

# **Influência dos parâmetros de corte na maquinação do alumínio 7050**

**Vítor Manuel Macedo Vicente**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Eletromecânica**  
(2<sup>o</sup> ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Helder Joaquim Dinis Correia

**Setembro de 2020**



# Agradecimentos

Quero agradecer a todos os que contribuíram e tornaram possível a realização deste trabalho, em especial:

Ao meu orientador, Professor Doutor Helder Correia, por toda a orientação e conhecimentos transmitidos ao longo do meu percurso académico, em especial durante a realização desta dissertação e por toda a ajuda no trabalho realizado no centro de maquinagem.

Ao professor Doutor Fernando Santos, pelo apoio e sugestões fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Também quero agradecer ao projeto Centro-01-0145-FEDER-000017 - EMaDeS - Energy, Materials and Sustainable Development, project 026653, POCI-01-0247-FEDER-026653, e UID/EMS/00151/2019 por ter facultado o bloco de alumínio.



## **Resumo**

Uma das principais desvantagens da maquinaria CNC é o seu elevado custo operacional, porém este valor pode aumentar exponencialmente caso os parâmetros de corte não sejam os ideais.

Neste trabalho são estudados os parâmetros de corte (velocidade de corte, velocidade de avanço, penetração radial e penetração axial) e o efeito que estes parâmetros têm na rugosidade superficial e na taxa de remoção de material durante a fresagem de uma liga de alumínio AL7050. Para tal análise foi maquinado um provete a partir de um bloco de alumínio da liga estudada. Neste provete foram testadas duas séries de dezasseis ensaios. Nestes ensaios foi utilizado o método de Taguchi, em que foi construída uma matriz ortogonal L16 e foram definidos quatro níveis para cada parâmetro. Também foi registada a rugosidade média das superfícies horizontal e lateral, além da taxa de remoção de material. A partir da matriz ortogonal criada foi possível criar uma análise de variação ANOVA, que consiste em três gráficos: gráfico de efeitos principais na rugosidade da superfície horizontal, gráficos de efeitos principais na rugosidade da superfície lateral, e o gráfico de efeitos principais na taxa de remoção de material. Podendo assim tirar conclusões sobre os efeitos dos parâmetros de corte na liga de alumínio AL7050.

## **Palavras-chave**

Fresagem, parâmetros de corte, método de Taguchi, rugosidade da superfície, taxa de remoção de material, análise ANOVA.



# **Abstract**

One of the main disadvantages of CNC machinery is its high operating cost, but this value can increase exponentially if the cutting parameters are not ideal.

In this work, the cutting parameters (cutting speed, feed rate, radial penetration, and axial penetration) and the effect these parameters have on the surface roughness and material removal rate during the milling of an AL7050 aluminum alloy were studied. For this analysis, a specimen was machined from an aluminum block of the studied alloy. In this specimen, two series of sixteen tests were tested. Through the test piece, the Taguchi method was used, in which an L16 orthogonal matrix was built and four levels were defined for each parameter. The average roughness of the horizontal and lateral surfaces was also recorded, as well as the material removal rate. From the orthogonal matrix created, it was possible to create an analysis variation ANOVA, that consists of three graphs: main effect graph on horizontal surface roughness, main effect graph on lateral surface roughness, and the main effect graph on material removal rate. Thus, being able to draw conclusions about the effects of the cutting parameters in the aluminum alloy AL7050.

# **Keywords**

Milling, cutting parameters, Taguchi method, surface roughness, material removal rate, ANOVA analysis.



# Índice

Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Justificação	2
1.3 Objetivos e organização da dissertação	4
Capítulo 2 – Conceitos fundamentais	5
2.1 Fresagem	5
2.2 Operações de fresagem	5
2.2.1 Facejamento	6
2.2.2 Fresagem periférica	9
2.2.3 Fresagem de ombro	10
2.2.4 Fresagem de perfil	11
2.2.5 fresagem de caixas	15
2.2.6 Fresagem de ranhura	16
2.3 Parâmetros de corte	17
2.3.1 Velocidade de rotação	17
2.3.2 Avanço	19
2.3.3 Profundidade de corte e largura de corte	20
2.4 Rugosidade da Superfície	20
2.5 Taxa de remoção de material	22
2.6 Método de Taguchi	23
Capítulo 3 – Ensaio experimentais	29
3.1 Materiais e ferramentas	29
3.2 Matrizes para o ensaio experimental	33
3.3 Provete	36
3.4 Resultados dos ensaios	42
Capítulo 4 – Análise e discussão dos resultados	47
4.1 Razão sinal-ruído	47
4.2 Analise ANOVA	51
Capítulo 5 – Conclusões	55
Bibliografia	57



# Lista de Figuras

Figura 1 – Facejamento [16].

Figura 2 – Ferramentas porta-pastilhas com diferentes ângulos: (a) pastilhas com  $90^\circ$ ; (b) pastilhas com grau médio; (c) pastilhas com grau baixo (adaptado de [16]).

Figura 3 – Ferramenta porta-pastilhas com pastilhas redondas e marcas de maquinação (adaptado de [16]).

Figura 4 – Ferramentas fresagem de topo [17].

Figura 5 - Marcas de maquinação de uma superfície maquinada por uma ferramenta de fresagem de topo inteiraça [18].

Figura 6 – Fresagem periférica [20].

Figura 7 – Fresagem de ombro [21].

Figura 8 – Fresagem de ombro raso feito por ferramentas de facejamento [21].

Figura 9 – Fresagem de ombro profundo feito por ferramenta porta-pastilhas de passe repetido [21].

Figura 10 - Fresagem de perfil [22].

Figura 11 – Camadas de uma peça produzida através de fresagem de perfil nas diferentes etapas, (a) desbaste, (b) semi-acabamento, (c) acabamento (adaptado de [22] [23]).

Figura 12 - Peça produzida através de fresagem de perfil, (a) início do desbaste, (b) final do desbaste (adaptado de [23]).

Figura 13 - Peça produzida através de fresagem de perfil no fim da etapa de semi-acabamento (adaptado de [23]).

Figura 14 - Peça produzida através de fresagem de perfil no fim da etapa de acabamento (adaptado de [23]).

Figura 15 - Estratégias de criação de caixas [24].

Figura 16 – Fresagem de ranhura, (a) ferramentas de fresagem de topo, (b) fresa de disco (alterado de [25]).

Figura 17 – Representação dos parâmetros de corte [2].

Figura 18 – Valores da velocidade de corte ( $V_c$ ) recomendados no Catálogo de ferramentas da fabricante GARANT (alterado de [26]).

Figura 19 - Recomendações do avanço por dente ( $f_z$ ) do catálogo de ferramentas do fabricante GARANT (alterado de [26]).

Figura 20 - Limites máximos de profundidade de corte ( $a_p$ ) a largura de corte ( $a_e$ ) em [mm] em relação ao diâmetro ( $D$ ), do catálogo de ferramentas do fabricante GARANT [26].

Figura 21 – Diagrama espinha de peixe que mostra os parâmetros que afetam a rugosidade de superfície [27].

Figura 22 - Rugosidade média ( $R_a$ ) [28].

Figura 23 - Esquema representativo do processo de controle com a influência de ruído [30].

Figura 24 - Bloco de alumínio HOKOTOL® utilizado para a produção do provete.

Figura 25 - Centro de maquinagem vertical CNC Litz CV-1000.

Figura 26 - Fixação do bloco de alumínio através de grampos.

Figura 27 - Rugosímetro HOMMEL TESTER T1000.

Figura 28 - Ferramenta de fresagem [26].

Figura 29 - Ferramenta do tipo porta-pastilhas utilizada na pré-maquinagem.

Figura 30 - Esboço do layout do provete.

Figura 31 - Modelo 3D do provete após a pré-maquinagem.

Figura 32 - Modelo 3D do provete após a série A.

Figura 33 - Modelo 3D do provete após a série B.

Figura 34 - Material removido durante a série A.

Figura 35 - Material removido durante a série B.

Figura 36 - Simulação da pré-maquinagem.

Figura 37- Simulação da série A com trajetórias em zig-zag.

Figura 38- Simulação da série B com trajetórias em zig-zag.

Figura 39 - provete finalizado.

Figura 40 - Gráfico de efeito principais na rugosidade da superfície horizontal.

Figura 41 - Gráfico de efeito principais na rugosidade da superfície lateral.

Figura 42 - Gráfico de efeito principais no MMR.

# Lista de Tabelas

Tabela 1 - Seletor de arranjo ortogonal

Tabela 2 - Matriz ortogonal de Taguchi L25 P=4 L=5.

Tabela 3 - Composição química HOKOTOL (% peso).

Tabela 4 - Matriz ortogonal de Taguchi L16.

Tabela 5 - Valores dos parâmetros selecionados.

Tabela 6 - Matriz L16 de Taguchi com os valores dos parâmetros selecionados.

Tabela 7- Pesagem do provete e tempo de maquinagem de cada ensaio.

Tabela 8- Rugosidades medidas na superfície horizontal.

Tabela 9- Rugosidades medidas na superfície vertical.

Tabela 10- Valor médio da rugosidade e quociente  $S/N$  na superfície horizontal.

Tabela 11- Valor médio da rugosidade e quociente  $S/N$  na superfície lateral.

Tabela 12- MMR e Quociente sinal ruído  $S/N$ .



# Lista de Acrónimos

C-MAST	Centre for Aerospace Science and Technologies
CAD	Computer aided design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CNC	Computer Numeric Control
DOE	Design of experiments
MMR	Milling material removal
MTC	Multi Task Cutting
UBI	Universidade da Beira Interior



# Capítulo 1 – Introdução

## 1.1 Enquadramento

Tipicamente para o fabrico de componentes de alumínio da série AL7050 (como é o caso do HOKOTOL®) é usado um centro de maquinagem vertical CNC. O processo mais utilizado neste tipo de maquinaria é a fresagem de topo, isso deve-se à sua capacidade de produzir superfícies geométricas complexas com precisão razoável, além de que tem um tempo de processamento baixo em comparação a outros processos convencionais de maquinagem. Na fresagem de topo, a rugosidade do acabamento da superfície e a taxa de remoção de material são dois fatores cruciais que ditam a relação custo-benefício da produção do componente. [4]

A taxa de remoção de material vai afetar diretamente o custo do processo de maquinagem. Assim, de uma forma geral, quanto maior for a taxa de remoção de material menor será o tempo da fresagem, logo menores serão os custos da fresagem, pois associados ao tempo estão o consumo de energia e lubrificação por parte da máquina. Mais importante que isso, a taxa de remoção de material e o tempo do processo vão ditar o desgaste da ferramenta de corte. O ciclo de vida da ferramenta de corte neste tipo de maquinaria assume valores significativos para balanço económico da produção do componente. [5]

A maneira mais comum de avaliar a qualidade de acabamento de um componente maquinado é avaliar a rugosidade de superfície desse componente. A rugosidade da superfície tem um impacto sobre as propriedades mecânicas e atributos funcionais da peça, como o comportamento em diversas situações (e.g., à fadiga, resistência à corrosão, fluência, atrito, desgaste, reflexão de luz, transmissão de calor, lubrificação, condutividade elétrica) [6]

Durante a implementação da maquinação a alta velocidade na indústria, foram desenvolvidos vários estudos para encontrar os parâmetros ótimos de maquinagem. Os principais parâmetros de maquinagem de metais são: velocidade de corte, taxa de avanço, profundidade de corte e largura de corte. As configurações desses parâmetros vão determinar as características da qualidade das peças e a rentabilidade do processo de fabrico. O primeiro passo para o estudo destes parâmetros foi apresentado em 1907, quando F. W. Taylor mostrou que existe uma velocidade de corte ideal que pode

maximizar a taxa de remoção de material. Mais tarde, em 1950, W. W. Gilbert investigou a otimização dos parâmetros de maquinagem em relação à taxa máxima de produção e ao custo mínimo de produção. Em 1966 Brewer sugeriu o uso de multiplicadores de Lagrange para otimização dos parâmetros de modo a que exista corte mais económico, com o poder de corte como principal restrição. Posteriormente, em 1969, E. J. A. Armarego e R. H. Brown estudaram a otimização parâmetros de maquinagem de metais usando o cálculo diferencial. Em 1970 Bhattacharya otimizou o custo de torneamento, sujeito às restrições de rugosidade superficial e poder de corte, usando o método de Lagrange. No mesmo ano A. G. Walvekar e B. K. Lambert discutiram o uso da programação geométrica na seleção de variáveis de maquinação. Eles otimizaram a velocidade de corte e a taxa de alimentação para gerar um custo mínimo de produção. Mais tarde, em 1985, Hindujaetal desenvolveu um processo para calcular as condições de corte com custo mínimo ou taxa máxima de produção, para uma dada combinação de ferramenta/material de trabalho [7] [8]

Os estudos que relacionam os parâmetros de corte com a qualidade da peça e o custo do processo de fabricação apresentados anteriormente precisam ser atualizados à medida que novos revestimentos, materiais e ferramentas de corte são introduzidos. Assim, nas últimas décadas, foram desenvolvidas técnicas de otimização aplicadas à maquinagem, sendo que as mais utilizadas são: a lógica de fuzzy, os algoritmos genéticos, o método de resposta de superfície e o método de Taguchi. No presente trabalho utilizou-se o método de Taguchi. [7]

## **1.2 Justificação**

Vários avanços tecnológicos têm sido alcançados em relação aos centros de maquinagem CNC, como a integração de modelos 3D na fabricação assistida por computador (CAM) ou a fresagem de múltiplos eixos, que acabam por originar novos modelos de máquinas CNC. Modelos esses que possibilitam o fabrico de peças cada vez mais complexas e com um acabamento definitivo, popularizando ainda mais a utilização de centros de maquinagem CNC na indústria.

Segundo o relatório publicado em janeiro de 2018 [9], pela empresa norte americana Grand View Research, o valor do mercado global de maquinaria CNC está previsto chegar a 100,9 mil milhões de dólares até 2025, com uma taxa de crescimento anual de 6,8%.

Por consequência do crescimento deste mercado, também cresceu a necessidade de reduzir custos operacionais deste tipo de maquinaria.

De modo a responder a esta necessidade da indústria, têm surgido, em meio académico, inúmeros artigos científicos [4] [6] [10] [11] [12] relativos a esta área. Grande parte destes artigos têm como base estudar o efeito dos parâmetros de corte no acabamento final da peça maquinada, com o fim de otimizar os parâmetros de corte em relação à rugosidade da peça maquinada. Para além disso, alguns têm também em consideração a quantidade de material removido, com o fim de otimizar os parâmetros de corte em relação ao tempo de maquinagem e consequentemente aos custos da operação.

Cada um desses estudos tem por norma estudar um material em específico, sendo que a maioria opta por se focar numa liga de alumínio leve. A escolha destas ligas deve-se ao facto de este tipo de materiais serem amplamente utilizados na indústria aeronáutica, uma vez que continua a ser um dos principais clientes de centros de maquinagem CNC. Isso é devido à dimensão reduzida dos lotes de fabrico e também devido à dificuldade de se obterem peças por deformação plástica nas ligas de alumínio de elevada resistência mecânica. Além de que a indústria aeronáutica requer muitas vezes componentes maciços e de geometria complexa. Estes fatores tornam os novos centros de fresagem vertical CNC mais modernos, bastante atrativos para o efeito. [13]

Uma das principais preocupações na maquinagem de ligas alumínio da família 7000, é a temperatura gerada no processo da maquinagem. A temperatura do ponto de fusão deste tipo de alumínio (494°C) é relativamente baixa quando comparada com a dos materiais ferrosos como o aço (1500°C). Para atender à necessidade de maquinar alumínio em temperaturas mais baixas têm surgido no mercado novas ferramentas de corte, nomeadamente novas fresas com revestimento de diamante. [14] [15] [16] [17]

O desenvolvimento tecnológico e industrial nesta área, o surgimento de novos materiais, como o HOKOTOL®, e de novas ferramentas de corte no mercado, fazem com que este tipo de estudos seja um assunto atual e relevante na comunidade científica.

Apesar de já haver vários estudos semelhantes, que procuram otimizar os parâmetros de corte com a rugosidade da superfície maquinada, o grande número de combinações de material/ferramenta a ser testadas faz com que estes estudos sejam uma mais valia, podendo até ter um impacto económico na indústria.

### **1.3 Objetivos e organização da dissertação**

O objetivo central deste trabalho é estudar o efeito dos parâmetros de corte na rugosidade superficial e na taxa de remoção de material, numa de peça de alumínio HOKOTOL® durante o processo de fresagem. Pretende-se desta forma determinar as condições ótimas para obter a menor rugosidade e a maior taxa de remoção de material na fresagem CNC do material estudado. Para esse efeito fez-se um provete da liga de alumínio estudada com diferentes parâmetros de maquinagem. Para definir como os parâmetros de corte iriam variar ao longo do provete, utilizou-se o método de Taguchi e a análise estatística dos dados pelo método da análise da variância (ANOVA). Para além do estudo dos parâmetros de corte, a produção de provete permite-nos alcançar o outro objetivo deste trabalho, que é a aprendizagem da utilização do software de CAM ESPRIT. Podendo assim adquirir conhecimentos que permitem conceber uma peça de alumínio desde o arquivo CAD até à peça maquinada, escolhendo entre parâmetros de corte que permitem melhor qualidade de acabamento ou parâmetros que tornem a fabricação da peça mais económica.

No primeiro capítulo é feito um enquadramento, justificada a necessidade e a importância deste tipo de estudos, também são definidos os objetivos do mesmo. No capítulo 2 são apresentados alguns conceitos teóricos fundamentais como operações de fresagem, parâmetros de corte, rugosidade de superfície, taxa de remoção de material e método de Taguchi. No capítulo 3 é feito todo planeamento dos ensaios experimentais e são apresentados os resultados dos ensaios experimentais. O capítulo 4 é dedicado a analisar e discutir os resultados do capítulo anterior. No último capítulo são apresentadas as principais conclusões deste trabalho.

# Capítulo 2 – Conceitos fundamentais

## 2.1 Fresagem

A fresagem é um dos processos de maquinagem mais utilizados e é executado com uma ferramenta de corte rotativa com várias laminas de corte. A ferramenta usada na fresagem percorre uma trajetória previamente programada ao longo da peça de trabalho, removendo material. Uma das características que se destaca na fresagem é a sua versatilidade, especialmente quando comparada outros processos de maquinagem por arranque de aparas como a perfuração, a retificação ou até mesmo o torneamento.

Cada uma das arestas da ferramenta de corte remove uma pequena quantidade de material da peça maquinada, a que chamamos de limalha ou aparas.

Tal como todos os processos de maquinagem por arranque de aparas, quanto mais duro for o material da peça, mais difícil é remover aparas da peça. [18]

## 2.2 Operações de fresagem

Na literatura existem diversas maneiras de classificar a fresagem em várias categorias. Contudo o mais comum é classificar a fresagem consoante a operação realizada. Assim, para distinguir os diferentes tipos de operação há que se ter em consideração: a geometria da peça, a ferramenta de corte e o percurso da ferramenta em relação à peça.

Atualmente podemos considerar que existem quatro tipos de operações principais [18]:

- Facejamento
- Fresagem periférica
- Fresagem de ombro
- Fresagem de perfil

Para além das quatro operações principais, podemos enumerar um grande número de operações secundárias, sendo que se podem destacar duas:

- Fresagem de ranhuras (slot milling)
- Fresagem de caixas (pocket milling)

### 2.2.1 Facejamento

Podemos definir o facejamento como a operação de fresagem que corta superfícies perpendiculares ao eixo da ferramenta de corte. De uma forma mais simplificada o facejamento cria superfícies planas com um bom acabamento. [5]

O facejamento pode ser feito com uma ampla gama de ferramentas de corte diferentes (Figura 1), sendo que o tipo de ferramentas mais comumente utilizado neste processo são as ferramentas porta-pastilhas que, geralmente, se encontram posicionadas com um ângulo de  $45^\circ$  em relação a superfície. Contudo também são utilizadas pastilhas laterais e até redondas. Dependendo do tipo de acabamento que é pretendido e da geometria da peça, as ferramentas de fresagem de topo inteiriças também são bastantes utilizadas. [19]



Figura 1 – Facejamento [19].

Usar uma ferramenta do tipo porta-pastilhas como ferramenta de corte é a escolha mais comum, pois possibilita um acabamento de superfície mais uniforme.

O ângulo das pastilhas destas ferramentas é um parâmetro crucial quando estamos a falar de facejamento. Os porta-pastilhas podem ter ângulos de entrada baixos que rondam os  $10^\circ$ , ângulos médios no intervalo de  $25^\circ$  a  $60^\circ$  e ferramentas com  $90^\circ$  (Figura 2).

Na operação de facejamento, o ângulo das pastilhas da ferramenta vai influenciar a profundidade de corte e o avanço por dente.

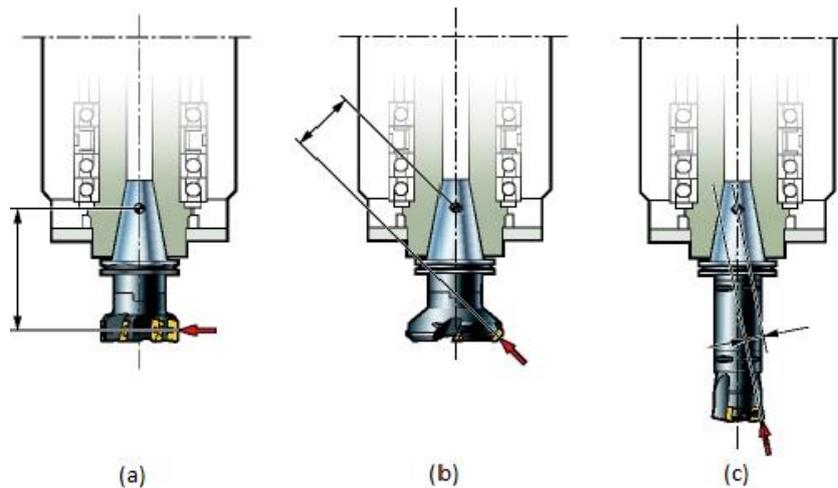


Figura 2 – Ferramentas porta-pastilhas com diferentes ângulos: (a) pastilhas com  $90^\circ$ ; (b) pastilhas com grau médio; (c) pastilhas com grau baixo (adaptado de [19]).

As ferramentas com a pastilhas de  $90^\circ$  permitem uma grande profundidade de corte, porém o avanço que a ferramenta faz em relação a peça é bastante reduzido, originando aparas mais grossas. Uma grande vantagem deste tipo de ferramentas é que produz forças axiais relativamente baixas, quando comparadas a outras ferramentas. O que favorece a utilização destas na maquinação de paredes finas.

Contrariamente ao caso anterior, as ferramentas com pastilhas de corte com ângulo baixo permitem um aumento dramático no avanço, devido ao afinamento de aparas quando a profundidade de corte é menor.

As ferramentas com pastilhas de ângulo médio são as mais utilizadas no facejamento. O ângulo destas pastilhas varia entre  $25^\circ$  e  $60^\circ$ , sendo que o mais comum é um ângulo de  $45^\circ$ . Geralmente este tipo de ferramentas é a primeira escolha em operações de facejamento, uma vez que conseguem manter um bom avanço por dente e uma profundidade de corte bastante aceitável. A escolha destas ferramentas é considerada a escolha mais segura, conseguindo bons resultados na grande maioria das situações. [5]

Ferramentas de corte com pastilhas redondas são bastante versáteis. Estas abrangem uma larga gama tanto de profundidade como de corte e de avanço por dente. Podendo assim trabalhar com grande profundidade de corte e pouco avanço por dente ou vice-versa. As pastilhas redondas são mais usadas em ligas resistentes ao calor, visto que o calor gerado por estas pastilhas é maior. O facejamento feito por estas ferramentas de corte deixa geralmente marcas de maquinação visíveis (Figura 3).



Figura 3 – Ferramenta porta-pastilhas com pastilhas redondas e marcas de maquinação (adaptado de [19]).

As ferramentas de fresagem de topo (Figura 4) ao contrário das porta-pastilhas não possuem pastilhas, sendo toda ela uma peça inteiriça. Estas ferramentas são aquelas que tem dentes de corte tanto nas superfícies laterais como na extremidade. Podemos encontrar este tipo de ferramentas com topo plano ou topo arredondado. Este tipo de ferramentas são as mais usadas em fresagem, isso deve-se principalmente ao facto da sua versatilidade, abrangendo grande parte das operações de fresagem, entre as quais o facejamento.



Figura 4 – Ferramentas fresagem de topo [20].

Por vezes não é economicamente viável adquirir uma ferramenta de corte específica para o facejamento. Então uma ferramenta de corte que possa executar todas ou quase todas as operações de maquinagem torna-se uma solução bastante atrativa. Outro motivo pelo qual este tipo de ferramentas é utilizado no facejamento, é o facto de que estas geralmente têm um diâmetro menor, o que facilita o facejamento em áreas mais pequenas ou de difícil acesso.

De um modo geral apenas ferramentas de topo com extremidades planas são usadas para o facejamento. Superfícies facejadas por estas estas ferramentas podem ser bastantes

lisas, mas ainda assim é possível observar marcas da maquinação na peça (Figura 5), deixando um padrão visível, dependendo da trajetória da ferramenta. [5]

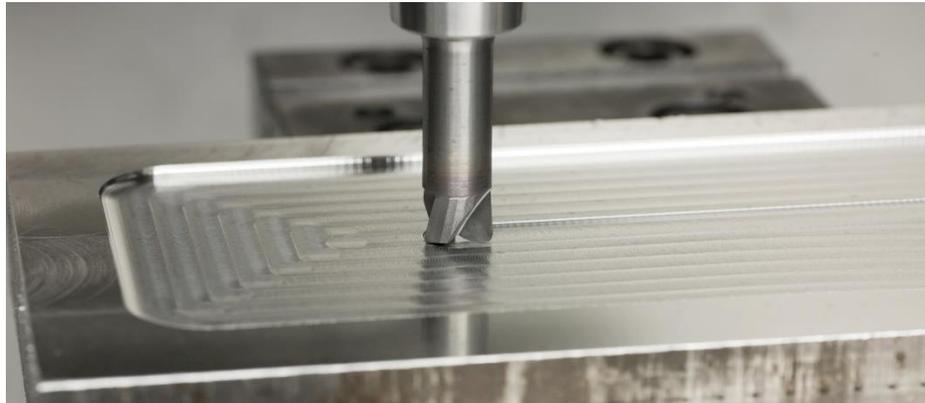


Figura 5 - Marcas de maquinação de uma superfície maquinada por uma ferramenta de fresagem de topo inteiraça [21].

### 2.2.2 Fresagem periférica

A fresagem periférica (Figura 6) é a operação de fresagem em o eixo da ferramenta de corte está em paralelo à peça maquinada. Assim sendo, apenas a parte lateral da ferramenta de corte remove material da peça maquinada. Estando, desta forma, a ferramenta e a peça sujeitas a grandes forças radiais. [22]



Figura 6 – Fresagem periférica [23].

A ferramenta de corte utilizada na maior parte dos casos de fresagem periférica é a fresa de topo inteiraça, no entanto a ferramentas do tipo porta-pastilhas de passo repetido também são utilizadas. [5]

### 2.2.3 Fresagem de ombro

A fresagem de ombro é a operação de fresagem em que a ferramenta de corte trabalha simultaneamente na extremidade e na lateral. Assim, são criadas duas faces na peça trabalhada, uma paralela e outra na perpendicular ao eixo da ferramenta. Além de trabalhar duas faces ao mesmo tempo, a fresagem de ombro tem como objetivo criar uma quina de 90° entre as duas faces trabalhadas. [18]

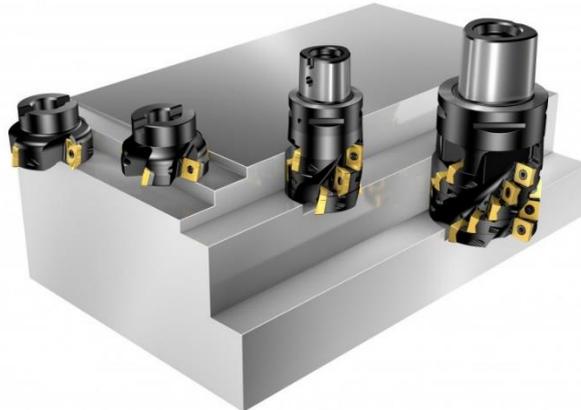


Figura 7 – Fresagem de ombro [24].

A fresagem de ombro pode ser dividida em duas subcategorias dependendo da profundidade do corte, a fresagem de ombro raso e a fresagem de ombro profundo.

A fresagem de ombro raso (Figura 8), tal como o nome indica, é a operação fresagem de ombro em baixa profundidade. Porém, esta operação permite um maior corte radial. Esta operação é muitas vezes executada pelas mesmas ferramentas porta-pastilhas destinadas ao facejamento, visto que de uma forma geral, a pressão axial é relativamente baixa quando comparada à pressão radial neste tipo de operações. Contudo ferramentas de fresagem de topo inteiriças também são usadas especialmente quando a acessibilidade é reduzida. [24]



Figura 8 – Fresagem de ombro raso feito por ferramentas de faceamento [24].

A fresagem de ombro profundo permite cortes mais fundos e com menor diâmetro (Figura 9). As ferramentas mais usadas nesta operação são as porta-pastilhas de passe repetido. No entanto, as ferramentas de fresagem de topo inteiriças também são bastante utilizadas para este fim.



Figura 9 – Fresagem de ombro profundo feito por ferramenta porta-pastilhas de passo repetido [24].

#### 2.2.4 Fresagem de perfil

As operações de fresagem anteriores, facejamento, fresagem periférica e a fresagem de ombro, permitem-nos criar superfícies perpendiculares e paralelas em relação à ferramenta de corte. Com apenas estes três processos é possível criar peças com alguma complexidade geométrica em duas dimensões, podendo até criar concavidades em relação aos eixos x e y. Contudo, com apenas estas duas operações não é possível criar peças de maior complexidade em três dimensões, como por exemplo concavidades em relação aos três eixos.

Para criar peças mais complexas e côncavas em três dimensões recorre-se à operação de fresagem de perfil (Figura 10), também conhecida como fresagem de superfície esculpida ou fresagem copiadora. [5] [25]

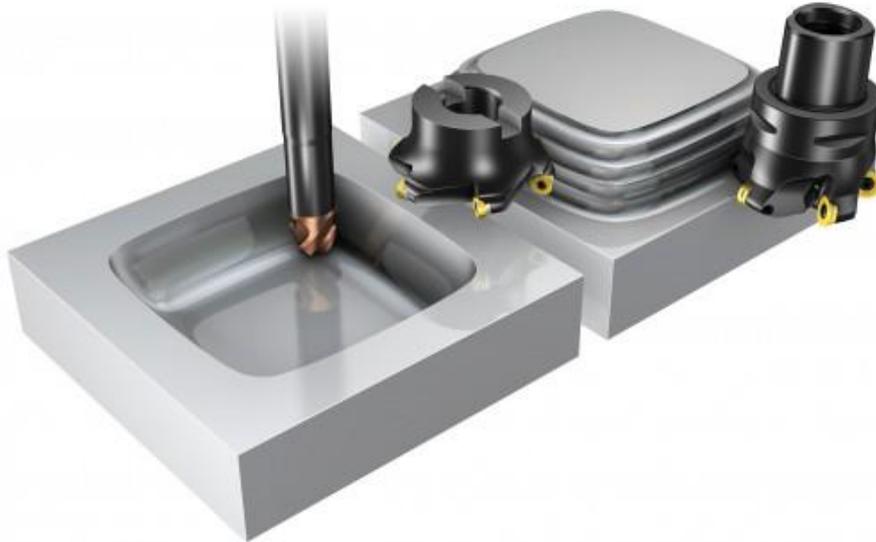


Figura 10 - Fresagem de perfil [25].

Geralmente as operações apresentadas até agora são feitas em uma ou duas etapas:

- Desbaste
- Acabamento

No desbaste, a ferramenta e os parâmetros de corte são escolhidos com o fim de uma maior remoção de material em menos tempo (conhecido como taxa de material removido ou MMR), enquanto no acabamento, a ferramenta e os parâmetros priorizam a rugosidade da superfície. Quando a operação de fresagem é feita numa única etapa, a escolha da ferramenta e dos parâmetros de maquinagem devem equilibrar a rugosidade com a taxa de material removido, dependendo do que é exigido no produto final.

Já a operação fresagem de perfil é feita normalmente em duas ou mais etapas entre as quais:

- Desbaste
- Semi-acabamento
- Acabamento
- Super-acabamento

Além de mais etapas (Figura 11), a fresagem de perfil é a operação que faz melhor uso delas, pois, além de alternar entre uma maior taxa de material removido e uma menor rugosidade vai-se aproximando da forma desejada através das várias etapas. [25]

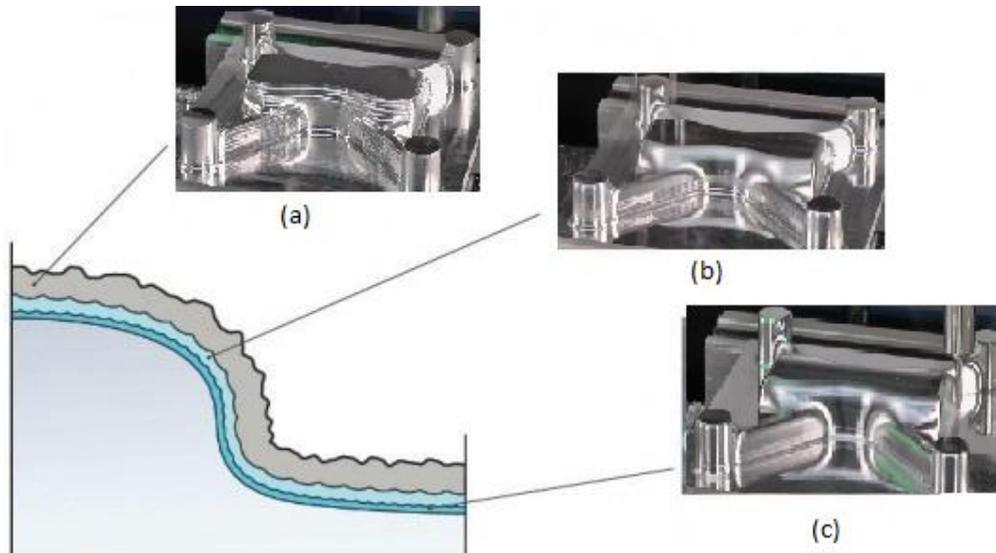


Figura 11 – Camadas de uma peça produzida através de fresagem de perfil nas diferentes etapas, (a) desbaste, (b) semi-acabamento, (c) acabamento (adaptado de [25] [26]).

Na fase de desbaste, a ferramenta de corte vai contornando o bloco de material a trabalhar na forma da peça desejada, mantendo o eixo z enquanto percorre o perímetro da peça. Esse processo repete-se em diferentes valores do eixo z, até chegar a uma forma com vários degraus, que se assemelha a socacos numa montanha (Figura 12) (b). Nesta fase podem ser utilizadas ferramentas porta-pastilhas com pastilhas de vários feitios e ferramentas de topo inteiriças de fundo plano e arredondado. Porém, o mais usado no desbaste são as porta-pastilhas de pastilhas redondas. [5]

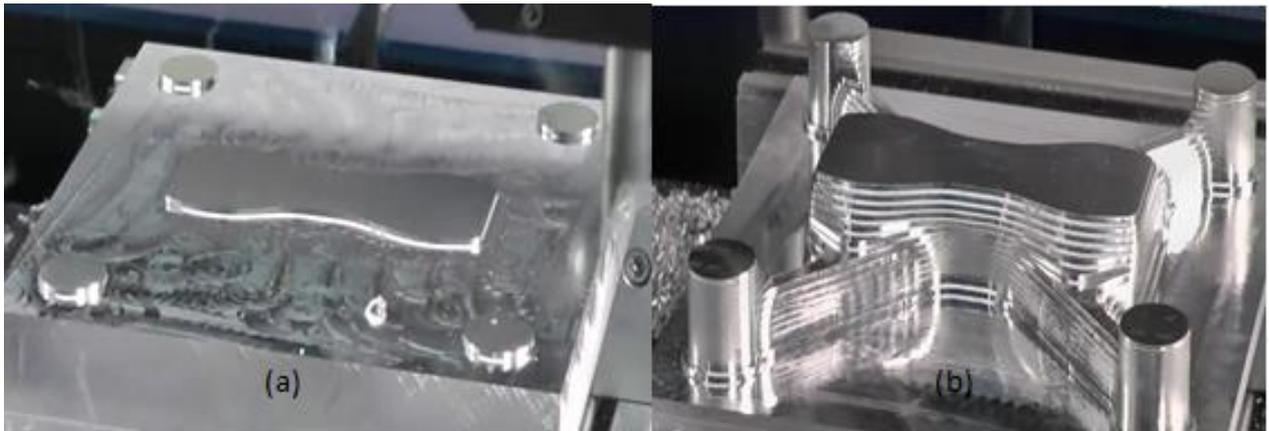


Figura 12 - Peça produzida através de fresagem de perfil, (a) início do desbaste, (b) final do desbaste (adaptado de [26]).

Na fase de semi-acabamento, a ferramenta de corte vai percorrer uma trajetória similar a fase anterior, no entanto, desta vez os níveis do eixo z vão ser níveis intermédios em relação aos níveis da etapa anterior. Cortando cada um dos degraus anteriores em dois degraus mais pequenos (Figura 13). As ferramentas de corte usadas no semi-acabamento são do tipo porta-pastilhas redondas ou ferramentas de topo inteiriças.

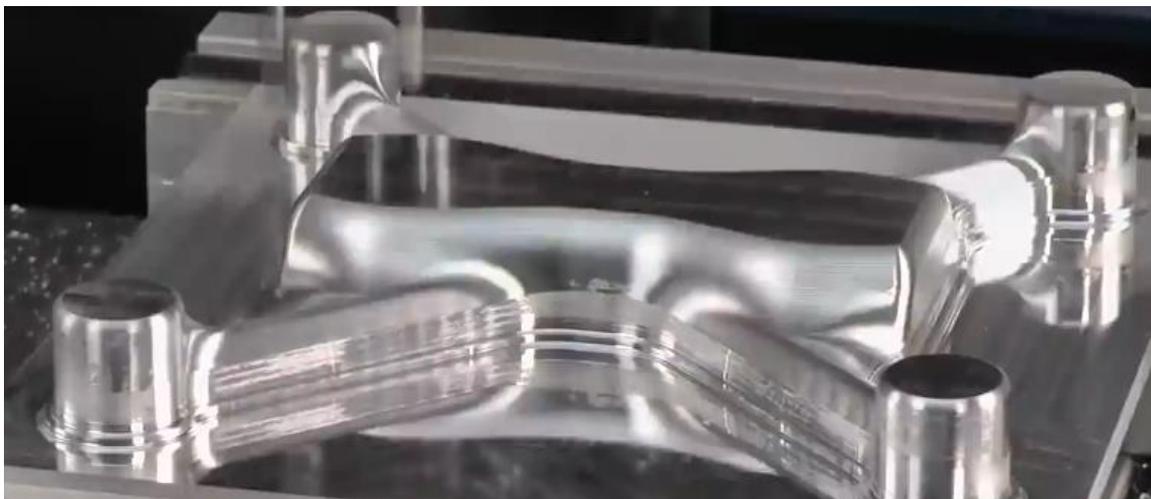


Figura 13 - Peça produzida através de fresagem de perfil no fim da etapa de semi-acabamento (adaptado de [26]).

Nas fases de acabamento e super-acabamento os parâmetros de corte são otimizados para uma menor rugosidade de superfície (Figura 14). No acabamento é muito comum mover os três eixos simultaneamente, sendo frequentemente executado com máquinas de 4 ou 5 eixos. As ferramentas mais comuns nesta fase da fresagem perfil são as ferramentas de topo inteiriças de ponta arredondada.

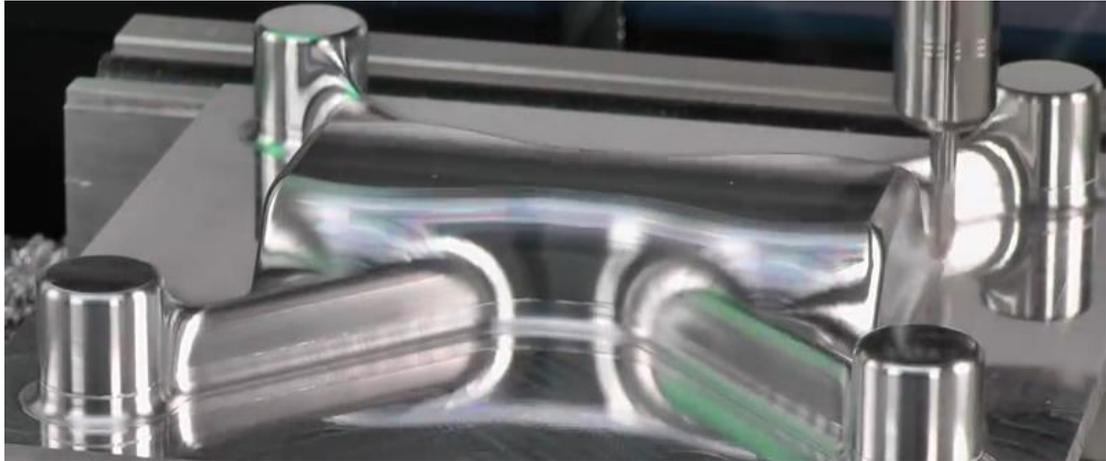


Figura 14 - Peça produzida através de fresagem de perfil no fim da etapa de acabamento (adaptado de [26]).

### 2.2.5 Fresagem de caixas

Fresagem de caixas permite criar uma cavidade numa superfície sólida. Dentro desta operação há várias estratégias para o fazer como mostra a Figura 15. [27]

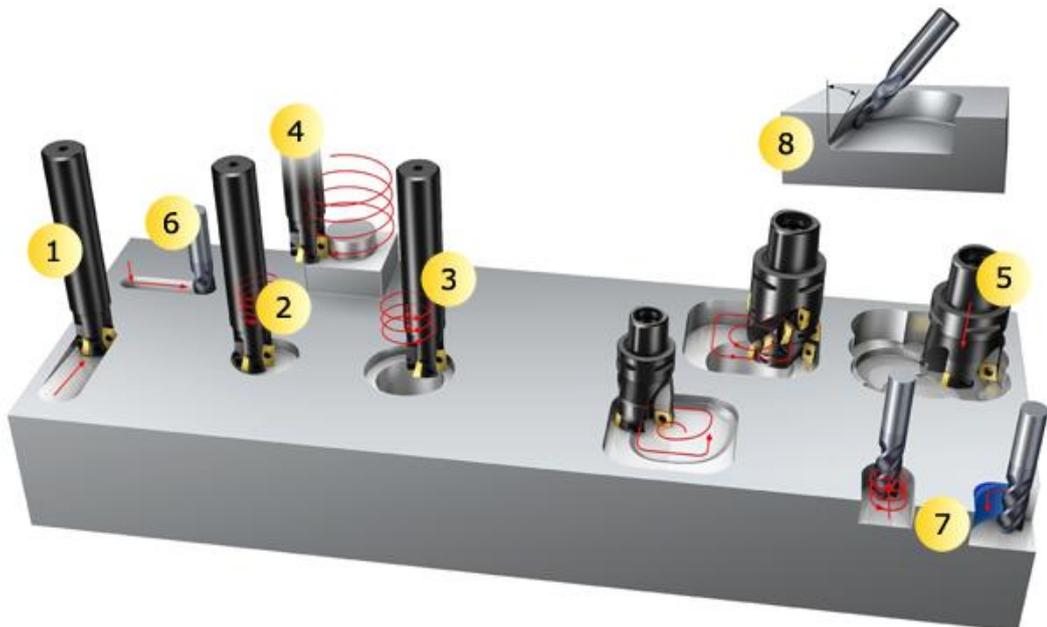


Figura 15 - Estratégias de criação de caixas [27].

1. Rampa linear – a abertura da cavidade é feita de forma linear, em que há avanço de dois eixos sendo que um deles é o eixo z.
2. Rampa circular – A abertura da cavidade é feita pelo avanço dos três eixos simultaneamente. Esta estratégia é mais indicada para furos de maior diâmetro. Porém, não é economicamente viável para grandes séries de furos.
3. Alargamento do furo – esta estratégia consiste em criar uma cavidade a partir de uma cavidade de diâmetro menor, permitindo criar grandes cavidades sem submeter a ferramenta de corte a grandes esforços, porém com uma baixa taxa de remoção de material.
4. Fresagem helicoidal externa – esta estratégia é muito similar à fresagem de perfil. Removendo material em torno de uma secção, avançando com os 3 eixos simultaneamente.
5. Fresagem de mergulho – esta estratégia consiste em mergulhar várias vezes a ferramenta de corte perpendicularmente em relação a peça de trabalho até criar uma cavidade de área maior.
6. Fresagem pica-pau– esta estratégia consiste em mergulhar a ferramenta de corte perpendicularmente em relação à peça de trabalho e de seguida avançar na direção paralela.
7. Métodos de fatiamento – esta estratégia é semelhante à fresagem de ombro. A ferramenta de corte avança paralelamente em relação à peça de trabalho, retirando fatias de material até criar a forma desejada.
8. Caixas fechadas com paredes inclinadas – só é possível criar esta estratégia em centros de maquinagem com quatro ou cinco eixos. Esta estratégia permite alcançar formas que não eram possíveis com as estratégias anteriores.

### 2.2.6 Fresagem de ranhura

Tal como o nome indica, o objetivo da fresagem de ranhura é criar uma ranhura ou entalhe no material trabalhado. Esta operação na maioria das situações é feita através de ferramentas porta-pastilhas de disco específicas para o efeito (Figura 16 b). Sendo também utilizadas ferramentas de fresagem de topo nesta operação (Figura 16 a). [28]



Figura 16 – Fresagem de ranhura, (a) ferramentas de fresagem de topo, (b) fresa de disco (alterado de [28]).

## 2.3 Parâmetros de corte

Os quatro parâmetros principais de corte durante a fresagem são [5]:

- Velocidade de rotação,  $n$
- Avanço,  $f$
- Profundidade de Corte,  $a_p$
- Largura de Corte,  $a_e$

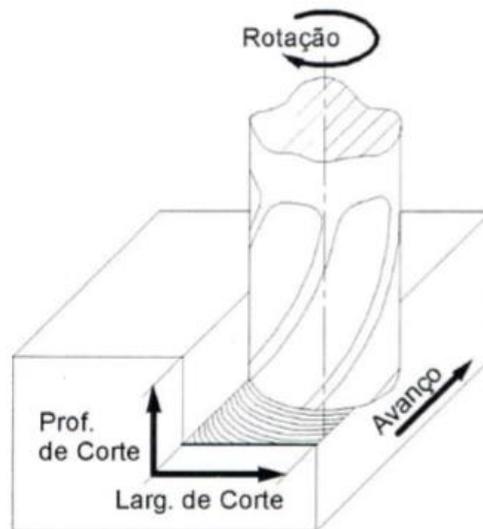


Figura 17 – Representação dos parâmetros de corte [2].

### 2.3.1 Velocidade de rotação

Ao falar sobre parâmetros de corte, é necessário reconhecer a diferença entre velocidade de rotação ( $n$ ) e velocidade de corte ( $V_c$ ). A velocidade de rotação corresponde a velocidade angular da ferramenta de corte, em rotações por minuto (rpm). Já a velocidade de corte corresponde à velocidade linear de um ponto na periferia da

ferramenta e normalmente expressa-se em metros por minuto [m/min]. Podemos relacionar a velocidade de rotação com a velocidade de corte através da equação (1). [5] [22]

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

Onde:

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

A velocidade de rotação é mais fácil de controlar, visto que a maioria das fresadoras usam esse parâmetro. Contudo, a maior parte dos catálogos de ferramentas de corte utiliza a velocidade de corte (Figura 18). Logo, saber relacionar a velocidade de rotação com a velocidade de corte através da equação (1) é essencial para um domínio dos parâmetros de corte.

Para selecionar uma velocidade de rotação adequada deve-se ter em conta as recomendações do fabricante da ferramenta. Caso o valor deste parâmetro exceda o limite recomendado, pode causar encurtamento à vida útil da ferramenta. [12]

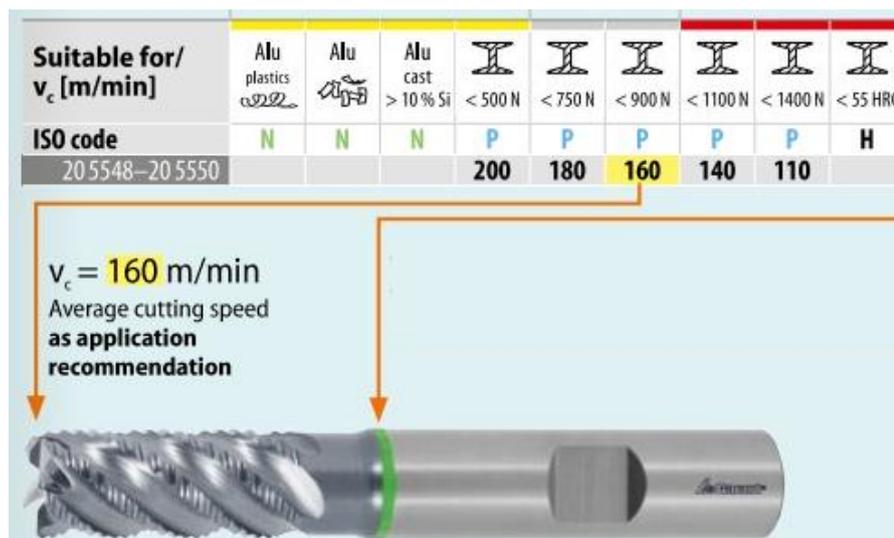


Figura 18 – Valores da velocidade de corte ( $V_c$ ) recomendados no catálogo de ferramentas da fabricante GARANT (alterado de [29]).

### 2.3.2 Avanço

Podemos avaliar o avanço por duas perspectivas diferentes:

- Avanço por gume ( $f_z$ ) [mm/z/rot]
- Velocidade de avanço ( $f$ ) [mm/min]

O Avanço por gume ( $f_z$ ) representa o avanço feito por cada dente numa rotação completa.

A velocidade de avanço representa o avanço em relação ao tempo. Ou seja, a velocidade com que a ferramenta de corte avança sobre a peça de trabalho. Como se pode ver através da equação (2), os fatores que influenciam a velocidade de avanço são: a velocidade de rotação, o número de dentes da ferramenta e o avanço feito por cada dente. [22] [5]

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

Onde:

- $f$ : Velocidade de avanço [mm/min]
- $n$ : Velocidade de rotação [rpm]
- $f_z$ : Avanço por gume [mm/z/rot]
- $z$ : Número de dentes da ferramenta

Juntamente com a velocidade de rotação, o avanço é um parâmetro crucial para a vida útil da ferramenta. Quando este parâmetro é mal selecionado pode causar grande prejuízo económico. Para selecionar uma velocidade de avanço adequada ao material e ao tipo de corte, o operador deve consultar o catálogo da ferramenta utilizada. Através do catálogo deve-se identificar o avanço por dente ( $f_z$ ) que o fabricante recomenda (Figura 19). Com o avanço por dente e através da equação (2) é selecionada a velocidade de avanço ( $f$ ). [5]

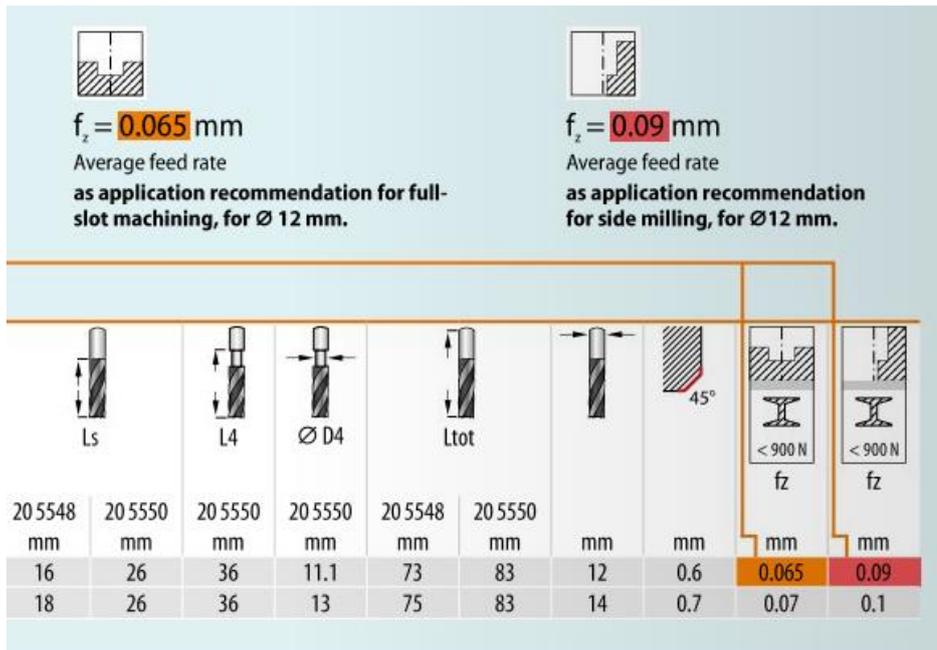


Figura 19 - Recomendações do avanço por dente ( $f_z$ ) do catálogo de ferramentas do fabricante GARANT (alterado de [29]).

### 2.3.3 Profundidade de corte e largura de corte

A profundidade de corte ( $a_p$ ) e a largura de corte ( $a_e$ ) correspondem ao penetramento em [mm]. Os limites máximos destes parâmetros em função do tipo de corte devem ser consultados no catálogo do fabricante (Figura 20). [5]

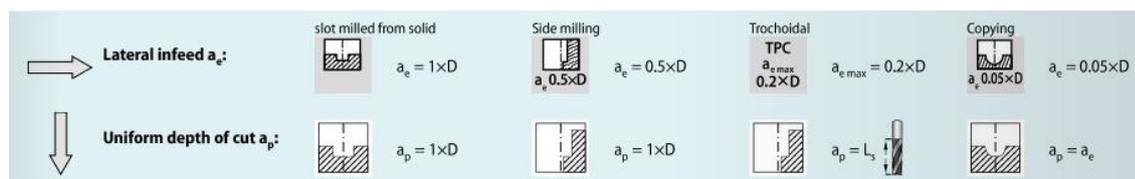


Figura 20 - Limites máximos de profundidade de corte ( $a_p$ ) a largura de corte ( $a_e$ ) em [mm] em relação ao diâmetro (D), do catálogo de ferramentas do fabricante GARANT [29].

## 2.4 Rugosidade da Superfície

A rugosidade é o conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências e concavidade que caracterizam uma superfície.

A rugosidade de superfície é um fator importante para avaliar a qualidade da peça maquinada. Superfícies de rugosidade inapropriada têm sido apontadas como a principal causa de grandes acidentes. Isso deve-se principalmente à grande influência no desempenho das peças no que se refere a:

- Qualidade de deslizamento
- Resistência ao desgaste
- Qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras
- Resistência à corrosão e à fadiga
- Aparência
- Reflexão de luz
- Transferência de calor
- Lubrificação
- Condutividade elétrica

Para além do impacto na qualidade de superfície, a rugosidade também tem um grande impacto no custo de produção da peça pois quanto melhor for o acabamento, maior será o custo de produção da peça. Por isso é tão importante que cada peça tenha um nível de acabamento adequado para para a sua função. [6]

Como podemos ver na Figura 21, a rugosidade de superfície de peças maquinadas depende de vários parâmetros. Contudo os parâmetros que mais influenciam, e por consequência os mais estudados também, são os parâmetros descritos na subsecção 2.3.

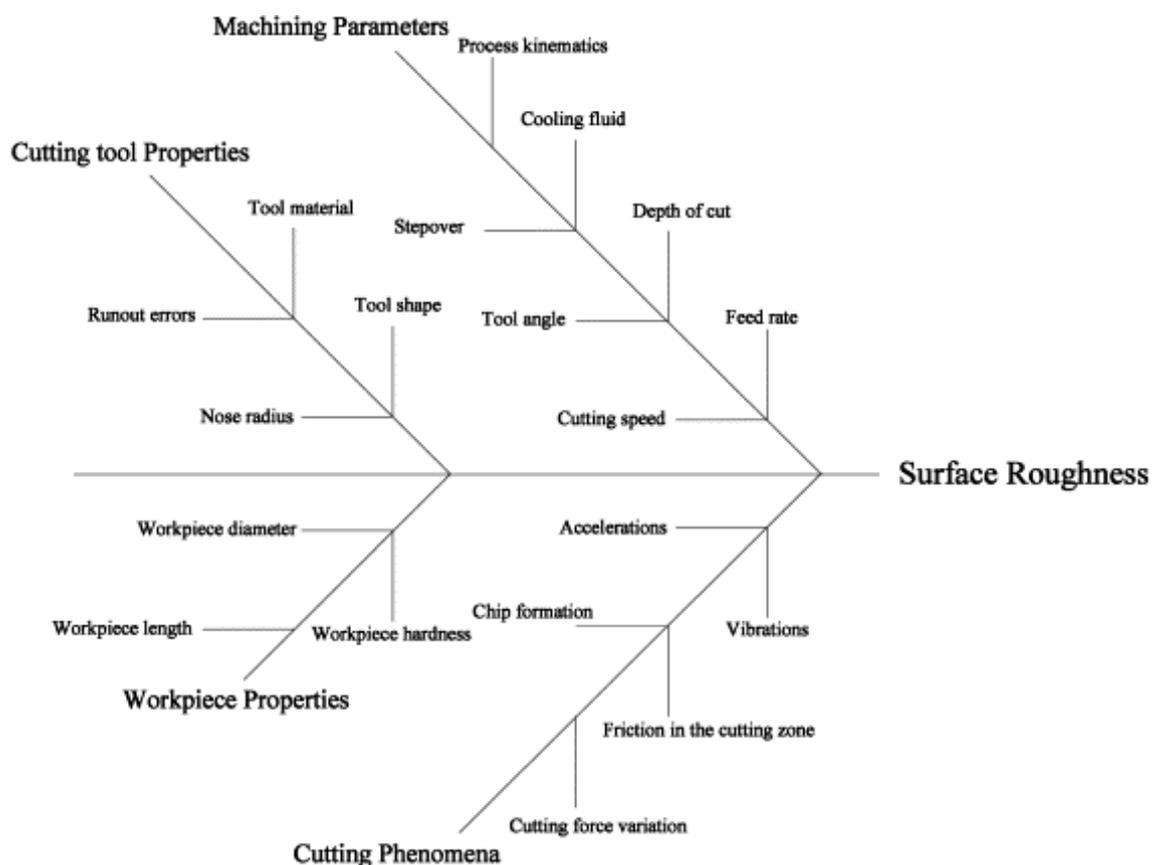


Figura 21 – Diagrama espinha de peixe que mostra os parâmetros que afetam a rugosidade de superfície [30].

A rugosidade pode ser avaliada por vários parâmetros diferentes. Mas o parâmetro mais usado pela indústria e consequentemente por este tipo de estudos é a rugosidade média ( $R_a$ ).

Através da Figura 22 e da equação (3), podemos observar que a rugosidade média resulta da média aritmética dos valores ( $y_i$ ), em relação à linha média do perfil de rugosidade ao longo do percurso ( $l_m$ ). [31]

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (3)$$

Onde:

- $R_a$ : rugosidade média
- $n$ : número de pontos da amostra
- $y_i$ : desvios do perfil de rugosidade

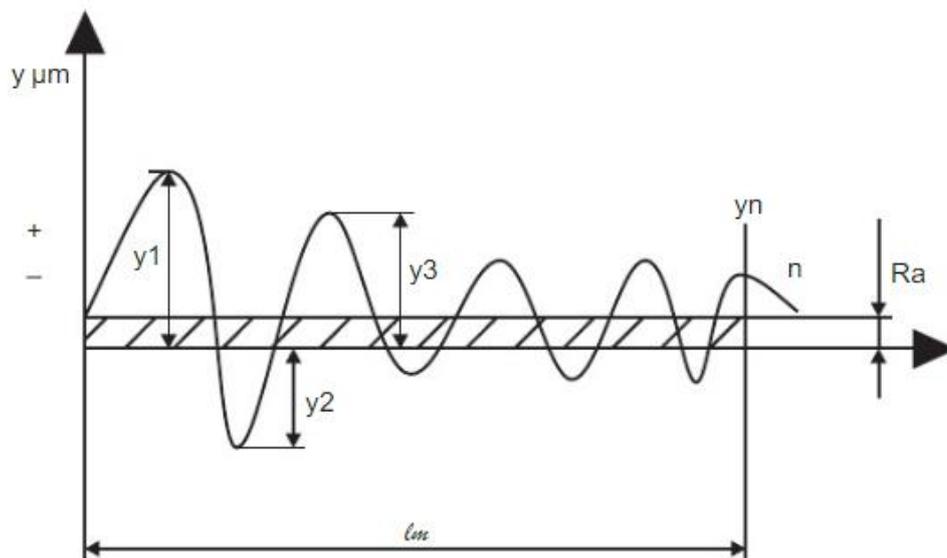


Figura 22 - Rugosidade média ( $R_a$ ) [31].

## 2.5 Taxa de remoção de material

A taxa de remoção de material ou MMR (*Material Removal Rate*), tal como o nome indica, permite calcular o volume de matéria removido em relação ao tempo. Esta grandeza pode ser calculada de várias maneiras, mas como estamos a falar de um procedimento prático, o MMR é calculado através de da equação (4). [4]

$$MMR = \frac{w_i - w_f}{\rho \times T} \quad (4)$$

Onde:

- $MMR$ : Taxa de remoção de material [cm<sup>3</sup>/min]
- $w_i$ : Massa inicial da peça de trabalho [g]
- $w_f$ : Massa final da peça de trabalho [g]
- $\rho$ : Massa volúmica do material [g/cm<sup>3</sup>]
- $T$ : Tempo de maquinagem [min]

## 2.6 Método de Taguchi

O método de Taguchi foi desenvolvido pelo engenheiro e estatístico japonês Genichi Taguchi. Este método tem como objetivo melhorar a qualidade dos produtos fabricados. Mais recentemente, este método também tem sido aplicado em áreas como a biotecnologia, o marketing e a publicidade. Os avanços de Taguchi tiveram o seu primeiro grande impacto na indústria japonesa, logo após a segunda guerra mundial, onde Taguchi revolucionou os processos de fabricação no Japão por meio de economia de custos.

A maioria dos métodos de controlo de qualidade são on-line, isto é, todos os produtos são inspecionados na linha de produção. Já o método de Taguchi é um método off-line no qual, a qualidade de um produto não é inspecionada, mas sim projetada e antecipada, recorrendo a uma pequena amostra proveniente de uma fase experimental. O método de Taguchi pode ser aplicado antes do fabrico propriamente dito.

Para antecipar a qualidade do produto na linha de produção, Taguchi propôs que se estudasse a relação funcional entre os *inputs* e os *outputs*, isto é, estudar os diferentes parâmetros de fabricação em diferentes níveis e qual a relação que esses parâmetros (*input*) teriam na qualidade do produto final (*output*).

Porém, prever a qualidade de um produto não é assim tão simples. Principalmente pelo facto de que há muitos fatores externos não controláveis, que podem influenciar a qualidade do produto final. Esses fatores externos podem ser a temperatura, a humidade ambiente, o desgaste da ferramenta, as variações dimensionais, entre outros.

Aos fatores controláveis chamamos de variáveis controláveis. Já aos fatores não controláveis chamamos de ruído ou perturbação. [32] [33]

Na figura seguinte (Figura 23) podemos ver o esquema que representa o sistema segundo Taguchi:

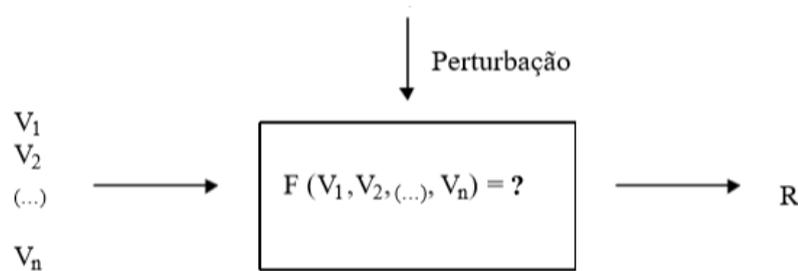


Figura 23 - Esquema representativo do processo de controle com a influência de ruído [33].

Onde:

- $V_i$  – Variáveis controláveis, de ordem  $i$
- $R$  – Resposta (qualidade do produto)
- Perturbação – variáveis não controláveis (ruídos)

Para o estudo ter em conta as variáveis não controláveis Taguchi recomenda que os testes sejam repetidos pelo menos uma vez, de preferência em condições bem diferentes. Isso, para que haja alterações nas variações não controláveis.

Para que as variações não controláveis sejam tomadas em conta, Taguchi propõe que a resposta (qualidade do produto) seja dada em quociente  $S/N$  (sinal para ruído, do inglês *signal to noise*). Quanto maior a relação  $S/N$  melhor é o resultado.

Existem três tipos diferentes de quociente S/N conforme o objetivo da resposta:

- **Nominal é melhor**

$$S/N_t = 10 * \log \left( \frac{\bar{y}^2}{s_y^2} \right) \quad (5)$$

O objetivo da função  $S/N_t$  é reduzir a variabilidade em torno de um alvo específico.

- **Maior é melhor**

$$S/N_L = -10 * \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (6)$$

O objetivo da função  $S/N_L$  é encontrar o maior valor possível.

- **Menor é melhor**

$$S/N_S = -10 * \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (7)$$

O objetivo da função  $S/N_S$  é encontrar o menor valor possível.

Onde:

- $\bar{y}^2$  – Média dos dados observados
- $s_y^2$  – Variância de y
- $n$  - Número de observações
- $y_i$  – Dados observados

O método do Taguchi baseia-se na técnica DOE (do inglês “*design of experiments*”) desenvolvida nos anos 20 por Fisher. Esta técnica, tal como o método de Taguchi, tem como objetivo encontrar uma relação funcional entre os diferentes parâmetros de entrada (*input*) e a qualidade do produto final (*output*) [34].

Segundo a técnica tradicional DOE o número de ensaios é dado pela equação (8).

$$N = L^P \quad (8)$$

Onde:

- $N$ : número de ensaios.
- $L$ : número de níveis.
- $P$ : número de parâmetros.

Uma das principais críticas feitas por Taguchi em relação à técnica DOE, é o elevado número de ensaios necessários. Taguchi defendia que apenas uma parte desse número de ensaios apresenta informação relevante e o restante dos ensaios produzia informações redundantes. fazendo com que os testes fossem mais dispendiosos do que o necessário.

Então, para colmatar essa falha, no método de Taguchi é utilizada uma Matriz ortogonal de Taguchi para escolher as diferentes combinações de parâmetros  $P$  e os diferentes níveis  $L$  desses parâmetros o que resulta num menor número de ensaios e consequentemente numa redução de custos experimentais.

Se tomarmos o exemplo de uma situação em que há quatro parâmetros para ser testados ( $P=4$ ) em cinco níveis diferentes ( $L=5$ ), pela técnica tradicional de DOE que utiliza uma matriz fatorial completa, o número de ensaios segundo a equação (8) seria de  $5^4 = 625$ , o que pode ser bastante dispendioso.

Para estas condições ( $P=4$  e  $L=5$ ), se usarmos o método de Taguchi e consequentemente uma matriz ortogonal de Taguchi, podemos consultar a Tabela 1 para saber que apenas 25 ensaios são suficientes através de uma matriz L25.

Para saber qual a matriz ortogonal de Taguchi, podemos consultar a tabela seguinte:

Tabela 1 - Seletor de arranjo ortogonal [1].

		Número de parâmetros (P)								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Número de níveis (L)	2	L4	L4	L8	L8	L8	L8	L12	L12	L12
	3	L9	L9	L9	L18	L18	L18	L18	L27	L27
	4	L16	L16	L16	L16	L32	L32	L32	L32	L32
	5	L25	L25	L25	L25	L25	L50	L50	L50	L50

A matriz ortogonal de Taguchi L25 para as quatro parâmetros e cinco níveis ( $P=4$ ;  $L=5$ ) pode ser vista na Tabela 2. Esta tabela mostra níveis de parâmetros que seriam testados para cada um dos 25 ensaios:

Tabela 2 - Matriz ortogonal de Taguchi L25 P=4 L=5 [2].

Número de ensaio	Parâmetro (a)	Parâmetro (b)	Parâmetro (c)	Parâmetro (d)
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	1	4	4	4
5	1	5	5	5
6	2	1	2	3
7	2	2	3	4
8	2	3	4	5
9	2	4	5	1
10	2	5	1	2
11	3	1	3	5
12	3	2	4	1
13	3	3	5	2
14	3	4	1	3
15	3	5	2	4
16	4	1	4	2
17	4	2	5	3
18	4	3	1	4
19	4	4	2	5
20	4	5	3	1
21	5	1	5	4
22	5	2	1	5
23	5	3	2	1
24	5	4	3	2
25	5	5	4	3

Como podemos ver na Tabela 2, nos primeiros cinco ensaios o parâmetro (a) está no nível 1 e o parâmetro (b) é testado em todos os níveis (1, 2, 3, 4 e 5), a mesma coisa acontece com os parâmetros (c) e (d). Isto também se repete quando o parâmetro (a) está nos outros níveis (2, 3, 4 e 5). O mesmo vale com todos os outros parâmetros (b), (c) e (d).



# Capítulo 3 – Ensaios experimentais

## 3.1 Materiais e ferramentas

O material escolhido para este estudo é a liga de alumínio comercial HOKOTOL®. O nome HOKOTOL® é o nome comercial dado a uma liga de alumínio modificada rica em zinco, da série AL7050. Este material tem características semelhantes à liga da série AL7075 e foi desenvolvida com o propósito de ser implementada na indústria aeronáutica pois, tal como o seu concorrente AL7075, é uma liga de alumínio leve e de alta resistência. O HOKOTOL® tem facilidade para ser maquinado, o que é um dos fatores que fazem com que este material seja muito usado hoje em dia na indústria de moldes.

A composição química do HOKOTOL® está representada na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química HOKOTOL (% peso) [3].

Elementos	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr	Ti	Al
Mínimo	-	-	1,5	-	1,8	-	5,7	0,08	-	-
Máximo	0,3	0,35	2,6	0,1	2,6	0,05	7,6	0,25	0,06	Resto

As dimensões originais do bloco de alumínio HOKOTOL® utilizado são de: 250 x 250 x 100 mm.



Figura 24 - Bloco de alumínio HOKOTOL® utilizado para a produção do provete.

Os ensaios experimentais foram feitos no Laboratório de Fabricação da Universidade da Beira interior FabLab|UBI, um laboratório integrado na unidade de investigação C-MAST (Centre for Aerospace Science and Technologies).

O equipamento utilizado para as operações de fresagem foi o centro de maquinagem vertical CNC, modelo CV-1000 da marca Litz (Figura 25). Trata-se de um modelo com 3+2 eixos, que está equipado com um controlador Mitsubishi M70. A velocidade de rotação máxima da árvore é de 12000 rpm e a velocidade de avanço que pode atingir os 10000 mm/min.



Figura 25 - Centro de maquinagem vertical CNC Litz CV-1000.

Devido às dimensões da peça, não foi possível efetuar a fixação por prensa mecânica, então optou-se pela abertura de rasgos laterais e utilização de grampos de fixação (Figura 26).

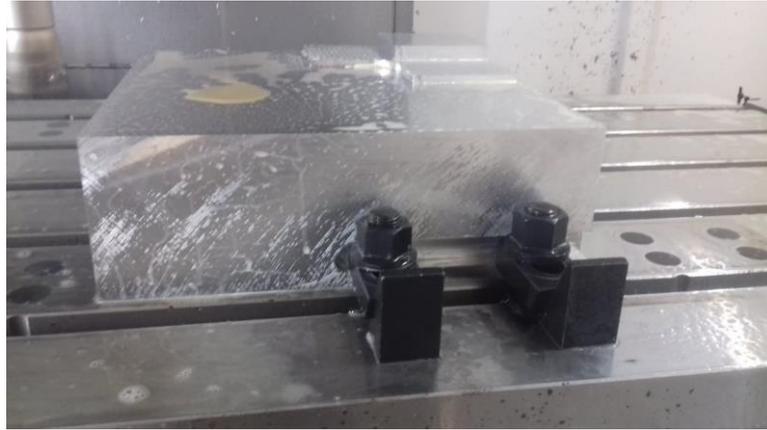


Figura 26 - Fixação do bloco de alumínio através de grampos.

A medição da rugosidade foi feita através do rugosímetro HOMMEL TESTER T1000 (Figura 27).

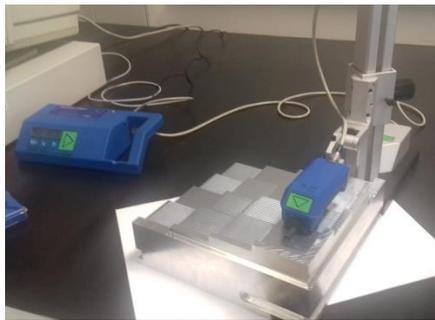


Figura 27 - Rugosímetro HOMMEL TESTER T1000.

Para selecionar a ferramenta de corte que iria ser utilizada, foi feita uma consulta no catálogo da empresa GARANT [29]. Tendo em conta o material, o tipo de corte e a geometria, a ferramenta de corte selecionada foi a ferramenta de fresagem de topo inteiraça 202270 (Figura 28). Esta ferramenta MTC (*Multi Task Cutting*) de extremidade plana possui 3 gumes, 12 mm de diâmetro e um revestimento do tipo DLC sp<sup>2</sup>.



Figura 28 - Ferramenta de fresagem Garant 202270 [29].

Para a pré-maquinagem foi utilizada uma ferramenta do tipo porta-pastilhas (Figura 29), própria para o desbaste.



Figura 29 - Ferramenta do tipo porta-pastilhas utilizada na pré-maquinagem.

Para a produção do provete os softwares CAM e CAD utilizados foram o ESPRIT 2017 e SOLIDWORKS 2018, respetivamente. As licenças de ambos os softwares foram cedidas pela UBI.

### 3.2 Matrizes para o ensaio experimental

Antes de projetar o provete do ensaio experimental, é necessário contruir a matriz ortogonal de Taguchi, que será a base do provete. Para tal é necessário selecionar as variáveis controláveis  $P$  e os níveis dessas variáveis  $L$ .

O objetivo dos ensaios experimentais é testar o efeito dos parâmetros de corte na qualidade do produto final. Recorre se mais uma vez, aos parâmetros mais estudados e referidos na secção 2.3:

- Velocidade de rotação,  $n$
- Avanço por gume,  $f_z$
- Profundidade de Corte,  $a_p$
- Largura de Corte,  $a_e$

Então, estes quatro parâmetros foram definidos como as nossas variáveis controláveis. Assim sendo, para o nosso caso de estudo a matriz ortogonal de Taguchi tem quatro variáveis controláveis,  $P=4$ .

Com base nessa mesma literatura [4] [6] [10] [11] [12] observou-se que o número de níveis  $L$  normalmente varia entre dois e cinco. Dentro deste intervalo foi decidido que cada parâmetro iria ser testado em quatro níveis diferentes,  $L=4$ .

Caso este trabalho tivesse como base o DOE tradicional e utilizando uma matriz fatorial completa nestas condições ( $P=4$  e  $L=4$ ) de acordo com a equação (8) iriam ser feitos duzentos e cinquenta e seis ensaios.

Como o método utilizado foi o de Taguchi, utilizou-se uma Matriz ortogonal de Taguchi. Recorrendo a Tabela 1 da secção 2.6 nas condições  $P=4$  e  $L=4$ , observou-se que a matriz indicada era uma matriz do tipo L16, ou seja, irão ser feitos dezasseis ensaios.

Porém, tal como foi referido na subsecção 2.6, um dos aspetos mais importantes do método de Taguchi é o conceito de ruído. Então, foi importante que os ensaios fossem repetidos pelo menos uma vez em condições diferentes, para que pudesse ser observado a influência do ruído na qualidade do produto final. Assim sendo foi decidido que seria realizada uma segunda série de ensaios. resultando num total de 32 ensaios necessários.

Na Tabela 4 - Matriz ortogonal de Taguchi L16 mostra-se como são feitas as combinações dos parâmetros com os diferentes níveis numa situação de  $P=4$  e  $L=4$ .

Tabela 4 - Matriz ortogonal de Taguchi L16 [2].

Número de ensaio	Parâmetro 1	Parâmetro 2	Parâmetro 3	Parâmetro 4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	1	4	4	4
5	2	1	2	3
6	2	2	1	4
7	2	3	4	1
8	2	4	3	2
9	3	1	3	4
10	3	2	4	3
11	3	3	1	2
12	3	4	2	1
13	4	1	4	2
14	4	2	3	1
15	4	3	2	4
16	4	4	1	3

O próximo passo para o planeamento do procedimento experimental foi decidir quais os valores a serem testados.

Tal como foi dito na subsecção 2.3.1, a primeira coisa para seleccionar os valores da velocidade de rotação ( $n$ ) foi consultar o catálogo da ferramenta de corte [29]. A informação que constava no catálogo, era que a velocidade de corte ( $V_c$ ) recomendada para este tipo de material não deveria ultrapassar os 440 m/min. A equação (1) relaciona a velocidade de corte com a velocidade de rotação consoante o diâmetro da ferramenta ( $D$ ) que neste era de 12 mm. Ao aplicar esta equação chegamos ao valor da velocidade de rotação máxima de  $n = 11635$  rpm. um valor perfeitamente alcançável pelo centro de maquinagem CNC utilizado em que a velocidade máxima é de 12000 rpm.

Para trabalhar com números inteiros decidiu-se que o nível de velocidade mais alta seria de 11000 rpm. O intervalo entre os diferentes níveis seria de 2000 rpm.

O parâmetro seguinte a ser decidido foi o avanço. Através da pesquisa verificou-se que para decidir os valores dos intervalos dos diferentes níveis deste parâmetro, os estudos que se baseiam no método de Taguchi [4] [35] optam por fazer intervalos constantes

entre os valores de avanço por gume ( $fz$ ). Consultando o catálogo da ferramenta [29], pode-se verificar que o avanço por gume máximo recomendado neste tipo de material e no tipo de corte usado, era de 0,07 mm/z/rot.

Decidiu-se então que o valor máximo do avanço por gume ( $fz$ ) seria de 0,07 mm e os intervalos entre os diferentes níveis seriam de 0,015, fazendo com que o nível mais baixo seria de 0,025 mm. Para converter os valores de avanço por gume ( $fz$ ) em valores de velocidade de avanço ( $f$ ) foi utilizada a equação (2), sendo que a ferramenta utilizada tem 3 gumes.

O nível máximo de largura de corte ( $a_e$ ) foi o recomendado pelo catálogo 3 mm. O intervalo entre os diferentes níveis foi de 0,75 mm, fazendo com que o nível mínimo testado seria de 0,75 mm.

Como o objetivo deste projeto era de medir não só a rugosidade da superfície horizontal trabalhada pela extremidade da ferramenta, mas também a rugosidade da superfície vertical trabalhada pela lateral da ferramenta, foi necessário trabalhar com profundidades de corte maiores do que é normalmente visto por este tipo de estudos [4] [11] [12] [35]. Então, foi decidido que a profundidade cortada durante o provete seria de 10 mm. No nível 1 do parâmetro 3 a profundidade de corte foi de 1,25 mm, sendo necessário fazer oito passagens para completar os 10 mm de profundidade. No nível 2 deste parâmetro a profundidade de corte foi de 2,5 mm sendo necessários 4 passagens. O nível 3 foi feito em duas passagens de 5 mm. O último nível foi feito com uma única passagem de 10 mm de profundidade de corte.

Na tabela seguinte podemos observar os valores dos parâmetros estudados:

Tabela 5 - Valores dos parâmetros selecionados.

	Parâmetro 1	Parâmetro 2	Parâmetro 3	Parâmetro 4
nível	$n$ (rpm)	$f_z$ (mm/z/rev)	$a_p$ (mm)	$a_e$ (mm)
1	5000	0,025	1,25	0,75
2	7000	0,040	2,50	1,50
3	9000	0,055	5,00	2,25
4	11000	0,070	10,00	3,00

Combinado a Tabela 4 com a Tabela 5 pode-se contruir a matriz L16 de Taguchi com os valores a serem testados (Tabela 6).

Tabela 6 - Matriz L16 de Taguchi com os valores dos parâmetros selecionados.

Número de ensaio	Velocidade de rotação $n$ (rpm)	avanço por dente $f_z$ (mm/z/rot)	Profundidade de corte $a_p$ (mm)	Largura de corte $a_e$ (mm)
1	5000	0,025	1,25	0,75
2	5000	0,040	2,50	1,50
3	5000	0,055	5,00	2,25
4	5000	0,070	10,00	3,00
5	7000	0,025	2,50	2,25
6	7000	0,040	1,25	3,00
7	7000	0,055	10,00	0,75
8	7000	0,070	5,00	1,50
9	9000	0,025	5,00	3,00
10	9000	0,040	10,00	2,25
11	9000	0,055	1,25	1,50
12	9000	0,070	2,50	0,75
13	11000	0,025	10,00	1,50
14	11000	0,040	5,00	0,75
15	11000	0,055	2,50	3,00
16	11000	0,070	1,25	2,25

### 3.3 Proвете

Apos ter sido definida, a matriz para o ensaio experimental e, conseqüentemente, o número de ensaios, o próximo passo seria de conceber o design do provete. Como a matriz ortogonal de Taguchi selecionada era uma matriz do tipo L16, o provete teria desaseis áreas, que fossem facilmente identificáveis e distinguíveis, além de fácil acesso para o rugosímetro, tanto na superfície horizontal como na superfície vertical.

Como o objetivo dos ensaios era não só medir a rugosidade das superfícies, mas também medir o MMR, a quantidade de material removido para cada ensaio teria de ser expressiva. Além de que as condições para cada ensaio teriam de ter as mesmas, como se tratasse de uma produção de uma peça em série, mas com parâmetros diferentes.

Outra necessidade a que o provete tinha de atender, era que os ensaios tinham de ser repetidos pelo menos uma vez em condições diferentes. Para este efeito, foi decidido que seriam feitos duas séries de ensaios, série A e série B.

Primeiramente o provete é dividido em desasseies áreas, cada área é referente a um determinado ensaio. Posteriormente, cada uma das áreas irá ser dividida entre a série A e série B. sendo que a série B irá ter metade do comprimento e largura em relação à série anterior. A divisão das diferentes áreas é ilustrada na imagem seguinte.

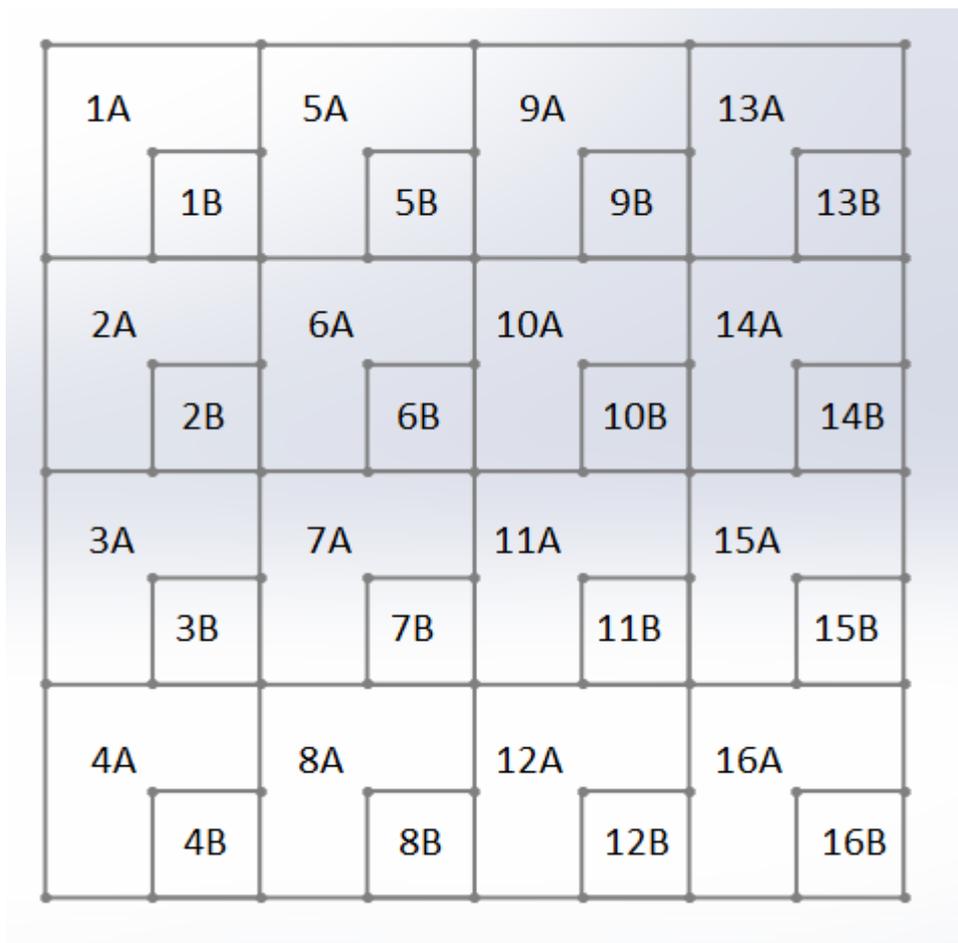


Figura 30 - Esboço do layout do provete.

O desenvolvimento do provete foi feito através do software SOLIDWORKS, a partir de três modelos 3D. Um primeiro modelo corresponde ao provete antes dos ensaios (Figura 31). O segundo modelo corresponde ao provete após a série A dos ensaios (Figura 32). E o último modelo 3D representa a forma do provete final, ou seja, após a série B (Figura 33).

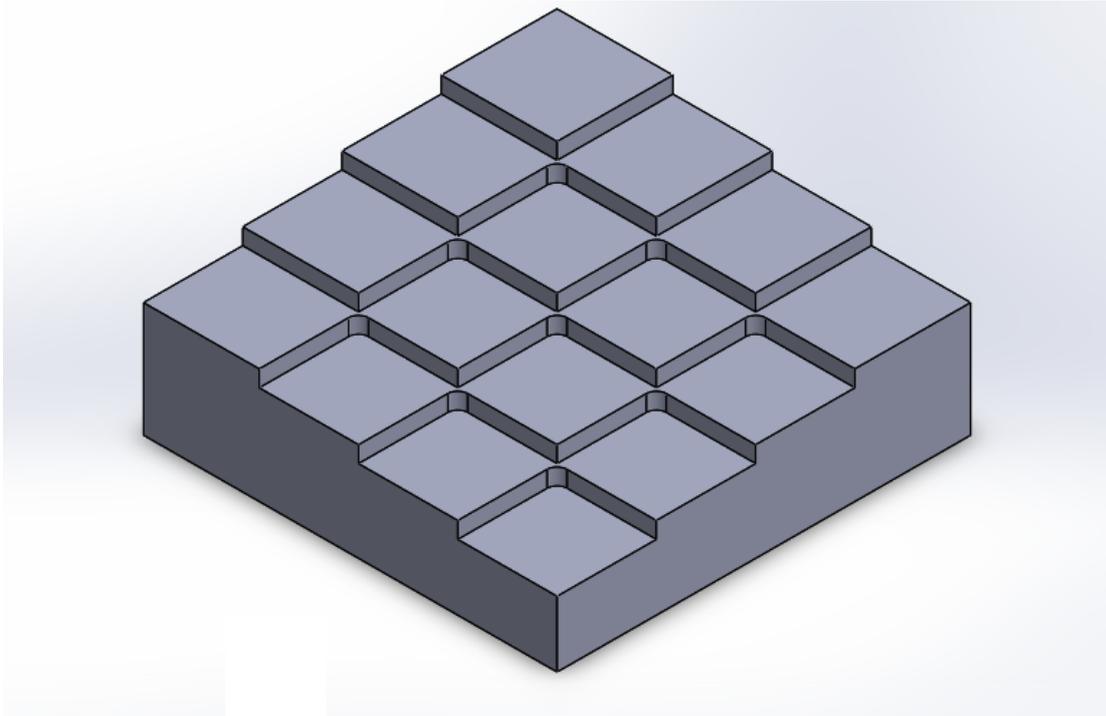


Figura 31 - Modelo 3D do provete após a pré-maquinação.

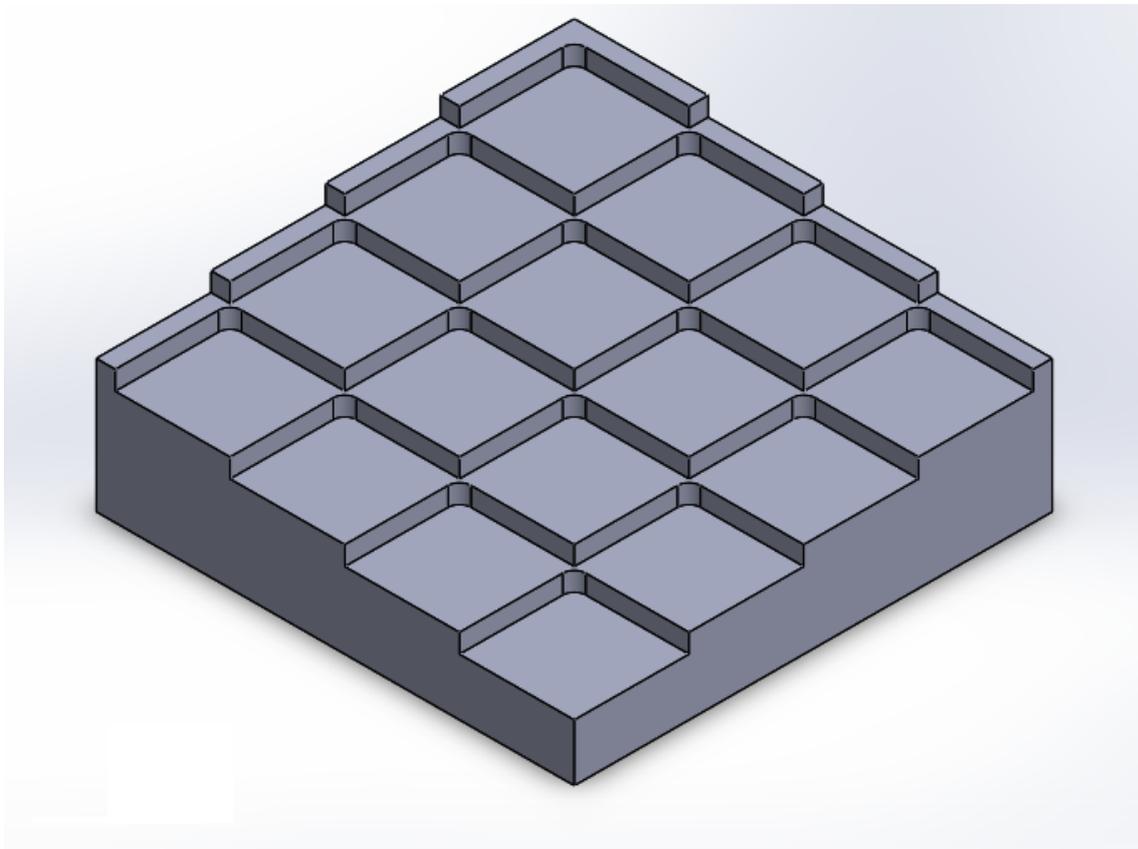


Figura 32 - Modelo 3D do provete após a série A.

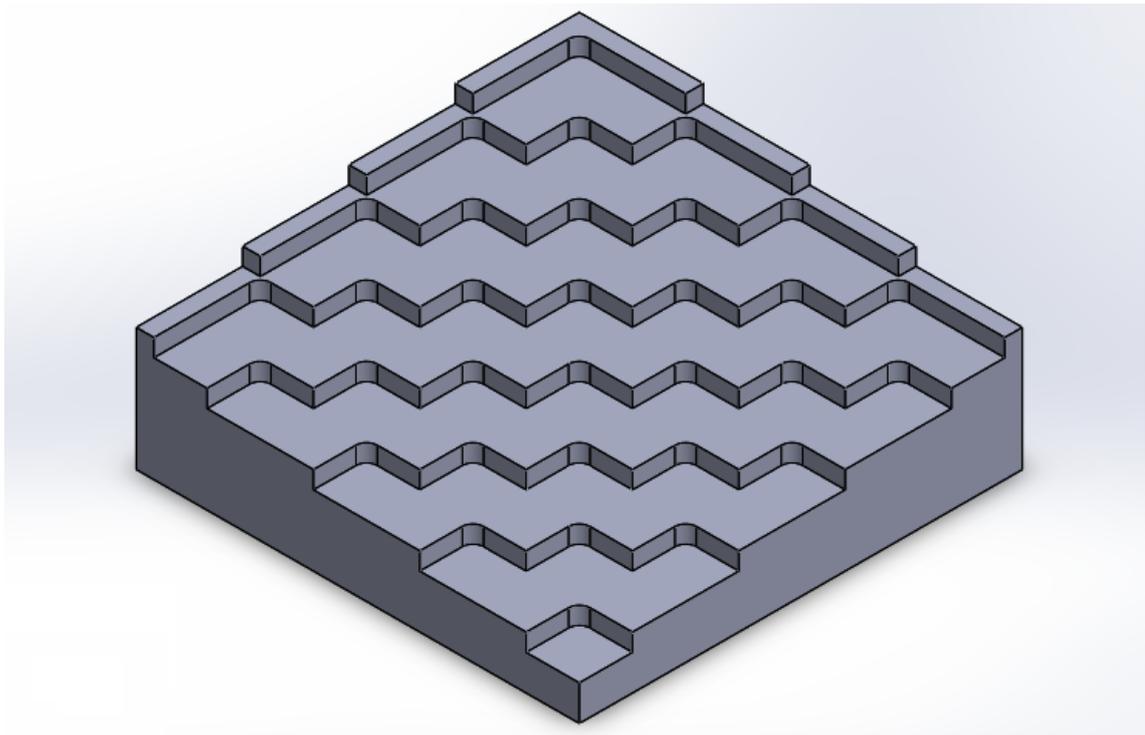


Figura 33 - Modelo 3D do provete após a série B.

Nas próximas imagens (*Figura 34* e *Figura 35* ) podemos ver (a castanho) melhor o material removido durante os ensaios.

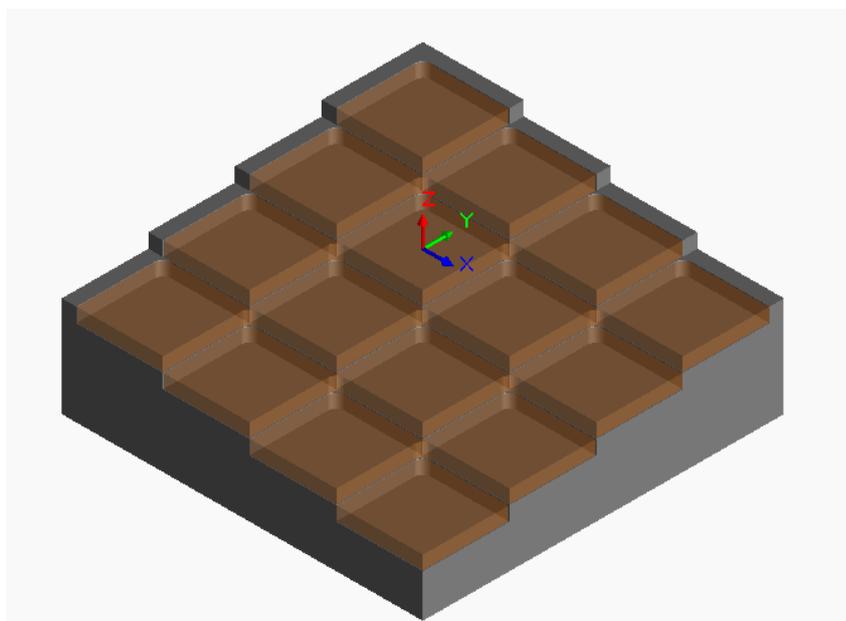


Figura 34 - Material removido durante a série A.

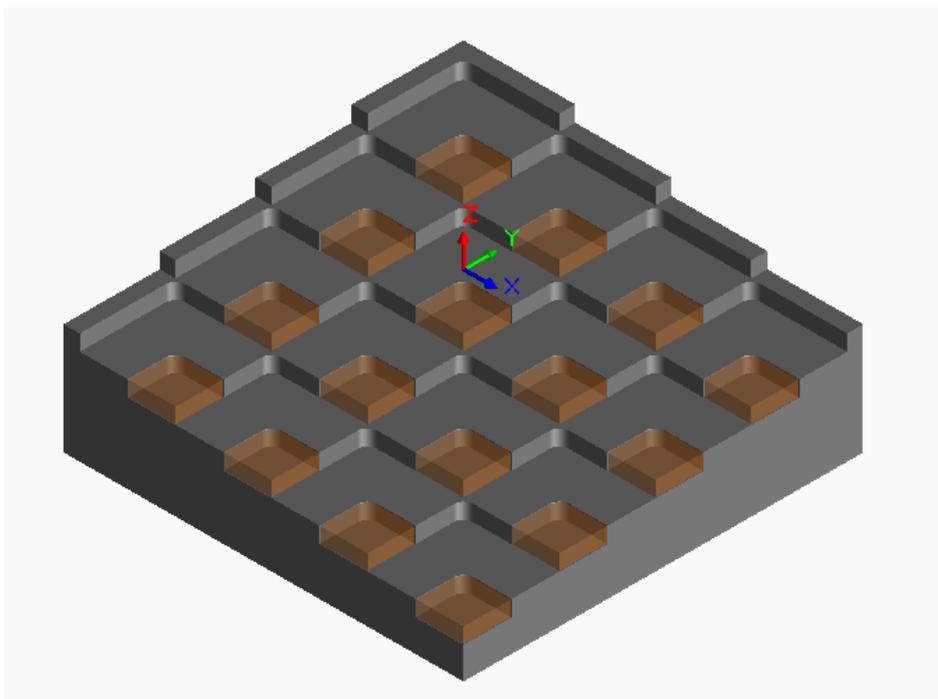


Figura 35 - Material removido durante a série B.

Para obter o provete antes dos ensaios (Figura 31) a partir do bloco (Figura 24), foi necessário prosseguir com uma pré-maquinagem. Esta pré-maquinagem consiste essencialmente em desbaste de material. Como é comum numa fase de desbaste a ferramenta de corte utilizada foi uma ferramenta específica para o efeito (Figura 29), (para que esta fase seja o economicamente mais vantajosa).

As operações utilizadas na fase pré-maquinagem foram fresagem de ombro e a fresagem de perfil, referidas nas subsecções 2.2.3 e 2.2.4 respetivamente (Figura 36).

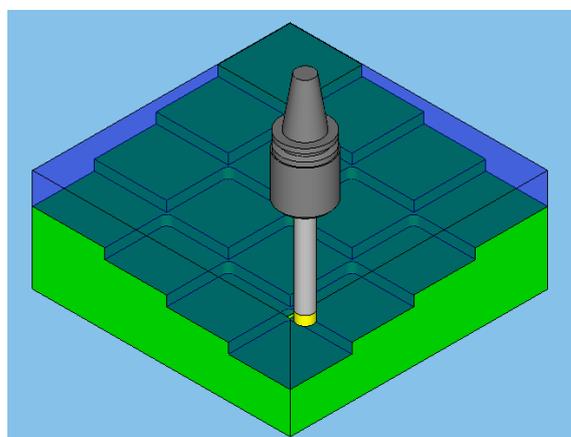


Figura 36 - Simulação da pré-maquinagem.

O último passo que faltava antes de realizar a programação dos ensaios foi definir as trajetórias. Então, foi decidido que as trajetórias a utilizar seriam uma trajetória em zig-zag (Figura 37 e Figura 38). O número de passagens em cada ensaio depende da profundidade de corte e da largura de corte.

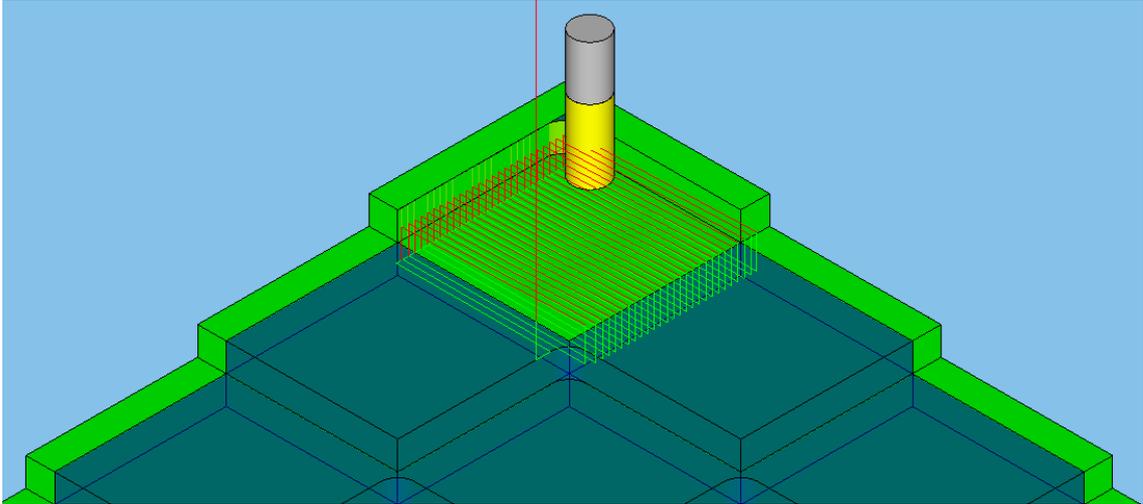


Figura 37- Simulação da série A com trajetórias em zig-zag.

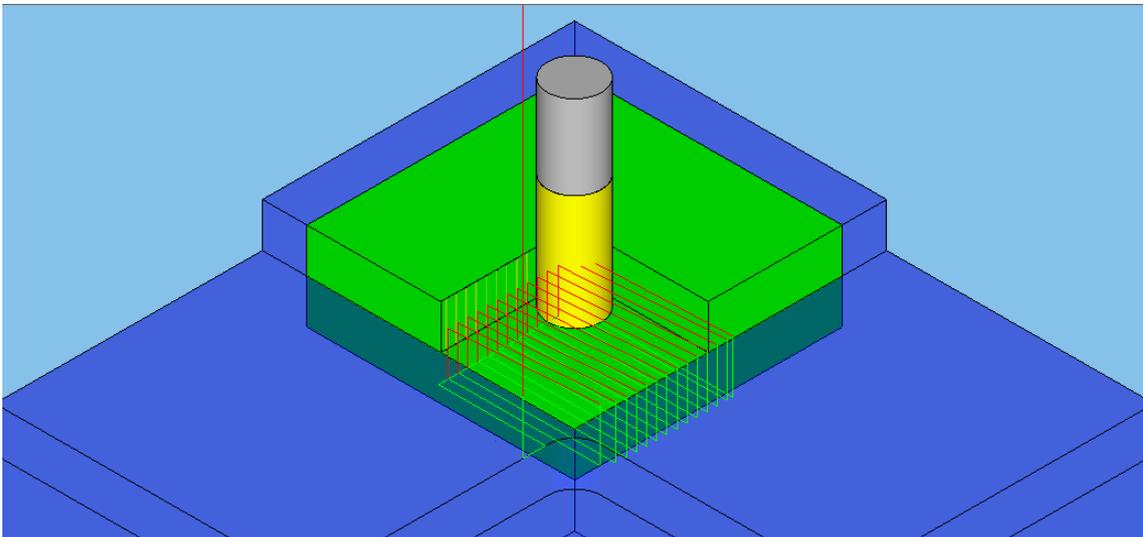


Figura 38- Simulação da série B com trajetórias em zig-zag.

### 3.4 Resultados dos ensaios

A Figura 39 mostra qual o aspeto real do provete finalizado.

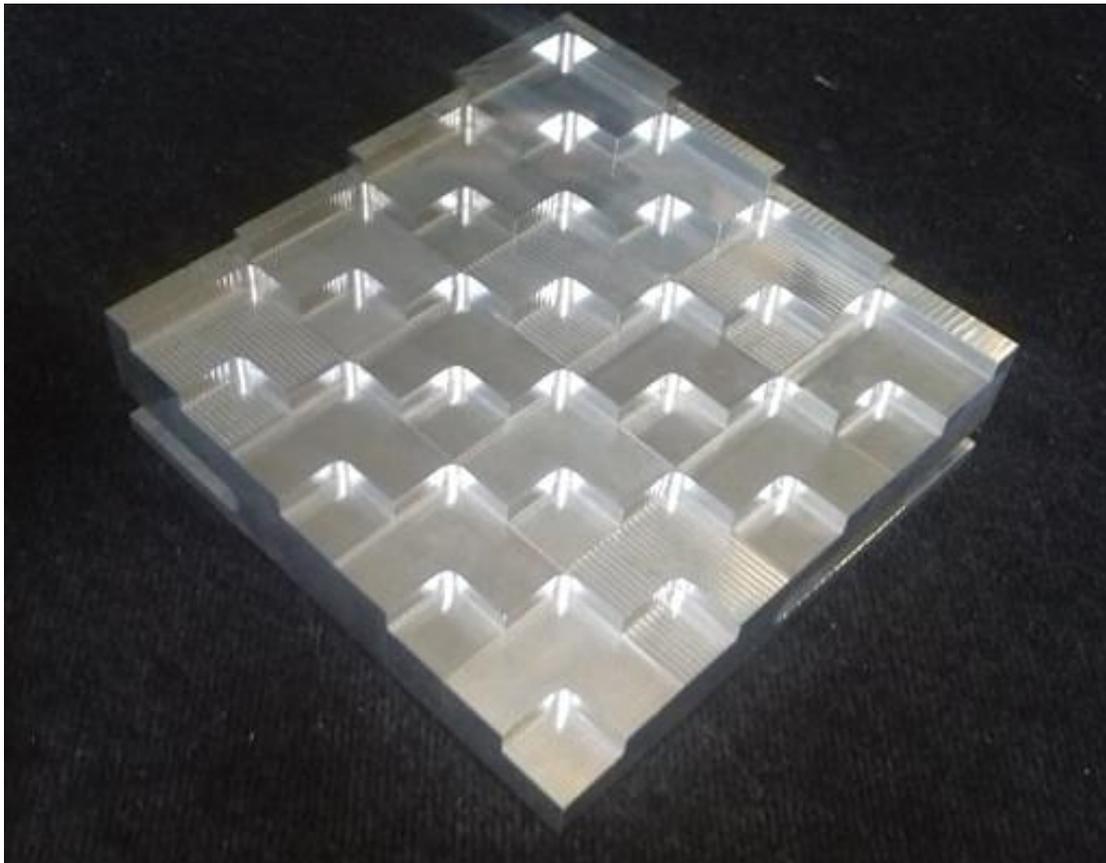


Figura 39 - Provete finalizado.

Com a finalidade de calcular o MMR de cada ensaio, o provete foi pesado antes e depois de cada ensaio. Através dessa pesagem observou-se que na série A o material removido era aproximadamente de 100 gramas. Na série B, o material removido em cada ensaio era de 25 gramas, cerca de  $\frac{1}{4}$  da massa em relação à série A.

Outro fator a ter em conta para calcular o MMR é o tempo de maquinagem. Para tal, foi cronometrado o tempo de maquinagem de cada ensaio. Os dados da pesagem e do tempo de maquinagem podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7- Pesagem do provete e tempo de maquinagem de cada ensaio.

	A		B	
	Massa [kg]	Tempo [hh:mm:ss]	Massa [kg]	Tempo [hh:mm:ss]
0	12,79		11,19	
1	12,69	01:59:34	11,165	00:41:10
2	12,59	00:19:55	11,14	00:07:55
3	12,49	00:05:10	11,115	00:02:04
4	12,39	00:01:48	11,09	00:00:44
5	12,29	00:14:42	11,065	00:05:39
6	12,19	00:14:40	11,04	00:06:23
7	12,09	00:05:48	11,015	00:02:18
8	11,99	00:04:31	10,99	00:02:08
9	11,89	00:04:34	10,965	00:01:56
10	11,79	00:02:59	10,94	00:00:55
11	11,69	00:26:03	10,915	00:08:25
12	11,59	00:22:28	10,89	00:07:09
13	11,49	00:05:01	10,865	00:01:34
14	11,39	00:13:44	10,84	00:04:16
15	11,29	00:06:22	10,815	00:02:09
16	11,19	00:13:55	10,79	00:04:48

Após a conclusão de cada uma das séries de maquinagem, procedeu-se à medição da rugosidade média das superfícies através do rugosímetro. Para cada ensaio foram medidas duas superfícies, a superfície horizontal e a superfície lateral. Cada uma das superfícies foi medida cinco vezes ignorando o maior e menor valor. Nas Tabelas (8) e (9) podemos observar os resultados obtidos.

Tabela 8- Rugosidades medidas na superfície horizontal.

Número de ensaio	Série A				Série B			
	P1 [μm]	P2 [μm]	P3 [μm]	Média da Rugosidade[μm]	P1 [μm]	P2 [μm]	P3 [μm]	Média da Rugosidade[μm]
1	0,05	0,05	0,04	0,047	0,05	0,06	0,06	0,057
2	0,06	0,06	0,05	0,057	0,05	0,06	0,06	0,057
3	0,08	0,09	0,09	0,087	0,1	0,09	0,07	0,087
4	0,18	0,21	0,18	0,190	0,16	0,16	0,17	0,163
5	0,06	0,06	0,05	0,057	0,06	0,06	0,06	0,060
6	0,11	0,1	0,09	0,100	0,14	0,14	0,11	0,130
7	0,05	0,06	0,06	0,057	0,09	0,07	0,11	0,090
8	0,07	0,08	0,09	0,080	0,08	0,08	0,07	0,077
9	0,06	0,06	0,06	0,060	0,07	0,07	0,07	0,070
10	0,07	0,06	0,07	0,067	0,1	0,12	0,12	0,113
11	0,09	0,09	0,08	0,087	0,07	0,07	0,08	0,073
12	0,06	0,06	0,06	0,060	0,06	0,06	0,07	0,063
13	0,05	0,06	0,06	0,057	0,07	0,1	0,08	0,083
14	0,05	0,06	0,06	0,057	0,06	0,09	0,07	0,073
15	0,1	0,11	0,1	0,103	0,12	0,09	0,1	0,103
16	0,16	0,16	0,17	0,163	0,16	0,15	0,11	0,140

Tabela 9- Rugosidades medidas na superfície vertical.

Número de ensaio	Série A				Série B			
	P1 [μm]	P2 [μm]	P3 [μm]	Média da Rugosidade[μm]	P1 [μm]	P2 [μm]	P3 [μm]	Média da Rugosidade[μm]
1	0,09	0,09	0,10	0,093	0,09	0,10	0,1	0,097
2	0,13	0,12	0,12	0,123	0,11	0,10	0,09	0,100
3	0,25	0,25	0,21	0,237	0,26	0,28	0,25	0,263
4	0,14	0,14	0,12	0,133	0,09	0,09	0,1	0,093
5	0,12	0,11	0,12	0,117	0,11	0,11	0,12	0,113
6	0,08	0,09	0,08	0,083	0,09	0,09	0,11	0,097
7	0,11	0,11	0,11	0,110	0,13	0,14	0,14	0,137
8	0,2	0,21	0,21	0,207	0,19	0,19	0,19	0,190
9	0,33	0,35	0,33	0,337	0,17	0,18	0,17	0,173
10	0,11	0,11	0,11	0,110	0,11	0,11	0,09	0,103
11	0,10	0,11	0,11	0,107	0,09	0,11	0,08	0,093
12	0,14	0,12	0,12	0,127	0,16	0,15	0,15	0,153
13	0,11	0,11	0,12	0,113	0,14	0,14	0,14	0,140
14	0,33	0,29	0,31	0,31	0,3	0,32	0,31	0,310
15	0,11	0,11	0,11	0,110	0,25	0,23	0,24	0,240
16	0,10	0,12	0,10	0,107	0,23	0,21	0,23	0,223



# Capítulo 4 – Análise e discussão dos resultados

## 4.1 Razão sinal-ruído

Para avaliar a rugosidade de superfície e a taxa de remoção de material (MMR) dos ensaios através da ótica de Taguchi, os resultados obtidos devem ser convertidos para quociente  $S/N$ , tal como foi descrito na subsecção 2.6.

A conversão dos valores das rugosidades médias apresentadas pelo rugosímetro para  $S/N$  é feita através da equação 7, pois quanto menor a rugosidade da superfície melhor.

$$S/N_S = -10 * \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (7)$$

Como exemplo segue-se a determinação do quociente  $S/N$  para a rugosidade da superfície horizontal no primeiro ensaio através da equação 7.

$$S/N_S = -10 * \log \left( \frac{1}{2} * (0,047^2 + 0.057^2) \right) = 25,695$$

Nas tabelas seguintes é apresentado os valores do quociente  $S/N$  para a rugosidade das superfícies horizontal Tabela 10 e lateral Tabela 11.

Tabela 10- Valor médio da rugosidade e quociente S/N na superfície horizontal

Número de ensaio	Velocidade de rotação $n$ (rpm)	avanço por dente $f_z$ (mm/z/rot)	Profundidade de corte $a_p$ (mm)	Largura de corte $a_e$ (mm)	Média da Rugosidade da série A ( $\mu\text{m}$ )	Média da Rugosidade da série B ( $\mu\text{m}$ )	Quociente sinal ruído S/N
1	5000	0,025	1,25	0,75	0,047	0,057	25,695
2	5000	0,040	2,50	1,50	0,057	0,057	24,933
3	5000	0,055	5,00	2,25	0,087	0,087	21,243
4	5000	0,070	10,00	3,00	0,190	0,163	15,032
5	7000	0,025	2,50	2,25	0,057	0,060	24,678
6	7000	0,040	1,25	3,00	0,100	0,130	18,713
7	7000	0,055	10,00	0,75	0,057	0,090	22,475
8	7000	0,070	5,00	1,50	0,080	0,077	22,119
9	9000	0,025	5,00	3,00	0,060	0,070	23,716
10	9000	0,040	10,00	2,25	0,067	0,113	20,633
11	9000	0,055	1,25	1,50	0,087	0,073	21,908
12	9000	0,070	2,50	0,75	0,060	0,063	24,196
13	11000	0,025	10,00	1,50	0,057	0,083	22,943
14	11000	0,040	5,00	0,75	0,057	0,073	23,671
15	11000	0,055	2,50	3,00	0,103	0,103	19,715
16	11000	0,070	1,25	2,25	0,163	0,140	16,357

Tabela 11- Valor médio da rugosidade e quociente S/N na superfície lateral.

Número de ensaio	Velocidade e de rotação $n$ (rpm)	avanço por dente $f_z$ (mm/z/rot)	Profundidade e de corte $a_p$ (mm)	Largura de corte $a_e$ (mm)	Média da Rugosidade da série A ( $\mu\text{m}$ )	Média da Rugosidade da série B ( $\mu\text{m}$ )	Quociente sinal ruído S/N
1	5000	0,025	1,25	0,75	0,093	0,364	11,502
2	5000	0,040	2,50	1,50	0,123	0,708	5,882
3	5000	0,055	5,00	2,25	0,237	1,079	2,147
4	5000	0,070	10,00	3,00	0,133	1,378	0,186
5	7000	0,025	2,50	2,25	0,117	1,706	-1,647
6	7000	0,040	1,25	3,00	0,083	2,028	-3,137
7	7000	0,055	10,00	0,75	0,110	2,370	-4,494
8	7000	0,070	5,00	1,50	0,207	2,736	-5,755
9	9000	0,025	5,00	3,00	0,337	3,112	-6,902
10	9000	0,040	10,00	2,25	0,110	3,370	-7,547
11	9000	0,055	1,25	1,50	0,107	3,702	-8,363
12	9000	0,070	2,50	0,75	0,127	4,042	-9,126
13	11000	0,025	10,00	1,50	0,113	4,371	-9,804
14	11000	0,040	5,00	0,75	0,310	4,770	-10,578
15	11000	0,055	2,50	3,00	0,110	5,037	-11,035
16	11000	0,070	1,25	2,25	0,107	5,369	-11,589

Ao analisar as tabelas da rugosidade de superfície horizontal (Tabela 10) e lateral (Tabela 11) pode observar-se que em ambas as superfícies o ensaio nº 1 foi o que apresentou melhor resposta, o ensaio com pior resposta foi o ensaio nº 16.

Na tabela de rugosidade de superfície horizontal (Tabela 10) os valores da rugosidade média da série A não variam muito em relação à série B. Porém, o mesmo não acontece na superfície lateral (Tabela 11) em que há uma grande variação dos valores das médias de rugosidade entre as séries A e B. A hipótese mais plausível para este fator será o desgaste que a ferramenta de corte tenha sofrido entre as duas séries, este desgaste não teve efeito prático na superfície horizontal, porém causou um aumento de rugosidade na superfície lateral.

O valor do MMR de cada ensaio foi obtido através dos dados da tabela (7) com a equação (4).

A conversão dos valores do MMR para S/N é feita através da equação (6), pois quanto maior o MMR melhor.

$$S/N_L = -10 * \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (6)$$

Como exemplo segue-se a determinação do quociente S/N para MMR no primeiro ensaio através da equação (6).

$$S/N_S = -10 * \log \left( \frac{1}{2} * \left( \frac{1}{0,296^2} + \frac{1}{0,215^2} \right) \right) = -12,197$$

Na tabela 12 são apresentados os valores do quociente S/N para o MMR.

Tabela 12- MMR e Quociente sinal ruído S/N.

Número de ensaio	Velocidade de rotação n(rpm)	avanço por dente $f_z$ (mm/z/rot)	Profundidade de corte $a_p$ (mm)	Largura de corte $a_e$ (mm)	MMR série A (mm <sup>3</sup> /min)	MMR série B (mm <sup>3</sup> /min)	Quociente sinal ruído S/N
1	5000	0,025	1,25	0,75	0,296	0,215	-12,197
2	5000	0,040	2,50	1,50	1,774	1,116	2,515
3	5000	0,055	5,00	2,25	6,839	4,270	14,195
4	5000	0,070	10,00	3,00	19,631	12,046	23,239
5	7000	0,025	2,50	2,25	2,404	1,564	5,360
6	7000	0,040	1,25	3,00	2,409	1,384	4,594
7	7000	0,055	10,00	0,75	6,092	3,840	13,245
8	7000	0,070	5,00	1,50	7,823	4,141	14,280
9	9000	0,025	5,00	3,00	7,738	4,569	14,908
10	9000	0,040	10,00	2,25	11,844	9,637	20,483
11	9000	0,055	1,25	1,50	1,356	1,050	1,393
12	9000	0,070	2,50	0,75	1,573	1,236	2,760
13	11000	0,025	10,00	1,50	7,044	5,639	15,883
14	11000	0,040	5,00	0,75	2,573	2,070	7,163
15	11000	0,055	2,50	3,00	5,55	4,109	13,387
16	11000	0,070	1,25	2,25	2,539	1,840	6,474

Analisando a tabela que diz respeito ao MMR (Tabela 12) pode observar-se que o ensaio nº 1 se destaca pela negativa, sendo o pior ensaio com um S/N de -12,197 tendo uma

grande diferença para o segundo pior ensaio. O melhor ensaio foi o ensaio nº 4 com um  $S/N$  de 23,239, porém não havendo uma grande diferença para o segundo melhor ensaio.

## 4.2 Análise ANOVA

Para uma melhor análise destes resultados foi feita uma análise de variância (ANOVA). Uma análise de variância vai permitir avaliar individualmente a contribuição que cada parâmetro tem na qualidade do produto final. Esta análise foi feita através do software Minitab 19.

Nos gráficos de análise ANOVA o eixo das abscissas representa os parâmetros de corte C1 (velocidade de rotação), C2 (avanço do dente), C3 (profundidade de corte) e C4 (largura de corte). Já no eixo das ordenadas representa as médias de  $S/N$  de cada parâmetro.

Na análise ANOVA da rugosidade da superfície horizontal (Figura 40) em relação ao primeiro parâmetro C1 (velocidade de rotação) o valor testado com melhores resultados foi 9000 rpm. No segundo parâmetro C2 (avanço do dente) pode observar-se que quanto menor é o avanço por dente melhor. No parâmetro C3 (profundidade de corte) melhor valor é de 2,5 mm. No último parâmetro C4 (largura de corte) quanto menor é a largura de corte melhor.

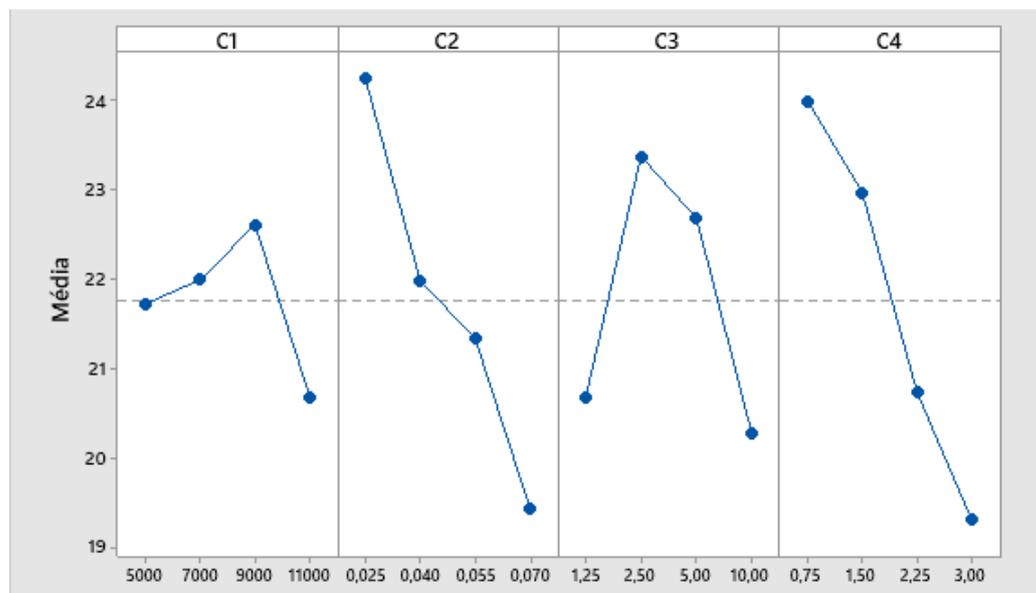


Figura 40 - Gráfico de efeito principais na rugosidade da superfície horizontal.

Na análise ANOVA da rugosidade da superfície lateral (Figura 41) podemos observar que  $S/N$  varia mais no primeiro parâmetro, assim podemos deduzir que o C1 (velocidade de rotação) tem uma grande influência para a rugosidade da superfície lateral sendo que quanto menor a velocidade menor a rugosidade. Já os parâmetros C2, C3 e C4 tem pouca influencia na rugosidade lateral.

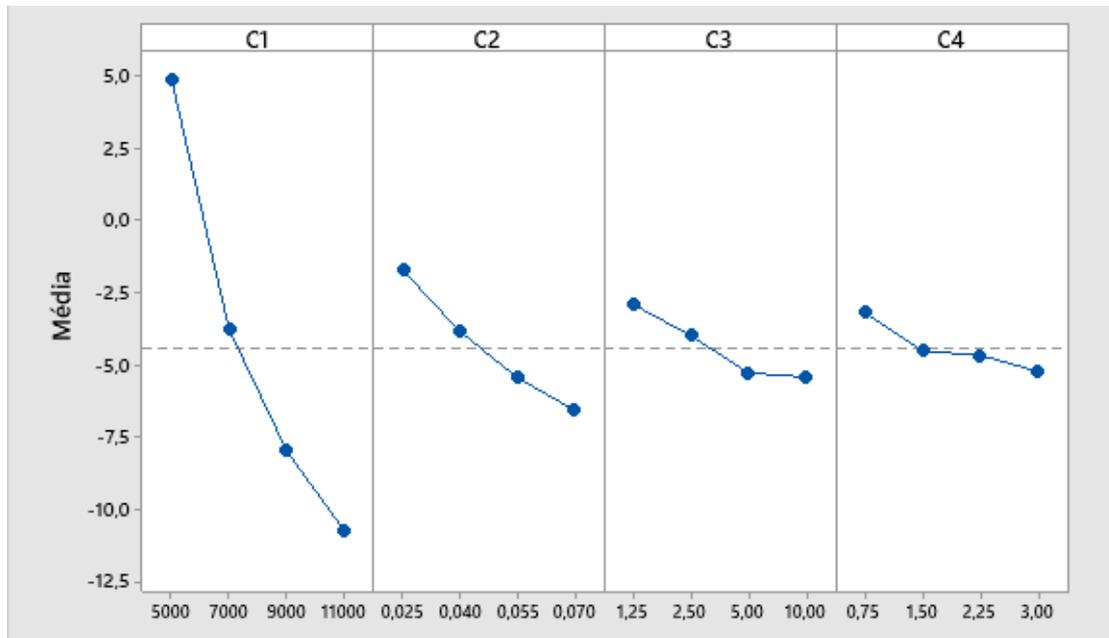


Figura 41 - Gráfico de efeito principais na rugosidade da superfície lateral.

Na análise ANOVA do MMR (Figura 42) os primeiros dois parâmetros não têm grande efeito na taxa de remoção de material. Já o parâmetro C3 (profundidade de corte) é o parâmetro mais significativo, e quanto maior a profundidade de corte maior o MMR. já em relação ao parâmetro C4 quanto maior for a largura de corte maior será também o MMR.

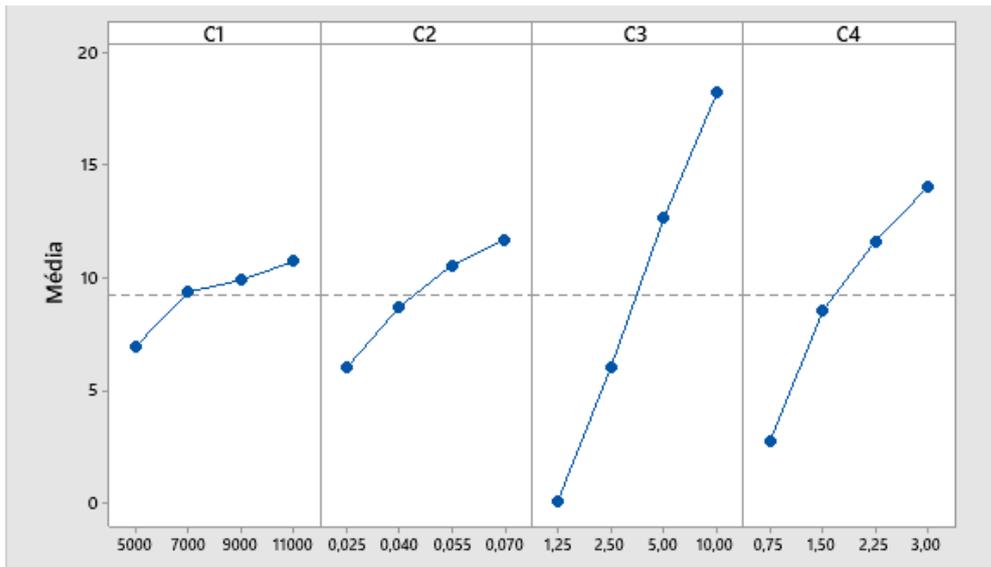


Figura 42 - Gráfico de efeito principais no MMR.



# Capítulo 5 – Conclusões

A aplicação do método de Taguchi mostrou-se um método eficaz para conhecer melhor a relação entre a ferramenta de corte e o material cortado na maquinação CNC.

Através das medições e análises feitas do provete desenvolvido é possível agora otimizar os parâmetros de corte para que a peça de alumínio 7050 maquinada por uma ferramenta de fresagem de topo tenha a qualidade de fabrico desejado e de uma forma a minimizar os gastos no processo.

Para que a peça fabricada tenha uma melhor qualidade de superfície trabalhada pelo topo da ferramenta, a velocidade de rotação  $n$  deve rondar os 9000 rpm. O avanço por dente  $f_z$  deve ser bem baixo, dentro do limite recomendado pelo fabricante da ferramenta, pois o nível mínimo testado (0,025 mm/z/rot) foi o que teve melhor desempenho. Em relação à escolha da profundidade e largura de corte, estes parâmetros devem ser escolhidos com a finalidade de maximizar o MMR para diminuir o tempo de maquinação e por sua vez reduzir os gastos do processo, pois são os parâmetros que mais influenciam o MMR.

Caso o fabricante da peça procure uma melhor qualidade da superfície trabalhada pela região lateral da ferramenta, a velocidade de rotação  $n$  deve diminuir para diminuir a rugosidade da superfície. Outro aspeto importante em relação à qualidade da superfície lateral é que esta superfície é a superfície mais afetada pelo desgaste da ferramenta, o que realça a necessidade de otimizar os parâmetros de corte com uma alta taxa de MMR.



# Bibliografia

- [1] S. Karna e R. Sahai, “An Overview on Taguchi Method,” vol. 1, pp. 11-18, 2012.
- [2] J. M. Cimbala, “Taguchi Orthogonal Arrays,” 2014.
- [3] Polylanema, Hokotol® Ficha técnica, 2019. [Online]. Available: [https://www.polylanema.pt/client/files/0000000001/hokotol-fichatecnica\\_1514.pdf](https://www.polylanema.pt/client/files/0000000001/hokotol-fichatecnica_1514.pdf) [Acedido em 16 Fevereiro 2019].
- [4] S. Subramanian, T. Anandaraj e M. Selwin, “Multi-Objective Optimization of Machining Conditions on Surface Roughness and MRR during CNC End Milling of Aluminium Alloy 7075 Using Taguchi Design of Experiments,” *Mechanics and Mechanical Engineering*, vol. 21, pp. 95-103, 2017.
- [5] C. Relvas, *Controlo Numérico Computorizado: Conceitos Fundamentais*, Porto: Engebook, 2018.
- [6] B. C. Routara, A. Bandyopadhyay e P. Sahoo, “Roughness modeling and optimization in CNC end milling using response surface method: effect of workpiece material variation,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 40, pp. 1166-1180, 2009.
- [7] A. Aggarwal e H. Singh, “Optimization of machining techniques – A retrospective,” *Sadhana*, vol. 30, pp. 699-711, 2005.
- [8] S. A. Tobia, *Machine Tool Design and Research: International Conference*, birmingham: Macmillan International Higher Education, 1985.
- [9] Grand View Research, “Computer Numerical Control (CNC) Machine Market Size & Share Report By Type (Lathe, Milling, Laser, Grinding, Welding, Winding), By End Use (Industrial, Power & Energy, Automotive, Aerospace & Defense), And Segment Forecasts, 2018 - 2025,” grand view research, 2018.
- [10] D. Vakondios, P. Kyratsis e S. A. A. Yaldiz, “Influence of milling strategy on the surface roughness in ball end milling of the aluminum alloy Al7075-T6,” *Measurement*, vol. 45, p. 1480–1488, 2012.
- [11] B. Arjun, R. Jayaprakash, B. Kaviyarasu, S. Jaganbabu e K. Gopalakrishnan, “Optimization of cutting parameters in milling of Aluminium 7075 alloy using response surface methodology,” *KSR Institute for Engineering and Technology*, vol. 1, nº 1, pp. 236-243, 2018.
- [12] T. Dias, “Otimização dos Parâmetros de Maquinagem no Processo de Fresagem,” Bragança, 2016, Instituto Politécnico de Bragança.
- [13] T. Paiva, “Preparação de trabalho e programação CAM para a maquinagem de componentes aeronáuticos,” Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2013.
- [14] J. Sousa e M. Sousa, “Análise da Temperatura de Usinagem no Corte,” Uberlândia, 2010.
- [15] Harvey performance, “shining a light on diamond end mills,” 10 Maio 2018. [Online]. Available: <https://www.harveyperformance.com/in-the-loupe/shining-a-light-on-diamond-end-mills/>. [Acedido em 2 Maio 2019].
- [16] AZoM, “Aluminium / Aluminum 7050 Alloy (UNS A97050),” 18 Setembro 2012. [Online]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6650>. [Acedido em 15 Abril 2020].

- [17] Coppermetal, “Informações Técnicas Alumínio 7075-T651,” 1 julho 2009. [Online]. Available: [https://www.coppermetal.com.br/pdf/aluminio/info-tec-copp\\_alumi7075.pdf](https://www.coppermetal.com.br/pdf/aluminio/info-tec-copp_alumi7075.pdf). [Acedido em 15 04 2020].
- [18] L. N. L. d. Lacalle, F. J. Campa e A. Lamikiz, “Milling,” em *Modern Machining Technology A Practical Guide*, Bilbao, Elsevier, 2011, pp. 213-303.
- [19] Sandvik, “Face milling,” [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/pages/face-milling.aspx>. [Acedido em 13 maio 2019].
- [20] Indiamart, “end mill cutters,” [Online]. Available: <https://www.indiamart.com/proddetail/end-mill-cutters-11695854473.html>. [Acedido em 3 Abril 2019].
- [21] Seco, “HIGH FEED MACHINING SOLID CARBIDE END MILLS,” [Online]. Available: [https://www.secotools.com/article/m\\_7472](https://www.secotools.com/article/m_7472). [Acedido em 3 Abril 2019].
- [22] Dormer, *Technical Handbook*, 2009. [Online]. Available: <http://finval.ru/upload/catalog/instr/dormer/DORMER.pdf> [Acedido em 1 Maio 2019]
- [23] Sandvik, “CoroMill Plura - solid end mills,” [Online]. Available: [https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/coromill\\_plura/Pages/optimized.aspx](https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/coromill_plura/Pages/optimized.aspx). [Acedido em 1 Maio 2019].
- [24] Sandvik, “shoulder milling,” 15 Maio 2019. [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/pages/shoulder-milling.aspx>.
- [25] Sandvik, “profile milling,” [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/pages/profile-milling.aspx>. [Acedido em 17 Maio 2019].
- [26] “Profile Milling,” [Online]. Available: [https://www.youtube.com/watch?v=\\_Sx5B-2sK5w](https://www.youtube.com/watch?v=_Sx5B-2sK5w). [Acedido em 16 Maio 2019].
- [27] Sandvik, “milling holes cavities pockets,” [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/milling-holes-cavities-pockets/pages/default.aspx>. [Acedido em 20 Maio 2019].
- [28] Sandvik, “groove or slot milling,” [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/milling/pages/groove-or-slot-milling.aspx>. [Acedido em 22 Maio 2019].
- [29] Hoffmann group, *Catalog 1 Machinig / clamping tecnology*, 2018-2019.
- [30] P.G.Benardo e C.Vosniakos, “Predicting surface roughness in machining: a review,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, pp. 833-844, 2003.
- [31] J. C. d. S. Neto, *Metrologiae Controle Dimensional*, Elsevier Editora , 2012.
- [32] P. M. Castro, “TAGUCHI’S METHOD: QUALITY CONTROL WITH A NON-CONVENTIONAL USE OF DESIGN OF EXPERIMENTS (DOE),” Lisboa, 2008.
- [33] A. Valente, “Modelação de um Edifício e Obtenção da Solução Ótima de Climatização Aplicando a Metodologia de Taguchi,” Setúbal, 2017.
- [34] N. Costa, “Multiple response optimization: methods and results,” *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, vol. 5, nº 4, pp. 442-459, 2010.

- [35] T. P. Mahesh e R. Rajesh, "Optimal Selection of Process Parameters in CNC End Milling of Al 7075-T6 Aluminium Alloy Using a Taguchi-fuzzy Approach," *Procedia Materials Science*, vol. 5, pp. 2493-2502, 2014.
- [36] K. Kadirgamaa, M. Noor, N. Nik Mohamed, P. D. M. M. Rahman, R. Rejab, R. Daud e K. Abou-El-Hossein, "Optimization of Surface Roughness in End Milling on Mould Aluminium Alloys (AA6061-T6) Using Response Surface Method and Radian Basis Function Network," *Jordan J. Mech. Ind. Eng*, vol. 2, n° 4, pp. 209-214, dezembro 2008.