



Universidade de Aveiro

2023

HUGO MIGUEL **Maquinagem a 3 e 5 Eixos - Estudo do Acabamento**
DUARTE TEIXEIRA **Obtido em Superfícies Fresadas Inclinadas**



Universidade de Aveiro

2023

**HUGO MIGUEL
DUARTE TEIXEIRA**

**Maquinagem a 3 e 5 Eixos - Estudo do Acabamento
Obtido em Superfícies Fresadas Inclinadas**

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

Este trabalho teve o apoio financeiro de: Projetos de Investigação do Centro de Tecnologia Mecânica e Automação (TEMA) com referências UIDB/00481/2020 e UIDP/00481/2020; e Projeto Centro de Tecnologia Mecânica e Automação (TEMA) Infraestrutura de Investigação com referência CENTRO-01-0145-FEDER-022083

Dedico este trabalho a toda a minha família e amigos que sempre acreditaram em mim e me apoiaram, nos bons e maus momentos, do percurso mais marcante da minha vida.

o júri

presidente

Prof. Doutor Carlos Alberto Moura Relvas
Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

vogais

Professor Doutor Ricardo Nuno de Oliveira Bastos Torcato
Professor Adjunto, Universidade de Aveiro

Professor Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva
Professor Catedrático, Universidade de Aveiro

agradecimentos

Ao longo destes anos foram várias as pessoas que se cruzaram no meu caminho e, de alguma forma, contribuíram para o meu crescimento e para a concretização deste sonho.

Ao meu orientador, Professor Doutor João Paulo Davim, pela disponibilidade prestada na realização deste estudo e por todo o auxílio e colaboração para execução do mesmo.

Ao Engenheiro António Festas, por todo o apoio e por todas as trocas de ideias; por me ter exposto diversas opções, mesmo quando algo não estava a correr como planeado; por todas as dicas e conselhos durante a realização do trabalho prático; por confiar em mim durante o manuseamento de equipamentos de grande importância; por ser “o elemento-chave” para a existência de ligação com entidades externas fundamentais para a realização deste trabalho.

Ao Engenheiro Hélder Cravo da empresa CADNEA, por todo o apoio prestado para trabalhar com o *software SolidCam*. Por me ter explicado as potencialidades deste *software* e esclarecido as minhas dúvidas nos momentos de utilização do mesmo e pela constante disponibilidade demonstrada.

À Eng. Inês Bicas e ao Eng. Sérgio Lavos da Moldino, por cederem duas ferramentas de corte, pela disponibilidade prestada e apoio na realização do presente estudo.

Ao Professor Rui Moreira, por ceder uma placa de alumínio utilizada para a execução dos provetes.

Ao meu pai, à minha mãe e ao meu irmão, por todos os sacrifícios que fizeram por mim para que fosse possível chegar até onde cheguei, por todo o incentivo que me deram, pelas palavras sábias que pronunciam, por todos os conselhos, por nunca me deixarem desistir nos momentos mais difíceis.

À minha namorada, por todo o apoio incondicional, por todas as horas ao meu lado, por nunca me deixar desistir mesmo nos momentos mais difíceis, por todo o companheirismo ao longo destes anos.

A todas as outras pessoas, que sabem quem são, pelas palavras certas nos momentos certos.

palavras-chave

Maquinagem a 3 eixos; Maquinagem a 5 eixos; Acabamento de Superfície; Estratégias de Maquinagem; Rugosidade; Maquinagem de Superfícies Inclinadas; Sistemas CAD/CAM.

resumo

Este estudo tem como objetivo avaliar de que forma é que o número de eixos e a estratégia de maquinagem utilizada numa máquina CNC influenciam o acabamento de superfície obtido em provetes com superfícies inclinadas.

Para isso, este estudo foi composto por várias fases. A primeira fase incidiu no desenvolvimento de provetes, utilizando sistemas CAD/CAM. Para a modelação destes, foi utilizado o software CAD Solidworks. Após obter um modelo digital do provete a maquinar, foi executada a programação das trajetórias das ferramentas de topo com diâmetro 10 mm e de topo esférico com diâmetro 6 mm no software SolidCAM. Foram exploradas sete estratégias de maquinagem distintas, sendo que, seis foram com recurso a 3 eixos e uma com recurso aos 5 eixos do centro de maquinagem.

Numa segunda fase, foram realizados testes preliminares em espuma, com o intuito de testar as trajetórias anteriormente programadas. Após a qual, foram executados ajustes nos programas, sendo estes posteriormente para maquinar os provetes em alumínio.

Utilizaram-se dois métodos para a avaliação do acabamento de superfície, através de microscopia ótica e medição de rugosidades.

Após analisar e comparar o desempenho das estratégias de maquinagem, de um ponto de vista global, a estratégia que possibilitou minimizar a rugosidade foi a maquinagem em Z constante HSM.

Considerando todas as estratégias de maquinagem a 3 eixos, o aumento da inclinação das faces dos provetes, causou aumentos significativos nos valores de rugosidade.

No que diz respeito à estratégia de maquinagem a 5 eixos, o aumento dos ângulos de inclinação nas faces do provete, causou um decréscimo nos valores de rugosidade.

Para o provete preconizado no presente estudo, a tecnologia de maquinagem que apresentou melhor desempenho foi a maquinagem a 3 eixos.

Neste sentido, o principal contributo deste estudo prende-se com a avaliação do desempenho de diferentes estratégias de maquinagem em superfícies planas inclinadas.

keywords

3-axis Machining; 5-axis Machining; Surface Finishing; Machining Strategies; Roughness; Inclined Surface Machining; CAD/CAM Systems.

abstract

The aim of this study was to assess how the number of axes and the machining strategy used on a CNC machine influence the surface finish obtained on specimens with inclined surfaces.

To this end, the study consisted of several phases. The first phase involved the development of specimens using CAD/CAM systems. Solidworks CAD software was used to model the specimens. After obtaining a digital model of the specimen to be machined, the trajectories of the 10 mm diameter end tools and 6 mm diameter spherical end tools were programmed using SolidCAM software. Seven different machining strategies were explored, six using 3 axes and one using the 5 axes of the machining center.

In a second phase, preliminary tests were carried out on foam in order to test the previously programmed trajectories. After this, adjustments were made to the programs, which were then used to machine the aluminum specimens.

Two methods were used to assess the surface finish, through optical microscopy and roughness measurement.

After analyzing and comparing the performance of different machining strategies, from an overall point of view, the strategy that minimized roughness was HSM constant Z machining.

Considering all the 3-axis machining strategies, increasing the inclination of the specimen faces caused significant increases in the roughness values.

With regard to the 5-axis machining strategy, increasing the inclination angles on the specimen faces caused a decrease in the roughness values.

For the specimen recommended in this study, the machining technology that performed best was 3-axis machining.

In this sense, the main contribution of this study is to evaluate the performance of different machining strategies on inclined flat surfaces.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Finalidade do estudo	4
1.3	Questão de investigação	4
1.4	Objetivos	4
1.5	Organização do relatório	5
2	ENQUADRAMENTO TEÓRICO E PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	O processo de maquinagem	6
2.2	A tecnologia dos centro de maquinagem CNC	7
2.2.1	Centro de maquinagem de 3 eixos	8
2.2.2	Centro de maquinagem de 5 eixos	10
2.3	Os sistemas de CAD/CAM	12
2.3.1	Programação das operações de maquinagem	13
2.3.2	Simulação virtual das operações de maquinagem	15
2.3.3	Pós processamento do programa CAM	16
2.4	Os parâmetros de corte	17
2.4.1	Velocidade de corte	17
2.4.2	Velocidade de avanço	18
2.4.3	Profundidade de corte	19
2.5	Estratégias de maquinagem de acabamento	20
2.5.1	Estratégias de maquinagem de acabamento a 3 eixos	20
2.5.1.1	Maquinagem de Z constante	22
2.5.1.2	Passagem constante 3D	22
2.5.1.3	Maquinagem linear	23
2.5.1.4	Maquinagem horizontal	24
2.5.2	Estratégias de maquinagem de acabamento a 5 eixos	25
2.5.2.1	Maquinagem a 5 eixos simultâneos	26
2.6	Maquinagem de superfícies inclinadas	26
2.7	Acabamento de superfície	29
2.7.1	Rugosidade da superfície	30
2.7.2	Síntese do estado de arte	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	Definição do modelo e geometria de estudo	34
3.2	Material a maquinar	35
3.3	Centro de maquinagem utilizado e respetivas características	36
3.3.1	Sistema de fixação de peças	37
3.3.2	Fixador da ferramenta	38

3.4	Seleção das estratégias de maquinagem	39
3.4.1	Desbaste	39
3.4.2	Desbaste/acabamento superfície horizontal	40
3.4.3	Acabamento superfícies inclinadas	41
3.5	Escolha das ferramentas de corte	44
3.6	Parâmetros de corte	46
3.7	Equipamento de medição e controlo utilizado	49
3.7.1	Rugosidade de superfície.....	49
3.7.2	Análise por microscopia ótica	50
4	TRABALHO EXPERIMENTAL	52
5	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	60
5.1	Análise superficial através de microscopia ótica	60
5.1.1	Faces de 30º de inclinação	61
5.1.2	Faces de 45º de inclinação	62
5.1.3	Faces de 60º de inclinação	63
5.1.4	Síntese dos resultados obtidos por microscopia ótica em superfícies inclinadas	64
5.2	Análise superficial através da medição da rugosidade	65
5.2.1	Superfícies inclinadas	65
5.2.1.1	Medição no sentido transversal dos valores de Ra.....	66
5.2.1.2	Medição no sentido transversal dos valores de Rt	67
5.2.1.3	Medição no sentido transversal dos valores de Rz	68
5.2.1.4	Medição no sentido longitudinal dos valores de Ra	69
5.2.1.5	Medição no sentido longitudinal dos valores de Rt	70
5.2.1.6	Medição no sentido longitudinal dos valores de Rz.....	71
5.3	Síntese dos resultados obtidos.....	72
5.3.1	Desempenho das estratégias de maquinagem	72
5.3.2	Desempenho das diferentes inclinações.....	73
5.3.2.1	Valores referentes às estratégias de 3 eixos do centro de maquinagem	73
5.3.2.2	Valores referentes à estratégia de 5 eixos do centro de maquinagem	74
6	CONCLUSÕES	75
6.1	Trabalhos futuros	76
	REFERÊNCIAS.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Indicadores de avaliação do processo de maquinagem (Vishnu et al., 2023) (adaptada).....	2
Figura 2 - Centro de maquinagem (HAAS, 2023).....	7
Figura 3 - A: Centro de maquinagem horizontal; B: Centro de maquinagem vertical (Moldviet, n.d.) (adaptada)	8
Figura 4 - Disposição dos eixos de um centro de maquinagem de 3 eixos (Samala & Amanda, 2023)	9
Figura 5 - Disposição dos eixos de um centro de maquinagem de 5 eixos Haas UMC 500 (HAAS, 2023)	10
Figura 6 - Eixos B e C para conversão de um centro de maquinagem de 3 a 5 eixos (EXACT MACHINERY CO., LTD., n.d.)	11
Figura 7 - Sistema CAD/CAM (Relvas, 2012).....	13
Figura 8 - (A) Simulador CAM parte exterior máquina (B) Simulador CAM área de trabalho máquina.....	16
Figura 9 - Parâmetros de corte (Sandvik Coromant, 2023)	17
Figura 10 - Profundidade axial de corte (ap) (Sandvik Coromant, 2023).....	19
Figura 11 - Profundidade radial de corte (ae) (Sandvik Coromant, 2023)	19
Figura 12 - Percurso ferramenta com estratégia Z constante (SolidCAM, 2022)	22
Figura 13 - Percurso ferramenta com estratégia passagem constante 3D (SolidCAM, 2022).....	23
Figura 14 - Percurso ferramenta com estratégia maquinagem linear (SolidCAM, 2022)	24
Figura 15 - Percurso ferramenta com estratégia maquinagem horizontal (SolidCAM, 2022).....	25
Figura 16 - Percurso ferramenta com estratégia a 5 eixos simultâneos (SolidCAM, 2022).....	26
Figura 17 - Ponto da ferramenta de topo esférico de velocidade de corte zero (Sandvik Coromant, 2023)	27
Figura 18 - Locais da ferramenta de topo esférico com velocidade de corte superior a zero (Sandvik Coromant, 2023).....	28

Figura 19 - A: inclinação na direção do avanço da ferramenta; B: inclinação lateral da ferramenta (SolidCAM, 2022).....	29
Figura 20 - Desvio médio aritmético (Ra) (Stahli. A. W, 2023)	30
Figura 21 - Altura máxima Pico a Vale (Rt) (Stahli. A. W, 2023)	31
Figura 22 - Média de altura do pico ao vale de cinco comprimentos de amostragem consecutivos (Rz) (Stahli. A. W, 2023).....	31
Figura 23 - Modelo digital do provete modelado.....	34
Figura 24 - A: Haas UMC 500 exterior	36
Figura 25 - Sistema de fixação de peças	38
Figura 26 - Porta ferramentas.....	38
Figura 27 - Trajetória executada durante operação de desbaste	40
Figura 28 - Trajetória executada durante a operação de maquinagem horizontal HSM	40
Figura 29 -Trajetória executada durante a operação de maquinagem de Z constante.....	41
Figura 30 - Trajetória executada durante a operação de maquinagem de passagem constante 3D	41
Figura 31 - Trajetória executada durante a operação de maquinagem linear	42
Figura 32 - Trajetória executada durante a operação de maquinagem de Z constante turbo.....	42
Figura 33 - Trajetória executada durante a operação de maquinagem passagem constante 3D turbo	43
Figura 34 - Trajetória executada durante a operação de maquinagem linear turbo	43
Figura 35 - Trajetória executada durante a operação de maquinagem a 5 eixos simultâneos	44
Figura 36 - A: fresa de topo HGOS2100-PN; B: Fresa de topo esférico HGOB2060-PN	46
Figura 37 - Rugosímetro Hommel T1000	50
Figura 38 – A: Microscópio Leica EZ4 W; B: Software Leica	51
Figura 39 - Peça de testagem do pós-processador maquinada	52
Figura 40 - Simulação virtual da operação de desbaste.....	53

Figura 41 - A: Maquinagem provete em espuma a 3 eixos; B: Maquinagem provete em espuma a 5 eixos	54
Figura 42 - Provetes maquinados em poliuretano	54
Figura 43 - Blocos alumínio 6061-T6.....	55
Figura 44 - Operação de desbaste	56
Figura 45 - Acabamento superfície horizontal	56
Figura 46 - Acabamento superfícies inclinadas	57
Figura 47 - A: Provete anteriormente modelado; B: Provete alterado	58
Figura 48 - Provetes finais.....	58
Figura 49 - Dispositivos para posicionamento dos provetes.....	59
Figura 50 - A: Medição rugosidade superfícies; B: Análise superfícies no microscópio	59
Figura 51 - Set-up para análise por microscopia ótica	60
Figura 52 - A: Estratégia de maquinagem Passagem constante 3D; AT: Estratégia de maquinagem Passagem constante 3D turbo; B: Estratégia de maquinagem Constante Z; BT: Estratégia de maquinagem Constante Z turbo; C: Estratégia de maquinagem linear; CT: Estratégia de maquinagem linear turbo; D: Estratégia de maquinagem 5 eixos simultâneos.....	61
Figura 53 - A: Estratégia de maquinagem Passagem constante 3D; AT: Estratégia de maquinagem Passagem constante 3D turbo; B: Estratégia de maquinagem Constante Z; BT: Estratégia de maquinagem Constante Z turbo; C: Estratégia de maquinagem linear; CT: Estratégia de maquinagem linear turbo; D: Estratégia de maquinagem 5 eixos simultâneos.....	62
Figura 54 - A: Estratégia de maquinagem Passagem constante 3D; AT: Estratégia de maquinagem Passagem constante 3D turbo; B: Estratégia de maquinagem Constante Z; BT: Estratégia de maquinagem Constante Z turbo; C: Estratégia de maquinagem linear; CT: Estratégia de maquinagem linear turbo; D: Estratégia de maquinagem 5 eixos simultâneos.....	63

Figura 55 - Set-up para procedimento de medição de rugosidade das superfícies	65
Figura 56 - Sentido de medição das superfícies inclinadas.....	66

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química da liga de alumínio 6061-T6 (MatWeb, 2023)..	35
Tabela 2 - Propriedades físicas e mecânicas da liga de alumínio 6061-T6 (MatWeb, 2023)	36
Tabela 3 - Dimensões das ferramentas de corte	46
Tabela 4 - Parâmetros de corte recomendados pelo fabricante das ferramentas utilizadas	47
Tabela 5 - Parâmetros de corte utilizados durante a operação de desbaste	47
Tabela 6 - Parâmetros de corte utilizados durante a operação de maquinagem superfície horizontal	48
Tabela 7 - Parâmetros de corte utilizados durante a operação de acabamento das superfícies inclinadas	49
Tabela 8 - Síntese resultados obtidos para as superfícies maquinadas inclinadas	73
Tabela 9 - Resultados obtidos por ângulos para estratégias de 3 eixos	74
Tabela 10 - Resultados obtidos por ângulos para estratégia de 5 eixos.....	74

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Medição no sentido transversal dos valores de Ra	67
Gráfico 2 - Medição no sentido transversal dos valores de Rt	68
Gráfico 3 - Medição no sentido transversal dos valores de Rz.....	69
Gráfico 4 - Medição no sentido longitudinal dos valores de Ra.....	70
Gráfico 5 - Medição no sentido longitudinal dos valores de Rt.....	71
Gráfico 6 - Medição no sentido longitudinal dos valores de Rz.....	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS :

CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CN	Controlo Numérico
CNC	Controlo Numérico Computorizado
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
DPE	Dissertação/Projeto/Estágio
HSM	High Speed Machining
HSR	High Speed Roughing
LTM	Laboratório Tecnologia Mecânica
MACTRIB	Laboratório de Tribologia
UA	Universidade de Aveiro

SÍMBOLOS :

Ae	Profundidade radial de corte
Ap	Profundidade axial de corte
D	Diâmetro da ferramenta
<i>f</i>	Velocidade de avanço
fz	Avanço por dente
Lt	Distância total
mm	Milímetros
m/min	Metros por minuto
mm/min	Milímetros por minuto
n	Velocidade de rotação
Ra	Rugosidade média aritmética
Rpm	Rotações por minuto
Rt	Amplitude máxima de rugosidade
Rz	Profundidade média da rugosidade
z	Número de navalhas da ferramenta
Vc	Velocidade de corte
µm	micrómetro

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado o contexto em que esta investigação foi desenvolvida, as questões de investigação, as finalidades do estudo e os objetivos. Para além destes aspetos, a importância da realização deste estudo é abordada neste primeiro capítulo, bem como a organização do documento.

1.1 Contextualização

Nos dias de hoje, na indústria metalúrgica existe uma grande complexidade imposta à fabricação. Nesta, é cada vez mais comum estar perante a presença de superfícies côncavas, convexas e planas (Baptista & Antune Simões, 2000).

A complexidade de geometrias institui a necessidade de recorrer a processos de fabrico hábeis e com potencialidade para as produzir com o maior rigor possível (Dimitrov & Saxer, 2012).

Segundo Ramos et al. (2003), o projeto de produtos de geometria complexa, bem como os novos desafios tecnológicos introduzidos pelas indústrias aeroespacial, automobilística, no fabrico de moldes, de componentes e de muitos outros setores de grande relevo industrial, promoveram o rápido desenvolvimento de poderosos *softwares* de desenho assistido por computador (CAD). Os sistemas CAD permitem-nos modelar geometrias muito complexas que, conseqüentemente, introduzem problemas de fabrico de componentes onde a redução de tempo e custos dos processos são objetivos a seguir. Deste modo, refira-se que a crescente complexidade dos produtos a executar motivou o desenvolvimento de novas tecnologias de fabricação.

As máquinas CNC são tecnologias que passam por bastantes desenvolvimentos na indústria, sendo estas consideradas como o “motor dos processos de fabrico modernos”. Esta tecnologia oferece maior produtividade, permite executar produtos com mais qualidade e de forma mais sustentável, sendo considerados indicadores de avaliação da qualidade deste processo tecnológico (Vishnu et al., 2023). Assim sendo, o principal foco da presente

dissertação é avaliar a qualidade das superfícies maquinadas obtidas por fresagem a 3 e a 5 eixos. Na figura 1 encontram-se representados os indicadores de avaliação do processo de maquinagem.

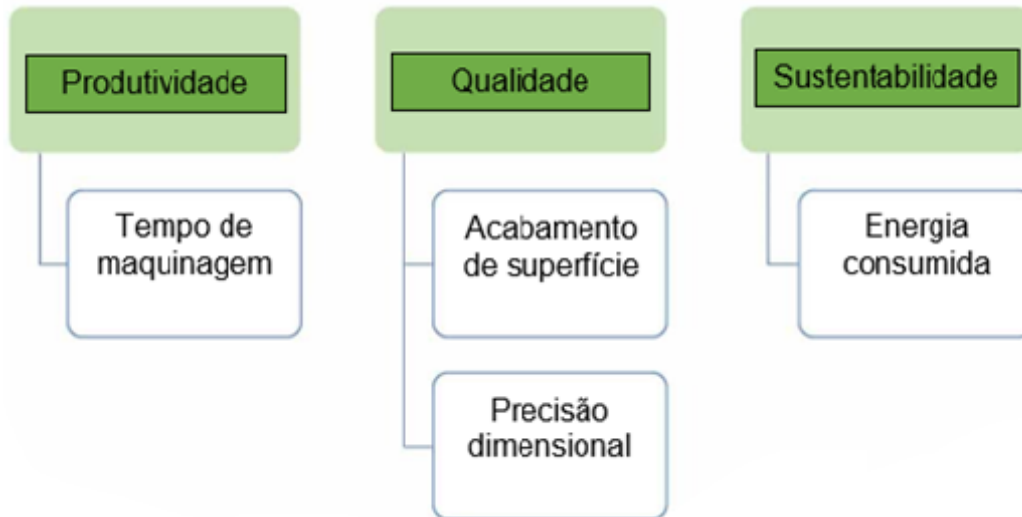


Figura 1 - Indicadores de avaliação do processo de maquinagem (Vishnu et al., 2023) (adaptada)

A utilização de uma técnica de maquinagem adequada para o componente que se pretende fabricar, permite não só obter uma melhor qualidade de superfície, como reduzir o tempo de fabrico e o respetivo consumo de energia, e, conseqüentemente o custo de execução será menor (Alok et al., 2023).

As condições de superfícies são alteradas, não só pela tecnologia de maquinagem utilizada, mas em grande parte pela influência dos parâmetros de corte e pelas estratégias de maquinagem selecionadas. Uma seleção inadequada dos parâmetros do processo, causa perdas, tais como o rápido desgaste da ferramenta que podem conseqüente resultar na sua fratura, e em peças defeituosas e/ou qualidade da superfície reduzida (Uzun et al., 2022).

A maquinagem de peças a 5 eixos, sem o auxílio de sistemas computacionais é possível, mas não é exequível para geometrias complexas nem é rentável para trabalhos mais complicados, pelo que, é fundamental a utilização de *softwares* CAD/CAM para a programação dos 5 eixos de um centro de maquinagem. No final do processo de programação CAM é importante que haja uma simulação e verificação do processo de maquinagem,

ou seja, é necessário que o *software* CAM verifique e apresente graficamente a existência de alguma inconformidade na superfície, a existência de eventuais colisões, permita analisar a coerência dos movimentos realizados pela ferramenta e, ainda, forneça informações sobre a existência ou não de material residual deixado em determinadas regiões da peça (Sadílek et al., 2018).

Neste sentido, saliente-se o estudo realizado por (Ghionea et al., 2009) que propôs-se testar várias estratégias de maquinagem para determinadas operações, e defende que o processo de maquinagem pode e deve ser otimizado através da ferramenta utilizada e do tipo de trajetória por esta percorrida, a fim de obter superfícies com precisão, qualidade e menores tempos de produção.

Posto isto, o desenvolvimento de trabalhos efetuados em centros de maquinagem de 3 e 5 eixos é apresentado em grande escala na indústria. As melhorias que estes implementaram nos produtos e serviços torna-os bastante relevantes, porém, avaliar qual destes (3 ou 5 eixos) apresenta melhor qualidade no acabamento de superfície é um dos objetivos deste estudo.

Desta forma, o presente trabalho enquadra-se no desafio de encontrar métricas rigorosas que permitam estabelecer a comparação entre estes dois métodos. O foco será instituir estratégias de maquinagem e parâmetros de corte adequados durante a execução dos modelos de estudo, a fim de obter valores de rugosidade, como indicadores de qualidade, que permitam retirar conclusões.

Para esse efeito, foi utilizado o centro de maquinagem CNC de 5 eixos HAAS UMC 500 que se encontra no Departamento de Engenharia Mecânica da UA. Para tal, foi feita a programação em CAM dos 5 eixos simultâneos através do *software* SolidCam e a utilização de um pós-processador para o centro de maquinagem.

1.2 Finalidade do estudo

Durante a realização do presente estudo foi definido como finalidade do mesmo:

- Efetuar um estudo comparativo qualitativo e quantitativo do acabamento de superfície obtido por fresagem a 5 eixos, face à fresagem a 3 eixos em superfícies inclinadas em materiais metálicos.

1.3 Questão de investigação

Neste sentido, a questão de investigação do presente estudo é:

- Como é que o número de eixos e a estratégia de maquinação utilizada numa máquina CNC, influenciam o acabamento de superfície obtido em faces inclinadas ?

1.4 Objetivos

Através da questão de investigação definida, foram estabelecidos os seguintes objetivos a alcançar com o presente estudo:

- Projetar um modelo com uma geometria pertinente para o presente estudo;
- Produzir os modelos de estudo, recorrendo a maquinação a 3 e 5 eixos com diferentes estratégias;
- Registrar e analisar os resultados nos modelos executados e obter valores de rugosidade nas superfícies maquinadas.

1.5 Organização do relatório

O presente documento encontra-se organizado em oito capítulos.

No capítulo I – Introdução – é resumido o contexto do estudo, a sua finalidade, a questão de investigação e os objetivos; é incluído também nesta mesma secção uma breve descrição da organização de todo este documento.

O capítulo II – Enquadramento Teórico e Pesquisa Bibliográfica – é composto pela revisão do estado de arte onde se descreve o que foi estudado por outros autores tendo em conta o tema da dissertação e os objetivos propostos.

No capítulo III – Materiais e Métodos – são mencionadas e justificadas todas as opções tomadas para a execução do trabalho experimental.

No capítulo IV – Trabalho Experimental – apresenta-se todo o “algoritmo” percorrido, desde a modelação dos provetes até às medições finais para obter os resultados do estudo.

No capítulo V – Análise de Resultados – são descritos os resultados obtidos quer por microscopia ótica, quer por medição de rugosidade das superfícies. Após a análise dos resultados, foi feita uma síntese dos resultados obtidos.

No capítulo VI - Conclusões – são descritas as conclusões do estudo, onde se inclui a resposta à questão de investigação. São apresentadas também, neste último capítulo, sugestões para futuros trabalhos a fim de implementar melhorias no presente estudo. Finaliza-se o documento com as referências bibliográficas.

2 ENQUADRAMENTO TEÓRICO E PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Para o respetivo enquadramento teórico começou-se por efetuar uma pesquisa bibliográfica. Deste modo, a revisão bibliográfica começou por sistematizar o processo de fresagem e quais as vantagens que este aporta para o meio industrial. Em seguida, foi abordada a tecnologia dos centros de maquinagem, o seu funcionamento e diferenças entre centros de maquinagem de 3 e 5 eixos. Foram também abordados os sistemas CAD/CAM e os procedimentos a seguir no manuseamento destes sistemas, assim como aspetos de boas práticas na utilização dos mesmos. Foram ainda referidos os parâmetros de corte e as estratégias de maquinagem de 3 como de 5 eixos e a sua influência no resultado da superfície. No final, foi abordada a maquinagem de superfícies inclinadas, o acabamento de superfícies, e as formas de o avaliar.

2.1 O processo de maquinagem

A maquinagem é um processo de corte com remoção de aparas, sendo esta a designação dada aos processos nos quais os materiais são removidos para criar a forma em uma peça de trabalho, com as dimensões e os acabamentos de superfície desejados. Este é um dos processos de fabrico mais utilizados na indústria da metalomecânica, sendo bastante conhecido pelo bom desempenho que tem vindo a demonstrar nas mais diversas áreas. Com o sucessivo desenvolvimento das máquinas-ferramentas, é possível fabricar peças de elevada complexidade geométrica, com tolerâncias apertadas e com bom acabamento de superfície. Contudo, é necessário combinar da melhor forma possível todos os parâmetros que têm influência no resultado final (Alok et al., 2023).

Segundo Relvas (2012) a utilização de máquinas-ferramentas associadas a um controlo numérico (CN) trouxe inúmeras vantagens à indústria, das quais se destacam as seguintes:

- Produtividade: diminuição do tempo total de maquinagem;
- Flexibilidade: permite a execução de protótipos e pequenas séries sem grandes gastos temporais, devido à fácil permuta de programas e ao grande número de operações que estas conseguem executar;
- Precisão: a utilização de servomotores em conjunto com *encoders* ou réguas óticas permitem precisões na ordem do micrómetro;
- Fiabilidade: após ter o programa feito e validado, é possível proceder à produção de peças em massa sem paragens para ajustes;
- Viabilização de peças complexas: a utilização de *softwares* CAM, viabiliza a execução de peças com formas complexas, pois permite a geração de código CN rapidamente, assim como a simulação do processo que permite a redução de erros durante a maquinagem.

2.2 A tecnologia dos centro de maquinagem CNC

Um centro de maquinagem é uma máquina-ferramenta que tem por base uma fresadora, mas bastante mais automatizada e versátil de forma a permitir executar várias operações sequencialmente. A figura 2 apresenta um centro de maquinagem.



Figura 2 - Centro de maquinagem (HAAS, 2023)

Estes são capazes de realizar a troca automática da ferramenta de corte através de um braço de troca de ferramentas. Conseqüentemente, o tempo e o esforço necessário para a troca de ferramentas são menores, o que permite reduzir os tempos de produção, os gastos energéticos e conseqüentemente os respectivos custos (Tsai & Lin, 2018).

Os centros de maquinagem podem apresentar 2 tipos diferentes de configuração:

- Verticais (árvore no sentido vertical como ilustra a figura 3B);
- Horizontais (árvore no sentido horizontal como ilustra a figura 3A).

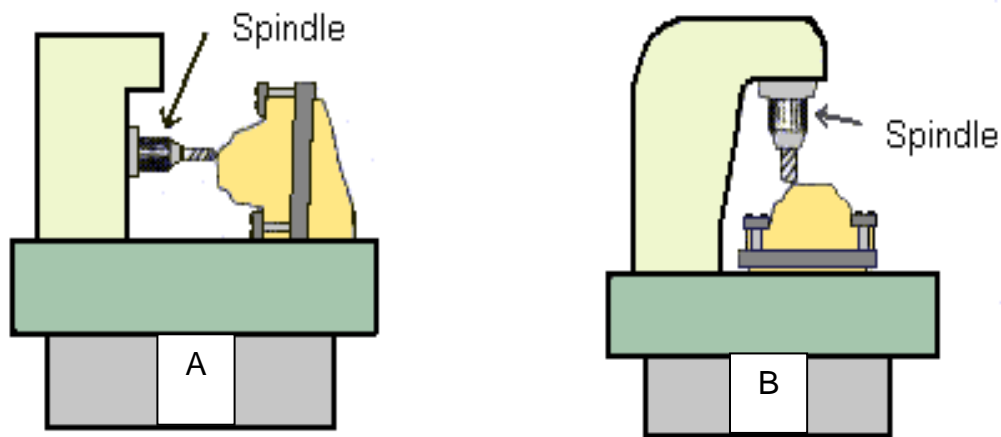


Figura 3 - A: Centro de maquinagem horizontal; B: Centro de maquinagem vertical (Moldviet, n.d.) (adaptada)

O tipo de centro de maquinagem mais utilizado na indústria é o vertical de 3 eixos. No entanto, caso exista a necessidade de produção de peças com maior complexidade, recorre-se a centros de maquinagem com 4 ou 5 eixos, embora seja ainda possível a utilização de centros de maquinagem multitarefa, sendo estes ainda portadores de um maior número de eixos (Tsai & Lin, 2018)

2.2.1 Centro de maquinagem de 3 eixos

Os centros de maquinagem de 3 eixos são, normalmente, utilizados para maquinar geometrias a 2D, 2.5D e 3D. É possível maquinar os 6 lados de uma peça recorrendo a um centro de maquinagem de 3 eixos, porém, para isso, é necessário realizar vários apertos de fixação de peça em função das diversas faces a

maquinar, o que faz com que se torne um processo mais complexo, demorado e conseqüentemente mais caro. Para uma única configuração de fixação, apenas pode ser maquinado um lado da peça, daí a esta tecnologia ser mais adequada para a fresagem de perfis planos, furações e furos roscados em linha com um eixo (Chan et al., 2023).

Os centros de maquinagem de 3 eixos, tem o eixo Z sempre no alinhamento do eixo da árvore, sendo o seu sentido negativo aquele que se aproxima da peça e o positivo o que se afasta da peça. A posição dos eixos X e Y é deduzida a partir do eixo do Z. O plano XY, numa fresadora, é o da mesa de trabalho. Normalmente o eixo Y é aquele que entre os eixos X e Y tem o menor curso (Chan et al., 2023).

Na figura 4 encontra-se representado o sistema de eixos de um centro de maquinagem de 3 eixos.

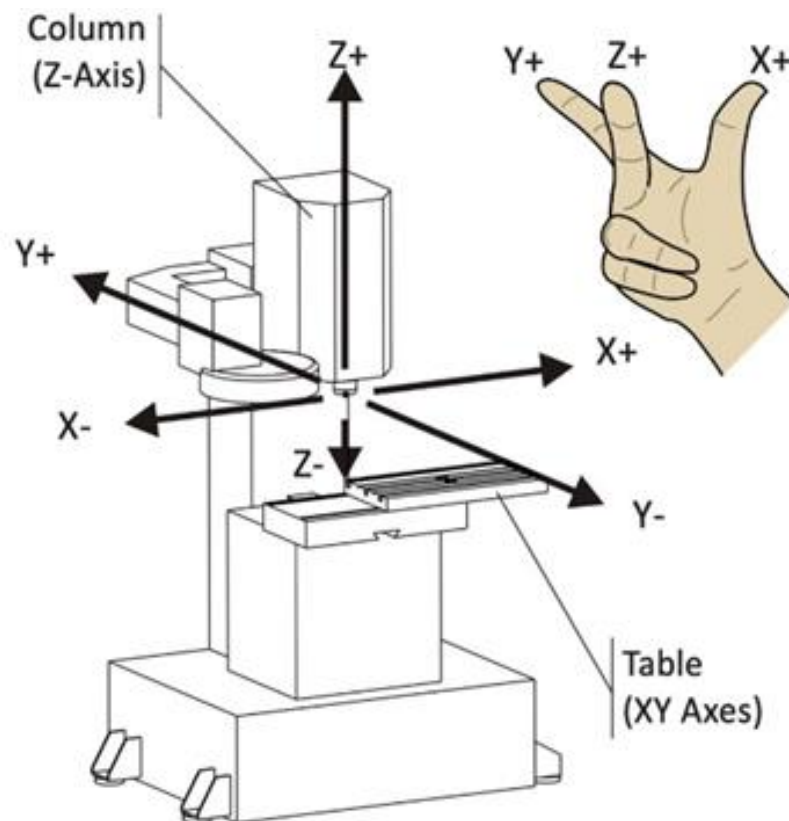


Figura 4 - Disposição dos eixos de um centro de maquinagem de 3 eixos (Samala & Amanda, 2023)

2.2.2 Centro de maquinagem de 5 eixos

Nos últimos anos, os centros de maquinagem de 5 eixos foram alvos de bastantes melhorias tecnológicas que os tornaram mais compactos e economicamente mais acessíveis. Os progressos implementados permitiram uma maior utilização desta tecnologia em componentes de geometria complexa e tolerâncias apertadas (Mazak, 2016).

As máquinas de 5 eixos podem permitir o controlo dos 5 eixos simultâneos ou realizar operações a 3 eixos e disporem de mais 2 eixos indexantes (conhecidos como 3+2 eixos). Na maquinagem com 5 eixos simultâneos, como mostra a Figura 5, os 3 eixos lineares (X, Y e Z) e os dois rotativos (B e C) podem movimentar-se simultaneamente de forma a ser possível a maquinagem de formas complexas. As vantagens que a utilização de 5 eixos simultâneos oferece são deslocamentos da ferramenta mais rápidos e melhor qualidade no acabamento de superfície obtido (Mazak, 2016).

Na figura 5 que se segue, encontra-se representada a disposição dos eixos de um centro de maquinagem HAAS UMC 500.

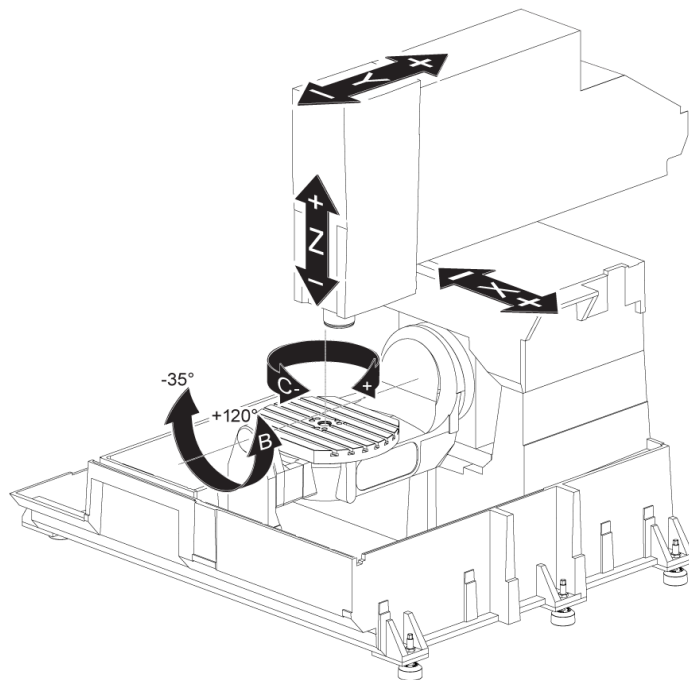


Figura 5 - Disposição dos eixos de um centro de maquinagem de 5 eixos Haas UMC 500 (HAAS, 2023)

Em determinadas peças de maior complexidade geométrica, recorre-se muitas das vezes à maquinação a 3+2 eixos. Os eixos rotativos (B e C) são utilizados apenas para posicionamento da peça. Além de melhorarem o acesso da ferramenta à peça, permitem a utilização de ferramentas mais curtas e de maior rigidez. Além das melhorias anteriormente descritas, a maquinação a 3+2 eixos tem maior facilidade de previsão e cálculo das trajetórias, a fim de evitar colisões entre a ferramenta e a peça (Mazak, 2016).

Para além dos centros de maquinação de 5 eixos disponíveis, existe a possibilidade de converter um centro de maquinação originalmente de 3 eixos, num de 5 eixos. Isto ocorre se houver a necessidade de utilizar um maior número de eixos. Desta forma, existem sistemas mecânicos de indexação ao centro de maquinação de 3 eixos, sendo estes dispositivos, mesas rotativas e portadoras do eixo B e C (4º e 5º eixo), como ilustra a figura 6.

Em meios industriais onde é necessário um centro de maquinação de 5 eixos e a baixa produtividade não compensa o investimento, as mesas rotativas apresentam-se como uma boa solução pois tem um custo inferior, desempenho razoável e são um bom princípio para que o utilizador destas tecnologias se adapte aos equipamentos de 5 eixos contínuos no lugar dos convencionais 3 eixos (Mazak, 2016).

Na figura 6 encontra-se representado um sistema de eixos B e C para indexar a um centro de maquinação de 3 eixos (caso o comando numérico do centro de maquinação de destino o permita).



Figura 6 - Eixos B e C para conversão de um centro de maquinação de 3 a 5 eixos (EXACT MACHINERY CO., LTD., *n.d.*)

2.3 Os sistemas de CAD/CAM

Os sistemas CAD/CAM são utilizados para projetar um produto e para programar todos os procedimentos necessários à sua execução, quando se recorre à maquinagem CNC. Para permitir a programação de um centro de maquinagem de 3 ou de 5 eixos simultâneos, recorre-se a *softwares* CAD/CAM, uma vez que manualmente torna-se inconcebível a programação destes (Altintas et al., 2014).

O desenho assistido por computador (CAD) tem como objetivo primordial a modelação tridimensional de um objeto e a concessão digital do mesmo. Para além da execução de desenhos, estes *softwares* permitem o estudo e a verificação do conceito implementado ainda durante a execução do modelo digital, de forma a permitir qualquer tipo de alteração antes de passar à execução física do componente. A partir de uma modelação feita num *software* CAD, esse ficheiro é importado pelo programador para o *software* CAM (Kučera et al., 2023).

O fabrico assistido por computador (CAM) é uma ferramenta utilizada em série com os *softwares* CAD para gerar todos os parâmetros necessários à execução de um componente. Neste, é calculado e gerado o percurso da ferramenta de corte, assim como definidos os parâmetros de corte associados ao processo que ocorre posteriormente, gerando assim todas as instruções necessárias e compilando-as em código CN. Após a execução do programa é importante simular virtualmente o processo, a fim de validar as trajetórias e garantir segurança. Se as trajetórias não se mostrarem satisfatórias para o programador, devem ser reconsideradas e ajustadas (Kučera et al., 2023).

Após a geração das trajetórias da ferramenta de corte, os *softwares* CAM recorrem a um pós-processador para gerar o programa CN em conformidade com o controlador da máquina-ferramenta. Por fim, o programa é enviado para a máquina, onde se procede à fixação do bloco em bruto, preparam-se as ferramentas a utilizar e executa-se a peça final (Y. Liu & Wu, 2023).

A figura 7 ilustra o processo de maquinagem CNC recorrendo a um sistema CAD/CAM.

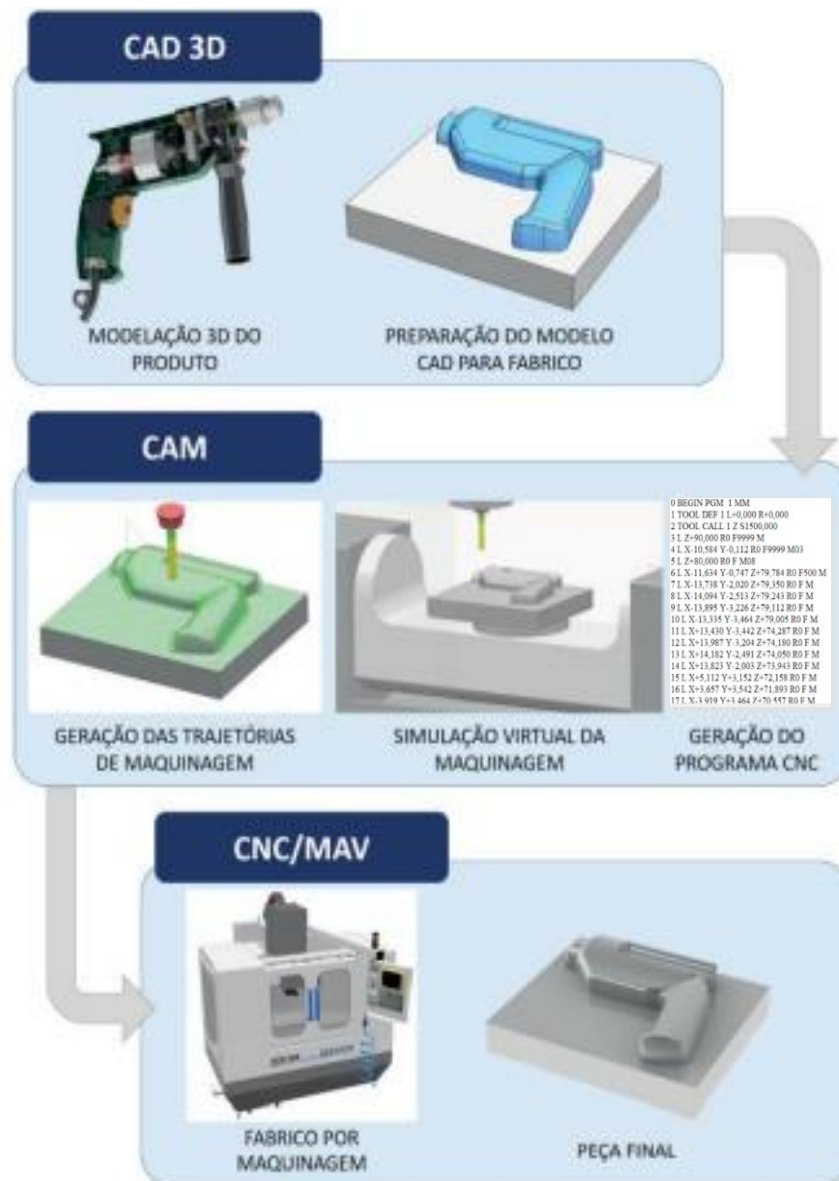


Figura 7 - Sistema CAD/CAM (Relvas, 2012)

2.3.1 Programação das operações de maquinagem

Segundo Stratogiannis (2019), na programação das operações de maquinagem são definidas as ferramentas de corte a utilizar, o dispositivo de fixação da peça, as trajetórias da maquinagem e os parâmetros de corte.

As operações de maquinagem podem ser de 3 tipos:

- Desbaste;

- Semiacabamento;
- Acabamento.

O desbaste é a primeira fase da fresagem e é usado para remover rapidamente uma grande quantidade de material do bloco de trabalho. Nesta etapa, a ferramenta de corte utilizada é geralmente uma fresa de maiores dimensões, capaz de remover grandes quantidades de material numa única passagem. As velocidades de corte e avanço são geralmente altas para maximizar a taxa de remoção de material. O objetivo do desbaste é deixar o bloco de trabalho o mais próximo possível da forma final desejada (Stratogiannis et al., 2019).

O semi-acabamento é a segunda fase do processo de fresagem e é utilizado para remover a maior parte do material deixado pelo desbaste. A ferramenta de corte utilizada no semi-acabamento, é nomeadamente uma fresa com navalhas menores e mais próximas do que a anteriormente utilizada no desbaste, a fim de remover material mais controladamente. As velocidades de corte e avanço são geralmente mais baixas do que no desbaste, para obter um melhor acabamento das superfícies. Nesta operação o objetivo é deixar o bloco de trabalho com uma forma quase final e um acabamento próximo ao acabamento final desejado (Stratogiannis et al., 2019).

Por fim, no seguimento das duas fases de maquinagem anteriormente descritas, a maquinagem em acabamento é utilizada para dar ao bloco de trabalho a forma final desejada. A ferramenta de corte utilizada nesta fase é geralmente uma fresa de menores dimensões, que pode remover material com grande precisão e controlo. Normalmente, são utilizadas velocidades de corte mais altas e velocidades de avanço mais baixas do que no semi-acabamento. O objetivo do acabamento é deixar a peça com a forma final desejada e com um bom acabamento de superfície, a fim de garantir boa precisão dimensional (Stratogiannis et al., 2019).

A qualidade de uma superfície depende de vários fatores, incluindo a trajetória que a ferramenta percorre. Desta forma, esta corresponde ao percurso que a ferramenta faz num determinado espaço a maquinar, até obter a peça final maquinada.

2.3.2 Simulação virtual das operações de maquinagem

O objetivo das simulações virtuais das operações de maquinagem é simular as operações em ambiente virtual antes da realização física de uma peça. Se não forem utilizadas simulações e o processo for considerado defeituoso, o ciclo de tentativa e erro entre o CAM e as etapas de maquinagem física têm de ser repetidas até que um resultado satisfatório seja obtido (Altintas et al., 2014).

Assim sendo, a execução de simulações virtuais reduz ou elimina maquinagens preliminares. Recorrendo a estas, é permitido ao programador verificar existência de alguma violação da superfície da peça, verificar a existência de colisões, analisar as trajetórias da ferramenta a serem realizadas a fim de perceber a coerência destas e ainda obter informações à cerca de eventual material residual deixado em regiões da peça a maquinar (Yi & Xue, 2023).

Além de verificações físicas, a simulação virtual de operações de maquinagem é também importante para ter conhecimento do tempo necessário para executar a peça pretendida. Sabendo o tempo virtual de maquinagem, é permitido ao programador ponderar a necessidade de uma eventual otimização do programa (Yi & Xue, 2023).

Para assegurar a integridade tanto da máquina como da ferramenta de corte, os *softwares* CAM dispõem de um ambiente virtual que possibilita a importação da geometria da máquina. Neste, é possível importar ficheiros CAD de ferramentas, do sistema de fixação da peça à mesa de trabalho e de outros elementos constituintes da máquina e que posteriormente são utilizados pelo sistema para executar a simulação virtual do processo de maquinagem programado (Altintas et al., 2014). Na figura 8 encontra-se representado o ambiente virtual do simulador CAM, mais especificamente do software SolidCAM.

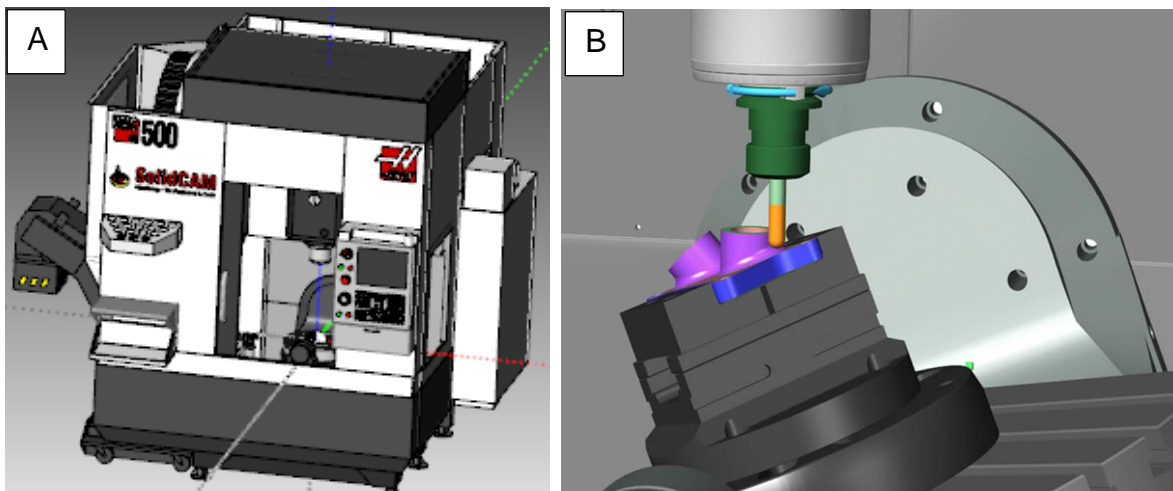


Figura 8 - (A) Simulador CAM parte exterior máquina (B) Simulador CAM área de trabalho máquina

2.3.3 Pós processamento do programa CAM

O pós-processamento de um programa CAM é uma etapa essencial no processo de maquinação. Este, ocorre após o *software* CAM utilizado ter gerado os percursos da ferramenta para executar a peça previamente modelada (Yu & Ding, 2019).

A etapa de pós-processamento corresponde à conversão do percurso da ferramenta numa linguagem que o controlador da máquina CNC possa entender. O centro de maquinação normalmente usa uma linguagem proprietária, variando assim com a marca e o modelo do mesmo. A essa conversão de linguagem dá-se o nome de transformação cinemática inversa (Yu & Ding, 2019).

A principal preocupação no pós-processamento ocorre quando o percurso gerado pelo CAM é traduzido em código CN com erros derivados da inadequação do pós-processador, o que faz com que não seja garantida uma maquinação precisa e eficiente, podendo até causar danos materiais (Yu & Ding, 2019).

2.4 Os parâmetros de corte

Os parâmetros de corte dependem do material que está a ser maquinado, da geometria da peça, da ferramenta de corte que está a ser utilizada e do tipo de operação. É importante otimizar esses parâmetros para se obter o acabamento superficial desejado, uma boa vida útil da ferramenta e eficiência para a operação de fresagem em questão (Tunç et al., 2016).

Os parâmetros de corte na fresagem são os quatro seguintes:

- Velocidade de corte (V_c - m/min) ou rotação (rpm);
- Velocidade de Avanço (f - mm/min);
- Profundidade de Corte (a_p - mm);
- Largura de Corte (a_e - mm).

Na figura 9 encontram-se representados os 4 parâmetros de corte da fresagem.

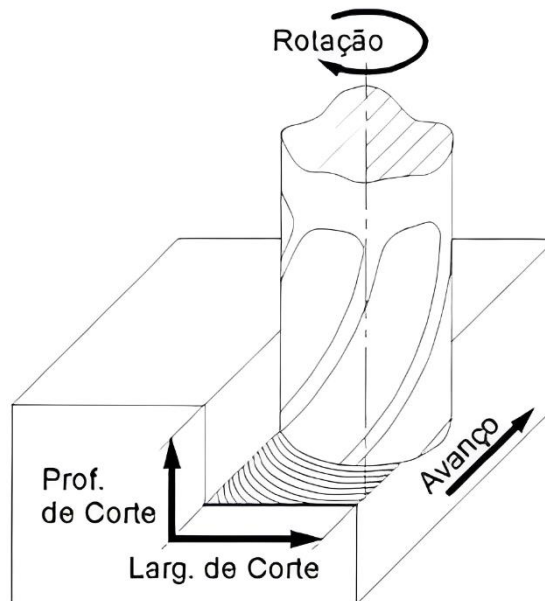


Figura 9 - Parâmetros de corte (Sandvik Coromant, 2023)

2.4.1 Velocidade de corte

A velocidade de corte (V_c) representa a velocidade linear de um ponto da periferia da ferramenta enquanto esta se move ao longo do material da peça

a maquinar. A velocidade de corte é expressa em metros por minuto (m/min).

A velocidade de rotação (n) é calculada a partir da velocidade de corte, e corresponde à velocidade angular da ferramenta, expressa em rotações por minuto (rpm) (García-Hernández et al., 2021).

Estas relacionam-se através da seguinte equação:

$$V_c = \frac{\pi \times D \times n}{1000} \quad (1)$$

Onde:

- n : Velocidade de rotação [rpm];
- V_c : Velocidade de corte [m/min];
- D : Diâmetro da ferramenta [mm].

2.4.2 Velocidade de avanço

A velocidade de avanço representa a velocidade com que a ferramenta de corte avança sobre o material da peça de trabalho. Esta é expressa em milímetros por minuto (mm/min). Os fatores que influenciam a velocidade de avanço são a velocidade de rotação, o avanço por dente e o número de dentes da ferramenta utilizada (García-Hernández et al., 2021).

A equação que relaciona todas estas variáveis é a seguinte:

$$f = n \times f_z \times z \quad (2)$$

Onde:

- f : Velocidade de avanço [mm/min];
- n : Velocidade de rotação [rpm];
- f_z : Avanço por dente [mm];
- z : Número de dentes da ferramenta.

2.4.3 Profundidade de corte

A profundidade axial de corte (a_p) refere-se à distância entre a superfície da peça de trabalho e a profundidade na qual a extremidade da ferramenta de corte está a cortar material. Este parâmetro geralmente encontra-se expresso em milímetros (mm) (García-Hernández et al., 2021).

A seguinte figura 10 ilustra a profundidade axial de corte (a_p).

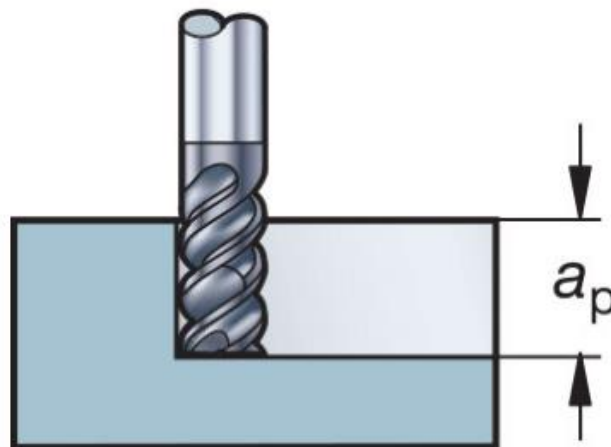


Figura 10 - Profundidade axial de corte (a_p)
(Sandvik Coromant, 2023)

A profundidade radial de corte, também conhecida como largura de corte (a_e), é a porção de material que a ferramenta de corte está a retirar lateralmente por cada passagem. Este parâmetro é geralmente expresso em milímetros (García-Hernández et al., 2021).

A seguinte figura 11 ilustra a profundidade radial de corte (a_e).

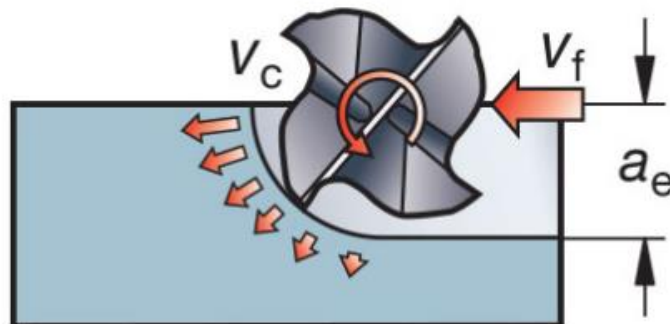


Figura 11 - Profundidade radial de corte (a_e)
(Sandvik Coromant, 2023)

Na fresagem com fresas tricoidais, o valor de a_e deve ser menor do que o valor de a_p uma vez que o a_e leva em consideração a geometria da ferramenta e a espessura da apra, o que resulta numa área efetiva menor do que a largura total da passagem da ferramenta (García-Hernández et al., 2021).

2.5 Estratégias de maquinagem de acabamento

Atualmente, a escolha de uma estratégia de maquinagem adequada é um fator determinante para a existência de competitividade, lucro e sucesso de uma empresa. A adesão a tecnologias CNC de 5 eixos é um bom meio para a obter competitividade, porém, um manuseamento eficaz de um centro de maquinagem, seja este de 3 ou 5 eixos, é determinante para obter sucesso. A escolha de uma estratégia de maquinagem adequada tem bastante relevância para obter um componentes com boa qualidade de superfície, em menos tempo e com os custos de maquinagem minimizados (J. Liu et al., 2020).

2.5.1 Estratégias de maquinagem de acabamento a 3 eixos

As estratégias de maquinagem a alta velocidade (High Speed Machining HSM) são um conjunto de estratégias de corte que procuram velocidade e taxas de avanço elevadas para aumentar a produtividade e a qualidade das superfícies maquinadas a 3 eixos. Este processo de corte subdivide-se em dois grandes grupos, as de desbaste a alta velocidade (HSR) e as de acabamento (HSM). As estratégias de maquinagem de desbaste a alta velocidade (HSR) caracterizam-se por remover rapidamente grandes volumes de material de uma peça bruta, deixando-a mais próxima das dimensões finais antes de operações de acabamento. As estratégias de maquinagem de acabamento a alta velocidade (HSM) são utilizadas principalmente na fase de acabamento, sendo que a peça maquinada já está próxima das dimensões finais e esta foca-se na obtenção de superfícies de alta qualidade (SolidCAM, 2022).

Neste estudo foi dado especial ênfase às estratégias HSM de

acabamento de superfícies, uma vez que este é o fator que se pretende avaliar com este trabalho.

No caso do software utilizado no estudo (SolidCAM), paralelamente às estratégias de maquinagem de alta velocidade, existe um módulo de estratégias denominadas de Turbo 3D HSM. Estas, fazem parte do módulo HSM, mas com cálculos mais rápidos. Este mecanismo de cálculo de 3 eixos recalcula a trajetória da ferramenta e os parâmetros de corte a fim de diminuir o tempo de execução da peça a maquinar (SolidCAM, 2022).

O SolidCAM (2022) disponibiliza 15 estratégias de maquinagem de acabamento a 3 eixos no módulo HSM que são as seguintes:

- Maquinagem de Z constante;
- Híbrido constante Z;
- Maquinagem helicoidal;
- Maquinagem horizontal;
- Maquinagem linear;
- Maquinagem radial;
- Maquinagem espiral;
- Maquinagem morphed;
- Maquinagem em offset;
- Maquinagem de fronteira;
- Maquinagem restrita;
- Passagem constante 3D;
- Fresagem a lápis;
- Deslocamento de canto 3D;
- Maquinagem de peças prismáticas.

No módulo turbo 3D HSM, as estratégias de maquinagem de acabamento a 3 eixos disponíveis são as seguintes:

- Maquinagem de Z constante - Turbo;
- Passagem constante 3D - Turbo;
- Maquinagem horizontal - Turbo;
- Maquinagem linear – Turbo;

- Fresagem a lápis – Turbo.

2.5.1.1 Maquinagem de Z constante

O caminho da ferramenta da estratégia de maquinagem de Z constante, é gerado para um conjunto de secções criadas com diferentes alturas. Estas alturas são controladas pelo parâmetro incremental segundo o eixo do Z, denominado de *step down*. Esta estratégia é geralmente usada para semi-acabamento e acabamento de áreas íngremes com ângulo de inclinação entre 30 e 90 graus. Como a distância entre as passagens é medida ao longo do eixo Z do sistema de coordenadas, em áreas rasas (com menor ângulo de inclinação da superfície) a estratégia Z constante é geralmente menos eficaz. Na figura 12 é possível observar uma ilustração de um modelo com trajetórias definidas segundo a estratégia de maquinagem de Z constante (SolidCAM, 2022).

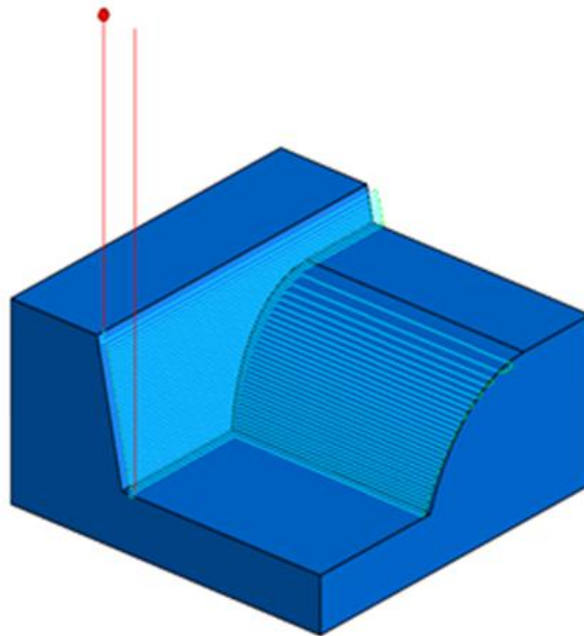


Figura 12 - Percurso ferramenta com estratégia Z constante (SolidCAM, 2022)

2.5.1.2 Passagem constante 3D

A presente estratégia é ideal para operações de semi acabamento e de acabamento. Para a utilização desta estratégia, primeiramente é fundamental definir o limite exterior do local a maquinar. Após este processo estar efetuado, esta estratégia executa o percurso da ferramenta sempre a uma distância constante durante todas as passagens pelas faces do modelo a maquinar. É mais adequada para maquinar superfícies ingremes e planas (SolidCAM, 2022).

Na figura 13 encontra-se representado um exemplo de um percurso executado, a partir da utilização de uma estratégia de maquinagem de passagem constante 3D.

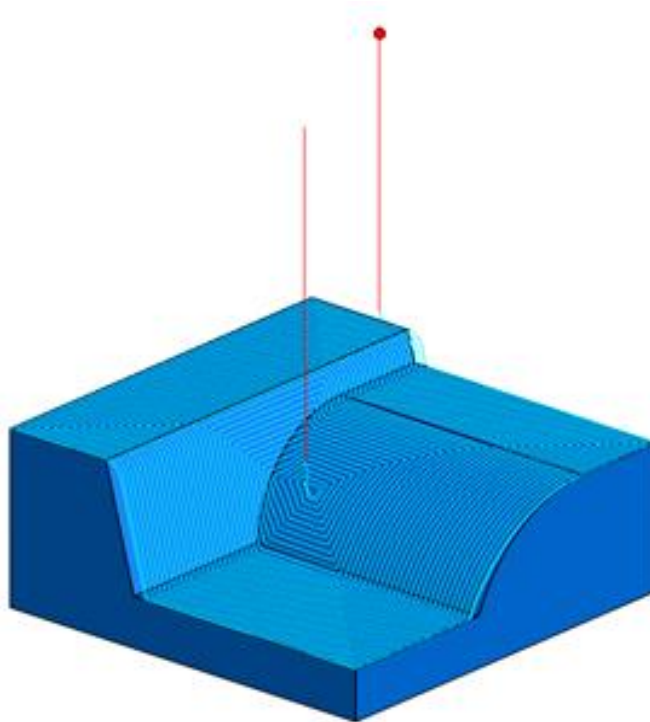


Figura 13 - Percurso ferramenta com estratégia passagem constante 3D (SolidCAM, 2022)

2.5.1.3 Maquinagem linear

A estratégia de maquinagem linear gera um padrão linear de passagens, sendo que cada passagem é orientada numa direção, definida a partir do valor ângulo pretendido com um dos eixos cartesianos. Esta estratégia de maquinagem é mais eficaz em superfícies próximas da horizontal ou superfícies mais inclinadas ao longo da direção das passagens. Na figura 14 encontra-se

ilustrado um modelo com trajetórias definidas segundo a estratégia de maquinagem linear SolidCAM (2022).

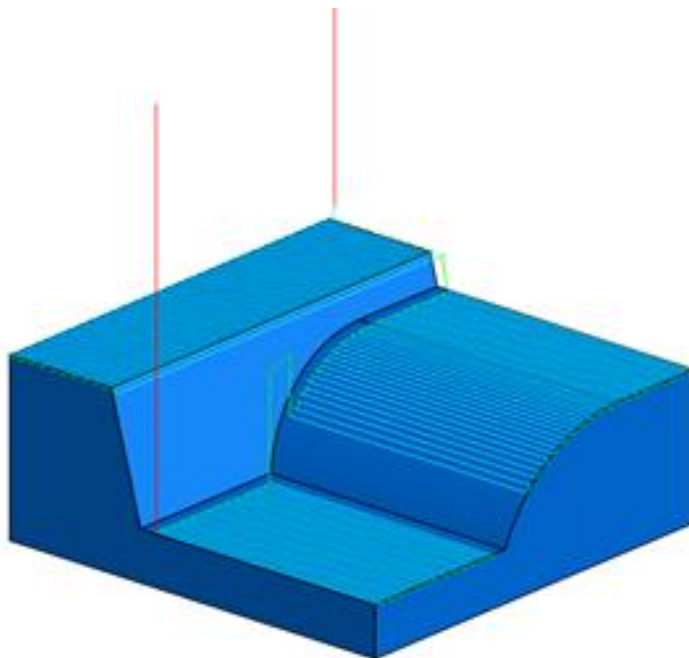


Figura 14 - Percurso ferramenta com estratégia maquinagem linear (SolidCAM, 2022)

2.5.1.4 Maquinagem horizontal

Esta estratégia foi concebida para maquinar superfícies horizontais planas de um componente 3D. Esta estratégia é benéfica para o acabamento das superfícies de um componente e é mais adequada para maquinar grandes superfícies horizontais a vários níveis segundo o eixo do Z (SolidCAM, 2022).

Na figura 15 estão ilustradas as trajetórias definidas num componente recorrendo à estratégia de maquinagem horizontal.

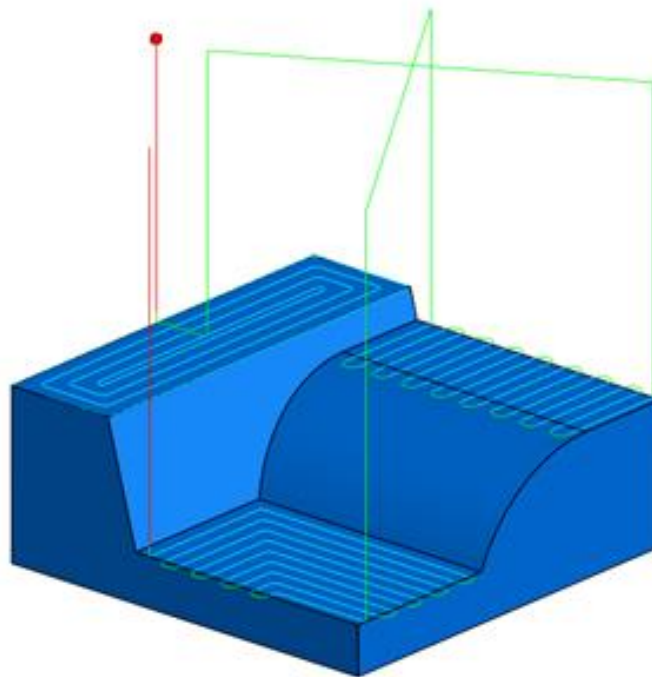


Figura 15 - Percurso ferramenta com estratégia maquinação horizontal (SolidCAM, 2022)

2.5.2 Estratégias de maquinação de acabamento a 5 eixos

Além das estratégias de 3 eixos anteriormente mencionadas, os *softwares* CAM dispõem de estratégias de maquinação específicas para programação de 5 eixos (simultâneos ou posicionais).

Segundo o *software* SolidCAM (2022), as estratégias de maquinação existentes para maquinação a 5 eixos são as seguintes:

- Maquinação a 5 Eixos simultâneos;
- Maquinação de Contorno de 5 Eixos;
- Maquinação SWARF;
- Maquinação Geodésica;
- Maquinação Rotativa;
- Maquinação Multi-Eixo;
- Maquinação de pás de turbinas;
- Maquinação de furos.

2.5.2.1 Maquinagem a 5 eixos simultâneos

A estratégia de maquinagem de 5 eixos simultâneos é uma alternativa à convencional maquinagem a 3+2 eixos. É uma boa estratégia para maquinar formas complexas com elevada exatidão e precisão. Esta técnica envolve o movimento simultâneo da ferramenta de corte ao longo de cinco eixos a fim de fazer vários cortes ao mesmo tempo, assegurando o constante contacto entre a peça e a ferramenta. Com uma otimização dos ângulos de inclinação da ferramenta é possível melhorar as condições de corte das superfícies (SolidCAM, 2022).

Na seguinte figura 16 encontra-se representado um exemplo de um percurso com recurso a uma estratégia de maquinagem de 5 eixos simultâneos.

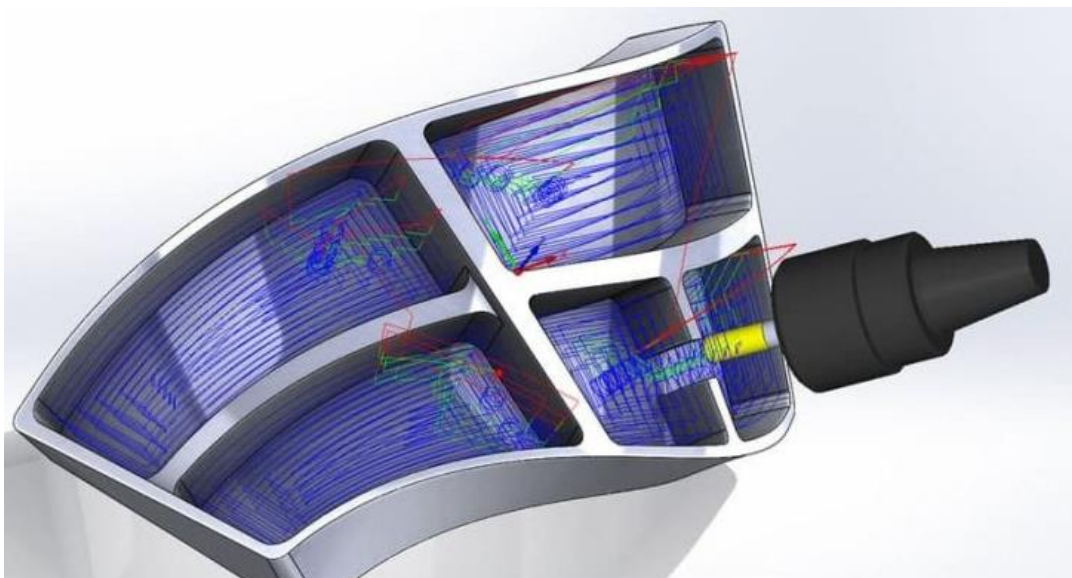


Figura 16 - Percurso ferramenta com estratégia a 5 eixos simultâneos (SolidCAM, 2022)

2.6 Maquinagem de superfícies inclinadas

O ângulo de inclinação da superfície a maquinar e respetivo ponto de contacto com a aresta de corte da ferramenta são fatores com impacto no desempenho da fresagem quando se utilizam ferramentas de topo esférico. Estes parâmetros, afetam as forças de corte e as vibrações geradas durante o processo, o que conseqüentemente tem influência na rugosidade da peça e no desgaste da ferramenta de corte (Wojciechowski et al., 2014).

Segundo Mikó e Zentay (2019), diferentes ângulos de inclinação de superfícies maquinadas a 3 eixos fazem com que o diâmetro de trabalho da ferramenta seja diferente, conseqüentemente, a velocidade de corte também será modificada.

O ângulo de inclinação da fresa corresponde ao ângulo formado entre a face frontal da fresa e uma linha perpendicular à superfície da peça. Este ângulo determina a inclinação da fresa em relação à peça.

O ângulo de ataque na fresagem é o ângulo formado entre a linha da aresta de corte da fresa e a direção de avanço da fresa. Este ângulo influencia a capacidade da fresa para cortar o material e a eficiência do processo. No eixo central da ferramenta, a velocidade de corte é zero. Se a velocidade de corte for demasiado baixa, a ferramenta em vez de cortar o material irá “arrancá-lo” e “arrastá-lo” ao longo da superfície. Isto deve-se às dificuldades de escoamento da aparas na ponta da ferramenta de topo esférico, devido ao pequeno espaço na aresta transversal desta. Isto, conduz a um desgaste mais acelerado da ferramenta e uma rugosidade de superfície maior. Na seguinte figura 17 encontra-se representado o ponto da ferramenta de topo esférico onde a velocidade de corte é zero

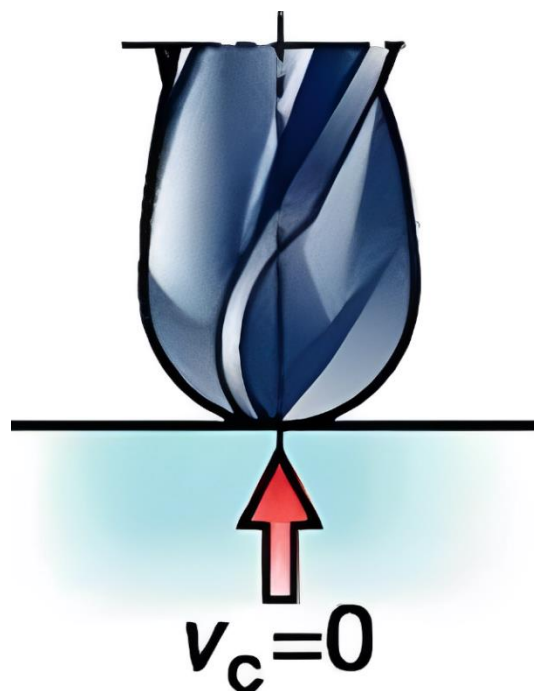


Figura 17 - Ponto da ferramenta de topo esférico de velocidade de corte zero (Sandvik Coromant, 2023)

O problema anteriormente descrito pode ser resolvido recorrendo à maquinação a 5 eixos. Com esta, a partir da manipulação dos eixos B e C do centro de maquinação, é possível inclinar a ferramenta sempre com o mesmo ângulo ao longo das superfícies com diferentes inclinações, a fim de manter o diâmetro de trabalho da ferramenta constante ao longo de toda a peça (Mikó & Zentay, 2019). Na figura 18 encontra-se representada a periferia da ferramenta de topo esférico onde a velocidade de corte é maior do que zero.

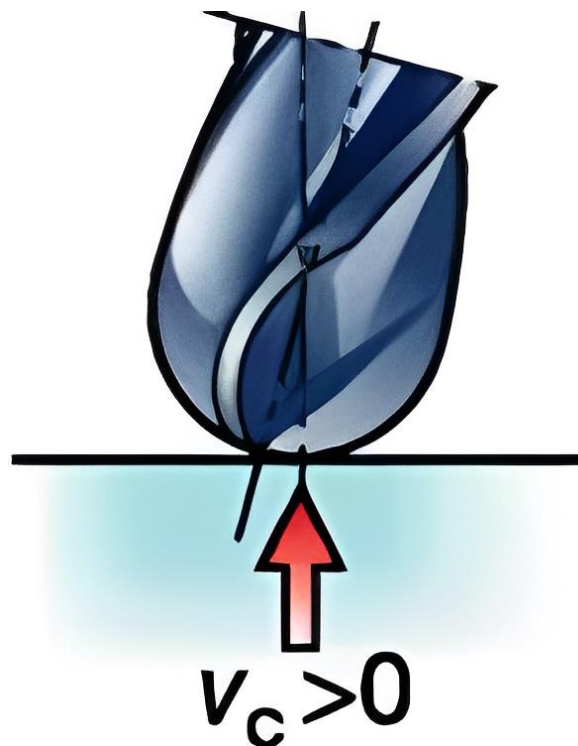


Figura 18 - Locais da ferramenta de topo esférico com velocidade de corte superior a zero (Sandvik Coromant, 2023)

Segundo Zhang, (2018), é possível manipular dois ângulos de inclinação da ferramenta de corte, sendo estes o ângulo de ataque e ângulo de inclinação. Estes representam os ângulos de inclinação da árvore principal na direção de avanço e na direção perpendicular à direção de avanço, respetivamente. Quando o ângulo de inclinação e ataque da ferramenta de corte são zero, os eixos do sistema de coordenadas do fuso estão na mesma direção do sistema de coordenadas da peça de trabalho.

Autores como Baptista e Simões (2000), Ghionea et al., 2009. e Layegh K. et al. (2015), defendem que a qualidade de uma superfície maquinação pode

ser melhorada através da utilização de uma boa estratégia de maquinagem e da otimização dos ângulos de corte quando se recorre à maquinagem a 5 eixos.

Baptista e Simões (2000) utilizaram um valor de 15° de inclinação da fresa de topo esférico na direção do avanço, a fim de obter bons valores de rugosidade da superfície maquinada.

Layegh (2015) investigou o efeito dos ângulos de ataque e de inclinação durante a maquinagem de peças a 5 eixos, a partir da utilização de uma fresa de topo esférico. Este, após efetuar a maquinagem de provetes e após realizar a sua análise, concluiu que o menor valor de rugosidade de superfície que obteve foi com a ferramenta de topo esférico inclinada 2° no sentido do avanço de corte e 10° de inclinação lateral. Na figura 19 ilustra-se a inclinação na direção do avanço de corte e a inclinação lateral da ferramenta de corte.

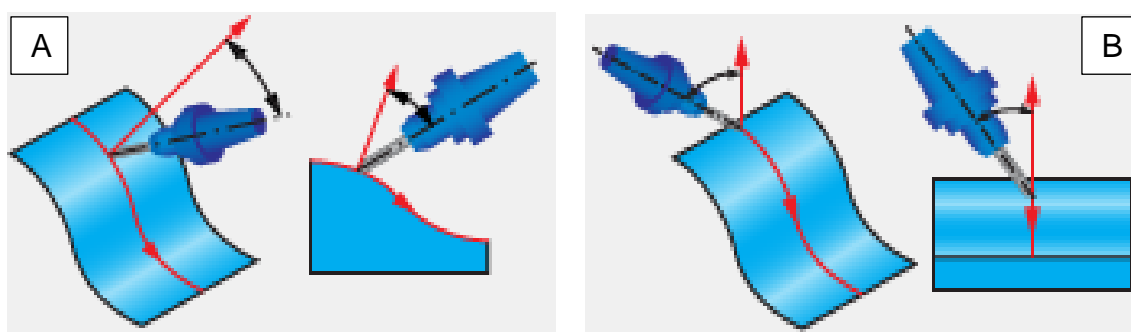


Figura 19 - A: inclinação na direção do avanço da ferramenta; B: inclinação lateral da ferramenta (SolidCAM, 2022)

2.7 Acabamento de superfície

O acabamento de superfície refere-se à textura ou suavidade de uma superfície seja ela simples ou complexa, após ter sido maquinada. É uma característica bastante importante para diversas aplicações, pois afeta a aparência, a funcionalidade e o desempenho de um componente ou produto (Abebe & Gopal, 2023).

A qualidade de uma superfície é avaliada a partir da medição da rugosidade, ou seja, quanto menor o valor de rugosidade registado, melhor é o acabamento da superfície (Abebe & Gopal, 2023).

Alcançar um bom acabamento de superfície depende de vários fatores,

incluindo o tipo de ferramenta de corte, os parâmetros de corte, o material a ser maquinado e as condições da máquina-ferramenta (Abebe & Gopal, 2023).

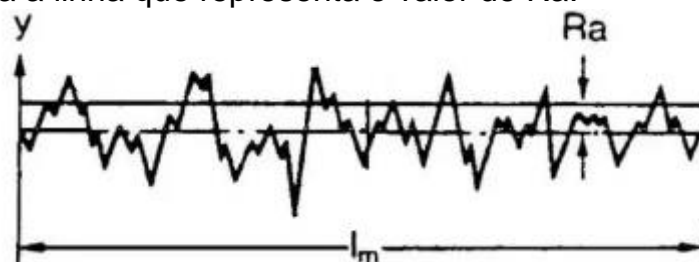
Para melhorar o acabamento de superfície, podem ser empregues várias técnicas, tais como a utilização de centros de maquinagem menos flexíveis, reduzir a profundidade de corte, reduzir a velocidade de avanço, aumentar a velocidade de corte, recorrer a estratégias de maquinagem que originem menos vibrações e utilizar lubrificantes ou refrigerantes para reduzir a temperatura de corte. Além das técnicas anteriormente mencionadas, técnicas de retificação, polimento ou tratamentos químicos, também podem ser utilizadas para melhorar ainda mais o acabamento da superfície após a maquinagem (Kalisz et al., 2021).

2.7.1 Rugosidade da superfície

A rugosidade de superfície é um índice de qualidade do produto amplamente utilizado e, na maioria dos casos, é um requisito técnico. Esta, corresponde à medida das irregularidades de uma superfície maquinada. A rugosidade é normalmente quantificada a partir de uma variedade de formas de medição, sendo a mais comum a rugosidade média aritmética (R_a), a profundidade média da rugosidade (R_z) e a amplitude máxima de rugosidade (R_t).

A rugosidade média aritmética (R_a) é o parâmetro de rugosidade mais utilizado em meios industriais e académicos. No entanto, a avaliação do estado de uma superfície apenas através do R_a pode não ser suficiente para avaliar com precisão o acabamento de superfície, pois este ignora a distribuição de picos e vales ao longo da superfície (Carvalho et al., 2023).

Na figura 20 encontra-se representado um gráfico de rugosidade em que é demonstrada a linha que representa o valor de R_a .



Rt é o parâmetro de rugosidade que representa a altura máxima, pico-a-vale, dentro de um comprimento de amostragem. Este, expressa a distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais baixo do perfil da superfície (Carvalho et al., 2023).

Na figura 21 encontra-se representado um gráfico de rugosidade em que é demonstrado o valor que representa Rt.

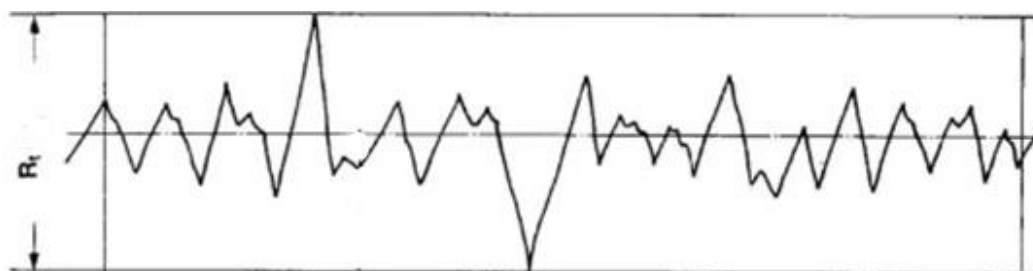


Figura 21 - Altura máxima Pico a Vale (Rt) (Stahli. A. W, 2023)

Outro parâmetro bastante utilizado para avaliar o acabamento de superfície obtido é a média de altura do pico ao vale de cinco comprimentos de amostragem consecutivos (Rz). Ao contrário do Ra, o parâmetro Rz é mais sensível a picos ocasionais ou vales profundos, pois em vez das médias, são examinadas as alturas pico-vale de um determinado comprimento de amostragem. Além disso, o Rz traz vantagens sobre parâmetros como Rt, pois integra mais o perfil de rugosidade. Por outro lado, Rz é uma média dos extremos no perfil de rugosidade, portanto, pode ser excessivamente afetado por *outliers* (Carvalho et al., 2023).

Na figura 22 encontra-se representada a média de altura pico a vale dos cinco comprimentos de amostragem consecutivos (Rz).

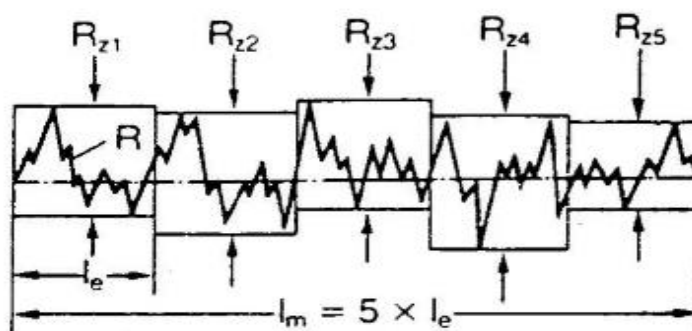


Figura 22 - Média de altura do pico ao vale de cinco comprimentos de amostragem consecutivos (Rz) (Stahli. A. W, 2023)

Todos estes parâmetros de rugosidade são expressos em micrómetros.

2.7.2 Síntese do estado de arte

Após o estudo na análise do estado de arte sobre a maquinagem a 3 e 5 eixos, foi possível obter elementos informativos suficientes para ser possível prosseguir com a componente prática, assim como conhecer os aspetos mais importantes a ter em conta.

Independentemente do centro de maquinagem a utilizar, a partir da análise do estado de arte, foi possível obter informações acerca do funcionamento base destes equipamentos, assim como conhecer o seu algoritmo de utilização e alguns cuidados a ter a fim de produzir peças com qualidade.

Os parâmetros de corte são de grande importância para perceber de que forma é que o manuseamento destes têm influência no acabamento de superfície obtido.

Sendo que se pretende perceber de que forma é que o número de eixos e a estratégia de maquinagem utilizada influenciam o acabamento de superfície obtido, foram estudadas as estratégias de maquinagem que estão ao alcance de um utilizador de um *software* CAM.

Tendo em conta que o objetivo passa por maquinar superfícies inclinadas, entendeu-se que a alteração do ponto de contacto da ferramenta de corte com a superfície a maquinar faz com que a velocidade de corte seja superior ou inferior, o que se demonstra ser um elemento de influência na rugosidade de uma superfície. Durante o procedimento de maquinagem a 5 eixos, diversos autores concluíram que ao inclinar a ferramenta de corte na direção do avanço é possível obter melhorias no acabamento de superfície obtido.

No que diz respeito à avaliação das superfícies maquinadas, foram estudados três parâmetros de rugosidade a avaliar, o Ra, o Rt e o Rz. Percebeu-se que entre estes 3 parâmetros, o Ra é o parâmetro de maior importância, uma vez que este tem em consideração todos os valores da superfície analisada, enquanto o Rt apenas indica a distância entre o pico e o vale e o Rz uma média de altura pico-vale de 5 comprimentos de amostragem.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo remete para as opções metodológicas do estudo. Neste, objetiva-se enumerar e descrever todos os materiais e ferramentas utilizadas, bem como todas as operações e decisões tomadas.

Todos os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Tecnologia Mecânica (LTM) e no laboratório de tribologia (MACTRIB) do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da Universidade de Aveiro (UA). Tal como foi mencionado anteriormente, existe uma diversidade de fatores que influenciam o acabamento de superfície obtido, tais como os parâmetros de corte, a estratégia de maquinagem a utilizar, a utilização ou não de fluído de corte, a ferramenta de corte e o respetivo desgaste desta, o tipo de centro de maquinagem utilizado e a geometria e material da peça a maquinar. Para ser possível retirar conclusões no final do presente estudo, durante a maquinagem dos provetes, apenas se diferiram as estratégias de maquinagem, o ângulo de inclinação das superfícies e o número de eixos do centro de maquinagem utilizados. Os restantes parâmetros que influenciam a rugosidade de superfície das peças foram mantidos constantes durante a execução de todos os provetes.

Os parâmetros de corte utilizados foram os mesmos em todas as estratégias, sejam estas de 3 ou 5 eixos.

Os ângulos de inclinação das superfícies maquinadas foram iguais em todos os provetes e estes foram executados em duplicado para verificar repetibilidade nos valores obtidos.

Durante o processo de maquinagem, tanto para operações de desbaste, como para operações de acabamento foi utilizado o fluído de corte abundante. Este, foi utilizado para diminuir o esforço de corte, para obter um melhor acabamento, assim como prolongar a vida útil das ferramentas utilizadas.

Desta forma, é possível concluir qual a melhor estratégia de maquinagem a utilizar e conhecer qual o número de eixos necessários para executar provete preconizado com qualidade. Como o intuito de executar o trabalho com a devida segurança e evitar danos materiais, todo o procedimento experimental foi

realizado com o maior cuidado possível, com testagens preliminares e com supervisão.

3.1 Definição do modelo e geometria de estudo

A primeira tarefa executada foi a elaboração de um modelo digital de um provete, para previamente executar um modelo físico. Este foi modelado no software SolidWorks 2022, com as dimensões de 52.50x30x17.5 mm.

Este foi modelado com a finalidade de possibilitar a medição da rugosidade de 7 superfícies diferentes: uma superfície horizontal (0°), duas superfícies a 30° , duas a 45° e outras duas a 60° de inclinação. A existência de mais do que uma superfície com inclinação superior a 0° deve-se à necessidade de verificar repetibilidade nos valores de medição obtidos. Na figura 23 encontra-se representado o provete modelado.

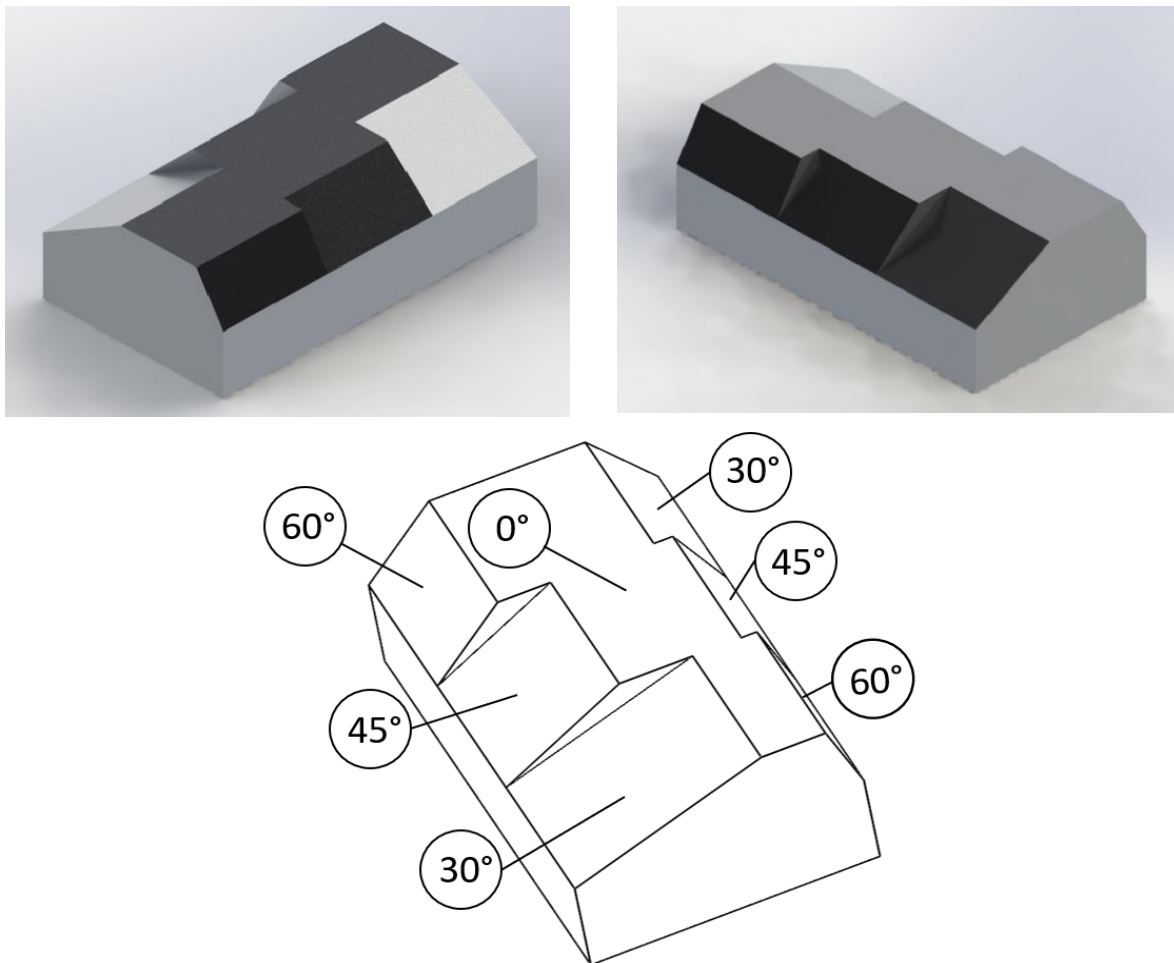


Figura 23 - Modelo digital do provete modelado

3.2 Material a maquirar

Existe uma grande diversidade de materiais, porém cada material apresenta melhor desempenho em determinadas condições de serviço.

O material utilizado para a execução dos provetes foi alumínio 6061-T6. O principal motivo de ter sido escolhida uma liga de alumínio está relacionado com o desgaste da ferramenta de corte ser um fator de influência no acabamento de superfície, como foi referido anteriormente, sendo que este é um dos fatores que não se objetiva avaliar na presente dissertação.

Segundo MatWeb, 2023, este material tem uma resistência mecânica relativamente alta, boa aceitação de revestimentos, boa trabalhabilidade, alta resistência à corrosão e boa soldabilidade. É uma das ligas de alumínio mais utilizadas a nível mundial e é vulgarmente utilizada na produção de acessórios para aeronaves, construção de quadros de bicicleta, componentes de automóvel e componentes para eletrodomésticos.

Os principais elementos que constituem esta liga são o magnésio e o silício. A presença destas ligas juntamente com o alumínio, confere-lhe melhores propriedades mecânicas. Na tabela 1 encontram-se representados todos os constituintes da liga de alumínio 6061-T6, assim como a percentagem de cada um deles.

Tabela 1 – Composição química da liga de alumínio 6061-T6 (MatWeb, 2023)

Material	Percentagem constituinte (mínima – máxima)
Alumínio, Al	95,8 - 98,6%
Cromo, Cr	0,04 - 0,35%
Cobre, Cu	0,15 - 0,40%
Ferro, Fe	$\leq 0,70\%$
Magnésio, Mg	0,80 - 1,2%
Manganês, Mn	$\leq 0,15\%$
Outros	$\leq 0,15\%$
Silício, Si	0,40 - 0,80%
Titânio, Ti	$\leq 0,15\%$
Zinco, Zn	$\leq 0,25\%$

Na tabela 2 apresentam-se as propriedades físicas e mecânicas da liga de alumínio utilizada.

Tabela 2 - Propriedades físicas e mecânicas da liga de alumínio 6061-T6 (MatWeb, 2023)

Propriedades físicas	Valor
Densidade	2.7 g/cm ³
Propriedades mecânicas	Valor
Dureza de Brinell	95
Tensão de cedência	276 MPa
Tensão de rutura	310 MPa
Módulo de Young (ou elasticidade)	68,9 GPa
Coefficiente de Poisson	0,33
Módulo de corte	26,0 GPa
Tensão de corte	207 MPa

3.3 Centro de maquinagem utilizado e respetivas características

O centro de maquinagem utilizado para o presente estudo foi um Haas UMC 500, como ilustra a figura 24.



Figura 24 - A: Haas UMC 500 exterior

O *spindle* tem valor de potência máxima 22,4 kW, uma velocidade de rotação máxima de 10000 rpm e um torque máximo de 122,0 Nm às 2000 rpm. A mesa tem uma geometria circular com um diâmetro de 400 mm, com as ranhuras de encaixe e posicionamento do porta peças entre 15,9 e 16 mm de largura nas ranhuras. O eixo do X tem a capacidade de se mover 610 mm e os eixos Y e Z 406 mm. À velocidade de avanço máxima em corte (G01), é possível movimentar os eixos a uma velocidade de 16,5 m/min e em movimentos rápidos (G00) 22,9 m/min. O eixo B, responsável pela inclinação da mesa, tem um alcance de deslocamento entre os 120 ° e os -35 °, com uma velocidade máxima até 50 graus por segundo. O eixo C, responsável pela rotação da mesa, não tem limite angular de rotação e é possível ser rotacionado a uma velocidade de até 50 graus por segundo.

3.3.1 Sistema de fixação de peças

Os sistemas de fixação das fresadoras são utilizados para fixar a peça firmemente no local de maquinagem. Esses sistemas garantem que a peça permaneça estável e corretamente posicionada de forma a permitir operações com consistência e precisão. O sistema de fixação de peças que constitui este centro de maquinagem Haas é um conjunto da 5TH AXIS, com uma prensa mecânica V562M, juntamente com um centrador de aperto à mesa VP56M. Na figura 25 encontra-se ilustrado o sistema de fixação de peças utilizado no centro de maquinagem Haas UMC 500.



Figura 25 - Sistema de fixação de peças

3.3.2 Fixador da ferramenta

O sistema de fixação da ferramenta à árvore do centro de maquinagem foi feito recorrendo a um cone porta ferramentas SK 40-2/16-60 ER25 DIN 69871 AD, como ilustra a figura 26.

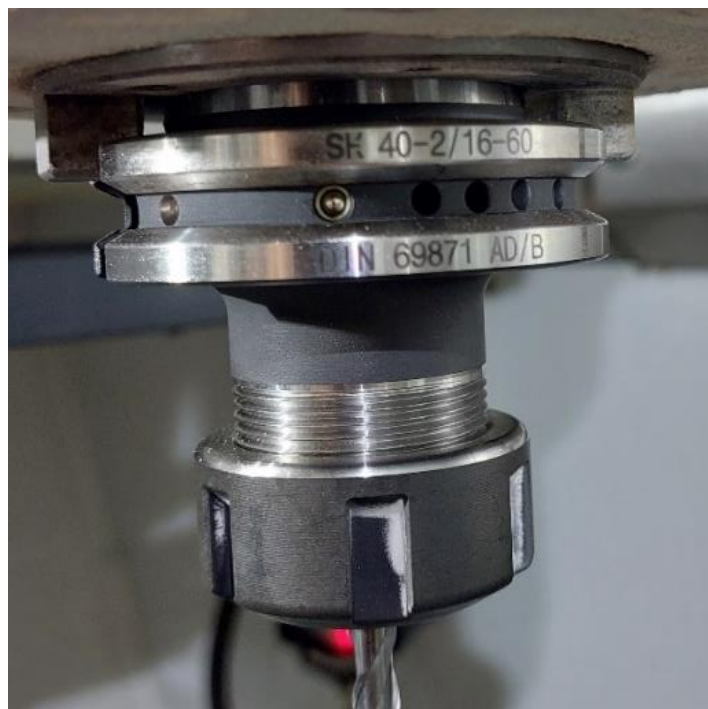


Figura 26 - Porta ferramentas

3.4 Seleção das estratégias de maquinagem

No presente estudo, como foi mencionado anteriormente, as estratégias de maquinagem foram o elemento a diferenciar durante a execução dos provetes. Neste, foram exploradas 6 estratégias de maquinagem a 3 eixos e 1 estratégia de maquinagem de 5 eixos simultâneos. De seguida encontram-se explanadas cada uma das estratégias utilizadas.

3.4.1 Desbaste

O desbaste das peças foi feito sempre da mesma forma: recorreu-se a uma função exclusiva do SolidCAM, denominada de iMachining 3D. O iMachining 3D produz automaticamente um programa CN pronto a executar com condições de corte ideais para desbaste de uma peça 3D inteira com apenas uma única operação. Este utiliza algoritmos de análise sofisticados para determinar a ordem ideal dos caminhos da ferramenta de desbaste e de re-desbaste. Devido à otimização do iMachining 3D, este atinge o menor tempo de ciclo possível para desbaste e semi-acabamento de moldes, peças 3D complexas e peças prismáticas 3D. Apesar do iMachining já apresentar automaticamente os parâmetros de corte ideais em função do material e da peça a maquinar, os parâmetros de corte utilizados durante a operação de desbaste em todos os provetes foram os recomendados pelo fabricante da ferramenta de corte. Na figura 27 encontram-se ilustradas as linhas de trajetória percorridas pela ferramenta durante a operação de desbaste.

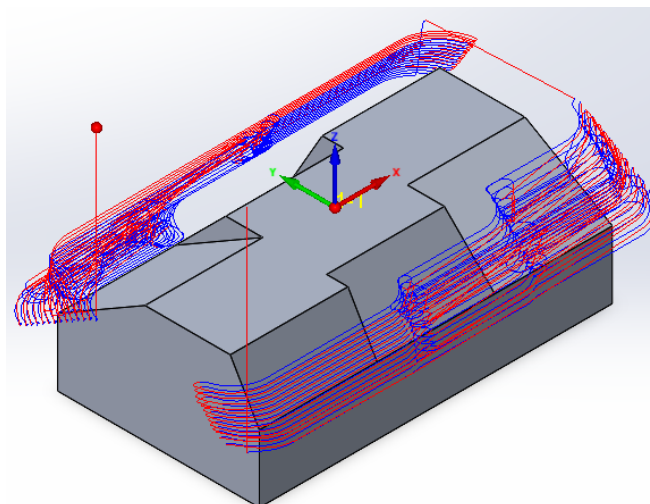


Figura 27 - Trajetória executada durante operação de desbaste

3.4.2 Desbaste superfície horizontal

Recorreu-se exclusivamente a uma estratégia de maquinagem para a superfície horizontal (0° de inclinação) para realizar a operação de desbaste/acabamento.

- Maquinagem horizontal em HSM – Nesta estratégia de maquinagem a ferramenta contacta com a peça no ponto central da face e descreve trajetórias paralelas às executadas na passagem anterior, de forma a executar todas as passagens até ao exterior da face da peça. Na figura 28 encontram-se ilustradas as linhas de trajetória percorridas pela ferramenta durante a maquinagem horizontal.

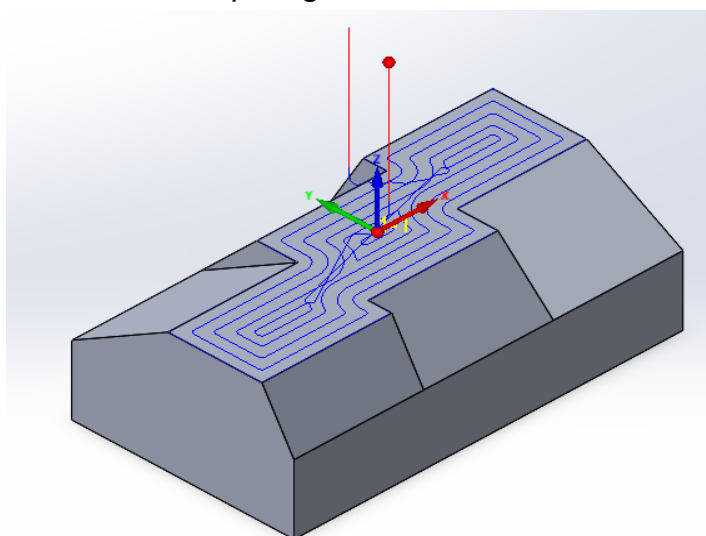


Figura 28 - Trajetória executada durante a operação de maquinagem horizontal HSM

3.4.3 Acabamento superfícies inclinadas

As estratégias de maquinação para acabar as superfícies com inclinação superior a 0° foram as seguintes:

- Maquinação de Z constante (figura 29);

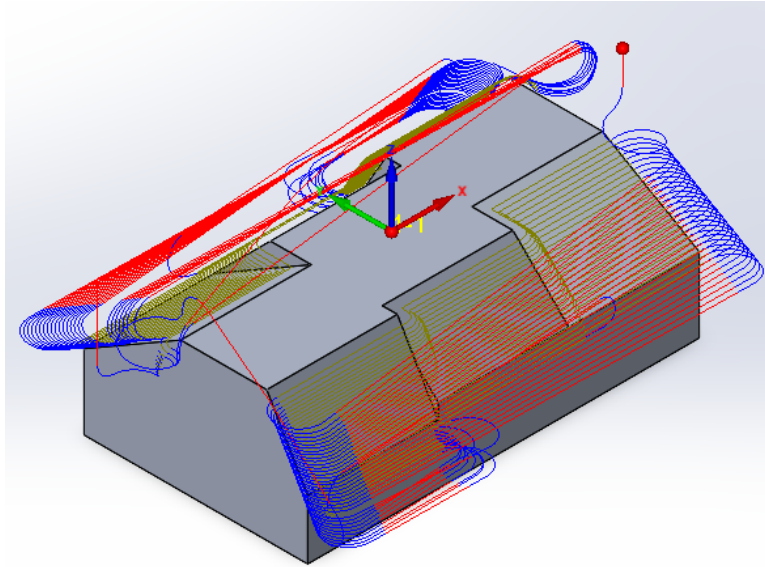


Figura 29 -Trajetória executada durante a operação de maquinação de Z constante

- Passagem constante 3D (figura 30);

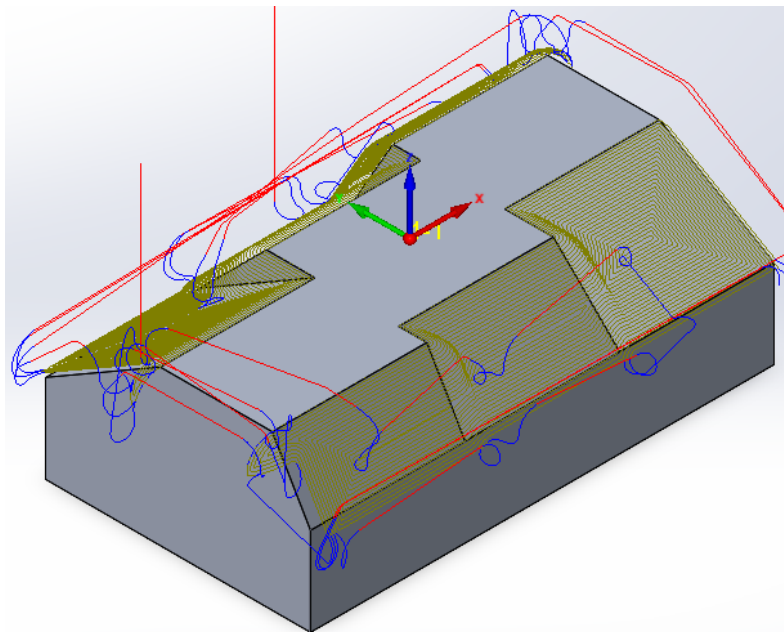


Figura 30 - Trajetória executada durante a operação de maquinação de passagem constante 3D

- Maquinagem linear (figura 31);

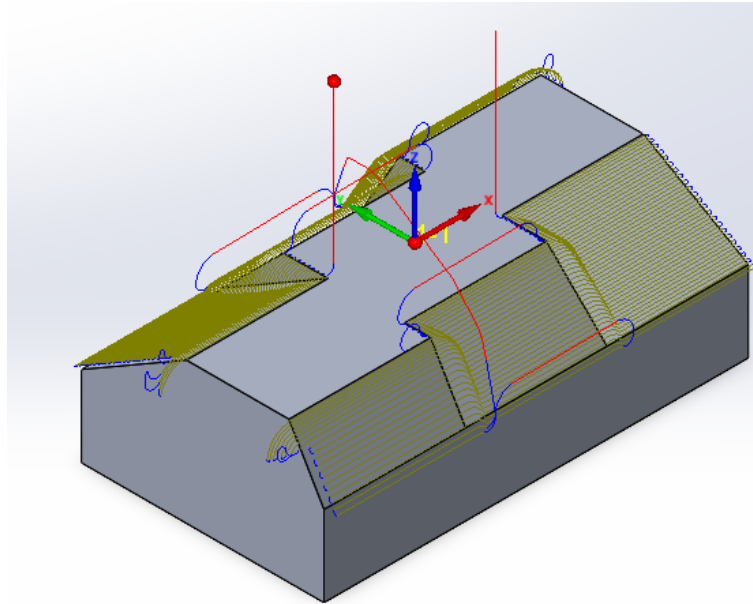


Figura 31 - Trajetória executada durante a operação de maquinagem linear

- Maquinagem de Z constante – Turbo (figura 32);

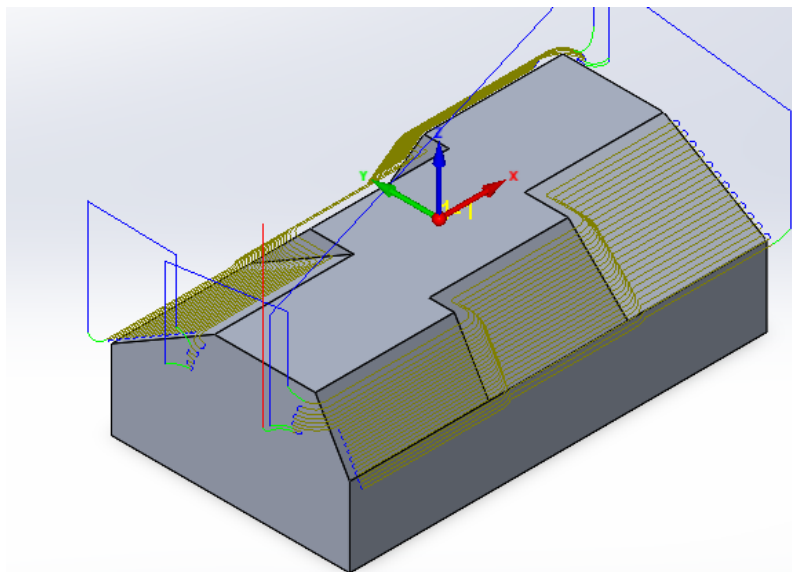


Figura 32 - Trajetória executada durante a operação de maquinagem de Z constante turbo

- Passagem constante 3D – Turbo (figura 33);

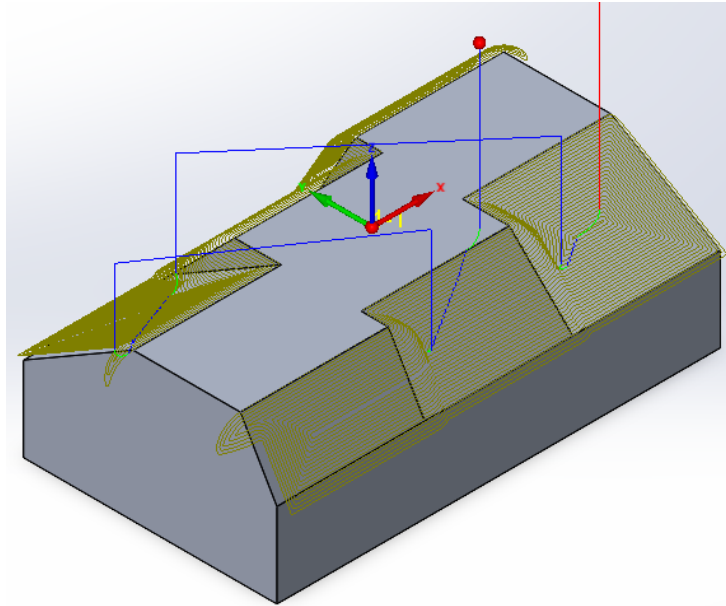


Figura 33 - Trajetória executada durante a operação de maquinagem passagem constante 3D turbo

- Maquinagem linear – Turbo (figura 34);

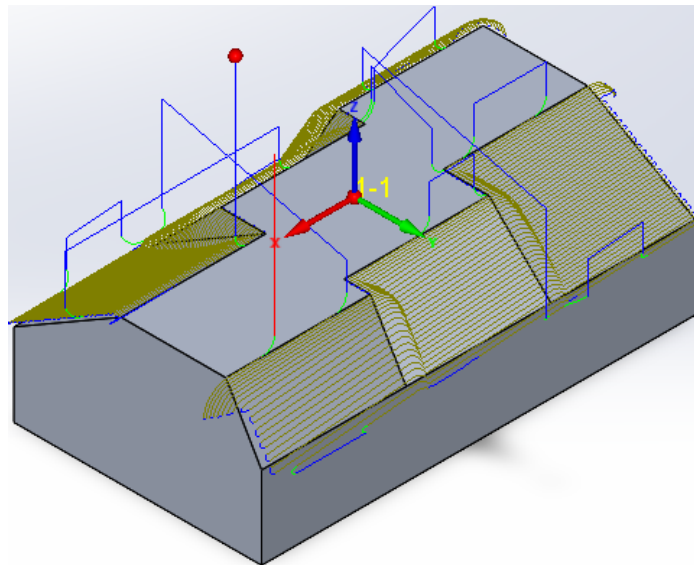


Figura 34 - Trajetória executada durante a operação de maquinagem linear turbo

- Maquinagem a 5 Eixos simultâneos – Tendo em conta as informações adquiridas na literatura relativamente à maquinagem de superfícies planas utilizou-se a ferramenta de topo esférico

inclinada a 15° no sentido do avanço de corte, recorrendo ao deslocamento dos 5 eixos do centro de maquinagem. A figura 35 ilustra as trajetórias executadas durante a operação de maquinagem a 5 eixos simultâneos

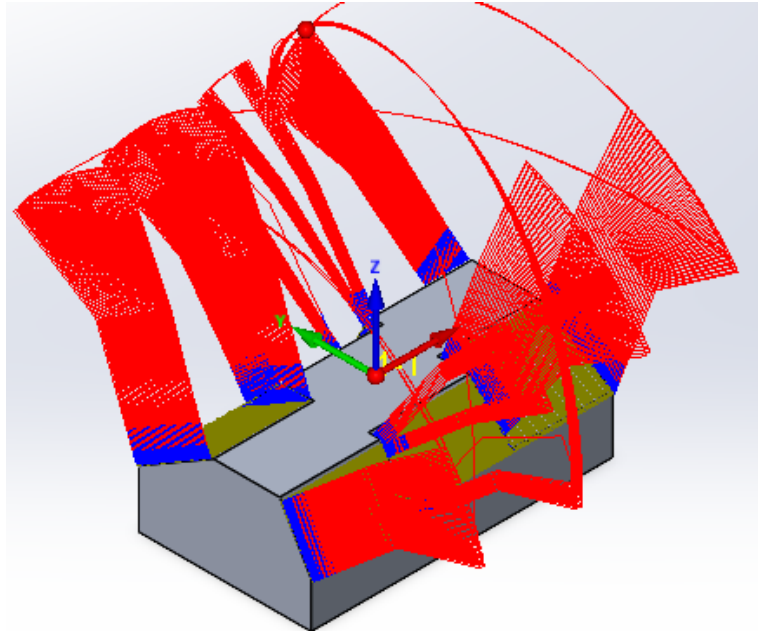


Figura 35 - Trajetória executada durante a operação de maquinagem a 5 eixos simultâneos

Como é possível observar nas figuras anteriores, a utilização de diferentes estratégias faz com que as trajetórias da ferramenta de corte também sejam diferentes. Isto são fatores que influenciam o acabamento de superfície obtido, assim como o tempo de maquinagem de cada provete.

3.5 Escolha das ferramentas de corte

No processo de seleção de ferramenta de corte para operações de maquinagem, há vários fatores a serem considerados para garantir bom desempenho e eficiência. Estes podem ser os seguintes:

- Material a ser maquinado: diferentes materiais a maquinar requerem diferentes materiais e geometrias de ferramentas de corte para maior eficácia;
- Material da ferramenta: com base no material que vai ser maquinado, seleciona-se o material da ferramenta apropriado;

- Geometria da ferramenta: a geometria da ferramenta afeta o escoamento da apanha, as forças de corte e o acabamento das superfícies;
- Parâmetros de corte: para a aplicação específica é importante que os parâmetros de corte, tais como a velocidade de corte, a taxa de avanço e a profundidade de corte estejam de acordo com os recomendados pelo fabricante da ferramenta de corte e ajustadas ao caso em questão;
- Revestimento da ferramenta: os revestimentos podem melhorar a vida útil da ferramenta, reduzir o atrito e aumentar a resistência ao calor;
- Fabricante de ferramentas: a escolha de fabricantes de ferramentas conhecidos pela qualidade e bom desempenho faz com que estes sejam portadores de catálogos com valores confiáveis. É sempre importante procurar o aconselhamento de especialistas em ferramentas que possam fornecer recomendações com base na sua experiência e conhecimento de aplicações específicas;
- Estratégia de maquinagem: diferentes trajetórias percorridas exigem determinadas geometrias de ferramenta para melhor desempenho do processo de maquinagem.

Neste sentido, as ferramentas de corte utilizadas foram fornecidas pela *Moldino*. Para maquinar alumínio 6061-T6, a empresa recomendou e cedeu uma fresa de topo esférico e uma fresa de topo direito para a execução do presente estudo.

A fresa de topo direito tem como referência HGOS2100-PN e foi utilizada para efetuar operações de desbaste do provete e acabamento da superfície a 0° e a ferramenta de topo esférico tem como referência HGOB2060-PN, sendo utilizada para maquinar as superfícies inclinadas.

Esta série de ferramentas da *Moldino* apresenta um material de revestimento resistente ao calor com boa adesão à ferramenta e boa resistência ao desgaste devido ao revestimento de silício que a envolve.

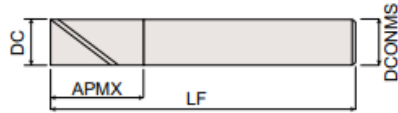
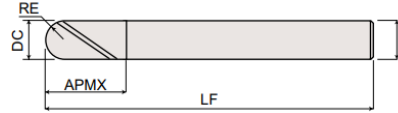
Na figura 36, encontram-se ilustradas as ferramentas anteriormente mencionadas.



Figura 36 - A: fresa de topo HGOS2100-PN; B: Fresa de topo esférico HGOB2060-PN

Na tabela 3 encontram-se as dimensões de cada uma das ferramentas de corte utilizadas.

Tabela 3 - Dimensões das ferramentas de corte

Ferramenta	HGOS2100-PN	HGOB2060-PN
Medidas (mm)		
Diâmetro da ferramenta (DC)	10	6
Comprimento do local de corte (APMX)	22	12
Comprimento total (LF)	80	90
Diâmetro da haste (DCONMS)	10	6
Número de navalhas de corte	2	2
Raio da ponta esférica (RE)	-	3

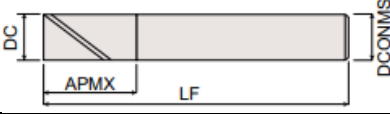
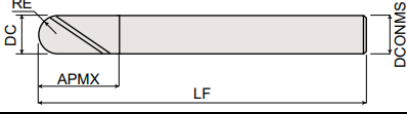
3.6 Parâmetros de corte

Os parâmetros de corte inseridos no *software* CAM para executar a maquinagem dos provetes foram mantidos constantes durante a maquinagem de todos os provetes com diferentes estratégias de maquinagem.

Os valores dos parâmetros de corte utilizados foram selecionados de acordo com os valores tabelados pelo fabricante das ferramentas de corte. Segundo o catálogo das ferramentas da *Moldino*, para as ferramentas de corte HGOS2100-PN e HGOB2060-PN na maquinagem de ligas de alumínio, recomenda-se os seguintes parâmetros de corte, como estão representados na

tabela 4:

Tabela 4 - Parâmetros de corte recomendados pelo fabricante das ferramentas utilizadas

Ferramenta Parâmetro	HGOS2100-PN	HGOB2060-PN
		
Velocidade de rotação (RPM)	4586	19427
Avanço (mm/min)	459	2331
Ap (mm)	15	0.3
Ae (mm)	1	0.3

Apesar dos valores dos parâmetros de corte que se apresentam na tabela 4 serem os recomendados pelo fabricante das ferramentas, estes, tiveram de ser adaptados aos limites do centro de maquinagem. O centro de maquinagem Haas UMC 500 da UA só consegue uma velocidade de rotação do fuso da árvore de até 10000 RPM.

A ferramenta de corte utilizada para a operação de desbaste total do provete foi a fresa de topo de 10 mm de diâmetro (HGOS2100-PN). Foram utilizados os valores de ap (0,5 mm) e ae (0,5 mm) durante a operação de desbaste.

Na tabela 5 encontram-se os parâmetros de corte utilizados durante a operação de desbaste dos provetes.

Tabela 5 - Parâmetros de corte utilizados durante a operação de desbaste

Operação Parâmetro	Desbaste
Velocidade de rotação (RPM)	4586
Avanço (mm/min)	800
ap (mm)	0.5
ae (mm)	0.5

Durante a operação de maquinagem das superfícies horizontais com a fresa de topo, os parâmetros de corte utilizados foram bastante semelhantes aos utilizados no desbaste, porém, foi mantido constante em 2 mm o valor da profundidade radial de corte (a_e). Na tabela 6 encontram-se os parâmetros de corte utilizados durante a maquinagem destas superfícies.

Tabela 6 - Parâmetros de corte utilizados durante a operação de maquinagem superfície horizontal

Operação	Maquinagem superfície horizontal (0°)
Parâmetro	
Velocidade de rotação (RPM)	4586
Avanço (mm/min)	800
a_p (mm)	0.5
a_e (mm)	2

Posto isto, realizaram-se todos os provetes com duas combinações de parâmetros de corte, em acabamento, com a ferramenta de topo esférico. Na primeira testagem dos valores de parâmetros de corte em todos os provetes, não foram obtidos valores de rugosidade de superfície, uma vez que foi visualmente perceptível que não havia boa qualidade nas superfícies. Numa segunda testagem visualmente já se obtiveram boas superfícies, de tal forma que surgiu a necessidade de proceder à medição da rugosidade destas.

A tabela 7 contém os valores dos parâmetros de corte utilizados no primeiro caso e no segundo caso durante o procedimento de acabamento com a fresa de topo esférico.

Tabela 7 - Parâmetros de corte utilizados durante a operação de acabamento das superfícies inclinadas

Caso Parâmetro	Caso 1	Caso 2
Velocidade de rotação (RPM)	10000	10000
Avanço (mm/min)	2331	1200
ap (mm)	0.3	0.1
ae (mm)	0.3	0.1

No primeiro caso de valores de parâmetros de corte, foram utilizados os valores de avanço, profundidade radial de corte e profundidade axial de corte de acordo com os recomendados pelo fabricante das ferramentas. Como foi referido anteriormente, o valor da velocidade de rotação foi o imposto pelo limite do centro de maquinagem.

No segundo caso de valores, foram diminuídos os valores da profundidade radial e axial de corte para 0,1 mm e estabeleceu-se uma relação de proporcionalidade direta entre os valores de velocidade de rotação e de avanço, recomendados pelo fabricante das ferramentas e o de velocidade máxima de rotação, permitida pelo centro de maquinagem. Desta forma, determinou-se a velocidade de avanço adequada para a rotação do fuso de 10000 RPM, sendo 1200 mm/min.

3.7 Equipamento de medição e controlo utilizado

3.7.1 Rugosidade de superfície

A fim de avaliar a rugosidade das superfícies dos provetes maquinados, utilizou-se um rugosímetro, modelo *Hommel T1000*. Foi definido que este

durante o procedimento de medição percorre uma distância total (L_t) sobre a superfície de 4.8 mm e que o comprimento de amostragem (*cut off*) é de 0.8 mm.

Na figura 37 encontra-se ilustrado o rugosímetro utilizado.

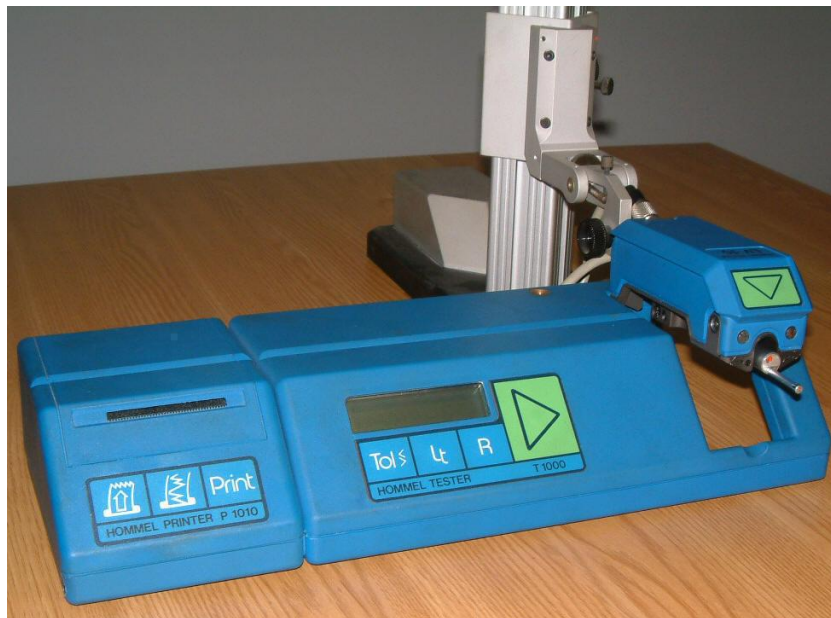


Figura 37 - Rugosímetro *Hommel T1000*

A partir da utilização de uma agulha de palpagem de superfícies, este equipamento mede a topografia da superfície e extrai diversos parâmetros de rugosidade. Selecionaram-se três dos parâmetros de amplitude mais reportados na literatura para a caracterização da rugosidade, sendo estes o R_a , o R_t e o R_z .

3.7.2 Análise por microscopia ótica

Para observar mais pormenorizadamente as superfícies, utilizou-se um microscópio ótico. Este é um *Leica EZ4 W*, sendo capaz de exercer uma ampliação entre 8x e 35x.

Na figura 38 encontra-se ilustrado o microscópio utilizado.

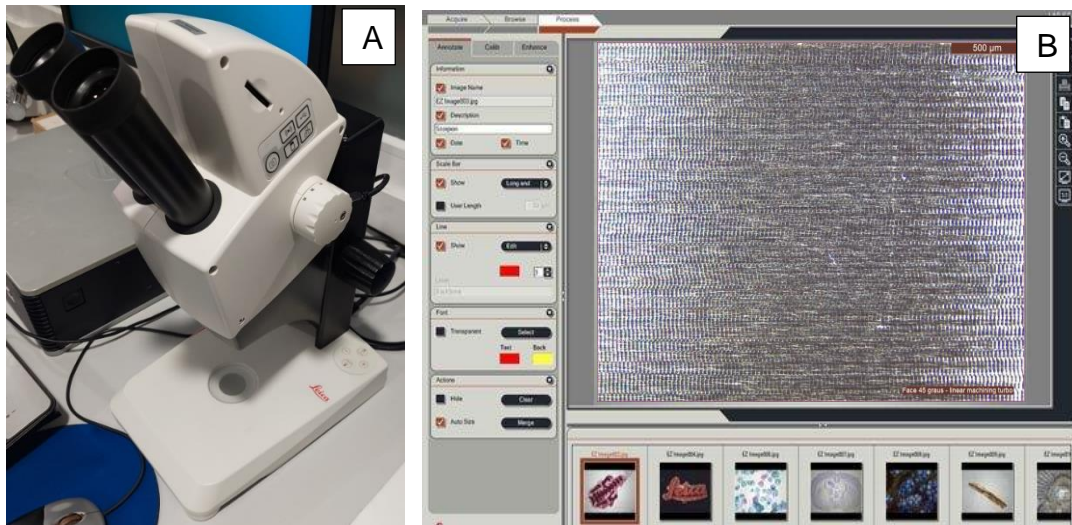


Figura 38 – A: Microscópio Leica EZ4 W; B: Software Leica

4 TRABALHO EXPERIMENTAL

Após a modelação de um provete de pertinência para o presente estudo, ambicionou-se explorar um *software* CAM para iniciar programação de trajetórias para executar os provetes.

O *software* CAM utilizado foi o *SolidCAM 2022*. Este é executado diretamente dentro do ambiente de trabalho do *SolidWorks*. Desta forma há uma integração perfeita entre ambos os *softwares*, sendo que qualquer alteração de projeto CAD, permite o recalculo automático da trajetória da ferramenta no CAM.

Além da licença *SolidCAM*, gentilmente cedida pela *CADNEA*, esta disponibilizou-se a fornecer um pós-processador adequado para o centro de maquinagem utilizado. Com o auxílio do pós-processador, apesar de este ter sido concebido para o centro de maquinagem *Haas UMC 500*, foi executada uma peça de validação em poliuretano com recurso a 3 e a 5 eixos do centro de maquinagem, com o intuito de verificar se a tradução foi feita corretamente. Desta forma, minimizou-se a probabilidade da existência de danos durante a execução dos provetes.

Na figura 39 representa-se a peça de verificação do pós-processador executada.

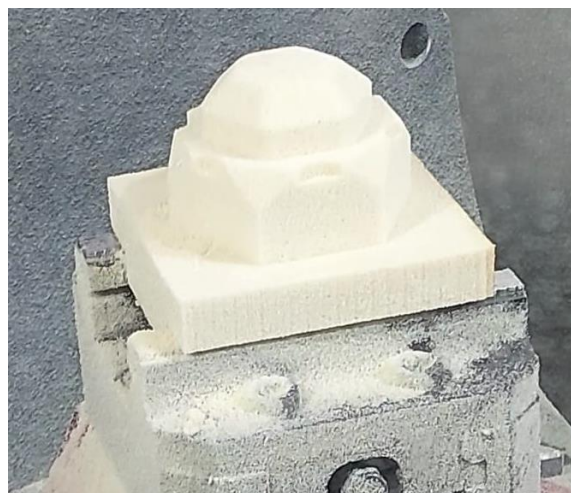


Figura 39 - Peça de testagem do pós-processador maquinada

Após uma fase inicial de integração no *software*, procedeu-se à programação de diversas estratégias de maquinagem no modelo digital do

provetes modelado.

Após a definição dos parâmetros de corte e das trajetórias, foi possível gerar as linhas de trajetória percorridas pela ferramenta de corte. Além da análise das linhas de trajetória da ferramenta, foi feita uma simulação virtual da maquinação, a fim de excluir qualquer possibilidade de colisão durante as operações de maquinação. Estas verificações foram realizadas para todas as operações de maquinação durante a realização dos provetes.

Na figura 40 encontra-se representada a simulação virtual da operação de desbaste dos provetes, a fim de verificar colisões entre a ferramenta e a peça a maquinar, ou entre a ferramenta e o próprio centro de maquinação. Posto isto ficou definido o CAM para todos os provetes a maquinar.

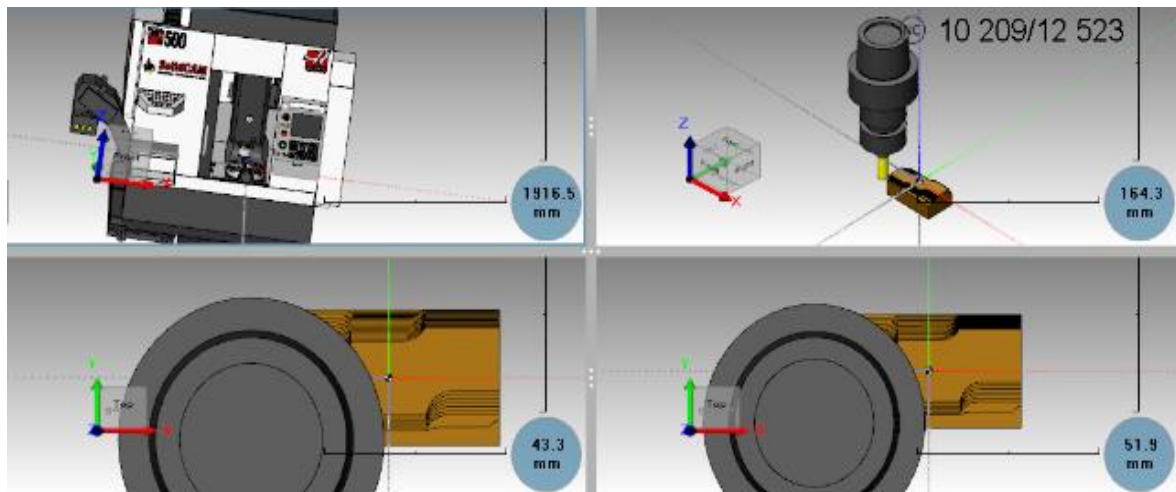


Figura 40 - Simulação virtual da operação de desbaste

Seguidamente, realizou-se um ensaio preliminar em poliuretano para passar à maquinação dos provetes em alumínio. Durante a maquinação destes observou-se com bastante atenção todos os movimentos executados pelo centro de maquinação, a fim de ter a certeza de que a probabilidade de ocorrência de qualquer tipo de dano fosse baixa.

Na figura 41 encontram-se representados os provetes durante o processo de maquinação. Na imagem A, abaixo ilustrada, encontra-se um provete em espuma a ser maquinar, recorrendo aos 3 eixos do centro de maquinação. Na imagem B, abaixo ilustrada, encontra-se um provete a ser maquinar com recurso aos 5 eixos do centro de maquinação.

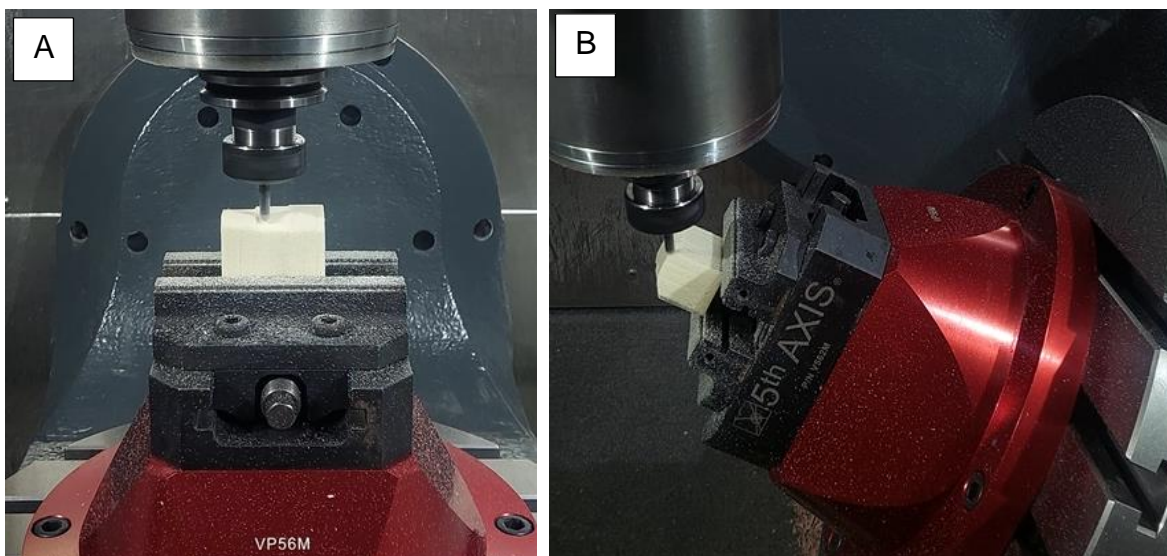


Figura 41 - A: Maquinagem provete em espuma a 3 eixos; B: Maquinagem provete em espuma a 5 eixos

Os provetes em poliuretano serviram apenas para validar as trajetórias e para ter uma ideia dimensional dos provetes para o estudo. Na figura 42 encontram-se ilustrados os provetes maquinados em poliuretano.

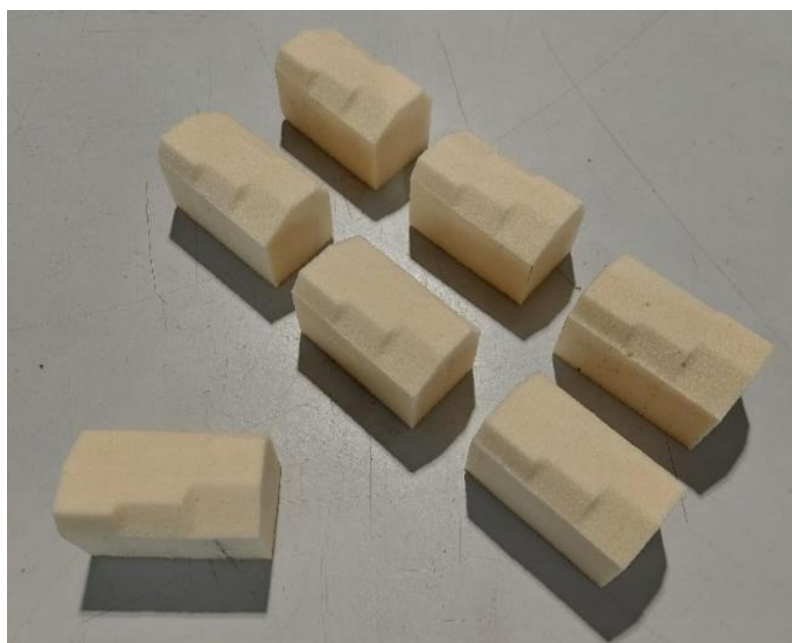


Figura 42 - Provetes maquinados em poliuretano

Posto isto, procedeu-se à execução dos provetes em alumínio 6061-T6. Estes foram executados com os mesmos parâmetros de corte do que os provetes em espuma, tanto para operações de desbaste, assim como para operações de acabamento.

Primeiramente foram preparados 7 blocos de material, todos com as dimensões do bloco previamente modelado no *SolidWorks*. Na figura 43 encontram-se os blocos em alumínio.

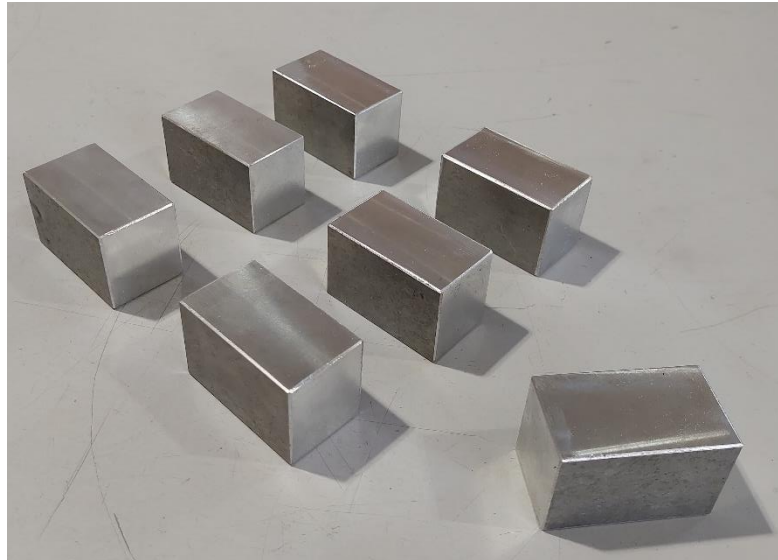


Figura 43 - Blocos alumínio 6061-T6

Tendo assim os blocos de alumínio 6061-T6 preparados e o programa CAM testado e validado o seu bom funcionamento, procedeu-se à maquinagem dos provetes.

Durante a maquinagem destes, foi utilizado fluido de corte com o principal intuito de diminuir o esforço de corte durante o processo de remoção de aparas. O fluido de corte utilizado foi Castrol Hysol SI 36 XBB com emulsão de aproximadamente 5% de óleo para o restante de água.

Tal como nos blocos de poliuretano, as etapas de maquinagem foram exatamente as mesmas, sendo estas :

- Desbaste completo (fresa de topo, figura 44);



Figura 44 - Operação de desbaste

- Acabamento superfície horizontal (fresa de topo, figura 45);

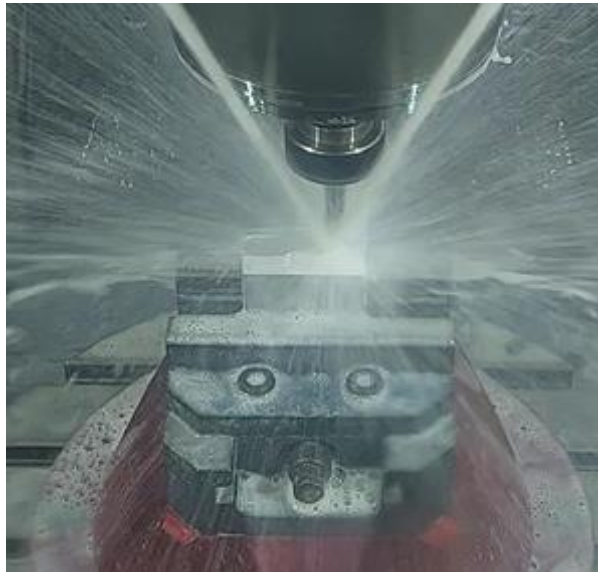


Figura 45 - Acabamento superfície horizontal

- Acabamento das superfícies inclinadas (fresa de topo esférico, figura 46).

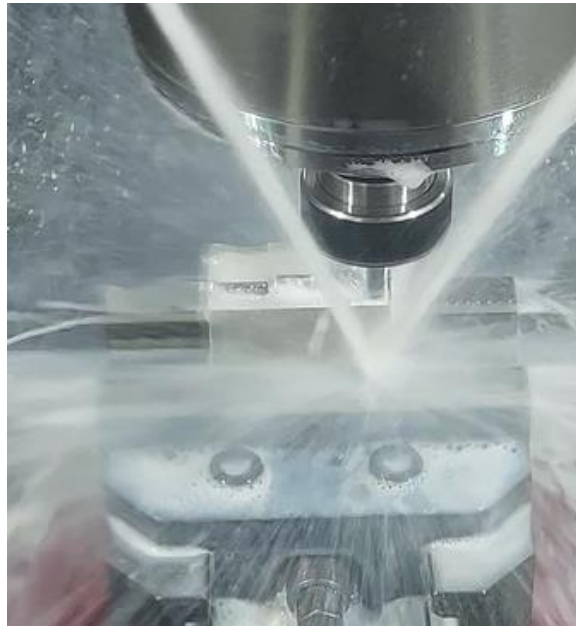


Figura 46 - Acabamento superfícies inclinadas

Após a realização de todos os provetes segundo o primeiro conjunto de parâmetros, verificou-se a necessidade de fazer uma alteração na geometria dos desenhos e nos parâmetros de corte. As superfícies com 60° de inclinação apresentaram-se com dimensões bastante reduzidas para uma posterior medição da rugosidade.

Além do motivo anteriormente mencionado a que levou a refazer os provetes, observou-se que as superfícies não se encontravam como era esperado para superfícies acabadas. Neste sentido, visualmente foi possível observar que as superfícies tinham demasiadas irregularidades para efetuar uma medição nas condições adequadas com o rugosímetro.

A fim de implementar melhorias que possibilitassem a análise das superfícies dos provetes, primeiramente foi alterada a modelação. Na figura 47 assinalado a vermelho é possível observar a alteração feita na modelação dos provetes. Foi executado um corte em profundidade com a finalidade de aumentar a dimensão da face e simultaneamente manter o ângulo de inclinação da mesma.

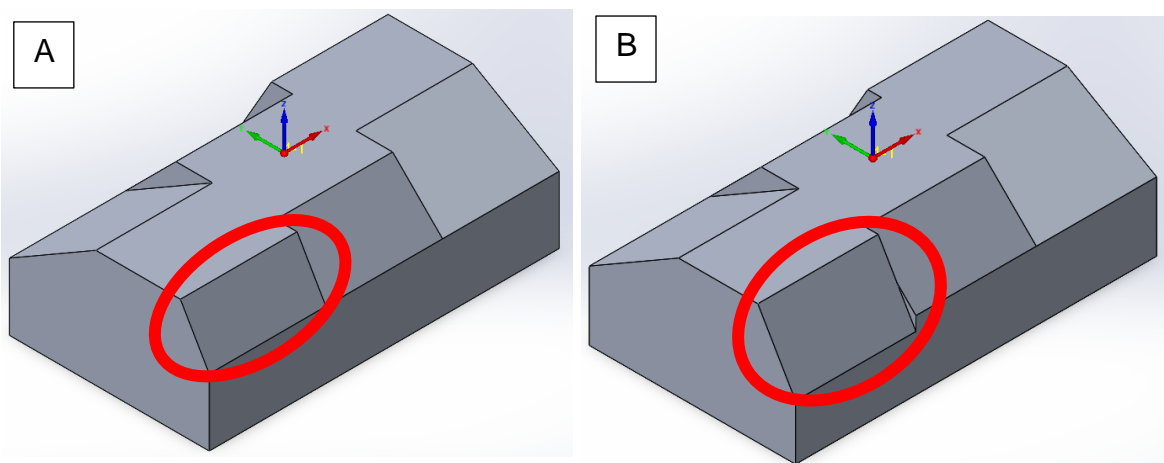


Figura 47 - A: Provette anteriormente modelado; B: Provete alterado

Após a alteração da geometria do provete ter sido realizada, foram alterados os parâmetros de corte dos programas CAM. No que diz respeito ao desbaste da peça e ao acabamento da superfície horizontal, foi preservado tudo tal como foi realizado durante as operações de maquinagem anteriores. Apenas foram alterados os parâmetros de corte para as superfícies inclinadas durante a operação de acabamento com a fresa de topo esférico.

Nessa alteração, foi reduzida a profundidade radial e axial de corte (a_e e a_p) e o avanço de corte. Na tabela 7 anteriormente apresentada, encontram-se os parâmetros de corte utilizados durante o segundo procedimento de maquinagem dos provetes metálicos, denominados de “caso 2”. Após essa alteração, maquinaram-se todos os provetes obtendo as seguintes superfícies, tal como ilustra a figura 48.

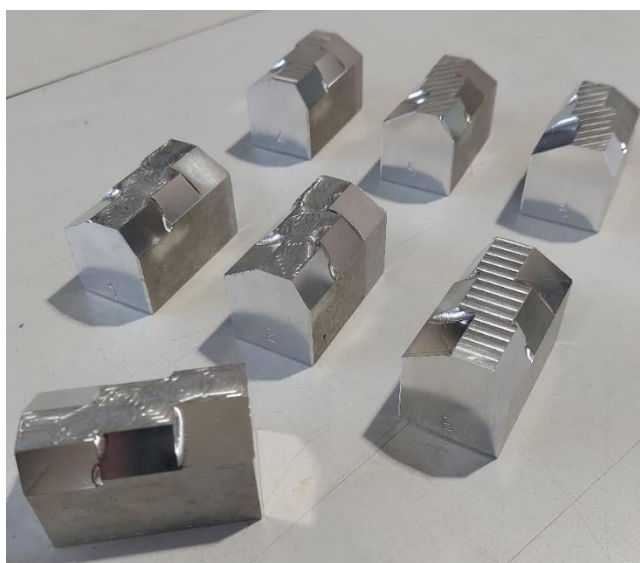


Figura 48 - Provetes finais

Depois de maquinados todos os provetes, foram analisadas as superfícies no rugosímetro e no microscópio. Foram feitas quatro medições por cada inclinação de superfície diferente nos vários provetes, sendo que duas no sentido longitudinal e duas no sentido transversal a fim de verificar repetibilidade nos valores de rugosidade obtidos.

Uma vez que, para ser possível analisar as superfícies maquinadas tem de ser garantido o paralelismo entre estas e o instrumento de medição, seja este o rugosímetro ou o microscópio, foram feitos três dispositivos em poliuretano com a inclinação das três superfícies de amplitude superior a 0° . Na figura 49, encontram-se ilustrados os três dispositivos para análise das superfícies.

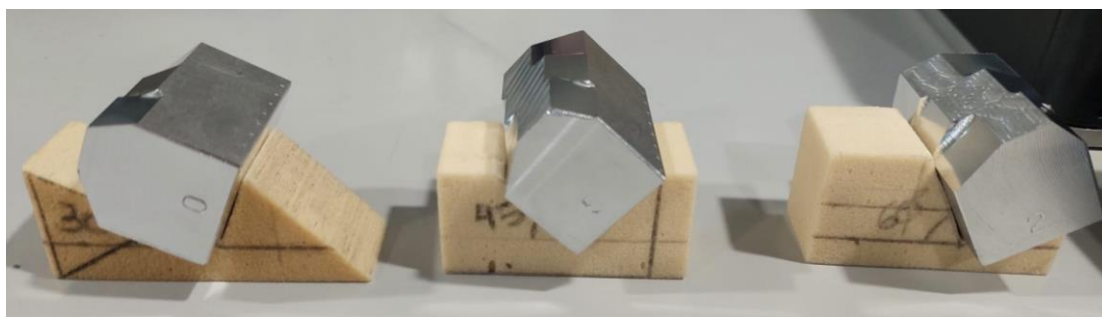


Figura 49 - Dispositivos para posicionamento dos provetes

Seguida da execução dos três dispositivos para análise das superfícies das peças, estas foram analisadas por medição com um rugosímetro e por microscopia ótica. Na figura 50 encontra-se ilustrada, na imagem A, a medição de rugosidade das superfícies de um provete e, na imagem B, a análise por microscopia ótica.

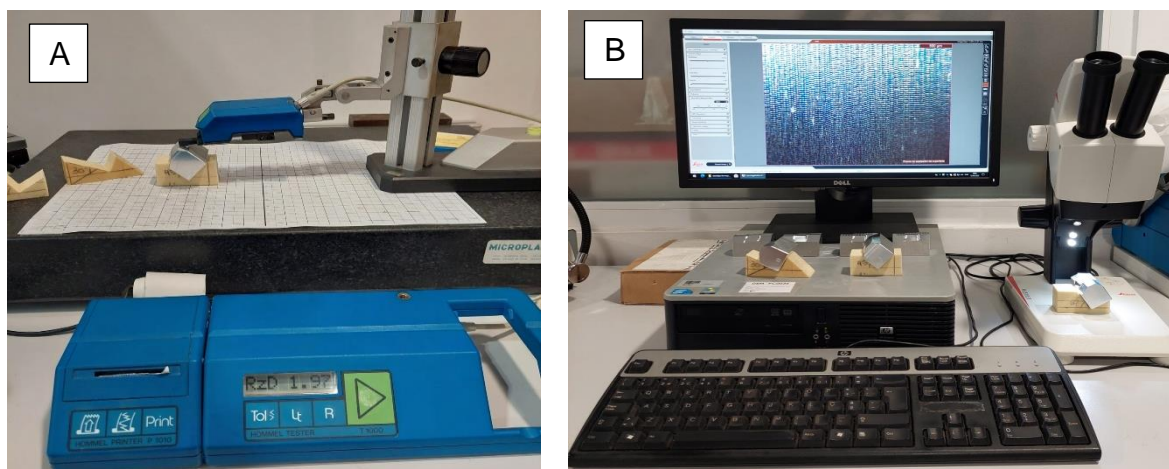


Figura 50 - A: Medição rugosidade superfícies; B: Análise superfícies no microscópio

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo serão explanados os principais resultados deste estudo. Em primeiro lugar, serão apresentados os resultados obtidos a partir da análise por microscopia ótica em cada uma das superfícies dos provetes. Com esta, pretende-se comparar visualmente as divergências causadas pela utilização de diferentes estratégias de maquinagem, diferentes inclinações de superfície e um diferente número de eixos utilizados .

Seguidamente serão apresentados os resultados obtidos a partir da medição de valores de rugosidade das superfícies.

No final, será realizada uma breve discussão dos resultados obtidos.

5.1 Análise superficial através de microscopia ótica

Na figura 51 encontra-se representado o “set-up” da peça posicionada sobre o dispositivo em poliuretano onde foram analisadas as superfícies dos provetes. Após todo este procedimento de análise por microscopia ótica foi possível obter os resultados que se irão apresentar nos sub-capítulos seguintes.



Figura 51 - Set-up para análise por microscopia ótica

As superfícies inclinadas foram analisadas com a ampliação máxima possível alcançável pelo microscópio, sendo esta 35x.

5.1.1 Faces de 30° de inclinação

Na figura 52, encontram-se representadas as imagens resultantes da análise por microscopia ótica das superfícies maquinadas com 30° de inclinação.

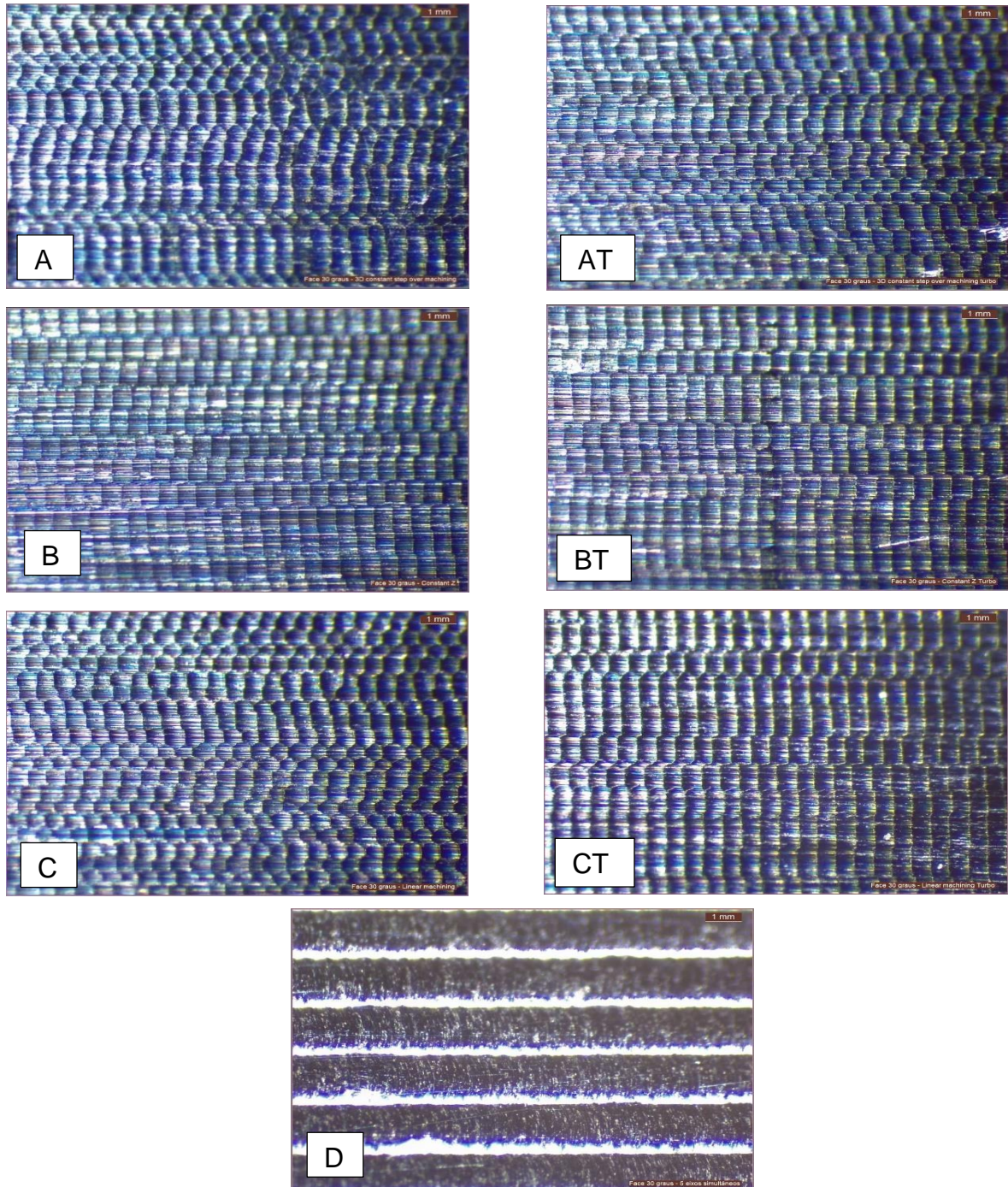


Figura 52 - A: Estratégia de maquinagem Passagem constante 3D; AT: Estratégia de maquinagem Passagem constante 3D turbo; B: Estratégia de maquinagem Constante Z; BT: Estratégia de maquinagem Constante Z turbo; C: Estratégia de maquinagem linear; CT: Estratégia de maquinagem linear turbo; D: Estratégia de maquinagem 5 eixos simultâneos

5.1.2 Faces de 45° de inclinação

Na figura 53, encontram-se representadas as imagens resultantes da análise por microscopia ótica das superfícies maquinadas com 45° de inclinação.

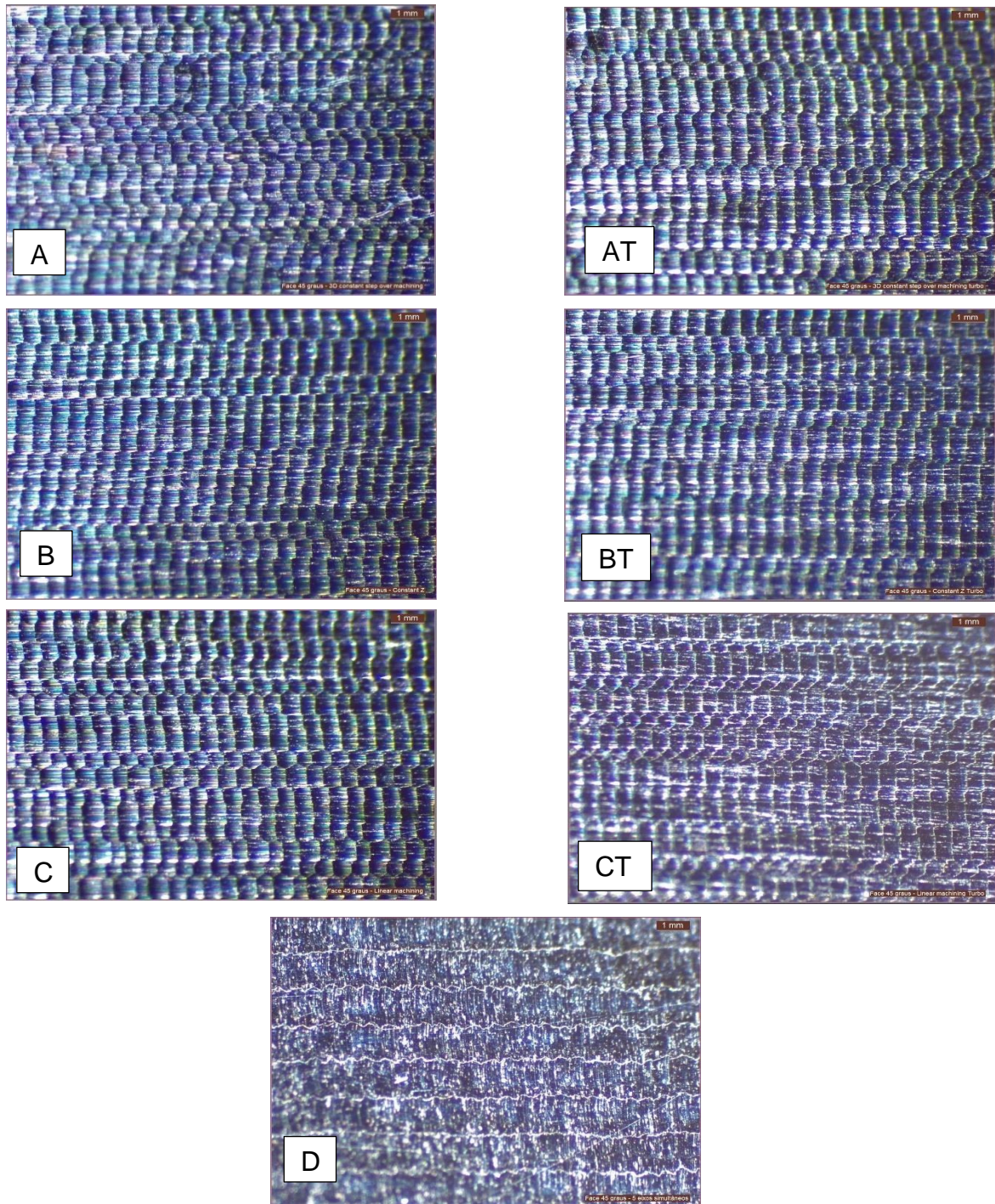


Figura 53 - A: Estratégia de maquinagem Passagem constante 3D; AT: Estratégia de maquinagem Passagem constante 3D turbo; B: Estratégia de maquinagem Constante Z; BT: Estratégia de maquinagem Constante Z turbo; C: Estratégia de maquinagem linear; CT: Estratégia de maquinagem linear turbo; D: Estratégia de maquinagem 5 eixos simultâneos

5.1.3 Faces de 60° de inclinação

Na figura 54, encontram-se representadas as imagens resultantes da análise por microscopia ótica das superfícies maquinadas com 60° de inclinação.

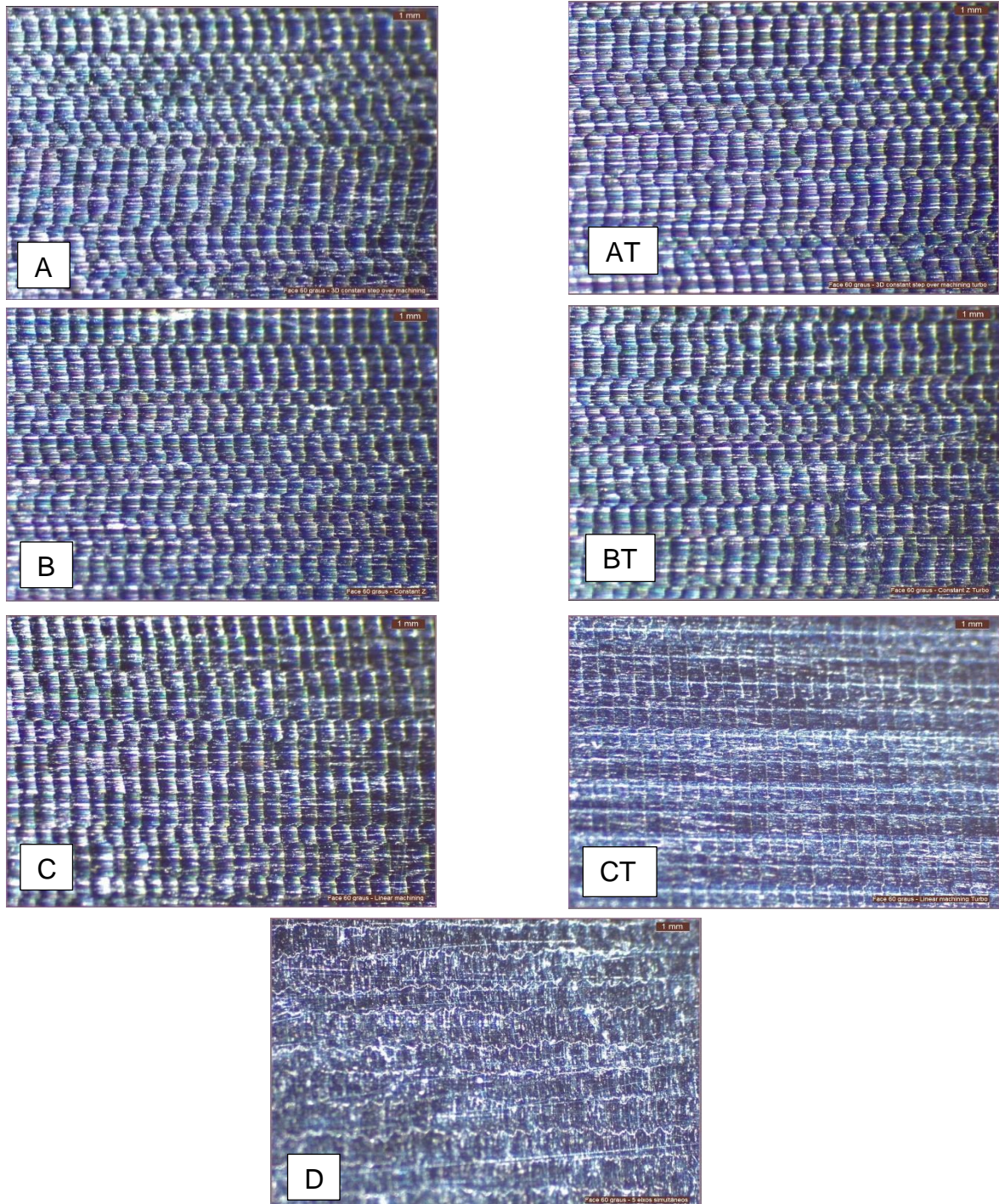


Figura 54 - A: Estratégia de maquinagem Passagem constante 3D; AT: Estratégia de maquinagem Passagem constante Z 3D turbo; B: Estratégia de maquinagem Constante Z; BT: Estratégia de maquinagem Constante Z turbo; C: Estratégia de maquinagem linear; CT: Estratégia de maquinagem linear turbo; D: Estratégia de maquinagem 5 eixos simultâneos

5.1.4 Síntese dos resultados obtidos por microscopia ótica em superfícies inclinadas

No que diz respeito aos resultados obtidos após a análise por microscopia ótica, verificou-se alguma uniformidade nas marcas da ferramenta de topo esférico ao longo das superfícies maquinadas. Com a seleção de outra estratégia de maquinagem e mantendo constantes os parâmetros de corte, não foi evidente a presença de grandes diferenças visuais entre as diferentes superfícies.

Após uma observação mais pormenorizada de todas as superfícies, verificou-se alguma “distorção” nas marcas entre passagens em todas as peças maquinadas a 3 eixos.

É também possível verificar algumas diferenças no formato das marcas observadas nas superfícies. As superfícies maquinadas com a estratégia de maquinagem de passagem constante 3D e maquinagem linear, apresentam marcas em que o formato destas se assemelha a um hexágono. Por outro lado, a estratégia de maquinagem de Z constante apresenta marcas com o formato de um retângulo.

Relativamente às diferenças verificadas entre as diferentes inclinações, foi possível observar uma ligeira aproximação entre as marcas nas superfícies, à medida que o ângulo de inclinação das superfícies foi aumentado.

Bastante diferente das estratégias anteriormente mencionadas apresenta-se a estratégia de maquinagem de 5 eixos simultâneos. Nesta apenas são evidentes as marcas da passagem da ferramenta, sendo que nas superfícies de 45° e 60° é possível observar irregularidades provenientes de possíveis vibrações durante o procedimento de acabamento.

5.2 Análise superficial através da medição da rugosidade

Na figura 55 encontra-se representado o “set-up” da peça posicionada sobre o dispositivo em poliuretano, onde foram analisadas as superfícies dos provetes. Após todo este procedimento de medição de rugosidades, foi possível obter os resultados que se irão apresentar nos subcapítulos seguintes.

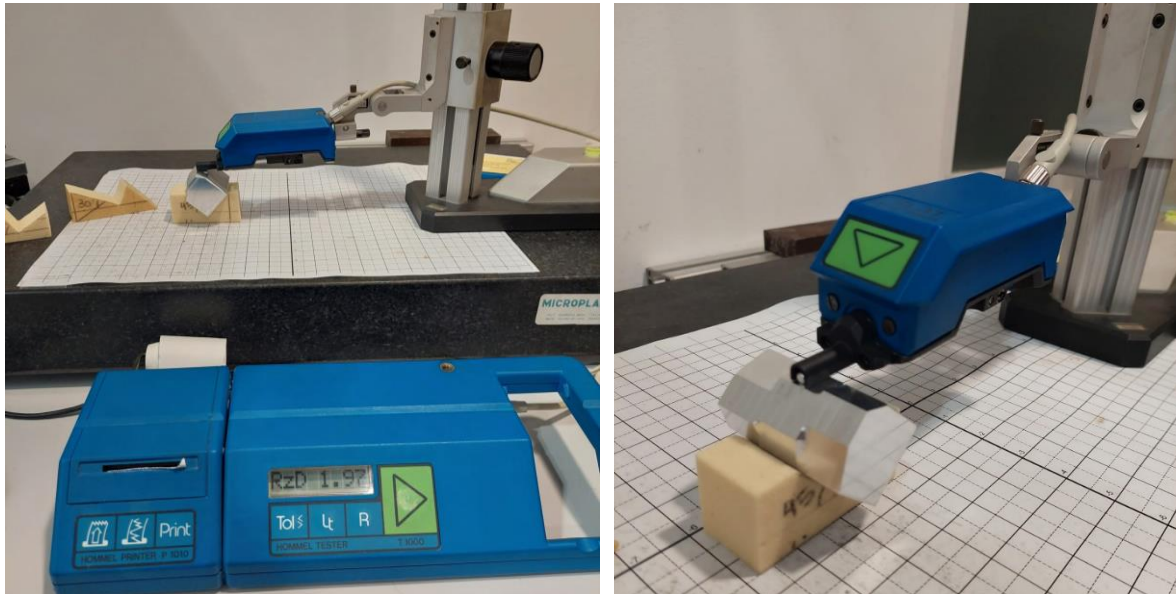


Figura 55 - Set-up para procedimento de medição de rugosidade das superfícies

5.2.1 Superfícies inclinadas

Os gráficos seguintes são uma representação visual e numérica dos valores de rugosidade das superfícies inclinadas dos provetes maquinados.

O eixo horizontal do gráfico exibe as estratégias de maquinagem utilizadas. Cada uma das estratégias subdivide-se em 3 barras com cores distintas, sendo que cada cor corresponde a um diferente ângulo de inclinação da superfície. No eixo vertical, temos as medidas numéricas dos valores de rugosidade sejam estes R_a , R_t ou R_z , correspondentes a cada uma das variáveis.

Na figura 56 encontra-se ilustrado o sentido de medição das faces inclinadas dos provetes. Representado com a seta vermelha é o sentido denominado de “medição no sentido transversal” e com a seta amarela é o sentido denominado de “medição no sentido longitudinal”.

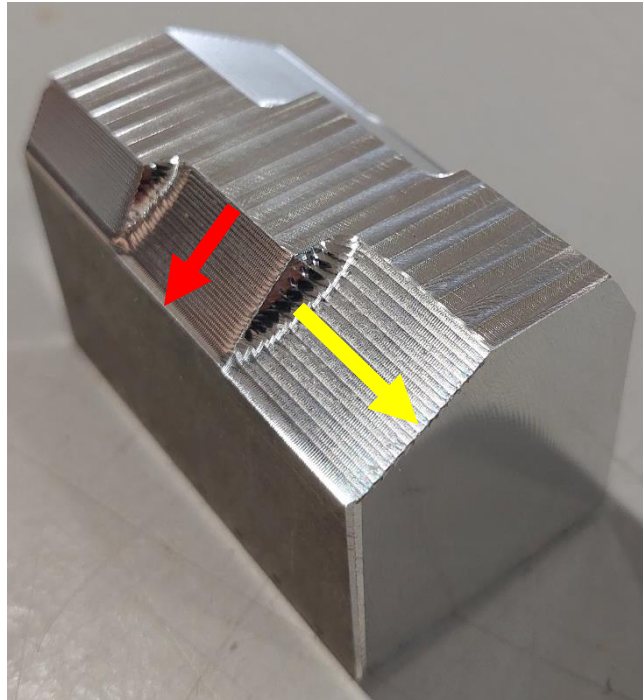


Figura 56 - Sentido de medição das superfícies inclinadas

5.2.1.1 Medição no sentido transversal dos valores de Ra

Segundo a análise do gráfico 1, é possível observar que a estratégia de maquinagem que apresentou um menor valor de Ra de entre as superfícies de 30° foi a passagem constante 3D HSM com um valor de 0,285 μm . Após a análise por microscopia ótica, era de prever que a superfície de 30°, maquinada com a estratégia de 5 eixos simultâneos, fosse a que apresentasse um maior valor de rugosidade, sendo este 1,64 μm .

No que diz respeito às faces de 45° de inclinação, a estratégia que apresentou melhor desempenho foi igualmente a passagem constante 3D HSM. A que teve um maior valor de Ra foi igualmente a estratégia de 5 eixos simultâneos.

Quanto à face de 60°, verificou-se que a estratégia de maquinagem que apresenta menor valor de rugosidade de superfície é a estratégia de maquinagem passagem constante 3D HSM. Os maiores valores de rugosidade de superfície de entre todas as estratégias de maquinagem obtiveram-se na estratégia de maquinagem linear turbo, com um valor correspondente a 0,88 µm.

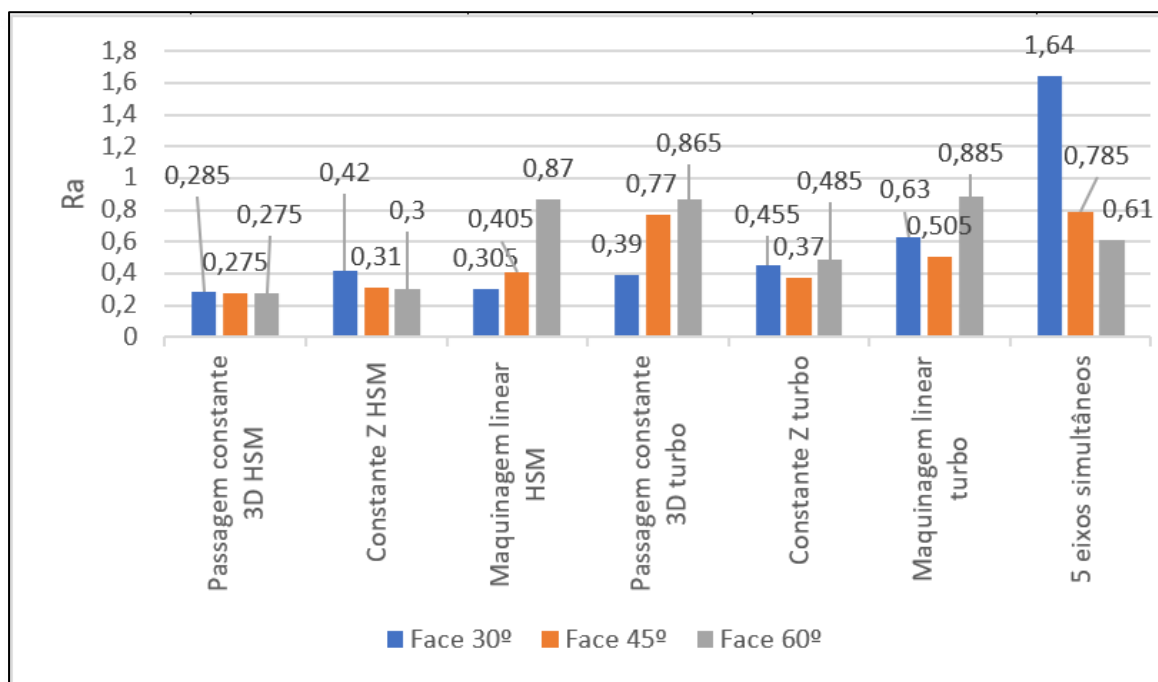


Gráfico 1 - Medição no sentido transversal dos valores de Ra

5.2.1.2 Medição no sentido transversal dos valores de Rt

Segundo a análise do gráfico 2, é possível observar que a estratégia de maquinagem que apresentou um menor valor de Rt de entre as superfícies de 30° foi a maquinagem linear HSM com um valor de 1,93 µm. A superfície de 30°, maquinada com a estratégia de 5 eixos simultâneos foi a que apresentou um maior valor de Rt, sendo este 7,37 µm.

No que diz respeito às faces de 45° de inclinação, a estratégia que apresentou melhor desempenho foi a estratégia de maquinagem, de Z constante HSM. A que teve um maior valor de Rt foi a estratégia de passagem constante 3D turbo.

Quanto à face de 60°, após a análise das barras cinzentas, verifica-se que a estratégia de maquinagem que apresenta menor valor de Rt é a estratégia de maquinagem passagem constante 3D HSM. Os maiores valores de Rt de entre todas as estratégias de maquinagem verificaram-se na estratégia de maquinagem passagem constante 3D turbo, com um valor correspondente a 7,18 µm.

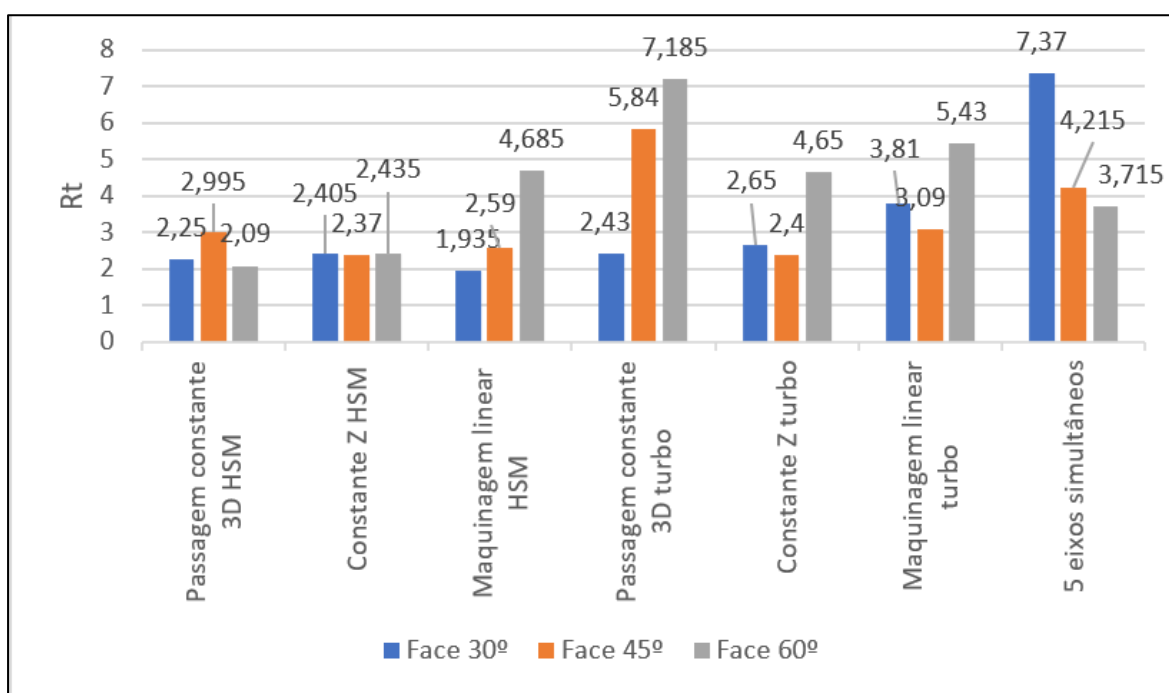


Gráfico 2 - Medição no sentido transversal dos valores de Rt

5.2.1.3 Medição no sentido transversal dos valores de Rz

Através da análise do gráfico 3, é possível observar que a estratégia de maquinagem que apresentou um menor valor de Rz de entre as superfícies de 30° foi a maquinagem linear HSM com um valor de 1,60 µm. A superfície de 30°, maquinada com a estratégia de 5 eixos simultâneos, foi a que apresentou um maior valor de Rz, sendo este 6,42 µm.

No que diz respeito às faces de 45° de inclinação, a estratégia que apresentou melhor desempenho foi a estratégia de maquinagem passagem constante 3D HSM. A que obteve um maior valor de Rz foi a estratégia de passagem constante 3D turbo.

Quanto à face de 60°, verificou-se que a estratégia de maquinação que apresentou menor valor de Rz foi a estratégia de maquinação passagem constante 3D HSM. Os maiores valores de Rz de entre todas as estratégias de maquinação verificaram-se na estratégia de maquinação linear turbo, com um valor correspondente a 4,32 µm.

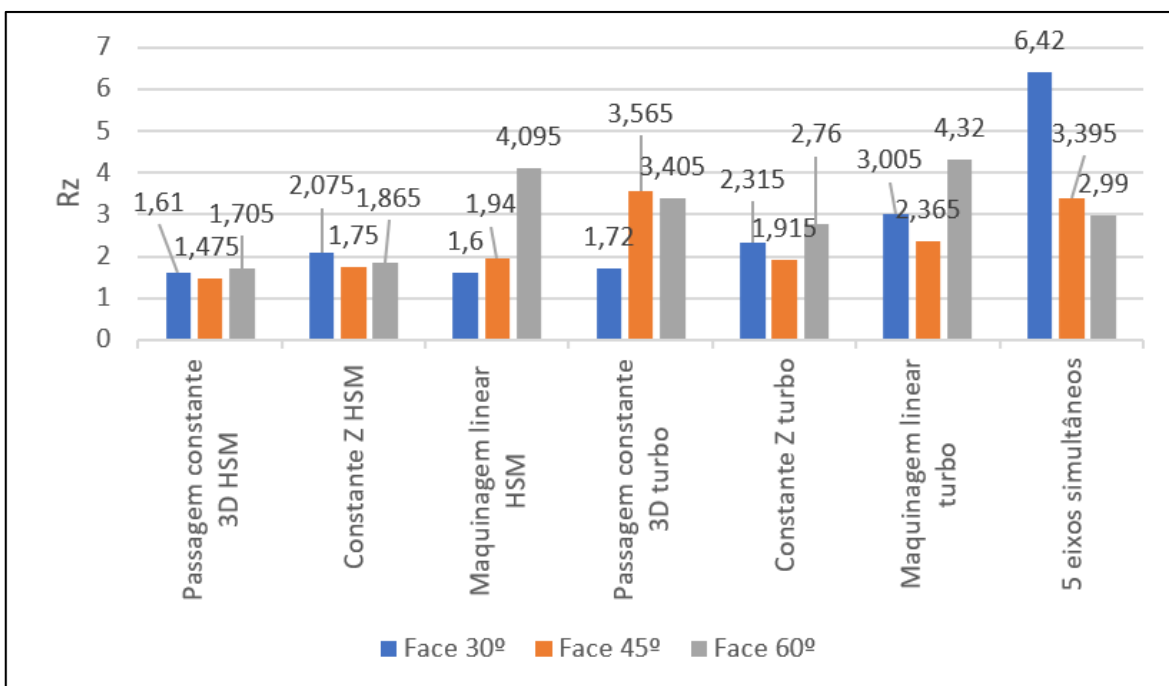


Gráfico 3 - Medição no sentido transversal dos valores de Rz

5.2.1.4 Medição no sentido longitudinal dos valores de Ra

A partir da análise do gráfico 4, é possível observar que a estratégia de maquinação que apresentou um menor valor de Ra, de entre as superfícies de 30° medidas no sentido longitudinal, foi a maquinação linear HSM com um valor de 0,19 µm. A superfície de 30° maquinada com a estratégia de 5 eixos simultâneos foi a que apresentou um maior valor de Ra, sendo este 0,50 µm.

No que diz respeito às faces de 45° de inclinação, a estratégia que apresentou melhor desempenho foi a estratégia de maquinação constante Z turbo. A que teve um maior valor de Ra foi a estratégia de passagem constante 3D turbo.

Quanto à face de 60°, verifica-se que a estratégia de maquinagem que apresenta menor valor de Ra é a estratégia de maquinagem contante Z turbo. Os maiores valores de Ra de entre todas as estratégias de maquinagem verificaram-se na estratégia de maquinagem passagem constante 3D turbo, com um valor correspondente a 0,47 μm .

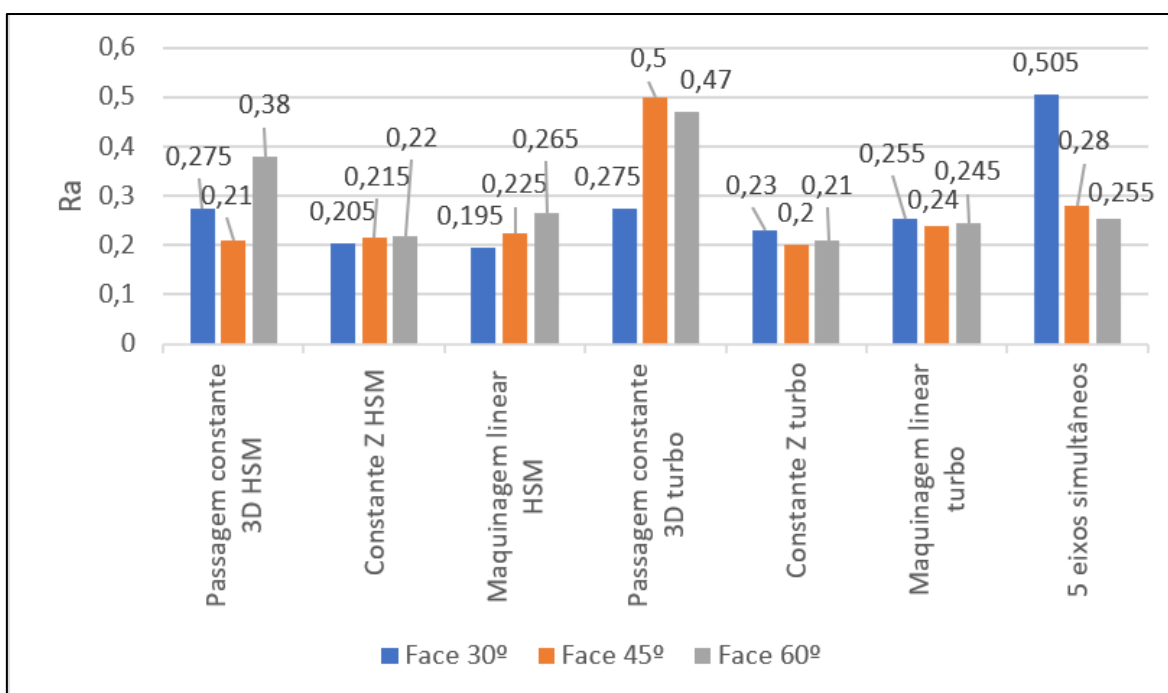


Gráfico 4 - Medição no sentido longitudinal dos valores de Ra

5.2.1.5 Medição no sentido longitudinal dos valores de Rt

Segundo a análise do gráfico 5, é possível observar que a estratégia de maquinagem que apresentou um menor valor de Rt medido no sentido longitudinal de entre as superfícies de 30° foi a constante Z HSM com um valor de 1,34 μm . A superfície de 30° maquinada com a estratégia de 5 eixos simultâneos foi a que apresentou um maior valor de Rt, sendo este 4,06 μm .

No que diz respeito às faces de 45° de inclinação, a estratégia que apresentou melhor desempenho foi a estratégia de maquinagem de Z constante turbo. A que teve um maior valor de Rt foi a estratégia de passagem constante 3D turbo.

Quanto à face de 60°, verifica-se que a estratégia de maquinagem que apresenta menor valor de Rt é a estratégia de maquinagem constante Z turbo.

Os maiores valores de Rt de entre todas as estratégias de maquinação verificaram-se na estratégia de maquinação passagem constante 3D turbo, com um valor correspondente a 3,21 μm .

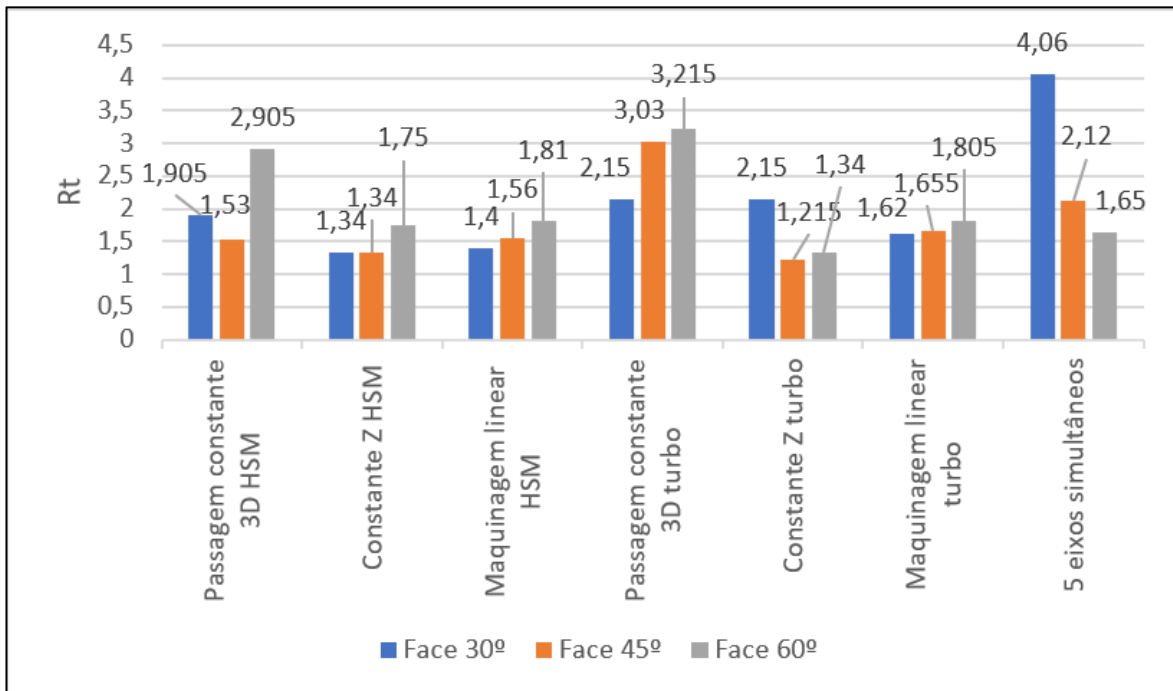


Gráfico 5 - Medição no sentido longitudinal dos valores de Rt

5.2.1.6 Medição no sentido longitudinal dos valores de Rz

Segundo a análise do gráfico 6, é possível observar que a estratégia de maquinação que apresentou um menor valor de Rz medido no sentido longitudinal de entre as superfícies de 30° foi a maquinação linear HSM com um valor de 1,09 μm . A superfície de 30° maquinação com a estratégia de 5 eixos simultâneos foi a que apresentou um maior valor de Rz, sendo este 2,58 μm .

No que diz respeito às faces de 45° de inclinação, a estratégia que apresentou melhor desempenho foi a estratégia de maquinação de Z constante turbo. A que teve um maior valor de Rz foi a estratégia de passagem constante 3D turbo.

Quanto à face de 60°, verifica-se que a estratégia de maquinagem que apresenta menor valor de Rz é a estratégia de maquinagem constante Z turbo. Os maiores valores de Rz de entre todas as estratégias de maquinagem verificaram-se na estratégia de maquinagem passagem constante 3D turbo, com um valor correspondente a 1,99 μm .

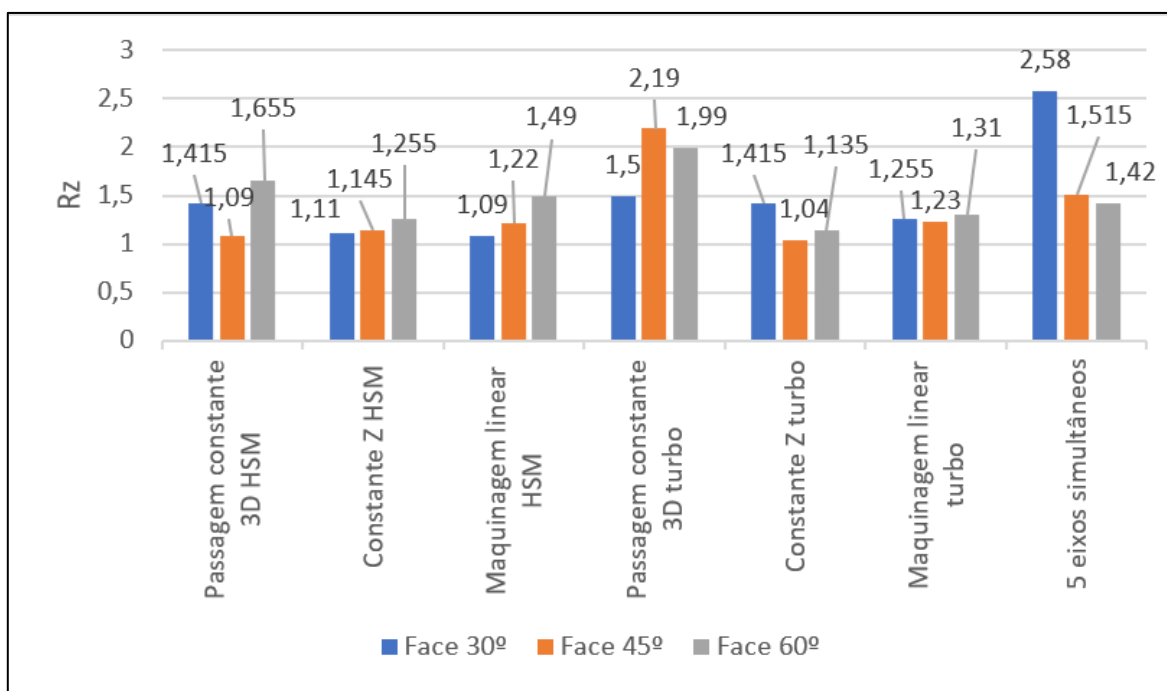


Gráfico 6 - Medição no sentido longitudinal dos valores de Rz

5.3 Síntese dos resultados obtidos

5.3.1 Desempenho das estratégias de maquinagem

A fim de sintetizar os resultados obtidos relativamente ao desempenho das estratégias de maquinagem, foi realizada a tabela 8. Nesta, foi feita a soma da média dos valores de rugosidade obtidos após a medição das superfícies tanto no sentido longitudinal como transversal para cada uma das superfícies inclinadas (30°, 45° e 60°). Desta forma, é perceptível qual a estratégia de maquinagem que apresentou melhor e pior desempenho durante o processo de maquinagem do provete preconizado.

Os valores assinalados a cor verde apresentam o melhor resultado obtido (menor valor de rugosidade) e por outro lado, o vermelho representa o pior valor (maior valor de rugosidade).

Tabela 8 - Síntese resultados obtidos para as superfícies maquinadas inclinadas

	Passagem constante 3D HSM	Constante Z HSM	Maquinagem Linear HSM	Passagem constante 3D Turbo HSM	Constante Z Turbo HSM	Maquinagem Linear Turbo HSM	5 Eixos Simultâneos
Ra (µm)	1,7	1,67	2,265	3,27	1,95	2,76	4,075
Rt (µm)	13,68	11,64	13,98	23,85	14,41	17,41	23,13
Rz (µm)	8,95	9,2	11,44	14,37	10,58	13,49	18,32

5.3.2 Desempenho das diferentes inclinações

5.3.2.1 Valores referentes às estratégias de 3 eixos do centro de maquinagem

À semelhança da síntese realizada no subcapítulo anterior, foi realizada a tabela 9. Esta, tem como finalidade sintetizar os resultados obtidos após adquirir valores de rugosidade para as superfícies inclinadas, porém, pretende-se avaliar o desempenho de cada uma das diferentes inclinações de forma individual. Para tal, foi feita a soma da média dos valores de rugosidade obtidos após a medição das superfícies tanto no sentido longitudinal como transversal da medição de cada uma das diferentes inclinações, sendo estes apenas referentes às superfícies maquinadas a 3 eixos. A soma foi feita tendo em conta o parâmetro de rugosidade medido e o ângulo de inclinação da superfície, a fim de perceber qual foi a inclinação que apresentou melhor e pior desempenho, independentemente da estratégia de maquinagem utilizada.

Os valores assinalados a cor verde apresentam o melhor resultado obtido (menor valor de rugosidade) e, por outro lado, o vermelho representa o pior valor (maior valor de rugosidade).

Tabela 9 - Resultados obtidos por ângulos para estratégias de 3 eixos

	30°	45°	60°
Ra (µm)	3,92	4,23	5,47
Rt (µm)	26,05	29,62	39,30
Rz (µm)	20,11	20,93	26,99

5.3.2.2 Valores referentes à estratégia de 5 eixos do centro de maquinagem

Os valores apresentados na seguinte tabela 10 são referentes às superfícies maquinadas com a estratégia de 5 eixos. O procedimento de obtenção de valores foi exatamente igual ao anteriormente descrito no subcapítulo 5.3.2.1, porém, os valores apresentados são exclusivamente referentes à estratégia de maquinagem de 5 eixos simultâneos.

Os valores assinalados a cor verde apresentam o melhor resultado obtido (menor valor de rugosidade) e, por outro lado, o vermelho representa o pior valor (maior valor de rugosidade).

Tabela 10 - Resultados obtidos por ângulos para estratégia de 5 eixos

	30°	45°	60°
Ra (µm)	2,15	1,07	0,87
Rt (µm)	11,43	6,34	5,37
Rz (µm)	9,00	4,91	4,41

6 CONCLUSÕES

Este trabalho tinha como objetivo primordial a comparação do estado de superfícies maquinadas entre a tecnologia 3 e 5 eixos recorrendo a um centro de maquinagem de controlo numérico computadorizado.

Para tal, optou-se por modelar um provete que fosse exequível a 3 eixos, e 5 eixos, e posteriormente fossem comparadas diferentes estratégias na maquinagem de um provete com diferentes inclinações de superfície.

Após a realização dos ensaios de maquinagem e análise de todos os valores obtidos, foi possível concluir que a qualidade de uma superfície maquinada inclinada depende bastante da estratégia de maquinagem utilizada. Como foi possível observar, com a mesma ferramenta de acabamento, com os mesmos parâmetros de corte e variando apenas as estratégias de maquinagem obtiveram-se valores bastante distintos.

Na execução dos provetes utilizados no presente estudo, verificou-se que na maquinagem das superfícies inclinadas, para minimizar a rugosidade de superfície, a estratégia que apresentou o melhor desempenho foi a maquinagem em Z constante HSM.

Além das conclusões retiradas quanto às estratégias de maquinagem, é possível concluir qual das inclinações foi a que apresentou melhor desempenho. Considerando todas as estratégias de maquinagem a 3 eixos, foi possível concluir que com o aumento da inclinação das faces dos provetes, houve aumentos significativos nos valores de rugosidade, sendo que os melhores valores de rugosidade de superfície foram obtidos nas superfícies maquinadas a 30° e os piores das de 60°. No que diz respeito à estratégia de maquinagem de 5 eixos, verificou-se o oposto de nas de 3 eixos. Com o aumento dos ângulos de inclinação das faces do provete, os valores de rugosidade foram decrescendo, sendo que o menor valor foi obtido na face de 60° e o maior na face de 30°.

Por fim, após a análise dos resultados anteriormente descritos, é possível concluir qual a melhor tecnologia de maquinagem a utilizar. Para o provete preconizado no presente estudo, a tecnologia de maquinagem que apresentou melhor desempenho foi a maquinagem a 3 eixos. Esta apresentou melhores

resultados uma vez que não existe pertinência de utilizar uma estratégia de 5 eixos para este tipo de geometrias. Apesar de a ferramenta ter sido inclinada a 15° no sentido do avanço de corte, ficaram bastante salientes as marcas das passagens nas superfícies. Certamente que esta tecnologia teria um desempenho notoriamente melhor no caso de ser uma peça com mais complexidade geométrica, ou seja, superfícies concavas e convexas.

6.1 Trabalhos futuros

Após a realização do presente trabalho reconhece-se que ainda há necessidade de melhorar alguns aspectos em futuras investigações relacionadas com este tema. Neste sentido, seria interessante proceder à avaliação de superfícies de maior complexidade, a fim de perceber a influência das estratégias de maquinagem e do número de eixos utilizados no acabamento de superfície obtido em superfícies côncavas e convexas.

De bastante relevância seria também a utilização de diferentes métodos de refrigeração (seco e MQL) em vez de abundante para perceber se é um fator de influência nos acabamentos de superfície obtidos.

Considera-se também importante a exploração de diferentes materiais sujeitos às mesmas estratégias. Assim sendo, seria de bastante interesse comparar o acabamento de superfície obtido e o desgaste das ferramentas de corte quando são sujeitas à maquinagem de diferentes ligas metálicas.

Além das futuras melhorias anteriormente referidas, seria de bastante interesse avaliar de que forma é que a utilização de diferentes geometrias de ferramentas (fresas de barril e fresas de lente) têm influência no acabamento de superfícies.

Por fim, outro aspeto sugerido estaria relacionado com a medição de peças com diferentes geometrias. Neste sentido, seria bastante interessante explorar diferentes estratégias de maquinagem, especialmente no que diz respeito às estratégias de maquinagem de 5 eixos simultâneos.

REFERÊNCIAS

- Abebe, R., & Gopal, M. (2023). Exploring the effects of vibration on surface roughness during CNC face milling on aluminum 6061-T6 using sound chatter. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.332>
- Alok, A., Kumar, S., Pandey, S. M., & Kumar, A. (2023). Review on the effect of surface textured tool in the field of machining. *Https://Doi.Org/10.1080/2374068X.2023.2184580*.
<https://doi.org/10.1080/2374068X.2023.2184580>
- Altintas, Y., Kersting, P., Biermann, D., Budak, E., Denkena, B., & Lazoglu, I. (2014). Virtual process systems for part machining operations. *CIRP Annals*, 63(2), 585–605. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.05.007>
- Baptista, R., & Antune Simões, J. F. (2000). Three and five axes milling of sculptured surfaces. *Journal of Materials Processing Technology*, 103(3), 398–403. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00479-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00479-3)
- Carvalho, S. R., Horovistiz, A., & Davim, J. P. (2023). The role of roughness parameters in grading the machined surface quality in Ti-alloys. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 095440542311792. <https://doi.org/10.1177/09544054231179249>
- Chan, T. C., Chang, C. C., Ullah, A., & Lin, H. H. (2023). Study on Kinematic Structure Performance and Machining Characteristics of 3-Axis Machining Center. *Applied Sciences* 2023, Vol. 13, Page 4742, 13(8), 4742. <https://doi.org/10.3390/APP13084742>

- Cripps, R. J., Cross, B., Hunt, M., & Mullineux, G. (2017). Singularities in five-axis machining: Cause, effect and avoidance. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 116, 40–51. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.12.002>
- Dimitrov, D., & Saxer, M. (2012). Productivity Improvement in Tooling Manufacture through High Speed 5 Axis Machining. *Procedia CIRP*, 1(1), 277–282. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2012.04.050>
- EXACT MACHINERY CO., LTD. (n.d.). Retrieved June 13, 2023, from http://www.exactmachinery.com/english/2-1-1-4_ERT_e.html
- Fan, J. (2014). Cutting speed modelling in ball nose milling applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(1–4), 161–171. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5672-3>
- García-Hernández, C., Garde-Barace, J.-J., Valdivia-Sánchez, J.-J., Ubieto-Artur, P., Bueno-Pérez, J.-A., Cano-Álvarez, B., Alcázar-Sánchez, M.-Á., Valdivia-Calvo, F., Ponz-Cuenca, R., Huertas-Talón, J.-L., & Kyratsis, P. (2021). Trochoidal Milling Path with Variable Feed. Application to the Machining of a Ti-6Al-4V Part. *Mathematics*, 9(21), 2701. <https://doi.org/10.3390/math9212701>
- Ghionea, I., Ghionea, A., & Eng, L. (2009). OPTIMIZATION BY SIMULATION OF SURFACE MACHINING ON CNC MACHINE TOOLS USING CAD-CAM TECHNIQUES. *INTERNATIONAL MULTIDISCIPLINARY CONFERENCE*, 8.
- HAAS. (2023). VF-2SS | Fresadora de cone ISO40 | Super velocidade | Fresadoras Verticais – Máquinas CNC Haas. <https://www.haascnc.com/pt/machines/vertical-mills/vf-series/models/small/vf-2ss.html>

- Kalisz, J., Źak, K., Wojciechowski, S., Gupta, M. K., & Krolczyk, G. M. (2021). Technological and tribological aspects of milling-burnishing process of complex surfaces. *Tribology International*, 155, 106770. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106770>
- Kučera, D., Linkeová, I., & Stejskal, M. (2023). The influence of CAD model continuity on accuracy and productivity of CNC machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 124(3–4), 1115–1128. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10422-w>
- Layegh K., S. E., Yigit, I. E., & Lazoglu, I. (2015). Analysis of tool orientation for 5-axis ball-end milling of flexible parts. *CIRP Annals*, 64(1), 97–100. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.04.067>
- Lazoglu, I., Manav, C., & Murtezaoglu, Y. (2009). Tool path optimization for free form surface machining. *CIRP Annals*, 58(1), 101–104. <https://doi.org/10.1016/J.CIRP.2009.03.054>
- Liu, J., Huang, L., Wang, Y., Wang, Y., & Shi, J. (2020). Developing continuous machining strategy for cost-effective five-axis CNC milling systems with a four-axis controller. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 33(5), 474–490. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2020.1736719>
- Liu, J., Lu, E., Yi, H., Wang, M., & Ao, P. (2017). A new surface roughness measurement method based on a color distribution statistical matrix. *Measurement*, 103, 165–178. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.02.036>
- Liu, Y., & Wu, L. (2023). CAD/CAM Based Aided Design of Mechanical Product Shape. *Journal of Physics: Conference Series*, 2476(1), 012062. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2476/1/012062>

- López de Lacalle, L. N., Lamikiz, A., Sánchez, J. A., & Salgado, M. A. (2004). Effects of tool deflection in the high-speed milling of inclined surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 24(9–10), 621–631. <https://doi.org/10.1007/s00170-003-1723-x>
- MatWeb. (2023). *Alumínio 6061-T4; 6061-T451*. <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=d5ea75577b1b49e8ad03caf007db5ba8>
- Mazak. (2016). *Full 5-axis or 3 + 2 Machining: Which is Right for You?* <https://www.mazakusa.com/news-events/blog/full-5-axis-or-3-2-machining-which-is-right-for-you/>
- Mikó, B., & Zentay, P. (2019). A geometric approach of working tool diameter in 3-axis ball-end milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(1–4), 1497–1507. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03968-9>
- Moldviet. (n.d.). *Machining Center*. Retrieved June 13, 2023, from http://moldviet.net/Tai-Lieu/yougo2/nc_maciningc.php
- Okokpuije, I. P., & Tartibu, L. K. (2022). A mini-review of the behaviour characteristic of machining processes of aluminium alloys. *Materials Today: Proceedings*, 62, 4526–4532. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.006>
- Öztürk, B., & Kara, F. (2020). Calculation and Estimation of Surface Roughness and Energy Consumption in Milling of 6061 Alloy. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2020/5687951>
- Ramos, A. M., Relvas, C., & Simões, J. A. (2003). The influence of finishing milling strategies on texture, roughness and dimensional deviations on the machining of complex surfaces. *Journal of Materials Processing Technology*, 136(1–3), 209–216. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00160-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00160-2)

Relvas, C. (2012). *Controlo Numérico Computorizado - Conceitos Fundamentais* (3ª Edição).

Sadílek, M., Hajnys, J., Kousal, L., Náprstková, N., Szotkowski, T., & Hajnyš, J. (2018). *The Analysis of Accuracy of Machined Surfaces and Surfaces Roughness after 3axis and 5axis Milling Technology Wire Electrical Discharge Machining AI Foam View project The Analysis of Accuracy of Machined Surfacesand Surfaces Roughness after 3axis and 5axis Milling*. <https://doi.org/10.21062/ujep/217.2018/a/1213-2489/MT/18/6/1015>

Samala, A. D., & Amanda, M. (2023). Immersive Learning Experience Design (ILXD): Augmented Reality Mobile Application for Placing and Interacting with 3D Learning Objects in Engineering Education. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (IJIM)*, 17(05), 22–35. <https://doi.org/10.3991/ijim.v17i05.37067>

Sandvik Coromant. (2023). *Milling formulas and definitions*. <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/machining-formulas-definitions/milling-formulas-definitions>

Siemens Software. (n.d.-a). *CAD para programação NC | Software Siemens*. Retrieved May 11, 2023, from <https://plm.sw.siemens.com/en-US/nx/manufacturing/cad-cam-nc-programming/>

Siemens Software. (n.d.-b). *NX CAM software | Siemens Software*. Retrieved May 11, 2023, from <https://plm.sw.siemens.com/en-US/nx/manufacturing/cam-software/>

SolidCAM. (2022). *SolidCAM CAM Software: CAM Modules*. <https://www.solidcam.com/21/cam-solutions/cam-modules/>

- Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2023a). Machine learning and artificial intelligence in CNC machine tools, A review. *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, 100009. <https://doi.org/10.1016/J.SMSE.2023.100009>
- Soori, M., Asmael, M., Khan, A., & Farouk, N. (2021). Minimization of surface roughness in 5-axis milling of turbine blades. *Https://Doi.Org/10.1080/15397734.2021.1992779*.
<https://doi.org/10.1080/15397734.2021.1992779>
- Stahli, A. W. (n.d.). *Surface Finish Quality - Ra, Rz, Rt Surface Roughness Measuring & Finish*. Retrieved September 18, 2023, from <https://www.stahlusa.com/stahli-publication/the-technique-of-lapping/surface-finish-quality/>
- Stratogiannis, F. I., Galanis, N. I., Karkalos, N. E., & Markopoulos, A. P. (2019). Optimization of the Manufacturing Strategy, Machining Conditions, and Finishing of a Radial Impeller. *Machines*, 8(1), 1. <https://doi.org/10.3390/machines8010001>
- Tsai, C.-Y., & Lin, P. D. (2018). Gear manufacturing using power-skiving method on six-axis CNC turn-mill machining center. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(1–4), 609–623. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1154-8>
- Tunc, L. T. (2019). Smart tool path generation for 5-axis ball-end milling of sculptured surfaces using process models. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 56, 212–221. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.10.002>
- Tunc, L. T., & Budak, E. (2009). Extraction of 5-axis milling conditions from CAM data for process simulation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43(5–6), 538–550. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1735-7>

- Tunç, L. T., Ozkirimli, O. M., & Budak, E. (2016). Machining strategy development and parameter selection in 5-axis milling based on process simulations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85(5–8), 1483–1500. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8001-6>
- Unnikrishna Pillai, J., Sanghrajka, I., Shunmugavel, M., Muthuramalingam, T., Goldberg, M., & Littlefair, G. (2018). Optimisation of multiple response characteristics on end milling of aluminium alloy using Taguchi-Grey relational approach. *Measurement*, 124, 291–298. <https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2018.04.052>
- Uzun, M., Usca, Ü. A., Kuntoğlu, M., & Gupta, M. K. (2022). Influence of tool path strategies on machining time, tool wear, and surface roughness during milling of AISI X210Cr12 steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119(3–4), 2709–2720. <https://doi.org/10.1007/S00170-021-08365-9/FIGURES/12>
- Vishnu, V. S., Varghese, K. G., & Gurumoorthy, B. (2023). A data-driven digital twin framework for key performance indicators in CNC machining processes. *https://Doi.Org/10.1080/0951192X.2023.2177741*. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2023.2177741>
- Wojciechowski, S., Twardowski, P., & Pelic, M. (2014). Cutting Forces and Vibrations During Ball End Milling of Inclined Surfaces. *Procedia CIRP*, 14, 113–118. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.102>
- Yi, R., & Xue, M. (2023). Milling Simulation of NC System Based on 3D Modeling. *Journal of Physics: Conference Series*, 2476(1), 012059. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2476/1/012059>

- Yu, D.-Y., & Ding, Z. (2019). Post-processing algorithm of a five-axis machine tool with dual rotary tables based on the TCS method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(9–12), 3937–3944. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03490-y>
- Zhang, Q., Zhang, S., & Shi, W. (2018). Modeling of surface topography based on relationship between feed per tooth and radial depth of cut in ball-end milling of AISI H13 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(9–12), 4199–4209. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1502-8>
- Zhou, W., Peng, K., & Yu, Y. (2016). Surface roughness measurement and analysis of mechanical parts based on digital holography. *Advances in Manufacturing*, 4(3), 217–224. <https://doi.org/10.1007/s40436-016-0146-5>