rms...
(new_amplitude_z_time);

app.Edit_field_max_resultant_time.Value=...
max(new_amplitude_resultant_time);
app.Edit_field_min_resultant_time.Value=...
min(new_amplitude_resultant_time);
app.Edit_field_RMS_resultant_time.Value=rms...
(new_amplitude_resultant_time);
catch
end
end

%X axis
if app.CheckBox_amplitude_x_time.Value==1
axis(app.Graph_x_time,[xmin_tempo xmax_tempo...
ymin_tempo ymax_tempo])
try
app.Edit_field_max_x_time.Value=...
max(new_amplitude_x_time);
app.Edit_field_min_x_time.Value=...
min(new_amplitude_x_time);
app.Edit_field_RMS_x_time.Value=rms...
(new_amplitude_x_time);
catch
end
end

%Y axis
if app.CheckBox_amplitude_y_time.Value==1
axis(app.Graph_y_time,[xmin_tempo xmax_tempo...
ymin_tempo ymax_tempo])
try
app.Edit_field_max_y_time.Value=...
max(new_amplitude_y_time);
app.Edit_field_min_y_time.Value=...
min(new_amplitude_y_time);
app.Edit_field_RMS_y_time.Value=rms...
(new_amplitude_y_time);
catch
end
end

%Z axis
if app.CheckBox_amplitude_z_time.Value==1
axis(app.Graph_z_time,[xmin_tempo xmax_tempo...
ymin_tempo ymax_tempo])
try
app.Edit_field_max_z_time.Value=...
max(new_amplitude_z_time);
app.Edit_field_min_z_time.Value=...
min(new_amplitude_z_time);
app.Edit_field_RMS_z_time.Value=rms...
(new_amplitude_z_time);
catch
end
end

%Resultant
if app.CheckBox_amplitude_resultant_time.Value==1
axis(app.Graph_resultant_time,[xmin_tempo xmax_tempo...
ymin_tempo ymax_tempo])
try
app.Edit_field_max_resultant_time.Value=...
max(new_amplitude_resultant_time);
app.Edit_field_min_resultant_time.Value=...
min(new_amplitude_resultant_time);
app.Edit_field_RMS_resultant_time.Value=rms...
(new_amplitude_resultant_time);
catch
end
end
end
end

```

*Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075.
Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem*

Código para a predefinição dos eixos dos gráficos no domínio do tempo.

```
function Button_default_timePushed(app, event)
try
%Call of the funcicon with time data
[~,amplitude_x_time,amplitude_y_time,...
amplitude_z_time,amplitude_resultant_time]=...
vectors_with_time_values(app);
catch
end

%All
if app.CheckBox_amplitude_all_time.Value==1
axis(app.Grpah_x_time,'auto');
axis(app.Graph_y_time,'auto');
axis(app.Graph_z_time,'auto');
axis(app.Graph_resultant_time,'auto');
app.CheckBox_amplitude_all_time.Value=0;

%All
if app.CheckBox_amplitude_all_time.Value==1
axis(app.Grpah_x_time,'auto');
axis(app.Graph_y_time,'auto');
axis(app.Graph_z_time,'auto');
axis(app.Graph_resultant_time,'auto');
app.CheckBox_amplitude_all_time.Value=0;
try
app.Edit_field_max_x_time.Value=...
max(amplitude_x_time);
app.Edit_field_min_x_time.Value=...
min(amplitude_x_time);
app.Edit_field_RMS_x_time.Value=rms(amplitude_x_time);

app.Edit_field_max_y_time.Value=...
max(amplitude_y_time);
app.Edit_field_min_y_time.Value=...
min(amplitude_y_time);
app.Edit_field_RMS_y_time.Value=rms(amplitude_y_time);

app.Edit_field_max_z_time.Value=...
max(amplitude_z_time);
app.Edit_field_min_z_time.Value=...
min(amplitude_z_time);
app.Edit_field_RMS_z_time.Value=rms(amplitude_z_time);

app.Edit_field_max_resultant_time.Value=max...
(amplitude_resultant_time);
app.Edit_field_min_resultant_time.Value=min...
(amplitude_resultant_time);
app.Edit_field_RMS_resultant_time.Value=rms...
(amplitude_resultant_time);
catch
end
end
```

```
%X axis
if app.CheckBox_amplitude_x_time.Value==1
axis(app.Grpah_x_time,'auto');
app.CheckBox_amplitude_x_time.Value=0;
try
app.Edit_field_max_x_time.Value=...
max(amplitude_x_time);
app.Edit_field_min_x_time.Value=...
min(amplitude_x_time);
app.Edit_field_RMS_x_time.Value=rms(amplitude_x_time);
catch
end
end

%Y axis
if app.CheckBox_amplitude_y_time.Value==1
axis(app.Graph_y_time,'auto');
app.CheckBox_amplitude_y_time.Value=0;
try
app.Edit_field_max_y_time.Value=...
max(amplitude_y_time);
app.Edit_field_min_y_time.Value=...
min(amplitude_y_time);
app.Edit_field_RMS_y_time.Value=rms(amplitude_y_time);
catch
end
end

%Z axis
if app.CheckBox_amplitude_z_time.Value==1
axis(app.Graph_z_time,'auto');
app.CheckBox_amplitude_z_time.Value=0;
try
app.Edit_field_max_z_time.Value=...
max(amplitude_z_time);
app.Edit_field_min_z_time.Value=...
min(amplitude_z_time);
app.Edit_field_RMS_z_time.Value=rms(amplitude_z_time);
catch
end
end

%Resultant
if app.CheckBox_amplitude_resultant_time.Value==1
axis(app.Graph_resultant_time,'auto');
app.CheckBox_amplitude_resultant_time.Value=0;
try
app.Edit_field_max_resultant_time.Value=max...
(amplitude_resultant_time);
app.Edit_field_min_resultant_time.Value=min...
(amplitude_resultant_time);
app.Edit_field_RMS_resultant_time.Value=rms...
(amplitude_resultant_time);
catch
end
end
end
```

Código para ativar ou desativar a grelha dos gráficos no domínio do tempo.

```
function Button_grid_timeValueChanged(app, event)
    if app.Button_grid_time.Value==1
        grid(app.Grpah_x_time, 'on');
        grid(app.Graph_y_time, 'on');
        grid(app.Graph_z_time, 'on');
        grid(app.Graph_resultant_time, 'on');
    else
        grid(app.Grpah_x_time, 'off');
        grid(app.Graph_y_time, 'off');
        grid(app.Graph_z_time, 'off');
        grid(app.Graph_resultant_time, 'off');
    end
end
```

Código da *check box* de escolha do gráfico a ajustar os eixos no domínio do tempo: a) eixo X; b) eixo Y; c) eixo Z; d) Resultante; d) todos.

```
function CheckBox_amplitude_x_timeValueChanged(app, event)
    if app.CheckBox_amplitude_x_time.Value==1
        app.CheckBox_amplitude_all_time.Value=0;
    end
end
```

a)

```
function CheckBox_amplitude_y_timeValueChanged(app, event)
    if app.CheckBox_amplitude_y_time.Value==1
        app.CheckBox_amplitude_all_time.Value=0;
    end
end
```

b)

```
function CheckBox_amplitude_z_timeValueChanged(app, event)
    if app.CheckBox_amplitude_z_time.Value==1
        app.CheckBox_amplitude_all_time.Value=0;
    end
end
```

c)

```
function CheckBox_amplitude_resultant_timeValueChanged(app, event)
    if app.CheckBox_amplitude_resultant_time.Value==1
        app.CheckBox_amplitude_all_time.Value=0;
    end
end
```

d)

```
function CheckBox_amplitude_all_timeValueChanged(app, event)
    if app.CheckBox_amplitude_all_time.Value==1
        app.CheckBox_amplitude_resultant_time.Value=0;
        app.CheckBox_amplitude_x_time.Value=0;
        app.CheckBox_amplitude_y_time.Value=0;
        app.CheckBox_amplitude_z_time.Value=0;
    end
end
```

d)

Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075. Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem

Código da representação dos gráficos no domínio da frequência.

```
function Button_update_graphs_FrequencyButtonPushed(app, event)
    Button_update_graphs_timeButtonPushed(app, event)

    try
        [frequency_samples,...
         amplitude_x_freq_graph,...
         amplitude_y_freq_graph,...
         amplitude_z_freq_graph,...
         amplitude_resultant_freq_graph] = transform_FFT(app);

        %X axis
        plot(app.Graph_x_frequency,...
             frequency_samples,amplitude_x_freq_graph)
        xlabel(app.Graph_x_frequency,'Frequency [Hz]');
        ylabel(app.Graph_x_frequency,'Amplitude [m/s^2]');
        title(app.Graph_x_frequency,...
              'Vibration Amplitude on X Axis');
        axtoolbar(app.Graph_x_frequency,{'export'});
        app.Edit_field_max_x_frequency.Value=...
            max(amplitude_x_freq_graph);

        %Y axis
        plot(app.Graph_y_frequency,...
             frequency_samples,amplitude_y_freq_graph,'g');
        xlabel(app.Graph_y_frequency,'Frequency [Hz]');
        ylabel(app.Graph_y_frequency,'Amplitude [m/s^2]');
        title(app.Graph_y_frequency,...
              'Vibration Amplitude on Y Axis');
        axtoolbar(app.Graph_y_frequency,{'export'});
        app.Edit_field_max_y_frequency.Value=...
            max(amplitude_y_freq_graph);

        %Z axis
        plot(app.Graph_z_frequency,...
             frequency_samples,amplitude_z_freq_graph,'r');
        xlabel(app.Graph_z_frequency,'Frequency [Hz]');
        ylabel(app.Graph_z_frequency,'Amplitude [m/s^2]');
        title(app.Graph_z_frequency,...
              'Vibration Amplitude on Z Axis');
        axtoolbar(app.Graph_z_frequency,{'export'});
        app.Edit_field_max_z_frequency.Value=...
            max(amplitude_z_freq_graph);

        %Resultant
        plot(app.Graph_resultant_frequency,...
             frequency_samples,amplitude_resultant_freq_graph,'black');
        xlabel(app.Graph_resultant_frequency,'Frequency [Hz]');
        ylabel(app.Graph_resultant_frequency,'Amplitude [m/s^2]');
        title(app.Graph_resultant_frequency,...
              'Resultant Vibration Amplitude');
        axtoolbar(app.Graph_resultant_frequency,{'export'});
        app.Edit_field_max_resultant_frequency.Value=...
            max(amplitude_resultant_freq_graph);

        %Default axes
        axis(app.Graph_x_frequency,'auto');
        xticks(app.Graph_x_frequency,'auto');
        yticks(app.Graph_x_frequency,'auto');
        axis(app.Graph_y_frequency,'auto');
        xticks(app.Graph_y_frequency,'auto');
        yticks(app.Graph_y_frequency,'auto');
        axis(app.Graph_z_frequency,'auto');
        xticks(app.Graph_z_frequency,'auto');
        yticks(app.Graph_z_frequency,'auto');
        axis(app.Graph_resultant_frequency,'auto');
        xticks(app.Graph_resultant_frequency,'auto');
        yticks(app.Graph_resultant_frequency,'auto');

        %Activate the cut parameters table
        app.Panel_cut_parameters.Enable='on';

        %Mark on the time domain of the interval of the FFT
        xline(app.Graph_x_time,...
              app.Edit_field_start_reading_frequency.Value,'-',...
              'labelOrientation','horizontal','linewidth',1.5);
        xline(app.Graph_x_time,...
              app.Edit_field_end_reading_frequency.Value,'-',...
              'labelOrientation','horizontal','linewidth',1.5);
        xline(app.Graph_y_time,...
              app.Edit_field_start_reading_frequency.Value,'-',...
              'labelOrientation','horizontal','linewidth',1.5);
        xline(app.Graph_y_time,...
              app.Edit_field_end_reading_frequency.Value,'-',...
              'labelOrientation','horizontal','linewidth',1.5);
        xline(app.Graph_z_time,...
              app.Edit_field_start_reading_frequency.Value,'-',...
              'labelOrientation','horizontal','linewidth',1.5);
        xline(app.Graph_z_time,...
              app.Edit_field_end_reading_frequency.Value,'-',...
              'labelOrientation','horizontal','linewidth',1.5);
        xline(app.Graph_resultant_time,...
              app.Edit_field_start_reading_frequency.Value,'-',...
              'labelOrientation','horizontal','linewidth',1.5);
        xline(app.Graph_resultant_time,...
              app.Edit_field_end_reading_frequency.Value,'-',...
              'labelOrientation','horizontal','linewidth',1.5);
    end

    if app.Check_box_velocity.Value==1
        ylabel(app.Graph_x_frequency,'Amplitude [m/s]');
        ylabel(app.Graph_y_frequency,'Amplitude [m/s]');
        ylabel(app.Graph_z_frequency,'Amplitude [m/s]');
        ylabel(app.Graph_resultant_frequency,'Amplitude [m/s]');
    elseif app.Check_box_displacement.Value==1
        ylabel(app.Graph_x_frequency,'Amplitude [m]');
        ylabel(app.Graph_y_frequency,'Amplitude [m]');
        ylabel(app.Graph_z_frequency,'Amplitude [m]');
        ylabel(app.Graph_resultant_frequency,'Amplitude [m]');
    end

    %Table with FFT values
    pontos=1:length(frequency_samples);
    app.Table_frequency.Data=[pontos.',frequency_samples.',...
                              amplitude_x_freq_graph,...
                              amplitude_y_freq_graph,...
                              amplitude_z_freq_graph,...
                              amplitude_resultant_freq_graph];
    app.Table_frequency.ColumnName={'Point Nº',...
                                    'Frequency [Hz]',...
                                    'X Axis Amplitude [m/s^2]',...
                                    'Y Axis Amplitude [m/s^2]',...
                                    'Z Axis Amplitude [m/s^2]',...
                                    'Resultant Amplitude [m/s^2]'};

    if app.Check_box_velocity.Value==1
        app.Table_frequency.ColumnName={'Point Nº',...
                                        'Frequency [Hz]',...
                                        'X Axis Amplitude [m/s]',...
                                        'Y Axis Amplitude [m/s]',...
                                        'Z Axis Amplitude [m/s]',...
                                        'Resultant Amplitude [m/s]'};
    end

    elseif app.Check_box_displacement.Value==1
        app.Table_frequency.ColumnName={'Point Nº',...
                                        'Frequency [Hz]',...
                                        'X Axis Amplitude [m]',...
                                        'Y Axis Amplitude [m]',...
                                        'Z Axis Amplitude [m]',...
                                        'Resultant Amplitude [m]'};
    end

    app.Edit_field_max_x_table_frequency.Value=...
        max(amplitude_x_freq_graph);
    app.Edit_field_max_y_table_frequency.Value=...
        max(amplitude_y_freq_graph);
    app.Edit_field_max_z_table_frequency.Value=...
        max(amplitude_z_freq_graph);
    app.Edit_field_max_r_table_frequency.Value=...
        max(amplitude_resultant_freq_graph);
    app.Edit_field_nf_table_frequency.Value=...
        length(frequency_samples);
    app.Edit_field_max_f_table_frequency.Value=...
        max(frequency_samples);

    catch
        %Security
        warndlg(['The interval for the FFT (star + end), cannot' ...
                ' exceed the Nº of time samples (see time domain' ...
                ' graphs or table).'],'Warning!','non-modal')
    end

    %Active the default button
    app.Button_default_frequency.Enable='on';

    %Activate the cut parameters table
    app.Panel_cut_parameters.Enable='on';

    %Mark on the time domain of the interval of the FFT
    xline(app.Graph_x_time,...
          app.Edit_field_start_reading_frequency.Value,'-',...
          'labelOrientation','horizontal','linewidth',1.5);
    xline(app.Graph_x_time,...
          app.Edit_field_end_reading_frequency.Value,'-',...
          'labelOrientation','horizontal','linewidth',1.5);
    xline(app.Graph_y_time,...
          app.Edit_field_start_reading_frequency.Value,'-',...
          'labelOrientation','horizontal','linewidth',1.5);
    xline(app.Graph_y_time,...
          app.Edit_field_end_reading_frequency.Value,'-',...
          'labelOrientation','horizontal','linewidth',1.5);
    xline(app.Graph_z_time,...
          app.Edit_field_start_reading_frequency.Value,'-',...
          'labelOrientation','horizontal','linewidth',1.5);
    xline(app.Graph_z_time,...
          app.Edit_field_end_reading_frequency.Value,'-',...
          'labelOrientation','horizontal','linewidth',1.5);
    xline(app.Graph_resultant_time,...
          app.Edit_field_start_reading_frequency.Value,'-',...
          'labelOrientation','horizontal','linewidth',1.5);
    xline(app.Graph_resultant_time,...
          app.Edit_field_end_reading_frequency.Value,'-',...
          'labelOrientation','horizontal','linewidth',1.5);
end
```

Código de ajuste dos eixos dos gráficos no domínio da frequência.

```

function Button_adust_axes_frequencyButtonPushed(app, event)
    try
        %Call of the funtion that preforms the FFT and with the...
        %axes limits
        [xmax_frequency,xmin_frequency,...
        ymax_frequency,ymin_frequency] =...
        graph_axes_frequency(app);
        [frequency_samples,...
        amplitude_x_freq_graph,...
        amplitude_y_freq_graph,...
        amplitude_z_freq_graph,...
        amplitude_resultant_freq_graph] = tranform_FFT(app);

        new_samples_frequency=...
        frequency_samples(xmin_frequency:xmax_frequency);
        new_amplitude_x_freq_graph=...
        amplitude_x_freq_graph...
        (xmin_frequency:xmax_frequency);
        new_amplitude_y_freq_graph=...
        amplitude_y_freq_graph...
        (xmin_frequency:xmax_frequency);
        new_amplitude_z_freq_graph=...
        amplitude_z_freq_graph...
        (xmin_frequency:xmax_frequency);
        new_amplitude_resultant_freq_graph=...
        amplitude_resultant_freq_graph...
        (xmin_frequency:xmax_frequency);
    catch
    end

    %All
    if app.CheckBox_amplitude_all_frequency.Value==1
        try
            axis(app.Graph_x_frequency,[new_samples_frequency(1)...
            new_samples_frequency(end)]...
            ymin_frequency ymax_frequency)
            axis(app.Graph_y_frequency,[new_samples_frequency(1)...
            new_samples_frequency(end)]...
            ymin_frequency ymax_frequency)
            axis(app.Graph_z_frequency,[new_samples_frequency(1)...
            new_samples_frequency(end)]...
            ymin_frequency ymax_frequency)
            axis(app.Graph_resultant_frequency,...
            [new_samples_frequency(1)...
            new_samples_frequency(end)]...
            ymin_frequency ymax_frequency)
            app.Edit_field_max_x_frequency.Value=...
            max(new_amplitude_x_freq_graph);
            app.Edit_field_max_y_frequency.Value=...
            max(new_amplitude_y_freq_graph);
            app.Edit_field_max_z_frequency.Value=...
            max(new_amplitude_z_freq_graph);
            app.Edit_field_max_resultant_frequency.Value=...
            max(new_amplitude_resultant_freq_graph);
        catch
        end
    end

    %X axis
    if app.CheckBox_amplitude_x_frequency.Value==1
        try
            axis(app.Graph_x_frequency,[new_samples_frequency(1)...
            new_samples_frequency(end)]...
            ymin_frequency ymax_frequency)
            app.Edit_field_max_x_frequency.Value=...
            max(new_amplitude_x_freq_graph);
        catch
        end
    end

    %Y axis
    if app.CheckBox_amplitude_y_frequency.Value==1
        try
            axis(app.Graph_y_frequency,[new_samples_frequency(1)...
            new_samples_frequency(end)]...
            ymin_frequency ymax_frequency)
            app.Edit_field_max_y_frequency.Value=...
            max(new_amplitude_y_freq_graph);
        catch
        end
    end

    %Z axis
    if app.CheckBox_amplitude_z_frequency.Value==1
        try
            axis(app.Graph_z_frequency,[new_samples_frequency(1)...
            new_samples_frequency(end)]...
            ymin_frequency ymax_frequency)
            app.Edit_field_max_z_frequency.Value=...
            max(new_amplitude_z_freq_graph);
        catch
        end
    end

    %Resultant
    if app.CheckBox_amplitude_resultant_frequency.Value==1
        try
            axis(app.Graph_resultant_frequency,...
            [new_samples_frequency(1)...
            new_samples_frequency(end)]...
            ymin_frequency ymax_frequency)
            app.Edit_field_max_resultant_frequency.Value=...
            max(new_amplitude_resultant_freq_graph);
        catch
        end
    end
end

```

*Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075.
Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem*

Código para a predefinição dos eixos dos gráficos no domínio da frequência.

```
function Button_default_frequencyButtonPushed(app, event)
try
% Call of the function with frequency data
[~,...
amplitude_x_freq_graph,...
amplitude_y_freq_graph,...
amplitude_z_freq_graph,...
amplitude_resultant_freq_graph] = transform_FFT(app);
catch
end

%All
if app.CheckBox_amplitude_all_frequency.Value==1
axis(app.Graph_x_frequency,'auto')
axis(app.Graph_y_frequency,'auto')
axis(app.Graph_z_frequency,'auto')
axis(app.Graph_resultant_frequency,'auto')
app.CheckBox_amplitude_all_frequency.Value=0;
try
app.Edit_field_max_x_frequency.Value=...
max(amplitude_x_freq_graph);
app.Edit_field_max_y_frequency.Value=...
max(amplitude_y_freq_graph);
app.Edit_field_max_z_frequency.Value=...
max(amplitude_z_freq_graph);
app.Edit_field_max_resultant_frequency.Value=...
max(amplitude_resultant_freq_graph);
catch
end
end

%All
if app.CheckBox_amplitude_all_frequency.Value==1
axis(app.Graph_x_frequency,'auto')
axis(app.Graph_y_frequency,'auto')
axis(app.Graph_z_frequency,'auto')
axis(app.Graph_resultant_frequency,'auto')
app.CheckBox_amplitude_all_frequency.Value=0;
try
app.Edit_field_max_x_frequency.Value=...
max(amplitude_x_freq_graph);
app.Edit_field_max_y_frequency.Value=...
max(amplitude_y_freq_graph);
app.Edit_field_max_z_frequency.Value=...
max(amplitude_z_freq_graph);
app.Edit_field_max_resultant_frequency.Value=...
max(amplitude_resultant_freq_graph);
catch
end
end

%X axis
if app.CheckBox_amplitude_x_frequency.Value==1
axis(app.Graph_x_frequency,'auto')
app.CheckBox_amplitude_x_frequency.Value=0;
try
app.Edit_field_max_x_frequency.Value=...
max(amplitude_x_freq_graph);
catch
end
end

%Y axis
if app.CheckBox_amplitude_y_frequency.Value==1
axis(app.Graph_y_frequency,'auto')
app.CheckBox_amplitude_y_frequency.Value=0;
try
app.Edit_field_max_y_frequency.Value=...
max(amplitude_y_freq_graph);
catch
end
end

%Z axis
if app.CheckBox_amplitude_z_frequency.Value==1
axis(app.Graph_z_frequency,'auto')
app.CheckBox_amplitude_z_frequency.Value=0;
try
app.Edit_field_max_z_frequency.Value=...
max(amplitude_z_freq_graph);
catch
end
end

%Resultant
if app.CheckBox_amplitude_resultant_frequency.Value==1
axis(app.Graph_resultant_frequency,'auto')
app.CheckBox_amplitude_resultant_frequency.Value=0;
try
app.Edit_field_max_resultant_frequency.Value=...
max(amplitude_resultant_freq_graph);
catch
end
end
end
```

Código para ativar ou desativar a grelha dos gráficos no domínio da frequência.

```
function Button_grid_frequencyValueChanged(app, event)
    if app.Button_grid_frequency.Value==1
        grid(app.Graph_x_frequency, 'on')
        grid(app.Graph_y_frequency, 'on')
        grid(app.Graph_z_frequency, 'on')
        grid(app.Graph_resultant_frequency, 'on')
    else
        grid(app.Graph_x_frequency, 'off')
        grid(app.Graph_y_frequency, 'off')
        grid(app.Graph_z_frequency, 'off')
        grid(app.Graph_resultant_frequency, 'off')
    end
end
```

Código da *check box* de escolha do gráfico a ajustar os eixos no domínio da frequência: a) eixo X; b) eixo Y; c) eixo Z; d) Resultante; d) todos.

```
function CheckBox_amplitude_x_frequencyValueChanged(app, event)
    if app.CheckBox_amplitude_x_frequency.Value==1
        app.CheckBox_amplitude_all_frequency.Value=0;
    end
end
```

a)

```
function CheckBox_amplitude_y_frequencyValueChanged(app, event)
    if app.CheckBox_amplitude_y_frequency.Value==1
        app.CheckBox_amplitude_all_frequency.Value=0;
    end
end
```

b)

```
function CheckBox_amplitude_z_frequencyValueChanged(app, event)
    if app.CheckBox_amplitude_z_frequency.Value==1
        app.CheckBox_amplitude_all_frequency.Value=0;
    end
end
```

c)

```
function CheckBox_amplitude_resultant_frequencyValueChanged(app, event)
    if app.CheckBox_amplitude_resultant_frequency.Value==1
        app.CheckBox_amplitude_all_frequency.Value=0;
    end
end
```

d)

```
function CheckBox_amplitude_all_frequencyValueChanged(app, event)
    if app.CheckBox_amplitude_all_frequency.Value==1
        app.CheckBox_amplitude_resultant_frequency.Value=0;
        app.CheckBox_amplitude_x_frequency.Value=0;
        app.CheckBox_amplitude_y_frequency.Value=0;
        app.CheckBox_amplitude_z_frequency.Value=0;
    end
end
```

d)

Código para guardar os dados na tabela no domínio do tempo.

```
function Button_save_table_timeButtonPushed(app, event)
    if isempty(app.Table_time.Data)
        msgbox(['A Tabela auxiliar de Tempo não contém dados.' ...
            ' Atualize primeiro os Gráficos no Domínio' ...
            ' do Tempo e a Tabela.'])
    else
        try
            [ficheiro_frequencia,caminho_frequencia]=...
                uinputfile('.xlsx','Guardar dados Tempo');
            ficheiro_exportar=fullfile(caminho_frequencia,...
                ficheiro_frequencia);
            writecell(app.Table_frequency.ColumnName.',...
                ficheiro_exportar,'AutoFitWidth',true)
            writematrix(app.Table_frequency.Data,ficheiro_exportar,...
                'WriteMode','append')
        catch
        end
    end
end
```

Código para guardar os dados na tabela no domínio da frequência.

```
function Button_save_table_frequencyButtonPushed(app, event)
    if isempty(app.Table_frequency.Data)
        msgbox(['A Tabela auxiliar de FFT não contém dados.' ...
            ' Atualize primeiro os Gráficos no Domínio' ...
            ' da Frequência e a Tabela.'])
    else
        try
            [ficheiro_frequencia,caminho_frequencia]=...
                uinputfile('.xlsx','Guardar dados FFT');
            ficheiro_exportar=fullfile(caminho_frequencia,...
                ficheiro_frequencia);
            writecell(app.Table_frequency.ColumnName.',...
                ficheiro_exportar,'AutoFitWidth',true)
            writematrix(app.Table_frequency.Data,ficheiro_exportar,...
                'WriteMode','append')
        catch
        end
    end
end
```

Código das *check box* para escolha da unidade de representação dos dados:

a) aceleração não filtrada; b) aceleração; c) velocidade; d) deslocamento.

```
function Check_box_acceleration_non_filteredValueChanged(app, event)
    if app.Check_box_acceleration_non_filtered.Value==1
        app.Check_box_acceleration_non_filtered_2.Value=1;
        app.Check_box_acceleration.Value=0;
        app.Check_box_acceleration_2.Value=0;
        app.Check_box_velocity.Value=0;
        app.Check_box_velocity_2.Value=0;
        app.Check_box_displacement.Value=0;
        app.Check_box_displacement_2.Value=0;
        app.Panel_butter.Enable='off';
        app.Panel_butter_2.Enable='off';
    end
    clean_2(app);
end
```

a)

```
function Check_box_accelerationValueChanged(app, event)
    if app.Check_box_acceleration.Value==1
        app.Check_box_acceleration_2.Value=1;
        app.Check_box_acceleration_non_filtered.Value=0;
        app.Check_box_acceleration_non_filtered_2.Value=0;
        app.Check_box_velocity.Value=0;
        app.Check_box_velocity_2.Value=0;
        app.Check_box_displacement.Value=0;
        app.Check_box_displacement_2.Value=0;
        app.Panel_butter.Enable='on';
        app.Panel_butter_2.Enable='on';
    end
    clean_2(app);
end
```

b)

```
function Check_box_velocityValueChanged(app, event)
    if app.Check_box_velocity.Value==1
        app.Check_box_velocity_2.Value=1;
        app.Check_box_acceleration_non_filtered.Value=0;
        app.Check_box_acceleration_non_filtered_2.Value=0;
        app.Check_box_acceleration.Value=0;
        app.Check_box_acceleration_2.Value=0;
        app.Check_box_displacement.Value=0;
        app.Check_box_displacement_2.Value=0;
        app.Panel_butter.Enable='on';
        app.Panel_butter_2.Enable='on';
    end
    clean_2(app);
end
```

c)

```
function Check_box_displacementValueChanged(app, event)
    if app.Check_box_displacement.Value==1
        app.Check_box_displacement_2.Value=1;
        app.Check_box_acceleration_non_filtered.Value=0;
        app.Check_box_acceleration_non_filtered_2.Value=0;
        app.Check_box_velocity.Value=0;
        app.Check_box_velocity_2.Value=0;
        app.Check_box_acceleration_2.Value=0;
        app.Check_box_acceleration_2.Value=0;
        app.Panel_butter.Enable='on';
        app.Panel_butter_2.Enable='on';
    end
    clean_2(app);
end
```

d)

Código para atualização do fim da FFT.

```
function Drop_down_comp_frequencyValueChanged(app, event)
    end_of_reading=...
    app.Edit_field_start_reading_frequency.Value+...
    str2double(app.Drop_down_comp_frequency.Value);
    app.Edit_field_end_reading_frequency.Value=end_of_reading;
end
```

Código para igualar valores nas *tabs* do domínio do tempo e da frequência:

a) ordem do filtro *butterworth*; b) nome do ficheiro.

```
function Drop_down_orderValueChanged(app, event)
    app.Drop_down_order_2.Value=...
    app.Drop_down_order.Value;
end
```

a)

```
function Drop_down_order_2ValueChanged(app, event)
    app.Drop_down_order.Value=...
    app.Drop_down_order_2.Value;
end
```

```
function Edit_field_file_name_timeValueChanged(app, event)
    app.Edit_field_filename_2.Value=...
    app.Edit_field_file_name_time.Value;
end
```

b)

```
function Edit_field_filename_2ValueChanged(app, event)
    app.Edit_field_file_name_time.Value=...
    app.Edit_field_filename_2.Value;
end
```

Código de segurança para o mínimo do ajuste do eixo horizontal no domínio do tempo.

```
function Edit_field_axis_horizontal_min_timeValueChanged(app, event)
    %Security
    if app.Edit_field_axis_horizontal_min_time.Value>=...
        app.Edit_field_axis_horizontal_max_time.Value ||...
        app.Edit_field_axis_horizontal_min_time.Value<1
        app.Button_adjust_axes_time.Enable='off';
    else
        app.Button_adjust_axes_time.Enable='on';
    end

    if app.Edit_field_axis_horizontal_min_time.Value>=...
        app.Edit_field_axis_horizontal_max_time.Value
        app.Edit_field_axis_horizontal_min_time.BackgroundColor='r';
        app.Edit_field_axis_horizontal_max_time.BackgroundColor='r';
        errordlg(['The maximum value should be greater than' ...
            ' the minimum.'],'Error!','non-modal')
    elseif app.Edit_field_axis_horizontal_min_time.Value<1
        app.Edit_field_axis_horizontal_min_time.BackgroundColor='r';
        errordlg(['The minimum value of the X axis should be' ...
            ' greater than or equal to 1.'],'Error!','non-modal')
    else
        app.Edit_field_axis_horizontal_min_time.BackgroundColor='w';
        app.Edit_field_axis_horizontal_max_time.BackgroundColor='w';
    end
end
```

Código de segurança para o máximo do ajuste do eixo horizontal no domínio do tempo.

```
function Edit_field_axis_horizontal_max_timeValueChanged(app, event)
%Security
try
[time_samples,~,...
~,~,...
~] = vectors_with_time_values(app);
maximum=length(time_samples);
catch
maximum=inf;
end

if app.Edit_field_axis_horizontal_min_time.Value>=...
app.Edit_field_axis_horizontal_max_time.Value ||...
app.Edit_field_axis_horizontal_max_time.Value>...
maximum ||...
app.Edit_field_axis_horizontal_max_time.Value<1
app.Button_adjust_axes_time.Enable='off';
else
app.Button_adjust_axes_time.Enable='on';
end

if app.Edit_field_axis_horizontal_min_time.Value>=...
app.Edit_field_axis_horizontal_max_time.Value
app.Edit_field_axis_horizontal_min_time.BackgroundColor='r';
app.Edit_field_axis_horizontal_max_time.BackgroundColor='r';
errordlg(['The maximum value should be greater than' ...
' the minimum.'],'Error!','non-modal');
elseif app.Edit_field_axis_horizontal_max_time.Value>...
maximum
app.Edit_field_axis_horizontal_max_time.BackgroundColor='r';
errordlg(['the maximum value cannot exceed the Nº of time' ...
' samples (see auxiliary table of the time domain)', ...
'Error!','non-modal'])

elseif app.Edit_field_axis_horizontal_max_time.Value>...
maximum
app.Edit_field_axis_horizontal_max_time.BackgroundColor='r';
errordlg(['the maximum value cannot exceed the Nº of time' ...
' samples (see auxiliary table of the time domain)', ...
'Error!','non-modal'])
elseif app.Edit_field_axis_horizontal_max_time.Value<1
app.Edit_field_axis_horizontal_max_time.BackgroundColor='r';
errordlg(['The maximum value of the X Axis should be' ...
' greater than or equal to 1'],'Error!','non-modal')
else
app.Edit_field_axis_horizontal_min_time.BackgroundColor='w';
app.Edit_field_axis_horizontal_max_time.BackgroundColor='w';
end
end
```

Código de segurança para o mínimo e máximo do ajuste do eixo vertical no domínio do tempo.

```
function Edit_field_axis_vertical_min_timeValueChanged(app, event)
%Security
if app.Edit_field_axis_vertical_min_time.Value>=...
    app.Edit_field_axis_vertical_max_time.Value
    app.Edit_field_axis_vertical_min_time.BackgroundColor=...
        'r';
    app.Edit_field_axis_vertical_max_time.BackgroundColor=...
        'r';
    app.Button_adjust_axes_time.Enable='off';
    errordlg(['The maximum value should be greater than the' ..
        ' minimum.'],'Error!','non-modal')
else
    app.Edit_field_axis_vertical_min_time.BackgroundColor=...
        'w';
    app.Edit_field_axis_vertical_max_time.BackgroundColor=...
        'w';
    app.Button_adjust_axes_time.Enable='on';
end
end
```

Código de segurança para o mínimo do ajuste do eixo horizontal no domínio da frequência.

```
function Edit_field_eixo_min_horizontal_frequencyValueChanged(app, event)
%Security
if app.Edit_field_eixo_min_horizontal_frequency.Value>=...
    app.Edit_field_eixo_max_horizontal_frequency.Value ||...
    app.Edit_field_eixo_min_horizontal_frequency.Value<0
    app.Button_adjust_axes_time.Enable='off';
else
    app.Button_adust_axes_frequency.Enable='on';
end

if app.Edit_field_eixo_min_horizontal_frequency.Value>=...
    app.Edit_field_eixo_max_horizontal_frequency.Value
    app.Edit_field_eixo_min_horizontal_frequency.BackgroundColor='r';
    app.Edit_field_eixo_max_horizontal_frequency.BackgroundColor='r';
    errordlg(['The maximum value should be greater than the' ...
        ' minimum.'],'Error!','non-modal')
elseif app.Edit_field_eixo_min_horizontal_frequency.Value<0
    app.Edit_field_eixo_min_horizontal_frequency.BackgroundColor='r';
    errordlg(['The minimum value of the X axis should be' ...
        ' greater than or equal to 0.'],'Error!','non-modal')
else
    app.Edit_field_eixo_min_horizontal_frequency.BackgroundColor='w';
    app.Edit_field_eixo_max_horizontal_frequency.BackgroundColor='w';
end
end
```

Código de segurança para o máximo do ajuste do eixo horizontal no domínio da frequência.

```
function Edit_field_eixo_max_horizontal_frequencyValueChanged(app, event)
    %Security
    try
        [frequency_samples,...
         ~,...
         ~,...
         ~,...
         ~] = transform_FFT(app);

        maximum=length(frequency_samples);
        catch
            maximum=inf;
        end

        if app.Edit_field_eixo_min_horizontal_frequency.Value>=...
            app.Edit_field_eixo_max_horizontal_frequency.Value ||...
            app.Edit_field_eixo_max_horizontal_frequency.Value>...
            maximum ||...
            app.Edit_field_axis_horizontal_max_time.Value<0
            app.Button_adust_axes_frequency.Enable='off';
        else
            app.Button_adust_axes_frequency.Enable='on';
        end

        if app.Edit_field_eixo_min_horizontal_frequency.Value>=...
            app.Edit_field_eixo_max_horizontal_frequency.Value
            app.Edit_field_eixo_min_horizontal_frequency.BackgroundColor='r';
            app.Edit_field_eixo_max_horizontal_frequency.BackgroundColor='r';
            errordlg(['The maximum value should be greater than the' ...
                    ' minimum.'],'Error!','non-modal')

        elseif app.Edit_field_eixo_max_horizontal_frequency.Value>...
            maximum
            app.Edit_field_eixo_max_horizontal_frequency.BackgroundColor='r';
            errordlg(['The maximum value cannot exceed the Nº of points' ...
                    ' of the FFT (see frequency domain auxiliary table)', ...
                    'Error!','non-modal'])
        elseif app.Edit_field_eixo_max_horizontal_frequency.Value<0
            app.Edit_field_eixo_max_horizontal_frequency.BackgroundColor='r';
            errordlg(['The maximum value of the X axis should be' ...
                    ' greater than or equal to 0.'],'Error!','non-modal')
        else
            app.Edit_field_eixo_min_horizontal_frequency.BackgroundColor='w';
            app.Edit_field_eixo_max_horizontal_frequency.BackgroundColor='w';
        end
    end
end
```

Código de segurança para o mínimo e máximo do ajuste do eixo vertical no domínio da frequência.

```
function Edit_field_axis_min_vertical_frequencyValueChanged(app, event)
%Security
if app.Edit_field_axis_min_vertical_frequency.Value>=...
    app.Edit_field_axis_max_vertical_frequency.Value
    app.Edit_field_axis_min_vertical_frequency.BackgroundColor=...
    'r';
    app.Edit_field_axis_max_vertical_frequency.BackgroundColor=...
    'r';
    app.Button_adust_axes_frequency.Enable='off';
    errordlg(['The maximum value should be greater than the' ...
        ' minimum.'],'Error!','non-modal')
else
    app.Edit_field_axis_min_vertical_frequency.BackgroundColor=...
    'w';
    app.Edit_field_axis_max_vertical_frequency.BackgroundColor=...
    'w';
    app.Button_adust_axes_frequency.Enable='on';
end
end
```

Código de segurança para o ponto inicial para realizar a FFT.

```
function Edit_field_start_reading_frequencyValueChanged(app, event)
%Security
if app.Edit_field_start_reading_frequency.Value<1
    app.Edit_field_start_reading_frequency.BackgroundColor=...
    'r';
    app.Button_update_graphs_frequency.Enable='off';
    errordlg(['The star of the reading should be' ...
        ' greater than or equal to 1.'],'Error!','non-modal')
else
    app.Edit_field_start_reading_frequency.BackgroundColor=...
    'w';
    app.Button_update_graphs_frequency.Enable='on';
end

fim_da_leitura=...
    app.Edit_field_start_reading_frequency.Value+...
    str2double(app.Drop_down_comp_frequency.Value);
    app.Edit_field_end_reading_frequency.Value=fim_da_leitura;
end
```

Código de segurança para a frequência de aquisição.

```
function Edit_field_acquisition_freqValueChanged(app, event)
    app.Edit_field_acquisition_freq_2.Value=...
    app.Edit_field_acquisition_freq.Value;
    app.Edit_field_frequency.Value=...
    app.Edit_field_acquisition_freq.Value;

    %Security
    if app.Edit_field_acquisition_freq.Value<=0 ||...
        app.Edit_field_cut_freq.Value>=...
        app.Edit_field_acquisition_freq.Value/2
        app.Button_update_graphs_time.Enable='off';
        app.Button_update_graphs_frequency.Enable='off';
    else
        app.Button_update_graphs_time.Enable='on';
        app.Button_update_graphs_frequency.Enable='on';
    end

    if app.Edit_field_acquisition_freq.Value<=0
        app.Edit_field_acquisition_freq.BackgroundColor='r';
        app.Edit_field_acquisition_freq_2.BackgroundColor='r';
        errordlg(['The value of the acquisition frequency should' ...
            ' be greater than 0.'],'Error!','non-modal');
    elseif app.Edit_field_cut_freq.Value>=...
        app.Edit_field_acquisition_freq.Value/2
        app.Edit_field_acquisition_freq.BackgroundColor='r';
        app.Edit_field_acquisition_freq_2.BackgroundColor='r';
        app.Edit_field_cut_freq.BackgroundColor='r';
        app.Edit_field_cut_freq_2.BackgroundColor='r';
        errordlg(['The value of half of the acquisition frequency' ...
            'should be greater than the cut-off frequency.'],...
            'Error!','non-modal');

    elseif app.Edit_field_cut_freq.Value>=...
        app.Edit_field_acquisition_freq.Value/2
        app.Edit_field_acquisition_freq.BackgroundColor='r';
        app.Edit_field_acquisition_freq_2.BackgroundColor='r';
        app.Edit_field_cut_freq.BackgroundColor='r';
        app.Edit_field_cut_freq_2.BackgroundColor='r';
        errordlg(['The value of half of the acquisition frequency' ...
            'should be greater than the cut-off frequency.'],...
            'Error!','non-modal');
    else
        app.Edit_field_acquisition_freq.BackgroundColor='w';
        app.Edit_field_acquisition_freq_2.BackgroundColor='w';
        app.Edit_field_cut_freq.BackgroundColor='w';
        app.Edit_field_cut_freq_2.BackgroundColor='w';
    end
end
```

Código de segurança para a frequência de corte para o filtro *butterworth*.

```
function Edit_field_cut_freqValueChanged(app, event)
    app.Edit_field_cut_freq_2.Value=...
    app.Edit_field_cut_freq.Value;

    %Security
    if app.Edit_field_cut_freq.Value<=0 ||...
        app.Edit_field_cut_freq.Value>=...
        app.Edit_field_acquisition_freq.Value/2
        app.Button_update_graphs_time.Enable='off';
        app.Button_update_graphs_frequency.Enable='off';
    else
        app.Button_update_graphs_time.Enable='on';
        app.Button_update_graphs_frequency.Enable='on';
    end

    if app.Edit_field_cut_freq.Value<=0
        app.Edit_field_cut_freq.BackgroundColor='r';
        app.Edit_field_cut_freq_2.BackgroundColor='r';
        errordlg(['The value of the cut-off frequency should be ' ...
            ' greater than 0.'],'Error!','non-modal');
    elseif app.Edit_field_cut_freq.Value>=...
        app.Edit_field_acquisition_freq.Value/2
        app.Edit_field_acquisition_freq.BackgroundColor='r';
        app.Edit_field_acquisition_freq_2.BackgroundColor='r';
        app.Edit_field_cut_freq.BackgroundColor='r';
        app.Edit_field_cut_freq_2.BackgroundColor='r';
        errordlg(['The value of half of the acquisition frequency' ...
            'should be greater than the cut-off frequency.'],...
            'Error!','non-modal');

    else
        app.Edit_field_acquisition_freq.BackgroundColor='w';
        app.Edit_field_acquisition_freq_2.BackgroundColor='w';
        app.Edit_field_cut_freq.BackgroundColor='w';
        app.Edit_field_cut_freq_2.BackgroundColor='w';
    end
end
```

Código para a inserção dos valores de frequências para o filtro de *bandstop* na tabela respectiva.

```
function ButtonPushed(app, event)
    writematrix([app.Edit_field_RMS_x_time.Value...
        app.Edit_field_RMS_y_time.Value...
        app.Edit_field_RMS_z_time.Value...
        app.Edit_field_RMS_resultant_time.Value]...
        , 'Tab.xlsx', 'WriteMode', 'append')
end
```

Código para inserção dos títulos na tabela do filtro de *bandstop*.

```
function Button_addButtonPushed(app, event)
    table_line=[app.Edit_field_cut_frequency.Value...
        ,app.Edit_field_lowerv.Value...
        ,app.Edit_field_upperv.Value];
    app.Table_cut.ColumnNames=...
        {'Cut frequencies','Lower cut','Upper cut'};
    app.Table_cut.Data=[app.Table_cut.Data;table_line];
end
```

Código para fazer o *reset* da tabela do filtro de *bandstop*.

```
function Button_resetButtonPushed(app, event)
    app.Table_cut.Data=[];
    app.Table_cut.ColumnName=({'1','2','3'});
end
```

Código de segurança para a frequência de corte do filtro de *bandstop*.

```
function Edit_field_cut_frequencyValueChanged(app, event)
%Securiry
if app.Edit_field_cut_frequency.Value<=...
    app.Edit_field_lowerv.Value
    app.Edit_field_cut_frequency.BackgroundColor='r';
    app.Edit_field_lowerv.BackgroundColor='r';
    app.Button_add.Enable='off';
    errordlg([' The cut frequency should be greater then the' ...
        ' the lower limit of the cut'],'Error!','non-modal');
else
    app.Edit_field_cut_frequency.BackgroundColor='w';
    app.Edit_field_lowerv.BackgroundColor='w';
    app.Button_add.Enable='on';
end

if app.Edit_field_cut_frequency.Value>=...
    app.Edit_field_upperv.Value
    app.Edit_field_cut_frequency.BackgroundColor='r';
    app.Edit_field_upperv.BackgroundColor='r';
    app.Button_add.Enable='off';
    errordlg([' The cut frequency should be lower then the' ...
        ' the upper limit of the cut'],'Error!','non-modal');
else
    app.Edit_field_cut_frequency.BackgroundColor='w';
    app.Edit_field_upperv.BackgroundColor='w';
    app.Button_add.Enable='on';
end
end
```

Código de segurança para a frequência inferior do filtro de *bandstop*.

```
function Edit_field_lowervValueChanged(app, event)
%Securiry
if app.Edit_field_cut_frequency.Value<=...
    app.Edit_field_lowerv.Value
    app.Edit_field_cut_frequency.BackgroundColor='r';
    app.Edit_field_lowerv.BackgroundColor='r';
    app.Button_add.Enable='off';
    errordlg([' The cut frequency should be greater then the' ...
        ' the lower limit of the cut'],'Error!','non-modal');
else
    app.Edit_field_cut_frequency.BackgroundColor='w';
    app.Edit_field_lowerv.BackgroundColor='w';
    app.Button_add.Enable='on';
end
end
```

Código de segurança para a frequência superior do filtro de *bandstop*.

```
function Edit_field_upperValueChanged(app, event)
%Securiry
if app.Edit_field_cut_frequency.Value>=...
    app.Edit_field_upper.Value
    app.Edit_field_cut_frequency.BackgroundColor='r';
    app.Edit_field_upper.BackgroundColor='r';
    app.Button_add.Enable='off';
    errordlg([' The cut frequency should be lower then the' ...
        ' the upper limit of the cut'],'Error!','non-modal');
else
    app.Edit_field_cut_frequency.BackgroundColor='w';
    app.Edit_field_upper.BackgroundColor='w';
    app.Button_add.Enable='on';
end
end
```

Código da mensagem de ajuda dos gráficos no domínio do tempo.

```
function Button_help_graphs_timeButtonPushed(app, event)
msgbox(['The present graphs indicate the amplitude of' ...
    ' vibration in the time domain, on the X, Y, Z axes' ...
    ' and its Resultant (3 Axes).''Under each' ...
    ' graph is shown the maximum value,' ...
    ' minimum value and RMS (effective value that indicates the destructive' ...
    ' capacity of vibrations), within the temporal ccale' ...
    ' displayed on the graphs. The Scale of the various graphs'...
    ' can be adjusted independently from the '...
    ' Adjust Axes panel'],'Help (graphs).','non-modal')
end
```

Código da mensagem de ajuda de ajuste dos gráficos no domínio do tempo.

```
function Button_help_axes_timeButtonPushed(app, event)
msgbox(['You must enter the minimum and maximum value of the' ...
    ' axes extremes that you want. It should be noted that:' ...
    ' ...
    '- The maximum value cannot be less than or equal to' ...
    ' the minimum value;' ...
    ' ...
    '- The minimum value of the X axis must be equal or greater' ...
    ' than 1;' ...
    ' ...
    '- The program is prepared not to let the user adjust the' ...
    ' axes if there are errors (red color and error warnings.' ...
    ' ...
    'To adjust the desired graph the respective Check Box to' ...
    ' it must be selected.' ...
    ' ...
    'The Adjust Axes button finnaly makes the adjustment when' ...
    ' pressed.' ...
    ' ...
    'The Default button restores the originals values.' ...
    ' ...
    'The Grid button turns on the graphs grid on and off.'],...
    'Help (adjust axes graphs).','non-modal')
end
```

Código da mensagem de ajuda para carregar dados no domínio do tempo.

```
function Button_help_data_timeButtonPushed(app, event)
    msgbox(['You must press the Load Data button.' ...
        'The button being pressed allows ther user to import' ...
        ' data from an excel file at choice.' ...
        'The button Load Data allows you to update the graphics' ...
        ' only if a file is chosen.'...
        'If no file is selected, it appears a warning message' ...
        ' indicating taht a selection is needed.' ...
        'To save the image of a graph you must put the cursor' ...
        ' in the upper righth corner of the graph, and choose' ...
        ' the file type to save the graph (only works if the' ...
        ' graph has information.' ...
        'The user can still select which units to use in the' ...
        ' analysis of the vibration amplitude, trthrough the' ...
        ' various checks boxes.'], 'Help (data and graphs).', 'non-modal')
end
```

Código da mensagem de ajuda dos gráficos no domínio da frequência.

```
function Button_help_graph_frequencyButtonPushed(app, event)
    msgbox(['The present graphs indicate the amplitude of' ...
        ' vibration in the frequency domain, on the X, Y, Z axes' ...
        ' and its Resultant (3 Axes). Under each' ...
        ' graph is shown the maximum value,' ...
        ' within the scale in frequency' ...
        ' displayed on the graphs. The scale of the various graphs' ...
        ' can be adjusted independently' ...
        ' from the Adjust Axes panel.'...
        'The scale displayed by default on the X' ...
        ' axis of the various graphs (Frequency [Hz])' ...
        ' is half the value of the' ...
        ' frequency entered in Data for FFT due' ...
        ' to its algorithm.'], 'Help (graphs).', 'non-modal')
end
```

Código da mensagem de ajuda de ajuste dos gráficos no domínio da frequência.

```
function Button_help_adjust_axes_frequencyButtonPushed(app, event)
    msgbox(['You must enter the minimum and maximum value of the ' ...
        ' extremes of the axes you want. It should be noted that: ' ...
        '- The maximum value of the extremum cannot be less than or equal to' ...
        ' to the minimum;' ...
        '- The minimum value of the X axis (of the graphs) must be equal to' ...
        ' or greater than 1;' ...
        '- The interval to be chosen on the X axis (of the graphs) is one' ...
        ' range of points to which corresponds a range of' ...
        ' frequencies (the table with values in the frequency domain' ...
        ' must be analyzed for choosing the correct range;' ...
        '- The program is prepared not to let adjust the ' ...
        ' axes if there are errors (red color and error warnings).' ...
        'To adjust the desired graph to the respective Check Box' ...
        ' to it must be selected.' ...
        'The Adjust Axes button finally makes the adjustment when' ...
        ' pressed.' ...
        'The Default button restores the originals values.' ...
        'The Grid button turns the graphs grid on and off.'], ...
        'Help (adjust graphs axes).', 'non-modal')
end
```

Código da mensagem de ajuda para carregar dados no domínio da frequência.

```
function Button_help_data_frequencyButtonPushed(app, event)
    msgbox(['You must press the Load Data button.'...
        '
        'The button being pressed allows the user to' ...
        ' import data from an excel file of your choice.'...
        '
        'The button that allows you to update the graphics only' ...
        ' can be pressed if a file is chosen.'...
        '
        'If no file is selected, a warning message appears' ...
        ' indicating that a selection is needed.'...
        '
        'If the file is selected its name' ...
        ' is shown in the blank field.'...
        '
        'To Save the image of a Graph you must put' ...
        ' the cursor in the upper right corner of the graph and choose '...
        ' the file type to save the graph (only'...
        ' works if the graph has information).'...
        '
        'It is advisable to represent the graphics in the time' ...
        ' domain first to then understand which interval to apply'...
        ' the FFT (data for the FFT is entered in the field ' ...
        ' Data for Fast Fourier Transform)' ...
        '
        'The user can still select which units to use in the' ...
        ' analysis of the vibration amplitude, through the' ...
        ' various checks boxes.'], 'Help (data and graphs).', 'non-modal')
end
```

Código da mensagem de ajuda da FFT.

```
function Button_help_data_FFButtonPushed(app, event)
    msgbox(['You must enter the parameters to perform the FFT' ...
        ' and get the graphs in the Frequency Domain.'...
        ' The fields concern: ' ...
        '
        '- The range of frequencies to be represented, this being '...
        ' half of the amount indicated in the frequency field' ...
        ' to the FFT algorithm;'...
        '
        '- To the initial point (start of the reading) of the FFT with' ...
        ' respect to point on the time domain where you want to' ...
        ' start the FFT;'...
        '
        '- To the signal length that will translate into the '...
        ' number of points covered by the FFT. This must be'...
        ' an integer with base 2 and power n (2^n). Being' ...
        ' n an integer;'...
        '
        '- To the end point of the FFT (initial point +' ...
        ' signal length) which should never exceed '...
        ' number of temporal samples (the FFT is not performed)' ...
        ' - see time domain auxiliary table;'...
        '
        '- To the window used to avoid spectral leakage' ...
        ' when moving from the time domain to the frequency.'...
        ' The Hanning and Hamming window are the most common for'...
        ' most cases and have a good range compromise'...
        ' and reliable frequency. If the objective is the'...
        ' vibration amplitude the Flat Top Window should be use. If' ...
        ' you want the closest value of the frequency you can' ...
        ' use the Rectangular window.'],...
        'Help (fast fourier transform).', 'non-modal')
end
```

Código da mensagem de ajuda da tabela de dados no domínio do tempo.

```
function Button_help_table_timeButtonPushed(app, event)
    msgbox(['Table that shows time in Nº of samples' ...
        ' and the vibration amplitude on the X, Y, Z axes and '...
        ' Resultant, corresponding to each sample.'...
        '
        'Although the graphics allow adjustment' ...
        ' in the values to show, the table shows all the values'...
        ' collected.'], 'Help (time domain table).', 'non-modal')
end
```

Código da mensagem de ajuda da tabela de dados no domínio da frequência.

```
function Button_help_table_frequencyButtonPushed(app, event)
    msgbox(['The Table shows the frequencies and amplitude of' ...
        ' vibration on X, Y, Z and Resultant axes, corresponding'...
        ' at each frequency.' ...
        '
        'Although the Graphics allow adjustment in'...
        ' the values to show, the table shows all the values' ...
        ' generated by the FFT algorithm.'...
        '
        'It should be noted that the first point of this table does not' ...
        ' corresponds to the first point of the temporal dataset' ...
        ' and yes to the time point chosen to start the FFT.'], ...
        'Help (frequency domain table).','non-modal');
end
```

Código da mensagem de ajuda do filtro *butterworth*.

```
function Button_help_butterButtonPushed(app, event)
    msgbox(['The Butterworth filter is designed to be a' ...
        ' highpass filter in this case. So the user must enter' ...
        ' the cut-off frequency which below no frequency/data is' ...
        ' desired to analyze. The filter removes the noise and' ...
        ' distortion associated with those frequencies. In' ...
        ' short, the filter will only let frequencies above the' ...
        ' cut-off frequency to pass. The acquisition frequency' ...
        ' should be the same used to obtain data. Ther order' ...
        ' of the filter is associated whit its effectiveness.' ...
        ' The higher the order, greater the effectiveness.' ...
        '
        ' Neither the acquisition frequency or cut-off frequency' ...
        ' can be less or equal than 0. The cut-off frequency' ...
        ' cannot be equal or greater than: (acquisition frequency)/2.'], ...
        'Help (butterworth filter).','non-modal')
end
```

Código da mensagem de ajuda do filtro *bandstop*.

```
function Button_help_cutButtonPushed(app, event)
    msgbox(['- The Frequencies to cut tab is used to the user input' ...
        ' the frequencies that he wants to remove from the signal.' ...
        '
        ' - The user should introduce the range and the frequency' ...
        ' that we wants to remove then add them to the table (add button).' ...
        ' It can be introduced several frequencies. When the cut' ...
        ' button is on and the table has data if the update graphs' ...
        ' button is pressed the frequencies (range) on the table' ...
        ' are removed.' ...
        '
        '- The reset button cleans the table and the cut frequencies' ...
        '
        '- The option to cut frequencies of the signal is only available' ...
        ' after plotting the data.'], 'Help','non-modal')
end
```

Código da questão de saída da aplicação.

```
function VibrationAnalysisUIFigureCloseRequest(app, event)
    %Question to the user if he wants to exit the app
    Sair=questdlg('Do you really want to exit?','Exit.','Yes',...
        'No','Yes');
    switch Sair
        case 'Yes'
            delete(app)
        end
end
```

Apêndice E – Tabelas das Medições de Espessuras e Rugosidades das Paredes Finas

Este apêndice apresenta os valores de espessura medidos ao longo da maquinagem de cada parede, tanto para a geometria reta como curva e as médias em cada zona, a média global e a diferença absoluta entre o valor a atingir e o valor teórico medido, bem como as rugosidades medidas além do Pz, sendo estas o Ra, Rq, Rz, Pa e Pq.

Espessuras medidas ao longo das paredes com geometria reta.

| Valor a atingir (mm) | ac (mm) | Parede (mm) | Espessura | | | | | | | | | | | | Diferença | |
|----------------------|---------|-------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-----------|-------------|
| | | | Zona 1 | | | | Zona 2 | | | | Zona 3 | | | | | Média total |
| | | | Topo | Meio | Base | Média | Topo | Meio | Base | Média | Topo | Meio | Base | Média | | |
| 10,6 | 0,8 | 11,9 – 10,6 | 10,615 | 10,612 | 10,615 | 10,614 | 10,605 | 10,615 | 10,61 | 10,610 | 10,61 | 10,62 | 10,615 | 10,615 | 10,613 | 0,013 |
| 9 | | 10,6 - 9 | 9,01 | 9,02 | 9,02 | 9,017 | 9,01 | 9,03 | 9,04 | 9,027 | 9,01 | 9,02 | 9,04 | 9,023 | 9,022 | 0,022 |
| 7,4 | | 9 – 7,4 | 7,41 | 7,42 | 7,425 | 7,418 | 7,4 | 7,42 | 7,41 | 7,410 | 7,405 | 7,42 | 7,41 | 7,412 | 7,413 | 0,013 |
| 5,8 | | 7,4 – 5,8 | 5,815 | 5,82 | 5,85 | 5,828 | 5,81 | 5,82 | 5,81 | 5,813 | 5,81 | 5,825 | 5,815 | 5,817 | 5,819 | 0,019 |
| 4,2 | | 5,8 – 4,2 | 4,205 | 4,22 | 4,22 | 4,215 | 4,205 | 4,21 | 4,205 | 4,207 | 4,21 | 4,215 | 4,21 | 4,212 | 4,211 | 0,011 |
| 2,6 | | 4,2 - 2,6 | 2,61 | 2,62 | 2,625 | 2,618 | 2,61 | 2,62 | 2,61 | 2,613 | 2,615 | 2,62 | 2,61 | 2,615 | 2,616 | 0,016 |
| 2,2 | 0,2 | 2,6 – 2,2 | 2,21 | 2,215 | 2,205 | 2,210 | 2,205 | 2,21 | 2,2 | 2,205 | 2,21 | 2,22 | 2,205 | 2,212 | 2,209 | 0,009 |
| 1,8 | | 2,2 – 1,8 | 1,815 | 1,82 | 1,81 | 1,815 | 1,815 | 1,815 | 1,81 | 1,813 | 1,82 | 1,82 | 1,81 | 1,817 | 1,815 | 0,015 |
| 1,4 | | 1,8 – 1,4 | 1,46 | 1,445 | 1,415 | 1,440 | 1,44 | 1,43 | 1,41 | 1,427 | 1,46 | 1,435 | 1,41 | 1,435 | 1,434 | 0,034 |
| 1 | | 1,4 - 1 | 1,12 | 1,06 | 1,035 | 1,072 | 1,11 | 1,06 | 1,02 | 1,063 | 1,16 | 1,06 | 1,02 | 1,080 | 1,072 | 0,072 |
| 0,9 | 0,05 | 1 – 0,9 | 1,06 | 0,97 | 0,925 | 0,985 | 1,02 | 0,95 | 0,925 | 0,965 | 1,05 | 0,92 | 0,925 | 0,965 | 0,972 | 0,072 |
| 0,8 | | 0,9 – 0,8 | 0,99 | 0,89 | 0,83 | 0,903 | 0,955 | 0,91 | 0,835 | 0,900 | 1,005 | 0,89 | 0,835 | 0,910 | 0,904 | 0,104 |
| 0,7 | | 0,8 – 0,7 | 0,95 | 0,81 | 0,74 | 0,833 | 0,905 | 0,805 | 0,73 | 0,813 | 0,97 | 0,815 | 0,74 | 0,842 | 0,829 | 0,129 |
| 0,6 | | 0,7 – 0,6 | 0,94 | 0,74 | 0,65 | 0,777 | 0,83 | 0,725 | 0,635 | 0,730 | 0,92 | 0,755 | 0,645 | 0,773 | 0,760 | 0,160 |
| 0,5 | | 0,6 – 0,5 | 0,85 | 0,62 | 0,56 | 0,677 | 0,775 | 0,66 | 0,555 | 0,663 | 0,875 | 0,68 | 0,56 | 0,705 | 0,682 | 0,182 |

*Caracterização de Estratégias de Fresagem da Liga de Alumínio AW 7075.
Aperfeiçoamento de Sistema de Aquisição e Análise da Vibração na Maquinagem*

Espessuras medidas ao longo das paredes de geometria curva.

| Valor a atingir (mm) | ac (mm) | Parede (mm) | Espessura | | | | | | | | | | | | Diferença | |
|----------------------|---------|-------------|-----------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-----------|-------------|
| | | | Zona 1 | | | | Zona 2 | | | | Zona 3 | | | | | Média total |
| | | | Topo | Meio | Base | Média | Topo | Meio | Base | Média | Topo | Meio | Base | Média | | |
| 10,6 | 0,8 | 11,9 - 10,6 | 10,61 | 10,62 | 10,61 | 10,613 | 10,64 | 10,63 | 10,63 | 10,633 | 10,61 | 10,61 | 10,605 | 10,608 | 10,618 | 0,018 |
| 9 | | 10,6 - 9 | 9,01 | 9,02 | 9,03 | 9,020 | 9,05 | 9,06 | 9,06 | 9,057 | 9,01 | 9,02 | 9,01 | 9,013 | 9,030 | 0,030 |
| 7,4 | | 9 - 7,4 | 7,41 | 7,425 | 7,42 | 7,418 | 7,43 | 7,44 | 7,43 | 7,433 | 7,41 | 7,415 | 7,415 | 7,415 | 7,422 | 0,022 |
| 5,8 | | 7,4 - 5,8 | 5,82 | 5,82 | 5,815 | 5,818 | 5,83 | 5,825 | 5,82 | 5,825 | 5,815 | 5,82 | 5,815 | 5,817 | 5,820 | 0,020 |
| 4,2 | | 5,8 - 4,2 | 4,215 | 4,22 | 4,215 | 4,217 | 4,21 | 4,225 | 4,22 | 4,218 | 4,215 | 4,22 | 4,21 | 4,215 | 4,217 | 0,017 |
| 2,6 | | 4,2 - 2,6 | 2,625 | 2,63 | 2,62 | 2,625 | 2,63 | 2,625 | 2,62 | 2,625 | 2,62 | 2,62 | 2,61 | 2,617 | 2,622 | 0,022 |
| 2,2 | 0,2 | 2,6 - 2,2 | 2,22 | 2,225 | 2,22 | 2,222 | 2,22 | 2,22 | 2,22 | 2,220 | 2,215 | 2,22 | 2,21 | 2,215 | 2,219 | 0,019 |
| 1,8 | | 2,2 - 1,8 | 1,83 | 1,83 | 1,82 | 1,827 | 1,82 | 1,835 | 1,815 | 1,823 | 1,83 | 1,83 | 1,81 | 1,823 | 1,824 | 0,024 |
| 1,4 | | 1,8 - 1,4 | 1,45 | 1,44 | 1,43 | 1,440 | 1,43 | 1,43 | 1,42 | 1,427 | 1,45 | 1,445 | 1,42 | 1,438 | 1,435 | 0,035 |
| 1 | | 1,4 - 1 | 1,12 | 1,08 | 1,04 | 1,080 | 1,06 | 1,06 | 1,04 | 1,053 | 1,125 | 1,075 | 1,02 | 1,073 | 1,069 | 0,069 |
| 0,9 | 0,05 | 1 - 0,9 | 1,04 | 0,98 | 0,93 | 0,983 | 0,96 | 0,94 | 0,93 | 0,943 | 1,045 | 0,98 | 0,935 | 0,987 | 0,971 | 0,071 |
| 0,8 | | 0,9 - 0,8 | 0,99 | 0,91 | 0,83 | 0,910 | 0,86 | 0,84 | 0,83 | 0,843 | 0,98 | 0,92 | 0,84 | 0,913 | 0,889 | 0,089 |
| 0,7 | | 0,8 - 0,7 | 0,95 | 0,83 | 0,74 | 0,840 | 0,75 | 0,74 | 0,73 | 0,740 | 0,94 | 0,83 | 0,74 | 0,837 | 0,806 | 0,106 |
| 0,6 | | 0,7 - 0,6 | 0,9 | 0,76 | 0,66 | 0,773 | 0,69 | 0,66 | 0,64 | 0,663 | 0,88 | 0,76 | 0,65 | 0,763 | 0,733 | 0,133 |
| 0,5 | | 0,6 - 0,5 | 0,86 | 0,71 | 0,53 | 0,700 | 0,59 | 0,53 | 0,525 | 0,548 | 0,87 | 0,71 | 0,535 | 0,705 | 0,651 | 0,151 |

Rugosidades medidas ao longo das paredes de geometria reta.

| a_e (mm) | Parede (mm) | Rugosidade (μm) | | | | | |
|---------------|-------------|------------------------------|------|------|----------|------|-------|
| | | Lateral | | | Vertical | | |
| | | Ra | Rq | Rz | Pa | Pq | Pz |
| 0,8 | 11,9 – 10,6 | 1,05 | 1,24 | 4,67 | 1,55 | 1,71 | 5,46 |
| | 10,6 – 9 | 0,78 | 0,92 | 3,41 | 0,52 | 0,68 | 3,5 |
| | 9 – 7,4 | 0,49 | 0,62 | 2,49 | 0,87 | 1,04 | 4 |
| | 7,4 – 5,8 | 0,37 | 0,45 | 1,77 | 0,88 | 1,02 | 3,72 |
| | 5,8 – 4,2 | 0,67 | 0,81 | 3,03 | 0,73 | 0,84 | 3,17 |
| | 4,2 – 2,6 | 0,74 | 0,86 | 3,07 | 0,7 | 0,88 | 3,84 |
| 0,2 | 2,6 – 2,2 | 0,45 | 0,58 | 2,52 | 0,9 | 1,7 | 4,41 |
| | 2,2 – 1,8 | 0,63 | 0,79 | 3,21 | 1,08 | 1,31 | 4,92 |
| | 1,8 – 1,4 | 0,85 | 1 | 3,8 | 1,63 | 1,93 | 7,27 |
| | 1,4 – 1 | 0,98 | 1,17 | 4,2 | 1,92 | 1,52 | 11,55 |
| 0,05 | 1 – 0,9 | 0,65 | 0,77 | 2,88 | 2,37 | 2,93 | 11,45 |
| | 0,9 – 0,8 | 1,08 | 1,32 | 4,8 | 2,86 | 3,66 | 15,16 |
| | 0,8 – 0,7 | 1,41 | 1,66 | 6,07 | 3 | 3,5 | 12,83 |
| | 0,7 – 0,6 | 1,31 | 1,56 | 5,81 | 3,48 | 4,09 | 14,29 |
| | 0,6 – 0,5 | 1,14 | 1,38 | 5,73 | 3,32 | 3,78 | 13,21 |

Rugosidades medidas ao longo das paredes de geometria reta.

| a_e (mm) | Parede (mm) | Rugosidade (μm) | | | | | |
|---------------|----------------|------------------------------|------|-------|----------|------|-------|
| | | Lateral | | | Vertical | | |
| | | Ra | Rq | Rz | Pa | Pq | Pz |
| 0,8 | 11,9 – 10,6 | 0,99 | 1,18 | 3,85 | 0,58 | 0,7 | 2,93 |
| | 10,6 – 9 | 0,61 | 0,79 | 3,12 | 0,58 | 0,77 | 3,66 |
| | 9 – 7,4 | 0,049 | 0,64 | 2,76 | 0,35 | 0,5 | 2,73 |
| | 7,4 – 5,8 | 0,95 | 1,1 | 3,5 | 0,63 | 0,86 | 3,99 |
| | 5,8 – 4,2 | 0,81 | 0,94 | 3,08 | 0,86 | 1,01 | 3,88 |
| | 4,2 – 2,6 | 1,06 | 1,17 | 3,56 | 0,61 | 0,72 | 2,92 |
| 0,2 | 2,6 – 2,2 | 0,56 | 0,71 | 2,8 | 0,52 | 0,6 | 2,33 |
| | 2,2 – 1,8 | 0,68 | 0,81 | 2,96 | 0,82 | 0,96 | 3,6 |
| | 1,8 – 1,4 | 0,82 | 0,98 | 3,69 | 1,32 | 1,5 | 5,43 |
| | 1,4 – 1 | 2,39 | 2,93 | 10,99 | 1,17 | 1,57 | 7,11 |
| 0,05 | 1 – 0,9 | 0,74 | 0,88 | 3,22 | 2,69 | 3,15 | 10,8 |
| | 0,9 – 0,8 | 0,65 | 0,74 | 3,04 | 1,88 | 2,45 | 10,36 |
| | 0,8 – 0,7 | 0,77 | 0,95 | 9,63 | 2,46 | 2,87 | 10,96 |
| | 0,7 – 0,6 | 0,75 | 0,89 | 3,29 | 2,78 | 3,31 | 11,61 |
| | 0,6 – 0,5 | 0,61 | 0,71 | 2,44 | 2,74 | 3,18 | 11,94 |



**Instituto Superior
de Engenharia**

Politécnico de Coimbra