



DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ÓTIMOS NA OPERAÇÃO DE ACABAMENTO SUPERFICIAL DO ALUMÍNIO AW 6082

VÍTOR MANUEL DA COSTA RIBEIRO

novembro de 2019

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ÓTIMOS NA OPERAÇÃO DE ACABAMENTO SUPERFICIAL DO ALUMÍNIO EN AW-6082

Vítor Manuel da Costa Ribeiro

1030676

2019

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ÓTIMOS NA OPERAÇÃO DE ACABAMENTO SUPERFICIAL DO ALUMÍNIO EN AW-6082

Vítor Manuel da Costa Ribeiro

1030676

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Hernâni Miguel Reis Lopes, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP e Co-orientação do Doutor Manuel Joaquim Pereira Lopes, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP.

2019

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

POLITÉCNICO
DO PORTO

JÚRI

Presidente

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Doutor Hernâni Miguel Reis Lopes

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Co-orientador

Doutor Manuel Joaquim Pereira Lopes

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Arguente

Doutor João Eduardo Pinto Castro Ribeiro

Professor Adjunto, Instituto Politécnico de Bragança

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer ao professor Hernâni Lopes pela orientação e motivação ao longo deste trabalho. Foi uma ajuda preciosa em termos científicos e humanos.

Aos professores Manuel Lopes, Eduardo Martins e Manuel Castro por todas as dúvidas e esclarecimentos prestados.

Ao Engenheiro Victor Moreira pelo apoio.

À minha esposa por todo o apoio, compreensão e motivação dada ao longo deste mestrado.

À minha filha, pelo sorriso com que me presenteava, quando me interpelava a meio do estudo.

À minha família e amigos.

Muito obrigado a todos.

PALAVRAS CHAVE

Melhoria do acabamento da superfície, fresagem, método de Taguchi, matriz ortogonal, otimização de parâmetros, vibrações.

RESUMO

Este trabalho apresenta a aplicação do método de Taguchi com o objetivo de reduzir a rugosidade média produzida pela operação de fresagem CNC do alumínio EN AW-6082, através da identificação dos parâmetros ótimos de maquinagem. É também objetivo deste trabalho, investigar o nível de vibração gerado pelo processo de maquinagem como meio de avaliação da rugosidade produzida na superfície.

A partir da experiência anteriormente adquirida, foram selecionados os quatro fatores a_p , f_z , V_c e a_e definidos dois níveis para cada fator e estabelecido as interações entre fatores considerados mais relevantes. Com base nesta informação foi construída a matriz ortogonal de testes, a qual foi usada na definição dos parâmetros de maquinagem. Para cada ensaio foram realizadas três observações da rugosidade média em quatro diferentes regiões da superfície e registado o nível de vibração produzido pela operação de maquinagem. Através da análise da razão S/N e ANOVA, permitiu identificar que a velocidade de corte V_c e a velocidade de avanço por dente f_z correspondem aos parâmetros com maior influência na rugosidade média da superfície. A partir destas, foram identificados os parâmetros ótimos de maquinagem, o que se veio a confirmar através da realização de um nono ensaio experimental. No que se refere ao nível de vibração média RMS gerado pelos ensaios, observou-se que estes apresentam uma fraca correlação com o valor da rugosidade da superfície. No entanto, há a destacar que o valor mínimo de vibração foi obtido para o ensaio com os parâmetros ótimos de maquinagem, o qual, também corresponde, à rugosidade mínima da superfície.

KEYWORDS

Improving the surface finish, milling, Taguchi method, orthogonal matrix, parameters optimization, vibrations.

ABSTRACT

This paper presents the application of the Taguchi method in order to reduce the EN AW-6082 aluminium average roughness, produced by the CNC milling operation by identifying the optimal parameters. It is also the objective of this work to investigate the vibration level generated by the machining process as a means to evaluate the surface roughness.

From previous experience, we selected the four factors a_p , f_z , V_c and a_e , defined two levels for each factor and established the interactions between factors that are considered most relevant. Based on this information, the orthogonal test matrix was constructed, which was used to define the machining tests. For each test three mean roughness observations were made on four different surface regions and was recorded the vibration level produced by the machining operation. Through the S/N ratio and ANOVA analysis, it was possible to identify the cutting speed V_c and the feed rate per tooth f_z are the most influential parameters for the average surface roughness analysis. From these, the optimal machining parameters were identified, which was confirmed by conducting a ninth experimental test. Regarding the average RMS vibration level measured in each test, it was observed that there is weak correlation with the surface roughness value. However, it should be noted that the minimum vibration value was obtained for the test with the optimal machining parameters, which also corresponds to the minimum surface roughness.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

a_e	Largura de corte
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
a_p	Profundidade de corte
ANOVA	Análise de Variância
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CNC	Comando Numérico Computorizado
D_c	Diâmetro de Corte
DOE	<i>Design of Experiments</i>
ECL	<i>Electrical Communication Laboratory</i>
GDL	Graus de liberdade
f_z	Avanço por dente
IC	Intervalo de confiança
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	<i>International Standardization Organization</i>
K	<i>kurtosis</i>
n	Velocidade de rotação da ferramenta
RMS	Desvio médio quadrático

SK	<i>Skewness</i>
S/N	<i>Signal-to-noise ratio</i>
V_c	Velocidade de corte
V_f	Velocidade de avanço
Z	Número de dentes

Lista de Unidades

dB	Decibel
fps	<i>Frames per second</i>
Hz	Hertz
KHz	Kilohertz
KW	Quilowatt
mm	Milímetros
m/min	Metros por minuto
mm/s	Milímetros por segundo
mm/t	<i>Millimeters per tooth</i>
rpm	Rotações por minuto
μm	Micrometro

Lista de Símbolos

α	Nível de significância
s	Desvio-padrão

%	Percentagem
---	-------------

Σ	Somatório
----------	-----------

GLOSSÁRIO DE TERMOS

Setup Configuração dos parâmetros do equipamento

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - OPERAÇÃO NO TRABALHO DE FRESAR (GERLING, 1977).....	38
FIGURA 2 - FRESAGEM A) CILÍNDRICA, B) FRONTAL OU DE TOPO (GERLING, 1977).....	39
FIGURA 3 – FRESAGEM COM MOVIMENTO A) DISCORDANTE, B) CONCORDANTE (ADAPTADO DE GERLING, 1977).....	39
FIGURA 4 - TIPOS DE FRESAS A) PERIFÉRICAS, B) FACIAIS, C) DE TOPO, (DORMER, 2005).....	40
FIGURA 5 – FRESADORA UNIVERSAL CONVENCIONAL (STUERMER-MACHINES.COM).....	41
FIGURA 6 – CENTRO DE MAQUINAGEM CNC.....	41
FIGURA 7 – DIÂMETRO DA FRESA - D_c (SANDVIK.COM).....	43
FIGURA 8 - PROFUNDIDADE DE CORTE - ap , LARGURA DE CORTE - ae (SANDVIK.COM).....	43
FIGURA 9 - ESPESSURA MÁXIMA DA APARA - f_z (SANDVIK.COM).....	44
FIGURA 10 – REPRESENTAÇÃO DA TEXTURA DA SUPERFÍCIE, (ADAPTADO DE BHUSHAN, 2000).....	45
FIGURA 11 - GENICHI TAGUCHI (REVISTAADNORMAS.COM).....	47
FIGURA 12 - DIAGRAMA REPRESENTATIVO DE UM PRODUTO/PROCESSO (ADAPTADO DE PHADKE, 1989).....	49
FIGURA 13 - DIAGRAMA DE GRAFOS LINEARES REPRESENTATIVO DAS INTERAÇÕES DA MATRIZ L_8 (ROSS, 1988).....	52
FIGURA 14 – FUNÇÃO PERDA DE QUALIDADE DE TAGUCHI (ROY, 2010).....	54
FIGURA 15 – DISTRIBUIÇÃO DA FUNÇÃO F DE FISHER-SNEDECOR (PORTALACTION.COM).....	60
FIGURA 16 - FRESA 490-020A20-08L / INSERTO 490R-08T308E-ML H13A (SANDVIK.COM).....	66
FIGURA 17 – FIXAÇÃO DO BLOCO NO CENTRO DE MAQUINAGEM.....	67
FIGURA 18 - CENTRO DE MAQUINAGEM HAAS VF-2 (MACHINETOOLS.COM).....	68
FIGURA 19 - RUGOSÍMETRO MAHR M2.....	69

FIGURA 20 – PLACA DE AQUISIÇÃO E ACELERÓMETRO USADOS NA RECOLHA DAS VIBRAÇÕES.	70
FIGURA 21 – MONTAGEM DO ACELERÓMETRO NA ÁRVORE DO CENTRO DE MAQUINAGEM CNC.....	71
FIGURA 22 – CÂMARA DE ALTA-VELOCIDADE <i>PHOTRON, FASTCAM MINI AX200</i>	71
FIGURA 23 - ESTRATÉGIA DE MAQUINAGEM	73
FIGURA 24 - REGIÕES DE MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE	74
FIGURA 25 - MÁSCARA DE PAPEL	74
FIGURA 26 - IMAGENS DAS SUPERFÍCIES PRODUZIDAS PELOS ENSAIOS DE MAQUINAGEM A) ENSAIO 1, B) ENSAIO 2, C) ENSAIO 3, D) ENSAIO 4, E) ENSAIO 5, F) ENSAIO 6, G) ENSAIO 7, H) ENSAIO 8.....	75
FIGURA 27 - GRÁFICO DE INTERVALOS DE RUGOSIDADE MÉDIA.....	80
FIGURA 28 – MÉDIAS DOS DADOS CONSIDERANDO 5 REGIÕES DE MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE	81
FIGURA 29 - GRÁFICO DA RUGOSIDADE MÉDIA DETERMINADA COM BASE NAS MEDIÇÕES EM 4 REGIÕES	82
FIGURA 30 - MÉDIAS DOS DADOS CONSIDERANDO APENAS 4 REGIÕES DE MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE .	83
FIGURA 31 – MÉDIA DA RAZÃO S/NLB CONSIDERANDO 4 REGIÕES DE MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE	83
FIGURA 32 - GRÁFICO DE INTERAÇÕES: $ap \times fz$, $ap \times Vc$ E $fz \times Vc$	85
FIGURA 33 – IMAGEM DA SUPERFÍCIE PRODUZIDA PELO ENSAIO DE CONFIRMAÇÃO.....	86
FIGURA 34 - REPRESENTAÇÃO DO NÍVEL DE VIBRAÇÃO RMS E MÉDIA DA RUGOSIDADE RA PARA OS 9 ENSAIOS	88
FIGURA 35 - IMAGENS OBTIDAS COM CÂMARA DE ALTA VELOCIDADE RELATIVAS AO ENSAIO 7, PARA POSIÇÕES DISTINTAS DO PERCURSO DE MAQUINAGEM: A) E B) NA FASE INICIAL, C) E D) NA FASE FINAL.....	89
FIGURA 36 - IMAGENS OBTIDAS COM A CÂMARA DE ALTA VELOCIDADE PARA DIFERENTES POSIÇÕES DO PERCURSO RELATIVAS AO ENSAIO DE CONFIRMAÇÃO: A) E B) NA FASE INICIAL, C) E D) NA FASE FINAL.....	90

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - COMPARAÇÃO ENTRE O FATORIAL COMPLETO E O MÉTODO DE TAGUCHI (ADAPTADO DE ROY, 2010)	48
TABELA 2 – DEFINIÇÃO DAS MATRIZES ORTOGONAIS (KARNA, SINGH, & SAHAI, 2012)	50
TABELA 3 – ESQUEMA PARA A DETERMINAÇÃO DOS GRAUS DE LIBERDADE.	51
TABELA 4 – MATRIZ ORTOGONAL DE EXPERIÊNCIAS L_8 (ROSS, 1988)	51
TABELA 5 – REPRESENTAÇÃO DAS INTERAÇÕES DOS FATORES DA MATRIZ L_8 (ROSS, 1988)	52
TABELA 6 – DEMONSTRAÇÃO DO CÁLCULO DOS NÍVEIS DA INTERAÇÃO 1×2 , PARA A MATRIZ L_8	53
TABELA 7 – PLANEAMENTO DAS EXPERIÊNCIAS PARA UM PROBLEMA COM 4 FATORES.	54
TABELA 8 – APRESENTAÇÃO DA VARIABILIDADE, GRAUS DE LIBERDADE E VARIÂNCIA AMOSTRAL, PARA A ANÁLISE DA ANOVA.	58
TABELA 9 - NÍVEIS DOS PARÂMETROS.....	64
TABELA 10 - MATRIZ DE EXPERIÊNCIAS DEFINIDA PELOS NÍVEIS	65
TABELA 11 - MATRIZ DE EXPERIÊNCIAS DEFINIDA PELOS PARÂMETROS	65
TABELA 12 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA LIGA DE ALUMÍNIO EN AW-6082 (POLYLANEMA.PT).....	66
TABELA 13 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO CENTRO DE MAQUINAGEM HAAS VF-2	68
TABELA 14 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO RUGOSÍMETRO MAHR M2	69
TABELA 15 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA CÂMARA DE ALTA-VELOCIDADE.....	72
TABELA 16 - MATRIZ EXPERIMENTAL E RESULTADO DAS RUGOSIDADES NAS 5 REGIÕES.....	80
TABELA 17 – MATRIZ EXPERIMENTAL E RESULTADO DAS RUGOSIDADES EM 4 REGIÕES	82
TABELA 18 – ANOVA OBTIDA ATRAVÉS DO MODELO LINEAR GENERALIZADO.....	84
TABELA 19 – ANOVA COM AJUSTE DE MODELO LINEAR GENERALIZADO - <i>STEPWISE</i>	85

TABELA 20 - MATRIZ EXPERIMENTAL E RESULTADO DE CONFIRMAÇÃO.....	86
TABELA 21 - RESULTADOS DO NÍVEL DE VIBRAÇÃO RMS E MÉDIA DA RUGOSIDADE RA PARA OS 9 ENSAIOS	87
TABELA 22 - VALORES DE RA, 1º ENSAIO	104
TABELA 23 – VALORES DE RA, 2º ENSAIO.....	104
TABELA 24 – VALORES DE RA, 3º ENSAIO.....	104
TABELA 25 - VALORES DE RA, 4º ENSAIO	105
TABELA 26 – VALORES DE RA, 5º ENSAIO.....	105
TABELA 27 - VALORES DE RA, 6º ENSAIO	105
TABELA 28 - VALORES DE RA, 7º ENSAIO	106
TABELA 29 - VALORES DE RA, 8º ENSAIO	106
TABELA 30 - VALORES DE RA, ENSAIO DE CONFIRMAÇÃO.....	106

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	Enquadramento	29
1.2	Objetivos	31
1.3	Metodologia	32
1.4	Estrutura.....	32
2	FUNDAMENTOS.....	37
2.1	Processos de maquinagem.....	37
2.1.1	Fresagem	38
2.1.2	Fresas.....	40
2.1.3	Fresadoras.....	40
2.1.4	Principais parâmetros de corte na fresagem	42
2.2	Indústria 4.0	44
2.3	Acabamento superficial	45
2.4	Método de Taguchi	46
2.4.1	Introdução	47
2.4.2	Visão geral do Método de Taguchi.....	48
2.4.3	Planeamento de experiências – Construção de matrizes ortogonais	48
2.4.4	Função perda de qualidade de Taguchi.....	54

2.4.5	Análise dos resultados.....	55
3	ENSAIOS EXPERIMENTAIS	63
3.1	Definição dos fatores e níveis	63
3.2	Matriz de Taguchi.....	64
3.3	Razão Sinal-Ruído.....	65
3.4	Ferramenta, material e equipamentos	65
3.4.1	Ferramenta.....	66
3.4.2	Material	66
3.4.3	Equipamentos laboratoriais	67
3.5	Ensaio e métodos	72
3.5.1	Procedimento	72
3.5.2	Estratégia de maquinagem.....	72
3.5.3	Operação de maquinagem	73
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	79
4.1	Resultados da rugosidade obtidos através do método de Taguchi	79
4.1.1	Análise da influência dos fatores, das regiões de medição e das observações.....	80
4.2	Resultados das vibrações produzidas durante os ensaios de maquinagem	86
4.3	Resultados das imagens de alta velocidade.....	88
5	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	93
5.1	Conclusões	93
5.2	Propostas de trabalhos futuros.....	94
6	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	97
6.1	Artigos, livros, revistas e teses	97

6.2	Outras fontes.....	100
7	ANEXOS.....	103
7.1	Anexo 1 – Exemplo de um perfil de rugosidade	103
7.2	Anexo 2 – Valores e média da rugosidade para as 5 regiões.....	104

INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

1.2 Objetivos

1.3 Metodologia

1.4 Estrutura

1 Introdução

O presente documento descreve o trabalho desenvolvido sobre o tema “Determinação dos parâmetros ótimos na operação de acabamento superficial do alumínio EN AW-6082” no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica, no ramo de Gestão Industrial, do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). Este tem como principal objetivo determinar a combinação ótima de parâmetros que conduz à menor rugosidade superficial no processo de acabamento do alumínio EN AW-6082, por aplicação do método de Taguchi. É igualmente objetivo, investigar a utilização do nível de vibrações produzidas durante a maquinagem, como método alternativo para a determinação da combinação ótima dos parâmetros de maquinagem.

1.1 Enquadramento

Na atualidade, a competitividade do mercado obriga a indústria da metalomecânica a produzir com mais qualidade, maior quantidade, no menor tempo e com custos cada vez mais reduzidos. Por estes motivos, o foco da indústria de maquinagem centra-se em obter produtos de elevada qualidade dimensional, bom acabamento superficial, elevadas taxas de produção e maior vida útil das ferramentas, com evidentes vantagens económicas e menor impacto ambiental (A. K. Ghani, Choudhury, & Husni, 2002; Somashekara & Lakshmana Swamy, 2012; Thamizhmanii, Saparudin, & Hasan, 2007). De forma a atingir estes objetivos, é frequente na indústria metalomecânica recorrer-se ao uso de equipamentos de comando numérico computadorizado (CNC). A opção pelos equipamentos CNC deve-se ao menor tempo de maquinagem, elevada precisão dimensional e elevada flexibilidade (Maurya, Sharma, & Diwaker, 2012; Pereira, Ribeiro, & Queijo, 2018). A tecnologia CNC é utilizada em vários tipos de máquinas-ferramentas da área dos processos de fabrico por arranque de apara, como por exemplo: furadoras, tornos, fresadoras, entre outros. Na maquinagem de materiais metálicos, a fresagem CNC assume ser, sem dúvida, um dos processos mais importantes (Anwar, Uz, & Khan, 2016; Maurya et al., 2012).

A baixa rugosidade superficial e a elevada precisão dimensional são parâmetros muito importantes para o desempenho dos componentes maquinados, por permitirem aumentar a resistência ao desgaste, a resistência à fadiga e melhorar a sua funcionalidade (Anwar et al., 2016). A qualidade de uma peça em termos de rugosidade superficial e a tolerância dimensional é influenciada pelos parâmetros de maquinagem,

geometria e material da ferramenta de corte, material da peça e vibração geradas durante o corte (A. K. Ghani et al., 2002). Normalmente os parâmetros de maquinagem são definidos em função da experiência do operador, a qual resulta do tipo de máquina e ferramenta usadas, da operação a executar, geometria da peça gerada, tipo de material a maquinar e nível de vibração produzidas durante o corte (A. K. Ghani et al., 2002; Somashekara & Lakshmana Swamy, 2012). Por esse motivo, é frequente existir um subaproveitamento das capacidades produtivas e desempenho das máquinas e ferramentas.

Em alternativa, a determinação dos parâmetros ótimos de maquinagem em cada operação requer a realização prévia de um conjunto elevado de ensaios, o que se torna bastante moroso e incompatível com as exigências de resposta atuais da indústria. Contudo, existem um conjunto de técnicas de otimização que permitem reduzir significativamente o número e o tempo dos ensaios para se obter a combinação ótima de parâmetros (J. A. Ghani, Choudhury, & Hassan, 2004). Algumas das técnicas de otimização mais usadas na definição dos parâmetros de maquinagem são o método de Taguchi (Moshat, Datta, Bandyopadhyay, & Pal, 2010), o método de resposta de superfície (Benardos & Vosniakos, 2003), a lógica difusa (Ribeiro, César, & Lopes, 2017), os algoritmos genéticos (Aggarwal & Singh, 2005) e análise relacional de Grey (Pereira et al., 2018). De entre as técnicas acima enumeradas, a que mais se destaca é o método de Taguchi, por ser o mais usado na indústria de maquinagem (Aggarwal & Singh, 2005). Vários autores têm aplicado o método de Taguchi na determinação dos parâmetros ótimos com o objetivo de reduzir a rugosidade superficial produzida no processo de fresagem do aço EN31, aço endurecido AISI H13 e aço endurecido 1.2738 (Anwar et al., 2016; Gopalsamy, B.; Ghosh, S.; Mondal, 2009; Ribeiro et al., 2017) e no processo de torneamento do aço S45C e do aço SKD11 (JIS) (Tzeng, Lin, Yang, & Jeng, 2009; Yang & Tarn, 1998).

O método de Taguchi é uma ferramenta estatística desenvolvida pelo Dr. Genichi Taguchi, com diferentes aplicações, entre as quais se destaca a otimização dos parâmetros de corte no processo de fresagem (Gopalsamy, Mondal, & Ghosh, 2009; Yang & Tarn, 1998). Este método de otimização tem por base a definição de matrizes ortogonais de combinações do número mínimo de experiências a realizar, os quais permitem encontrar a combinação ótima que conduzem à minimização ou maximização de uma função objetivo, chamada relação sinal-ruído (S/N) (Anwar et al., 2016; Sarıkaya, Dilipak, & Gezgin, 2015). Este método é geralmente acompanhado por uma análise de variância dos parâmetros em estudo (ANOVA), no sentido de identificar quais os parâmetros mais influentes para a função objetivo.

A otimização dos parâmetros de corte obtida pelo método de Taguchi permite, assim, uma abordagem simples, eficiente e sistemática, que aumenta a qualidade e a economia

nos processos de maquinagem (J. A. Ghani et al., 2004; Somashekara & Lakshmana Swamy, 2012; Yang & Tarng, 1998).

A qualidade da superfície produzida pelo processo de corte também está diretamente relacionada com o nível de vibração gerada. Por seu lado, a amplitude de vibração é função do estado da aresta de corte da ferramenta, parâmetros de maquinagem e estado da superfície a maquirar (Toh, 2004). A vibração da ferramenta é altamente indesejável já que influencia a rugosidade da superfície maquirada, afetando a qualidade da superfície e a precisão dimensional, a vida útil da ferramenta e da máquina-ferramenta e, no caso particular da fresagem, a vida útil do fuso (A. K. Ghani et al., 2002; Toh, 2004).

Através da análise do espectro em frequência da amplitude de vibração é possível estimar o desgaste de uma ferramenta, o qual se relaciona com o nível de vibrações produzido às frequências mais elevadas (A. K. Ghani et al., 2002; Orhan, Er, Camuşcu, & Aslan, 2007; Toh, 2004). Por outro lado, a medição do nível de vibração tem sido usado para avaliar o estado da ferramenta, qualidade da superfície produzida pela maquinagem, desvios dimensionais e fenómenos de auto-excitação (Orhan et al., 2007).

1.2 Objetivos

O principal objetivo é a aplicação do método de Taguchi para determinar a combinação de parâmetros ótimos de fresagem que conduzem ao melhor acabamento superficial de peças fabricadas em alumínio EN AW-6082. Um outro objetivo é mostrar que o nível de vibração medida na árvore da máquina está diretamente relacionado com a rugosidade produzida na peça pelo processo de fresagem CNC. Assim, será possível definir novas estratégias que permitam, de modo mais simples e em tempo real, encontrar os parâmetros de maquinagem por forma a minimizar a rugosidade e aumentar a longevidade da ferramenta.

Para atingir este objetivo principal, é necessário realizar as seguintes tarefas:

- Estudar as características do material a maquirar;
- Analisar os parâmetros fornecidos pelo fabricante das ferramentas;
- Utilizar o método de Taguchi de forma a diminuir o número de combinações possíveis e conseqüentemente o número de ensaios a realizar;
- Efetuar ensaios de maquiragem segundo a matriz de Taguchi;
- Medir e comparar a rugosidade das superfícies após a maquinagem;
- Utilizar a análise estatística dos dados pelo método da análise de variância (ANOVA), de modo a perceber quais os parâmetros que mais influenciam o acabamento superficial;
- Medir e analisar as vibrações durante a maquinagem;

- Correlacionar o nível de vibração com a qualidade gerada durante a maquinagem;
- Retirar conclusões dos resultados;

1.3 Metodologia

Este trabalho seguiu a seguinte metodologia:

- Estudo do estado da arte;
- Estudo do método de Taguchi;
- Estudo dos processos de maquinagem com destaque do processo de fresagem;
- Estudo das ferramentas de corte;
- Estudo do alumínio EN AW-6082 usado no processo de maquinagem;
- Estudo dos ensaios a efetuar;
- Determinação das condições práticas para a realização dos ensaios;
- Realização dos ensaios de maquinagem e medição das vibrações geradas na árvore da máquina;
- Medição das rugosidades após cada ensaio de maquinagem;
- Medição das vibrações em vazio;
- Realização da filmagem de alta velocidade;
- Elaboração do relatório da presente Dissertação.

1.4 Estrutura

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, cujo conteúdo se resume em seguida:

Capítulo 1- É realizada a descrição de alguns trabalhos mais relevantes publicados na área da maquinagem, que envolvem a aplicação do método de Taguchi para a otimização dos parâmetros de corte em função dos objetivos a atingir. São apresentados os principais objetivos, descrita a estrutura e um resumo dos temas abordados em cada capítulo deste trabalho.

Capítulo 2- São abordados os fundamentos teóricos que sustentam a aplicação da metodologia de Taguchi à otimização dos parâmetros de maquinagem do bloco de alumínio. Este inicia com uma breve introdução aos processos de maquinagem, com destaque para a fresagem e seus parâmetros de maquinagem. É abordada a importância da monitorização dos parâmetros de maquinagem e o seu enquadramento na indústria 4.0. Apresentados os parâmetros que permitem caracterizar a qualidade do acabamento superficial. Por fim, é descrito em detalhe o método de Taguchi, com destaque para o planeamento de experiências e análise de variância.

Capítulo 3- É dedicado à realização dos ensaios experimentais, sendo descrito o equipamento e o procedimento seguido na realização das experiências.

Capítulo 4- São processados e analisados os resultados obtidos nas experiências e determinado a combinação ótima de parâmetros de maquinagem. São apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios experimentais.

Capítulo 5- São apresentadas as principais conclusões deste trabalho e sugeridas linhas orientadoras para a realização de trabalhos futuros.

FUNDAMENTOS

2.1 Processos de maquinagem

2.2 Indústria 4.0

2.3 Acabamento superficial

2.4 Método de Taguchi

2 Fundamentos

Neste capítulo são abordados alguns conceitos teóricos importantes para a correta compreensão do trabalho desenvolvido. Este inicia-se com a descrição dos processos de maquinagem detalhando a fresagem e os seus principais parâmetros. É também explicado a importância do acabamento superficial. São descritos sumariamente alguns dos métodos de otimização e detalhado o método de Taguchi aplicado à otimização dos parâmetros de maquinagem. Por fim, é apresentada a técnica estatística da análise de variância (ANOVA).

2.1 Processos de maquinagem

A maquinagem é a designação dada aos processos de fabrico por arranque de apana, como por exemplo a fresagem, o torneamento, a furação, entre outros. Este é o processo de fabrico mais utilizado na indústria metalomecânica, ao ponto de se poder medir a evolução da riqueza de um país, através da análise do investimento em máquinas-ferramentas (Childs, Maekawa, Obikawa, & Yamane, 2000). No processo de produção são usadas operações complementares de acabamento, principalmente, em peças metálicas provenientes de outros processos de fabrico, como fundição e forjamento. No caso específico de operações de acabamento pretende-se fabricar peças com elevada precisão dimensional, normalmente com toleranciamento de 50 μm , e com bom acabamento superficial com rugosidade média até 1 μm . Com o desenvolvimento das máquinas-ferramentas é hoje possível fabricar peças de elevada complexidade geométrica, garantir toleranciamentos apertados e com bom acabamento superficial, sendo para isso necessário definir os parâmetros ótimos de maquinagem. Um outro aspeto relevante é que o processo de maquinagem não afeta significativamente as propriedades mecânicas dos componentes.

As operações de maquinagem são executadas por máquinas-ferramentas, as quais são classificadas em função do tipo de operação que executam, sendo algumas das mais importantes: fresadora, torno, furadora e retificadora. No caso das fresadoras, as operações dividem-se em fresagem de superfície planas ou curvas, fresagem de escatéis em veios, fresagem de placas guia, fresagem de peças hexagonais ou sextavadas, realização de cavidades, entalhes, ranhuras, dentes de engrenagens, etc. Os tornos mecânicos são utilizados essencialmente para produzir peças de revolução. As principais operações a executar são o torneamento cilíndrico, facejamento, furação, abertura de

cavidades, torneamento cônico, roscagem, etc. As furadoras são máquinas usadas principalmente para a realização de furos, que poderão ser cegos ou passantes, sendo usadas ferramentas cortantes.

Como o principal objetivo deste trabalho é definir os parâmetros ótimos na operação de facejamento realizado por fresagem, irá ser descrito em seguida com algum detalhe esta operação e os parâmetros que estão associados.

2.1.1 Fresagem

A fresagem é um dos processos de maquinagem mais utilizados devido, sobretudo, à sua versatilidade e possibilidade de realizar peças de diversas geometrias complexas. O processo é realizado através da interação entre a ferramenta, a fresa que possui movimento de rotação, e o material ou peça a ser maquinada, que possui movimento linear ou de translação, Figura 1. Desta interação resulta a remoção do material sobre a forma de apra para obtenção da geometria final da peça (Gerling, 1977).

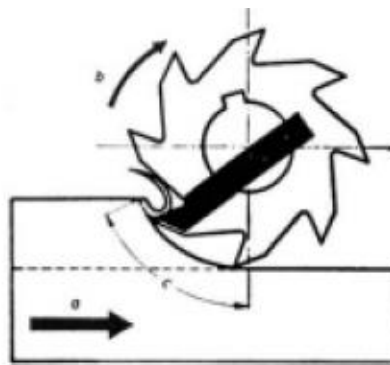


Figura 1 - Operação no trabalho de fresar (Gerling, 1977)

A fresagem divide-se em fresagem cilíndrica e fresagem frontal ou de topo. Na primeira, o eixo da fresa encontra-se disposto paralelamente à superfície de trabalho da peça, quanto à segunda, o eixo da fresa encontra-se perpendicular à superfície de trabalho, Figura 2.

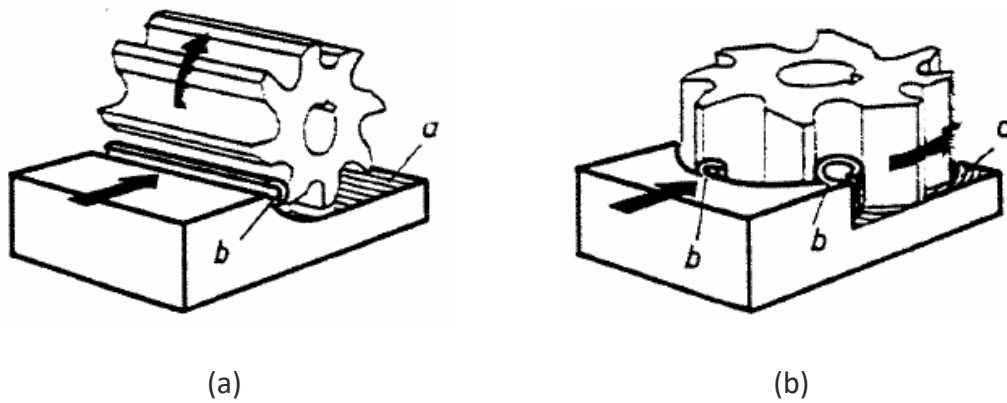


Figura 2 - Fresagem a) cilíndrica, b) frontal ou de topo (Gerling, 1977)

Sempre que possível deve-se optar pela fresagem frontal ou de topo, por esta apresentar um rendimento em geral superior entre 15 % a 20 % em relação à fresagem cilíndrica, a qual apresenta uma carga irregular devido à forma da avara em vírgula e uma ligeira ondulação das superfícies maquinadas (Gerling, 1977). No que se refere à fresagem cilíndrica, o movimento de fresagem pode ocorrer de duas formas, o avanço da peça é contrário ao movimento de rotação da fresa ou o avanço da peça e rotação da fresa possuem o mesmo sentido, Figura 3. O primeiro é designado de movimento discordante, Figura 3 (a), e é geralmente o mais utilizado na maquinagem convencional, porque permite eliminar folgas no acionamento da mesa de trabalho. No que se refere ao movimento concordante, Figura 3 (b), este é mais utilizado nos centros de maquinagem, porque não existe o problema associado às folgas na mesa e a avara gerada tem forma decrescente até ao fim do corte.

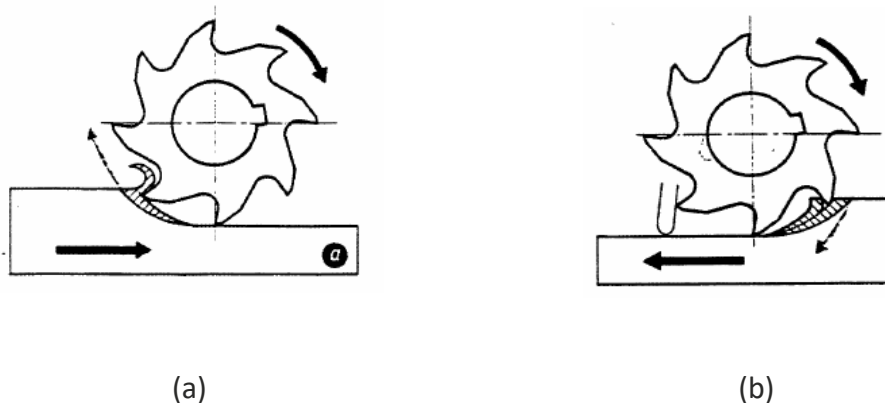


Figura 3 – Fresagem com movimento a) discordante, b) concordante (adaptado de Gerling, 1977)

2.1.2 Fresas

As ferramentas de corte designadas por fresas são constituídas por arestas de corte que possuem a função de remover material da peça. A evolução dos equipamentos de maquinagem deve-se, em grande parte, à grande evolução das ferramentas de corte. Com a introdução de novos revestimentos e novas formas geométricas, foi possível incrementar os parâmetros de maquinagem e alargar o processo de maquinagem de novos materiais. A procura de ferramentas com maior desempenho conduziu ao desenvolvimento de ferramentas específicas para cada aplicação, sendo por esta razão que na atualidade existem no mercado oferta de um elevado número de fresas. Porém, estas podem ser agrupadas de acordo com orientação do eixo de rotação da fresa relativamente à superfície da peça a maquinar, sendo designadas por fresas periféricas ou cilíndricas, quando o eixo é paralelo à superfície, e fresas faciais ou de topo, quando o eixo é perpendicular à superfície (Dormer, 2005). As fresas faciais distinguem-se das fresas de topo no fato das segundas possuírem uma aresta de corte lateral superior, Figura 4.

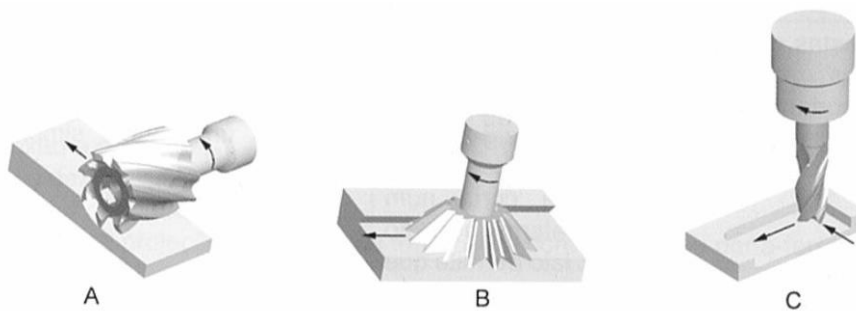


Figura 4 - Tipos de fresas a) periféricas, b) faciais, c) de topo, (Dormer, 2005)

Na escolha da ferramenta mais adequada à operação de maquinagem deverão ser considerados o material a maquinar, os parâmetros de corte e as características da máquina-ferramenta (Martins, 2017). Para garantir uma boa estabilidade no processo de maquinagem deverão, também, serem observados o diâmetro, a rigidez e o comprimento da ferramenta. No que diz respeito às fresas, estas podem ser de corpo integral ou corpo com insertos. As últimas são preferíveis uma vez permitem a utilização de diferentes tipos de insertos e a sua substituição em caso de desgaste ou degradação ao contrário das primeiras, o que se traduz numa solução mais económica.

2.1.3 Fresadoras

As fresadoras foram evoluindo ao longo dos tempos, estas eram distinguidas em função da posição da árvore principal, sendo designadas por fresadoras verticais, fresadoras horizontais e fresadoras universais. No caso das fresadoras universais, a árvore tanto pode estar na horizontal como na vertical. Com o desenvolvimento tecnológico foram

sendo incorporados nas fresadoras sistemas automáticos de controlo, as quais passaram a ser designadas por fresadoras não-convencionais, para as distinguir das fresadoras convencionais não automatizadas. Na Figura 5 é apresentada um exemplo de uma fresadora universal convencional.



Figura 5 – Fresadora universal convencional (Stuermer-machines.com)

A necessidade do aumento de produtividade, conduziu à introdução, nos processos de fabrico, de centros de maquinagem completamente automatizados, conhecidos por CNC, cujo um exemplo se apresenta na Figura 6. Para além das operações realizadas pelas fresadoras convencionais, estas permitem realizar, também, algumas das operações de torneamento.



Figura 6 – Centro de maquinagem CNC

Os centros de maquinagem são máquinas completamente autónomas que permitem combinar diversas operações, possuindo, por isso, várias vantagens como, maior autonomia de trabalho, movimentos simultâneos de vários eixos, melhores

acabamentos, troca automática de ferramentas, sistema automáticos de alimentação de matéria-prima, sistema de remoção de aparas, maior segurança, entre outras.

As operações nas máquinas CNC requerem a construção de um programa com os percursos a realizar pelas ferramentas. Este pode ser elaborado manualmente ou com recurso a programas comerciais, sendo que, neste caso, fazem uso de algoritmos de interpolação para definir a melhor trajetória das ferramentas, os quais são designados por *Computer Aided Manufacturing (CAM)*. Uma das grandes vantagens da utilização do CAM é a possibilidade de simular todo o processo, permitindo melhorar o tempo de maquinagem e prevenir eventuais acidentes.

Antes do início das operações de maquinagem é necessário referenciar a origem das peças e medir as ferramentas, para que a máquina execute corretamente todo o processo. Atualmente, estas operações são executadas automaticamente com a incorporação de sondas de medição, o que permitem maior flexibilidade, rapidez e precisão. A flexibilização das máquinas CNC tornou possível que peças diferentes sejam executadas em série. Na procura de maximizar o tempo de produção, os centros de maquinagem dispõem hoje de múltiplas mesas, o que permite realizar em paralelo a preparação das peças enquanto realiza as operações de maquinagem noutra das mesas. Também já existem centros de maquinagem com múltiplos eixos, múltiplas estações e maquinagem paralela, o que permite executar múltiplas operações simultaneamente com elevada precisão e em menor tempo.

2.1.4 Principais parâmetros de corte na fresagem

Os parâmetros de maquinagem devem ser determinados com base nas recomendações do fabricante da ferramenta. Estes são definidos em função do tipo de material a maquinar, do material da ferramenta de corte, da potência do equipamento e do acabamento superficial pretendido. Na operação de acabamento numa superfície plana, os fabricantes recomendam a utilização de fresas faceais ou de topo, dependendo da área de superfície a maquinar. Na Figura 7 é possível observar fresas com porta-insertos e fresas de corpo integral, sendo o diâmetro de corte definido pela distância da aresta principal que se encontra na face paralela à fresa.

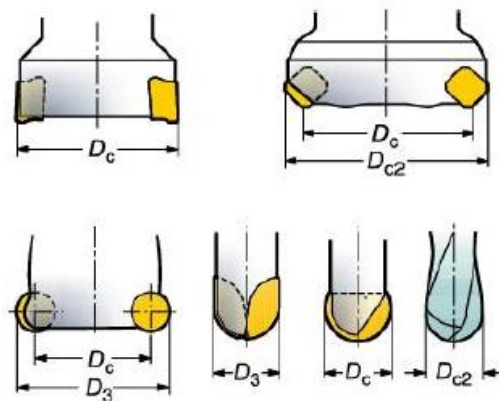


Figura 7 – Diâmetro da fresa - D_c (Sandvik.com)

Um dos principais parâmetros indicado pelo fabricante da ferramenta é a velocidade de corte (V_c), a qual corresponde à velocidade de contato da aresta de corte com a peça. A partir da velocidade de corte e conhecido o diâmetro de corte são determinados a velocidade do fuso,

$$n = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot D_c} \quad [\text{rpm}] \quad (1)$$

sendo V_c a velocidade de corte em m/min e D_c o diâmetro de corte em mm .

A profundidade de corte (a_p) corresponde à penetração da ferramenta de corte no material na direção axial e está limitada principalmente pela aresta de corte e pela potência da máquina, Figura 8. A largura de corte (a_e) define a penetração da ferramenta de corte na direção radial.

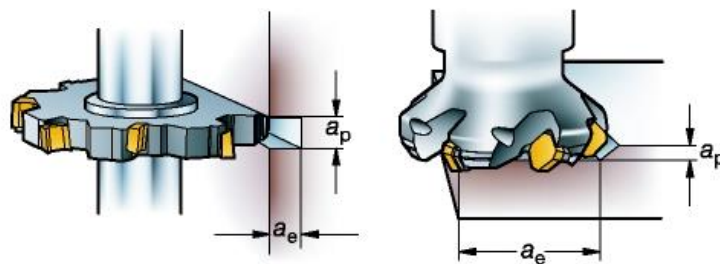


Figura 8 - Profundidade de corte - a_p , Largura de corte - a_e (Sandvik.com)

O avanço por dente (f_z) representado na Figura 9, corresponde à espessura máxima da aparado removida por cada aresta de corte durante o movimento de rotação da ferramenta, valor máximo definido pelo fabricante. Todavia, este valor deve ser determinado para cada condição de maquinagem, tendo em atenção o volume máximo

a ser removido, o qual é definido com base na velocidade de corte, profundidade de corte e avanço por dente.

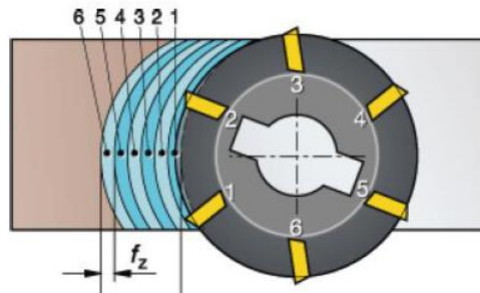


Figura 9 - Espessura máxima da aparatura - f_z (Sandvik.com)

A velocidade de avanço (V_f) representa a velocidade de deslocamento da peça em relação à ferramenta de corte, a qual é definida pelo avanço por dente, f_z em mm , número de dentes Z e velocidade de rotação da ferramenta n .

$$V_f = f_z \cdot n \cdot Z \quad [mm/min] \quad (2)$$

2.2 Indústria 4.0

Na indústria moderna a tendência é para produzir a baixo custo, com elevada qualidade e em menor tempo. Estes objetivos são alcançados através da aplicação de uma metodologia de controlo absoluto do processo produtivo, a qual assenta na gestão da informação em tempo real gerada por todo o processo. Esta tecnologia é chamada de indústria 4.0, a qual fornece aos decisores uma vasta quantidade de informação útil para a toma de decisões em qualquer momento, ajudando-os a identificar as principais áreas que podem beneficiar da inovação e melhoria tecnológica. Permite a rápida partilha da informação entre os colaboradores e a distribuição de uma série de tarefas. A tecnologia ainda possui a capacidade de tomar decisões de forma autónoma mediante parâmetros pré-definidos. Salvo situações de interferência ou de conflito, as decisões são tomadas a um nível superior. As máquinas CNC inteligentes, permitem aumentar a precisão e a eficiência dos processos, ao mesmo tempo que aumenta a autonomia das máquinas na tomada de decisões, libertando os operadores para outras tarefas. Além disso, as máquinas são capazes de detetar, diagnosticar e corrigir vários tipos de erros durante a produção, fornecendo soluções otimizadas para produção. Sensores como o de vibrações servem para medir a energia de vibração produzidos durante o processo de corte. A análise do seu sinal permite a deteção em tempo real do desgaste prematuro da ferramenta, a quebra da aresta de corte e a identificação de condições anormais de

maquinagem, mesmo em operações que geram forças de corte pequenas. É de fácil instalação quer em máquinas existentes e novas. A sua introdução permite controlar a máquina em tempo real e aumentar a fiabilidade do processo de maquinagem.

2.3 Acabamento superficial

A textura da superfície é o desvio repetitivo ou aleatório relativamente à superfície nominal que define a sua topografia tridimensional (Bhushan, 2000). Esta inclui a rugosidade de dimensão nano e micro, ondulações (macro-rugosidades), estrias e falhas, Figura 10. As nano e micro-rugosidades são formadas por flutuações na superfície de pequeno comprimento, caracterizadas por picos (máximos locais) e vales (mínimos locais) de amplitudes e de espaçamento variável. Estas são intrínsecas ao processo de produção, produzidas pelas marcas de avanço da ferramenta e por outras irregularidades resultantes do processo de arranque do material. Ondulação na superfície de maior comprimento são designadas de macro-rugosidades. Esta ondulação pode resultar de fatores como desvios da máquina ou da peça de trabalho, vibração, ressonâncias, dilatações térmicas ou deformações plásticas. A ondulação inclui todas as irregularidades cujo comprimento é maior que as macro-rugosidades e menor que o comprimento de amostragem. As estrias são padrões predominantes na superfície, com a direção determinada pelo processo de maquinagem da peça. As falhas são interrupções involuntárias na textura da superfície.

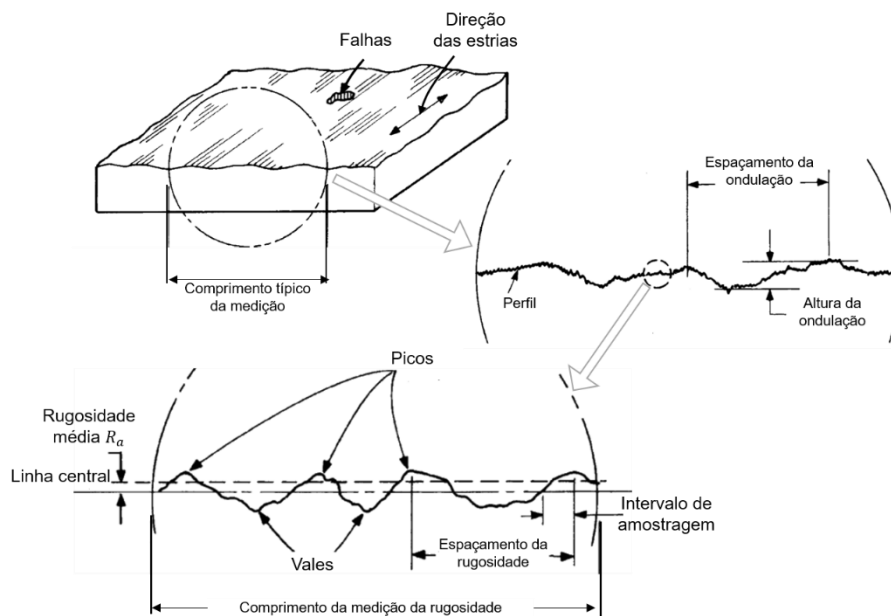


Figura 10 – Representação da textura da superfície, (adaptado de Bhushan, 2000)

A rugosidade da superfície corresponde às variações na altura em relação a um plano de referência. Este pode ser medido ao longo de um perfil ou de um conjunto de perfis

paralelos, no caso da caracterização de uma área. Geralmente é caracterizada segundo a *American National Standards Institute* (ANSI) e a *International Standardization Organization* (ISO), por dois parâmetros estatísticos: (1) a rugosidade média R_a , a média da linha central CLA ou a média aritmética AA; (2) o desvio padrão ou variância σ ou o desvio médio quadrático (RMS) R_q . Dois parâmetros estatísticos menos usados são *skewness* (Sk) e a *kurtosis* (K). Outros parâmetros também usados para descrever a rugosidade superficial são o valor extremo da altura R_t , o valor de máximo de pico R_p , o valor máximo de vale R_v , a altura média entre o vale e o pico R_z e a altura média de pico R_{pm} (Bhushan, 2000).

2.4 Método de Taguchi

Tradicionalmente o processo de seleção dos parâmetros de maquinagem é deixado ao critério do operador da máquina. Nesta situação, a experiência do operador tem um papel fundamental, mas mesmo quando muito experiente é difícil alcançar os parâmetros ótimos de maquinagem. A configuração desses parâmetros determina as características de qualidade das peças fabricadas. A necessidade de selecionar e implementar as melhores condições de fabrico tem motivado a aplicação das técnicas numéricas de otimização nas três últimas décadas (Aggarwal & Singh, 2005). Estas são aplicadas ao processo de maquinagem para a seleção dos parâmetros ótimos. Algumas das técnicas de otimização recentemente utilizadas são a lógica difusa (Jenarthanan, Nishanth, & Bharathwaj, 2016; Ramanujam et al., 2014), os algoritmos genéticos (D'Addona & Teti, 2013), métodos heurísticos (Chen & Chen, 2004), o método de resposta de superfície (Benardos & Vosniakos, 2003) e o método de Taguchi (Abhang & Hameedullah, 2012; Blanca, 2015; Haşçalık & Çaydaş, 2008; Ribeiro et al., 2017; Vishnu, Tilak, Guruvaiah Naidu, Raju, & Professor, 2017). De entre estes, o método Taguchi é o mais usado pelo facto de requerer um pequeno número de ensaios e pela facilidade na sua aplicação. No âmbito deste trabalho este será aplicado à determinação dos parâmetros ótimos de maquinagem na operação de acabamento da superfície de uma peça de alumínio. Em seguida será descrito a filosofia que está na origem no método de Taguchi e a sua aplicação à otimização dos parâmetros de maquinagem.

Nos dias de hoje a qualidade dos produtos assume um papel decisivo na competitividade das empresas. Na procura de aumentar a eficiência do processo ou produto, o método de Taguchi tem adquirido maior popularidade na indústria produtiva. O método de Taguchi assenta em técnicas estatísticas e procura a melhoria da qualidade dos produtos e processos, através de um projeto robusto, insensível às variáveis extrínsecas, ou seja, fatores de ruído. Alguns dos conceitos abordados por Taguchi, são o planeamento de experiências, *Design of Experiments* (DOE), função custo, fatores de controlo, fatores de ruído e projeto robusto através da minimização do ruído.

2.4.1 Introdução

Genichi Taguchi foi um engenheiro e estatístico Japonês, cuja obra sobre melhoria da qualidade lhe proporcionou a atribuição do primeiro prêmio Deming em 1960, Figura 11. Nasceu em Tokamachi no Japão em 1924 e veio a falecer a 2 de junho de 2012 em Tóquio no Japão.



Figura 11 - Genichi Taguchi (Revistaadnormas.com)

Taguchi trabalhou para o Instituto de Estatística e Matemática de 1948 a 1950 e ganhou reconhecimento pelo seu contributo no desenvolvimento de experiências industriais relacionados com a produção de penicilina. Em 1950 foi contratado pela *Electrical Communication Laboratory* (ECL) como controlador estatístico da qualidade e foi ganhando popularidade nesta área.

Centrado numa perspetiva diferente e revolucionária acerca da qualidade mudou todo o paradigma da época. Segundo ele, a qualidade teria de ser projetada para o produto e não para a sua inspeção, dever-se-ia apostar na minimização dos desvios em relação ao valor alvo e tornar o produto imune a fatores ambientais incontroláveis. Baseando-se nesta filosofia, Taguchi desenvolveu métodos estatísticos com o propósito de otimizar os processos de engenharia e melhorar a qualidade dos produtos produzidos. No início dos anos 80, Taguchi introduziu os seus métodos de melhoria da qualidade nos Estados Unidos. O seu objetivo era otimizar o desempenho utilizando métodos estatísticos, conhecido como planeamento de experiências (DOE), já introduzido originalmente em Inglaterra na década de 1920 por Ronald Fisher (Roy, 2010).

Com o objetivo de facilitar o uso e tornar mais eficaz a sua metodologia, Taguchi recomendou uma versão padronizada do DOE e desenvolveu formas para a sua aplicação prática e análise dos seus resultados. Esta foi uma ferramenta muito atraente na área da qualidade, sobretudo nos Estados Unidos, pois permitiu melhorar o nível da qualidade dos seus produtos relativamente ao mercado externo, em particular no ramo automóvel. Desde então foram desenvolvidos grandes esforços no sentido de ensinar o seu método.

Com a desaceleração da economia no início do século XXI, muitas indústrias estavam mais preocupadas com a sua sobrevivência que com a melhoria da qualidade dos seus produtos (Roy, 2010). Contudo, com a retoma económica as indústrias nos últimos anos voltaram a focar-se na implementação de técnicas estatísticas aplicadas à qualidade e, por isso, o método Taguchi é hoje amplamente utilizado na indústria.

2.4.2 Visão geral do Método de Taguchi

O método de Taguchi assenta na conceção estatística de testes experimentais, na aplicação de uma função perda progressiva de qualidade e na robustez de produtos e processos, os quais devem ser imunes aos fatores não controláveis (ruído).

2.4.3 Planeamento de experiências – Construção de matrizes ortogonais

A técnica de investigação de um conjunto de condições envolvendo múltiplos fatores e níveis é designada de planeamento de experiências (DOE) (Roy, 2010). Esta tem a finalidade de determinar o efeito das variáveis sobre a resposta do sistema. Tradicionalmente, o planeamento de experiências é baseado no número de combinações possíveis envolvendo todos os fatores e níveis, designado de fatorial completo. Contudo, este pode muito facilmente conduzir a um número elevado de ensaios, tornando-se inexequível. A solução passa por realizar só uma fração destes ensaios mediante determinadas condições, sendo este designado de fatorial fracionário.

O método de Taguchi é um método de planeamento de experiências fracionado que permite executar apenas uma fração do número total de experiências necessárias para a obtenção da solução ótima (Gopalsamy, B.; Ghosh, S.; Mondal, 2009), Tabela 1. Esta assenta em modelos matemáticos que faz uso de várias técnicas estatísticas (Roldão & Ribeiro, 2014).

Tabela 1 - Comparação entre o fatorial completo e o Método de Taguchi (adaptado de Roy, 2010)

Fatores	Níveis	Número de experiências	
		Fatorial completo	Taguchi
2	2	4 (2^2)	4
3	2	8 (2^3)	4
4	2	16 (2^4)	8
7	2	128 (2^7)	8
15	2	32768 (2^{15})	16
4	3	81 (3^4)	9

Taguchi dá uso ao conceito de variáveis intrínsecas (fatores de sinal e fatores de controlo) e variáveis extrínsecas (fatores de ruído). Compreende-se por fatores de sinal aqueles que são configuráveis pelo utilizador ou operador do produto, sendo

selecionados durante o desenvolvimento do produto com base no seu conhecimento. Os fatores de ruído são todos os parâmetros que não são controláveis ou possíveis de eliminar das experiências. O ruído introduzido por estes fatores gera desvios na resposta do sistema em relação ao valor alvo do sinal, criando perdas de qualidade. Denominam-se fatores de controlo todos aqueles que podem ser especificados livremente pelo responsável do estudo. O diagrama exibido na Figura 12 representa a resposta de um processo ou produto influenciada pelos fatores intrínsecos, fatores de sinal e fatores de controlo, e os fatores extrínsecos ou de ruído.

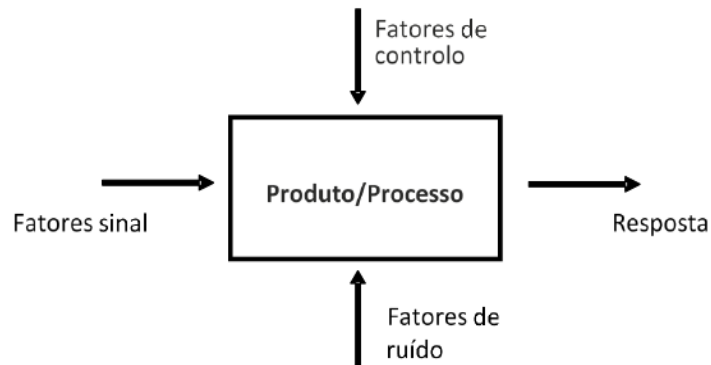


Figura 12 - Diagrama representativo de um produto/processo (adaptado de Phadke, 1989)

Taguchi propõe que se realize um conjunto de experiências planeadas, de modo que os fatores intrínsecos interfiram em níveis diferentes. Nesta fase o método recorre ao planeamento de experiências, de modo a observar-se o efeito na resposta são alterados os valores de entrada de um processo ou produto. Cada experiência corresponde a uma combinação específica de níveis para as variáveis intrínsecas.

Analisando os resultados, identificar-se-á quais as variáveis intrínsecas que mais influenciam a resposta, bem como quais os seus níveis limite para que essa variação da resposta seja mínima e se alcance uma grande robustez do produto.

A metodologia de planeamento de experiências desenvolvida por Taguchi propõe a utilização de matrizes compostas por vetores ortogonais, que utiliza conjuntos de experiências fracionadas na forma matricial, dimensionadas de acordo com o número de fatores e o dos respetivos níveis definidos no estudo.

Considere-se um problema com 7 fatores e dois níveis, o fatorial completo 2^7 conduziria à realização de 128 experiências distintas. Pelo método de Taguchi o mesmo problema necessita apenas da realização de 8 experiências, uma vez que a maior parte das restantes experiências possui informação considerada irrelevante, conseqüentemente, o esforço despendido na realização de experiências é menor. Naturalmente que o planeamento do número reduzido de experiências tem por base algum do conhecimento do operador, para identificar quais os possíveis fatores e suas interações mais influentes na resposta do processo ou produto. Taguchi propõe a realização de um

número de experiências com combinações específicas definidos na forma de matriz, em função do número de fatores, número de níveis e das possíveis interações entre fatores. A ortogonalidade das matrizes admite que os fatores sejam avaliados independentemente uns dos outros, isto é, o resultado de um parâmetro não interfere com o cálculo do efeito de outro parâmetro. Esta característica é conseguida através do balanceamento das experiências, havendo um igual número de amostras para os todos os fatores e níveis do estudo.

Taguchi apresenta uma nomenclatura específica para designar as matrizes ortogonais com a dimensão das experiências. Estas matrizes são designadas por L_K , em que K representa o número de experiências a realizar. Na Tabela 2 são apresentadas as matrizes ortogonais definidas em função do número de níveis e número de fatores ou parâmetros, sendo proposto para dois níveis $L_4(2^3)$, $L_8(2^7)$ e $L_{12}(2^{11})$; para três níveis $L_9(3^4)$, $L_{18}(3^8)$ e $L_{27}(3^{10})$; para quatro níveis $L_{16}(4^5)$ e $L_{32}(4^{10})$; e para cinco níveis $L_{25}(5^6)$ e $L_{50}(5^{10})$. Contudo, também é possível combinar fatores com diferentes níveis no mesmo estudo, como exemplo, dois e três níveis $L_{18}(2^1 \times 3^{13})$ ou $L_{36}(2^3 \times 3^{13})$ (Taguchi, Chowdhury, & Wu, 2007).

Tabela 2 – Definição das matrizes ortogonais (Karna, Singh, & Sahai, 2012)

		Number of parameter(p)								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
No. of level	2	L4	L4	L8	L8	L8	L8	L12	L12	L12
	3	L9	L9	L9	L18	L18	L18	L18	L27	L27
	4	L'16	L'16	L'16	L'16	L'32	L'32	L'32	L'32	L'32
	5	L25	L25	L25	L25	L25	L50	L50	L50	L50

A matriz ortogonal é designada de saturada quando é usado o número máximo de fatores, caso contrário é chamada de não saturada. Neste segundo caso, é possível nalguns casos avaliar o efeito no resultado não só dos fatores, mas também algumas das suas interações. Para determinar as interações existentes na matriz não saturada, são apresentados grafos lineares ou tabelas de interações. O método de Taguchi define o número de experiências a realizar a partir do número de graus de liberdade (GDL) do processo ou produto. O número de GDL refere-se à quantidade de variações que os fatores podem tomar quando é definido um nível, isto é, para um fator com 2 níveis e escolhido o nível mais alto, só existe a possibilidade de escolher o nível mais baixo, possuindo, portanto, 1 GDL. No caso específico de serem estudados 4 fatores (A, B, C e D) com 2 níveis e considerando que há duas interações entre os fatores $A \times C$ e $B \times C$, o número total de graus de liberdade é de 6, determinado de acordo com esquema apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Esquema para a determinação dos graus de liberdade.

Fatores	Níveis (N_k)	Graus de Liberdade ($GDL = N_k - 1$)
A	2	1
B	2	1
C	2	1
D	2	1
A X C		$(2-1) \times (2-1) = 1 \times 1 = 1$
B X C		$(2-1) \times (2-1) = 1 \times 1 = 1$
$GDL = \sum_{i=1}^k (N_k - 1)$		6

Assim, o número total de experiências a realizar será igual ao número total de GDL mais um, isto é, igual sete experiências. A seleção da matriz ortogonal deve permitir realizar o número total de experiências, possuir o mesmo número de níveis e um número igual ou superior de fatores, pelo que a matriz selecionada por ser a mais próxima é a $L_8(2^7)$. Esta permite analisar até ao máximo sete fatores com dois níveis, sendo que as oito experiências definidas de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 – Matriz ortogonal de experiências L_8 (Ross, 1988)

L8 Array							
Trial no.	Column no.						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Como só são estudados 4 fatores, a matriz não está saturada o que significa que as restantes colunas da matriz representam a interação entre alguns destes fatores. O diagrama de grafos lineares ou a tabela triangular de interações mostram, precisamente, quais as interações que são possíveis estabelecer. Para a matriz ortogonal L_8 , são apresentados na Figura 13 e na Tabela 5, respetivamente, o diagrama e a tabela das interações.

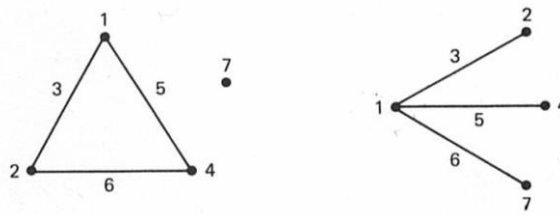


Figura 13 - Diagrama de grafos lineares representativo das interações da matriz L_8 (Ross, 1988).

Na Figura 13 estão dois diagramas de grafos lineares que representam as duas possíveis análises de interações entre os quatro fatores. A interpretação destes diagramas deve ser realizada considerando os pontos como fatores e as linhas a ligar esses pontos como as interações entre esses fatores.

Tabela 5 – Representação das interações dos fatores da matriz L_8 (Ross, 1988)

L8 Triangular Table (Interactions)						
Column no.	Column no.					
	2	3	4	5	6	7
1	3	2	5	4	7	6
2	—	1	6	7	4	5
3	—	—	7	6	5	4
4	—	—	—	1	2	3
5	—	—	—	—	3	2
6	—	—	—	—	—	1

A análise tanto do diagrama de grafos lineares como da tabela de interações revelam que devem ser usadas as oito experiências com as combinações apresentadas nas colunas 1, 2, 4 e 7 para estudar o efeito principal na resposta dos quatro fatores, mas também o efeito de algumas das suas interações 1×2 , 1×4 e 2×4 ou 1×2 , 1×4 e 1×7 , uma vez que dois efeitos estão confundidos nas experiências. Os efeitos da interação 1×2 corresponde aos níveis da coluna 3, da interação 1×4 corresponde aos níveis da coluna 5 e as interações 2×4 ou 1×7 corresponde aos níveis da coluna 6. Uma vez que os efeitos dos fatores e das interações estão confundidos, para evitar duplicação as colunas 3, 5, e 6 da matriz ortogonal L_8 devem ser excluídas das experiências. Para melhor perceber o conceito de efeitos confundidos, na Tabela 6 é demonstrado a partir da matriz ortogonal L_8 como a interação da coluna 1 com a coluna 2 resulta nos níveis da coluna 3, sendo que o nível 2 dos fatores foi substituído por -1. Para representar a interação entre os fatores associados à coluna 1 e à coluna 2 é multiplicado o seu nível, sendo o resultado apresentado na coluna à sua direita. Conforme se pode comprovar os valores (Col. 1 X Col. 2) são iguais aos da coluna 3. Pelo que não se deve atribuir nenhum fator à coluna 3 quando se pretende estudar o efeito da interação entre os fatores atribuídos à coluna 1 e coluna 2.

Tabela 6 – Demonstração do cálculo dos níveis da interação 1×2 , para a matriz L_8 .

Número da experiência	Coluna 1	Coluna 2	Col. 1 X Col. 2	Coluna 3
1	1	1	1	1
2	1	1	1	1
3	1	-1	-1	-1
4	1	-1	-1	-1
5	-1	1	-1	-1
6	-1	1	-1	-1
7	-1	-1	1	1
8	-1	-1	1	1

No planejamento das experiências com interações, deve-se primeiro reservar as colunas das interações. A seleção destas colunas pode ser realizada com base no diagrama de grafos lineares ou na tabela triangular de interações. A partir do diagrama de grafos da Figura 13 e para o exemplo em estudo com as interações $A \times C$ e $B \times C$, é possível atribuir o fator C tanto à coluna 1 como à coluna 2, por ser comum às duas interações. Com C na coluna 2, o fator A pode ser atribuído tanto à coluna 1 como à coluna 4, sendo o fator B a atribuída à restante. No caso de ser atribuído A à coluna 1, B à coluna 4 e C à coluna 2, o efeito da interação $A \times C$ está confundida nos fatores A (coluna 1) e C (coluna 2) e está refletida na coluna 3 e o efeito da interação $B \times C$ está confundida nos fatores A (coluna 1) e B (coluna 4) e está refletida na coluna 6. O fator D deverá ser atribuído à coluna 7. Uma outra alternativa de atribuição dos fatores A, B e C às colunas, é seguir o diagrama de grafos do lado direito da Figura 13, em o fator C é atribuído à coluna 2 e os restantes fatores distribuídos por qualquer ordem entre as colunas 2, 4 e 7, sendo as interações $A \times C$ e $B \times C$ refletidas nas colunas pela ordem que são atribuídos os fatores A e C.

Conforme já referido, a coluna de interação não é incluída no planejamento das experiências, uma vez que esta já está confundida nas colunas dos fatores.

Após a atribuição dos fatores a cada uma das colunas da matriz ortogonal L_8 é construído o planejamento final das experiências. Baseado na atribuição dos fatores $A \rightarrow 1, B \rightarrow 4, C \rightarrow 2$ e $D \rightarrow 7$, são selecionadas as colunas 1, 2, 4 e 7 da matriz ortogonal que se apresenta na Tabela 7.

Tabela 7 – Planejamento das experiências para um problema com 4 fatores.

Número da experiência	1/A	2/C	4/B	7/D
1	1	1	1	1
2	1	1	2	2
3	1	2	1	2
4	1	2	2	1
5	2	1	1	2
6	2	1	2	1
7	2	2	1	1
8	2	2	2	2

2.4.4 Função perda de qualidade de Taguchi

Um conceito fundamental desenvolvido por Taguchi sobre a qualidade é centrado na definição de uma função contínua de perda de qualidade (*quality loss*), representado na Figura 14.

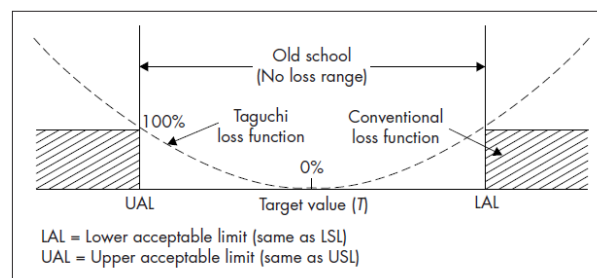


Figura 14 – Função perda de qualidade de Taguchi (Roy, 2010)

Taguchi considera que quando um produto apresenta um desvio das características funcionais em relação à especificação nominal, mesmo que obedecendo ao intervalo de tolerância, isso representa, inevitavelmente, uma correspondente perda de qualidade. Com esta filosofia, Taguchi preconiza a definição de uma função contínua de perda proporcional à distância ao valor alvo, ao contrário do modelo clássico de níveis limite de aceitação. Com este novo método de qualidade acaba por revolucionar os objetivos da produção e focar-se num objetivo muito preciso de reduzir a variabilidade do produto, já que esta constituiu uma ameaça à qualidade final do produto e constituirá um custo para a sociedade (Castro, 2001; Roldão & Ribeiro, 2014). De forma revolucionária, Taguchi define a perda de qualidade do produto como um custo para sociedade. Essas perdas são estimadas em função do tempo que compreende a chegada do produto ao cliente até ao final da sua vida útil. Outro aspeto relevante na filosofia de Taguchi é que a qualidade deve ser projetada antes do fabrico do produto e não durante

o processo produtivo. Taguchi argumenta que, mais do que controlar a qualidade durante a fase de produção, através do controlo quer do produto quer dos equipamentos, é na fase de conceção dos produtos e processos que se pode atingir maiores níveis de qualidade (Roldão & Ribeiro, 2014). Efetivamente, os fatores que levam à perda de qualidade percorrem todo o ciclo de produção, desde o projeto até ao fabrico de produto. Como tal, o esforço na melhoria da qualidade do produto não deve estar, como acontece na maioria das situações, no controlo do produto final, mas no seu planeamento, uma vez que este é menos dispendioso.

2.4.5 Análise dos resultados

O método de Taguchi centralizasse simultaneamente na maximização da resposta aos fatores intrínsecos e minimização dos fatores extrínsecos (ruído), os quais produzem variabilidade do produto e afetam o seu desempenho. Esta é uma abordagem que contrasta com a prática convencional de melhoria da qualidade, a qual tem por norma identificar as principais fontes de ruído e tomar medidas, muitas vezes dispendiosas, para as controlar. O método de Taguchi permite melhorar a robustez do produto através da realização de um número reduzido de experiências, que pode envolver diversos fatores de controlo.

Com base na função perda, Taguchi propôs diversos quocientes razão sinal-ruído (S/N), alegando que a maximização desses quocientes permitiria minimizar as perdas e a aumentar a robustez do produto ou processo. Conceptualmente a razão S/N é a relação entre sinal e ruído em termos de potência. Esta pode igualmente ser interpretada como a razão entre sensibilidade e variabilidade de um sistema. Idealmente um sistema deve apresentar uma relação proporcional entre a entrada e a saída, tal implica que a variabilidade da resposta é pequena. Quando a razão S/N é usada para analisar o comportamento de um sistema, a relação de proporcionalidade e a sua variabilidade são combinadas num único parâmetro.

São propostas diferentes relações sinal-ruído de acordo com o objetivo a atingir, isto é, valor alvo ou nominal S/N_{NB} , o maior valor S/N_{HB} e o menor valor S/N_{LB} , cujas expressões são apresentadas a seguir:

$$S/N_{NB} = 10 * \log \left(\frac{\bar{y}^2}{s_y^2} \right) \quad (3)$$

$$S/N_{HB} = -10 * \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4)$$

$$S/N_{LB} = -10 * \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (5)$$

onde, y representa os dados observados, \bar{y} a média dos dados observados, s_y^2 a variância de y e n o número de observações.

Um produto ou um processo em termos de qualidade pode ser medida usando um único critério ou uma combinação de múltiplos critérios, o objetivo pode ser definido em três direções: procura do melhor valor nominal S/N_{NB} , procura do maior valor S/N_{HB} e a procura do menor valor S/N_{LB} , em que se pretende sempre minimizar a variabilidade da função objetivo, designado de fatores de ruído.

2.4.5.1 Análise de variância (ANOVA)

O correto planeamento das experiências permite retirar facilmente conclusões, mesmo quando são usados métodos de análise elementar. Contudo, não é possível extrair informação relevante destas experiências quando estas são mal planeadas, mesmo recorrendo a métodos de análise estatística mais sofisticados. Os objetivos das experiências é aprender o máximo possível com o número mínimo de ensaios, identificar quais os fatores que têm maior efeito na média e/ou na variação da resposta, selecionar o número de fatores mais relevantes, modelar a resposta de processo ou produto por uma equação, otimizar os níveis dos fatores para uma dada resposta e validar os resultados através de ensaio de confirmação.

Como toda a discussão sobre a qualidade de um processo ou produto está focada na minimização da variação dos seus parâmetros, a análise de variância (ANOVA) deve ser usada para interpretar os resultados das experiências e tomar as necessárias decisões. A técnica não analisa diretamente os dados, mas determina a variabilidade (variância) dos dados, sendo o grau de confiança medido pela sua variância. Por isso, a ANOVA é conhecida como uma ferramenta estatística de decisão, baseada no nível de confiança que é medido a partir da variância dos resultados das experiências. Com a ANOVA é possível comparar vários fatores e determinar a sua interação.

Para uma correta análise pela ANOVA é necessário descrever os dados através de um modelo apropriado, sendo estes divididos em modelo com efeitos estáticos, modelo com efeitos aleatórios e modelo com efeitos mistos. O objetivo desta análise é avaliar o efeito dos diferentes níveis dos fatores na resposta. Para o caso concreto do modelo de efeito fixo e para um só fator podemos levantar as seguintes duas hipóteses,

$$\begin{cases} H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_k = 0 \\ H_0: \alpha_i \neq 0 \text{ para } i = 1, \dots, k \end{cases} \quad (6)$$

onde α_i representa o efeito do nível i do fator e k o número de níveis.

Graus de liberdade (GDL)

Os graus de liberdade (GDL) é um conceito fundamental na análise de variância, mas difícil de o definir. Pode ser interpretado como a medida da quantidade de informação que pode ser extraída a partir de um conjunto de dados. Conforme já referido, o GDL para dados relativos a um fator é igual ao número de níveis menos um. Para um fator A com quatro níveis, os dados A_1 pode ser comparado com dados A_2 , A_3 e A_4 , mas não com ele próprio, pelo que possui 3 GDL. O mesmo conceito pode ser aplicado para n experiências com r repetições, o que perfaz um total de $n \times r$ ensaios, sendo o número total de GDL f_T é dado por (Roy, 2010):

$$f_T = n \times r - 1 \quad (7)$$

Desvios quadráticos

A técnica da ANOVA está associada à medida da variabilidade dos dados, sendo a variabilidade total da resposta relativamente ao seu valor médio definida pelos desvios quadráticos (PortalAction.com).

$$SQT = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y})^2 \quad (8)$$

Y_{ij} representa a resposta do processo ou produto para a experiência i e para o nível j , \bar{Y} é a média das respostas Y_{ij} . A variância amostral dos dados é obtida dividindo a variabilidade total da resposta SQT pelo número de GDL ($N - 1$), em que N é igual ao número total de ensaios ou observações.

Estimativas da Variância

A ideia fundamental que está por de trás da análise da ANOVA é a razão entre a variância amostral entre grupos e a variância amostral dentro dos grupos. A estimativa da variabilidade dentro do fator A (SQA) e que corresponde à variação entre grupos, relativo às observações dos k níveis é determinado por:

$$SQA = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Y_i - \bar{Y})^2 = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2 \quad (9)$$

sendo \bar{Y}_i é a média das respostas para o nível i e apresentando $(k-1)$ graus de liberdade.

A estimativa da variabilidade entre níveis (SQE) e que corresponde à variação dentro dos grupos, com n_i observações, é dado por:

$$SQE = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{i,j} - \bar{Y}_i)^2 \quad (10)$$

Esta está associada ao erro experimental com $(n_i - 1)$ graus de liberdade.

Na Tabela 8 é apresentada um resumo das diferentes estimativas da variabilidade, os respectivos graus de liberdade e variância amostral.

Tabela 8 – Apresentação da variabilidade, graus de liberdade e variância amostral, para a análise da ANOVA.

Desvios quadráticos (SQ)	Graus de liberdade GDL	Variância amostral
SQA	$k-1$	$\frac{SQA}{k-1}$
SQE	$N-k$	$\frac{SQE}{N-k}$
SQT	$N-1$	$\frac{SQT}{N-1}$

É de referir que os três desvios quadráticos estão interrelacionados através da expressão:

$$SQT = SQA + SQE \quad (11)$$

Análise estatística

A realização do teste para avaliar a hipótese da diferença entre as médias da resposta dos níveis, tem como princípio de que as observações são independentes, possuem uma distribuição normal centrada num valor alvo μ e uma variância σ^2 , e o ruído também é independente, apresenta uma distribuição normal centrada em zero e uma variância σ^2 , sendo que a variância é homogénea.

Estatística do teste F - fator A

Como $\frac{SQA}{\sigma^2}$ e $\frac{SQE}{\sigma^2}$ possuem uma distribuição Qui-Quadrado e são independentes, quando calculado a razão entre variância amostral entre grupos e dentro dos grupos, obtém-se a razão F , definida por:

$$F = \frac{\frac{SQA}{k-1}}{\frac{SQE}{N-k}} \quad (12)$$

A expressão anterior é representativa de uma distribuição F de *Fisher-Snedecor*, definida por $F(x, k-1, N-k)$ (PortalAction.com), a qual se representa na Figura 15. Nesta está também representado o critério de aceitação ou rejeição da hipótese H_0 , através da identificação do valor $F_{1-\alpha}$ com base na definição do nível de significância do teste através do valor de α . Habitualmente é usado um valor de α igual a 5%, o que corresponde a um nível de confiança 95%.

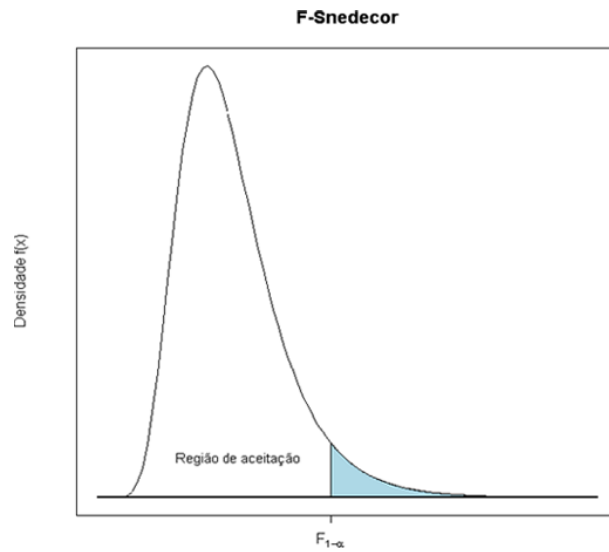


Figura 15 – Distribuição da função F de Fisher-Snedecor (PortalAction.com)

A partir do nível de significância e para os graus de liberdade $k - 1$ e $N - k$ é extraído o valor $F_{1-\alpha}$. A decisão para aceitação ou rejeição da hipótese nula H_0 é tomada função da relação entre a razão F e o valor $F_{1-\alpha}$. Caso a razão F esteja à direita do valor $F_{1-\alpha}$, deve-se considerar a rejeição da hipótese nula, caso contrário deve-se optar pela não rejeição da hipótese. Na análise da ANOVA é habitualmente apresentado o valor de prova (P-Value), o qual representa menor nível de significância com que se rejeitaria a hipótese nula.

ENSAIOS EXPERIMENTAIS

3.1 Definição dos fatores e níveis

3.2 Matriz de Taguchi

3.3 Razão Sinal-Ruído

3.4 Ferramenta, material e equipamentos

3.5 Ensaios e métodos

3 Ensaios Experimentais

Neste capítulo é apresentado o método de Taguchi aplicado à otimização dos parâmetros de maquinagem, com o objetivo de minimizar a rugosidade superficial em operações de acabamento num bloco em alumínio. É descrito o processo de seleção dos parâmetros mais relevantes, os níveis dos parâmetros e possíveis interações. A partir destes é construída a matriz ortogonal das experiências. Seguidamente, são apresentados a ferramenta, o material e os equipamentos usados. Por fim, é descrito o procedimento seguido na realização dos ensaios e na recolha dos dados.

3.1 Definição dos fatores e níveis

O objetivo deste trabalho é identificar os principais fatores e níveis que permitem minimizar a rugosidade superficial no processo de acabamento de uma liga de alumínio, produzido num centro de maquinagem CNC, através da aplicação do método de Taguchi de planeamento de experiências com resposta estática. Com base na experiência anterior foram selecionados os fatores mais influentes no processo de acabamento, os quais são a velocidade de corte (V_c), o avanço por dente (f_z), a profundidade de corte (a_p) e a largura de corte (a_e). Como primeira abordagem, foram definidos dois níveis por fator, os quais correspondem aos valores limite de operação e são apresentados na Tabela 9. Os limites do fator f_z são impostos pelo fabricante do inserto selecionado, o fator a_e é função do diâmetro do porta-insertos e do tempo limite de ensaio, tendo sido definidos valores inferiores a 50% do diâmetro do porta-insertos de modo a que o processo de corte seja sempre concordante com a trajetória. O fator a_p é definido função do tipo de operação a realizar, enquanto que os limites do fator V_c foram impostos pela capacidade do centro de maquinagem, o qual possui uma rotação máxima 10 000 rpm.

Tabela 9 - Níveis dos parâmetros

Teste 1		
Parâmetros	Nível 1	Nível 2
Profundidade de corte, a_p (mm)	0.2	1
Avanço por dente, f_z (mm)	0.08	0.3
Velocidade de corte, V_c (m/min)	314	628
Largura de corte, a_e (mm)	6	8

3.2 Matriz de Taguchi

A seleção da matriz ortogonal é função do número de graus de liberdade (GDL) do problema, conforme foi apresentado no capítulo anterior. Por sua vez, os graus de liberdade são definidos em função do número de fatores, número de níveis e suas interações. Relativamente a este último ponto, é expectável que exista alguma influência das interações entre os fatores $a_p \times f_z$, $a_p \times V_c$ e $f_z \times V_c$ na resposta. Assim, a seleção dos quatro fatores com dois níveis mais as três interações, conduzem a um problema com total 7 GDL. O que significa que o número total de ensaios é de 8, definido como número de GDL mais 1. A seleção da matriz ortogonal mais apropriada para a resolução do problema deve permitir realizar o número total de ensaios para o número definido de fatores (p) e níveis (*levels*), a qual é realizada com base na Tabela 2. Nesta podemos observar que a matriz mais próxima ortogonal é a L_8 .

A seguir é necessário atribuir os fatores a cada coluna da matriz L_8 , Tabela 4. A atribuição dos fatores tem por base os diagramas de grafos lineares ou as tabelas triangulares de interação correspondentes à matriz L_8 e já apresentados no capítulo anterior. Com base na sua análise e considerando três possíveis interações identificadas $a_p \times f_z$, $a_p \times V_c$ e $f_z \times V_c$, foram atribuídos os quatro fatores às seguintes colunas da matriz L_8 , $a_p \rightarrow 1$, $f_z \rightarrow 2$, $V_c \rightarrow 4$ e $a_e \rightarrow 7$. Pelo que o planeamento final das experiências a realizar é definida pela Tabela 10.

Tabela 10 - Matriz de experiências definida pelos níveis

Número do ensaio	$1/a_p$	$2/f_z$	$4/V_c$	$7/a_e$
1	1	1	1	1
2	1	1	2	2
3	1	2	1	2
4	1	2	2	1
5	2	1	1	2
6	2	1	2	1
7	2	2	1	1
8	2	2	2	2

Na Tabela 11 é apresentada a matriz de planeamento final de experiências, em que os níveis de cada fator foram substituídos pelos valores dos parâmetros.

Tabela 11 - Matriz de experiências definida pelos parâmetros

Número do ensaio	a_p [mm]	f_z [mm/t]	V_c [m/min]	a_e [mm]
1	0,2	0,08	314	6
2	0,2	0,08	628	8
3	0,2	0,3	314	8
4	0,2	0,3	628	6
5	1	0,08	314	8
6	1	0,08	628	6
7	1	0,3	314	6
8	1	0,3	628	8

3.3 Razão Sinal-Ruído

A procura do maior valor S/N_{LB} , foi a expressão usada no estudo, pois o objetivo era a minimização da rugosidade da superfície.

$$S/N_{LB} = -10 * \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (5)$$

3.4 Ferramenta, material e equipamentos

A seguir são apresentadas as principais características da ferramenta, do material e dos equipamentos laboratoriais usados na realização dos ensaios experimentais com o

objetivo de determinar os parâmetros ótimos que conduzem à minimização da rugosidade superficial na operação de acabamento do bloco de alumínio.

3.4.1 Ferramenta

Neste trabalho é usada uma fresa de topo da *Sandvik* modelo 490-020A20-08L com comprimento funcional de 110 mm, altura útil de 25 mm e diâmetro de corte de 20 mm existente no Laboratório de Tecnologia Mecânica do ISEP. Esta permite a montagem de dois insertos, tendo sido selecionado o modelo 490R-08T308E-ML H13A da *Sandvik* com o diâmetro do círculo inscrito de 8,5 mm e comprimento efetivo da aresta de corte de 5,6 mm, conforme a Figura 16, recomendado para a maquinagem do alumínio utilizado neste trabalho.

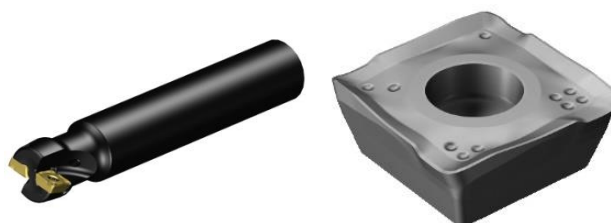


Figura 16 - Fresa 490-020A20-08L / Inserto 490R-08T308E-ML H13A (Sandvik.com)

3.4.2 Material

O material utilizado nos ensaios é uma liga de alumínio EN AW-6082 [AL SiMgMn], conhecida pela sua boa resistência mecânica, a melhor da sua série, e elevada resistência à corrosão, possuindo uma composição química definida pelos limites apresentados na Tabela 12. Este alumínio é usado essencialmente na construção de maquinaria industrial, de moldes, de armamento e de peças maquinadas para a indústria automóvel.

Tabela 12 - Composição química da liga de alumínio EN AW-6082 (Polylanema.pt)

Elementos	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Min	0,7	-	-	0,4	0,6	-	-	-	-
Max	1,3	0,5	0,1	1	1,2	0,25	0,2	0,1	Resto

O bloco paralelepípedo em alumínio apresenta as dimensões iniciais de comprimento, largura e altura $250 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$. Este foi montado na mesa do centro de maquinagem CNC e fixo através de uma prensa na sua direção transversal, para garantir a máxima estabilidade do bloco e minimizar a sua vibração durante o processo de maquinagem, conforme se pode observar na Figura 17.



Figura 17 – Fixação do bloco no centro de maquinagem

3.4.3 Equipamentos laboratoriais

A realização dos ensaios envolve a recolha e tratamento de dados experimentais, sendo utilizado para esse efeito alguns equipamentos laboratoriais. Desses equipamentos, destacam-se os seguintes:

- Centro de maquinagem CNC;
- Rugosímetro de contacto;
- Acelerómetro e sistema de aquisição de vibrações;
- Câmara de filmar de alta velocidade;

3.4.3.1 Centro de maquinagem vertical CNC

O centro de maquinagem da marca *HAAS* e modelo VF-2 apresentado na Figura 18, foi usado para a realização dos ensaios, o qual se encontra localizado no Laboratório de Tecnologia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP. O centro tem a capacidade de maquinagem a 3 ou 5 eixos, sendo que neste segundo caso o um volume de trabalho útil é mais reduzido, passando de $762 \times 406 \times 508 \text{ mm}^3$ para $200 \times 200 \times 250 \text{ mm}^3$, devido à montagem da mesa *Tilting* TRT-160. No caso concreto deste trabalho, como o processo de maquinagem só envolve operações de facejamento, foi usado maquinagem a três eixos.



Figura 18 - Centro de maquinagem HAAS VF-2 (Machinetools.com)

Este centro possui uma potência nominal de 15 kW, uma velocidade de rotação máxima de 10 000 rpm, sistema de medição automático de ferramenta da *Renishaw* e um armazém de 24 ferramentas, sendo as restantes características apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Especificações técnicas do centro de maquinagem HAAS VF-2

Cursos XYZ de 762 x 406 x 508mm
Monitorização da carga da ferramenta
Impulsor vetorial (Estrela/Triângulo) 15kW/20CV
Módulo de roscado rígido
Lubrificação automática
Armazém de 24 ferramentas
Árvore ISO 40 DIN69871-A ou BT 40
Construção em ferro fundido
Árvore de 10.000 rpm
Extrator transportador de aparas
Avanços rápidos 25,4m/min

3.4.3.2 Rugosímetro

Após a operação de maquinagem é medida a rugosidade em algumas regiões da superfície do bloco em alumínio, utilizando um rugosímetro da marca *Mahr* e modelo M2, apresentado na Figura 19. Este equipamento permite determinar e documentar os

parâmetros mais comuns (R_a , R_z , R_{max} e R_{Pc}) segundo as normas DIN EN ISO / AMSE / prEN 10049 e os parâmetros (R_z , R_a) segundo a norma JIS. Para além disto, dispõe de módulo de registo até 200 medições e permite, entre outras coisas, monitorizar tolerâncias, seleccionar a escala vertical e o ajuste de linhas de intersecção assimétricas, para determinação do valor de pico.



Figura 19 - Rugosímetro Mahr M2

Na Tabela 14 são apresentadas as principais características técnicas do rugosímetro de contacto utilizado.

Tabela 14 - Características técnicas do rugosímetro Mahr M2

Princípio de medição	Método <i>Stylus</i>
Faixa de medição	Até 150 μm
Filtro	Seleção automática
Cutoffs	0,25/0,8/2,5 mm
Comprimento de travessia conforme DIN EN ISO 4288/ASME B461:	1,75/5,6/17,5 mm; conforme EN ISO 12085:1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 12 mm, 16 mm
Número de comprimentos de amostragem seleccionáveis	De 1 a 5
Standards	DIN/ISO/JIS e CNOMO (MOTIF)
Parâmetro conforme DIN/ISO/SEP	R_a , R_z , R_{max} , R_p , R_q , R_t , R_{3z} , R_k , R_{vk} , R_{pk} , Mr_1 , Mr_2 , Mr , Sm , R_{Pc} , as per JIS: R_a , R_z , R_y , Sm , S , t_p
Tipo de impressão	Perfil R (ISO/JIS), perfil-P (MOTIF), curva de relação do material, registo de medição

3.4.3.3 Acelerómetros e placa de aquisição de sinal

Para medição das vibrações geradas durante os ensaios de maquinagem, foi instalado na árvore do centro um acelerómetro triaxial da *PCB Piezotronics* modelo 356B11 e o sinal registado por uma placa da *National Instruments* NI-4431, apresentados na Figura

20. Para a recolha e tratamento dos sinais foi desenvolvido um programa na plataforma *LabVIEW* 2013 SP1, o qual permitiu a determinação do valor RMS da amplitude de vibração gerada durante cada segundo do ensaio.



Figura 20 – Placa de aquisição e acelerómetro usados na recolha das vibrações.

Para a medição das vibrações geradas na árvore do centro de maquinagem CNC foi necessário instalar o acelerómetro triaxial. O processo envolveu a limpeza da zona de fixação com álcool e o uso de cola de cianoacrilato para garantir boa fixação do acelerómetro. Para além disto, teve-se o cuidado de garantir durante este processo que os eixos do acelerómetro estavam alinhados com os eixos principais da máquina, os quais estão identificados na Figura 21.

Os sinais em aceleração dos três eixos foram adquiridos à taxa de 4 000 amostras por segundo e filtrados através da aplicação de um filtro digital do tipo passa-banda de 3 Hz-2 kHz, com o objetivo de excluir não linearidades da resposta do acelerómetro. A partir da integração no tempo das acelerações foram obtidas as correspondentes velocidade para cada um dos três eixos de medição, sendo o seu valor eficaz (RMS) determinado a cada segundo do tempo de ensaio. Posteriormente, a norma euclidiana do valor RMS da velocidade foi determinada, sendo usada como base na análise no tempo da vibração gerada durante o ensaio.



Figura 21 – Montagem do acelerómetro na árvore do centro de maquinagem CNC

3.4.3.4 Câmara de filmar de alta velocidade

Para observar a geometria da apara criada pelas diferentes condições de maquinagem foi usada a câmara de alta-velocidade monocromática da *Photron* modelo FASTCAM Mini AX200, apresentada na Figura 22. Através da gravação à taxa de 6400 fps e com a resolução de 1024 x1024 pixels foi possível observar o processo de formação da apara durante o corte do material.



Figura 22 – Câmara de alta-velocidade *Photron, Fastcam Mini AX200*

Na Tabela 15 são apresentadas as principais características técnicas desta câmara, em que se destaca a capacidade de filmagem a uma taxa de 6 400 fps com a resolução 1024 x1024 pixels.

Tabela 15 - Principais características técnicas da câmara de alta-velocidade

Fabricante	Photron
Modelo	Fastcam Mini AX200
Máx. resolução	1024x1024 pixels @ 6 400 fps
Máx. taxa de aquisição	900 000 fps @ 128x16 pixel
Memória interna	16 GB

3.5 Ensaios e métodos

A seguir são detalhados todos os aspetos considerados mais relevantes no procedimento dos ensaios experimentais, com destaque para a descrição da estratégia de maquinagem e medição das vibrações e da rugosidade.

3.5.1 Procedimento

Após a elaboração do planeamento das experiências, que envolveu a definição dos fatores e seus níveis, procedeu-se ao desenvolvimento da estratégia de maquinagem da superfície do bloco em alumínio. Esta foi elaborada com a ajuda do programa *FeatureCAM*, o qual permite gerar a trajetória da ferramenta mediante a definição dos parâmetros de maquinagem.

A preparação dos ensaios, iniciou-se com a fixação do bloco na prensa montada na mesa da máquina, medição do comprimento e diâmetro de corte da ferramenta usando sistema da *Renishaw* e definição das coordenadas do zero-peça usando a sonda *Renishaw*, concluindo assim o *setup*. Em seguida, realizou-se a maquinagem do bloco usando os parâmetros de maquinagem, definidos no planeamento das experiências da Tabela 11. A vibração mecânica gerada no processo de maquinagem foi registada através do acelerómetro e placa de aquisição de sinal. Após cada ensaio, foi medida a rugosidade média em diferentes regiões da superfície do bloco através do rugosímetro. A informação recolhida nos oito ensaios, foi analisada pelo método de Taguchi para a determinação dos parâmetros ótimos de maquinagem.

3.5.2 Estratégia de maquinagem

A estratégia seguida no processo de maquinagem assenta no movimento concordante da fresa relativamente ao bloco e maquinagem contínua do material. Foi inicialmente considerado usar uma estratégia de maquinagem unidirecional, porém esta foi abandonada devido a esta resultar na perda de produtividade. Assim, foi selecionada uma estratégia de maquinagem em espiral retangular de acordo como é representado na Figura 23, com uma só passagem por cada ensaio.

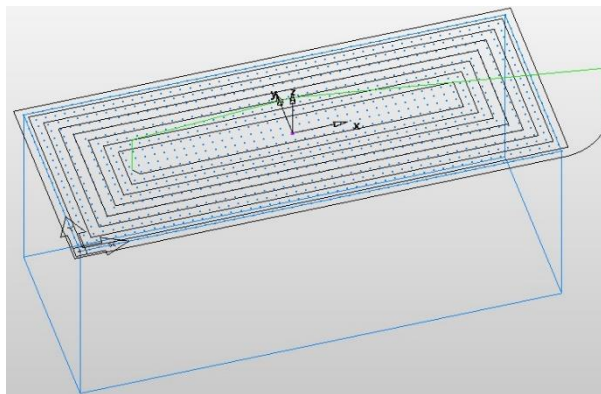


Figura 23 - Estratégia de maquinagem

Nestes ensaios não foi utilizado fluido de corte por estas serem condições mais exigentes de maquinagem e a sua presença impedir as filmagens de alta-velocidade. Para facilitar a observação da avara produzida durante corte, foi projetado ar comprimido na direção da extremidade da fresa para afastar as avaras desta região.

3.5.3 Operação de maquinagem

As operações de maquinagem foram realizadas seguindo uma ordem aleatória, conforme é habitualmente recomendado (Ross, 1988), para evitar viciação e erros no procedimento. Novos insertos foram instalados na ferramenta e, antes da realização de cada ensaio, foi observada as arestas de corte para garantir que estas não apresentavam qualquer degradação e as experiências eram realizadas segundo as mesmas condições. Para o registo completo das vibrações mecânicas geradas durante cada ensaio, o sistema de registo de vibrações era inicializado antes do processo de maquinagem e desligado só após o fim do ensaio.

No final de cada ensaio, foram recolhidos os valores da rugosidade média da superfície, usando o rugosímetro da *Mahr* M2. O comprimento total de travessia foi 5,6 mm, dividido em 7 intervalos de 0,8 mm, sendo que o primeiro e o último são eliminados da análise. Este processo envolveu a limpeza da superfície com acetona para a remoção de quaisquer resíduos resultantes do processo de maquinagem. Na avaliação da rugosidade média foram realizadas 5 observações em 5 regiões distintas, Figura 24, sendo que as regiões numeradas por 1, 2, 4 e 5 estão distanciadas em 20 mm do vértice mais próximo sobre a diagonal, enquanto a região 3 está localizada no centro e segundo a direção longitudinal da superfície.

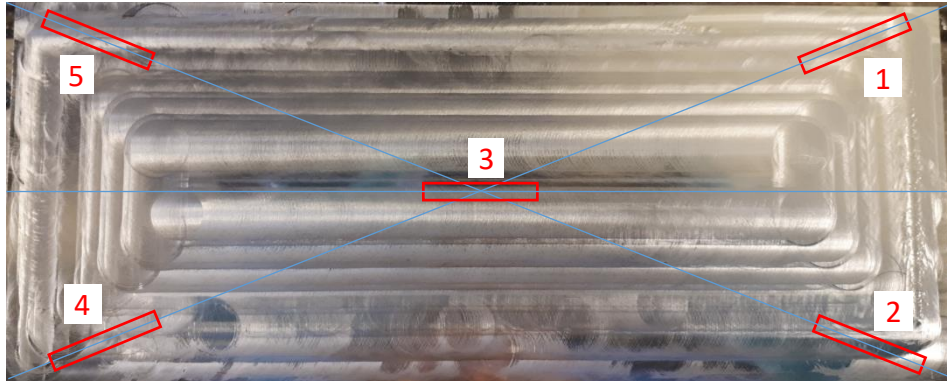


Figura 24 - Regiões de medição da rugosidade

Para garantir que as medições da rugosidade eram realizadas nas mesmas regiões e direções em todos os ensaios, foram usadas máscaras em papel, colocadas sobre a superfície do bloco maquinado para servirem de guia às medições, Figura 25.



Figura 25 - Máscara de papel

Na Figura 26 são apresentadas as oito imagens das superfícies do bloco após a maquinagem e que correspondem à numeração do plano de experiências da Tabela 11. Nestas é possível observar uma superfície mais ou menos espelhada e com as estrias correspondentes ao trajeto da ferramenta. A partir da análise do nível especular da superfície é possível identificar que este é superior para o ensaio 7, o que é resultado da combinação dos níveis máximos do avanço por dente e profundidade de corte. Pelo contrário, a superfície produzida pelo ensaio 1 apresenta estrias aleatórias com diferentes padrões e com o pior nível especular, correspondendo à combinação dos níveis mínimos de avanço por dente e da profundidade de corte.

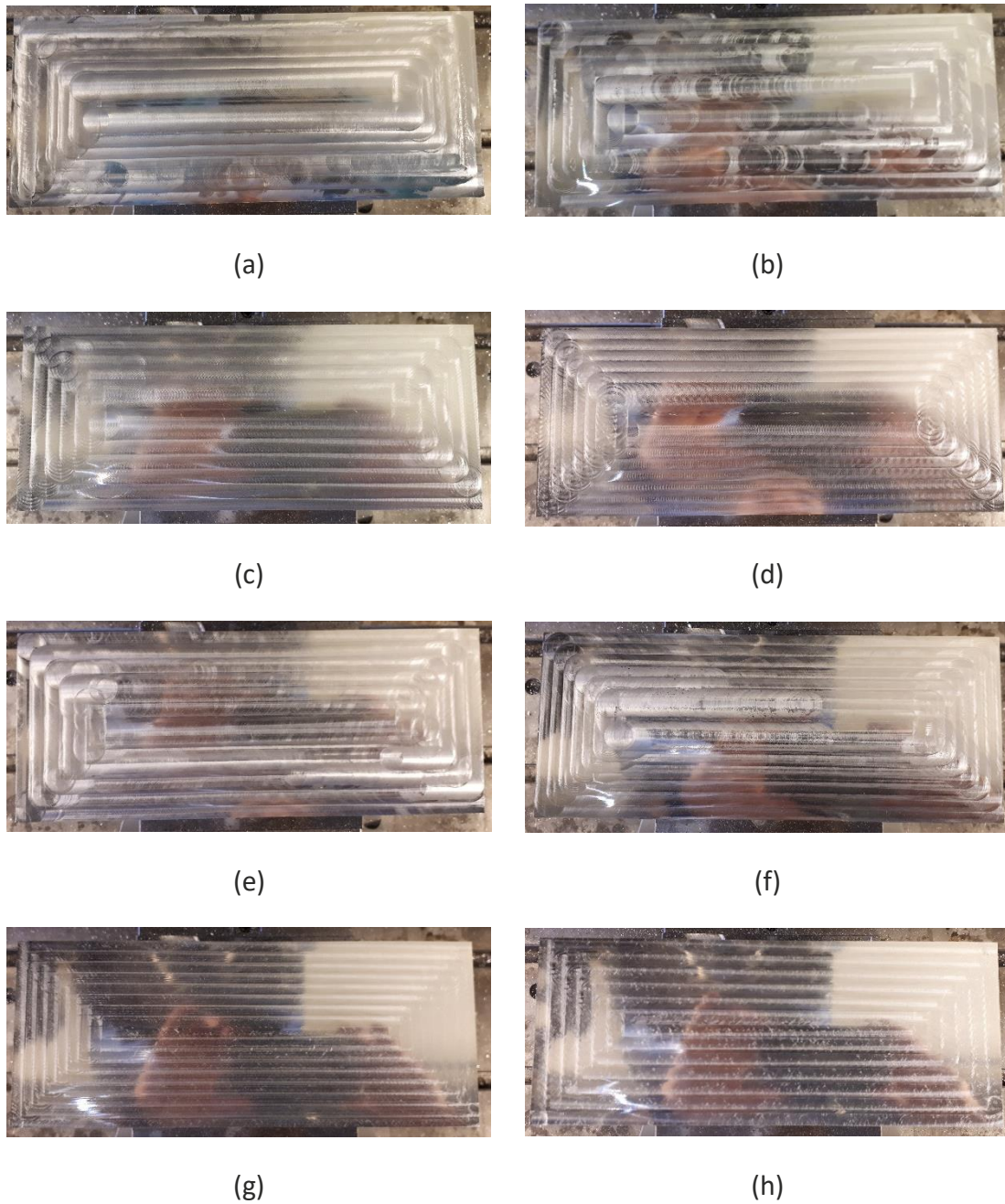


Figura 26 - Imagens das superfícies produzidas pelos ensaios de maquinagem a) ensaio 1, b) ensaio 2, c) ensaio 3, d) ensaio 4, e) ensaio 5, f) ensaio 6, g) ensaio 7, h) ensaio 8

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Resultados da rugosidade obtidos através do método de Taguchi

4.2 Resultados das vibrações produzidas durante os ensaios de maquinagem

4.3 Resultados das imagens de alta velocidade

4 Apresentação e análise dos resultados

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios experimentais com vista à determinação da combinação ótima de parâmetros de maquinagem na operação de acabamento do alumínio EN AW-6082. Através da aplicação do método de Taguchi são determinados os efeitos principais dos parâmetros selecionados e os efeitos das suas interações, recorrendo à análise gráfica e à análise da ANOVA. Este estudo foi realizado com auxílio da ferramenta Minitab. A solução ótima determinada através desta análise foi posteriormente validada com a realização do ensaio de confirmação. Foi também apresentado o nível de vibração gerada em cada ensaio de maquinagem, e também estudada uma possível relação entre as vibrações geradas e a rugosidade superficial. São também apresentadas algumas imagens retiradas dos vídeos de alta velocidade de modo a perceber o tipo de avara gerada pelo processo de maquinagem.

4.1 Resultados da rugosidade obtidos através do método de Taguchi

Na Tabela 16 e na Figura 27 são apresentados os resultados da rugosidade média medida na superfície do bloco após cada ensaio e envolvendo diferentes regiões. Com o objetivo de determinar o valor médio da rugosidade em toda a superfície, foram efetuadas medições da rugosidade em 5 regiões diferentes (R1, R2, R3, R4 e R5). Por cada região realizaram-se 5 observações, tendo sido calculado posteriormente o valor médio da rugosidade e depois excluídos os valores extremos, com o objetivo de reduzir a variabilidade da medição.

Tabela 16 - Matriz experimental e resultado das rugosidades nas 5 regiões

Número de ensaio	a_p [mm]	f_z [mm]	V_c [m/min]	a_e [mm]	Ra-R1 [μm]	Ra-R2 [μm]	Ra-R3 [μm]	Ra-R4 [μm]	Ra-R5 [μm]	Média Ra [μm]	s [μm]
1	0,2	0,08	314	6	0,404	0,254	0,568	0,471	0,493	0,44	0,118
2	0,2	0,08	628	8	0,250	0,238	0,247	0,271	0,351	0,27	0,046
3	0,2	0,3	314	8	0,457	0,482	0,692	0,391	0,497	0,50	0,113
4	0,2	0,3	628	6	0,342	0,454	0,579	0,219	0,334	0,39	0,137
5	1	0,08	314	8	0,433	0,616	0,234	0,252	0,366	0,38	0,155
6	1	0,08	628	6	0,317	0,213	0,494	0,281	0,239	0,31	0,111
7	1	0,3	314	6	0,472	0,580	0,654	0,484	0,396	0,52	0,101
8	1	0,3	628	8	0,310	0,510	0,850	0,543	0,467	0,54	0,197

A partir da análise da média da rugosidade R_a é possível identificar que o menor valor obtido corresponde à combinação do ensaio 2 cujo seu valor é $0,27 \mu\text{m}$. Pelo contrário, observa-se no ensaio 8 o valor da rugosidade mais elevado e que é de $0,54 \mu\text{m}$.

Com o objetivo de avaliar o efeito dos valores dos parâmetros escolhidos para o estudo, é representado na Figura 27 o valor da rugosidade média dos 8 ensaios. Esta mostra pela elevada variação da rugosidade entre ensaios que os valores escolhidos têm um efeito significativo na rugosidade da superfície.

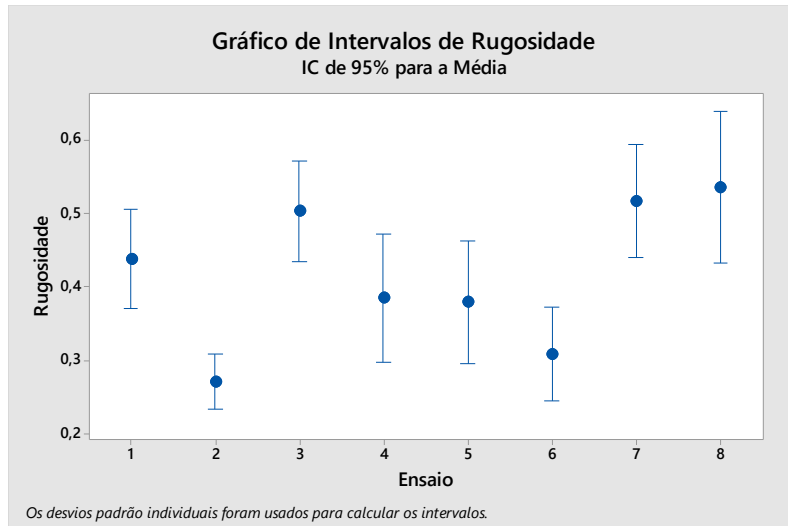


Figura 27 - Gráfico de intervalos de rugosidade média

4.1.1 Análise da influência dos fatores, das regiões de medição e das observações

O efeito principal da alteração de cada fator, das regiões de medição e das observações podem ser analisados pelo gráfico de efeitos principais para médias apresentado na Figura 28. Neste, são apresentados na forma gráfica os efeitos para os quatro fatores selecionados, para as 5 regiões de medição e para as três observações realizadas em

cada região. Conforme se pode observar pelo gradiente de cada fator, o mais influente é o avanço por dente (f_z), seguindo-se-lhe a velocidade de corte (V_c), a profundidade de corte (a_p) e, por último, a largura de corte (a_e). O gradiente entre as três observações é pequeno, pelo que este é um bom indicador que não existe dispersão nas três medições da rugosidade dentro de cada região e que a sua influência no resultado é pequena. Já no que refere aos valores da rugosidade entre regiões, este apresenta um forte gradiente para a região 3, o qual é superior ao dos fatores analisados. Isto significa que a sua influência na resposta é muito significativa, o que põe em causa a análise do efeito de cada fator na resposta. Esta observação é igualmente suportada pela análise da rugosidade média entre as diferentes regiões, ver Tabela 16. Os valores para a região 3 são substancialmente distintos das demais regiões. Por outro lado, pela análise da trajetória da ferramenta, verifica-se, igualmente, que esta região corresponde à etapa final da operação de maquinagem, onde os parâmetros de maquinagem são alterados devido à diminuição da largura de corte (a_e), conduzindo, por esse motivo a variações no valor da rugosidade média. Pelos motivos mencionados anteriormente, entendeu-se retirar da análise os valores da rugosidade média observados na região 3.

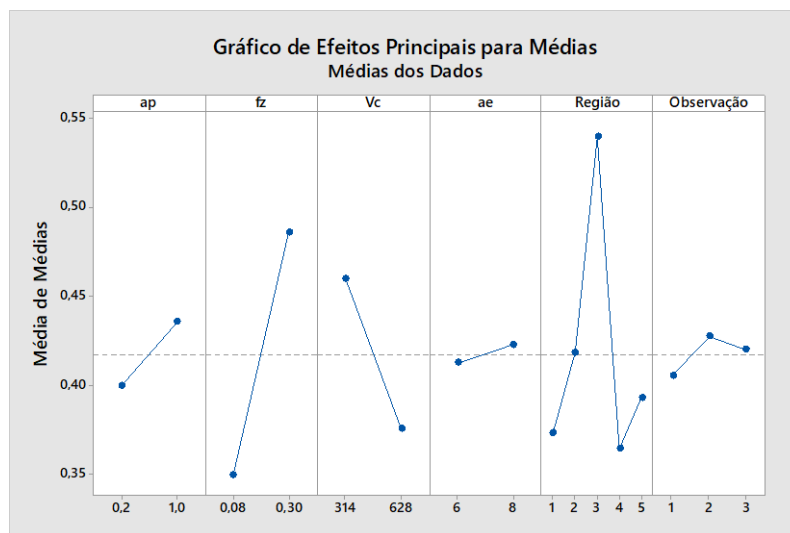


Figura 28 – Médias dos dados considerando 5 regiões de medição da rugosidade

Na Tabela 17 são apresentadas as médias e o desvio padrão das rugosidades produzidas em cada ensaio, na qual apenas se considerou os valores de quatro regiões. Apresenta-se também os valores da razão S/N_{LB} para cada ensaio, determinados recorrendo à equação 5. Como exemplo, apresenta-se a seguir o cálculo para o ensaio 1,

$$S/N_{LB} = -10 * \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) = -10 * \log \left(\frac{0,404^2 + 0,254^2 + 0,471^2 + 0,493^2}{4} \right) = 7,62 \text{ db} .$$

Na Tabela 17 é possível observar que a menor rugosidade média é dada agora pelo ensaio 6, seguido de muito próximo pelo ensaio 2, sendo os valores de 0,26 μm e 0,28 μm , respetivamente. É de destacar que são os ensaios 2 e 6 os que apresentam os maiores valores para a razão S/N_{LB} .

Tabela 17 – Matriz experimental e resultado das rugosidades em 4 regiões

Número de ensaio	a_p [mm]	f_z [mm]	V_c [m/min]	a_e [mm]	Ra-R1 [μm]	Ra-R2 [μm]	Ra-R4 [μm]	Ra-R5 [μm]	Média Ra [μm]	s [μm]	S/N_{LB} [db]
1	0,2	0,08	314	6	0,404	0,254	0,471	0,493	0,41	0,108	7,62
2	0,2	0,08	628	8	0,250	0,238	0,271	0,351	0,28	0,051	11,03
3	0,2	0,3	314	8	0,457	0,482	0,391	0,497	0,46	0,047	6,77
4	0,2	0,3	628	6	0,342	0,454	0,219	0,334	0,34	0,096	9,19
5	1	0,08	314	8	0,433	0,616	0,252	0,366	0,42	0,153	7,19
6	1	0,08	628	6	0,317	0,213	0,281	0,239	0,26	0,046	11,52
7	1	0,3	314	6	0,472	0,580	0,484	0,396	0,48	0,075	6,24
8	1	0,3	628	8	0,310	0,510	0,543	0,467	0,46	0,103	6,63

Na Figura 29 está representado o gráfico de intervalos para os oito ensaios realizados. Através da análise do intervalo de confiança é possível identificar se existe diferenças significativas entre os ensaios. Como exemplo, os ensaios três, sete e oito possuem um intervalo de rugosidade sobrepostos, o que indica que, muito provavelmente, a diferença entre eles não é significativa.

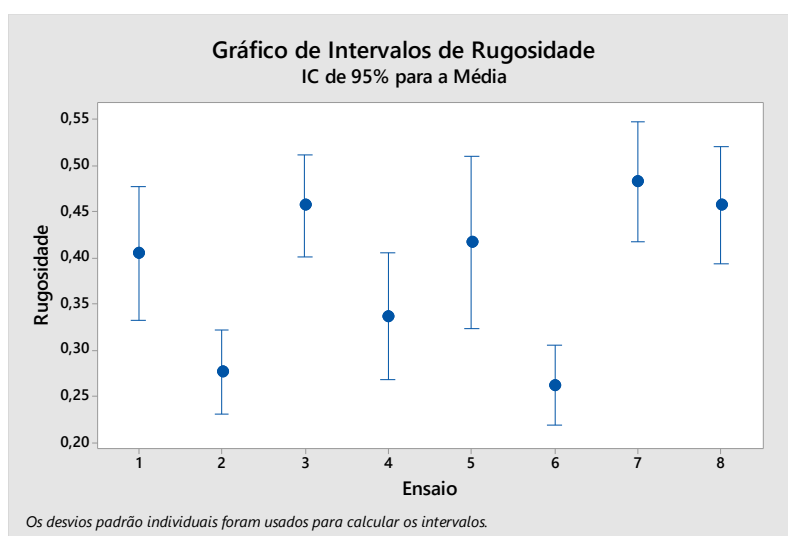


Figura 29 - Gráfico da Rugosidade média determinada com base nas medições em 4 regiões

No que concerne às médias dos dados obtidos com base nas quatro regiões de medições e cujo resultado se apresenta na Figura 30, constata-se que houve uma redução da influência da região de medição relativamente à análise com as cinco regiões, passando a ser mais influentes os fatores velocidade de corte (V_c) e avanço por dente (f_z).

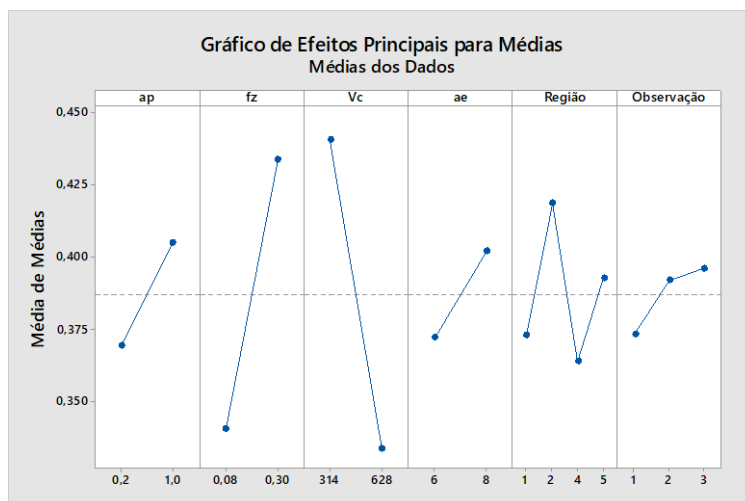


Figura 30 - Médias dos dados considerando apenas 4 regiões de medição da rugosidade

Após este estudo preliminar, passou-se à análise dos valores médios da razão S/N_{LB} para os diferentes níveis de parâmetros com base na média das rugosidades medidas nas quatro regiões em cada ensaio.

O resultado para os quatro fatores e dois níveis selecionados para este estudo, o qual foi obtido através do programa Minitab é apresentado na Figura 31.

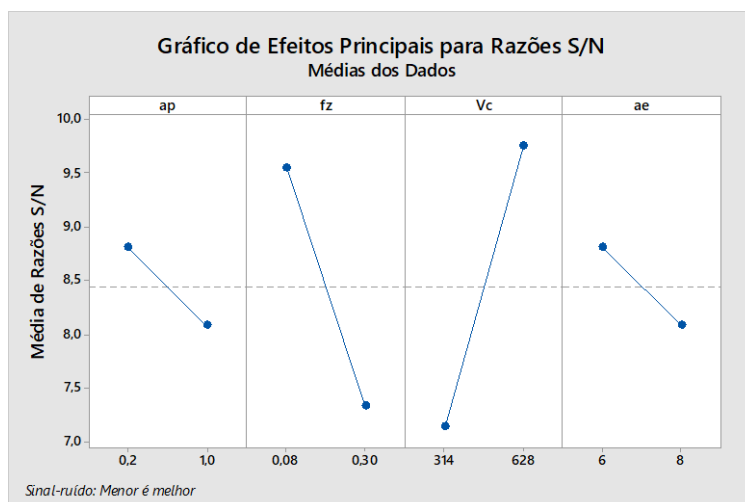


Figura 31 – Média da razão S/N_{LB} considerando 4 regiões de medição da rugosidade

Através da análise do gradiente de cada fator conclui-se que a rugosidade média diminui com a redução de a_p , f_z , a_e e o aumento de V_c . Deste modo, a combinação ótima de parâmetros de maquinagem para os níveis definidos será dada por:

- $a_p = 0,2$ [mm] (menor valor);
- $f_z = 0,08$ [mm] (menor valor);
- $V_c = 628$ [m/min] (maior valor);
- $a_e = 6$ [mm] (menor valor).

O principal objetivo da ANOVA é determinar quais os fatores e suas interações que maior influência apresenta sobre a rugosidade da superfície. As interações entre fatores foram previamente estabelecidas, aquando da definição da matriz ortogonal L_8 , tendo por base o conhecimento do processo de maquinagem e a sua relação entre os diferentes parâmetros. A partir desta análise foram consideradas para o estudo as interações entre os fatores $a_p \times f_z$, $a_p \times V_c$ e $f_z \times V_c$. Os resultados da análise de variância, envolvendo os quatro fatores e três interações, são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – ANOVA obtida através do modelo linear generalizado

Análise de Variância							
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
ap	1	1,1476	3,87%	1,1476	1,1476	*	*
fz	1	9,0951	30,65%	9,0951	9,0951	*	*
Vc	1	13,9128	46,88%	13,9128	13,9128	*	*
ae	1	1,0878	3,67%	1,0878	1,0878	*	*
ap*fz	1	1,2403	4,18%	1,2403	1,2403	*	*
ap*Vc	1	0,1540	0,52%	0,1540	0,1540	*	*
fz*Vc	1	3,0381	10,24%	3,0381	3,0381	*	*
Erro	0	*	*	*	*		
Total	7	29,6758	100,00%				

Nesta tabela, GL representa os graus de liberdade, SQ a soma dos quadrados e QM a média dos quadrados. Este último parâmetro é obtido dividindo a soma de quadrados pelos graus de liberdade correspondentes. A partir da análise da contribuição é possível verificar que os fatores com maior influência são V_c e f_z , que representam uma contribuição 46,88% e 30,65%, respetivamente.

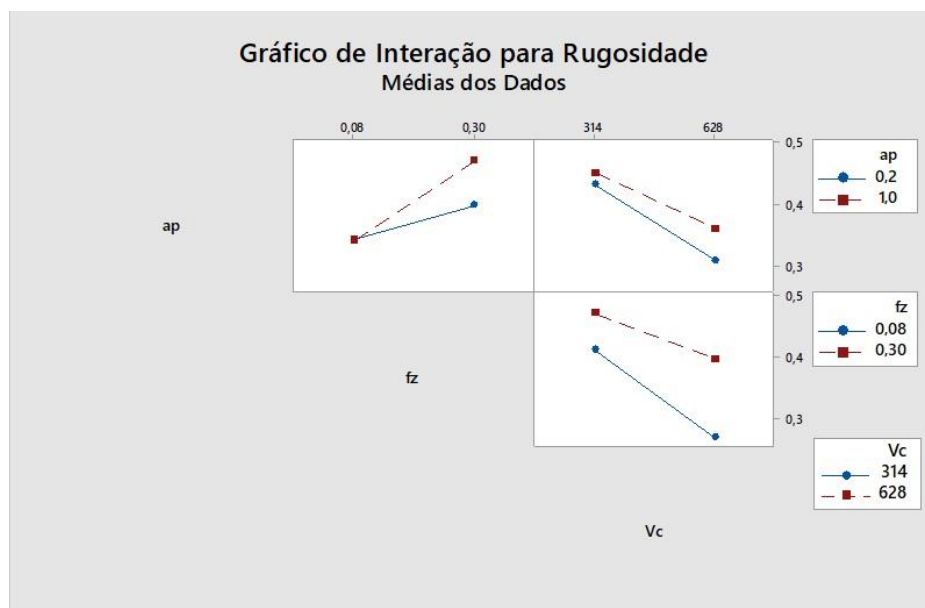
Na Tabela 19 é apresentada a ANOVA com ajuste do modelo linear generalizado (*Stepwise*), o qual é obtida através da não contabilização dos elementos menos preponderantes com o objetivo de identificar os parâmetros com maior significado estatístico, isto é, f_z e V_c . Desta forma é possível determinar os valores do teste F e o valor P.

Tabela 19 – ANOVA com ajuste de modelo linear generalizado - *Stepwise*

Análise de Variância - <i>Stepwise</i>							
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
fz	1	9,095	30,65%	9,095	9,095	6,82	0,048
Vc	1	13,913	46,88%	13,913	13,913	10,43	0,023
Erro	5	6,668	22,47%	6,668	1,334		
Total	7	29,676	100,00%				

INTERAÇÕES

Relativamente às interações, observa-se através da Figura 32, que embora exista interações, as linhas não são paralelas, estas não são muito significativas, como se pode constatar na Tabela 18. O nível de interação entre os fatores pode ser avaliado analisando graficamente o paralelismo das duas linhas geradas a partir da média da rugosidade para dois níveis de cada fator.

Figura 32 - Gráfico de interações: $a_p \times f_z$, $a_p \times V_c$ e $f_z \times V_c$

ENSAIO DE CONFIRMAÇÃO

Após a determinação da combinação ótima de parâmetros de maquinagem, os quais tiveram como base a razão S/N_{LB} , procedeu-se à realização do ensaio de confirmação, designado de ensaio nº 9, o qual serve para validar o estudo realizado. Os resultados da rugosidade média R_a para as quatro regiões de medição, o valor médio e a respetiva razão S/N_{LB} , são apresentados na Tabela 20. O valor da rugosidade média é de $0,24 \mu\text{m}$, que é inferior aos valores dos oito ensaios de teste, e a razão S/N_{LB} tem o valor mais elevado, confirmando assim, ser esta a combinação ótima de parâmetros e válida o estudo realizado. Por outro lado, a inspeção visual da superfície apresentada na Figura 33 revela ter bom acabamento superficial, apesar de não apresentar um nível especular elevado e uniforme como no ensaio 7. Mais uma vez se observam estrias mais pronunciadas na região central do bloco correspondente à fase final da maquinagem.

Tabela 20 - Matriz experimental e resultado de confirmação

Número de ensaio	a_p [mm]	f_z [mm]	V_c [m/min]	a_e [mm]	Ra-R1 [μm]	Ra-R2 [μm]	Ra-R4 [μm]	Ra-R5 [μm]	Média Ra [μm]	S [μm]	S/N_{LB} [db]
9	0,2	0,08	628	6	0,222	0,242	0,274	0,238	0,24	0,022	12,23



Figura 33 – Imagem da superfície produzida pelo ensaio de confirmação

4.2 Resultados das vibrações produzidas durante os ensaios de maquinagem

Na Tabela 21 são apresentados o nível médio de vibrações registado durante os ensaios de maquinagem. O valor médio RMS produzido pelo processo de maquinagem é determinado subtraindo o nível de vibração registado em vazio ao respetivo valor obtido durante os ensaios. Este procedimento permite remover qualquer efeito de ressonância da própria ferramenta e, assim, isolar o valor da vibração produzida só pelo processo de maquinagem. Os resultados do nível de vibração medidos em vazio são consistentes com a velocidade de rotação da árvore, isto é, há uma correspondência direta entre o nível de vibração RMS e a velocidade de rotação. Isto também indicia que a ferramenta está desequilibrada. Por comparação do nível de vibração com os valores da rugosidade

média entre os oito ensaios, verifica-se que não existe uma correlação direta entre os dois resultados. Nestes, observa-se que a rugosidade mínima é obtida para o ensaio 6, enquanto que o menor nível de vibração RMS é obtido no ensaio 4. A análise gráfica da rugosidade média e do nível de vibração RMS produzidos pelos oito ensaios, e que se apresentam na Figura 34, é possível identificar que possuem a mesma tendência para os ensaios 1, 2, 4, 6 e 9, e uma tendência distinta para os restantes ensaios. Constata-se ainda que os ensaios 7 e 8 que apresentam a maior rugosidade média são os que geram maior nível de vibração. Relativamente ao ensaio de confirmação (ensaio 9), ver Tabela 21, constata-se que este apresenta o menor valor de rugosidade média e o menor nível de vibração RMS dos nove ensaios.

Apesar de não ser possível estabelecer uma relação direta entre o nível de vibração e a rugosidade, é, no entanto, notório a existência de uma relação para os valores extremos. Isto permite deduzir que o controlo da vibração por si só não é um parâmetro suficiente para prever a rugosidade da superfície. Este enviesamento nos resultados pode também ser justificado pela seleção das regiões para medição da rugosidade, ao contrário da vibração que é medida durante todo o percurso de maquinagem.

Tabela 21 - Resultados do nível de vibração RMS e média da rugosidade Ra para os 9 ensaios

Número de ensaio	Nível de vibração média RMS [mm/s]	Nível de vibração média RMS em vazio [mm/s]	Vibração gerada pela maquinagem [mm/s]	Média Ra [μm]
1	1,0513	0,6271	0,424	0,41
2	2,2775	1,9870	0,291	0,28
3	0,8451	0,6196	0,225	0,46
4	2,1045	1,8898	0,215	0,34
5	1,2138	0,5993	0,614	0,42
6	2,4262	1,9205	0,506	0,26
7	2,1941	0,6255	1,569	0,48
8	3,6363	1,9659	1,670	0,46
9 (Confirmação)	2,1761	2,0136	0,1626	0,24

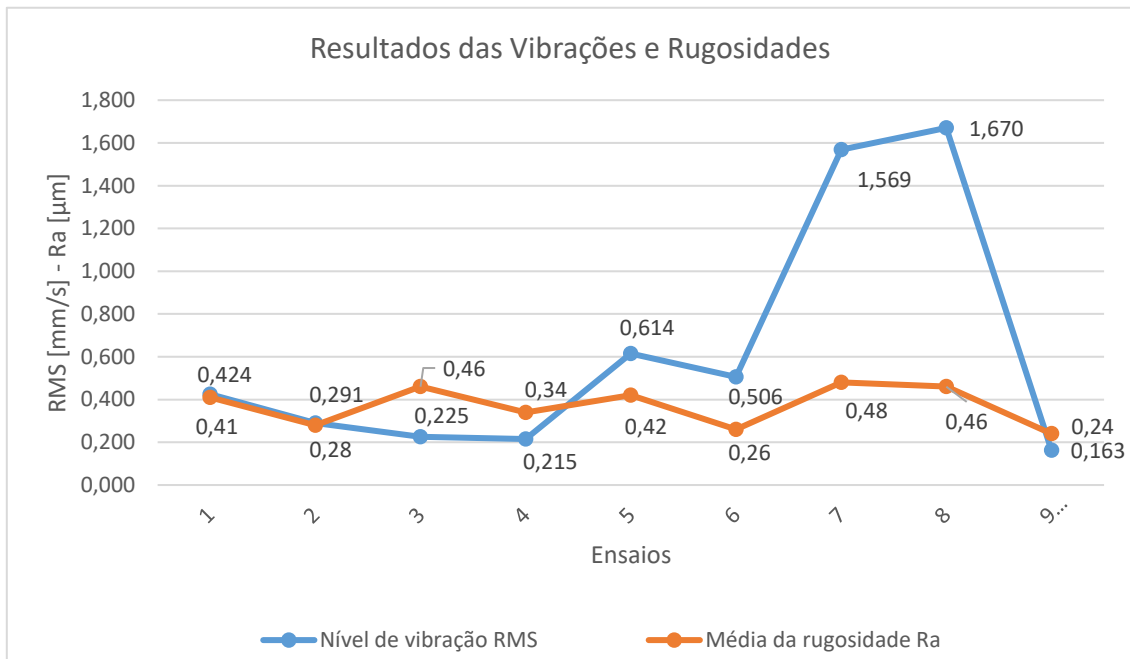


Figura 34 - Representação do nível de vibração RMS e média da rugosidade Ra para os 9 ensaios

4.3 Resultados das imagens de alta velocidade

Na Figura 35 são apresentadas quatro imagens obtidas com a máquina de filmar de alta velocidade para diferentes posições do trajeto de maquinagem referente ao ensaio 7. As imagens (a) e (b) foram obtidas na fase inicial do percurso de maquinagem e apresentam uma apara contínua, enquanto as imagens (c) e (d) são relativas à fase final do ensaio e apresenta uma apara mais curta, justificada pela redução da largura do corte. Na figura (d), é visível também, a formação de uma segunda apara mais longa. Esta forma-se na zona de concordância.

Ensaio 7

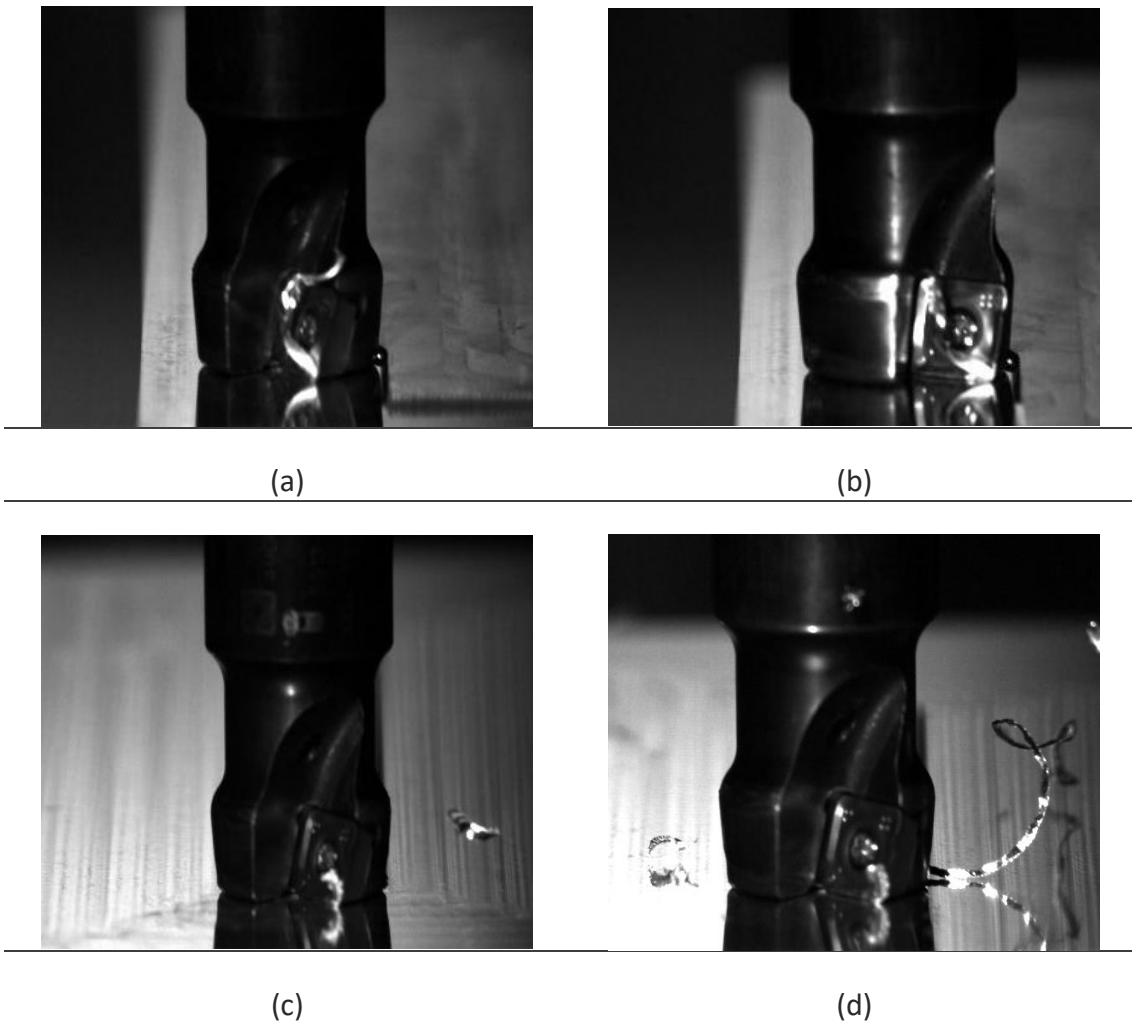


Figura 35 - Imagens obtidas com câmara de alta velocidade relativas ao ensaio 7, para posições distintas do percurso de maquinagem: a) e b) na fase inicial, c) e d) na fase final

Ao analisar as imagens obtidas para o ensaio de confirmação, Figura 36, é visível que a apara tem uma menor dimensão, e apesar de existir alguma adesão de material na zona da aresta de corte, o resultado final apresenta uma rugosidade superficial inferior aos restantes ensaios.

Ensaio de confirmação



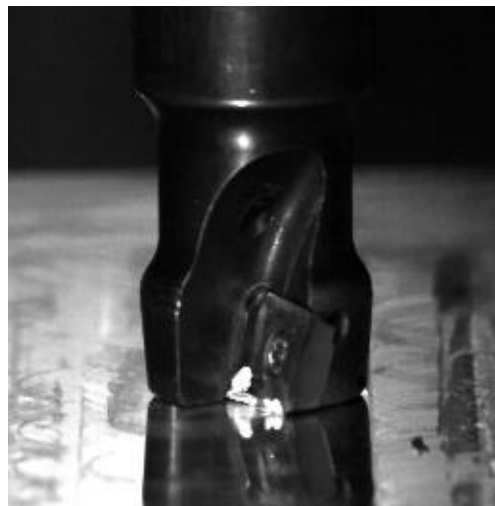
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 36 - Imagens obtidas com a câmara de alta velocidade para diferentes posições do percurso relativas ao ensaio de confirmação: a) e b) na fase inicial, c) e d) na fase final

CONCLUSÕES

5.1 Conclusões

5.2 Propostas de trabalhos futuros

5 Conclusões e propostas de trabalhos futuros

5.1 Conclusões

Neste trabalho foi apresentado a aplicação do método de Taguchi para minimizar a rugosidade na operação de acabamento superficial num bloco de alumínio EN AW-6082, através da identificação dos parâmetros ótimos de maquinagem. Este envolveu a construção duma matriz ortogonal de experiências L_8 , tendo sido medida a rugosidade média e o nível de vibração produzida pelas operações de maquinagem. A análise da razão S/N permitiu identificar que os elementos mais influentes para a rugosidade são os fatores velocidade de corte V_c e o avanço por dente f_z . Para além disto, foi possível identificar numa fase inicial da análise que havia uma forte influência nos resultados da rugosidade média medida na região 3, a qual era provocada pela redução da largura de corte na fase final da operação de maquinagem, sendo removida do estudo. A partir da observação do gradiente da razão S/N foi possível identificar que a rugosidade melhora com a redução de a_p , f_z , a_e e com o aumento de V_c , para os dois níveis selecionados. Tomando os valores máximos obtidos da razão S/N foi identificada a combinação ótima de parâmetros de maquinagem que minimiza a rugosidade superficial, correspondendo a $a_p = 0,2$ mm, $f_z = 0,08$ mm, $V_c = 628$ m/min e $a_e = 6$ mm. Este resultado foi confirmado através da realização de um nono ensaio, em que se obteve a rugosidade mínima dos nove ensaios realizados. A ANOVA avalia a contribuição de cada fator para a rugosidade da superfície. Esta mostra que a contribuição da velocidade de corte V_c e do avanço por dente f_z é de 46,88% e 30,65%, respetivamente.

Quanto ao nível de vibração média RMS produzida pelos ensaios, verificou-se que não existe globalmente uma correlação entre o nível de vibração e a rugosidade superficial média, embora esta possa ser estabelecida para os valores extremos de rugosidade. Todavia, obteve-se o menor nível de vibração médio RMS para a combinação ótima de parâmetros de maquinagem. As discrepâncias entre os resultados da rugosidade superficial e o nível de vibração medido, podem, em parte, serem explicadas pelo fato das primeiras serem obtidas por amostragem em quatro regiões distintas da superfície, enquanto que as segundas correspondem a medições globais. Estes resultados abrem boas perspectivas para que no futuro a medição do nível vibração possa ser usado para prever a rugosidade produzida na superfície. Contudo, o estudo aqui realizado não é suficiente para afirmar, sem reservas, que existe uma associação entre o nível de vibração produzida pela maquinagem e a rugosidade superficial.

É de referir que com o presente trabalho foi possível aprofundar os conhecimentos sobre a aplicação do método de Taguchi e da ANOVA na otimização dos parâmetros de maquinagem.

5.2 Propostas de trabalhos futuros

Como propostas de trabalhos futuros é sugerido continuar o trabalho de investigação a fim de identificar outras fontes de vibração que não as produzidas pelo processo de maquinagem, através da monitorização da vibração da peça e da estrutura da máquina.

Uma outra proposta de melhoria na realização dos trabalhos futuros seria considerar um maior número de regiões de medição da rugosidade média, com o objetivo obter uma avaliação mais próxima do seu valor real. Nos próximos trabalhos é sugerido aplicação do método de Taguchi para um número superior de níveis, procurando identificar não linearidades entre os parâmetros e a rugosidade da superfície. Por último, é proposta a realização de um estudo comparativo entre o método de Taguchi e os novos métodos de otimização, identificando as vantagens e as desvantagens de cada método.

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

6.1 Artigos, livros, revistas e teses

6.2 Outras fontes

6 Bibliografia e outras fontes de informação

6.1 Artigos, livros, revistas e teses

- Abhang, L. B., & Hameedullah, M. (2012). Optimization of machining parameters in steel turning operation by Taguchi method. *Procedia Engineering*, 38, 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.06.007>
- Aggarwal, A., & Singh, H. (2005). Optimization of machining techniques - A retrospective and literature review. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 30(6), 699–711. <https://doi.org/10.1007/BF02716704>
- Anwar, S., Uz, S., & Khan, Z. (2016). Optimization of End Milling Parameters for. *International Journal of Mechanical And Production Engineering*, (8), 6–9.
- Benardos, P. G., & Vosniakos, G. C. (2003). Predicting surface roughness in machining: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00059-2](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00059-2)
- Bhushan, B. (2000). *Modern Tribology Handbook, Two Volume Set. Modern Tribology Handbook, Two Volume Set*. <https://doi.org/10.1201/9780849377877>
- Blanca, A. S. (2015). OPTIMIZATION OF MILLING PARAMETERS TO IMPROVE THE SURFACE ROUGHNESS USING THE TAGUCHI METHODOLOGY Engenharia Industrial.
- Castro, P. (2001). MÉTODO DE TAGUCHI: CONTROLO DE QUALIDADE COM RECURSO NÃO- CONVENCIONAL AO DESENHO ESTATÍSTICO DE EXPERIÊNCIAS (DOE) TAGUCHI'S. *Statistical Review*.
- Chen, M.-C., & Chen, K.-Y. (2004). Determination of Optimal Machining Conditions Using Scatter Search. https://doi.org/10.1007/978-3-540-39930-8_28
- Childs, T., Maekawa, K., Obikawa, T., & Yamane, Y. (2000). *Metal Machining - Theory and Applications*, 416.
- D'Addona, D. M., & Teti, R. (2013). Genetic algorithm-based optimization of cutting parameters in turning processes. In *Procedia CIRP*. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.05.055>
- Dormer. (2005). *Dormer Technical Handbook*.

- Gerling, H. (1977). *À Volta da Máquina Ferramenta*. (Torrens, Ed.).
- Ghani, A. K., Choudhury, I. A., & Husni. (2002). Study of tool life, surface roughness and vibration in machining nodular cast iron with ceramic tool. *Journal of Materials Processing Technology*. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00092-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00092-4)
- Ghani, J. A., Choudhury, I. A., & Hassan, H. H. (2004). Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters. *Journal of Materials Processing Technology*. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00865-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00865-3)
- Gopalsamy, B.; Ghosh, S.; Mondal, B. (2009). Taguchi method and ANOVA: An approach for process parameters optimization of hard machining while machining hardened steel. *Journal of Scientific and Industrial Research*, (August 2009), 1–7.
- Gopalsamy, B. M., Mondal, B., & Ghosh, S. (2009). Taguchi method and anova: An approach for process parameters optimization of hard machining while machining hardened steel. *Journal of Scientific and Industrial Research*.
- Hasçalik, A., & Çaydaş, U. (2008). Optimization of turning parameters for surface roughness and tool life based on the Taguchi method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1147-0>
- Jenarthanan, M. P., Nishanth, G., & Bharathwaj, R. (2016). Optimization of machining parameters in end milling of GFRP composites based on the Taguchi method with fuzzy logics. *International Journal of Knowledge-Based and Intelligent Engineering Systems*. <https://doi.org/10.3233/KES-160338>
- Karna, S. K., Singh, R. V., & Sahai, R. (2012). Application of Taguchi method in process optimization. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2(4), 387–391.
- Martins, C. (2017). *Análise comparativa do comportamento de um inserto provido de diferentes revestimentos na maquinaagem de aço inoxidável duplex*.
- Maurya, P., Sharma, P., & Diwaker, B. (2012). Implementation of Taguchi methodology to Optimization of CNC end milling process parameters of AL6351 – T6. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 2, 3530–3533.
- Moshat, S., Datta, S., Bandyopadhyay, A., & Pal, P. (2010). Optimization of CNC end milling process parameters using PCA-based Taguchi method. *International Journal of Engineering, Science and Technology*. <https://doi.org/10.4314/ijest.v2i1.59096>
- Orhan, S., Er, A. O., Camuşcu, N., & Aslan, E. (2007). Tool wear evaluation by vibration analysis during end milling of AISI D3 cold work tool steel with 35 HRC hardness. *NDT and E International*. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2006.09.006>

- Pereira, D., Ribeiro, J., & Queijo, L. (2018). OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS DE FRESAGEM USANDO O MÉTODO DE TAGUCHI COM A ANÁLISE RELACIONAL DE GREY. *Iberoamerican Journal of Industrial Engineering*, 56–70.
- Ramanujam, R., Venkatesan, K., Saxena, V., Pandey, R., Harsha, T., & Kumar, G. (2014). Optimization of machining parameters using fuzzy based principal component analysis during dry turning operation of inconel 625 - A hybrid approach. In *Procedia Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.296>
- Ribeiro, J. E., César, M. B., & Lopes, H. (2017). Optimization of machining parameters to improve the surface quality. *Procedia Structural Integrity*, 5, 355–362. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.07.182>
- Roldão, V., & Ribeiro, J. (2014). *Gestão das Operações*. (Monitor, Ed.).
- Ross, P. J. (1988). *Taguchi Techniques for Quality Engineering: Loss Function, Orthogonal Experiments, Parameter and Tolerance Design*. McGraw-Hill Book Company. <https://doi.org/ISBN-13:978-0070539587> ISBN-10: 0070539588
- Roy, R. (2010). *A Primer on the Taguchi Method*. (Society of Manufacturing Engineers, Ed.).
- Sarıyaka, M., Dilipak, H., & Gezgin, A. (2015). Optimization of the process parameters for surface roughness and tool life in face milling using the Taguchi analysis. *Materiali in Tehnologije*, 49(1), 139–147.
- Somashekara, H. M., & Lakshmana Swamy, N. (2012). Optimizing Surface Roughness and MRR in turning operation using Taguchi's design of experiments approach. *International Journal of Applied Engineering Research*, 7(8), 887–895.
- Taguchi, G., Chowdhury, S., & Wu, Y. (2007). *Taguchi's Quality Engineering Handbook*. *Taguchi's Quality Engineering Handbook*. <https://doi.org/10.1002/9780470258354>
- Thamizhmanii, S., Saparudin, S., & Hasan, S. (2007). Analyses of surface roughness by turning process using Taguchi method. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1147-0>
- Toh, C. K. (2004). Vibration analysis in high speed rough and finish milling hardened steel. *Journal of Sound and Vibration*. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2003.11.012>
- Tzeng, C. J., Lin, Y. H., Yang, Y. K., & Jeng, M. C. (2009). Optimization of turning operations with multiple performance characteristics using the Taguchi method and Grey relational analysis. *Journal of Materials Processing Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.06.046>
- Vishnu, A. V., Tilak, K. B. G., Guruvaiah Naidu, G., Raju, G. J., & Professor, A. (2017). Optimization of Different Process Parameters of Aluminium Alloy 6351 in CNC

Milling Using Taguchi Method. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 3(2). Retrieved from www.ijergs.org

Yang, W. H., & Tarng, Y. S. (1998). Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method. *Journal of Materials Processing Technology*. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(98\)00079-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00079-X)

6.2 Outras fontes

<http://www.extrusal.pt/index.php?id=57> [Consultado em 28 11 2018]

<https://www.machinetools.com/en/models/haas-vf-2> [Consultado em 10 08 2019]

<https://www.palbit.pt/pt/produtos.7/ferramentas-de-corte.813/fresagem.814.html>
[Consultado em 12 02 2019]

<http://www.portalaction.com.br/anova> [Consultado em 10 05 2019]

<https://www.polylanema.pt/pt/aluminios-tecnicos/placas/aw-6082/> [Consultado em 28 11 2018]

<https://revistaadnormas.com.br/2018/10/02/genichi-taguchi-melhorando-a-qualidade-e-reduzindo-custos/> [Consultado em 24 07 2019]

<https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx?Country=pt> [Consultado em 08 01 2019]

<https://www.sandvik.coromant.com/pt-t/products/Pages/productdetails.aspx?c=490-020A20-08L> [Consultado em 08 01 2019]

<https://www.stuermer-machines.com/brands/optimum/category/product/optimum-milling-machines-conventional/3344125/> [Consultado em 08 07 2019]

<http://surfacefinishequipment.com/mahr-m1-mahr-m2.html> [Consultado em 18 04 2019]

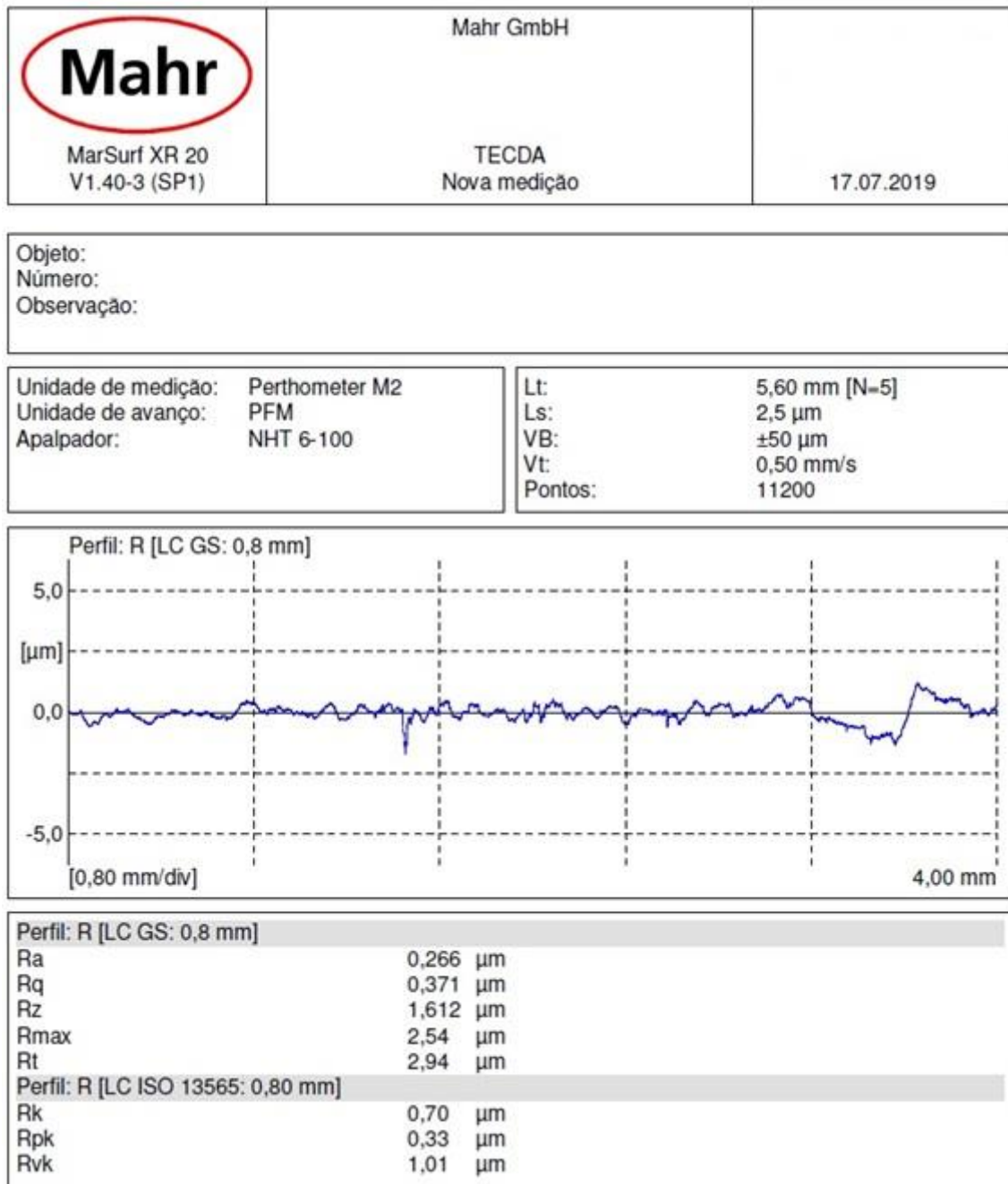
ANEXOS

7.1 Anexo 1 – Exemplo de um perfil de rugosidade

7.2 Anexo 2 – Valores e média da rugosidade para as 5 regiões

7 Anexos

7.1 Anexo 1 – Exemplo de um perfil de rugosidade



7.2 Anexo 2 – Valores e média da rugosidade para as 5 regiões

Tabela 22 - Valores de Ra, 1º ensaio

Ra - [μm] - 1º ensaio					
Leitura	R1	R2	R3	R4	R5
1	0,327	0,312	0,487	0,515	0,548
2	0,317	0,226	0,542	0,305	0,449
3	0,350	0,223	0,597	0,444	0,411
4	0,534	0,212	0,889	0,453	0,483
5	0,681	0,355	0,564	0,706	0,622
Média					
R1	R2	R3	R4	R5	Média Total
0,44	0,27	0,62	0,49	0,50	0,46

Tabela 23 – Valores de Ra, 2º ensaio

Ra - [μm] - 2º ensaio					
Leitura	R1	R2	R3	R4	R5
1	0,191	0,155	0,167	0,234	0,277
2	0,314	0,327	0,309	0,309	0,279
3	0,157	0,380	0,220	0,233	0,388
4	0,244	0,142	0,212	0,270	0,385
5	0,427	0,231	0,643	0,429	0,394
Média					
R1	R2	R3	R4	R5	Média Total
0,27	0,25	0,31	0,30	0,34	0,29

Tabela 24 – Valores de Ra, 3º ensaio

Ra - [μm] - 3º ensaio					
Leitura	R1	R2	R3	R4	R5
1	0,369	0,424	0,703	0,360	0,453
2	0,422	0,479	0,694	0,448	0,646
3	0,580	0,494	1,000	0,459	0,643
4	0,253	0,515	0,679	0,266	0,395
5	0,670	0,474	0,649	0,366	0,390
Média					
R1	R2	R3	R4	R5	Média Total
0,46	0,48	0,75	0,38	0,51	0,51

Tabela 25 - Valores de Ra, 4º ensaio

Ra - [μm] - 4º ensaio					
Leitura	R1	R2	R3	R4	R5
1	0,355	0,308	0,347	0,147	0,265
2	0,310	0,407	0,361	0,298	0,259
3	0,247	0,473	0,658	0,321	0,260
4	0,360	0,483	0,719	0,135	0,597
5	0,367	0,496	0,774	0,212	0,476
Média					
R1	R2	R3	R4	R5	Média Total
0,33	0,43	0,57	0,22	0,37	0,39

Tabela 26 – Valores de Ra, 5º ensaio

Ra - [μm] - 5º ensaio					
Leitura	R1	R2	R3	R4	R5
1	0,192	0,646	0,229	0,209	0,371
2	0,386	0,633	0,248	0,409	0,435
3	0,554	0,584	0,315	0,192	0,228
4	0,358	0,632	0,201	0,263	0,355
5	0,579	0,580	0,224	0,284	0,372
Média					
R1	R2	R3	R4	R5	Média Total
0,41	0,62	0,24	0,27	0,35	0,38

Tabela 27 - Valores de Ra, 6º ensaio

Ra - [μm] - 6º ensaio					
Leitura	R1	R2	R3	R4	R5
1	0,258	0,151	0,426	0,271	0,176
2	0,332	0,256	0,539	0,204	0,321
3	0,448	0,302	0,477	0,610	0,201
4	0,260	0,172	0,467	0,185	0,195
5	0,359	0,212	0,726	0,367	0,402
Média					
R1	R2	R3	R4	R5	Média Total
0,33	0,22	0,53	0,33	0,26	0,33

Tabela 28 - Valores de Ra, 7º ensaio

Ra - [μm] - 7º ensaio					
Leitura	R1	R2	R3	R4	R5
1	0,375	0,466	0,744	0,458	0,445
2	0,583	0,532	0,804	0,693	0,326
3	0,583	0,701	0,832	0,590	0,375
4	0,384	0,507	0,374	0,403	0,469
5	0,450	0,883	0,415	0,393	0,369
Média					
R1	R2	R3	R4	R5	Média Total
0,48	0,62	0,63	0,51	0,40	0,53

Tabela 29 - Valores de Ra, 8º ensaio

Ra - [μm] - 8º ensaio					
Leitura	R1	R2	R3	R4	R5
1	0,269	0,492	0,702	0,531	0,449
2	0,248	0,504	0,846	0,529	0,435
3	0,267	0,499	0,856	0,522	0,445
4	0,394	0,528	0,855	0,573	0,510
5	0,402	0,563	0,850	0,568	0,506
Média					
R1	R2	R3	R4	R5	Média Total
0,32	0,52	0,82	0,54	0,47	0,53

Tabela 30 - Valores de Ra, ensaio de confirmação

Ra - [μm] - ensaio de confirmação					
Leitura	R1	R2	R3	R4	R5
1	0,262	0,183	0,172	0,201	0,234
2	0,216	0,286	0,171	0,254	0,225
3	0,421	0,388	0,170	0,253	0,256
4	0,172	0,223	0,169	0,315	0,209
5	0,187	0,217	0,169	0,359	0,278
Média					
R1	R2	R3	R4	R5	Média Total
0,25	0,26	0,17	0,28	0,24	0,24