



**João Miguel Vaz  
Moreira**

**Estudo da geometria das hélices em fresas  
integrals de metal duro na fresagem trocoidal de  
aços inoxidáveis**





**João Miguel Vaz  
Moreira**

**Estudo da geometria das hélices em fresas  
integrals de metal duro na fresagem trocoidal de  
aços inoxidáveis**

Relatório de Projeto apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica do Prof. Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, e da Doutora Cristina Maria da Silva Fernandes, Responsável pelo Desenvolvimento de Materiais da Palbit SA.



**O júri / The jury**

Presidente / President

**Prof. Doutor Carlos Alberto Moura Relvas**

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

**Prof. Doutor Hernâni Miguel Reis Lopes**

Professor Coordenador da ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto

**Prof. Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva**

Professor Catedrático da Universidade de Aveiro (orientador)



## **Agradecimentos / Acknowledgements**

Agradeço ao meu orientador, Professor João Paulo Davim, pelo apoio ao longo do decorrer do trabalho e por todos os conselhos acadêmicos, profissionais e para a vida.

À Palbit SA e todos os seus trabalhadores, pela oportunidade de participar neste projeto e de adquirir novas experiências e oportunidades.

Ao Eng. Daniel Figueiredo, por ser o mentor deste projeto e pela sua disponibilidade, confiança e apoio que possibilitaram o sucesso do trabalho.

À Dra. Cristina Fernandes, pelos conselhos e apoio ao longo do decorrer do projeto.

Ao Eng. Ricardo Mendes, pelo seu apoio ao longo de todo o trabalho, no desenho das fresas e na amizade durante todo o projeto.

Ao João Marouvo e ao Prof. Fernando Simões, pela cedência do equipamento e pelo apoio nos ensaios de vibração.

Aos meus pais, que desde o início apoiam todos os meus sonhos e projetos, por toda a força e motivação que me deram para concluir mais esta etapa.

À minha namorada, Viviana, que sempre me acompanhou, motivou e ajudou a dar o meu melhor tanto neste projeto, como em tudo o que faço.

A todas as pessoas que contribuíram para o sucesso deste trabalho, obrigado.





**Palavras-chave**

Fresagem trocoidal; fresas metal duro; vibrações; passo; ângulo de hélice

**Resumo**

Com o aparecimento de novas estratégias de maquinagem eficientes é imperativo que existam ferramentas de corte que correspondam às necessidades da indústria. Este projeto decorreu na PALBIT, SA com o propósito de estudar a influência de variáveis geométricas na hélice na fresagem trocoidal de aço inoxidável austenítico 316L, compreendendo através de resultados obtidos da vibração e rugosidade quais seriam os valores ótimos para estes fatores.

Dos ensaios de vibração e rugosidade efetuados concluiu-se que o valor do ângulo de hélice não é proporcional à vibração, sendo que o valor ótimo é de cerca de  $35^\circ$ . Concluiu-se também que se deve usar passo variável e que ao aumentar a variação se diminui a vibração.

O acabamento superficial e a vibração estão diretamente ligados pelo que quando os valores de vibração aumentam, também os valores de rugosidade aumentam. Foi também possível chegar a um método indireto com o qual se pode determinar os valores de rugosidade em função da vibração medida.



**Keywords**

Trochoidal milling; carbide tools; chatter; pitch; helix angle

**Abstract**

With the arising of new efficient machining strategies there must be appropriate cutting tools that suit the industry needs. This project was developed in PALBIT, SA with the aim to study the influence of geometric variables of the helix in the trochoidal milling of austenitic stainless steel AISI 316L, understanding which are the optimal values for these variables, based on the results that were obtained with vibration and surface roughness tests.

Using vibration and roughness tests it was concluded that the helix angle isn't proportional to the vibration values, the optimum helix angle value is about  $35^\circ$ . It was also concluded that the pitch must be variable and when increasing the values of the angles the vibration values decrease.

The surface finish and the vibration are directly connected and when the vibration values grow, the roughness values grow as well. It was possible to achieve an indirect method to predict the roughness values using the vibration.



# Índice

<b>Lista de Tabelas</b>	<b>iii</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>v</b>
<b>Lista de Abreviaturas e Símbolos</b>	<b>vii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento . . . . .	1
1.2 Palbit, s.a. . . . .	2
1.3 Objetivos . . . . .	2
1.4 Guia de Leitura . . . . .	2
<b>2 Fresagem de aços inoxidáveis com fresas integrais de metal duro - Estado da arte</b>	<b>5</b>
2.1 Ferramentas de Corte . . . . .	5
2.1.1 Materiais . . . . .	5
2.1.2 Geometria da fresa . . . . .	6
2.1.3 Revestimentos . . . . .	13
2.2 Materiais a maquinar . . . . .	14
2.2.1 Aços inoxidáveis . . . . .	14
2.2.2 Desgaste na maquinagem do Aço Inoxidável . . . . .	16
2.2.3 Prevenção de problemas na maquinagem do Aço Inoxidável . . . . .	17
2.3 <i>High Efficiency Milling</i> e Fresagem Trocoidal . . . . .	17
2.3.1 Fresagem Trocoidal . . . . .	18
2.4 Vibrações na Fresagem . . . . .	19
2.4.1 Tipos de Vibrações . . . . .	20
2.4.2 Detecção das vibrações . . . . .	22
2.4.3 Influência da Geometria das Fresas nas Vibrações . . . . .	22
2.5 Rugosidade das superfícies . . . . .	23
2.5.1 Parâmetros de amplitude de rugosidade . . . . .	24
2.5.2 Fatores que influenciam a rugosidade . . . . .	25
2.6 Síntese . . . . .	26
<b>3 Procedimento Experimental</b>	<b>27</b>
3.1 Construção dos Protótipos . . . . .	27
3.1.1 Programa de Execução da Fresa . . . . .	29
3.1.2 Fabrico da Fresa . . . . .	29

3.2	Maquinagem . . . . .	31
3.2.1	Máquina . . . . .	31
3.2.2	Material . . . . .	32
3.2.3	Condições de Corte . . . . .	33
3.2.4	Procedimento . . . . .	33
3.3	Obtenção de dados . . . . .	34
3.3.1	Aquisição das vibrações . . . . .	34
3.3.2	Rugosidade das superfícies . . . . .	37
<b>4</b>	<b>Análise e discussão de Resultados</b>	<b>39</b>
4.1	Vibrações . . . . .	39
4.1.1	Fresas de Passo Constante . . . . .	39
4.1.2	Fresas de Passo Variável . . . . .	44
4.1.3	Análise . . . . .	47
4.2	Rugosidade das superfícies . . . . .	51
4.2.1	Valores $R_a$ e $R_z$ . . . . .	51
4.2.2	Análise . . . . .	51
<b>5</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>59</b>
5.1	Conclusões . . . . .	59
5.2	Trabalhos Futuros . . . . .	60
	<b>Bibliografia</b>	<b>61</b>

# Lista de Tabelas

3.1	Dados da geometria do Protótipo Inicial . . . . .	27
3.2	Valores das variáveis geométricas relativas aos novos protótipos . . . . .	28
3.3	Especificações da máquina <i>MAS MCV 1270</i> (MAS, 2017) . . . . .	32
3.4	Normas correspondentes ao aço inoxidável DIN 1.4404 . . . . .	32
3.5	Composição química do aço DIN 1.4404 . . . . .	32
3.6	Propriedades físicas e mecânicas do aço DIN 1.4404 . . . . .	33
3.7	Condições de corte para o aço inoxidável DIN 1.4404 . . . . .	33
3.8	Componentes usados na aquisição dos dados das vibrações . . . . .	35
4.1	Valores do Pico na variação do Ângulo de Hélice . . . . .	48
4.2	Valores do RMS na variação do Ângulo de Hélice . . . . .	48
4.3	Valores do Pico na variação do Passo . . . . .	49
4.4	Valores do RMS na variação do Passo . . . . .	50
4.5	Valores de rugosidade $R_a$ e $R_z$ . . . . .	51





# Lista de Figuras

2.1	Transformação das Ferramentas de Metal Duro, cortesia: <i>Palbit</i> . . . . .	6
2.2	Diâmetro do núcleo - <i>NumrotoPlus</i> , cortesia: <i>Palbit</i> . . . . .	7
2.3	Diâmetro de corte - <i>NumrotoPlus</i> , cortesia: <i>Palbit</i> . . . . .	7
2.4	Hélices (a laranja) - <i>NumrotoPlus</i> , cortesia: <i>Palbit</i> . . . . .	8
2.5	Ângulo de Hélice - <i>NumrotoPlus</i> , cortesia: <i>Palbit</i> . . . . .	8
2.6	Número de hélices (Helical Solutions, 2017) . . . . .	9
2.7	Comprimento útil, Comprimento de Corte e Comprimento Total da Ferramenta - <i>NumrotoPlus</i> , cortesia: <i>Palbit</i> . . . . .	10
2.8	Passo - <i>NumrotoPlus</i> , cortesia: <i>Palbit</i> . . . . .	10
2.9	Ângulo de Ataque - <i>NumrotoPlus</i> , cortesia: <i>Palbit</i> . . . . .	11
2.10	Alívio radial - <i>NumrotoPlus</i> , cortesia: <i>Palbit</i> . . . . .	11
2.11	Alívio da face - <i>NumrotoPlus</i> , cortesia: <i>Palbit</i> . . . . .	12
2.12	Haste da ferramenta (à esquerda - <i>Weldon</i> , à direita - cilíndrica), cortesia: <i>Palbit</i> . . . . .	12
2.13	Seccionador de aparas - <i>NumrotoPlus</i> , cortesia: <i>Palbit</i> . . . . .	13
2.14	Diagrama de Schaeffler para Aço Inoxidável (Adaptado de (Stainless, 2021))	15
2.15	Fresagem Convencional vs. HEM (adaptado de (Palbit, 2021)) . . . . .	19
2.16	Fresagem Trocoidal (Palbit, 2021) . . . . .	20
2.17	Comprimentos de medida usados na rugosimetria, adaptado de: (Plásticos, 2021) . . . . .	24
3.1	Passo variável relativo à fresa 2 . . . . .	28
3.2	Cilindro Inicial - <i>NumrotoPlus</i> , cortesia: <i>Palbit</i> . . . . .	29
3.3	Protótipo inicial - <i>NumrotoPlus</i> , cortesia: <i>Palbit</i> . . . . .	29
3.4	Cilindro de metal duro antes de ser afiado . . . . .	29
3.5	Fresa antes do revestimento (em cima) e depois do revestimento (em baixo)	30
3.6	Fresa 1: Ângulo de Hélice - 35 <sup>o</sup> , Passo constante . . . . .	30
3.7	Fresa 2: Ângulo de Hélice - 35 <sup>o</sup> , Passo 72-68-76-68 . . . . .	30
3.8	Fresa 3: Ângulo de Hélice - 35 <sup>o</sup> , Passo 72-66-78-66 . . . . .	30
3.9	Fresa 4: Ângulo de Hélice - 30 <sup>o</sup> , Passo constante . . . . .	31
3.10	Fresa 5: Ângulo de Hélice - 40 <sup>o</sup> , Passo constante . . . . .	31
3.11	<i>MAS MCV 1270</i> (MAS, 2017) . . . . .	31
3.12	Montagem da peça para executar os ensaios . . . . .	34
3.13	Trajatória da ferramenta de corte . . . . .	34
3.14	Montagem dos componentes para a aquisição dos dados das vibrações . .	35
3.15	Vibrações no domínio de frequência . . . . .	36

3.16	Rugosímetro <i>TESA-rugosurf 10-G</i> . . . . .	37
3.17	Zonas de medição da rugosidade . . . . .	38
4.1	Amplitude de vibração no domínio de tempo - Fresa 1 . . . . .	39
4.2	Entradas (a amarelo) e saídas (a vermelho) da fresa 1 na peça maquinada	40
4.3	Amplitude de vibração no domínio de frequências - Fresa 1 . . . . .	40
4.4	Amplitude de vibração no domínio de tempo - Fresa 4 . . . . .	41
4.5	Amplitude de vibração no domínio de tempo medida em aceleração - Fresa 4	41
4.6	Entradas (a amarelo) e saídas (a vermelho) da fresa 4 na peça maquinada	42
4.7	Amplitude de vibração no domínio de frequências - Fresa 4 . . . . .	42
4.8	Amplitude de vibração no domínio de tempo - Fresa 5 . . . . .	43
4.9	Amplitude de vibração no domínio de tempo medida em aceleração - Fresa 5	43
4.10	Entradas (a amarelo) e saídas (a vermelho) da fresa 5 na peça maquinada	44
4.11	Amplitude de vibração no domínio de frequências - Fresa 5 . . . . .	44
4.12	Amplitude de vibração no domínio de tempo - Fresa 2 . . . . .	45
4.13	Entradas (a amarelo) e saídas (a vermelho) da fresa 2 na peça maquinada	45
4.14	Amplitude de vibração no domínio de frequências - Fresa 2 . . . . .	46
4.15	Amplitude de vibração no domínio de tempo - Fresa 3 . . . . .	46
4.16	Entradas (a amarelo) e saídas (a vermelho) da fresa 3 na peça maquinada	47
4.17	Amplitude de vibração no domínio de frequências - Fresa 3 . . . . .	47
4.18	Valor do RMS e do pico de amplitude de vibração em função do ângulo de hélice . . . . .	48
4.19	Valor do RMS e do pico de amplitude de vibração em função do passo . .	50
4.20	Valores de $R_a$ e $R_z$ em função do ângulo de hélice . . . . .	52
4.21	Acabamento superficial ensaio Fresa 1 . . . . .	53
4.22	Acabamento superficial ensaio Fresa 4 . . . . .	53
4.23	Acabamento superficial ensaio Fresa 5 . . . . .	53
4.24	Valores de $R_a$ e $R_z$ em função do passo . . . . .	54
4.25	Acabamento superficial ensaio Fresa 2 . . . . .	55
4.26	Acabamento superficial ensaio Fresa 3 . . . . .	55
4.27	Valores de $R_a$ e $R_z$ em função da amplitude de vibração em RMS . . . . .	55
4.28	Valores de $R_a$ e $R_z$ em função da amplitude de vibração em RMS . . . . .	56
4.29	Valores de $R_a$ e $R_z$ em função da amplitude de vibração em RMS . . . . .	57

# Lista de Abreviaturas e Símbolos

$a_p$	penetramento axial
$a_e$	penetramento radial
C	Carbono
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CBN	<i>Cubic Boron Nitride</i>
CNC	Comando Numérico por Computador
Co	Cobalto
FFT	Transformada rápida de Fourier
$f_s$	frequência da árvore
$f_{TPF}$	frequência de passagem dos dentes da fresa
HEM	<i>High Efficiency Milling</i>
$f_z$	avanço por dente
$F_z$	avanço
$L_e$	Comprimento de Base
$L_m$	Comprimento de Cálculo
$L_n$	Último Comprimento de Palpagem
$L_t$	Comprimento de Palpagem ou Exploração
$L_v$	Primeiro Comprimento de Palpagem
$n$	velocidade de rotação da árvore
N	Azoto
Nb	Nióbio
$\overline{Pico}_{corte}$	Pico da amplitude de vibração no corte
$\overline{Pico}_{trabalho}$	Pico da amplitude de vibração em trabalho
$\overline{Pico}_{vazio}$	Pico da amplitude de vibração em vazio
PVD	<i>Physical Vapor Deposition</i>
$R_a$	Rugosidade Média Aritmética
RMS	<i>Root Mean Square</i>
$\overline{RMS}_{corte}$	RMS da amplitude de vibração no corte
$\overline{RMS}_{trabalho}$	RMS da amplitude de vibração em trabalho
$\overline{RMS}_{vazio}$	RMS da amplitude de vibração em vazio
$R_z$	Profundidade Média da Rugosidade
Ta	Tântalo
Ti	Titânio
$V_c$	velocidade de corte
WC	Carboneto de Tungstênio



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento

A maquinagem de aços inoxidáveis e ligas termorresistentes representa um grande desafio devido à baixa condutividade térmica característica destes materiais, tornando este processo muito complexo. Estas ligas têm excelentes propriedades mecânicas e tribológicas, tendo vastas áreas de aplicação desde a indústria naval até à indústria aeronáutica, aeroespacial ou alimentar, visto que os aços inoxidáveis são o material por excelência aplicado em situações nas quais se requer uma grande resistência à corrosão. Porém, a baixa condutividade térmica destas ligas conduz a uma enorme dificuldade na sua maquinagem. O calor na maquinagem é dispersado por três formas principais: pela peça a ser maquinada, pela apara e pela ferramenta de corte. Na maquinagem são geradas elevadas temperaturas devido à fricção entre os materiais, como o calor gerado não é tão absorvido pela peça devido à sua baixa condutividade térmica, significa que o calor será maioritariamente conduzido para a ferramenta, acelerando o seu desgaste. Além disso, os aços inoxidáveis têm tendência a encruar na maquinagem, ou seja, a sua dureza irá aumentar, o que provocará um crescimento ainda maior do valor da temperatura e geração de calor que acelerará ainda mais o desgaste da ferramenta (Gowthaman et al., 2020).

O processo de fabrico mais comum em ambiente industrial é a maquinagem (fabrico subtrativo). A maquinagem de peças tem evoluído em termos de complexidade e exigência, sendo hoje em dia comum o uso de centros de maquinagem com 3 eixos lineares e dois rotativos, conferindo uma maior versatilidade no que se refere às trajetórias que a ferramenta pode efetuar, havendo assim uma grande variedade de geometrias distintas que se podem maquinar. Com a evolução dos equipamentos houve também um desenvolvimento do *software*, nomeadamente do CAM (*Computer Aided Manufacturing*) que trouxe novas estratégias de maquinagem aplicáveis em materiais mais complexos de maquinar, ou que trazem uma otimização em fatores como o tempo de maquinagem ou a taxa de remoção de material (Gong et al., 2017; Sousa et al., 2020).

Com o aparecimento de estratégias de maquinagem eficientes, HEM (*High efficiency milling*), como a fresagem trocoidal, surge a necessidade da existência de ferramentas de corte apropriadas. A fresagem trocoidal é uma estratégia de fresagem eficiente em que a fresa percorre uma trocóide. Além desta trajetória especial, todo o comprimento de corte da ferramenta é utilizado, aumentando a profundidade de corte.

A Palbit, SA, empresa onde decorreu este projeto, dedica-se à produção de ferramen-

tas de corte, fazendo não só a construção mas também o desenvolvimento das ferramentas, nomeadamente a definição da sua geometria. Contudo, a determinação de valores para as variáveis geométricas é um processo complicado devido à influência de inúmeros fatores extrínsecos à ferramenta de corte, como o material e a estratégia de maquinagem. Desta forma, as fresas devem ser otimizadas através da sua geometria, de modo a garantir a melhor performance na fresagem dos materiais, particularmente dos aços inoxidáveis, tão complexos de maquinar. No sentido de otimizar a ferramenta é necessário o estudo de variáveis geométricas e da sua influência em termos mensuráveis. Para tal, podem ser usados testes de vibração e rugosidade, que são indicadores de qualidade e demonstram claramente o comportamento da fresa.

## 1.2 Palbit, s.a.

A Palbit, s.a. é a empresa onde este projeto decorreu. Trata-se de uma empresa com bastante história na área da produção de ferramentas de corte e de outros produtos para fornecer a indústria. Situa-se na zona de Albergaria-a-Velha, em Aveiro. Tem cerca de 200 funcionários e exporta para mais de 60 países (Público, 2015).

Fundada em 1916, a empresa iniciou a sua atividade na exploração das Minas de Galena do Palhal, sendo que também trabalhava na indústria e comércio de ferramentas de metal duro, metais e seus derivados (Palbit, 2021b).

Atualmente, a Palbit dedica-se à produção de ferramentas para maquinagem e tem outros dois sectores de mercado com menor dimensão, ferramentas anti-desgaste e ferramentas de perfuração mineira. Assim sendo, a Palbit consegue fornecer distintos ramos da indústria como Aeronáutica e Defesa, Construção Ferroviária, Construção Naval, Automóvel, Energia Eólica, Moldes e Matrizes, Produção de Energia e Engenharia em Geral. Além de estar disponível para oferecer soluções para diversas indústrias diferentes, a Palbit garante a qualidade dos seus produtos ao estar certificada pelas normas ISO 9001:2015 e NP 4457:2007 (Palbit, 2021a,b,c).

## 1.3 Objetivos

Para um melhor desenvolvimento deste projeto foram definidos objetivos concretos em termos de resultados que devem ser atingidos:

- Consolidar o Estado de Arte da operação de fresagem nos materiais definidos;
- Definir condições ótimas para a geometria das ferramentas;
- Processamento de protótipos;
- Obter e avaliar resultados dos protótipos ensaiados.

## 1.4 Guia de Leitura

O trabalho divide-se em 5 capítulos, sendo eles:

- **Capítulo 1** - Introdução

Pequeno texto indicativo do tema do trabalho, da empresa no qual se desenrola, dos objetivos do projeto e com a estrutura do relatório.

- **Capítulo 2** - Estado da Arte

Estado da Arte sobre Ferramentas de corte de metal duro integrais nomeadamente, o seu desgaste, os materiais a maquinar, as estratégias de maquinagem, as vibrações na fresagem e o acabamento superficial.

- **Capítulo 3** - Procedimento Experimental

Descrição do desenvolvimento, construção e teste de novos protótipos desenvolvidos com base em parâmetros específicos a partir do protótipo inicial.

- **Capítulo 4** - Análise e discussão de resultados

Apresentação e análise dos resultados obtidos no teste dos protótipos desenvolvidos.

- **Capítulo 5** - Conclusão

Síntese dos resultados do trabalho e das principais conclusões retiradas dos resultados. Apresentação de sugestões para trabalhos futuros.

Esta página foi deixada em branco propositadamente.



## Capítulo 2

# Fresagem de aços inoxidáveis com fresas integrais de metal duro - Estado da arte

### 2.1 Ferramentas de Corte

Com o aumento das necessidades de componentes fabricados de forma mais rigorosa, e peças obtidas por maquinagem com tolerâncias cada vez mais apertadas, surge a necessidade da existência de ferramentas de corte que cumpram as exigências de um mercado como a maquinagem CNC que tem crescido consideravelmente. Devido ao crescimento no mercado, justifica-se um forte investimento na investigação e desenvolvimento de novas ferramentas de corte (Sousa et al., 2020).

#### 2.1.1 Materiais

Na indústria encontram-se diversas classes de materiais para ferramentas de cortes, os aços rápidos, os carbonetos sinterizados, os cermets, os cerâmicos e os ultraduros.

A seleção do material a utilizar numa ferramenta, não é simplesmente aleatória, mas sim seguindo por base critérios de modo a se obter uma maquinagem mais eficiente, nomeadamente em aspetos tecnológicos e económicos. Para tal, é imperativo que se escolha o material que junte as características mais apropriadas para o uso pretendido, tendo em conta as suas propriedades mecânicas, químicas e tendo em atenção a evolução da temperatura nas operações a desempenhar (Davim, 2008).

#### Carbonetos Sinterizados

Atualmente, as ferramentas de corte mais abundantemente utilizadas na prática industrial são as ferramentas com classes de metal duro. Isto deve-se fundamentalmente às suas excelentes propriedades físicas e mecânicas como a elevada dureza superficial, o baixo fator de fricção, a baixa condutividade térmica, e as suas propriedades químicas estáveis. Outro fator a ter em conta é o aspeto económico, visto que os carbonetos sinterizados são economicamente mais viáveis do que as cerâmicas e o CBN, a título de exemplo (Davim, 2008; Gong et al., 2017).

O processo de concepção de ferramentas de corte de metal duro rotativas integrais na PALBIT (Figura 2.1) começa com a pesagem da matéria prima, nomeadamente do carboneto de tungstênio (WC) e do cobalto (Co) e em algumas classes, outros elementos para melhorar algumas propriedades ou controlar o processamento (Ti(C,N)-(Ta,Nb)C). A pesagem servirá para garantir que a mistura terá as composições químicas desejadas de cada uma das partes, conferindo as propriedades físicas requeridas em termos da maquinagem. Depois da pesagem, é feita a moagem, que irá consistir na mistura dos compostos, aos quais será acrescentado um líquido e outros produtos químicos.

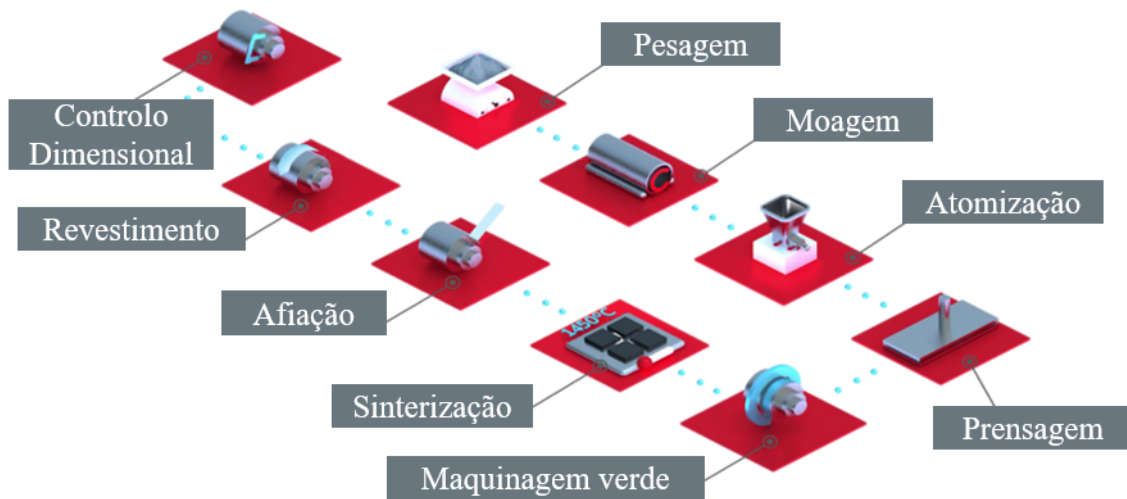


Figura 2.1: Transformação das Ferramentas de Metal Duro, cortesia: *Palbit*

Após algumas horas de moagem, uma suspensão resultante é atomizada, ou seja, removida a fase líquida transformando num pó de partículas de dimensões extremamente reduzidas que serão de seguida prensadas, resultando em cilindros. Após a prensagem, existe a sinterização num forno com condições apropriadas, que irá provocar a união das partículas num composto de base cerâmica com uma alta dureza.

De seguida é efetuada a afiação da ferramenta, sendo que lhe é conferida a sua geometria conforme o que for definido previamente, através de operações de desbaste e acabamento realizadas com mós. De seguida executa-se o revestimento das peças, na maioria dos casos através de PVD e faz-se o controlo dimensional. Se tudo corresponder ao previsto a peça segue para marcação laser e embalamento, concluindo assim o processo.

### 2.1.2 Geometria da fresa

Na construção das fresas existem diversas variáveis geométricas a ter em conta. No processo de desenvolvimento de ferramentas de alta performance deu-se conta que estas variáveis influenciam certos aspetos como o desgaste, as vibrações, o tempo de vida da ferramenta, as forças de corte, a taxa de remoção de material e o acabamento superficial. Como tal, a geometria das ferramentas de corte, e neste caso particular a geometria das fresas, tem sido objeto de estudo pela comunidade científica e pela indústria (Gong et al., 2017; Gowthaman et al., 2020; Uysal et al., 2015).

### Diâmetro do núcleo

O diâmetro do núcleo (Figura 2.2) trata-se do diâmetro de uma circunferência virtual definida numa secção transversal ao eixo de rotação que interceta o fundo de todas as hélices. Um diâmetro mais pequeno resulta de um menor número de hélices da ferramenta e permite mais espaço para escoar a aparas, porém resulta numa menor rigidez da ferramenta. Um diâmetro superior é consequente de um maior número de hélices, e apesar de ter um menor espaço para escoar a aparas, garante uma maior rigidez à ferramenta (Palbit, 2021).

Esta variável trata-se de uma das medidas de qualidade mais importantes nas fresas integrais, sendo um problema comum a deflexão do cilindro durante o processo de afiação da fresa que leva a desalinhamentos que provocam imprecisões dimensionais na maquinagem. Dittrich et al. (2020) estudou a influência da deflexão no desvio do diâmetro do núcleo, desenvolvendo um método de simulação da deflexão em função das forças envolvidas, fazendo a compensação da deflexão durante o corte o que resultou numa diminuição dos desvios em diferentes fresas em aproximadamente 75%.

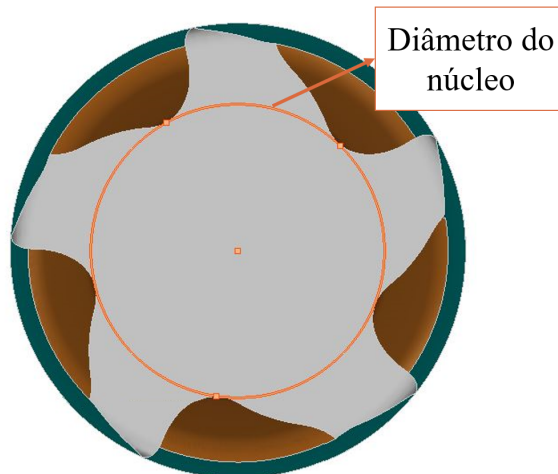


Figura 2.2: Diâmetro do núcleo - *NumrotoPlus*, cortesia: *Palbit*

### Diâmetro de corte

O diâmetro de corte (Figura 2.3) representa a medida de uma margem da fresa até à margem oposta. Este diâmetro define a geometria do sólido de revolução e por consequência a dimensão de corte da ferramenta (Palbit, 2021).

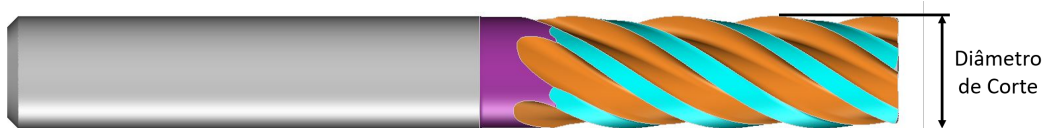


Figura 2.3: Diâmetro de corte - *NumrotoPlus*, cortesia: *Palbit*

## Hélices

As hélices (Figura 2.4) tratam-se das cavidades em espiral ao longo da ferramenta que permitem a formação e evacuação da avara. Para a caracterização das hélices há dois fatores muito relevantes, o ângulo da hélice e o número de hélices (Palbit, 2021).

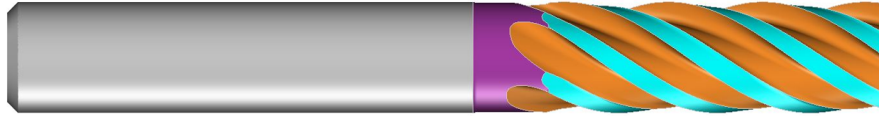


Figura 2.4: Hélices (a laranja) - *NumrotoPlus*, cortesia: *Palbit*

O Ângulo de Hélice (Figura 2.5) é o ângulo formado entre uma linha tangente à aresta de corte na hélice e um plano que passa através do eixo da ferramenta. Esta variável é uma das mais importantes na construção das fresas devido à elevada influência que tem no corte (Palbit, 2021).

Para se alterar o ângulo de hélice é necessário conhecer a aplicação que vai ser atribuída à fresa, nomeadamente o material a maquinar, o tipo de operação e a qualidade superficial desejada (Ema & Davies, 1989).

Ao se ter um maior ângulo de hélice, as forças radiais vão diminuir resultando em menores vibrações, pelo que o acabamento superficial será superior. Porém, como evidenciado por Öztürk et al. (2016), um problema desta geometria é que ao diminuir as forças radiais, serão aumentadas as forças axiais, de modo que surge um efeito de *pull-out* da ferramenta. Pelo contrário, menores ângulos de hélice envolvem maiores forças radiais que irão aumentar as vibrações, prejudicando o acabamento superficial e a vida da ferramenta. Porém, uma grande vantagem de se ter menores ângulos de hélice é o maior espaço para escoamento da avara (Buj-Corral et al., 2011; Chen et al., 2018; Zatarain et al., 2006).

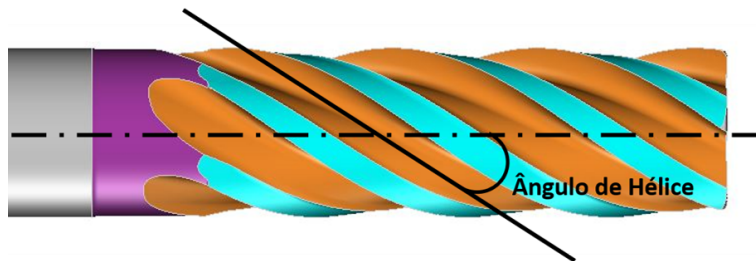


Figura 2.5: Ângulo de Hélice - *NumrotoPlus*, cortesia: *Palbit*

O Número de Hélices (Figura 2.6) representa o número de arestas de corte da ferramenta. Muitas vezes é também chamado de número de dentes, ou de número de navalhas. O Número de Hélices é uma variável muito importante e que deve ser definida tendo em conta a operação a realizar e o material. Variar este parâmetro pode resultar em mudanças no escoamento da avara, na rigidez da ferramenta e mesmo no acabamento superficial (Helical Solutions, 2017; Palbit, 2021).

Um número de hélices superior permite a maquinagem de materiais mais duros, devido essencialmente ao aumento da rigidez da ferramenta pelo aumento do diâmetro do núcleo.

Porém, o escoamento da apara será mais complexo, como tal, é recomendado o uso de quebra aparas em ferramentas deste género. (Harvey Performance Company, 2017; Helical Solutions, 2017).

Ferramentas com menor número de hélices são preferíveis para maquinar materiais mais dúcteis, tal como o alumínio, pois estas ferramentas apresentam uma menor rigidez consequente do seu menor diâmetro do núcleo. Contudo, esta ferramenta apresenta grandes vantagens em termos de escoamento da apara, sendo que se podem aplicar também avanços superiores. (Harvey Performance Company, 2017; Helical Solutions, 2017).



Figura 2.6: Número de hélices (Helical Solutions, 2017)

### Comprimento útil

O comprimento útil (Figura 2.7) representa o comprimento do topo da ferramenta até ao *shank*, ou seja, é o comprimento de corte somado com o comprimento do *neck*, que permite um comprimento extra ao de corte, de modo a dar uma margem para a peça e o aperto da ferramenta não baterem, de modo a não prejudicar o acabamento da peça (Palbit, 2021).

### Comprimento de Corte

Comprimento das arestas de corte na direção axial (Figura 2.7) (Palbit, 2021).

### Comprimento Total da Ferramenta

Comprimento da ferramenta desde o topo até ao final da haste (Figura 2.7) (Palbit, 2021).

### Passo

O Passo (Figura 2.8) é o ângulo entre as arestas de corte de cada hélice, este pode ser constante ou variável. Vários autores têm se dedicado ao estudo da influência do passo variável, como por exemplo Niu et al. (2017) que procuraram entender a diferença entre ferramentas com ou sem passo variável no que concerne a vibrações na fresagem concluindo que a existência de ângulos distintos entre as arestas de corte contribui para que não surjam harmónicos devidos às solicitações sinusoidais, diminuindo problemas de ruído e fadiga, e melhorando o acabamento da superfície a maquinar (Dong Yang, 2015; Helical Solutions, 2017).

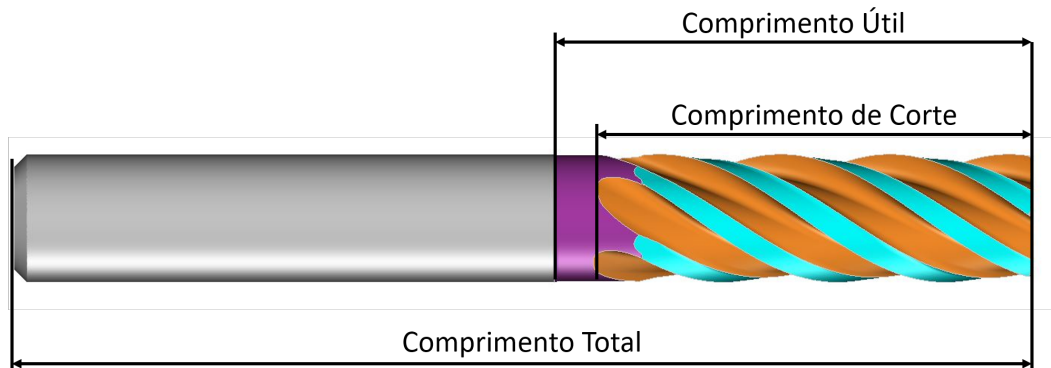


Figura 2.7: Comprimento útil, Comprimento de Corte e Comprimento Total da Ferramenta - *NumrotoPlus*, cortesia: *Palbit*

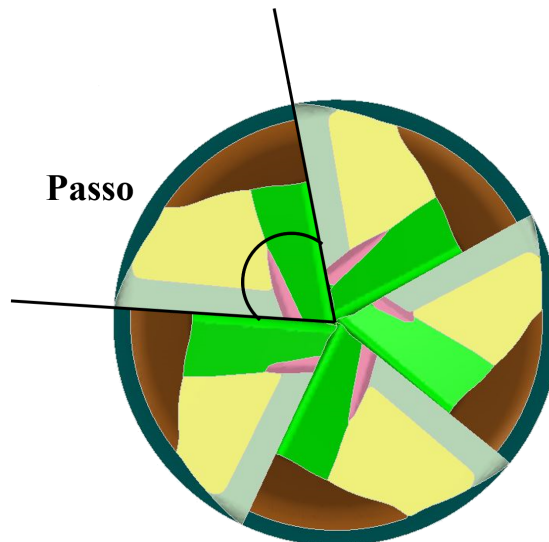


Figura 2.8: Passo - *NumrotoPlus*, cortesia: *Palbit*

### Ângulo de Ataque

O Ângulo de Ataque (Figura 2.9) pode ser positivo, negativo ou nulo, e representa o ângulo formado entre a face de ataque e a face de trabalho do material (Helical Solutions, 2017; Palbit, 2021).

A influência do ângulo de ataque na maquinagem é vital na fresagem, Choi (2017) estudou o efeito da variação do ângulo de ataque nas fresas e concluiu que ao se diminuir a carga aplicada o efeito do ângulo de ataque aumenta significativamente, sendo que o ângulo de ataque influencia bastante a fadiga da ferramenta e conseqüentemente o seu tempo de vida.

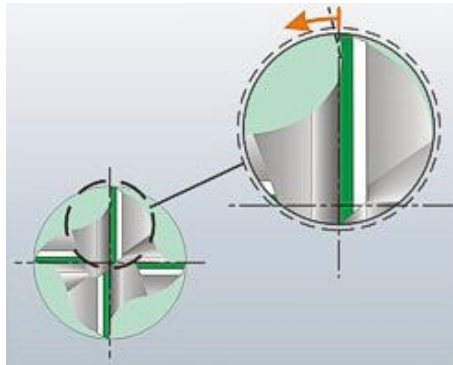


Figura 2.9: Ângulo de Ataque - *NumrotoPlus*, cortesia: *Palbit*

## Alívios

Os alívios são pequenas remoções de material efetuadas na face de saída com o objetivo de promover o acabamento de superfície, pois sem se efetuar este alívio, a aresta da face de saída irá também tocar na superfície a maquinar prejudicando o acabamento e aumentando o desgaste da fresa (Helical Solutions, 2017).

Existem dois tipos de alívios diferentes, o alívio radial (Figura 2.10) e o alívio da face (Figura 2.11). O alívio radial é efetuado na face de saída e evita o toque da aresta da face de saída na parede maquinada, enquanto o alívio da face tem o mesmo objetivo porém aplicado à superfície inferior maquinada. Segundo Wang & Chang (2004) o aumento do alívio conduz a uma diminuição da fricção entre a peça e a ferramenta, porém ao se aumentar este o ângulo do alívio excessivamente provoca-se uma diminuição da rigidez da aresta de corte por falta de suporte que pode originar falhas no processo de corte.

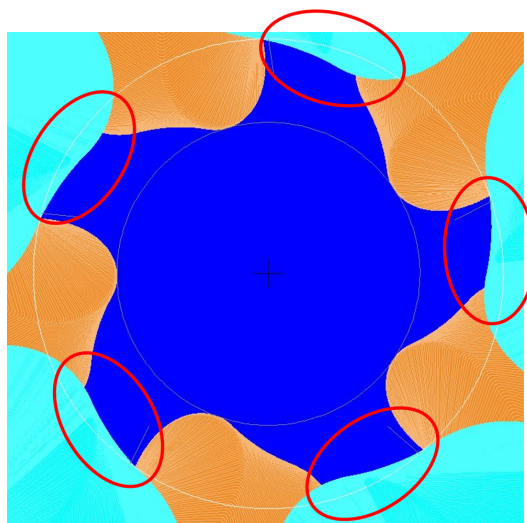


Figura 2.10: Alívio radial - *NumrotoPlus*, cortesia: *Palbit*

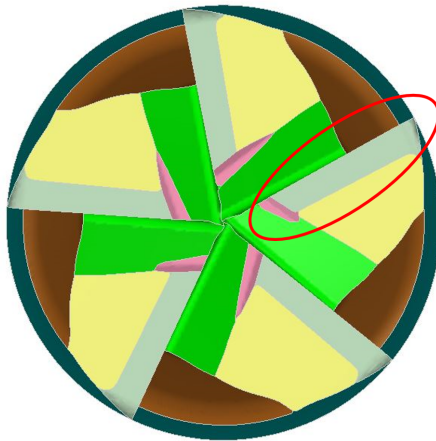


Figura 2.11: Alívio da face - *NumrotoPlus*, cortesia: *Palbit*

### Haste da Ferramenta

A haste da ferramenta (Figura 2.12) é a parte responsável pelo posicionamento e ligação da fresa à árvore (Palbit, 2021). Existem diversos formatos, consoante o tipo de aperto que se deseja efectuar, sendo que se encontram definidos por exemplo pela norma DIN 6535, destacando-se dois deles:

- Haste cilíndrica (DIN 6535 HA) – a haste é simplesmente reta sem quaisquer tipo de entalhes.
- Haste *Weldon* (DIN 6535 HB) – a haste tem uma face reta, onde será apertado um parafuso com o objetivo de corrigir o efeito de *pull-out* da ferramenta.

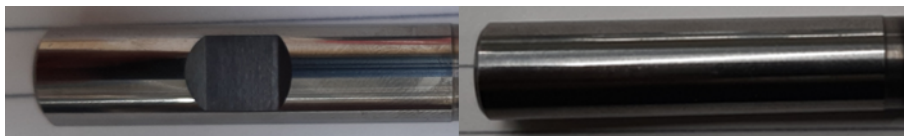


Figura 2.12: Haste da ferramenta (à esquerda - *Weldon*, à direita - cilíndrica), cortesia: *Palbit*

A haste é uma variável geométrica bastante importante pois sem ter um comprimento apropriado a ferramenta não terá a rigidez necessária para o corte. Wan et al. (2017b) estudaram um método no qual se obtém as forças envolvidas no corte através da medição da deflexão da haste chegando a resultados concordantes com os valores medidos por um dinamómetro *Kistler*.

### Seccionador de Aparas

O seccionador de aparas (Figura 2.13) trata-se de um pequeno rasgo efetuado na aresta de corte em certas posições ao longo do eixo da ferramenta. Devido à formação da apara, que por vezes pode não escoar da melhor forma, inserem-se estes pequenos entalhes, de modo a cortar a apara e ajudar ao seu escoamento. No caso de operações de desbaste



por vezes usa-se uma variante do seccionador de aparas denominado por *roughers*, que é apenas usado em operações de desbaste por prejudicar o acabamento superficial (Palbit, 2021).

O fabrico dos seccionadores de aparas envolve a execução de mais uma etapa com as mós no fabrico das fresas, aumentando o desperdício de tempo e o desgaste desnecessário das mós, sendo que o seccionar de aparas é efetuado apenas quando é necessário, porém Denkena et al. (2020) estudou se a fotoablação poderia ser uma alternativa viável pelo que concluiu que a forma da apara pode melhorar significativamente se o seccionador de aparas for fabricado por este processo.

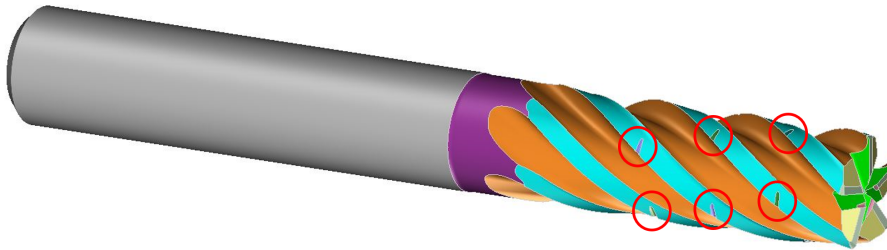


Figura 2.13: Seccionador de aparas - *NumrotoPlus*, cortesia: *Palbit*

### 2.1.3 Revestimentos

Os revestimentos são técnicas de proteção em que a superfície a proteger conserva a sua identidade. A utilização de revestimentos nas ferramentas de corte tem trazido grandes vantagens, nomeadamente a redução do desgaste, o melhoramento do acabamento superficial e o aumento do tempo de vida da ferramenta (Gowthaman et al., 2020).

#### Deposição física em Fase Vapor (PVD)

A deposição física em fase vapor é um dos processos de revestimento de última geração. Esta técnica é empregue em larga escala no revestimento de ferramentas de corte, com o objetivo de aumentar a sua resistência ao desgaste e o seu tempo de vida. O PVD (*Physical Vapor Deposition*) é um método que permite revestir uma geometria com filmes finos de revestimento (Baptista et al., 2018; Sandvik, 2021).

O PVD é um método que se assemelha com a pulverização catódica na medida em que ambas as técnicas utilizam a grande mobilidade das espécies químicas em fase gasosa, e a sua fácil condensação sobre uma superfície. Porém, enquanto a pulverização catódica se baseia na aplicação de uma corrente elétrica em dois eletrodos, nos quais irá haver uma pulverização do cátodo depositando uma camada fina de material no ânodo e nas paredes da câmara de vácuo, no PVD existem técnicas distintas para a sua aplicação (Bobzin, 2017; Deng et al., 2020).

A evaporação é uma das formas de PVD, e é feita aquecendo o material a depositar numa câmara de vácuo. As temperaturas andam na ordem dos 400 a 600 °C, e atingindo estas temperaturas, os átomos e as moléculas evaporam-se termicamente e viajam através do vácuo, onde se irão depositar sobre o substrato. Apesar de ser uma técnica simples, esta é aquela onde se tem um menor rendimento (Bobzin, 2017; Deng et al., 2020).

O *sputtering* é um processo que começa com a preparação da câmara de vácuo, ou seja, o aquecimento da câmara enquanto as bombas de vácuo diminuem a pressão dentro da câmara. De seguida, a câmara é cheia de argon e o alvo, de onde vão sair os eletrões, torna-se catódico através da aplicação de uma tensão (até 5000V). Posteriormente, é efetuado o revestimento propriamente dito, em que o material a ser depositado é projetado contra a superfície (Baptista et al., 2018).

As fresas e pastilhas de corte onde é aplicado o PVD são normalmente recomendadas por terem arestas de corte tenazes e afiadas, sendo também recomendada a aplicação do PVD para materiais com tendência à abrasão (Sandvik, 2021).

## 2.2 Materiais a maquinar

### 2.2.1 Aços inoxidáveis

O aço inoxidável trata-se de um dos materiais metálicos mais importantes nos dias de hoje. É possível comprová-lo pelo número e diversidade de aplicações atribuídas a este material, sendo que podem ir de utensílios de cozinha à indústria aeroespacial e até mesmo aplicações em centrais nucleares (Fan et al., 2021; Gowthaman et al., 2020; Lo et al., 2009; Uysal et al., 2015).

Os aços inoxidáveis são considerados como materiais difíceis de maquinar devido essencialmente à sua tendência a encruar durante a maquinagem, à sua alta resistência à tração e à sua baixa condutividade térmica. Segundo autores como Zhang et al. (2019) e Lin (2002) a maquinagem de aço inoxidável geralmente resulta em baixos tempos de vida das ferramentas, baixas taxas de material removido, grandes forças de corte e consumos elevados de potência (Gowthaman et al., 2020).

Aço inoxidável é uma liga de ferro e carbono com a particularidade especial da elevada resistência à corrosão. Esta resistência é dada pela junção do crómio que deve consistir em pelo menos 11% da liga. Assim, forma-se uma película de óxido de crómio, aderente à superfície que a irá proteger. Não só o Crómio é adicionado, mas também o Níquel e o Molibdénio, entre outros elementos dependendo das propriedades que se desejar conferir à liga (Fan et al., 2021; Gowthaman et al., 2020; Lo et al., 2009).

Existem diversos tipos de Aços Inoxidáveis com diferentes composições químicas. Para facilitar a distinção entre os aços inoxidáveis existem três formas de os separar:

- **Propriedades de aplicação**

As propriedades de aplicação têm a ver com a resistência à corrosão, a resistência ao calor e a resistência à fluência (EN10088-1, 2005).

- **Elementos de liga significativos**

Como se sabe, nos aços em geral e também nos aços inoxidáveis, a inserção de elementos conferem novas propriedades na liga, sendo exemplo disso elementos como o crómio e níquel, molibdénio, manganês, enxofre, entre outros (EN10088-1, 2005).

- **Microestrutura**

Existem diversos tipos de microestrutura nos aços inoxidáveis, como a Ferrite, a Martensite, a Austenite, o Duplex como se pode ver na Figura 2.14 (EN10088-1, 2005; Outokumpu Stainless AB, 2013).

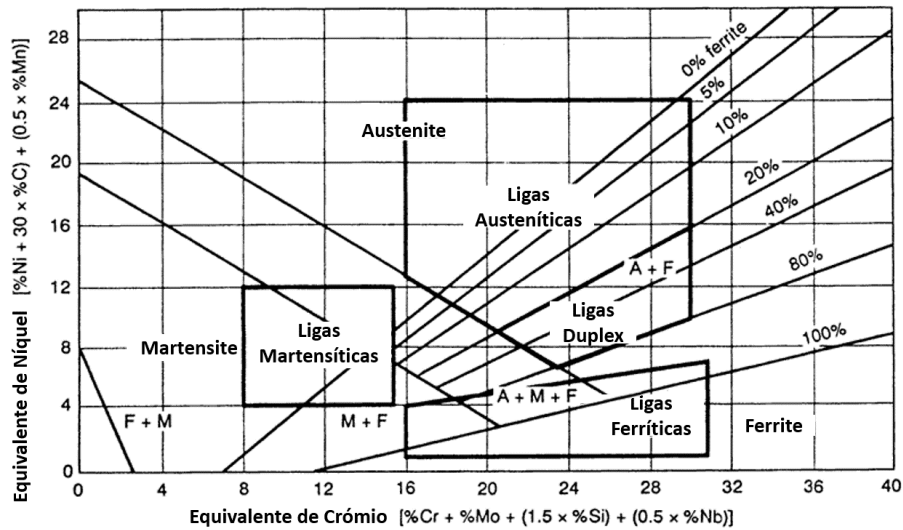


Figura 2.14: Diagrama de Schaeffler para Aço Inoxidável (Adaptado de (Stainless, 2021))

### Aço inoxidável ferrítico

As ligas ferríticas geralmente têm uma percentagem de crômio entre os 11.2 e 19 %. Estes aços possuem propriedades ferromagnéticas, e fragilidade abaixo de uma determinada temperatura de transição (EN10088-1, 2005; Outokumpu Stainless AB, 2013).

O aço inoxidável ferrítico apresenta características como a má soldabilidade devido à sua sensibilidade intragranular para a corrosão e fragilidade (EN10088-1, 2005).

### Aço inoxidável martensítico

O aço inoxidável martensítico representa o menor grupo destes aços. Este é formado a partir da austenite a partir de um tratamento térmico acima de 900°C, ou através de trabalho a frio (EN10088-1, 2005; Outokumpu Stainless AB, 2013).

As ligas martensíticas apresentam propriedades ferromagnéticas, sendo que possuem também uma elevada resistência que pode ser amplificada com a aplicação de tratamentos térmicos adequados (EN10088-1, 2005).

### Aço inoxidável austenítico

O aço inoxidável austenítico é a forma mais comum deste tipo de aços. Tem como particularidade ser a única destas microestruturas sem propriedades ferromagnéticas. Não se consegue proceder ao endurecimento destas ligas por tratamentos térmicos, porém o seu endurecimento provém do encruamento decorrente da sua maquinagem (EN10088-1, 2005; Outokumpu Stainless AB, 2013).

### Aço inoxidável duplex

As ligas duplex apresentam uma microestrutura constituída por 30 a 50 % de Ferrite, sendo o restante Austenite. Tratam-se de ligas de alta resistência mecânica e à corro-

são. Formam-se através das ligas de ferrite a partir de 600°C formando a austenite que complementa a microestrutura (EN10088-1, 2005; Outokumpu Stainless AB, 2013).

### 2.2.2 Desgaste na maquinagem do Aço Inoxidável

Ao ser um material tão complexo de maquinar, com o aumento das forças de corte que são necessárias para a maquinagem deste material, denota-se também o aumento do desgaste (Gowthaman et al., 2020). O desgaste pode surgir de várias modos, como:

- **Adesão**

A adesão é um dos mecanismos de desgaste mais frequentemente vistos na maquinagem do aço inoxidável. Como se sabe, a adesão surge devido a fatores como a alta pressão, temperaturas elevadas e a compatibilidade metalúrgica entre os materiais das ferramentas de corte e do aço inoxidável (Gowthaman et al., 2020; Zhang et al., 2019).

Devido à baixa condutividade térmica dos aços inoxidáveis e ao endurecimento provocado pelo encruamento do material, como referido por Varghese et al. (2018) as temperaturas envolvidas no corte são bastante elevadas, como tal, existe a tendência da criação de microsoldaduras e da aderência de material à ferramenta, como a adesão da apara, formando assim aresta postiça de corte (Lin, 2002).

- **Difusão**

A difusão é um mecanismo de desgaste com ativação térmica. Como tal, na maquinagem de ligas termorresistentes com velocidades de corte elevadas, este tipo de desgaste vai ter elevadas proporções, devido essencialmente às diferenças na concentração química dos diferentes elementos na estrutura do material (Corrêa et al., 2017; Davim, 2008; Wang et al., 2015).

A difusão pode manifestar-se de duas formas diferentes. De modo direto, pela perda de elementos químicos da ferramenta para a peça, como o caso da alteração química do revestimento da ferramenta, enfraquecendo-a. Também se pode manifestar de modo indireto pelo enfraquecimento da estrutura da ferramenta (Davim, 2008; Wang et al., 2015).

- **Abrasão**

O desgaste abrasivo deve-se essencialmente à interferência de partículas duras presentes nas superfícies, possivelmente originadas por outros mecanismos de desgaste, que ao haver deslizamento irão funcionar como mini arestas de corte, danificando a superfície a ser maquinada e também a ferramenta de corte. Além de se obter mau acabamento superficial, também o desgaste da ferramenta será muito significativo, e pode ser notado com o aparecimento de ranhuras na superfície da ferramenta (Davim, 2008; Wang et al., 2015).

Uma possível solução para reduzir o desgaste por abrasão passa por se aumentar a dureza do revestimento aplicado à ferramenta, possibilitando assim uma maior resistência à abrasão provocada pelas partículas de elevada dureza, aumentando assim a vida útil da ferramenta (Corrêa et al., 2017; Davim, 2008; Wang et al., 2015).

- **Oxidação**

Com as elevadas temperaturas, consequentes de elevadas velocidades de corte, alguns elementos do material da ferramenta reagem com o oxigênio presente no ar, nomeadamente em zonas como na face de saída da ferramenta. Verifica-se assim um mau acabamento superficial e a redução da vida útil da ferramenta. Porém, normalmente este não se trata de um mecanismo de desgaste muito relevante no caso dos aços inoxidáveis devido à sua elevada resistência à corrosão (Davim, 2008; Wang et al., 2015)

### 2.2.3 Prevenção de problemas na maquinagem do Aço Inoxidável

Na maquinagem do aço inoxidável, pelos motivos mencionados anteriormente, é preciso ter precauções especiais. Gowthaman et al. (2020) evidencia algumas formas de prevenção de problemas que se podem tomar de modo a se obter o melhor resultado da maquinagem, como por exemplo:

- **Uso de ferramentas revestidas**

O revestimento das ferramentas melhora a sua resistência ao desgaste superficial em especial na fresagem de ligas tão difíceis de maquinar como os aços inoxidáveis, melhorando a performance das ferramentas e aumentando o seu tempo de vida (Gowthaman et al., 2020; Uysal et al., 2015).

- **Maximizar a profundidade de corte e diminuir o avanço**

O uso de estratégias de maquinagem mais eficientes onde se maximiza a profundidade de corte permite distribuir o desgaste e principalmente o calor gerado por todo o comprimento de corte, o que neste caso tem bastante relevância devido à baixa condutividade térmica do aço inoxidável (Gowthaman et al., 2020; Harvey Performance Company, 2017).

- **Uso de seccionador de aparas**

Por ser um maquinao difícil de maquinar, e devido à complexa formação da apara, o seccionador de aparas é uma ajuda adicional ao escoamento e libertação da apara que tende a causar problemas de desgaste na ferramenta pela sua adesão. (Gowthaman et al., 2020; Uysal et al., 2015).

- **Elevado uso de fluido de corte**

O uso de fluido de corte na maquinagem de aços inoxidáveis constitui uma elevada importância ao ajudar no escoamento da apara, mas principalmente na absorção do calor gerado, reduzindo a quantidade de calor que irá para a ferramenta, aumento a sua durabilidade (Gowthaman et al., 2020; Uysal et al., 2015).

## 2.3 *High Efficiency Milling* e Fresagem Trocoidal

A evolução dos sistemas de maquinagem CAM tem sido possível devido ao progresso tecnológico crescente nos últimos anos. Desta forma, é possível definir novas estratégias de maquinagem que apresentam uma maior eficiência. Contudo, além da melhoria das

estratégias de maquinagem por novas trajetórias mais complexas e eficazes, é necessário que existam ferramentas de corte apropriadas para as operações em questão.

Segundo autores como Ötkür & Lazoglu (2007), *High Efficiency Milling* (HEM) baseia-se no uso de um menor penetramento radial enquanto o penetramento axial é maximizado. Isto vai permitir que o desgaste seja disperso por toda a superfície de corte e que o calor seja também dissipado de melhor forma reduzindo o risco de falha da ferramenta. Os principais objetivos do HEM são que a ferramenta atinja um maior tempo de vida, que se consiga maquinar um maior número de peças por ferramenta, ciclos de maquinagem mais rápidos, maior qualidade das peças obtidas, trajetórias da ferramenta mais fiáveis, entre outros (Amaro et al., 2020; Harvey Performance Company, 2017; Pleta et al., 2017).

Neste momento existem vários *softwares* CAM que já usam esta estratégia, sendo que dispõem de módulos, com os nomes *High Efficiency Milling* ou *Dynamic Milling*, que permitem gerar trajetórias com base nos princípios do HEM (Harvey Performance Company, 2017).

Para recorrer ao HEM, é necessário o uso de ferramentas apropriadas, assim sendo, as melhores ferramentas de corte para HEM são:

- Ferramentas com um maior número de hélices, de modo a aumentar a taxa de remoção de material;
- Ferramentas com maior diâmetro do núcleo, com o propósito de aumentar a rigidez;
- Ferramentas com *pitch* variável, de modo a reduzir os harmónicos.

Uma das preocupações do HEM é o *chip thinning*. O *chip thinning* é um fenómeno consequente da variação do penetramento radial, visto que, ao variar este penetramento os dentes da ferramenta vão cortar quantidades de material diferentes, obtendo aparas de diferentes espessuras, o que provoca desgaste prematuro das ferramentas, mau acabamento superficial e ciclos de maquinagem ineficientes. Como tal, o HEM contorna este problema ao garantir que cada aresta de corte da ferramenta corta a mesma espessura de apra a cada rotação (Harvey Performance Company, 2017).

### 2.3.1 Fresagem Trocoidal

A fresagem trocoidal trata-se de um método de maquinagem, pertencente ao HEM, que permite maquinar uma *slot* com uma largura superior ao diâmetro da ferramenta. Nesta estratégia a fresa desenvolve uma trajetória que se baseia numa série de cortes elipsóides progressivos, a que se chama trajetória trocoidal (Figuras 2.15 e 2.16) (Pleta et al., 2017).

Na fresagem trocoidal, exatamente por ser uma forma de HEM, maximiza-se o penetramento axial e, ao se efetuarem pequenas iterações em espiral, garante-se um baixo penetramento radial que promove uma redução da carga e desgaste na ferramenta (Ötkür & Lazoglu, 2007). As principais vantagens que se observam com a utilização da fresagem trocoidal são:

- Diminuição das forças de corte;
- Redução do calor;
- Melhor precisão na maquinagem;

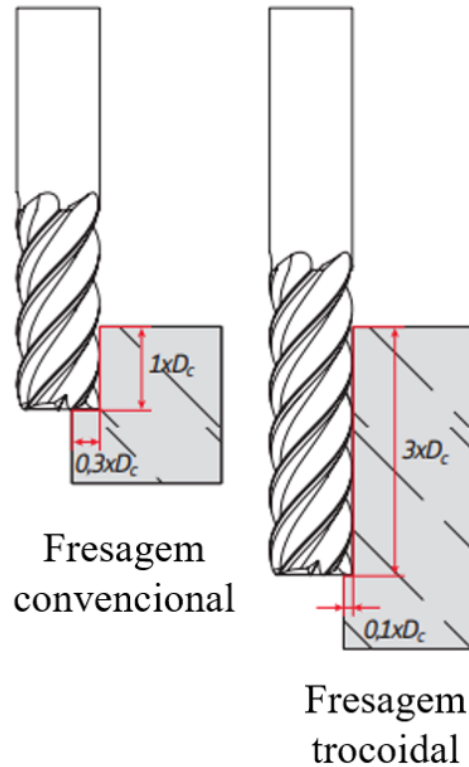


Figura 2.15: Fresagem Convencional vs. HEM (adaptado de (Palbit, 2021))

- Maior tempo de vida da ferramenta;
- Uma ferramenta adequa-se à fresagem de *slots* de diferentes tamanhos.

Amaro et al. (2020) testaram esta estratégia na maquinagem de aço inoxidável duplex comparando com a fresagem convencional. Concluiu então que a fresagem trocoidal tem vantagens em termos produtivos, visto que duplicando a velocidade de corte aplicada na fresagem convencional manteve-se o tempo de vida da ferramenta, aumentando também a taxa de remoção de material. Os autores concluíram também que isto se deve ao desgaste distribuído por toda a aresta de corte e a capacidade de dispersão de calor, consequente do curto tempo de contacto entre a peça e a ferramenta de corte.

Porém, Gross et al. (2020) compararam também, para diferentes operações, a fresagem trocoidal com a fresagem convencional, e concluiu que as forças de corte foram sempre inferiores na fresagem trocoidal, mas nem sempre o desgaste usado e as vibrações são menores. Porém, o autor usou alguns parâmetros, um avanço radial igual ao diâmetro da fresa, que contraria o princípio da fresagem trocoidal de minimizar o penetramento radial e maximizar o penetramento axial.

## 2.4 Vibrações na Fresagem

O interesse pela estimativa das vibrações nas operações de maquinagem, relativamente não só às máquinas como às ferramentas, tem crescido nos últimos anos. Os efeitos das

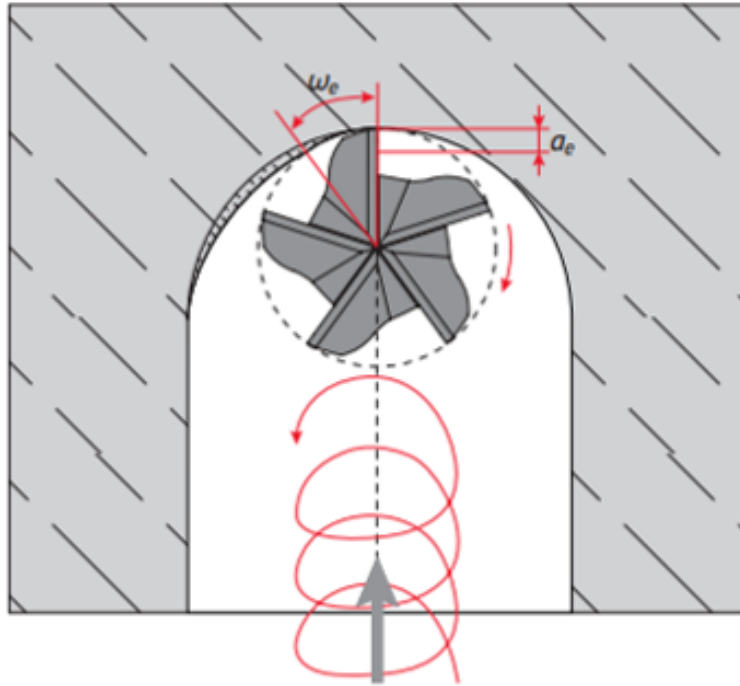


Figura 2.16: Fresagem Trocoidal (Palbit, 2021)

vibrações, ou trepidações no seu estado mais grave, são bastante prejudiciais à maquiagem no que toca à qualidade das superfícies obtidas, à taxa de remoção de material e consequentemente à produtividade, eficiência e em aspetos económicos e ecológicos, pelo desperdício de dinheiro e matéria-prima (Cao et al., 2013; Yue et al., 2019).

A investigação nesta área tem crescido e centra-se em dois aspetos principais, sendo eles a previsão e a deteção das vibrações. Apesar destes serem os principais focos de investigação, é de notar que tem havido desenvolvimentos nomeadamente no controlo das vibrações através da adição nas máquinas de sensores, atuadores e controladores que contrariem os efeitos da vibração, de modo a estabilizar o sistema. Salienta-se também o estudo feito nas próprias ferramentas, em termos de geometria para se obter produtos que sejam eficientes também nesta área (Yue et al., 2019; Zhuo et al., 2020).

#### 2.4.1 Tipos de Vibrações

Na fresagem as vibrações podem surgir de modos distintos. Como tal, destacam-se dois tipos de vibrações:

- Vibração forçada;
- Vibração *self-excited*.

##### Vibração forçada

A vibração forçada ocorre através da transmissão de vibrações geradas pela máquina em si, por defeitos em órgãos de máquinas como rolamentos e engrenagens e principalmente devido ao contacto periódico entre os dentes da fresa com a peça. As forças de corte



têm um grande peso neste tipo de variações fundamentalmente ao terem uma magnitude variável provocam uma variação da espessura da apara que induz o *regenerative chatter*.

A influência da máquina ferramenta ocorre devido à rotação da árvore. Previamente à maquinagem são definidas certas condições de corte, nomeadamente a velocidade de rotação da árvore. A velocidade de rotação da árvore é uma variável fundamental pois ela provoca um fenómeno periódico de vibração pelo que se espera ao analisar os valores de vibração em ter um pico de amplitude para a frequência da árvore calculada pela equação 2.1:

$$f_s = \frac{n}{60} \quad (2.1)$$

As fresas apresentam normalmente um número de arestas de corte superior a um, ou seja, a fresagem trata-se de um processo de corte interrompido o que quer dizer que vão existir diversas solicitações periódicas entre os dentes da ferramenta e a peça. Desse modo, tal como constatado por Norberto López de Lacalle et al. (2011), existe uma frequência onde irá haver um pico de amplitude de vibração correspondente ao fenómeno da passagem de cada um dos dentes na peça. Sendo  $z$  o número de dentes, calcula-se a *Tooth passing frequency* através da equação 2.2:

$$f_{TPF} = \frac{n \times z}{60} \quad (2.2)$$

Contudo, este efeito evidencia-se em outras frequências em que os seus valores sejam múltiplos do valor de  $f_{TPF}$ , como evidenciado por Insperger et al. (2003), resultando na equação 2.3.

$$f_{TPF} = \frac{i \times n \times z}{60}, \quad i = 1, 2, \dots \quad (2.3)$$

### **Vibração *self-excited***

A vibração *self-excited* pode surgir de duas formas, *regenerative chatter* e *doubling - repetitive impact chatter*. Segundo Quintana & Ciurana (2011) *Regenerative chatter* é uma forma de trepidação que surge devido às ondulações presentes nas superfícies. As ondulações correspondem ao mau acabamento superficial deixado pela ferramenta de corte e pela variação da espessura da apara. Este efeito acumula-se ao longo das passagens sobrepostas da ferramenta amplificando ainda mais a variação da espessura da apara induzindo variações nas forças de corte que geram este tipo de vibrações (Quintana & Ciurana, 2011; Yue et al., 2019).

O *doubling chatter*, ou *repetitive impact chatter* trata-se de uma forma de vibração que ocorre em circunstâncias em que o sistema possui uma baixa rigidez dinâmica, como por exemplo ao se usar ferramentas em que a relação entre o diâmetro de corte e o comprimento não útil da ferramenta seja superior a 7, ou pode surgir em condições de corte interrompido onde a largura de corte tem valores reduzidos. Este tipo de vibração pode também ser induzido com a variação da espessura de apara, ou seja, ao se cortar alternadamente grandes e baixas espessuras de material, serão geradas forças distintas de corte, uma força mais elevada ao se cortar apara com maior espessura que estará em fase com a frequência de corte, e uma força de corte mais baixa correspondente ao corte de uma apara de menor espessura que estará desfasada da frequência de corte, resultando em vibrações no sistema (Norberto López de Lacalle et al., 2011).

### 2.4.2 Detecção das vibrações

Na detecção das vibrações não é necessário fazer mudanças estruturais na máquina, ou seja, toda a instrumentação é efetuada pela adição de sensores que efetuarão medições enquanto a máquina trabalha. Como tal, existem diversas formas da aquisição de dados, podendo ser adquiridos como aceleração, som, forças de corte, entre outros (Quintana & Ciurana, 2011; Yue et al., 2019; Zhuo et al., 2020).

Em termos de instrumentação, é mais comum o uso de acelerómetros. Através da montagem de um acelerómetro na árvore e com uma placa de aquisição de dados obtêm-se valores de aceleração em domínio de tempo. Existem três formas de analisar as frequências em termos de amplitude, aceleração, velocidade ou deslocamentos. A diferença recai na gama de frequências inerentes ao processo que está a ser analisado. Para valores abaixo de 10 Hz é aconselhado o uso dos deslocamentos, entre 10 e 1000 Hz o uso de velocidades e acima de 1000 Hz o uso de acelerações. Isto deve-se à sensibilidade que é apresentada para as amplitudes para cada tipo de unidades, conferindo uma maior precisão à análise (Girdhar & Scheffer, 2004; Mohanraj et al., 2020).

A análise de vibrações na fresagem tem valores de frequência compreendidos normalmente entre 10 e 1000 Hz, pelo que o uso das velocidades é o mais correto em termos de amplitude de vibração. Porém, estes dados podem ser analisados em dois domínios diferentes. O domínio de tempo permite uma análise mais quantitativa pela atribuição de valores à vibração, nomeadamente pelo uso do RMS. Diversos autores utilizam o RMS (Equação 2.4) para obter um valor da energia associada à vibração, traduzindo a severidade da vibração num valor que pode ser comparado entre ensaios (Girdhar & Scheffer, 2004; Mohanraj et al., 2020).

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (2.4)$$

O estudo das amplitudes de vibração em domínio de frequências trata-se de um método muito usado na avaliação das vibrações. Este método começa pela passagem dos dados em domínio de tempo para domínio de frequências. Marouvo et al. (2021) traduz os dados de domínio de tempo para domínio de frequências com recurso a uma transformada rápida de Fourier (FFT) chegando a um gráfico de valores de amplitude de vibração em função das frequências. Neste género de gráficos denotam-se vários picos de frequências, contudo alguns destes picos são esperados pelo próprio comportamento da fresa e da máquina tal como se referido anteriormente como a frequência da árvore (Equação 2.1) e frequência relativa à passagem dos dentes da fresa na superfície (Equação 2.3).

Além destes fenómenos podem existir outros picos que correspondem normalmente ao ambiente envolvente, principalmente se o ensaio for realizado em ambiente industrial, sendo que por exemplo pode surgir um pico nos 50 Hz e nos 100 Hz que correspondem à frequência da corrente elétrica (Marouvo et al., 2021).

### 2.4.3 Influência da Geometria das Fresas nas Vibrações

Como se viu anteriormente, a vibração depende de parâmetros como as condições de corte, o material a maquinar, da própria máquina a utilizar, porém o parâmetro que neste caso pode ser melhorado é a geometria das fresas utilizadas. Este tópico tem sido

objeto de estudo, e conclui-se que algumas das variáveis na construção das fresas têm um grande impacto na prevenção e redução da vibração (Girdhar & Scheffer, 2004).

O Passo é uma das variáveis geométricas mais importantes no combate às vibrações. Ao se manter um passo constante entre as arestas de corte, promove-se a importância dos harmônicos, aumentando apenas o *Regenerative Chatter*. Ao se variar o ângulo entre as arestas de corte provoca-se um desfasamento que irá eliminar o efeito dos harmônicos, reduzindo assim o efeito do *regenerative chatter*, diminuindo as forças de corte envolvidas no sistema e promovendo a qualidade superficial (Dong Yang, 2015; Niu et al., 2017).

Stepan et al. (2018) concluiu que a variação do ângulo de hélice ajuda efetivamente na redução do *Regenerative Chatter*, porém concluiu que para melhores resultados o Passo tem de ser afinado, de acordo com um modelo matemático desenvolvido e fazendo comparações com outras fresas de passo variável, concluiu que a calibração é realmente necessária para obter os melhores resultados.

O Ângulo de Hélice atua, no caso das vibrações, pela redução de harmônicos de maior ordem. Como tal, reduz conseqüentemente o impacto do *regenerative chatter* (Buj-Corral et al., 2011; Chen et al., 2018; Zatarain et al., 2006).

Ao aumentar o ângulo de hélice, os perfis de ondulação na superfície ficam mais próximos, reduzindo assim a ondulação das superfícies que provoca a variação da espessura da apara e forças de corte. Com isto, obtém-se um acabamento superficial superior, redução de forças de corte e vibrações (Ema & Davies, 1989; Zatarain et al., 2006).

## 2.5 Rugosidade das superfícies

A rugosidade superficial trata-se de um indicador de qualidade medido nas superfícies maquinadas com o objetivo de obter valores para avaliar o estado da superfície. Os valores de rugosidade podem ser obtidos para fazer uma análise comparativa entre condições de corte, entre máquinas ferramenta, e também entre ferramentas de corte (Yasir et al., 2016).

A rugosimetria é uma técnica de análise altamente empregue na prática industrial devido à sua facilidade de execução com recurso a rugosímetros. O rugosímetro mais comum é o rugosímetro eletromecânico que funciona através da palpagem da superfície obtendo um perfil de rugosidade com as variações na superfície, identificando picos e vales na superfície. Para a obtenção dos valores de rugosidade a medição é efetuada num dado comprimento da superfície. Esse comprimento divide-se nos seguintes segmentos representados na Figura 2.17:

- $L_e$  - Comprimento de base (*cut-off*)

Comprimento normalizado em função da rugosidade que a superfície deverá ter. Os valores de  $L_e$  podem ser 0.08 - 0.25 - 0.8 - 2.5 - 8 e 25. Para processos de corte como a fresagem 0.8 mm é o valor mais usado, visto que a rugosidade  $R_a$  está compreendida entre 2 e 5  $\mu m$ .

- $L_m$  - Comprimento de cálculo

Corresponde a cinco vezes o comprimento de base (Equação 2.5).

$$L_m = 5 \times L_e \quad (2.5)$$

- $L_v$  - Primeiro comprimento de palpagem  
Corresponde à face de aceleração do dispositivo de medição, logo não é contabilizado para efeitos de cálculo Sahoo (2011).
- $L_n$  - Último comprimento de palpagem  
Corresponde à face de desaceleração do dispositivo de medição, logo não é contabilizado para efeitos de cálculo Sahoo (2011).
- $L_t$  - Comprimento de palpagem ou exploração  
Corresponde à conjugação dos comprimentos referidos anteriormente, sendo o comprimento percorrido pelo apalpador.

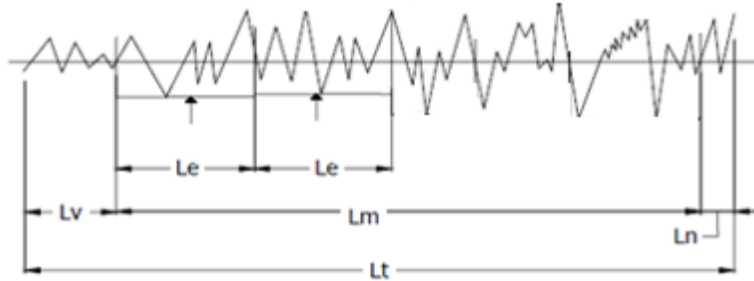


Figura 2.17: Comprimentos de medida usados na rugosimetria, adaptado de: (Plásticos, 2021)

### 2.5.1 Parâmetros de amplitude de rugosidade

Após a aquisição do perfil de rugosidade é necessário obter valores de rugosidade. A rugosidade das superfícies pode ser caracterizada através de parâmetros de amplitude, espaçamento ou híbridos. Os parâmetros de amplitude caracterizam os desvios que ocorrem ao longo do perfil na vertical. De acordo com Sahoo (2011) existem diversos parâmetros de amplitude como a Rugosidade média aritmética, a Rugosidade RMS (rugosidade média geométrica), *Skewness*, *Kurtosis* e a Profundidade média da Rugosidade.

#### Rugosidade média aritmética - $R_a$

A Rugosidade média aritmética (Equação 2.6) trata-se da média do valor das ordenadas em relação à linha média do perfil. Este parâmetro é usado em larga escala devido à sua simplicidade de aplicação e à sua insensibilidade a alguns picos e vales mais descabidos. Porém, a sua principal desvantagem é o facto de não distinguir entre perfis mais uniformes e perfis mais abruptos, pois perfis bastante diferentes podem obter o mesmo valor de  $R_a$ . Para maquinagem mais comum os valores típicos de  $R_a$  estão entre 3 e 10  $\mu m$ , para maquinagem mais precisa entre 1 e 3  $\mu m$ , e para retificação os valores encontram-se entre 0.2 e 1  $\mu m$  (Sahoo, 2011).

$$R_a = \frac{1}{L_m} \int_0^{L_m} |Z(x)| dx \quad (2.6)$$

### Profundidade média da rugosidade - $R_z$

A profundidade da rugosidade baseia-se na distância entre o maior pico e o maior vale dentro de um determinado comprimento de base. Porém, existem duas formas distintas de se obter a profundidade média da rugosidade:

- ISO 468

Pela ISO 468 (Equação 2.7) o valor de  $R_z$  é obtido pela distância entre os 5 pontos mais altos dos picos e os 5 pontos mais baixos dos vales.

$$R_z = \frac{1}{5} \left( \sum_{i=1}^5 Z_{pi} - \sum_{i=1}^5 Z_{vi} \right) \quad (2.7)$$

- DIN 4768

De acordo com a norma DIN 4768 (Equação 2.8) o valor de  $R_z$  é obtido através da média de 5 valores individuais da profundidade da rugosidade.

$$R_z = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 Z_{zi} \quad (2.8)$$

### 2.5.2 Fatores que influenciam a rugosidade

Todos os processos de maquinagem levam a defeitos geométricos nas superfícies maquinadas. Deste modo, para minimizar estes efeitos é necessário que se saiba de onde eles surgem. Zhang et al. (2015) enumera vários fatores que influenciam a rugosidade como as máquinas ferramenta, as condições de corte, a geometria da ferramenta, as condições ambientais, as propriedades do material, a formação da apara, o desgaste da ferramenta e as vibrações.

As condições de corte são um dos fatores mais estudados em diversos aspetos sendo um deles o acabamento superficial. Yasir et al. (2016) concluiu que o avanço é o parâmetro de corte com maior influência na rugosidade superficial, sendo que aumentando o avanço a rugosidade cresce, enquanto a velocidade de corte é o parâmetro que menos influencia. Airao et al. (2018) fez um estudo semelhante da influência das condições de corte, e além de confirmar as conclusões sobre a velocidade de corte e o avanço afirmou que o uso de fluido de corte diminui a rugosidade das superfícies Zhang et al. (2015).

As vibrações induzidas pela maquinagem deterioram o acabamento de superfície. Apesar de se saber que a existência de vibração causa problemas em termos do acabamento de superfície, não se consegue estabelecer uma relação entre a amplitude de vibração e a rugosidade. Tal é evidenciado por Seguy et al. (2008) que afirma que a previsão correta dos valores de rugosidade em função da vibração é muito difícil pela elevada complexidade do processo (Airao et al., 2018; Zhang et al., 2015).

## 2.6 Síntese

Na maquinagem de aços inoxidáveis o uso de ferramentas apropriadas será uma grande vantagem. Os aços inoxidáveis são muito complicados de maquinar devido a propriedades como a baixa condutividade térmica ou o encruamento que sofre durante a maquinagem, levando a um aumento da dureza durante o corte, tornando estes materiais muito resistentes a qualquer intervenção, pelo que a sua maquinagem tem de ser executada combinando estratégias de maquinagem mais eficientes com ferramentas de corte otimizadas, obtendo-se melhores resultados em termos de desgaste e vida da ferramenta, como melhor acabamento da superfície maquinada. Na prevenção de problemas na maquinagem do aço inoxidável deve-se considerar o uso de ferramentas revestidas, a maximização da profundidade de corte e diminuição do avanço, o uso de seccionador de aparas e o uso elevado de fluido de corte.

A otimização de ferramentas de corte pode passar por vários fatores, seja a escolha do melhor material, como a definição de uma geometria mais apropriada para o tipo de operação e material a maquinar. Existem diversas variáveis geométricas para a definição de uma fresa, sendo as mais importantes o ângulo de hélice e o passo. Estas variáveis influenciam largamente o comportamento da fresa em termos de rigidez, vibrações, desgaste da ferramenta e acabamento superficial. Apesar de não existir um estudo para a otimização destas variáveis em operações de fresagem trocoidal, relativamente a ferramentas que serão usadas em fresagem convencional, diversos autores concluem que maiores ângulos de hélice são benéficos, porém podem gerar um efeito de *pull-out* da ferramenta. Relativamente ao passo, na fresagem convencional sabe-se que o uso de ferramentas com passo variável fará com que a vibração gerada tenha valores de amplitude muito inferiores comparativamente a ferramentas com passo constante, ou seja, o ângulo entre as arestas de corte é igual entre todas as arestas de corte.

O uso de estratégias de maquinagem eficientes é uma prática crescente em ambiente industrial exatamente por se adequar a materiais difíceis de maquinar como é o caso dos aços inoxidáveis. Estas estratégias utilizam um penetramento axial máximo enquanto a largura de corte é mínima. Com a utilização de fresagem de alta eficiência existe uma diminuição das forças de corte, redução do calor gerado, melhor precisão na maquinagem, maior tempo de vida da ferramenta. Contudo, devem ser utilizadas ferramentas apropriadas para a maquinagem com recurso ao HEM, sendo que as ferramentas devem de ter um maior número de hélices, maior diâmetro do núcleo e devem ter passo variável. Para estas estratégias tanto o desgaste como o calor gerado foram distribuídos por todo o comprimento de corte da ferramenta, aumentando assim o seu tempo de vida, diminuindo as vibrações geradas e melhorando o acabamento superficial.

## Capítulo 3

# Procedimento Experimental

### 3.1 Construção dos Protótipos

O procedimento deste projeto inicia-se com a construção dos protótipos, desde a definição da sua geometria ao seu projeto e execução. A definição da geometria é efetuada a partir de um protótipo pré-existente resultante de estudos desenvolvidos pela PALBIT em trabalhos preliminares o qual será referido ao longo do relatório como Protótipo Inicial. O Protótipo Inicial em que a sua geometria da hélice é definida pelas variáveis apresentadas na Tabela 3.1. Como se pode ver, o Protótipo Inicial tem um ângulo de hélice constante com o valor de  $35^\circ$ , um passo variável com os ângulos  $72^\circ - 68^\circ - 76^\circ 69^\circ$  e com 5 hélices. Esta geometria vem de uma fresa já existente no catálogo de ferramentas e servirá como modelo para as variações a serem testadas.

Tabela 3.1: Dados da geometria do Protótipo Inicial

Variável	Valor
Número de Hélices	5
Ângulo de Hélice	Constante – $35^\circ$
Passo	Variável: $72^\circ, 68^\circ, 76^\circ, 69^\circ$

De modo a testar as duas variáveis geométricas principais no que concerne à hélice, definiu-se como essencial desenvolver protótipos com os quais fosse possível averiguar os seguintes aspetos:

- Influência entre passo constante e passo variável;
- Influência da variação do passo;
- Influência do ângulo de hélice.

Deste modo, definiram-se 5 fresas onde a fresa 1 seria uma fresa com um ângulo de hélice intermédio usado em situações semelhantes, ou seja, ferramentas aplicadas em fresagem de elevada eficiência, e com um passo constante para se exercer comparação

com fresas com o mesmo ângulo de hélice, mas passo variável. Desta variação surgem as fresas 2 e 3. Quando se possui uma fresa com 5 hélices significa que ao dividir  $360^\circ$  pelo número de hélices se resulta num passo constante de  $72^\circ$ . Na fresa 2 (Figura 3.1) observa-se uma variação de  $4^\circ$  em relação ao passo constante, sendo que os ângulos entre as hélices são de  $72^\circ$ ,  $72 - 4 = 68^\circ$  e  $72 + 4 = 76^\circ$ . O mesmo se aplica à fresa 3, sendo a variação de  $6^\circ$ .

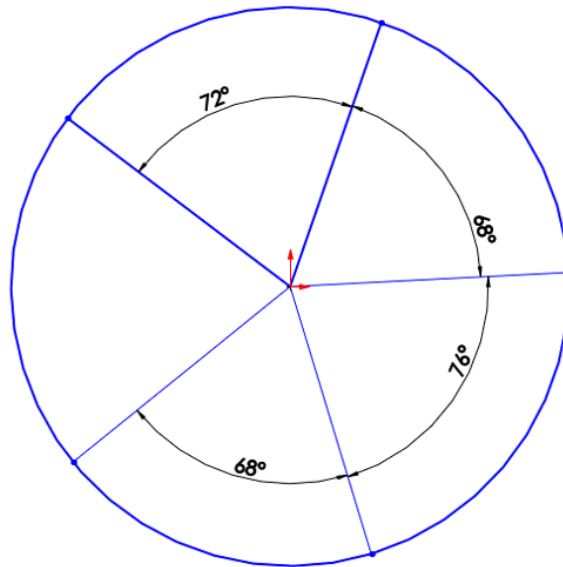


Figura 3.1: Passo variável relativo à fresa 2

Como se referiu no estado da arte diversos autores estudaram a influência do ângulo de hélice em fatores como o acabamento superficial e o desgaste da ferramenta relativamente à fresagem convencional, porém não existe bastante literatura no que concerne à fresagem de elevada eficiência. Como tal, definiram-se 3 fresas com passo constante e com ângulos de hélice diferentes. A fresa 1 com um ângulo de hélice intermédio de  $35^\circ$ , definindo uma fresa com um valor inferior e outra com um valor superior, ou seja, a fresa 4 com  $30^\circ$  e a fresa 5 com  $40^\circ$ . A geometria das fresas encontra-se definida na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Valores das variáveis geométricas relativas aos novos protótipos

Fresa	Variáveis Geométricas	
	Hélice	Passo
1	$35^\circ$	Constante
2	$35^\circ$	$72^\circ - 68^\circ - 76^\circ - 68^\circ$
3	$35^\circ$	$72^\circ - 66^\circ - 78^\circ - 66^\circ$
4	$30^\circ$	Constante
5	$40^\circ$	Constante



### 3.1.1 Programa de Execução da Fresa

Ao se definir a geometria pretendida para cada ferramenta, desenvolve-se o programa de execução da peça através do *software Numroto Plus* da empresa *NUM*. Trata-se de um *software* que está preparado para o desenho de ferramentas de corte ao atribuir valores para as variáveis geométricas obtendo assim as operações que são necessárias para a afiação, sendo possível definir também as mós necessárias para a execução das operações definidas. Deste modo inicia-se com um cilindro de metal duro (Figura 3.2) e termina-se o processo com uma fresa com a geometria definida (Figura 3.3).

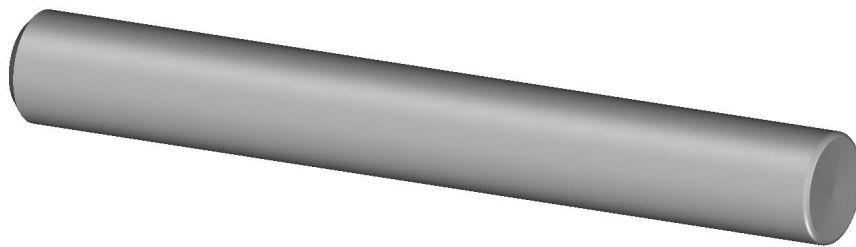


Figura 3.2: Cilindro Inicial - *NumrotoPlus*, cortesia: *Palbit*

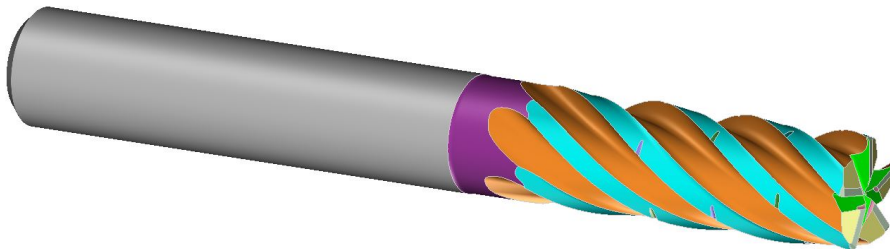


Figura 3.3: Protótipo inicial - *NumrotoPlus*, cortesia: *Palbit*

### 3.1.2 Fabrico da Fresa

O fabrico da fresa inicia-se com o cilindro de metal duro que será afiado (Figura 3.4). Para tal, transmite-se para a máquina o programa de execução da fresa. Na máquina são montados os cilindros e as mós. As mós são colocadas no armazém de ferramentas pelos operadores seguindo a ordem estabelecida no programa de execução da fresa.

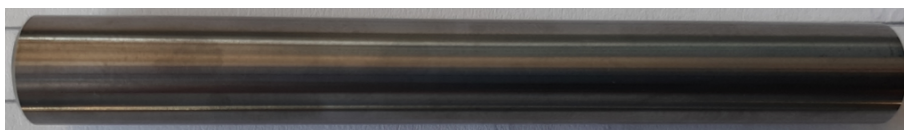


Figura 3.4: Cilindro de metal duro antes de ser afiado

Ao concluir o afiamento é adicionada uma face *Weldon* na haste da ferramenta (DIN 6535 HB). Desta forma é acrescentada uma face reta onde será apertado um parafuso evitando assim um efeito de *pull-out* da ferramenta, característico de fresas com ângulos de hélice mais elevados.

Após se fazer uma inspeção de qualidade, de modo a confirmar se os parâmetros estão conforme o que foi previamente definido, avança-se para o revestimento das ferramentas. O revestimento usado é do tipo PVD, mais concretamente PVD por *HiPIMS* (*TiAlSiN* com  $3\ \mu\text{m}$ ). Na Figura 3.5 pode-se ver a diferença entre a fresa por revestir em cima e por baixo a ferramenta já concluída com o revestimento efetuado.

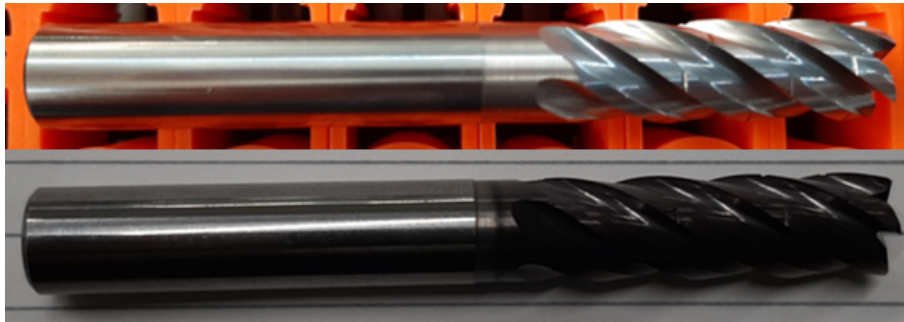


Figura 3.5: Fresa antes do revestimento (em cima) e depois do revestimento (em baixo)

Concluído o processo de revestimento obtém-se as ferramentas conforme a geometria pretendida (Figuras 3.6,3.7,3.8,3.9 e 3.10). Para finalizar é efetuada uma marcação laser de modo a se distinguir rapidamente as fresas em termos das variáveis geométricas associadas a cada fresa.

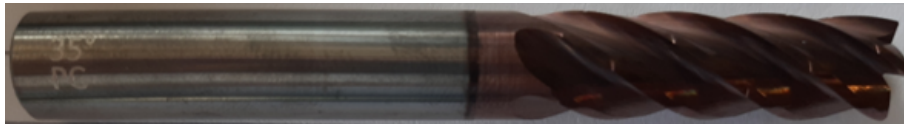


Figura 3.6: Fresa 1: Ângulo de Hélice -  $35^\circ$ , Passo constante



Figura 3.7: Fresa 2: Ângulo de Hélice -  $35^\circ$ , Passo 72-68-76-68



Figura 3.8: Fresa 3: Ângulo de Hélice -  $35^\circ$ , Passo 72-66-78-66



Figura 3.9: Fresa 4: Ângulo de Hélice -  $30^\circ$ , Passo constante



Figura 3.10: Fresa 5: Ângulo de Hélice -  $40^\circ$ , Passo constante

## 3.2 Maquinagem

### 3.2.1 Máquina

A máquina a utilizar nos ensaios trata-se de um centro de maquinagem CNC *MAS MCV 1270 POWER* da *Kovosvit MAS* (Figura 3.11). Trata-se de uma máquina de comando numérico com 3 eixos lineares, equipada com um controlador *Heidenhain*. Esta é uma máquina robusta que tem uma velocidade de rotação máxima da árvore de 8000 rpm, e a sua potência 47 kW, na Tabela 3.3



Figura 3.11: *MAS MCV 1270* (MAS, 2017)

Tabela 3.3: Especificações da máquina *MAS MCV 1270* (MAS, 2017)

<b>MAS MCV 1270</b>	
Potência [kW]	47
Velocidade de rotação máxima [rpm]	8000
Armazém de ferramentas [posições]	24
Distância Eixo X [mm]	1270
Distância Eixo Y [mm]	610
Distância Eixo Z [mm]	720
Comando Numérico	<i>Heidenhain</i>
Velocidade de avanço [mm/min]	1-40000

### 3.2.2 Material

#### Aço DIN 1.4404

O aço DIN X2CrNiMo17-22-2 é um aço de inoxidável austenítico. Na Tabela 3.4 pode-se ver as diferentes normas referentes a este material, enquanto na Tabela 3.5 pode-se ver a sua composição química. É de salientar que, tal como é característico nos aços inoxidáveis, a sua percentagem de Crómio é relativamente elevada, sendo neste caso de 17%, sendo esta liga constituída por outros elementos como o Manganês, o Níquel, o Molibdénio, Sílica, Carbono e Ferro. Na Tabela 3.6 encontram-se as principais propriedades físicas e mecânicas deste material.

Tabela 3.4: Normas correspondentes ao aço inoxidável DIN 1.4404

ISO	EN	AISI	GB
4404-316-03-I	1.4404	316L	022Cr17Ni12Mo2

Tabela 3.5: Composição química do aço DIN 1.4404

<b>Composição Química Aço DIN 1.4404 (%)</b>					
C	Mn	Cr	Ni	Mo	Si
0.03	1	17	12	2.5	1

Tabela 3.6: Propriedades físicas e mecânicas do aço DIN 1.4404

Módulo de Young [GPa]		Condutividade Térmica [W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]	Tensão de Rutura [MPa]	Tensão de Cedência [MPa]	Dureza [HV]
20°C	400°C				
200	172	15	1400	1300	430

### 3.2.3 Condições de Corte

Antes da realização dos ensaios é necessário apurar as condições de corte apropriadas relativamente ao material a maquinar conforme a estratégia selecionada, neste caso fresagem de alta eficiência. Para a realização do ensaio foram obtidas as seguintes condições de corte, representadas na Tabela 3.7, para o ensaio no aço DIN 1.4404:

Tabela 3.7: Condições de corte para o aço inoxidável DIN 1.4404

DIN 1.4404	
$n = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times D}$ (rpm)	$\frac{1000 \times 140}{\pi \times 10} = 4556$
$V_c$ (m/min)	140
$f_z$ (mm/dente)	0.08
$F_z = f_z \times Z \times n$ (mm/min)	$0.08 \times 5 \times 4556 = 1782$
$a_p = 3 \times D$ (mm)	$3 \times 10 = 30$
$a_e = 0.1 \times D$ (mm)	$0.1 \times 10 = 1$

### 3.2.4 Procedimento

Iniciou-se o processo de maquinagem pela montagem da peça a maquinar na máquina usando uma prensa direcional de maxilas para garantir o aperto da peça, de modo a manter a posição durante o corte (Figura 3.12).

Através do *software* CAM foi definido um programa que consistiu na fresagem da parede usando todo o comprimento de corte da ferramenta, ou seja, o  $a_p = 30\text{mm}$  e retirando em cada passagem da fresa uma quantidade de material correspondente a 10% do diâmetro de corte da ferramenta, ou seja,  $a_e = 1\text{mm}$ . Este programa foi enviado do computador para a máquina já apresentada. Para efeito de estudo definiu-se que cada fresa faria cinco passagens de forma a se poder estudar o valor das vibrações, obtendo valores para cada uma das passagens obtendo um valor médio para cada fresa.

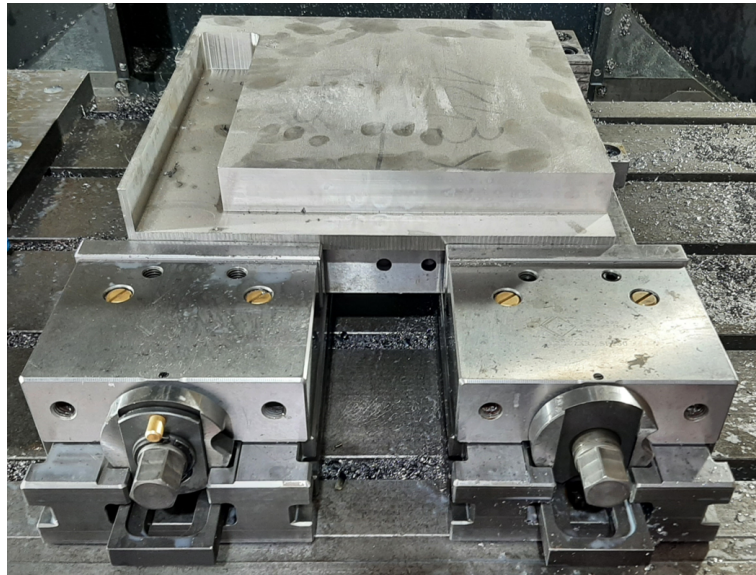


Figura 3.12: Montagem da peça para executar os ensaios

A trajetória da fresa (Figura 3.13), apesar de não se tratar de fresagem trocoidal, é demonstrativa do comportamento da fresa, sendo mais simples de estudar os resultados para esta trajetória.



Figura 3.13: Trajetória da ferramenta de corte


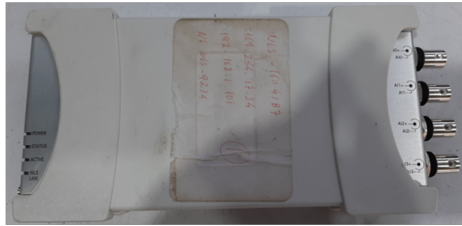
### 3.3 Obtenção de dados

#### 3.3.1 Aquisição das vibrações

##### Instrumentação

Para ser possível observar os resultados no que concerne à vibração no ensaio, instrumentou-se a máquina de modo a ser possível a recolha de dados que providenciem informação sobre as vibrações. Como tal, montou-se na árvore um acelerómetro que se ligou a uma célula de aquisição de dados, que por sua vez se encontrava ligada ao computador onde foi elaborado um programa no *software LabView* da *National Instruments*, que faz a aquisição dos dados, sendo estes tratados em *Matlab*, com recurso a um filtro de *Butterworth*, sendo os dados de aceleração convertidos para velocidade através de integração numérica cumulativa pelo método dos trapézios, apresentando os resultados da vibração em velocidade num determinado intervalo de tempo. Na Tabela 3.8 pode-se ver os componentes usados, e na Figura 3.14 a montagem efetuada para a aquisição dos dados.

Tabela 3.8: Componentes usados na aquisição dos dados das vibrações

Componente	Modelo	Imagem
Acelerómetro Triaxial	PCB 356 B08	
Célula de Aquisição de Dados	NI WLS-9163	

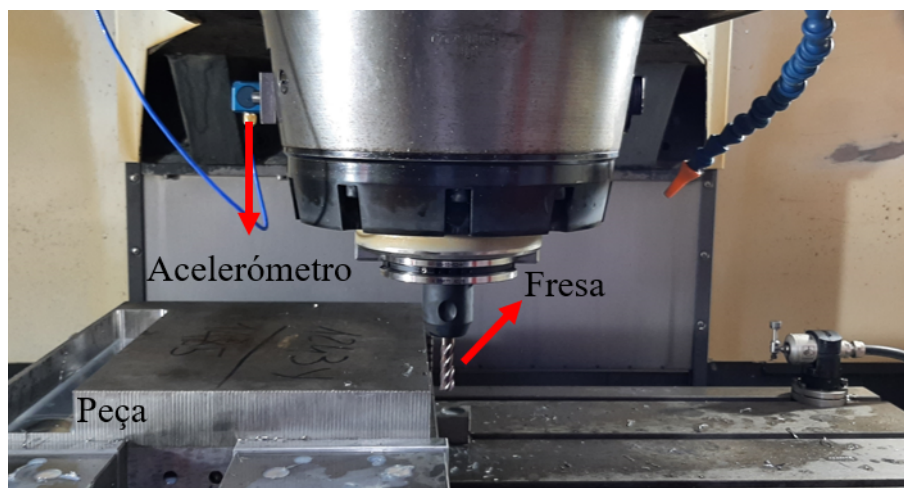


Figura 3.14: Montagem dos componentes para a aquisição dos dados das vibrações

O programa regista valores de aceleração referentes aos 3 eixos sensivelmente a cada 0.6 ms, visto que a frequência de aquisição dos dados é de 1613 Hz. Como tal, obtém-se valores de aceleração no domínio de tempo.

### Tratamento dos dados

A análise das vibrações pode ser efetuada de três modos distintos e em dois domínios diferentes, domínio de tempo e domínio de frequências. Os três modos distintos tratam-se da aceleração, velocidade e deslocamento, como foi descrito no Capítulo 2. Como tal, fez-se um primeiro teste de modo a confirmar qual o melhor modo de medir as vibrações, obtendo-se um valor no domínio de tempo que se passou a domínio de frequências como se pode visualizar na Figura 3.15.

Pelos resultados evidenciados na Figura 3.15, a gama de valores para a frequência está compreendida até 800 Hz, ou seja, o modo de medição mais apropriado neste tipo

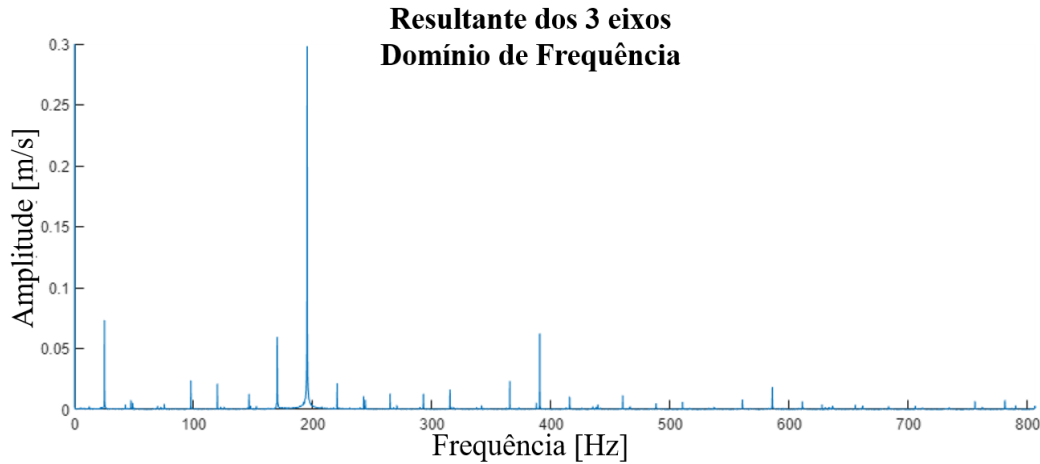


Figura 3.15: Vibrações no domínio de frequência

de ensaios confirma-se ser a velocidade.

Como referido no Estado da Arte, a quantificação da vibração pode ser efetuada com a energia associada à vibração pelo cálculo do RMS para a amplitude de vibração medida em velocidade. Contudo, para se obter o valor do RMS relativo à vibração no corte é necessário subtrair os efeitos do ambiente envolvente e da vibração da própria máquina, ou seja, calcula-se a média do RMS durante o corte e subtrai-se a média do RMS quando a fresa se encontra em vazio, como se vê na Equação 3.1.

$$\overline{RMS}_{corte} = \overline{RMS}_{trabalho} - \overline{RMS}_{vazio} \quad [m/s] \quad (3.1)$$

Outra variável importante na análise das vibrações trata-se do pico. O valor do pico trata-se da amplitude máxima da vibração, e para se obter o valor de pico relacionado com a maquinagem em si procede-se de um modo semelhante ao RMS ao se fazer a média do valor de pico em trabalho e subtrair a média do valor de pico em vazio, para se eliminar os efeitos da máquina e do ambiente envolvente, usando a Equação 3.2.

$$\overline{Pico}_{corte} = \overline{Pico}_{trabalho} - \overline{Pico}_{vazio} \quad [m/s] \quad (3.2)$$

No domínio de frequências a avaliação das vibrações desenrola-se pela identificação de picos de amplitude anormais para uma dada frequência. Desse modo, pelos gráficos correspondentes ao ensaio de cada uma das fresas pode-se identificar os picos e os valores de amplitude de vibração correspondentes, identificando a fresa com melhor desempenho segundo dois critérios:

- Menor número de picos relevantes
- Picos com um menor valor de amplitude

Porém, como referido no Capítulo 2 existem frequências onde são esperados picos de amplitude, como o caso dos 50 e dos 100 Hz referentes à corrente elétrica, mas também frequências relacionadas ao corte. Estas frequências foram calculadas e resultam nas Equações 3.3, 3.4 e 3.5



$$f_s = \frac{n}{60} = \frac{4456}{60} = 74.27Hz \quad (3.3)$$

$$f_{TPF} = \frac{n \times Z}{60} = \frac{4456 \times 5}{60} = 371Hz \quad (3.4)$$

$$f_{2h} = 2 \times f_m = 2 \times 371 = 742Hz \quad (3.5)$$

### 3.3.2 Rugosidade das superfícies

#### Equipamento

Para a recolha dos valores de rugosidade foi utilizado o rugosímetro *TESA-rugosurf 10-G* (Figura 3.16). Este trata-se de um aparelho bastante compacto e fácil de utilizar que através da agulha obtém o perfil de rugosidade. Através do perfil de rugosidade calcula automaticamente os valores dos parâmetros de amplitude de rugosidade  $R_a$ ,  $R_z$  e  $R_t$ .



Figura 3.16: Rugosímetro *TESA-rugosurf 10-G*

#### Obtenção e tratamento dos dados

Para uma superfície obtida por fresagem, seguindo a literatura existente, os valores de rugosidade  $R_a$  situam-se entre 2 e 5  $\mu m$ . Deste modo, o valor de comprimento de base apropriado, segundo os valores normalizados, será  $L_e = 0.8 mm$ . Deste modo parametrizou-se o rugosímetro para um comprimento de base de 0.8mm.

Para a obtenção dos valores de rugosidade é necessário fazer várias medições dos valores de  $R_a$  e  $R_z$  em diferentes zonas ao longo da face que foi maquinada. Deste modo, foi dividida a face maquinada em 3 zonas, nas quais se efetuaram várias medições, tendo sido obtido para cada zona um valor médio (Figura 3.17). Assim sendo, ao efetuar a média entre as diferentes zonas obteve-se o valor de rugosidade para a face maquinada (Equações 3.6 e 3.7).

$$R_a = \frac{R_{a1} + R_{a2} + R_{a3}}{3} \quad (3.6)$$

$$R_z = \frac{R_{z1} + R_{z2} + R_{z3}}{3} \quad (3.7)$$

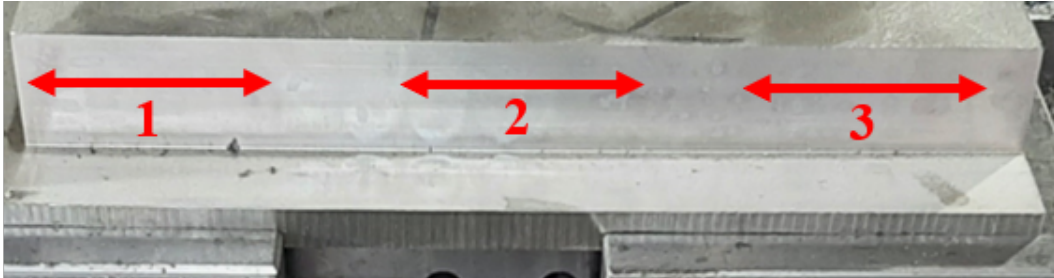


Figura 3.17: Zonas de medição da rugosidade

## Capítulo 4

# Análise e discussão de Resultados

Das fresas desenvolvidas foram efetuados ensaios com condições de corte constantes entre estes e dos quais se obtiveram dados relativos a vibração e rugosidade. Na Tabela 3.2 encontram-se os dados das fresas testadas.

### 4.1 Vibrações

#### 4.1.1 Fresas de Passo Constante

##### Fresa 1

A fresa 1 corresponde à fresa com ângulo de hélice de  $35^\circ$  e passo constante. Pelo ensaio foi obtido o perfil de vibração no domínio de tempo, estando este representado na figura 4.1.

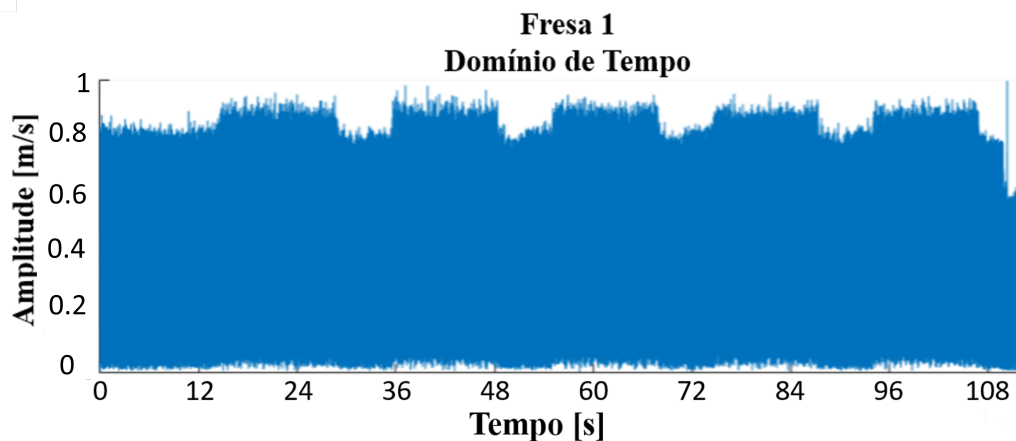


Figura 4.1: Amplitude de vibração no domínio de tempo - Fresa 1

Na figura 4.1 observa-se os valores de amplitude de vibração em função do tempo. Como tal, é possível identificar através da variação abrupta dos valores de amplitude o momento em que a fresa entrou e saiu da peça, estando estes pontos identificados na Figura 4.2. Vê-se neste gráfico um corte estável porém com uma diferença notável entre

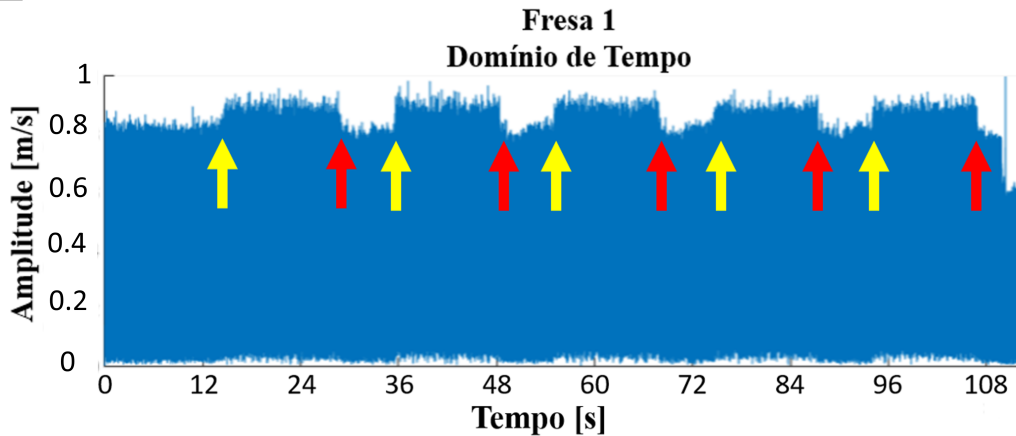


Figura 4.2: Entradas (a amarelo) e saídas (a vermelho) da fresa 1 na peça maquinada

o momento em que a fresa está em trabalho e em vazio. A partir dos valores do RMS e de pico da amplitude de vibração da fresa em trabalho e em vazio obtiveram-se os seguintes valores pelas Equações 4.1 e 4.2.

$$\overline{RMS}_{corte1} = 513.93 - 499.60 = 14.33 \quad [mm/s] \quad (4.1)$$

$$\overline{Pico}_{corte1} = 961.23 - 851.5 = 109.73 \quad [mm/s] \quad (4.2)$$

Na Figura 4.3 é possível observar os picos de amplitude de vibração em função das frequências. Ao analisar a figura identificam-se 3 picos significativos. O primeiro nos 74 Hz correspondente ao  $f_s$  já esperado, bem como nos 371 Hz correspondentes ao 2º harmónico do  $f_{TPF}$ . Contudo, nos 160 Hz aparece um pico de frequência não expectável. Todavia, este pico pode não ter que ver com o comportamento da fresa, mas possivelmente do ambiente envolvente.

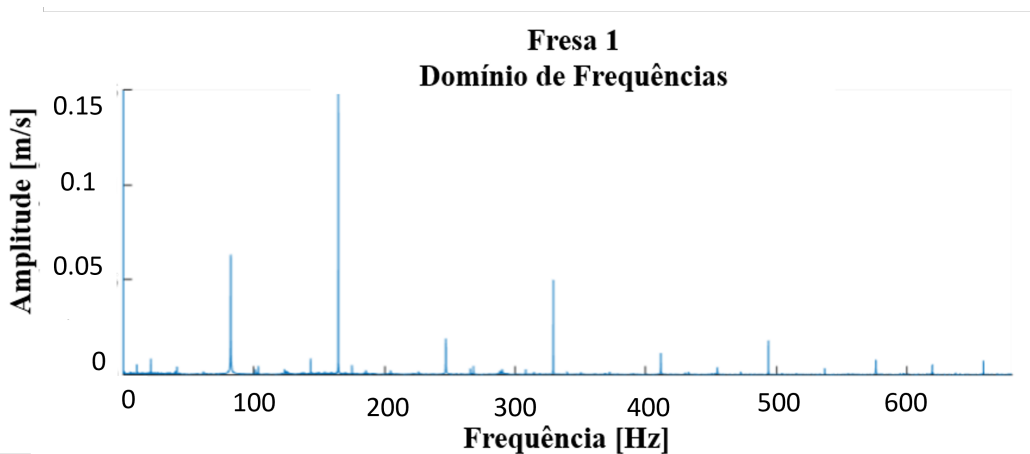


Figura 4.3: Amplitude de vibração no domínio de frequências - Fresa 1

### Fresa 4

A fresa 4 tem novamente um passo constante, porém com um ângulo de hélice relativamente mais baixo, sendo de  $30^\circ$ . Desta geometria e nas mesmas condições de corte resultou o perfil da amplitude de vibração no domínio de tempo que se pode ver na figura 4.4.

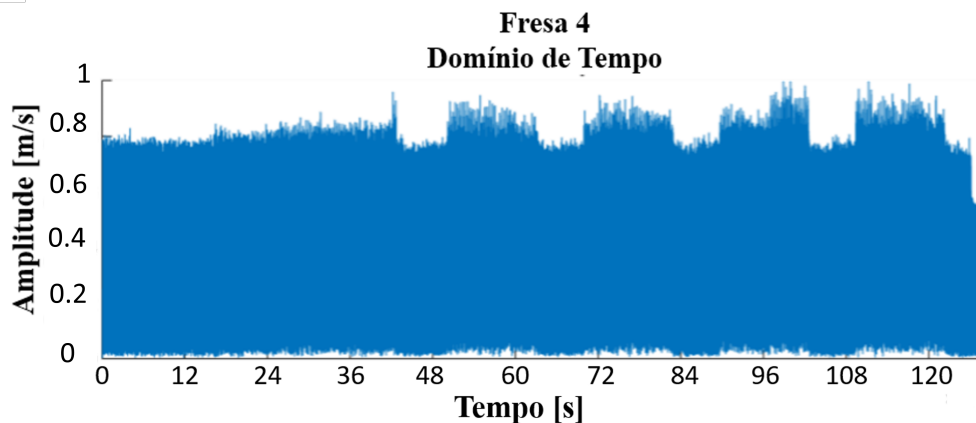


Figura 4.4: Amplitude de vibração no domínio de tempo - Fresa 4

Ao ver o perfil de vibração chama a atenção que das cinco passagens realizadas pela fresa apenas se identificam à primeira vista quatro delas. Contudo, pela análise da amplitude de vibração medida em aceleração (Figura 4.5) observa-se perfeitamente os pontos de entrada e saída (Figura 4.6), auxiliando a encontrar os mesmos valores na análise em velocidade.

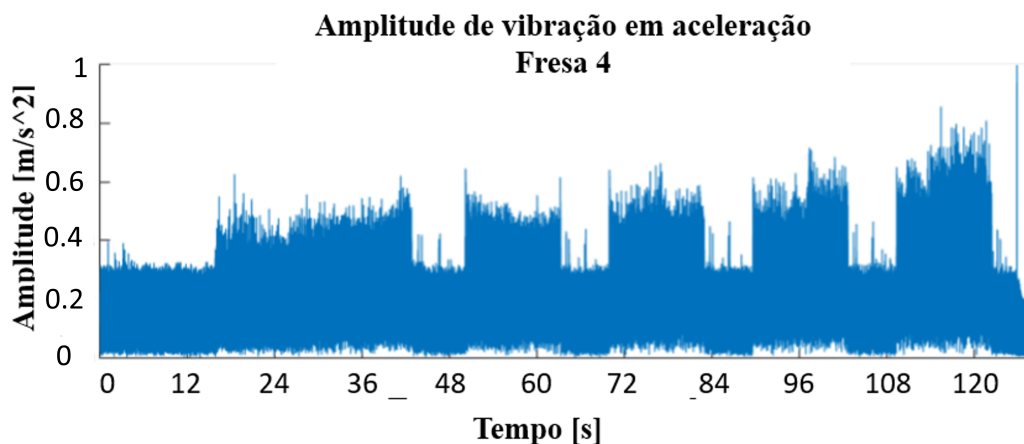


Figura 4.5: Amplitude de vibração no domínio de tempo medida em aceleração - Fresa 4

No ensaio desta ferramenta observa-se um valor crescente da amplitude da vibração, bem como o aumento da variação da amplitude, o que significa que o corte deixa de ser estável. Isto deve-se aos danos da ferramenta que foram sendo incrementados ao longo

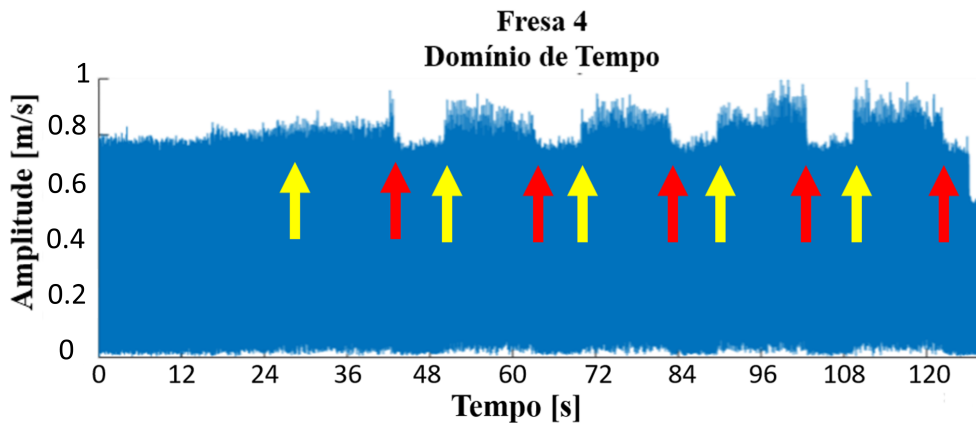


Figura 4.6: Entradas (a amarelo) e saídas (a vermelho) da fresa 4 na peça maquinada

das passagens provocando desgaste elevado da ferramenta e da superfície. Os valores podem ser visualizados pelas Equações 4.3 e 4.4.

$$\overline{RMS}_{corte4} = 488.18 - 467.63 = 20.55 \quad [mm/s] \quad (4.3)$$

$$\overline{Pico}_{corte4} = 974.9 - 800.4 = 174.5 \quad [mm/s] \quad (4.4)$$

Na análise no domínio de frequências (Figura 4.7) observam-se picos identificados nas mesmas frequências que os picos anteriores, porém para este ensaio observa-se que os valores são ligeiramente superiores.

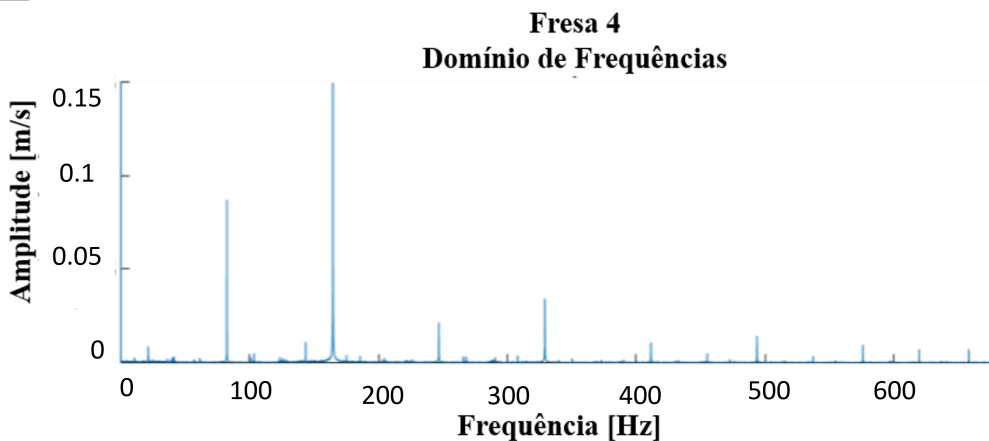


Figura 4.7: Amplitude de vibração no domínio de frequências - Fresa 4

### Fresa 5

Com  $40^\circ$  a fresa 4 é o protótipo com maior ângulo de hélice, porém novamente tem passo constante. Da mesma forma que as fresas anteriores o gráfico da figura 4.8 é resultado

do ensaio desta fresa.

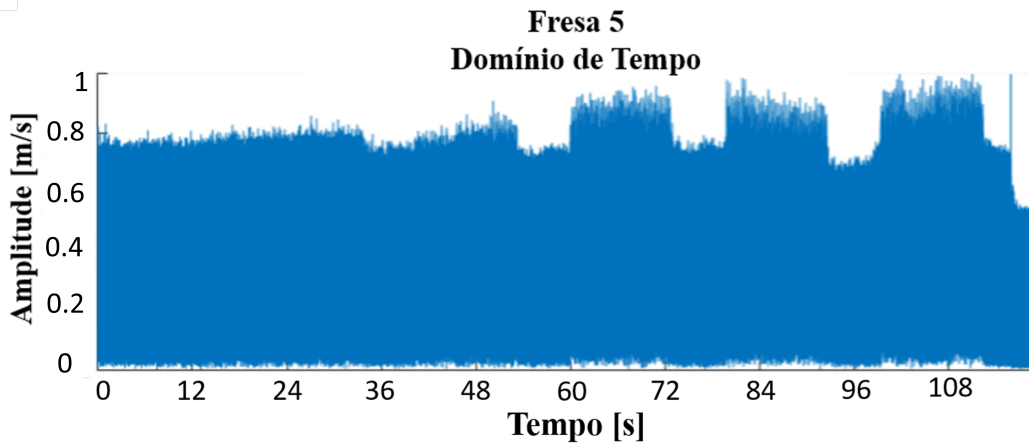


Figura 4.8: Amplitude de vibração no domínio de tempo - Fresa 5

Da mesma forma que a fresa 4 à primeira vista consegue-se identificar quatro das cinco passagens da fresa. Contudo, recorrendo ao perfil de vibração medido em aceleração (Figura 4.9) consegue-se saber quando é que a fresa entra e sai. Desta forma, chega-se aos pontos assinalados na Figura 4.10, sendo assim possível obter os valores de RMS em trabalho e em vazio medidos em velocidade.

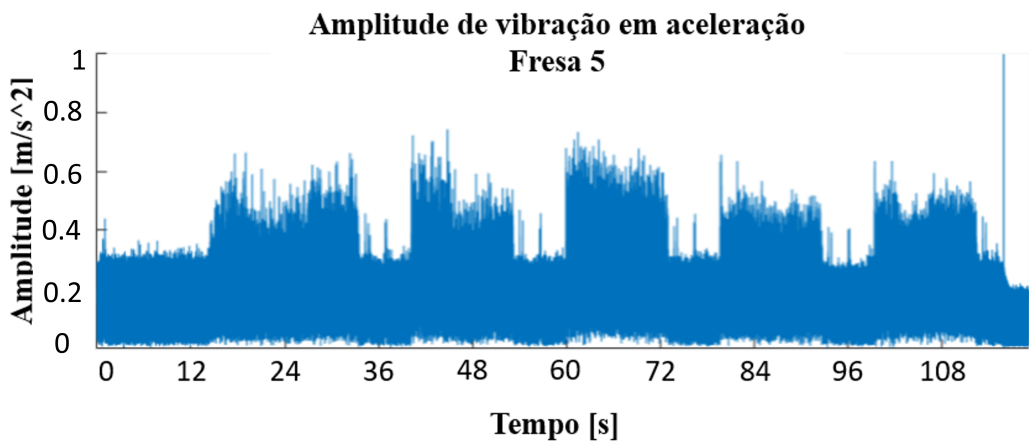


Figura 4.9: Amplitude de vibração no domínio de tempo medida em aceleração - Fresa 5

No ensaio desta ferramenta existe um aumento em cada passagem da variação da vibração, bem como do valor dos picos. O corte é claramente instável, sendo que a ferramenta teve danos que foram prejudicando ainda mais a vibração ao longo das passagens. Os valores de RMS e Pico foram obtidos pelas Equações 4.5 e 4.6

$$\overline{RMS}_{corte5} = 495.73 - 458.77 = 36.97 \quad [mm/s] \quad (4.5)$$

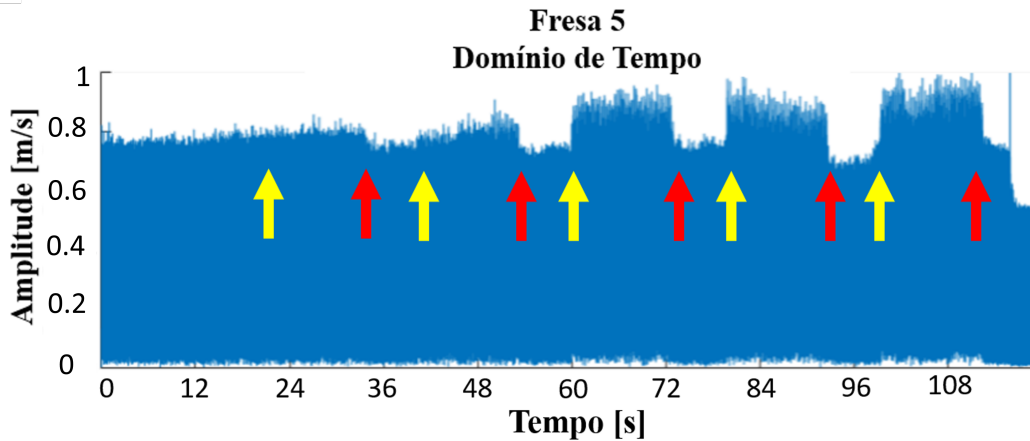


Figura 4.10: Entradas (a amarelo) e saídas (a vermelho) da fresa 5 na peça maquinada

$$\overline{Pico}_{corte5} = 986.23 - 760.93 = 225.3 \quad [mm/s] \quad (4.6)$$

Tal como nas outras fresas voltam a existir picos significativos nas mesmas frequências (Figura 4.11), porém para esta ferramenta esses picos têm um menor valor de amplitude do que para a fresa 4.

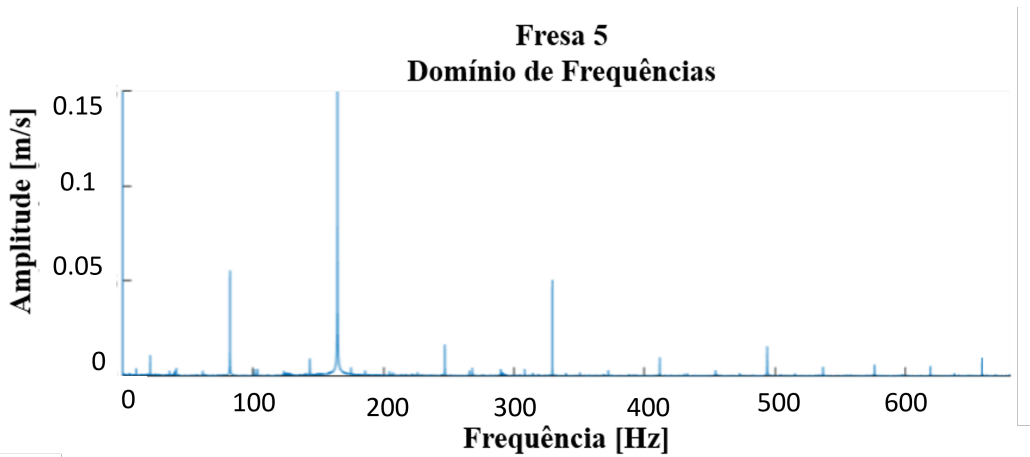


Figura 4.11: Amplitude de vibração no domínio de frequências - Fresa 5

#### 4.1.2 Fresas de Passo Variável

##### Fresa 2

A fresa 2 tem tal como a fresa 1 um ângulo de hélice de  $35^\circ$ , porém possui um passo variável  $72^\circ - 68^\circ - 76^\circ - 68^\circ$ . Do mesmo modo obteve-se o perfil de amplitude de vibração no domínio de tempo representado na Figura 4.12.



No ensaio da fresa 2 denota-se facilmente os pontos de entrada e saída da fresa novamente com um corte estável (Figura 4.13), porém denota-se que a variação de amplitude de vibração entre o momento em que a fresa está em vazio e em trabalho é menor do que na fresa 1, o que conduz a uma diminuição do valor RMS da amplitude de vibração correspondente ao corte como se pode ver nas Equações 4.7 e 4.8.

$$\overline{RMS}_{corte2} = 506.36 - 493.20 = 13.16 \quad [mm/s] \quad (4.7)$$

$$\overline{Pico}_{corte2} = 935.12 - 864.02 = 71.1 \quad [mm/s] \quad (4.8)$$

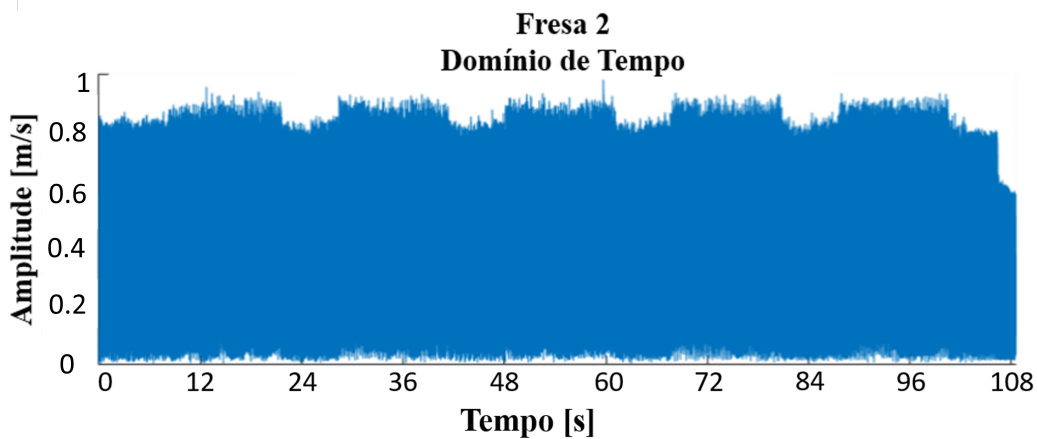


Figura 4.12: Amplitude de vibração no domínio de tempo - Fresa 2

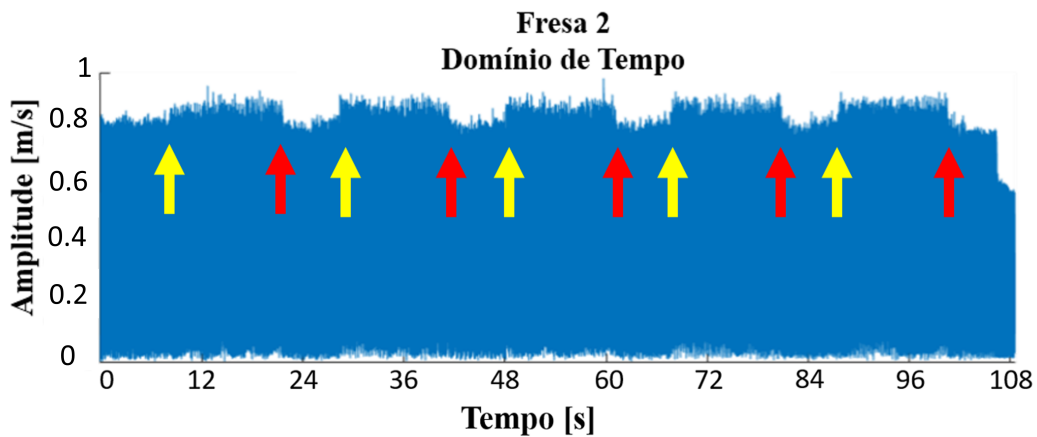


Figura 4.13: Entradas (a amarelo) e saídas (a vermelho) da fresa 2 na peça maquinada

Relativamente ao domínio de frequências (Figura 4.14) denotam-se picos nas mesmas frequências, tendo este um valor mais elevado no que concerne à frequência da árvore, mas mais baixo no que toca à influência da ferramenta. Isto justifica-se pelo uso de passo variável, anulando o efeito periódico das fresas com passo constante.

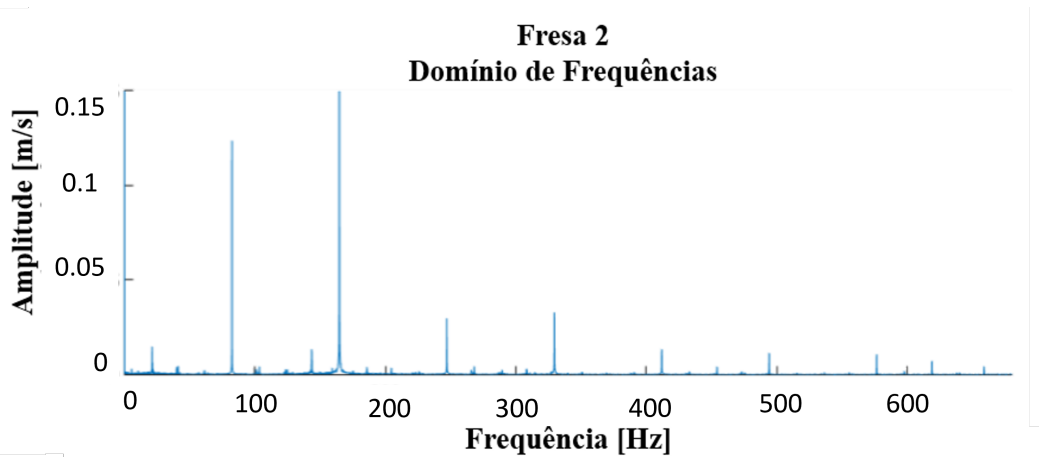


Figura 4.14: Amplitude de vibração no domínio de frequências - Fresa 2

### Fresa 3

A geometria da fresa 3 é semelhante às anteriores no que concerne o ângulo de hélice, porém a variação do passo é ainda superior, resultando num passo variável  $72^\circ - 66^\circ - 78^\circ - 66^\circ$ . Com o ensaio de maquinagem obteve-se o perfil de vibração no domínio de tempo representado na figura 4.15.

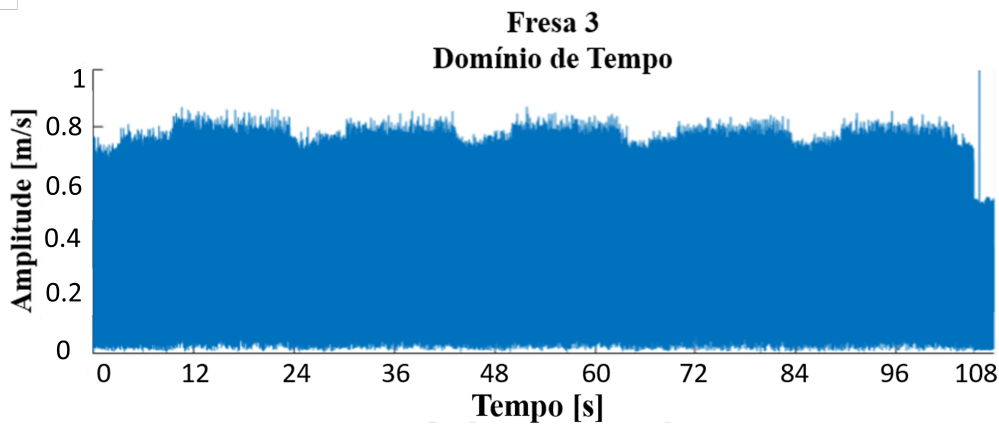


Figura 4.15: Amplitude de vibração no domínio de tempo - Fresa 3

Neste ensaio tem-se um corte muito estável onde se vê uma variação muito mais suave entre as zonas de entrada e saída da fresa (Figura 4.16). Esta aproximação entre as diferentes zonas comprova um melhoramento no corte por se obter uma maior estabilidade. Chegam-se aos seguintes valores do RMS e de pico da amplitude da vibração no corte através das Equações 4.9 e 4.10.

$$\overline{RMS}_{corte3} = 491.46 - 479.98 = 11.49 \quad [mm/s] \quad (4.9)$$

$$\overline{Pico}_{corte3} = 853.1 - 788.63 = 64.48 \quad [mm/s] \quad (4.10)$$

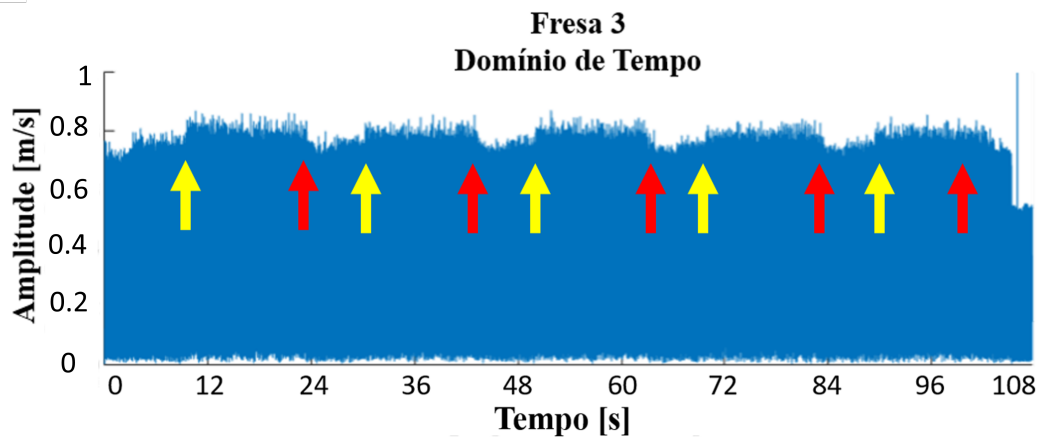


Figura 4.16: Entradas (a amarelo) e saídas (a vermelho) da fresa 3 na peça maquinada

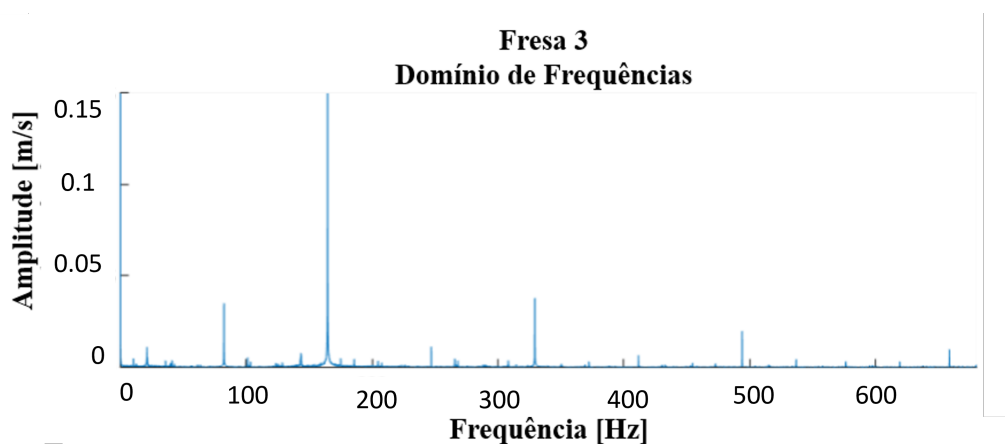


Figura 4.17: Amplitude de vibração no domínio de frequências - Fresa 3

No domínio de frequências (Figura 4.17) esta é a fresa que comprova ter melhores resultados, pois o passo variável influencia baixando os picos para uma frequência, sendo esta a fresa em que os picos para as mesmas frequências têm um valor de amplitude mais baixo.

### 4.1.3 Análise

#### Variação do ângulo de hélice

Para compreender a influência do ângulo de hélice comparam-se os valores obtidos para as fresas 1, 4 e 5 (Tabelas 4.2 e 4.1). Todas estas fresas têm passo constante e variam apenas no valor do ângulo de hélice, sendo:

- Fresa 1 - Ângulo de Hélice 35°
- Fresa 4 - Ângulo de Hélice 30°

- Fresa 5 - Ângulo de Hélice 40°

Tabela 4.1: Valores do Pico na variação do Ângulo de Hélice

Fresa	$\overline{PICO}_{trabalho}$ [mm/s]	$\overline{PICO}_{vazio}$ [mm/s]	$\overline{PICO}_{corte}$ [mm/s]
1	961,23	851,50	109,73
4	974,90	800,40	174,50
5	986,23	760,93	225,30

Tabela 4.2: Valores do RMS na variação do Ângulo de Hélice

Fresa	$\overline{RMS}_{trabalho}$ [mm/s]	$\overline{RMS}_{vazio}$ [mm/s]	$\overline{RMS}_{corte}$ [mm/s]
1	513,93	499,60	14,33
4	488,18	467,63	20,55
5	495,73	458,77	36,97

## EVOLUÇÃO DO ÂNGULO DE HÉLICE

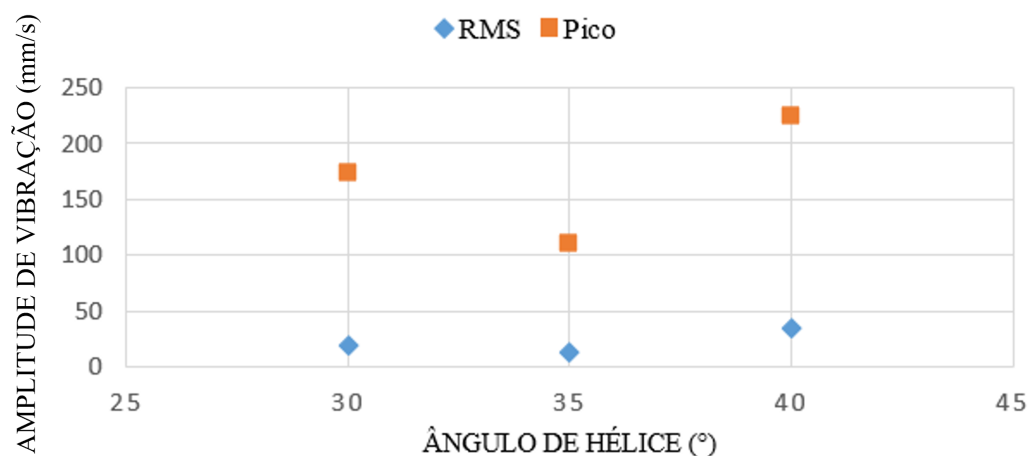


Figura 4.18: Valor do RMS e do pico de amplitude de vibração em função do ângulo de hélice

Na figura 4.18 pode-se observar a variação dos valores de rugosidade em função do ângulo de hélice. Daqui se conclui que o ângulo de hélice não é proporcional à vibração, ou seja, não se pode dizer que aumentar o ângulo de hélice diminui a vibração porque considerando os resultados entre a fresa 1 e a fresa 5 vê-se que a subida do ângulo de hélice provocou um aumento tanto no RMS como no valor de pico da amplitude de vibração.

Dos resultados obtidos vê-se que o ângulo de hélice tem um valor ótimo intermédio, no qual os 35° se adequam, porém para chegar ao ângulo mais apropriado teriam de ser testadas ferramentas num intervalo mais refinado. Este resultado justifica-se pelas componentes radiais e axiais nas forças de corte. Nas fresas com maiores ângulos de hélice a componente axial da força é mais preponderante, enquanto para menores ângulos de hélice a componente radial é a que tem mais importância. Geralmente, a componente radial da força é aquela em que surgem mais problemas, porém ao se ultrapassar um determinado valor para o ângulo de hélice a componente axial provoca esforços excessivos no aperto devido ao *pull-out*, resultando num aumento da vibração.

Na literatura existente para a fresagem convencional diversos autores como Chen et al. (2018) defendem que o aumento do ângulo de hélice é benéfico, e com os resultados obtidos verifica-se isso mesmo até um certo ponto, visto que os valores obtidos para um ângulo de hélice de 40° são piores do que os obtidos para 35°. Wan et al. (2017a) afirma que este acontecimento deve-se à dificuldade de escoamento da aparas, aumentando assim possíveis vibrações na ferramenta.

### Variação do passo

Com o objetivo de averiguar qual o efeito que o passo, variável ou constante, tem em termos de vibração foram definidas três fresas com geometrias distintas. Todas estas ferramentas possuem um ângulo de hélice constante de 35°, variando assim nas seguintes três fresas:

- Fresa 1: Passo constante
- Fresa 2: Passo 72° - 68° - 76° - 68°
- Fresa 3: Passo 72° - 66° - 78° - 66°

Nas Tabelas 4.3 e 4.4 podem ser observados os valores de pico e de rms, respetivamente, obtidos nos ensaios e que se encontram representados no gráfico da Figura 4.19.

Tabela 4.3: Valores do Pico na variação do Passo

Fresa	$\overline{PICO}_{trabalho}$ [mm/s]	$\overline{PICO}_{vazio}$ [mm/s]	$\overline{PICO}_{corte}$ [mm/s]
1	961,23	851,50	109,73
2	935,12	864,02	71,10
3	853,10	788,63	64,48

Relativamente à variação do passo da ferramenta podem-se tirar conclusões de duas formas:

Tabela 4.4: Valores do RMS na variação do Passo

Fresa	$\overline{RMS}_{trabalho}$ [mm/s]	$\overline{RMS}_{vazio}$ [mm/s]	$\overline{RMS}_{corte}$ [mm/s]
1	513,93	499,60	14,33
2	506,36	493,20	13,16
3	491,46	479,98	11,49

- Ferramentas com passo variável vs. Ferramentas com passo constante;
- Influência da variação do passo.

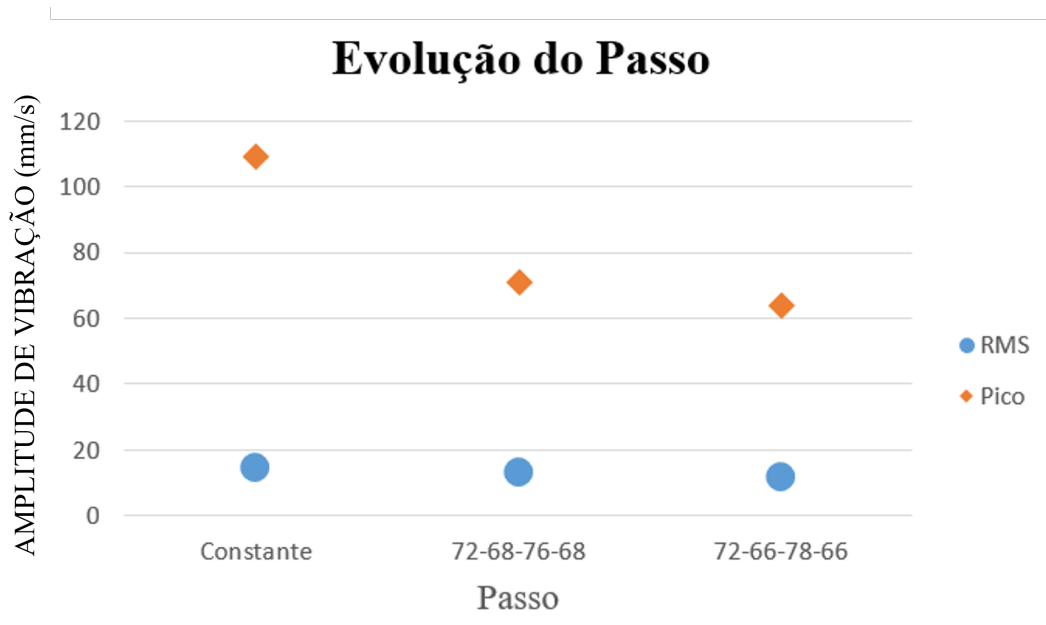


Figura 4.19: Valor do RMS e do pico de amplitude de vibração em função do passo

Dos resultados obtidos observa-se que existe uma enorme diferença com o uso de passo variável. Como referido previamente, o passo variável provoca um desfasamento de modo a que as solicitações referentes à ferramenta não tenham um efeito tão substancial. Deste modo, constatou-se uma diminuição dos valores de vibração, principalmente nos valores do pico de vibração onde o valor baixou de 109.73 mm/s para 71.1 mm/s na fresa com menor variação no passo. Estes valores comprovam o que está descrito na literatura, em que a variação do passo é essencial para a diminuição das vibrações, como constatado por Niu et al. (2017).

Relativamente às fresas com passo variável, observou-se que a fresa com uma variação do passo superior obteve menores valores de pico e de RMS. Porém, apesar de os valores diminuírem com esta maior variação do passo, existem restrições geométricas que impos-

sibilitam um aumento desmedido da variação do passo. Quando a variação é demasiado elevada as hélices intercetam-se o que põe em causa o funcionamento da ferramenta.

## 4.2 Rugosidade das superfícies

### 4.2.1 Valores $R_a$ e $R_z$

Como referido no Procedimento, obtiveram-se valores de  $R_a$  e  $R_z$  a partir de um rugosímetro tendo sido efetuadas medições em 3 zonas distintas, de modo a se obter um valor que representa-se a rugosidade em toda a superfície, visto que na zona de entrada ou saída os valores pudessem ser distintos. Em cada uma dessas zonas foram feitas 5 medições, chegando a um valor médio para cada zona e usando esses três valores, fez-se uma média obtendo o valor para a superfície. Na Tabela 4.5 encontram-se os valores obtidos para  $R_a$  e  $R_z$ .

Tabela 4.5: Valores de rugosidade  $R_a$  e  $R_z$

Fresa	$R_a$ [ $\mu m$ ]	$R_z$ [ $\mu m$ ]
1	0,467	2,214
2	0,541	2,439
3	0,439	2,084
4	0,863	3,919
5	3,468	14,766

### 4.2.2 Análise

#### Variação do ângulo de hélice

O estudo da influência do ângulo de hélice é efetuado a partir dos dados obtidos para as fresas 1, 4 e 5. Destas fresas resultaram os seguintes valores de rugosidade obtidos pelas Equações 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16.

- Fresa 1

$$R_{a1} = \frac{0.48 + 0.49 + 0.44}{3} = 0.47\mu m \quad (4.11)$$

$$R_{z1} = \frac{2.37 + 2.18 + 2.10}{3} = 2.21\mu m \quad (4.12)$$

- Fresa 4

$$R_{a4} = \frac{0.96 + 0.83 + 0.81}{3} = 0.86\mu m \quad (4.13)$$

$$R_{z4} = \frac{4.15 + 3.85 + 3.76}{3} = 3.92\mu m \quad (4.14)$$

- Fresa 5

$$R_{a5} = \frac{2.22 + 3.99 + 4.18}{3} = 3.46\mu m \quad (4.15)$$

$$R_{z5} = \frac{9.23 + 18.43 + 16.64}{3} = 14.77\mu m \quad (4.16)$$

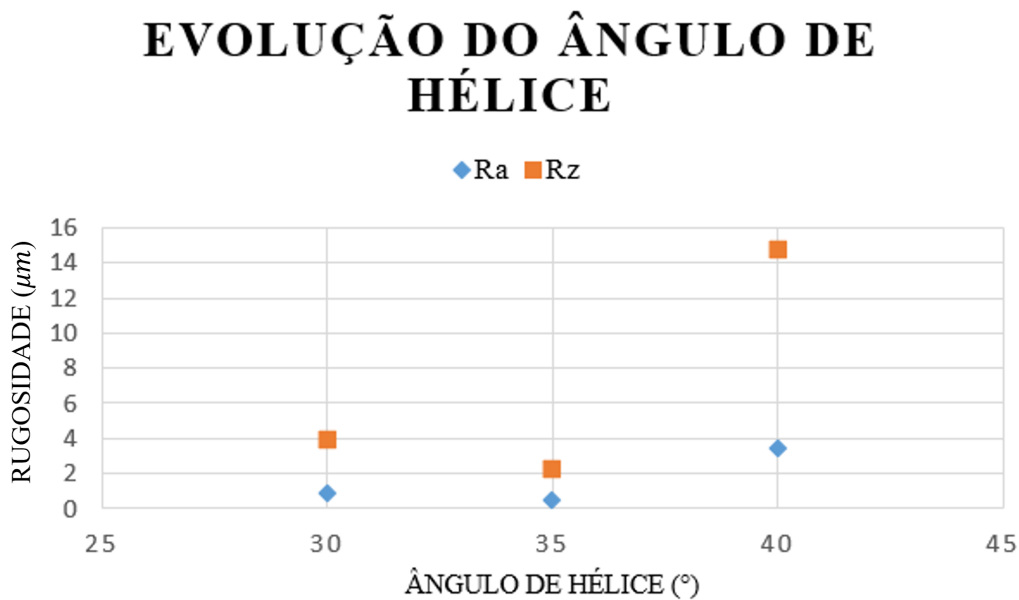


Figura 4.20: Valores de  $R_a$  e  $R_z$  em função do ângulo de hélice

No gráfico da Figura 4.20 é possível ver que a rugosidade varia, em função do ângulo de hélice, do mesmo modo que a vibração.

Para justificar os valores apresentados é possível verificar as estrias presentes nas figuras 4.21, 4.22 e 4.23 as imagens relativas à superfície maquinada com cada uma das fresas. Como se pode ver pelas estrias nas superfícies, os valores correspondem ao suposto visto que a superfície maquinada pela fresa 1 apresenta um bom acabamento superficial, enquanto a superfície maquinada pela fresa 5 apresenta um acabamento muito mais defeituoso com imperfeições visíveis perfeitamente a olho nu.

Chen et al. (2018) concluiu que para ângulos de hélice entre  $0^\circ$  e  $50^\circ$  o valor de  $R_a$  inicialmente diminui de forma muito rápida, começando a estabilizar, sendo que depois começa a crescer. Tal é consistente com os resultados obtidos, porém em estratégias convencionais como usado pelos autores o ângulo de hélice ótimo foi  $40^\circ$  com  $R_a = 0.37\mu m$  enquanto neste estudo se vê que o ângulo de hélice mais apropriado trata-se de  $35^\circ$ .



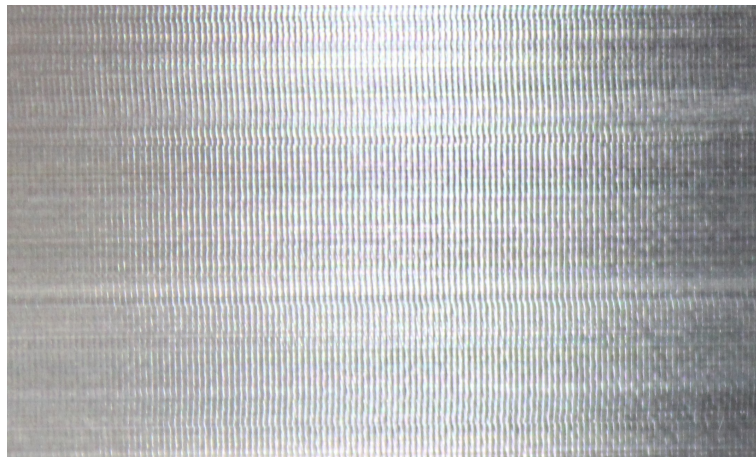


Figura 4.21: Acabamento superficial ensaio Fresa 1

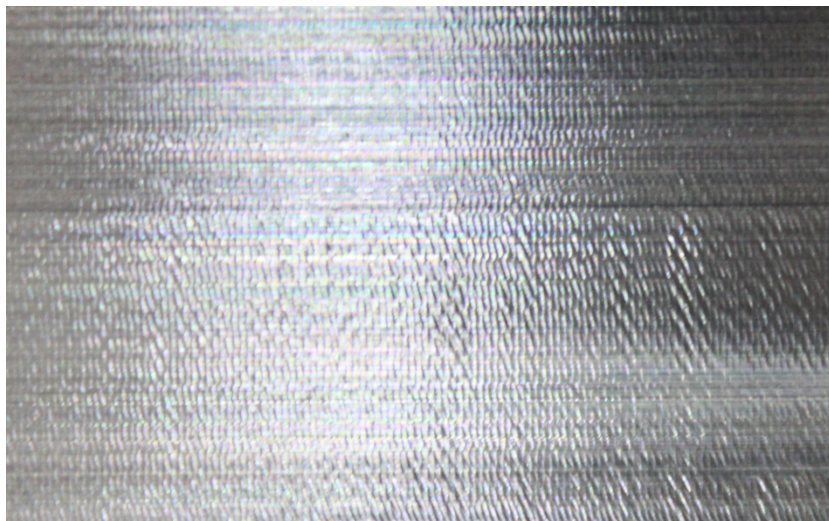


Figura 4.22: Acabamento superficial ensaio Fresa 4

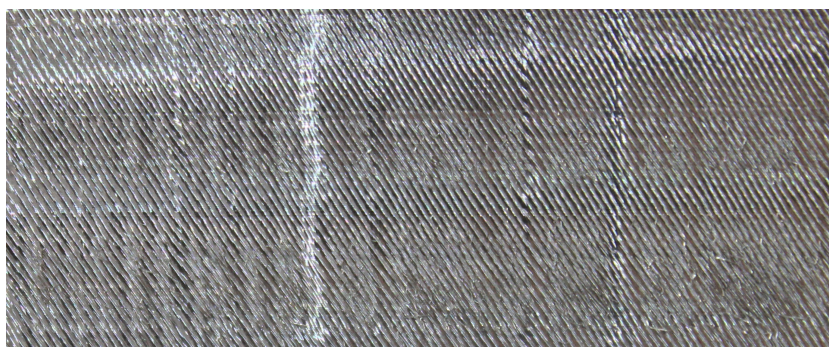


Figura 4.23: Acabamento superficial ensaio Fresa 5

### Variação do passo

O estudo da influência do passo é efetuado a partir dos dados obtidos para as fresas 1, 2 e 3. Destas fresas resultaram os seguintes valores de rugosidade obtidos pelas Equações

João Miguel Vaz Moreira

*Relatório de Projeto de Mestrado*

4.17, 4.18, 4.19, 4.20.

- Fresa 2

$$R_{a2} = \frac{0.54 + 0.55 + 0.53}{3} = 0.54\mu m \quad (4.17)$$

$$R_{z2} = \frac{2.49 + 2.53 + 2.29}{3} = 2.44\mu m \quad (4.18)$$

- Fresa 3

$$R_{a3} = \frac{0.46 + 0.42 + 0.44}{3} = 0.44\mu m \quad (4.19)$$

$$R_{z3} = \frac{2.16 + 1.98 + 2.11}{3} = 2.08\mu m \quad (4.20)$$

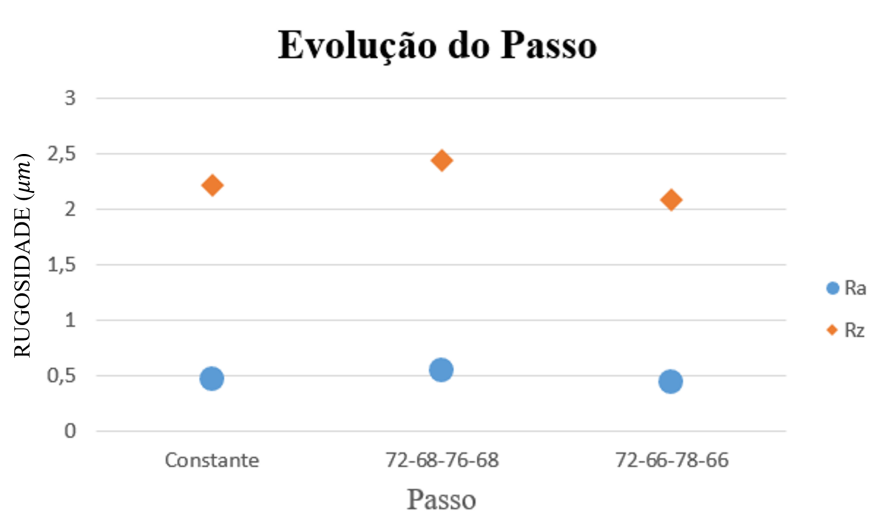


Figura 4.24: Valores de  $R_a$  e  $R_z$  em função do passo

Os valores de rugosidade obtidos são bastante baixos e satisfatórios para este tipo de maquinagem e de material evidenciando bons resultados em termos de acabamento. Porém, os valores obtidos não estão totalmente de acordo com os valores de vibração pois os valores obtidos para a fresa 2 são ligeiramente superiores aos valores obtidos para a fresa 1, enquanto a fresa 3 teve os valores mais baixos de rugosidade (Figura 4.24). Pode ser visto o acabamento superficial deixado nas superfícies maquinadas nas Figuras 4.25 e 4.26.

### Relação com a vibração

Com os resultados obtidos, determinou-se que seria interessante um estudo comparativo entre a rugosidade e a vibração. Para tal, fez-se um gráfico em que se relacionou, nas

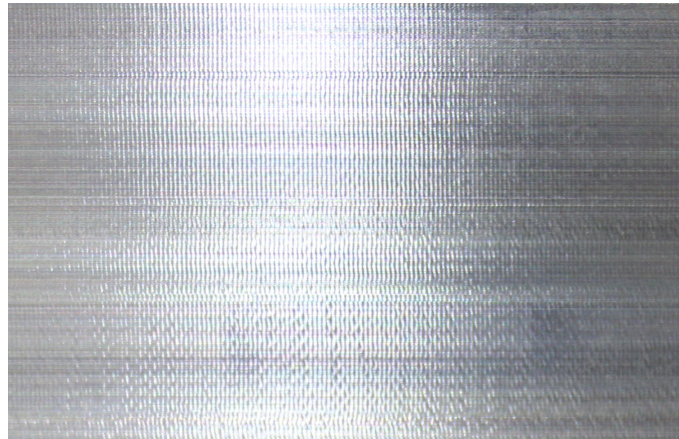


Figura 4.25: Acabamento superficial ensaio Fresa 2

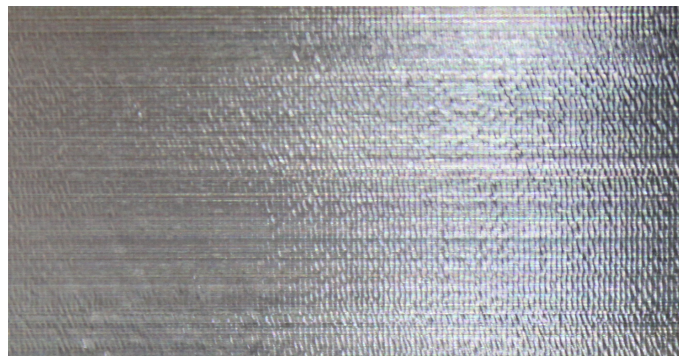
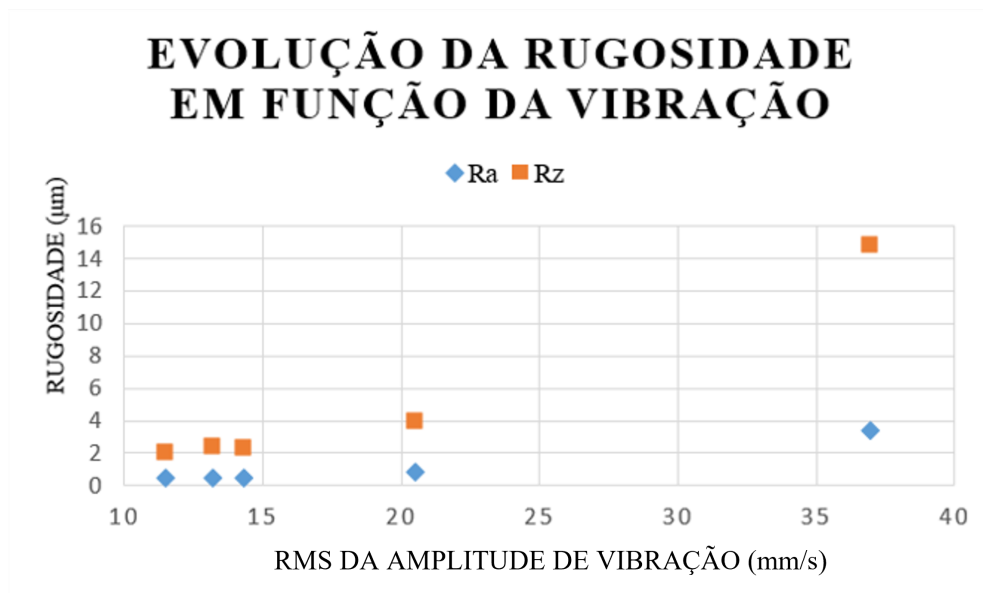


Figura 4.26: Acabamento superficial ensaio Fresa 3

Figura 4.27: Valores de  $R_a$  e  $R_z$  em função da amplitude de vibração em RMS

abcissas, o RMS da amplitude de vibração relativa ao corte com, nas ordenadas, os valores de rugosidade  $R_a$  e  $R_z$ , estando representado este gráfico na Figura 4.27.

Com o recurso ao gráfico da Figura 4.27 é possível confirmar que o aumento da vibração conduz ao aumento da rugosidade das superfícies. Porém, este aumento não tem um comportamento linear, visto que o crescimento aumenta rapidamente. Comparando  $R_a$  com  $R_z$ , vê-se que o crescimento destes é bastante distinto, pelo que se separou em dois gráficos (Figuras 4.28 e 4.29) para uma análise individual.

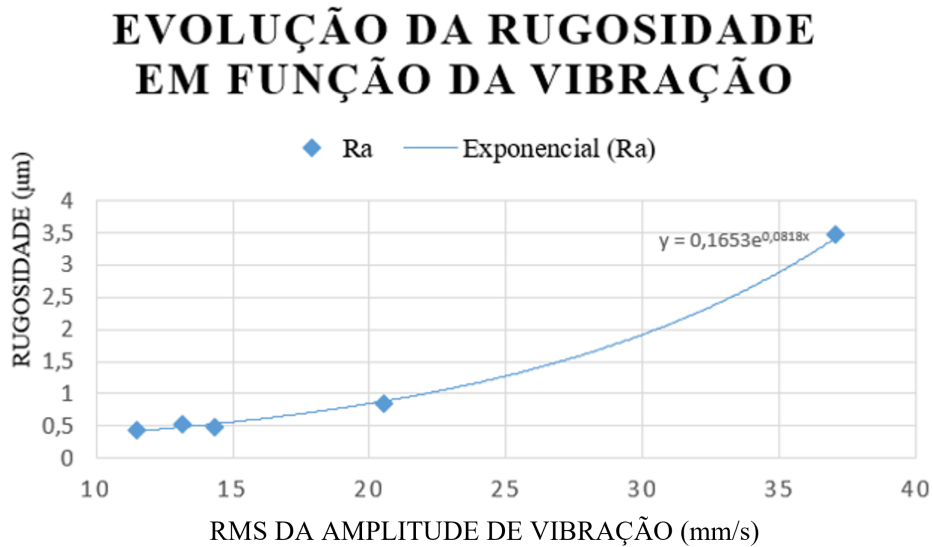


Figura 4.28: Valores de  $R_a$  e  $R_z$  em função da amplitude de vibração em RMS

No gráfico relativo a  $R_a$  observa-se um crescimento exponencial da Rugosidade. Este crescimento justifica-se pela acumulação de efeitos prejudiciais à rugosidade, como o aumento crescente do desgaste da ferramenta e a vibração da ferramenta. Do mesmo modo, para  $R_z$ , observa-se um comportamento semelhante, causado pelos mesmos motivos citados para  $R_a$ .

Esta análise resulta num método indireto para o cálculo de  $R_a$  e  $R_z$  através do RMS da amplitude de vibração referente ao corte através das equações 4.21 e 4.22.

$$R_a(RMS) = 0.1653e^{0.0818 \times RMS} \quad (4.21)$$

$$R_z(RMS) = 0.8101e^{0.078 \times RMS} \quad (4.22)$$

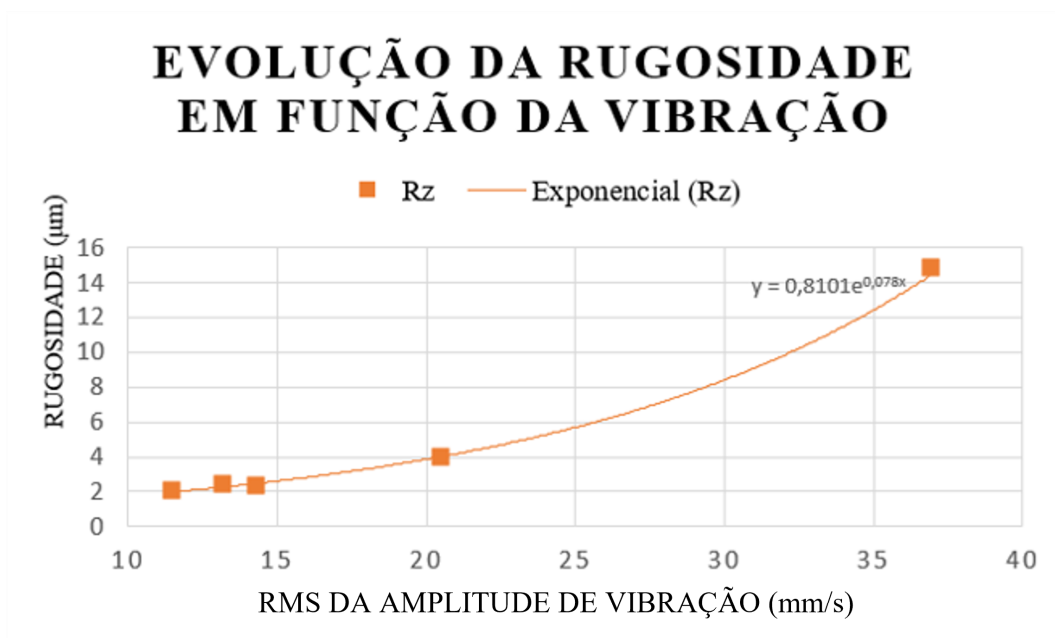


Figura 4.29: Valores de  $R_a$  e  $R_z$  em função da amplitude de vibração em RMS



## Capítulo 5

# Conclusões e Trabalhos Futuros

### 5.1 Conclusões

Neste projeto foi estudada a influência de variáveis geométricas de fresas integrais de metal duro na fresagem trocoidal de aços inoxidáveis. Como tal, definiram-se dois parâmetros de qualidade para avaliar qual a geometria que seria mais benéfica, sendo estes parâmetros a vibração, através do RMS da amplitude de vibração medida em velocidade e o valor do pico. Relativamente à rugosidade das superfícies obtiveram-se valores a partir da rugosidade média aritmética  $R_a$  e da profundidade média da rugosidade  $R_z$ .

Após a realização de todos os ensaios e testes retiram-se as seguintes conclusões:

- A análise de vibrações em domínio de tempo é uma forma excelente de avaliar a rugosidade. Ao se obter o valor do RMS da amplitude de vibração medida em velocidade para cada uma das fresas tornou-se bastante simples fazer uma análise comparativa entre estas.
- A variação do ângulo de hélice, no que concerne às vibrações, tem um valor ótimo a ser escolhido. Chegou-se à conclusão que devido às componentes radiais e axiais das forças de corte o ângulo de hélice é de cerca de  $35^\circ$ .
- O uso de ferramentas com passo variável é altamente recomendado neste tipo de operações. Comparando entre fresas com passo constante e fresas com passo variável chegam-se a valores muito distintos, sendo os valores mais baixos para as ferramentas com passo variável.
- Os valores de vibração diminuem em função da variação do passo, como se sucedeu neste trabalho, porém para estabelecer uma relação é necessário que se façam testes com mais geometrias.
- A fresa que teve o melhor comportamento foi a fresa com ângulo de hélice  $35^\circ$  e com um passo variável de  $72^\circ - 66^\circ - 78^\circ - 66^\circ$ .
- Não foi possível fazer uma análise correta em domínio de frequência devido à influência do meio externo, pelo que seria apropriada a execução dos ensaios num ambiente neutro.

- Obteve-se um método indireto de determinação da rugosidade em função do RMs da amplitude de vibração relativa ao corte, sendo que o crescimento da rugosidade é exponencial.

## 5.2 Trabalhos Futuros

Com base nos resultados obtidos e nas conclusões retiradas considera-se de grande interesse o estudo mais aprofundado sobre os seguintes tópicos:

- Estudo do desgaste da ferramenta de corte e do seu tempo de vida na fresagem de aços inoxidáveis com recurso a Fresagem Trocoidal;
- Análise da microestrutura das aparas e estudo da temperatura gerada nos processos de corte na fresagem de aços inoxidáveis com recurso a fresagem trocoidal;
- Estudo da influência do ângulo de hélice em passo variável;
- Efetuar um estudo semelhante para materiais superresistentes.
- Realização de ensaios com a mesma geometria e condições de corte, mas com diferentes classes de metal duro.



# Bibliografia

- Airao, J., Chaudhary, B., Bajpai, V., & Khanna, N. (2018). An experimental study of surface roughness variation in end milling of super duplex 2507 stainless steel. *Materials Today: Proceedings*, 5, 3682–3689.
- Amaro, P., Ferreira, P., & Simões, F. (2020). Comparative analysis of different cutting milling strategies applied in duplex stainless steel. *Procedia Manufacturing*, 47, 517–524.
- Baptista, A., Silva, F., Porteiro, J., Míguez, J., & Pinto, G. (2018). Sputtering physical vapour deposition (pvd) coatings: A critical review on process improvement and market trend demands. *Coatings*, 8, 1–22.
- Bobzin, K. (2017). High-performance coatings for cutting tools. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 18, 1–9.
- Buj-Corral, I., Vivancos-Calvet, J., & González-Rojas, H. (2011). Influence of feed, eccentricity and helix angle on topography obtained in side milling processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51, 889–897.
- Cao, H., Lei, Y., & He, Z. (2013). Chatter identification in end milling process using wavelet packets and hilbert–huang transform. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 69, 11–19.
- Chen, M., Liu, G., Dang, J., Li, C., & Ming, W. (2018). Effects of tool helix angles on machined surface morphology in tilt side milling of cantilever thin-walled plates. *Procedia CIRP*, 71, 93–98.
- Choi, Y. (2017). Influence of rake angle on surface integrity and fatigue performance of machined surfaces. *International Journal of Fatigue*, 94, 81–88.
- Corrêa, J. G., Schroeter, R. B., & Álisson Rocha Machado (2017). Tool life and wear mechanism analysis of carbide tools used in the machining of martensitic and supermartensitic stainless steels. *Tribology International*, 105, 102–117.
- Davim, J. P. (2008). *Princípios da Maquinagem*. (2<sup>a</sup> edição). Publindústria.
- Deng, Y., Chen, W., Li, B., Wang, C., Kuang, T., & Li, Y. (2020). Physical vapor deposition technology for coated cutting tools: A review. *Ceramics International*, 46, 18373–18390.
- Denkena, B., Krödel, A., Ellersiek, L., & Murrenhoff, M. (2020). Production of chip breakers on cemented carbide tools using laser ablation. *Procedia CIRP*, 94, 834–839.

- Dittrich, M. A., Böck, V., Wichmann, M., & Denkena, B. (2020). Simulation-based compensation of deflection errors in helical flute grinding. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 28, 136–143.
- Dong Yang, Z. L. (2015). Surface plastic deformation and surface topography prediction in peripheral milling with variable pitch end mill. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 91, 43–53.
- Ema, S. & Davies, R. (1989). Cutting performance of end mills with different helix angles. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 29, 217–227.
- EN10088-1 (2005). Stainless steels - part 1: List of stainless steels.
- Fan, Y., Liu, T. G., Xin, L., Han, Y. M., Lu, Y. H., & Shoji, T. (2021). Thermal aging behaviors of duplex stainless steels used in nuclear power plant: A review. *Journal of Nuclear Materials*, 544, 1–14.
- Girdhar, P. & Scheffer, C. (2004). *Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance*. 1<sup>a</sup> edição. Newnes - Elsevier.
- Gong, F., Zhao, J., Jiang, Y., Tao, H., Li, Z., & Zang, J. (2017). Fatigue failure of coated carbide tool and its influence on cutting performance in face milling skd11 hardened steel. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 64, 27–34.
- Gowthaman, P. S., Jeyakumar, S., & Saravanan, S. A. (2020). Machinability and tool wear mechanism of duplex stainless steel - a review. *Materials Today: Proceedings*, 26, 1–22.
- Gross, D., Friedl, F., Meier, T., & Hanenkamp, N. (2020). Comparison of linear and trochoidal milling for wear and vibration reduced machining. *Procedia CIRP*, 90, 563–567.
- Harvey Performance Company (2017). Hem guidebook.
- Helical Solutions (2017). Machining guidebook.
- Insperger, T., Stépán, G., Bayly, P., & Mann, B. (2003). Multiple chatter frequencies in milling processes. *Journal of Sound and Vibration*, 262, 333–345.
- Lin, T.-R. (2002). Experimental design and performance analysis of tin-coated carbide tool in face milling stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 127, 1–7.
- Lo, K. H., Shek, C. H., & Lai, J. K. L. (2009). Recent developments in stainless steels. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 65, 39–104.
- Marouvo, J., Ferreira, P., & Simões, F. (2021). Cutting performance of austenitic and duplex stainless steels with drills of three cutting edges. *Paper presented at ESAFORM 2021, 24th International Conference on Material Forming*, Liège, 1–9.
- MAS, K. (2017). Mcv line.

- Mohanraj, T., Shankar, S., Rajasekar, R., Sakthivel, N. R., & Pramanik, A. (2020). Tool condition monitoring techniques in milling process — a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 9, 1032–1042.
- Niu, J., Ding, Y., Zhu, L., & Ding, H. (2017). Mechanics and multi-regenerative stability of variable pitch and variable helix milling tools considering runout. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 123, 129–145.
- Norberto López de Lacalle, L., Campa, F. J., & Lamikiz, A. (2011). 3 - milling. In J. Paulo Davim (Ed.), *Modern Machining Technology* (pp. 213–303). Woodhead Publishing.
- Outokumpu Stainless AB (2013). Handbook of stainless steel.
- Palbit (2021a). As nossas ferramentas. <https://www.palbit.pt/pt/produtos>.
- Palbit (2021b). Sobre nós. <https://www.palbit.pt/pt/sobre-nos>.
- Palbit (2021c). Soluções industriais. <https://www.palbit.pt/pt/solucoes-industriais>.
- Palbit (2021). Technical guidebook.
- Pleta, A., Niaki, F. A., & Mears, L. (2017). Investigation of chip thickness and force modelling of trochoidal milling. *Procedia Manufacturing*, 10, 612–621.
- Plásticos, M. I. (2021). Parâmetros de avaliação da rugosidade – acabamento superficial. <http://moldesinjecaoplasticos.com.br/parametros-de-avaliacao-da-rugosidade-acabamento-superficial/>.
- Público (2015). Palbit, uma pme que enfrenta a concorrência das grandes multinacionais. <https://www.publico.pt/2015/12/10/economia/noticia/palbit-ou-como-uma-pme-enfrenta-a-concorrencia-das-grandes-multinacionais-1716893>.
- Quintana, G. & Ciurana, J. (2011). Chatter in machining processes: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51, 363–376.
- Sahoo, P. (2011). Surface topography. In J. Paulo Davim (Ed.), *Tribology for Engineers: A practical guide* (pp. 1–32). Woodhead Publishing.
- Sandvik (2021). Materiais de ferramentas de corte. <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>.
- Seguy, S., Desein, G., & Arnaud, L. (2008). Surface roughness variation of thin wall milling, related to modal interactions. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48, 261–274.
- Sousa, V., Silva, F., Fecheira, J., Lopes, H., Martinho, R., & Casais, R. (2020). Accessing the cutting forces in machining processes: An overview. *Procedia Manufacturing*, 51, 787–794.
- Stainless, K. (2021). Why choose stainless. <http://www.kvastainless.com/stainless-steel.html>.

- Stepan, G., Hajdu, D., Iglesias, A., Takacs, D., & Dombovari, Z. (2018). Ultimate capability of variable pitch milling cutters. *CIRP Annals*, 67, 373–376.
- Uysal, A., Demiren, F., & Altan, E. (2015). Applying minimum quantity lubrication (mql) method on milling of martensitic stainless steel by using nano mos2 reinforced vegetable cutting fluid. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 195, 2742–2747.
- Varghese, V., Chakradhar, D., & Ramesh, M. R. (2018). Micro-mechanical characterization and wear performance of tialn/nbn pvd coated carbide inserts during end milling of aisi 304 austenitic stainless steel. *Materials today: Proceedings*, 5, 12855–12862.
- Wan, M., Feng, J., Zang, W.-H., Yang, Y., & Ma, Y.-C. (2017a). Working mechanism of helix angle on peak cutting forces together with its design theory for peripheral milling tools. *Journal of Material Processing Technologies*, 249, 570–580.
- Wan, M., Yuan, H., Feng, J., Zhang, W.-H., & Yin, W. (2017b). Industry-oriented method for measuring the cutting forces based on the deflections of tool shank. *International Journal of Mechanical Sciences*, 130, 315–323.
- Wang, C., Xie, Y., Qin, Z., Lin, H., Yuan, Y., & Wang, Q. M. (2015). Wear and breakage of tialn- and tisin-coated carbide tools during high-speed milling of hardened steel. *Wear*, 336–337, 29–42.
- Wang, M.-Y. & Chang, H.-Y. (2004). Experimental study of surface roughness in slot end milling al2014-t6. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44, 51–57.
- Yasir, M., Ginta, T. L., Ariwahjoedi, B., Alkali, A. U., & Danish, M. (2016). Effect of cutting speed and feed rate on surface roughness of aisi 316l ss using end-milling. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11, 1–5.
- Yue, C., Gao, H., Liu, X., Liang, S., & Wang, L. (2019). A review of chatter vibration research in milling. *Chinese Journal of Aeronautics*, 32, 215–242.
- Zatarain, M., Muñoa, J., Peigné, G., & Insperger, T. (2006). Analysis of the influence of mill helix angle on chatter stability. *CIRP Annals*, 55, 365–368.
- Zhang, L., qiang Zhong, Z., chang Qiu, L., dong Shi, H., Layyous, A., & ping Liu, S. (2019). Coated cemented carbide tool life extension accompanied by comb cracks: The milling case of 316l stainless steel. *Wear*, 418-419, 133–139.
- Zhang, S. J., To, S., Wang, S. J., & Zhu, Z. W. (2015). A review of surface roughness generation in ultra-precision machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 91, 76–95.
- Zhuo, Y., Jin, H., & Han, Z. (2020). Chatter identification in flank milling of thin-walled blade based on fractal dimension. *Procedia Manufacturing*, 49, 150–154.
- Ötkür, M. & Lazoglu, I. (2007). Trochoidal milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47, 1324–1332.
- Öztürk, E., Ozkirimli, O. M., Gibbons, T. J., Saibi, M., & Turner, S. (2016). Prediction of effect of helix angle on cutting force coefficients for design of new tools. *CIRP Annals*, 65, 125–128.