

Otimização de Parâmetros de Usinagem para o Ciclo Fixo de *Pocket*

Gustavo Trelha Valério, 57021

Dissertação apresentada à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Este trabalho foi efetuado sob orientação de:

Professor Dr. João Eduardo Pinto Castro Ribeiro
Professor Dr. Luís Miguel Cavaleiro Queijo

Coorientação de:

Professor Dr. Thiago Antonini Alves

Maio de 2024

Otimização de Parâmetros de Usinagem para o Ciclo Fixo de *Pocket*

Gustavo Trelha Valério, 57021

Dissertação apresentada à
Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Este trabalho foi efetuado sob orientação de:

Professor Dr. João Eduardo Pinto Castro Ribeiro
Professor Dr. Luís Miguel Cavaleiro Queijo

Coorientação de:

Professor Dr. Thiago Antonini Alves

Maio de 2024

Dedicatória

Dedico este trabalho a minha família:

A minha mãe, minha companheira, minha parceira, meu apoio, e a pessoa mais bondosa que conheço.

Ao meu pai, que me deu a oportunidade de conquistar tudo que tivesse ao meu alcance, que nunca negou apoio e sempre nos incentivou.

Ao meu irmão, que de um jeito maluco e engraçado consegue ser dedicado e sábio ao mesmo tempo.

Também dedico esse trabalho a um grande amigo:

William Ferreira, Will Branco, uma pessoa mais que gente fina, com os mesmos gostos que eu, meu colega de assuntos que não conversava com ninguém, que estava me acompanhando na minha jornada, que estava trilhando a sua jornada. Até hoje vejo coisas e quero comentar com você. Obrigado por todos os momentos que tive contigo irmão, você nunca vai ser esquecido, vou carregar você no meu coração pra sempre.

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer muito ao Professor Dr. João Ribeiro, pela ótima orientação, pelos conhecimentos passados, pelas dicas, conselhos e sugestões. Sou grato pela quantidade gigantesca de conhecimento e experiência acumulado durante esse percurso.

Agradeço ao Professor Dr. Thiago Antonini, pelo apoio e suporte desde o início dessa jornada muito importante para mim. Um agradecimento ao Prof. Luís Queijo, pela disponibilidade para a utilização dos equipamentos do Laboratório de Tecnologia Mecânica, onde foi realizado o trabalho experimental desta dissertação. Agradeço ao Eng. Jorge Paulo (técnico de laboratório) pela disponibilidade e ajuda prestada durante os ensaios realizados no laboratório.

Ao pessoal do mentoring que fazem de Bragança uma casa para todos aqueles que veem perdidos de fora.

Gostaria de deixar meu muito obrigado a todos aqueles que estiveram ao meu redor na minha vida acadêmica e pessoal durante esse percurso. Infelizmente nem todos estarão nesse agradecimento, mas saibam que estão comigo sempre. Gostaria de agradecer aos meus amigos de faculdade Lucas Quessada, Bruno, Rodrigo, Mineiro, Gilmar, Victor, Pedro e Rodrigo que mesmo cada um tenha seguido seu caminho ainda são tão unidos quando éramos antigamente. Aos meus amigos Paulo, Vinícius Sabala, Ademir, Will branco e Will preto, Professor Sidney, Professor Ygo, Marcão, Caseiro, Cisco, Cristian e Du por mesmo estando tão longe me ajudarem tanto, a se divertir, a dar risada, desabafar, e fazer parecer estar perto do Brasil mesmo não estando. Agradeço também aos amigos que fiz e me acompanharam aqui em Portugal, que são minha rotina e minha família neste país, Gabriel, Geovanni, Toloto, Zadra, Adriano, Panta, Emilly, Valentina, Milena, Luiz, Camila e Laura.

Felipe, Neves, Carrazedo, Obrigado por fazer do Lab. de fluidos um lugar de estudo, descontração, de troca de ideias e ajuda conjunta.

Larissa e Duda, Obrigado por de um jeito tão chato serem tão perfeitas comigo.

Por último, gostaria de agradecer a minha família que com certeza é tudo que tenho de mais valioso na minha vida. Ao meu pai, Leonel, que sempre me apoiou em tudo, que sempre me ensinou o real valor do trabalho duro e da educação, ele que é ponto seguro para mim e para a minha família. A minha mãe, Claudinéia, que tem o maior coração do mundo, que me ensinou a ser caridoso e a se colocar no lugar dos outros. E ao meu irmão, Gabriel, por ser tão dedicado, ser um espelho, uma meta e uma inspiração pra mim. E a Deus por todas essas oportunidades.

Resumo

A indústria busca aumentar a produtividade com qualidade elevada em menor tempo, recorrendo frequentemente a máquinas de comando numérico (CNC) para alcançar esses objetivos.

Este estudo analisou a rugosidade superficial e a taxa de produção no fresamento do alumínio 5083 H111, variando o caminho de ferramenta e três parâmetros de usinagem: velocidade de corte, avanço por dente e profundidade de corte. Utilizou-se o método de Taguchi e a análise relacional de Grey para determinar a combinação ideal de parâmetros e avaliar a influência de cada um.

Para o caminho de ferramenta *ZigZag* (Amostra Z) foi obtida a combinação A3B1C3, correspondente a uma velocidade de corte de 150 [m/min], avanço por dente de 0,035 [mm/rot] e profundidade de corte de 2,0 [mm]. Para o caminho de ferramenta *Parallel Spiral* (Amostra S) foi obtida a combinação A3B3C1, com uma velocidade de corte de 150 [m/min], avanço por dente de 0,025 [mm/rot] e profundidade de corte de 1,0 [mm]. Para o caminho de ferramenta *OneWay* (Amostra O) foi obtida a combinação A1B3C3, ou seja, uma velocidade de corte de 50 [m/min], avanço por dente de 0,025 [mm/rot] e profundidade de corte de 2,0 [mm]. A ANOVA revelou que a velocidade de corte foi o parâmetro mais influente nos caminhos *ZigZag* e *Parallel Spiral*, enquanto o avanço por dente foi mais influente no caminho *OneWay*.

O estudo demonstrou a eficácia dos métodos de otimização aplicados, permitindo identificar as melhores condições para maximizar a qualidade e a produtividade no fresamento do alumínio 5083 H111.

Palavras chave: CNC, Rugosidade superficial, Taxa de produção, Fresamento, Taguchi, Análise Relacional de Grey, ANOVA, Otimização.

Abstract

The industry seeks to increase productivity with high quality in less time, frequently resorting to numerical control machines (CNC) to achieve these goals.

This study analyzed the surface roughness and production rate in milling aluminum 5083 H111, varying the tool path and three machining parameters: cutting speed, feed per tooth, and cutting depth. The Taguchi method and Grey relational analysis were used to determine the optimal combination of parameters and to assess the influence of each.

For the ZigZag toolpath (Sample Z), the combination A3B1C3 was obtained, corresponding to a cutting speed of 150 [m/min], a feed per tooth of 0.035 [mm/rev], and a cutting depth of 2.0 [mm]. For the Parallel Spiral toolpath (Sample S), the combination A3B3C1 was obtained, with a cutting speed of 150 [m/min], a feed per tooth of 0.025 [mm/rev], and a cutting depth of 1.0 [mm]. For the OneWay toolpath (Sample O), the combination A1B3C3 was obtained, that is, a cutting speed of 50 [m/min], a feed per tooth of 0.025 [mm/rev], and a cutting depth of 2.0 [mm]. ANOVA revealed that cutting speed was the most influential parameter for the ZigZag and Parallel Spiral paths, while feed per tooth was more influential for the OneWay path.

The study demonstrated the effectiveness of the applied optimization methods, allowing the identification of the best conditions to maximize quality and productivity in milling aluminum 5083 H111.

Keywords: CNC, Surface roughness, Production rate, Milling, Taguchi, Grey Relational Analysis, ANOVA, Optimization.

Índice

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Organização dos Capítulos	3
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	4
2.1	Processo de usinagem	4
2.2	Fresamento.....	5
2.2.1	Tipos de fresamento	5
2.3	Parâmetros de fresamento	8
2.4	Ciclos fixos de <i>pocket</i>	11
2.5	Caminhos de ferramenta	13
2.6	Alumínio e suas ligas	14
2.6.1	ligas de alumínio – magnésio	17
2.6.2	Liga de alumínio 5083 H111.....	17
2.7	Rugosidade.....	19
2.7.1	Rugosímetro	22
2.8	Método de Taguchi	22
2.9	Análise relacional de Grey	24
2.10	Análise ANOVA.....	28
3	ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	29
3.1	Procedimento experimental segundo Taguchi	29
3.2	Materiais e ferramentas	33

3.3	Resultados obtidos	37
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	41
4.1	Método de Taguchi	41
4.1.1	Razão Sinal-Ruído.....	41
4.1.1.1	Rugosidade Superficial.....	41
4.1.2	Taxa de produção	47
4.2	Análise ANOVA Taguchi.....	48
4.2.1	ANOVA Rugosidade Superficial	48
4.2.2	ANOVA - Taxa de produção	51
4.3	Análise relacional de Grey.....	51
4.3.1	Amostra Z.....	52
4.3.2	Amostra S.....	55
4.3.2.1	Confirmação de resultados – Amostra S	55
4.3.3	Amostra O	57
4.4	ANOVA - Análise relacional de Grey	57
4.4.1	Amostra Z.....	58
4.4.2	Amostra S.....	58
4.4.3	Amostra O	59
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	61
5.1	CONCLUSÃO	61
5.2	TRABALHOS FUTUROS	62
	REFERÊNCIAS	64

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Propriedades físicas típicas do alumínio [33].	15
Tabela 2 - Principais ligas de alumínio e suas aplicações[36], [37].	16
Tabela 3 - Elementos Químicos da liga 5083 H111[39].	18
Tabela 4 - Especificação dos tratamentos por deformação plástica[40].	18
Tabela 5 - Significado dos Graus de Dureza[41].	18
Tabela 6 – Propriedades da liga de alumínio 5083-H111[39].	19
Tabela 7 - Indicação de classes conforme valores de rugosidade segundo norma ISO 1302..	21
Tabela 8 - Valores dos parâmetros para diferentes níveis.....	30
Tabela 9 - Quadro de Taguchi para seleção da matriz ortogonal.....	30
Tabela 10 - Matriz ortogonal L9 segundo Taguchi.....	31
Tabela 11 - Matriz ortogonal L9 segundo Taguchi com os valores dos parâmetros escolhidos.	31
Tabela 12 - Matriz ortogonal L9 segundo Taguchi com sistema de unidades padronizado. ...	32
Tabela 13 - Valores de rugosidade média - Ensaio Z.	38
Tabela 14 - Valores de rugosidade média - Ensaio S.....	38
Tabela 15 - Valores de rugosidade média - Amostra O.	39
Tabela 16 - Taxa de produção para as amostras Z, S e O.	39
Tabela 17 - Valores S/N das rugosidades - Amostra Z.....	42
Tabela 18 - Abreviaturas para os vários níveis dos parâmetros.	42
Tabela 19 - Valores S/N das rugosidades – Amostra S.....	44
Tabela 20 - Valores S/N das rugosidades - Amostra O.....	45

Tabela 21 - Valores da ANOVA para rugosidade do fundo - Amostra Z.....	48
Tabela 22 - Valores da ANOVA para rugosidade lateral - Amostra Z.....	49
Tabela 23 - Valores da ANOVA para rugosidade do fundo - Amostra S.....	49
Tabela 24 - Valores da ANOVA para rugosidade lateral - Amostra S.	49
Tabela 25 - Valores da ANOVA para rugosidade do fundo - Amostra O.	50
Tabela 26 - Valores da ANOVA para rugosidade lateral - Amostra O.....	50
Tabela 27 - Valores da ANOVA para a taxa de produção - Amostra Z, S e O.....	51
Tabela 28 – Base de dados para análise relacional de Grey - Amostra Z.....	52
Tabela 29 -Dados normalizados - Amostra Z.	53
Tabela 30 - Coeficiente relacional de Grey - Amostra Z.....	53
Tabela 31 - Grau relacional de Grey e sua ordem - Amostra Z.	54
Tabela 32 - Resposta para o grau relacional de Grey – Amostra Z. Erro! Indicador não definido.	
Tabela 33 - Grau Relacional de Grey - Amostra S. Erro! Indicador não definido.	
Tabela 34 - S/N rugosidade do fundo e lateral - Contraprova Amostra S.	56
Tabela 35 - Comparação e melhoria entre graus relacionais de Grey – Amostra S.....	56
Tabela 36 - Grau Relacional de Grey - Amostra O..... Erro! Indicador não definido.	
Tabela 37 - Valores da ANOVA para a análise relacional de Grey - Amostra Z.....	58
Tabela 38 - Valores da ANOVA para a análise relacional de Grey - Amostra S.	58
Tabela 39 - Valores da ANOVA para a análise relacional de Grey - Amostra O.....	59

Lista de Figuras

Figura 1: Fresagem cilíndrica (a) e fresagem frontal (b), adaptada de [21].	6
Figura 2 - Fresagem periférica: a) faceamento, b) abertura de canal, c) fresagem lateral, e d) fresagem de contorno [22].	6
Figura 3 - – Fresagem de topo: a) faceamento, b) faceamento parcial, c) fresagem frontal de canal, d) fresagem lateral de contorno, e) fresagem de caixa, e f) fresagem de superfície 3D [22].	7
Figura 4: Fresamento concordante(a) e fresamento discordante(b) [24].	8
Figura 5 - Representação dos parâmetros de corte em fresagem frontal[20].	9
Figura 6 - Usinagem pocket [27].	12
Figura 7 - Caminhos de usinagem: (a) <i>OneWay</i> ; (b) <i>ZigZag</i> ; e (c) <i>Parallel Spiral</i> [28].	14
Figura 8 - Rugosímetro[49].	22
Figura 9 - (A) Avanço por dente x Profundidade de corte(a_p), (B) Profundidade radial (a_e) x Profundidade de corte (a_p) [68].	30
Figura 10 - Estratégias de usinagem estudadas. A – <i>ZigZag</i> , B - <i>Parallel Spiral</i> , C - <i>One Way</i>	32
Figura 11 - Bloco de alumínio 5083-H111.	33
Figura 12- Vista superior e vista frontal da geometria final da amostra.	34
Figura 13 – A – Geometria final 3D, B – Amostra usinada.	34
Figura 14 – Fresadora CNC – Deckel Maho DMC 63V.	35
Figura 15 - Fresa - JSE514060D2C.0Z4 SIRA da marca <i>Seco</i> [®] .	35
Figura 16 - Locais de aferição de rugosidade.	36

Figura 17 - Mitutoyo modelo SJ-301.	37
Figura 18 - Valor médio S/N por níveis - rugosidade de fundo – Amostra Z.....	43
Figura 19 - Valor médio S/N por níveis - rugosidade lateral – Amostra Z.....	43
Figura 20 - Valor médio S/N por níveis - Rugosidade do fundo – Amostra S.	44
Figura 21 - Valor médio S/N por níveis - Rugosidade lateral – Amostra S.....	45
Figura 22 - Valor médio S/N por níveis - Rugosidade de fundo - Amostra O.....	46
Figura 23 - Valor médio S/N por níveis - Rugosidade lateral - Amostra O.....	46
Figura 24 - Valor médio da taxa de produção por níveis - Amostra Z, S e O.....	47

Lista de símbolos

N	Velocidade de rotação [m/min]
V_c	Velocidade de corte [m/min]
D	Diâmetro externo da ferramenta [mm]
π	Número Pi
V_f	Velocidade de avanço [mm/min]
Z_n	Número de dentes
f_z	Avanço por dente [mm/t]
a_e	Largura de corte [mm]
a_p	Profundidade de corte [mm]
R_a	Rugosidade média
n	Número de parâmetros
y_i	Desvio do perfil de rugosidade
S/N	Razão sinal-ruído
n	Número de observações
Y_i	Dados observados
\bar{y}	Média dos dados observados
σ^2	Variância de y
ξ_{ij}	Coefficiente relacional de Grey
ζ	Coefficiente de influência da característica
y_i	Grau relacional de Grey
$\hat{\eta}$	Grau relacional de Grey estimado

Abreviaturas

ANOVA	Análise de variância
MRR	taxa de remoção de material
CNC	Controle Numérico Computadorizado
CAM	Manufatura assistida por computador
CAD	Projeto assistido por computador
Al	Alumínio
Mg	Magnésio
ISO	Organização Internacional de Normalização
DIN	Deutsches Institut für Normung
GRA	Análise relacional de Grey
GDL	Graus de liberdades
RPM	Rotações por minuto
ESTIG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

No cenário global, a competitividade entre as empresas é determinada pela capacidade de se adaptarem e se destacarem como resposta à procura e exigências dos mercados [1].

A importância dos processos de usinagem, também conhecidos como iniciação de cavacos, tem sido enfatizada ao longo do tempo, razão pela qual as operações de usinagem são o processo mais versátil e comum para a obtenção de geometrias complexas de alta precisão e diversos materiais [2].

Na indústria, existem certos requisitos técnicos, como a necessidade de um acabamento de superfície de alta qualidade, a remoção de grandes quantidades de material para obter geometrias complexas e uma alta precisão dimensional. Além disso, há também requisitos econômicos, uma vez que o tempo envolvido no processo limita a cadência produtiva. Portanto, é essencial realizar estudos que analisem o comportamento do material sob determinadas condições de corte. O principal objetivo dos estudos de usinabilidade é relacionar as condições de corte (como velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, tipo de material, geometria da ferramenta, etc.) com vários aspectos que influenciam o processo (como forças de corte, desgaste da ferramenta, acabamento superficial, precisão dimensional, custo e taxa de produção) [3].

A necessidade de tolerâncias menores e produtos de alta qualidade tem pressionado a indústria de manufatura a aprimorar continuamente as suas tecnologias de usinagem e controle de qualidade. Um dos processos fundamentais de corte de metal é o fresamento de topo, frequentemente, empregue no fresamento de *pocket* na fabricação de matrizes e moldes. A qualidade de um *pocket* é avaliada diretamente pela sua rugosidade superficial, pois características funcionais de um produto, como contato, desgaste, transmissão de calor e revestimento, podem ser influenciadas por essa rugosidade [4]. É enfatizado por vários autores a importância da otimização das condições e a geração de caminhos de ferramenta de usinagem para o custo e o *lead time* do fresamentos de *pockets* [5].

Diante das constantes mudanças no cenário industrial, a aplicação de técnicas de otimização nos processos de corte por arranque de cavaco é crucial para atender à crescente

procura por produtos de alta qualidade. Essas técnicas de otimização são essenciais para o aprimoramento contínuo da qualidade de produtos e processos, e incluem a criação de modelos que relacionam os parâmetros do processo e a determinação das condições ótimas de corte [6].

Para alcançar a combinação ótima dos parâmetros, é necessário avaliar um grande número de combinações possíveis. As técnicas de otimização oferecem uma solução eficaz para reduzir a quantidade de experimentos necessários. Ao longo das últimas décadas, foram desenvolvidas diversas técnicas de otimização voltadas para a usinagem e, neste estudo, foram empregues a técnica de Taguchi e a Análise Relacional de Grey, visando otimizar a rugosidade superficial e a taxa de produção [7].

O Método de Taguchi [8] facilita a criação de matrizes experimentais ortogonais, nas quais a variação entre diferentes parâmetros possibilita identificar a combinação ideal para um determinado fator de controle, como a rugosidade [9]. Geralmente, este método é utilizado em conjunto com ferramentas estatísticas, como a análise de variância (ANOVA), para modelar a incerteza dos resultados experimentais e estimar possíveis resultados futuros.

Já na Análise Relacional de Grey, os parâmetros são avaliados em uma escala de 0 a 1, refletindo sua importância relativa e permitindo a identificação da combinação ótima de parâmetros. Esta abordagem tem ganho ampla utilização nos últimos anos, muitas vezes combinada com o Método de Taguchi [10].

1.2 Objetivos

O objetivo desta dissertação é otimizar parâmetros de usinagem do ciclo fixo de *pocket* de modo a minimizar a rugosidade superficial e maximizar a taxa de produção. Para isso, serão escolhidos três tipos de caminho de ferramenta para se realizar a usinagem e se fará a otimização de cada um deles.

Para efetuar o planejamento dos experimentos e tratamentos de dados para a otimização, serão utilizados o método de Taguchi e a análise relacional de Grey. Através do Método de Taguchi, são estabelecidos os parâmetros de usinagem, juntamente com seus respectivos níveis, e é criada uma matriz ortogonal que especifica as diferentes combinações para os experimentos. Através dele, também é possível determinar a melhor combinação de parâmetros visando cada característica de qualidade isoladamente. A análise relacional de Grey foi usada para encontrar a combinação ótima de parâmetros de forma a atender todas as características de controle (rugosidade superficial e taxa de produção) de acordo com a importância de cada uma. Também

se pretende avaliar a influência de cada parâmetro no resultado da usinagem e, para isso, será utilizada a análise de variância (ANOVA).

1.3 Organização dos Capítulos

Este trabalho encontra-se dividido em seis capítulos. Para facilitar o entendimento o conteúdo destes pode ser resumido da seguinte forma:

1º Capítulo - Tem como objetivo apresentar uma introdução ao tema da dissertação, apresentar a motivação e os principais objetivos e ao final a estrutura do trabalho.

2º Capítulo – Contém a fundamentação teórica relevantes e necessárias para a compreensão do tema estudado nesta dissertação. No início, é apresentada uma descrição sobre a usinagem (corte por arranque de cavaco), dando ênfase no processo de fresamento, em específico, de pockets e os caminhos de ferramentas. Em seguida, é apresentado o material em estudo e a característica estudada (rugosidade). Por fim, são descritos os métodos de otimização que foram utilizados, o método de Taguchi, a análise relacional de Grey e a análise de variância (ANOVA).

3º Capítulo – São apresentados os materiais empregues no estudo, juntamente com detalhes sobre a configuração experimental adotada e os ensaios conduzidos ao longo da pesquisa utilizando o método de Taguchi. Também são apresentados os resultados obtidos de cada ensaio de rugosidade realizado, assim como a taxa de produção.

4º Capítulo – Neste capítulo são realizadas as análises dos dados obtidos anteriormente, e são feitas algumas considerações acerca dos resultados.

5º Capítulo – Apresenta as conclusões gerais do trabalho e são apresentadas algumas propostas de trabalhos futuros semelhantes ao tema aqui estudado.

Ao final desse trabalho é mencionada a bibliografia utilizada como base para a elaboração desta dissertação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é descrita a fundamentação teórica relevante e necessária para a compreensão do tema abordado nesta dissertação. No início, é apresentada uma descrição da usinagem (corte por arranque de cavaco), com ênfase no processo de fresamento, especificamente, de *pockets* e caminhos de ferramentas. De seguida, são descritos o material em estudo e a característica analisada (rugosidade). Finalmente, são detalhados os métodos de otimização utilizados: o método de Taguchi, a análise relacional de Grey e a análise de variância (ANOVA) que servirão para determinar os parâmetros ótimos de usinagem.

2.1 Processo de usinagem

O processo de usinagem viabiliza a fabricação de peças complexas, apresentando geometrias intrincadas, excelente acabamento superficial e elevada precisão dimensional [11]. Essas características fazem com que esse processo seja empregue em diversas áreas e seguindo vários métodos diferentes, conforme a necessidade. Na indústria, os métodos de fabricação mais comuns que envolvem o processo de remoção de material são o torneamento, fresagem, aplainamento, furação e serragem [12].

Os métodos de usinagem (corte por remoção de cavacos) são geralmente caracterizados como processos de fabricação nos quais ocorre a remoção de material devido ao movimento relativo entre a peça a ser usinada e a ferramenta de corte [13]. Esse movimento é composto por, no mínimo, dois movimentos simples, o movimento de corte e o movimento de avanço [13].

O movimento principal da máquina é o movimento de corte, o qual, embora seja sempre simples, pode variar conforme o processo de usinagem, podendo ser [14]:

- Movimento de rotação da ferramenta;
- Movimento de rotação da peça;
- Movimento de translação, no caso de nem a peça nem a ferramenta se encontrarem em rotação.

Somado ao movimento de corte temos o movimento de avanço que refere-se à alteração na posição relativa entre a peça e a ferramenta durante a formação de uma superfície de corte e, por fim, temos o movimento de penetração, que representa a dimensão da camada de material a ser removida durante o processo de corte [14].

2.2 Fresamento

Entre os processos de usinagem mencionados anteriormente, o fresamento se destaca pela sua versatilidade, superando a furação, torneamento e outros métodos de fabricação por remoção de material [15]. A prática da fresagem abrange desde operações simples de faceamento e contorno até à usinagem de uma ampla gama de formas complexas [16].

Esse procedimento envolve cortes intermitentes utilizando uma ferramenta com um ou mais dentes, denominada fresa. A ferramenta é montada em um fuso rotativo e fixada com um dispositivo apropriado, executando movimentos de corte. Ao mesmo tempo, a peça de trabalho, devidamente fixada na mesa da máquina operatriz, move-se linearmente em direção à ferramenta [17].

Podemos compreender que o fresamento consiste na remoção de material com uma espessura de corte instantaneamente variável em um contexto interrompido, resultante da combinação entre o avanço da mesa e o movimento rotativo da ferramenta multicortante, que possui uma geometria específica [18]. Neste processo, cada aresta de corte retira uma quantidade reduzida de material, originando cavacos pequenos que são facilmente removidos da região de usinagem [15].

2.2.1 Tipos de fresamento

A fresagem, como já dito, é um processo com grande flexibilidade na produção, capaz de criar componentes com distintas formas e dimensões, muito disso se deve aos diversos tipos de fresamentos, cada um adaptado para atender a requisitos específicos de usinagem.

Os dois modos principais de fresagem são a de forma cilíndrica ou tangencial e a frontal ou plano. Existem variações desses dois métodos de fresagem, os quais podem ser classificados como outros tipos de fresamento, dependendo das características específicas da peça e da ferramenta empregues [19].

A fresagem cilíndrica, também conhecida como fresamento tangencial, é identificada pela disposição do eixo da fresa em paralelo à superfície de trabalho da peça (Figura 1 – a) [20]. Esse processo executa a maior parte da operação de usinagem na superfície cilíndrica da peça ferramenta [18]. Já na fresagem de topo, também conhecida como fresamento frontal, o eixo da fresa é posicionado de maneira perpendicular à superfície a ser usinada, agindo na face frontal da ferramenta (Figura 1– b) [13], [18]. Nesse procedimento, a operação de corte pode ocorrer tanto na extremidade superior quanto na periferia da ferramenta [16].

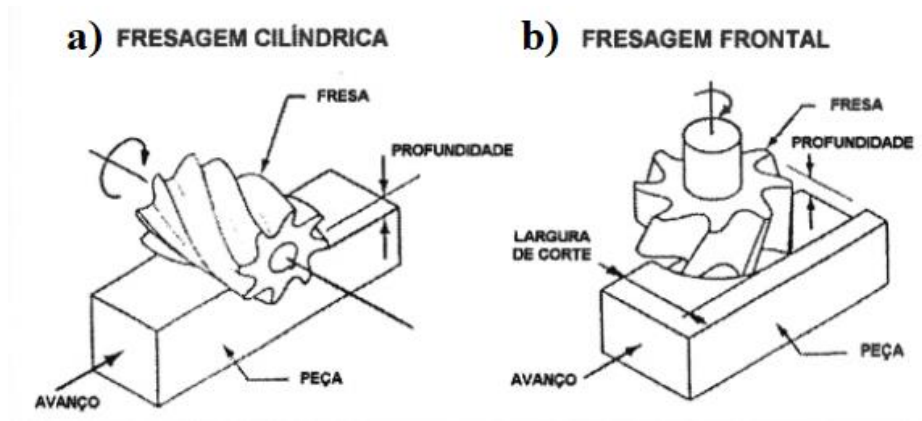


Figura 1: Fresagem cilíndrica (a) e fresagem frontal (b), adaptada de [21].

Dentro desses dois modos de operação temos variações conforme a necessidade de trabalho, como podemos ver na Figura 2 temos alguns métodos de utilização da fresagem cilíndrica, enquanto na Figura 3 temos algumas abordagens da fresagem frontal.

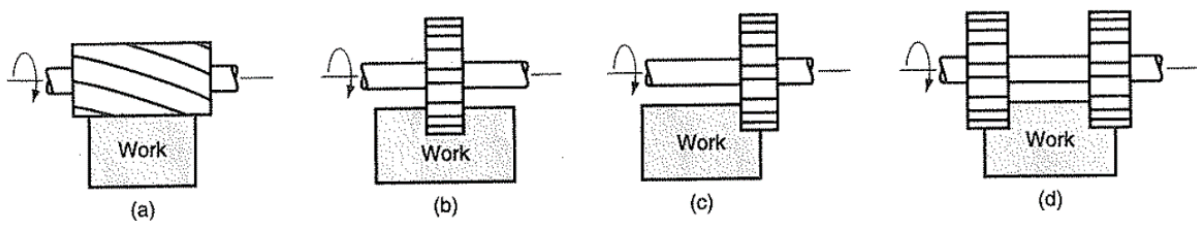


Figura 2 - Fresagem periférica: a) faceamento, b) abertura de canal, c) fresagem lateral, e d) fresagem de contorno [22].

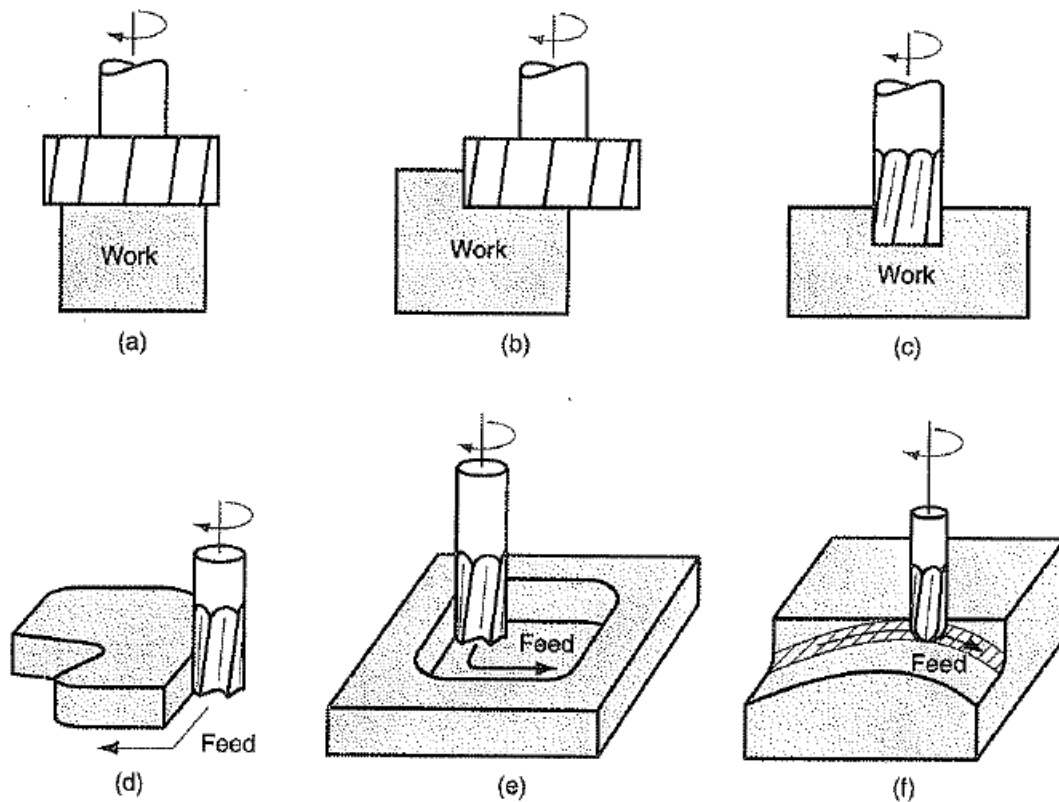


Figura 3 - - Fresagem de topo: a) faceamento, b) faceamento parcial, c) fresagem frontal de canal, d) fresagem lateral de contorno, e) fresagem de caixa, e f) fresagem de superfície 3D [22].

Também podemos classificar a fresagem de acordo com o movimento da fresa em relação a peça, cada um dos dois movimentos muda de maneira a que o dente da fresa penetra na peça a ser usinada. No fresamento concordante o cavaco é gerado começando com uma espessura máxima e diminuindo progressivamente à medida que a ferramenta percorre seu caminho para fora do material, alcançando eventualmente a espessura mínima, como é mostrado na Figura 4 (a). Por outro lado a Figura 4 (b) ilustra o início da operação de corte com uma espessura mínima, que aumenta gradualmente até atingir o máximo à medida que a ferramenta se afasta do material, isso caracteriza o fresamento discordante [2],[23].

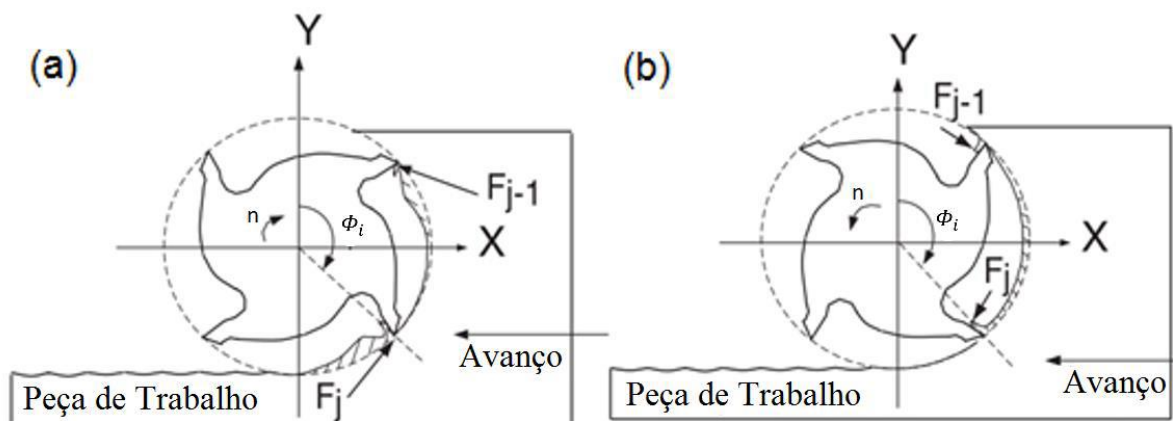


Figura 4: Fresamento concordante(a) e fresamento discordante(b) [24].

2.3 Parâmetros de fresamento

Os parâmetros de corte são um conjunto de dados que caracterizam o movimento relativo do par ferramenta-peça a usinar, durante uma operação de usinagem.

Na fresagem, os principais parâmetros de corte incluem a velocidade de rotação, a velocidade de avanço, a profundidade de corte e a largura de corte.

a) Velocidade de corte – A velocidade de corte corresponde à velocidade linear de um ponto na periferia da fresa e estabelece a velocidade a que se pode cortar o material, sendo medida em metros por minuto. A velocidade de corte influencia no cálculo da velocidade de rotação utilizada na máquina, sendo a primeira estabelecida pelo fabricante da ferramenta [25].

b) Velocidade de Avanço – Velocidade de deslocamento da fresa sobre a peça e define a espessura da apra, sendo o seu valor expresso em milímetros por minuto ou milímetros por rotação. Em conjunto com a velocidade de rotação, são os dois fatores que mais influenciam a vida útil da ferramenta.

c) Profundidade de Corte (ou penetração axial) – Dimensão ou altura de penetração da fresa no material da peça. Este valor permite determinar a altura do cavaco que conjuntamente com a espessura dele estabelece o valor da secção desta.

d) Largura de Corte (ou penetração radial) – Dimensão ou altura de atuação da fresa durante o corte, sendo calculada relativamente ao diâmetro da fresa em valores que vão normalmente desde os 50% a 90% do diâmetro da ferramenta.

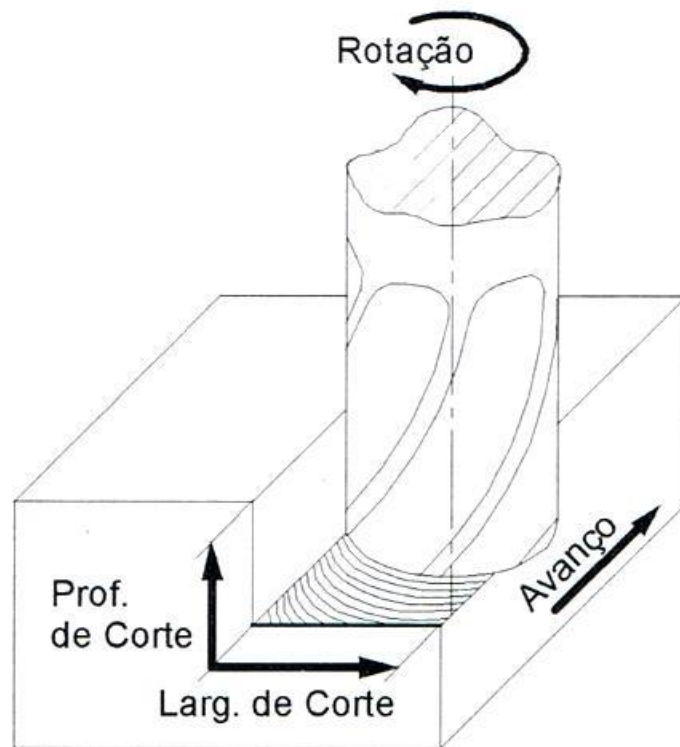


Figura 5 - Representação dos parâmetros de corte em fresagem frontal[20].

Na Figura 5 podemos ver exemplificar alguns dos parâmetros citados anteriormente. Além dos citados acima existem mais parâmetros, porém somente alguns são recomendados pelos fornecedores e fabricantes de ferramentas, pois os demais são encontrados através de operações matemáticas entre estes e as propriedades geométricas da ferramenta.

Os parâmetros como velocidade de corte, avanço por dente, penetração de trabalho e profundidade ou largura de corte são recomendados pelo fabricante/fornecedor e estão dentro de faixas de valores aconselhados para usinagem de materiais específicos, com ou sem o uso de fluido de corte [26]. É importante observar que há ferramentas dedicadas a cada tipo de corte, enquanto outras são versáteis e podem realizar diferentes tipos de cortes, tendo conjuntos de parâmetros específicos para cada método. Além disso, existem ferramentas designadas para operações de desbaste, acabamento ou ambas, requerendo ajustes adequados nos parâmetros correspondentes.

Operações de acabamento, como o próprio nome sugere, têm o objetivo de finalizar a peça, o que implica remover pequenas quantidades de material. Elas são caracterizadas por velocidades de avanço e penetração baixas, com velocidade de corte mais alta. Por outro lado,

as operações de desbaste são exatamente o oposto, com valores inversos dos parâmetros de corte.

O cálculo de alguns parâmetros se faz necessário em certas ocasiões devido a necessidade métrica dos equipamentos utilizados. No fresamento um bom exemplo disso é a rotação, o fornecedor da ferramenta irá informar qual a velocidade de corte ideal para aquele caso específico de usinagem e o operador terá que utilizar essa informação em conjunto com a geometria da ferramenta para calcular a rotação que deverá ser inserida na máquina de forma a termos as condições esperadas de usinagem.

A velocidade de corte (V_c) varia conforme o diâmetro externo da ferramenta (D), estabelecendo uma relação com a velocidade de rotação do eixo (N) por meio da seguinte equação (1) [22]:

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

Onde:

- I. V_c = Velocidade de corte [m/min];
- II. D = Diâmetro externo da ferramenta [mm];
- III. N = Velocidade de rotação [rpm].

Assim como a equação (1) utiliza a velocidade do corte para determinar a velocidade de rotação que deve ser introduzida na fresa, podemos utilizar o avanço por dente, dado pelo fornecedor da ferramenta em conjunto do números de dentes utilizados e velocidade de rotação, para calcular a velocidade de avanço que deverá ser utilizada na fresadora, conforme equação (2) abaixo:

$$V_f = N * Z_n * f_z \quad (2)$$

Onde:

- I. V_f = Velocidade de avanço [mm/min];
- II. N = Velocidade de rotação [rpm];
- III. Z_n = Número de dentes;
- IV. f_z = Avanço por dente [mm/t].

Os cálculos de parâmetros de usinagem nem sempre são requisitados por questões da fabricação em si, mas para outros motivos como a análise da produtividade da operação. A produtividade na operação de fresagem pode ser avaliada pela quantidade de processamento de material em um determinado tempo. Geralmente, esse grau de rendimento é definido pela taxa de remoção de material (MRR), que pode ser calculado utilizando a equação (3) abaixo:

$$MRR = \frac{a_e * a_p * V_f}{1000} \quad (3)$$

Onde:

- I. MRR = taxa de remoção de material [cm³/min]
- II. V_f = Velocidade de avanço [mm/min];
- III. a_e = Largura de corte [mm];
- IV. a_p = Profundidade de corte [mm];

2.4 Ciclos fixos de *pocket*

No domínio da usinagem por Controle Numérico Computadorizado (CNC), o fresamento de *pockets* (em português bolsões ou cavidades) se destaca como uma operação crítica e fundamental para a indústria. É um processo versátil utilizado em vários setores como o automotivo, aeroespacial, eletrônico e fabricação de moldes e matrizes por produzir peças com recursos e geometria complexas.

O fresamento de *pockets* é uma operação de usinagem, baseada em ciclos fixos, realizada em máquinas CNC para criar bolsões ou cavidades em uma peça de trabalho. Este processo envolve a remoção de material da peça de trabalho usando uma ferramenta de corte rotativa, como uma fresa (Figura 6).

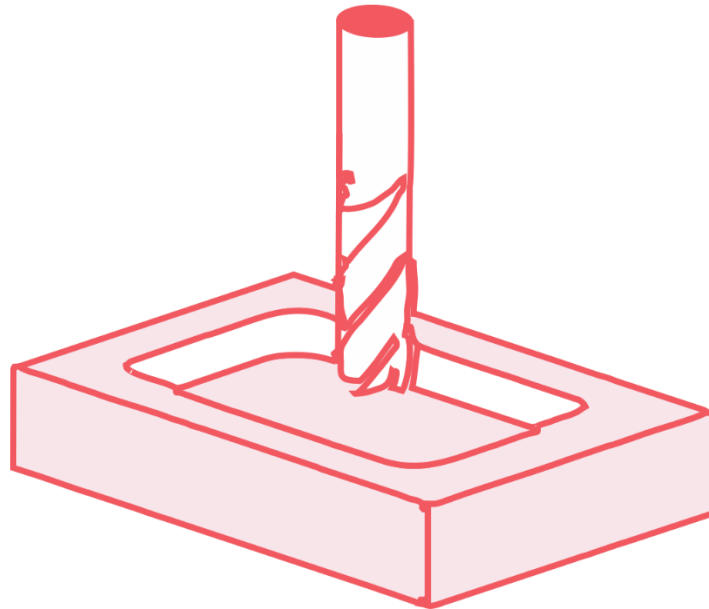


Figura 6 - Usinagem pocket [27].

Ao iniciar a usinagem de uma cavidade (*pocket*) envolve técnicas específicas para garantir a eficiência do processo e a qualidade do acabamento. Três métodos comuns para iniciar a usinagem *pocket* são: Perfuração, Rampa Circular e Plunge Ramp. Cada método tem suas próprias vantagens e aplicações específicas.

- **Perfuração (*Drilling*)**

A perfuração é o método mais direto para iniciar a usinagem de uma cavidade. Consiste em fazer um furo piloto que serve como ponto de entrada para a ferramenta de fresamento. Utilizado em situações em que a cavidade tem um ponto de entrada claro e onde a precisão inicial é crucial. Ideal para cavidades pequenas ou para iniciar a usinagem em materiais duros.

- **Rampa Circular (*Helical Interpolation*)**

A rampa circular, ou interpolação helicoidal, envolve a entrada da ferramenta em um movimento helicoidal, descendo gradualmente em espiral para criar a cavidade. Utilizado para cavidades de tamanho médio a grande, onde a suavidade da entrada e a eficiência do tempo são importantes. Ideal para materiais mais macios e quando se deseja minimizar o desgaste da ferramenta.

- ***Plunging Ramp***

O *Plunging Ramp* envolve a entrada da ferramenta em um ângulo inclinado, descendo gradualmente em rampas para formar a cavidade. Ideal para cavidades com formas complexas

ou irregulares e onde a estabilidade da ferramenta é crítica. Usado em materiais variados, desde metais macios até materiais compósitos.

2.5 Caminhos de ferramenta

O fresamento de *pocket* pode ser realizado utilizando diferentes estratégias de percurso da ferramenta. O caminho de ferramenta na usinagem é a trajetória programada que a ferramenta de corte (fresa) segue para usinar e finalizar uma peça de trabalho. Este caminho determina os movimentos da ferramenta em relação ao material, garantindo a geometria desejada, o acabamento superficial e a precisão do produto final. A escolha da estratégia de caminho da ferramenta pode impactar significativamente no tempo de usinagem, na qualidade da superfície e no desgaste da ferramenta, tornando-se um aspecto crucial do processo de usinagem.

Os caminhos da ferramenta são, geralmente, gerados por *software* de manufatura assistida por computador (CAM), que converte as especificações do design de um modelo CAD (projeto assistido por computador) em uma série de instruções para máquinas CNC (controle numérico computadorizado).

Em geral, três estratégias são comumente utilizadas em softwares CAM: uma direção, ida e volta, e percurso em espiral [28]. A estratégia *OneWay* envolve mover a ferramenta em linhas paralelas sobre a superfície a ser usinada. No final de cada linha, a ferramenta se eleva e retorna, escaneando a área com valores fixos de avanço lateral (veja Figura 7 (a)). No fresamento *ZigZag*, a ferramenta segue um caminho em ziguezague, movendo-se para frente e para trás na peça no plano X–Y (Figura 7(b)). Vale ressaltar que como a ferramenta realiza movimentos em ziguezague, ocorrem fresamentos ascendentes e descendentes. O fresamento *Parallel Spiral* é uma estratégia onde a ferramenta pode começar no centro do bolso e então prosseguir em espiral para fora. A ferramenta retorna ao ponto inicial em cada ciclo e depois corta para fora no próximo ciclo externo. Conforme mostrado na Figura 7 (c), a ferramenta avança em direção à periferia do bolso até que toda a superfície da peça seja usinada [28].

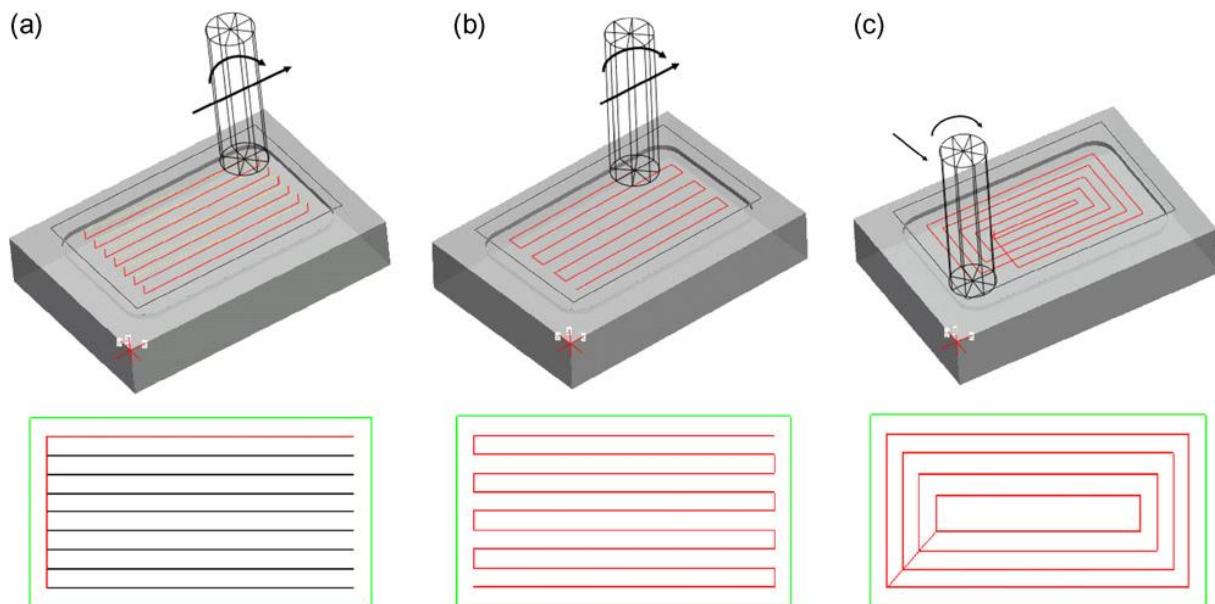


Figura 7 - Caminhos de usinagem: (a) *OneWay*; (b) *ZigZag*; e (c) *Parallel Spiral* [28].

2.6 Alumínio e suas ligas

O alumínio é amplamente empregue na indústria metalomecânica como o principal metal não ferroso, devido à sua notável versatilidade, leveza, resistência à corrosão, eficiente condução de calor, facilidade de usinagem e excelente reciclabilidade. Sua adaptabilidade na usinagem, permitindo ajustes de velocidade e facilidade de manuseio sem a necessidade de revestimentos protetores, contribui para sua rápida disseminação na indústria [29].

O alumínio é o metal mais amplamente disponível globalmente [30]. O aumento significativo no consumo de alumínio nos últimos anos é evidência do papel crucial que este metal desempenha na indústria contemporânea [31].

A diversidade de aplicações do alumínio resulta da vasta gama de propriedades do material e da capacidade de combinar essas propriedades de maneira específica, permitindo sua utilização tanto na construção civil quanto em diversas indústrias [32].

As características essenciais do alumínio, que garantem sua notável versatilidade, são destacadas na Tabela 1. Entretanto, devido à sua resistência limitada quando puro, o uso do alumínio em sua forma pura fica restrito a aplicações que demandam baixos esforços mecânicos. Como resposta a essa limitação, as indústrias de alumínio têm buscado desenvolver ligas que apresentem propriedades mecânicas superiores [31].

Tabela 1 - Propriedades físicas típicas do alumínio [33].

Propriedades físicas típicas Alumínio	
Densidade (g/cm ³)	2,7
Temperatura de fusão (°C)	660
Módulo de elasticidade (MPa)	70000
Coefficiente de dilatação térmica (L/°C);	23.10-6
Condutibilidade térmica a 25°C (Cal/cm/°C)	0,53
Condutibilidade elétrica (%IACS)	61

Incorporar elementos de liga ao alumínio possibilita a criação de novas características que expandem ainda mais suas possíveis aplicações [31], [34]. O objetivo primordial da introdução desses elementos é fortalecer a resistência mecânica e a capacidade de resistir à corrosão do alumínio, sem comprometer suas demais propriedades, tornando as ligas de alumínio altamente desejáveis para diversas aplicações na engenharia mecânica [35]. Embora o alumínio seja reconhecido por sua excelente usinabilidade, é essencial examinar as diversas ligas disponíveis para compreender as particularidades de cada uma.

O Tabela 2 apresenta as séries e os principais elementos de adição nas ligas de alumínio.

Algumas ligas de alumínio apresentam a notável capacidade de responder ao tratamento térmico, resultando em resistências superiores às alcançadas apenas por meio do trabalho a frio. Consequentemente, as ligas de alumínio são categorizadas em dois grupos distintos: as tratáveis termicamente, que oferecem maior resistência, e as não-tratáveis termicamente, cuja resistência só pode ser incrementada por meio do trabalho a frio [32].

As ligas de alumínio pertencentes a cada grupo são:

- **Tratáveis termicamente:** Estão incluídas as ligas das séries 2xxx, 6xxx e 7xxx;
- **Não tratáveis termicamente:** Estão incluídas as ligas das séries 1xxx, 3xxx, 4xxx e 5xxx.

As ligas tratáveis termicamente têm a capacidade de passar por trabalho a frio inicialmente e, em seguida, serem submetidas a tratamento térmico para aumentar sua resistência mecânica. Diversos métodos de tratamento térmico são empregues, incluindo homogeneização, solubilização, envelhecimento, recozimento pleno, recozimento parcial e estabilização. Esses processos visam eliminar ou reduzir segregações, criar estruturas estáveis e controlar diversas características metalúrgicas, como propriedades mecânicas e tamanho de grãos [32].

Tabela 2 - Principais ligas de alumínio e suas aplicações[36], [37].

Liga	Propriedades	Série
Liga de alumínio cobre	O cobre é um dos mais importantes elementos de liga do alumínio, o cobre possui alta solubilidade e melhora a resistência à ruptura do alumínio. Muitas ligas comerciais contêm cobre na concentração de 1 a 10%.	2XXX
Liga de alumínio manganês	São ligas não tratáveis termicamente contendo até 1% de manganês, o manganês aumenta consideravelmente a resistência ao escoamento do alumínio.	3XXX
Liga de alumínio silício	As ligas de alumínio silício possuem aplicação como ligas para fundição de alumínio, o silício melhora a fluidez do alumínio e também melhora levemente a resistência ao escoamento.	4XXX
Liga de alumínio magnésio	O binário alumínio magnésio é a base para uma série importante de ligas de alumínio não tratáveis termicamente, o magnésio possui importante solubilidade no alumínio. O teor de magnésio no alumínio não é maior que 7%, o magnésio melhora a resistência à tração e as propriedades mecânicas obtidas após o trabalho a frio.	5XXX
Liga de alumínio magnésio silício	Esta liga é a base para a maior classe de ligas tratáveis termicamente para produtos fundidos e forjados. Estas ligas contêm muitas propriedades desejadas como resistência ao escoamento moderado boa resistência à corrosão.	6XXX
Liga de alumínio zinco	As ligas de alumínio zinco possuem boas propriedades para proteção eletrolítica sem corrosão.	7XXX
Liga de alumínio estanho	São as ligas formadas por uma variada quantidade de elementos químicos tais como as ligas 8090 ou até as ligas de alumínio combinadas com elementos de terras raras e metais de transição.	8XXX

2.6.1 ligas de alumínio – magnésio

O principal objetivo ao utilizar ligas de alumínio é aprimorar sua resistência mecânica sem comprometer suas outras propriedades. Durante o processo de fusão, o alumínio tem a capacidade de incorporar outros materiais e substâncias metaloides. Durante o resfriamento e solidificação, certos componentes da liga permanecem em soluções sólidas, formando partículas rígidas de compostos intermetálicos. Essas partículas fortalecem a estrutura cristalina do alumínio, aumentando sua resistência mecânica [33]. Esse fortalecimento é essencial para ampliar a utilidade industrial das ligas de alumínio.

As ligas de alumínio-magnésio fazem parte do grupo de ligas de alumínio que não respondem ao tratamento térmico, portanto, seu endurecimento ocorre principalmente por meio de soluções sólidas e encruamento. No caso das ligas Al-Mg, é observada uma diminuição das propriedades mecânicas do material após algum tempo à temperatura ambiente, após ter sido submetido a deformação a frio. Para superar esse desafio, é comum aplicar o tratamento térmico de estabilização, mencionado anteriormente [33]. A inclusão de magnésio ao alumínio resulta em um aumento da resistência mecânica, mantendo, ao mesmo tempo, excelente ductilidade, resistência à corrosão e melhorando a soldabilidade. Essas características tornam as ligas de alumínio-magnésio ideais para ambientes que requerem razoável resistência mecânica e alta resistência à corrosão [35].

Devido à sua resistência e capacidade de proporcionar um acabamento superficial de alta qualidade, caracterizado por brilho intenso e baixa rugosidade, as ligas da série 5000 têm sua aplicabilidade expandida, especialmente em áreas como acessórios automotivos, componentes arquitetônicos e outras aplicações decorativas [38].

2.6.2 Liga de alumínio 5083 H111

Essa liga é pertencente a série 5XXX, observando o Tabela 3, nota-se que é necessário que a composição contenha pelo menos 4% de magnésio, conferindo ao material uma notável resistência à corrosão e excelente capacidade de soldagem. A liga de alumínio 5083 H111 destaca-se como uma das mais empregues na indústria naval[29].

Tabela 3 - Elementos Químicos da liga 5083 H111[39].

Elemento	Mínimo	Máximo
Si	-	0,4
Fe	-	0,4
Cu	-	0,1
Mn	0,4	0,1
Mg	4	4,9
Cr	0,05	0,25
Zn	-	0,25
Ti	-	0,15
Outro	0,05	0,15
Al	RESTANTE	RESTANTE

Adicionalmente, nota-se na nomenclatura do material a presença da letra H, indicando um processo de endurecimento por encruamento. O sufixo H é seguido por dois dígitos adicionais. O primeiro dígito está associado ao tratamento específico aplicado, conforme descrito na Tabela 4.

Tabela 4 - Especificação dos tratamentos por deformação plástica[40].

Tipo	Especificação do 1º dígito
H1x	Deformação a frio
H2x	Deformação a frio e recozimento parcial
H3x	Deformação a frio e estabilização

O primeiro dígito é o número um, resultando em H1, indicando produtos conformados que passaram por encruamento e não receberam nenhum tratamento adicional [29].

O segundo dígito corresponde ao nível de dureza, conforme ilustrado na Tabela 5 subsequente.

Tabela 5 - Significado dos Graus de Dureza[41].

GRAU DE DUREZA	TERMO USADO
1	1/8 DURO
2	1/4 DURO
4	1/2 DURO
6	3/4 DURO
8	DURO
9	EXTRA-DURO

Para o sufixo "H111" utilizado nesse trabalho, não se segue exatamente essa regra de graduação, mas sim uma designação específica que indica uma condição de leve endurecimento que é intermediária e especial, usada para aplicações onde se deseja uma pequena melhoria na resistência com manutenção de alta ductilidade.

Abaixo na Tabela 6 podemos conferir as propriedades gerais da liga de alumínio 5083-H111 que foi utilizado neste trabalho. A tabela se divide entre as propriedades físicas e mecânicas do material.

Tabela 6 – Propriedades da liga de alumínio 5083-H111[39].

Propriedades da liga de alumínio 5083-H111		
Propriedades Físicas		
Densidade	[g/cm ³]	2,8
Módulo de elasticidade	[Mpa]	70000
Condutividade elétrica	À 20°C [% IACS]	34
Coefficiente de expansão térmica	[k ⁻¹ /10 ⁻⁶]	24
Condutividade térmica	A 25°C [cal/cm/cm2 /seg °C]	0,34
Calor específico	[0 a 100 °C (cal/g C)]	0,23
Propriedades Mecânicas		
Limite de escoamento R _{p0,2}	(MPa)	125 MIN
Limite Resistência à tração R _m	(MPa)	270-345
Alongamento	(%)	15 MIN
Dureza HB	(2,5/62,5)	70

2.7 Rugosidade

A rugosidade é uma propriedade física que descreve as irregularidades das superfícies, geralmente, medida em termos de pequenas variações na altura dos picos e vales presentes em uma superfície. Essas irregularidades podem ser ocasionadas por diversos fatores, como processos de fabricação, desgaste e corrosão.

Em diversos campos da engenharia, incluindo engenharia mecânica, fabricação, metalurgia e *design* industrial, a rugosidade é uma consideração crucial. Ela pode afetar

diretamente o desempenho de componentes e sistemas, influenciando fatores como atrito, desgaste, adesão, lubrificação e estética. Geralmente, processos de fabricação como fundição, forjamento e laminação são realizados para corrigir erros de forma e ondulações, visando atingir níveis específicos de rugosidade para garantir o desempenho desejado do produto final [42].

Na prática industrial, especialmente na usinagem, a rugosidade superficial das peças desempenha um papel fundamental. Durante o processo de fabricação, o material bruto sofre transformações que interferem na aparência, funcionalidade e características gerais do produto acabado [43]. No caso de superfícies usinadas as imperfeições causam a rugosidade consistem em marcas de avanço, formação de aresta postiça ou desgaste da ferramenta [11]. A rugosidade da superfície usinada depende de vários parâmetros, como máquina-ferramenta, propriedades do material, geometria e material da ferramenta, além da operação de usinagem [44].

A influência da rugosidade vai além dos aspectos técnicos, impactando diretamente na interação dos objetos com o ambiente. Superfícies ásperas tendem a desgastar-se mais rapidamente e apresentar coeficientes de atrito mais elevados do que superfícies lisas. Ela também pode ser um indicador do desempenho de componentes mecânicos, pois irregularidades na superfície podem ser locais de nucleação para trincas ou corrosão, embora também possa promover a adesão [42]. No entanto, o controle da rugosidade na fabricação pode ser desafiador e dispendioso. O caso ideal seria alcançar uma superfície completamente lisa, sem qualquer rugosidade, mas mesmo ao buscar a melhor combinação de parâmetros, é difícil evitar imperfeições nos processos de corte por arranque de aparas [45]. Assim, embora um valor de rugosidade elevado seja muitas vezes indesejável, reduzi-lo pode aumentar os custos de fabricação [42]. Isso geralmente resulta em uma compensação entre o custo de fabricação e a qualidade da superfície do componente, onde é essencial que as peças apresentem o grau de acabamento adequado à sua função, visando um equilíbrio entre custo e benefício na produção industrial [46].

Diversos parâmetros de rugosidade são utilizados, porém, a média aritmética dos valores absolutos de rugosidade, conhecida como R_a , é a mais difundida. Isso se deve principalmente a razões históricas, pois os primeiros medidores de rugosidade eram capazes de medir apenas R_a [42]. A definição matemática desse parâmetro é fornecida pela equação (4).

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (4)$$

Onde:

R_a = Rugosidade média;

n = Número de parâmetros;

y_i = Desvio do perfil de rugosidade.

O parâmetro Ra (rugosidade média) pode ser empregue para o controle contínuo da rugosidade em linhas de produção, especialmente quando o acabamento apresenta fendas de usinagem, sendo aplicável a uma ampla gama de processos de fabricação [47]. No Sistema Internacional, a unidade de medida para rugosidade é micrômetros [μm], enquanto no sistema anglo-saxão, utiliza-se a micropolegada (μ") [42].

Segundo as diretrizes da Norma ISO 1302, em desenhos técnicos, a rugosidade pode ser representada de duas maneiras distintas. Uma delas envolve a expressão direta do valor da rugosidade em micrômetros (μm), enquanto a outra abordagem consiste em designar a classe de rugosidade. A Norma ISO 1302 estabelece um total de 12 classes de rugosidade, variando de N1 a N12, com valores de rugosidade média (Ra) que oscilam entre 0.025 e 50 μm, como evidenciado na Tabela 7 [48]. Mas existem outras normas que definem especificações de rugosidade, de acordo com a Norma DIN 4766, os valores de rugosidade média podem variar de 0.012 a 50 μm. Esses parâmetros estão sujeitos a flutuações dependendo dos processos de fabricação empregados na indústria em prática [45].

Tabela 7 - Indicação de classes conforme valores de rugosidade segundo norma ISO 1302.

Valor de rugosidade Ra		Classe de rugosidade
μm	μin	
50	2 000	N 12
25	1 000	N 11
12,5	500	N 10
6,3	250	N 9
3,2	125	N 8
1,6	63	N 7
0,8	32	N 6
0,4	16	N 5
0,2	8	N 4
0,1	4	N 3
0,05	2	N 2
0,025	1	N 1

2.7.1 Rugosímetro

Para a medição da rugosidade superficial de peças usinadas um dispositivo eletromecânico, conhecido como rugosímetro é empregue, assegurando a conformidade com os padrões requeridos. Esse instrumento utiliza uma agulha que, em contato com a superfície a uma velocidade constante, avalia as irregularidades da mesma, resultando em um gráfico que representa a rugosidade e/ou o valor em dígitos [48].

A partir dos valores encontrados por ele podemos efetuar várias tarefas, como o controle de qualidade, fazendo a inspeção diretamente na peça fabricada e avaliando se está seguindo o padrão requisitado, ou como a análise de desenvolvimento ou melhoramento de processo em que dados são recolhidos de amostras e aplicados em análises estatísticas para avaliar quais parâmetros seriam o ideal para o caso específico.

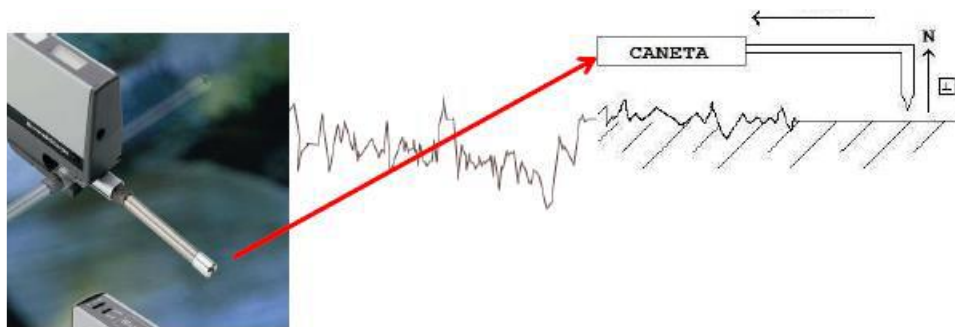


Figura 8 - Rugosímetro[49].

2.8 Método de Taguchi

O método de Taguchi foi criado na década de 1950 por Genichi Taguchi, um engenheiro e estatístico nascido em Tokamachi, Japão (1 de janeiro de 1924 - 2 de junho de 2012). Taguchi desenvolveu uma metodologia que aplicava métodos estatísticos com o objetivo de melhorar a qualidade dos produtos manufaturados. Embora seus métodos tenham gerado controvérsia entre estudiosos mais tradicionais, as inovações de Taguchi introduziram novos conceitos e extensões que avançaram significativamente o campo da qualidade em manufatura.

O método de Taguchi é visto como uma técnica de otimização e planejamento de experimentos, consistindo em um teste ou uma série de testes onde são feitas mudanças deliberadas nas variáveis de entrada de um processo ou sistema, permitindo observar e identificar as causas das variações nas variáveis de saída ou respostas (características desejada), com o objetivo de otimizar o tempo e os recursos empregados nos testes [50] [51].

Taguchi não estabeleceu uma estratégia rígida para a aplicação do método, mas sim sugeriu um procedimento a ser seguido em uma ordem específica. Primeiramente, é crucial definir o objetivo do estudo e a resposta que se deseja otimizar. Em seguida, é necessário determinar a característica de qualidade que melhor se ajusta tanto à resposta escolhida quanto ao estudo a ser realizado [52].

Taguchi denominou o método como "*Offline quality control*", pois sua aplicação é feita utilizando uma pequena amostra de uma fase experimental. Esta fase possui níveis de qualidade com uma variância elevada quando comparada às peças obtidas na linha de produção, que são submetidas ao "*online quality control*". A qualidade ideal poderia, em tese, ser alcançada testando e analisando todas as possíveis combinações de ajustes do processo. No entanto, isso resultaria em tempos de preparação extremamente longos e custos impraticáveis [53].

Esse método baseia-se na elaboração de experimentos utilizando arranjos ortogonais, nos quais os níveis das variáveis de entrada são estrategicamente controlados. A adoção dos arranjos ortogonais representa um avanço em relação aos métodos clássicos de experimentação planejada utilizados antes da metodologia de Taguchi, devido a capacidade dos arranjos de avaliar múltiplos fatores simultaneamente, através de um número reduzido de testes [8].

Para a escolha de um arranjo ortogonal dependemos de alguns fatores como [8]:

1. O número parâmetros e interações de interesse;
2. O número de níveis para os parâmetros de interesse;
3. As limitações quando a custo e resolução experimental desejada.

Após a escolha do arranjo ortogonal o método nos leva ao cálculo da razão sinal-ruído. A razão sinal-ruído avalia a sensibilidade da característica de qualidade estudada em relação aos fatores não controláveis, conhecidos como fatores de ruído [54].

É também possível usá-lo como uma medida da variação em um experimento quando há fatores de ruído [55]. Taguchi criou esta razão para transformar os dados de cada teste (e suas repetições) em um valor que representa a variação entre cada repetição. Para este estudo, cada teste descrito no arranjo ortogonal desenhado deve ser realizado pelo menos uma vez [8].

Conforme os objetivos estabelecidos para a característica de qualidade, esta pode ser categorizada em três grupos: "maior é melhor", "nominal é melhor" e "menor é melhor" [11].

Independentemente da categoria escolhida para o atributo de qualidade, uma maior relação sinal-ruído (S/N) está associada a um melhor desempenho da característica selecionada[56].

Quando o objetivo que se deseja é minimizar a resposta para a característica de qualidade analisada, o critério escolhido é “menor é melhor”, e a razão sinal-ruído é calculada seguindo a Equação (5).

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

Quando o objetivo que se deseja é maximizar a resposta para a característica de qualidade analisada, o critério escolhido é “maior é melhor”, e a razão sinal-ruído é calculada seguindo a Equação (6).

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

Para a equação 1 e para a equação 2 o valor n representa o número de observações realizadas e Y_i os dados observados.

Também há casos em que o valor nominal é considerado o melhor, nesse caso há um valor ideal para a característica de qualidade analisada, e a razão sinal ruído é calculado de acordo com a Equação (7).

$$S/N_N = -10 * \log\left(\frac{\bar{Y}^2}{\sigma^2}\right) \quad (7)$$

2.9 Análise relacional de Grey

A análise relacional de Grey é uma metodologia amplamente utilizada para lidar com problemas de decisão em ambientes incertos e com informações incompletas. Ela foi desenvolvida no âmbito da teoria dos sistemas de Grey, esta teoria foi proposta por Deng Julong em 1982 e tem sido aplicada em diversas áreas, incluindo engenharia, economia, e gestão, para otimizar processos e melhorar a tomada de decisões [57].

A análise relacional de Grey, especificamente, permite a comparação quantitativa e qualitativa entre múltiplos fatores, contribuindo para a identificação dos principais elementos

que influenciam um determinado sistema. Estudos demonstram sua eficácia em otimizar parâmetros de processos industriais e em avaliações de desempenho [58]. Além disso, esta técnica tem sido utilizada para prever tendências em séries temporais, possibilitando uma análise mais robusta mesmo quando os dados são limitados [59].

A Análise Relacional de Grey lida com problemas de tomada de decisão que envolvem múltiplos atributos (conhecida como *multi-attribute decision making*). Ela integra todas as características de desempenho (ou qualidade) avaliadas no processo em um único valor: o grau relacional de Grey. Essa abordagem permite que a decisão sobre os valores ótimos seja baseada em um único parâmetro. A combinação ideal de parâmetros é, então, determinada maximizando o grau relacional de Grey [60], [61]. Essa abordagem oferece uma vantagem em relação ao método de Taguchi, que avalia a influência dos fatores em uma única característica de qualidade do processo ou produto. Com a análise relacional de Grey, é possível identificar a combinação ótima de fatores que atende a todo o conjunto de resultados esperados [56].

O processo da análise relacional de Grey, também conhecida por “GRA” (*Grey Relational Analysis*) pode ser dividido nos seguintes passos [53]:

- **NORMALIZAÇÃO**

Inicialmente os dados de cada característica de qualidade são tratados através de uma normalização linear, resultando em valores numa faixa de entre zero e um. Similar ao cálculo da razão sinal-ruído, a normalização também segue equações diferentes dependendo do desejado para cada característica de qualidade [61].

Quando temos uma característica de qualidade que o resultado desejado deve ser maximizado a característica se encaixa no atributo “maior é melhor” e para este caso a normalização é calculada através da Equação (8) [60]:

$$x_{ij} = \frac{n_{ij} - \min_{ij} n_{ij}}{\max_{ij} n_{ij} - \min_{ij} n_{ij}} \quad (8)$$

Onde:

- I. x_{ij} é o valor normalizado, adimensional;
- II. n_{ij} é o valor estudado, em dB no caso da rugosidade e cm^3/min para taxa de produção;
- III. $\min_{ij} n_{ij}$ é o valor mínimo de cada característica de qualidade;
- IV. $\max_{ij} n_{ij}$ é o valor máximo de cada característica de qualidade.

Já quando temos o atributo “menor é melhor” escolhido para a característica de qualidade a normalização é dada pela Equação (9) [60], [61].

$$x_{ij} = \frac{\max_{ij}n_{ij} - n_{ij}}{\max_{ij}n_{ij} - \min_{ij}n_{ij}} \quad (9)$$

Quando a característica é “nominal é melhor” calculamos a normalização usando a Equação (10) [62], [63].

$$x_{ij} = \frac{|n_{ij} - n_{ob}|}{\max\{\max_{ij}n_{ij} - n_{ob}; n_{ob} - \min_{ij}n_{ij}\}} \quad (10)$$

Onde:

- I. n_{ob} é o valor nominal ao qual se deseja chegar (dB ou cm³/min);
- II. n_{ij} é o valor estudado, em dB no caso da rugosidade e cm³/min para taxa de produção;
- III. $\min_{ij}n_{ij}$ é o valor mínimo de cada característica de qualidade;
- IV. $\max_{ij}n_{ij}$ é o valor máximo de cada característica de qualidade.

• COEFICIENTE RELACIONAL DE GREY

Após a normalização passamos para o cálculo do coeficiente de Grey, esse coeficiente informa a relação entre o resultado real e o ideal. Podemos calcular ele de acordo com Equação (11) abaixo[55], [64]:

$$\xi_{ij} = \frac{\min_i \min_j |x^0_i - x_{ij}| + \zeta \max_i \max_j |x^0_i - x_{ij}|}{|x^0_i - x_{ij}| + \zeta \max_i \max_j |x^0_i - x_{ij}|} \quad (11)$$

Onde:

- I. ξ_{ij} é o coeficiente relacional de Grey;
- II. $\min_i \min_j |x^0_i - x_{ij}|$ é o valor mínimo normalizado entre os ensaios;
- III. $\max_i \max_j |x^0_i - x_{ij}|$ é o valor máximo normalizado entre os ensaios;
- IV. $|x^0_i - x_{ij}|$ é a diferença entre valor da sequência ideal e o valor estudado;
- V. ζ é o coeficiente de influência da característica.

- **GRAU RELACIONAL DE GREY**

Assim que tivermos calculado o coeficiente relacional de Grey podemos determinar o grau relacional de Grey, que se trata da média dos coeficientes associados a cada característica de desempenho escolhido. Desse modo, podemos usar a Equação x para calcular o grau relacional de Grey.

$$y_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i \xi_{ij}(i) \quad (12)$$

Onde:

- I. y_i é o grau relacional de Grey;
- II. n é o número de elementos observados;
- III. $w_i \xi_{ij}(i)$ são os dados observados.

O grau relacional funciona de forma a indicar a relação entre o valor da sequência de resultados ideal e os valores das sequencias de resultados obtidas, de forma que quando os dois valores são iguais o valor para o grau relacional de Grey será 1. Desta maneira, quando maior o grau relacional de Grey, maior a relevância daquela sequência em relação ao cenário ideal.

- **TESTE DE CONFIRMAÇÃO**

Em casos em que a combinação de parâmetro de controle ideal achada pelo método relacional de Grey não se encontra dentro das combinações condizente dentro do arranjo ortogonal de Taguchi se faz necessário realizar um teste de confirmação, de forma a avaliar o quanto a abordagem do método Taguchi contribui para a melhoria do processo.

Usando o nível ideal dos parâmetros determinados pela análise relacional de Grey, O grau relacional de Grey estimado é calculado seguindo a equação (13)[55], [61]:

$$\hat{\eta} = \eta_m + \sum_{i=1}^q \bar{\eta}_i - \eta_m \quad (13)$$

Em que:

- I. $\hat{\eta}$ é o grau relacional de Grey estimado para a combinação ótima de parâmetros;
- II. η_m é a média total do grau relacional de Grey de todos os experimentos;
- III. $\bar{\eta}_i$ é o Grau relacional para o nível ótimo de cada parâmetro;
- IV. q é o número de parâmetros significantes para o processo.

2.10 Análise ANOVA

A análise de variância (ANOVA) é uma técnica estatística utilizada para comparar as médias de três ou mais grupos, determinando se existem diferenças estatisticamente significativas entre eles. Desenvolvida por Ronald A. Fisher, a ANOVA permite a separação das variâncias observadas nos dados em componentes atribuíveis a diferentes fontes de variação, facilitando a compreensão das relações entre as variáveis independentes e a variável dependente [65].

Em resumo, a análise de variância (ANOVA) é uma metodologia estatística poderosa que facilita a comparação de múltiplos grupos e a compreensão das fontes de variação nos dados. Sua aplicação é fundamental para a realização de testes de hipóteses sobre as médias populacionais e para a análise de experimentos com múltiplas variáveis independentes.

Para conduzir uma análise de variância, é fundamental criar uma tabela ANOVA para avaliar os impactos de cada fator considerado no estudo. Os fatores da tabela ANOVA são:

- **Soma dos quadrados sequenciais** – Essas medidas capturam a variabilidade associada aos distintos elementos do modelo;
- **Graus de liberdade (GDL)**- Eles representam todas as informações integrais do modelo;
- **Quadrados médios** - Essa relação expressa a proporção entre a soma dos quadrados e o grau de liberdade, refletindo a variação existente entre as médias das amostras.
- **Valor F** - É uma medida estatística usada para verificar se um fator de controle do modelo está relacionado à resposta e qual é o impacto desse fator sobre essa resposta[66].
- **Valor P** - é a probabilidade de observar um valor da estatística de teste que seja maior ou igual ao valor encontrado. Tradicionalmente, o limiar para rejeitar a hipótese nula é estabelecido em 0,05, o que implica que, na ausência de qualquer diferença, um valor tão extremo para a estatística de teste é esperado em menos de 5% das ocasiões[67].

3 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo, são detalhados tanto a configuração experimental adotada quanto os ensaios realizados ao longo deste estudo, utilizando o Método de Taguchi. Inicialmente, são fornecidos os valores correspondentes aos diversos níveis dos parâmetros de usinagem, juntamente com a elaboração da matriz ortogonal conforme os princípios de Taguchi. Além disso, são descritos os procedimentos para a realização dos ensaios experimentais, seguindo os valores especificados nos parâmetros da matriz ortogonal, bem como, o processo de medição associado.

3.1 Procedimento experimental segundo Taguchi

A rugosidade superficial e a taxa de produção são elementos cruciais num processo de usinagem. Um dos principais objetivos em certos processos de usinagem é alcançar a menor rugosidade superficial possível junto com uma alta taxa de produção. Neste estudo, o método Taguchi será utilizado como uma ferramenta eficaz na otimização do planejamento experimental, visando identificar os parâmetros de corte que maximizam a taxa de produção e minimizam a rugosidade superficial para algumas estratégias de usinagens mais utilizadas. Uma matriz ortogonal de Taguchi será escolhida e aplicada em três diferentes estratégias de usinagem, para avaliar o comportamento e a eficiência dos parâmetros em cada uma das estratégias.

Nos processos de usinagem, os parâmetros mais comuns e, frequentemente, utilizados incluem a velocidade de corte (V_c), o avanço (f_z) e a penetração axial (a_p). Devido a isso, os fabricantes divulgam gráficos ou valores de mínimo e máximo referentes aos parâmetros, informando a margem de trabalho recomendado para cada ferramenta. Podemos ver na Figura 9 as margens de referência apresentadas pelo fabricante, neste caso a empresa *Seco*[®], com o modelo de fresa JSE514060D2C.0Z4 SIRA.

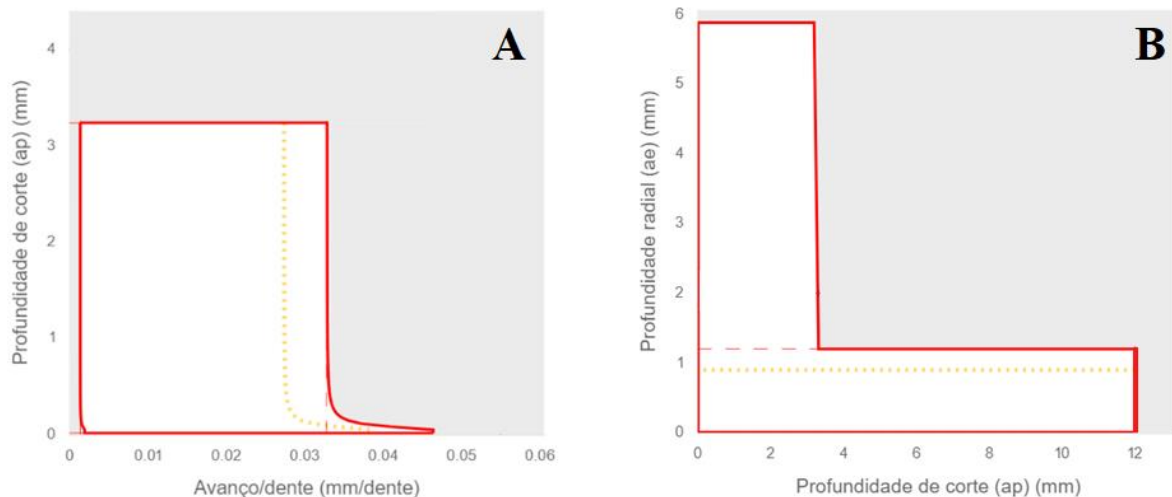


Figura 9 - (A) Avanço por dente x Profundidade de corte(ap), (B) Profundidade radial (ae) x Profundidade de corte (ap) [68].

A partir dos gráficos da Figura 9 e ponderando algumas limitações como a rotação máxima de 8000 RPM suportado pela fresadora CNC utilizada, foram escolhidos os parâmetros e os níveis de cada parâmetros em estudo. A Tabela 8 apresenta os valores correspondente para cada parâmetro e nível.

Tabela 8 - Valores dos parâmetros para diferentes níveis.

Parâmetros	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Velocidade de corte [m/mim]	50	100	150
Avanço por dente [mm/t]	0,035	0,030	0,025
Profundidade de corte [mm]	1,0	1,5	2,0

Em posse da informação do número de parâmetros e os números de níveis, podemos agora definir o arranjo ortogonal mais adequado para a análise utilizando a Tabela 9.

Tabela 9 - Quadro de Taguchi para seleção da matriz ortogonal.

		Número de níveis		
		2	3	4
Número de parâmetros	2	L4	L4	L8
	3	L9	L9	L9
	4	L16	L16	L16

Sabendo que temos três parâmetros para variar e cada um terá três valores diferentes (níveis) podemos concluir que o arranjo ortogonal que melhor se adequa para a análise será o L9, ou seja serão necessárias nove combinações de parâmetros para a análise, seguindo as configurações conforme a Tabela 10.

Tabela 10 - Matriz ortogonal L9 segundo Taguchi.

Número do ensaio	Parâmetro 1	Parâmetro 2	Parâmetro 3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Após a matriz de Taguchi ser escolhida podemos substituir os valores dos níveis em seus respectivos lugares assim obtendo a Tabela 11.

Tabela 11 - Matriz ortogonal L9 segundo Taguchi com os valores dos parâmetros escolhidos.

Número do ensaio	Velocidade de corte [m/min]	Avanço por dente [mm/t]	Profundidade de corte [mm]
1	50	0,035	1,0
2	50	0,030	1,5
3	50	0,025	2,0
4	100	0,035	1,5
5	100	0,030	2,0
6	100	0,025	1,0
7	150	0,035	2,0
8	150	0,030	1,0
9	150	0,025	1,5

Com os valores da Tabela 11 podemos utilizar as equações (1) e (2) para obter os valores da velocidade de rotação e velocidade de avanço, dessa forma expressamos os valores utilizados nos ensaio em unidades padronizadas mais comuns para utilização e aplicação na Tabela 12,

Tabela 12 - Matriz ortogonal L9 segundo Taguchi com sistema de unidades padronizado.

Número do ensaio	Velocidade de rotação [RPM]	Velocidade de avanço [mm/mim]	Profundidade de corte [mm]
1	2653	371,42	1,0
2	2653	318,36	1,5
3	2653	265,30	2,0
4	5305	742,70	1,5
5	5305	636,60	2,0
6	5305	530,50	1,0
7	7958	1114,12	2,0
8	7958	954,96	1,0
9	7958	795,80	1,5

Fora dos parâmetros de usinagem outra peça fundamental durante o processo é o caminho da ferramenta, ela define a trajetória que a fresa irá percorrer durante o procedimento de usinagem. Várias estratégias diferentes são utilizadas para diferentes funções, então, neste trabalho foram, foram estudados os três caminhos mais comuns. Os caminhos escolhidos foram, *ZigZag* (Amostra - Z), *Parallel Spiral* (Amostra - S) e *One Way* (Amostra - O), como podemos ver na Figura 10:

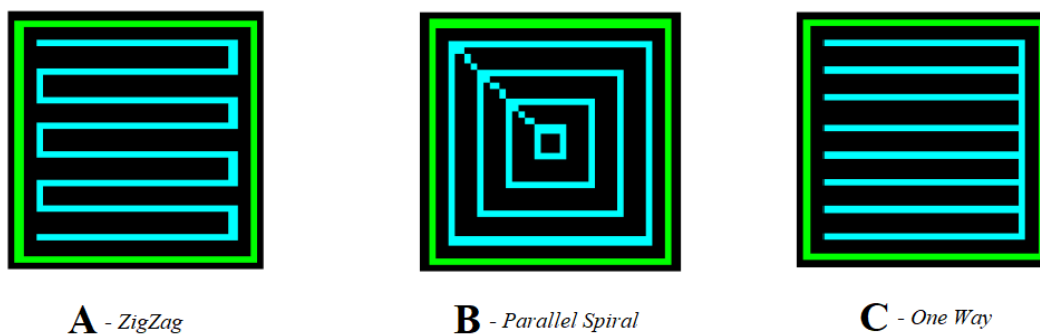


Figura 10 - Estratégias de usinagem estudadas. A – ZigZag , B - Parallel Spiral , C - One Way.

Após a definição da matriz L9 e dos caminhos de usinagem, foram realizados nove experimentos seguindo as combinações formuladas pela matriz ortogonal de Taguchi, conforme

o Tabela 12, para cada caminho de ferramenta escolhido. Isto se deu com intuito de verificar a melhor combinação de parâmetros para cada caminho determinado, de forma a minimizar a rugosidade e maximizar a taxa de produção.

3.2 Materiais e ferramentas

Nesta seção serão abordadas algumas propriedades dos materiais e ferramentas empregues na execução dos nossos experimentos.

Para esses estudos como o objetivo era avaliar a rugosidade foram realizados ensaios de rugosidade após a execução de usinagem seguindo os valores de parâmetros definidos anteriormente. Como material base para a usinagem foi utilizado o alumínio 5083-H111, conforme podemos ver a Figura 11. Os blocos base possuíam dimensões iniciais de 35 [mm] de altura, 35 [mm] de largura e 160 [mm] de comprimento.



Figura 11 - Bloco de alumínio 5083-H111.

Dados as dimensões do material base, projetou-se, utilizando o software de CAD (*Computer Aided-Design*) chamado *SolidWorks*®, a geometria final de modo a ser executado durante a usinagem de cada bloco nove operações de *pocket*, cada um seguindo os parâmetros estabelecidos pelo método de Taguchi. Como podemos ver na Figura 12 e Figura 13.

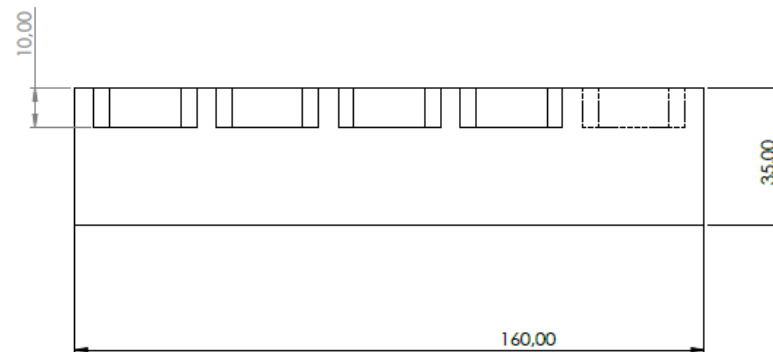
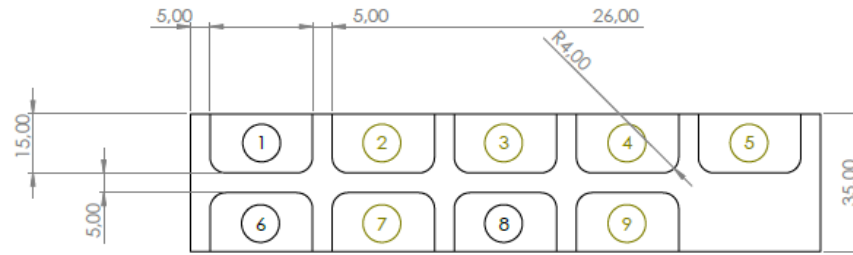
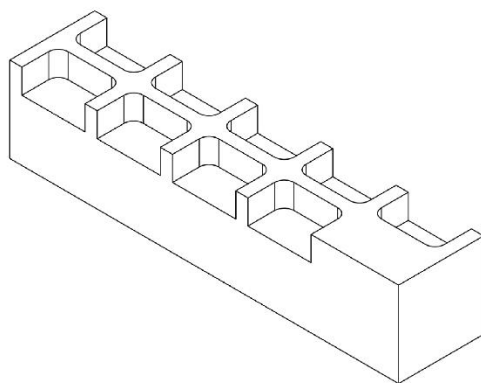
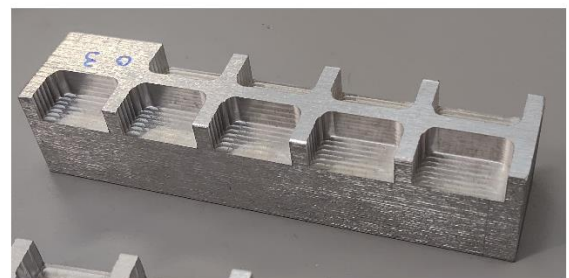


Figura 12- Vista superior e vista frontal da geometria final da amostra.



A



B

Figura 13 – A – Geometria final 3D, B – Amostra usinada.

Após projetado a geometria final, foi necessário gerar o código CNC com os respectivos parâmetros para cada ensaio. O código é gerado através de um *software* de CAM (*Computer Aided Manufacturing*), neste caso, o *software* utilizado foi o *MasterCam*®. Após introduzido todas as informações foi efetuada uma simulação de usinagem e gerado o código CNC.

Todas as usinagens foram realizadas na fresadora de CNC, Deckel Maho DMC 63V, representada na Figura 14, presente no Laboratório de Tecnologia Mecânica (LTM), da Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTIG) do Instituto Politécnico de Bragança (IPB).



Figura 14 – Fresadora CNC – Deckel Maho DMC 63V.

Em relação a fresa, apenas um modelo foi utilizado durante todo o projeto, sendo o modelo JSE514060D2C.0Z4 SIRA(Figura 15) da marca *Seco*[®] com as medidas mostradas na Tabela 13.

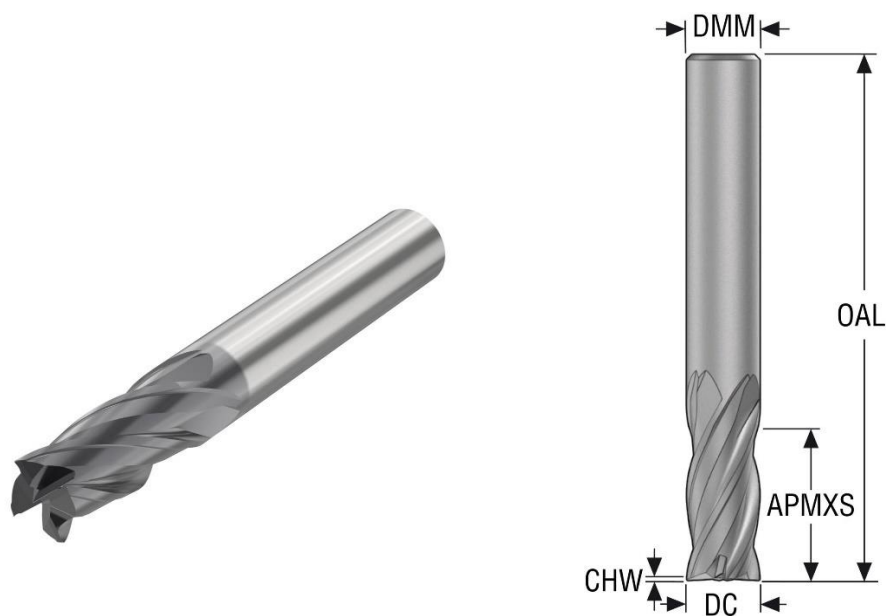


Figura 15 - Fresa - JSE514060D2C.0Z4 SIRA da marca *Seco*[®].

Tabela 13 - Medidas fresa - JSE514060D2C.0Z4 SIRA

Sigla	Descrição	Valor
DMM	Diâmetro da haste	6.00 mm
OAL	Comprimento total	57.0 mm
APMXS	Profundidade máxima de corte na direção de avanço lateral	12.0 mm
DC	Diâmetro de corte	6.000 mm
CHM	Largura do chanfro de canto	0.060 mm
PCEDC	Contagem de arestas de corte periféricas	4

O ensaio de rugosidade para cada pocket foi realizado quatro vezes, duas vezes da região do fundo da usinagem e duas vezes na região lateral da usinagem. Nas duas regiões, uma aferição foi realizada na região central do *pocket* e outra mais próximo da borda, como podemos ver na Figura 16.

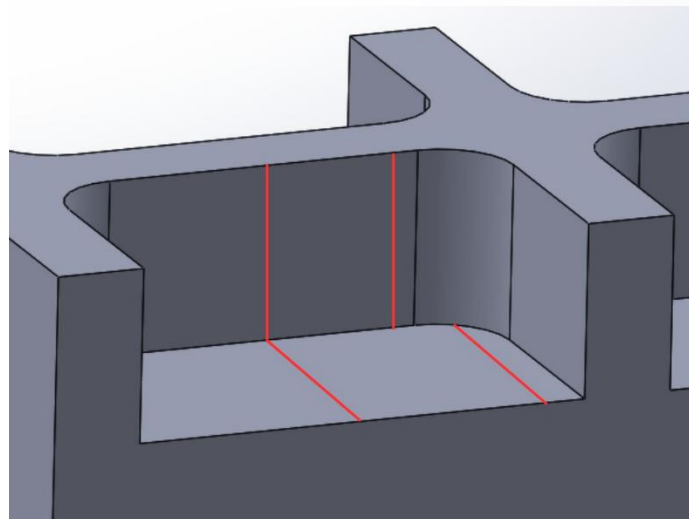


Figura 16 - Locais de aferição de rugosidade.

As medições foram realizadas utilizando o rugosímetro da marca Mitutoyo modelo SJ-301 (Figura 17), seguindo a norma ISO 1997, uma medição em cada região com comprimento de amostragem (cut-off) de 0,8 [mm] 5x e velocidade de agulha de 0,5 [mm/s].

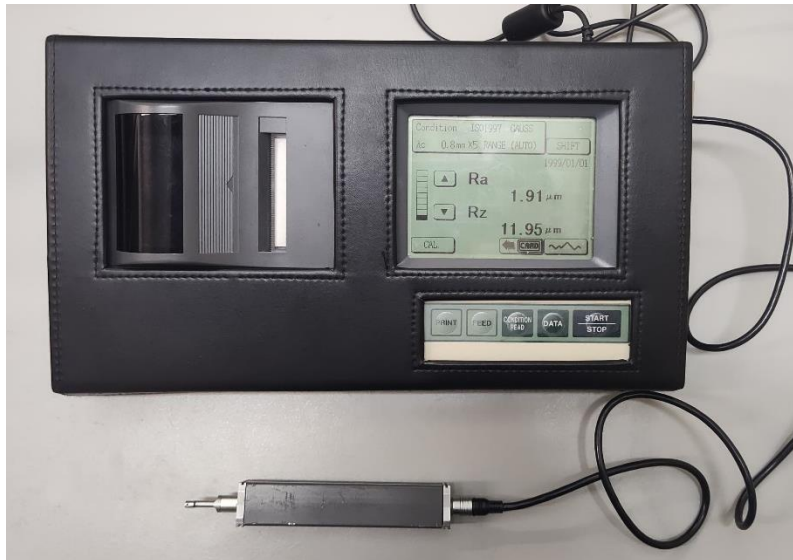


Figura 17 - Mitutoyo modelo SJ-301.

3.3 Resultados obtidos

Esta seção apresenta os resultados obtidos em cada ensaio, relativos à rugosidade média (lateral e de fundo) e taxa de produção (taxa de remoção de material), que, ao longo do trabalho, serão utilizados na aplicação do método de Taguchi, ANOVA e análise relacional de Grey.

Em relação à rugosidade, em cada *pocket* foram medidos, em duas regiões distintas, os valores de rugosidade média (R_a), no fundo do *pocket* onde se aferiu no centro da usinagem e mais uma medição deslocada para próximo a borda, e na região da lateral onde também se aferiu ao centro e mais próximo da borda. A análise de Taguchi foi feita, separadamente, entre a rugosidade lateral e a rugosidade de fundo. Na Tabela 14 podemos ver a média de rugosidade na região de fundo e na região lateral da usinagem feita utilizando o caminho de ferramenta *ZigZag*, apelidada de amostra Z.

Tabela 14 - Valores de rugosidade média - Ensaio Z.

Valores de rugosidade média - Amostra Z		
Número do ensaio	Média rugosidade do fundo [μm]	Média rugosidade da lateral [μm]
1	2,30	0,77
2	2,16	0,81
3	1,93	0,86
4	2,06	0,91
5	2,06	0,95
6	1,91	0,92
7	2,05	0,68
8	2,14	0,75
9	1,80	1,05

Na Tabela 15 podemos observar as médias de rugosidade na região de fundo e na região lateral da usinagem feita utilizando o caminho de ferramenta *Parallel Spiral*, apelidada de amostra S.

Tabela 15 - Valores de rugosidade média - Ensaio S.

Valores de rugosidade média - Amostra S		
Número do ensaio	Média rugosidade do fundo [Ra]	Média rugosidade da lateral [Ra]
1	2,09	0,95
2	2,70	0,96
3	2,60	1,11
4	2,68	0,89
5	2,49	1,13
6	1,69	0,92
7	2,29	1,21
8	1,82	0,85
9	1,98	0,89

Por fim, na Tabela 16 observamos as médias de rugosidade na região de fundo e na região lateral da usinagem feita utilizando o caminho de ferramenta *One way*, apelidada de amostra O.

Tabela 16 - Valores de rugosidade média - Amostra O.

Valores de rugosidade média - Amostra O		
Número do ensaio	Média rugosidade do fundo [Ra]	Média rugosidade da lateral [Ra]
1	2,01	1,10
2	2,22	1,04
3	1,67	1,22
4	2,59	1,00
5	2,37	1,23
6	2,25	0,98
7	2,61	1,49
8	2,41	1,18
9	1,95	1,16

Outro elemento avaliado foi a taxa de produção, que mede a quantidade de material removido pela usinagem durante um determinado período. Como os três experimentos seguiram a mesmo quadro de Taguchi definido na Tabela 12, a taxa de produção de ambos serão as mesmas para cada ensaio e são mostradas no Tabela 17.

Tabela 17 - Taxa de produção para as amostras Z, S e O.

Taxa de produção para as amostras Z, S e O				
Número do ensaio	Velocidade de avanço - Vf [mm/mim]	Profundidade de corte - ap [mm]	Largura de corte - ae [mm]	Taxa de produção [cm ³ /min]
1	371,42	1,0	2,0	0,74
2	318,36	1,5		0,96
3	265,30	2,0		1,06
4	742,70	1,5		2,23
5	636,60	2,0		2,55
6	530,50	1,0		1,06
7	1114,12	2,0		4,46
8	954,96	1,0		1,91
9	795,80	1,5		2,39

Dado a Tabela 17, podemos notar que o ensaio número 7 teve a maior taxa de produção, no valor de 4,46 [cm³/mim]. Enquanto o menor valor ocorreu no ensaio 1, com uma taxa de produção de 0,74 [cm³/mim] seguido do ensaio 2, com valor de 0,96 [cm³/mim].

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentadas as análises detalhadas dos resultados obtidos após todos os experimentos e procedimentos descritos anteriormente. Sempre que possível, serão incluídos gráficos, imagens e tabelas para facilitar a percepção e compreensão dos resultados.

Inicialmente, cada resultado será apresentado individualmente, abrangendo rugosidade do fundo, rugosidade lateral e taxa de produção. Após a análise desses resultados, serão exibidos os cálculos da análise relacional de Grey para determinar a combinação ótima que integra todos os requisitos previamente definidos para a usinagem.

4.1 Método de Taguchi

4.1.1 Razão Sinal-Ruído

Conforme citado previamente, a razão sinal-ruído avalia a reatividade da característica analisada em questão em contraponto aos fatores não controláveis. Durante os processos de fabricação por remoção de material se procura obter uma superfície de baixa rugosidade enquanto se tem uma alta taxa de produção, por esse motivo essas serão as qualidades estudadas. Para analisar as qualidades temos três categorias e precisamos ver em qual cada uma se encaixa de acordo com o objetivo. São elas, “menor é melhor”, “maior é o melhor” e “nominal é melhor”. Em nosso caso queremos minimizar a rugosidade superficial e maximizar a taxa de produção.

4.1.1.1 Rugosidade Superficial

O objetivo no trabalho é obter uma rugosidade superficial o mais reduzida possível, dessa forma, a razão S/N se encaixa na categoria “menor é melhor”.

- **Amostra Z**

Utilizando a Equação (5) e os dados da Tabela 14 é possível obter os valores da Tabela 18. Para melhor exemplificar os cálculos temos abaixo o cálculo de S/N para o primeiro ensaio da amostra Z, focada na Rugosidade superficial do fundo.

$$S/N_l = -10 * \log \left(\frac{1}{2} * \sum_{i=1}^2 (1,95^2 + 2,64^2) \right) = -7,31$$

Tabela 18 - Valores S/N das rugosidades - Amostra Z.

Valores S/N das rugosidades - Amostra Z		
Número do ensaio	S/N Rugosidade do fundo [dB]	S/N Rugosidade da lateral [dB]
1	-7,3127	2,3221
2	-6,6690	1,8639
3	-5,7834	1,3593
4	-6,2778	0,7769
5	-6,2839	0,4148
6	-5,6344	0,6384
7	-6,2848	3,3947
8	-6,8215	2,5520
9	-5,0961	-0,4556

Como os parâmetros para as três amostras (Z, S e O) são iguais e de modo a facilitar a visualização dos S/N's para diferentes parâmetros de usinagem foi criado abreviaturas para cada nível de cada parâmetro, podendo ser observada na Tabela 19.

Tabela 19 - Abreviaturas para os vários níveis dos parâmetros.

Abreviaturas para os vários níveis dos parâmetros	
Abreviaturas	Parâmetros e valores associados
A1	$V_c = 50$ [mm/min]
A2	$V_c = 100$ [mm/min]
A3	$V_c = 150$ [mm/min]
B1	$f_z = 0,025$ [mm/t]
B2	$f_z = 0,030$ [mm/t]
B3	$f_z = 0,035$ [mm/t]
C1	$a_p = 1,0$ [mm]
C2	$a_p = 1,5$ [mm]
C3	$a_p = 2,0$ [mm]

A partir da Tabela 18 podemos gerar gráficos dos valores médios de S/N para cada nível e parâmetro. A Figura 18, por exemplo, é formada pelas médias dos níveis dividido por parâmetros da rugosidade de fundo da amostra Z.

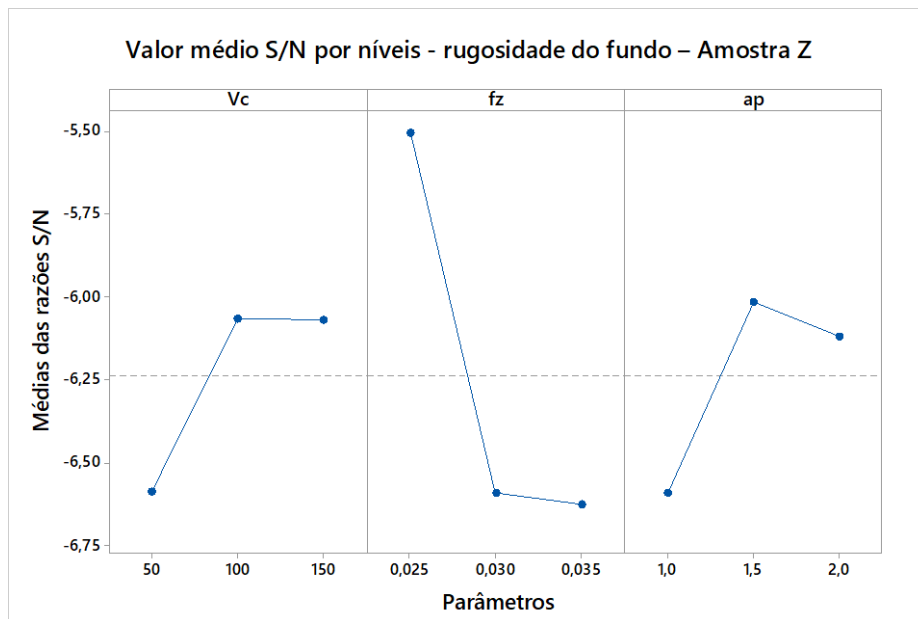


Figura 18 - Valor médio S/N por níveis - rugosidade de fundo – Amostra Z.

Observando a Figura 18 é possível concluir que a combinação A3B1C2 é a combinação ótima para a rugosidade do fundo na amostra Z pois o fator A3 ($V_c = 150$ [mm/mim]), B1 ($f_z = 0,025$ [mm/t]) e C2 ($a_p = 1,5$ [mm]) tem os maiores valores de S/N médio.

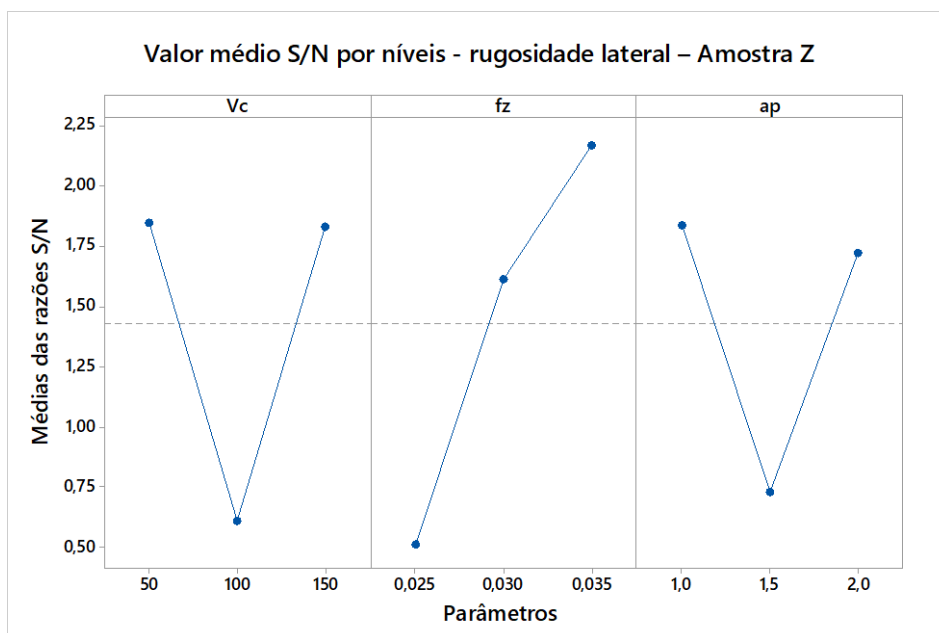


Figura 19 - Valor médio S/N por níveis - rugosidade lateral – Amostra Z.

Analisando a Figura 19, é possível concluir que a combinação ótima para a rugosidade lateral na amostra Z é A1B3C1, ou seja, $V_c = 50$ [mm/mim], $f_z = 0,035$ [mm/t] e $a_p = 1,0$ [mm].

- **Amostra S**

Utilizando e a Equação (5) e os dados da Tabela 15 é possível obter os valores da Tabela 20.

Tabela 20 - Valores S/N das rugosidades – Amostra S.

Valores S/N das rugosidades - Amostra S		
Número do ensaio	S/N Rugosidade do fundo [dB]	S/N Rugosidade da lateral [dB]
1	-6,4252	0,4335
2	-8,6130	0,3989
3	-8,3865	-0,9096
4	-8,5828	1,0599
5	-8,0188	-1,0238
6	-4,7015	0,7237
7	-7,3929	-1,6747
8	-5,1949	1,4110
9	-5,9337	1,0599

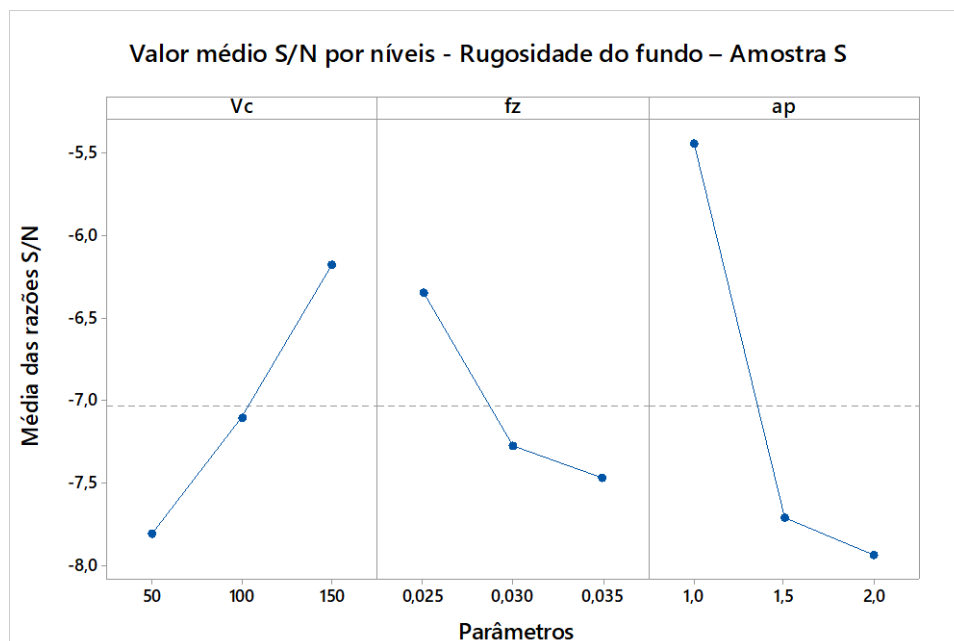


Figura 20 - Valor médio S/N por níveis - Rugosidade do fundo – Amostra S.

Analisando a Figura 20 é possível concluir que a combinação A3B1C1 é a combinação ótima para a rugosidade do fundo na amostra S, pois os fatores A3 ($V_c = 150$ [mm/mim]), B1 ($f_z = 0,025$ [mm/t]) e C1 ($a_p = 1,0$ [mm]) tem os maiores valores de S/N médio.

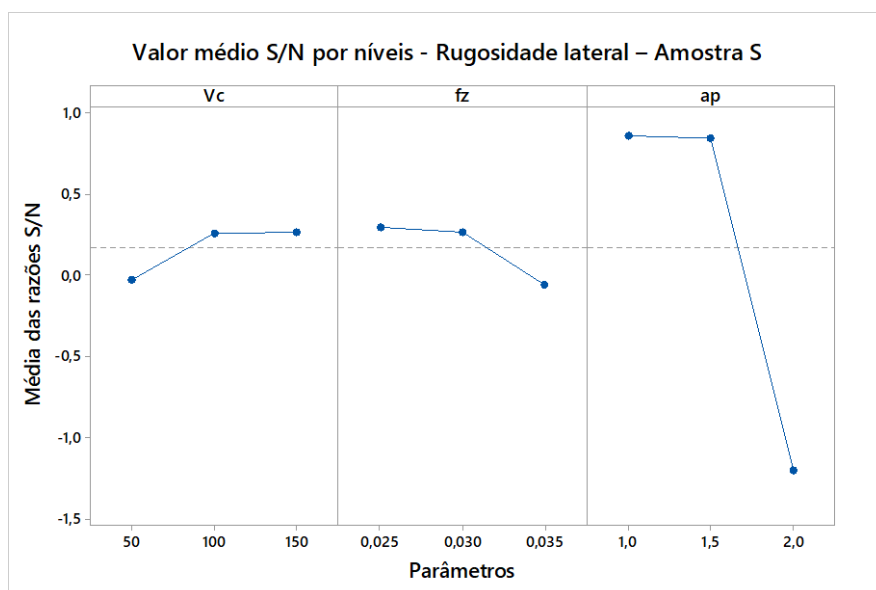


Figura 21 - Valor médio S/N por níveis - Rugosidade lateral – Amostra S.

Analisando a Figura 21, é possível concluir que a combinação A3B1C1 é a combinação ótima para a rugosidade lateral na amostra S, pois os fatores A3 ($V_c = 150$ [mm/mim]), B1 ($f_z = 0,025$ [mm/t]) e C1 ($a_p = 1,0$ [mm]) tem os maiores valores de S/N médio.

- **Amostra O**

Utilizando e a Equação (5) e os dados da Tabela 16 é possível obter os valores da Tabela 21.

Tabela 21 - Valores S/N das rugosidades - Amostra O.

Valores S/N das rugosidades - Amostra O		
Número do ensaio	S/N Rugosidade do fundo [dB]	S/N Rugosidade da lateral [dB]
1	-6,0875	-0,8282
2	-6,9271	-0,3471
3	-4,4527	-1,6934
4	-8,4127	0,0434
5	-7,6022	-1,8540
6	-7,0357	0,1714
7	-8,3344	-3,4350
8	-7,6550	-1,4027
9	-5,9308	-1,2905

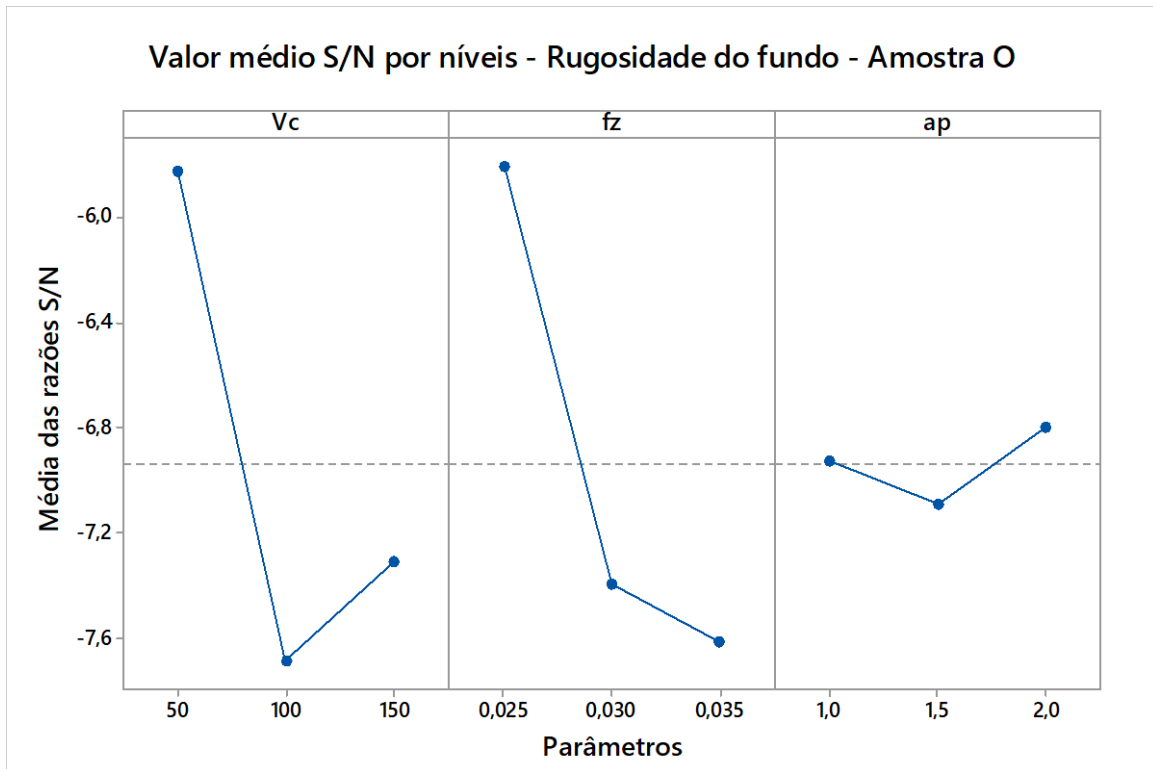


Figura 22 - Valor médio S/N por níveis - Rugosidade de fundo - Amostra O.

Analisando a Figura 22, é possível concluir que a combinação A1B1C3 é a combinação ótima para a rugosidade de fundo na amostra O, pois os fatores A1 ($V_c = 50$ [mm/mim]), B1 ($f_z = 0,025$ [mm/t]) e C3 ($a_p = 2,0$ [mm]) tem os maiores valores de S/N médio.

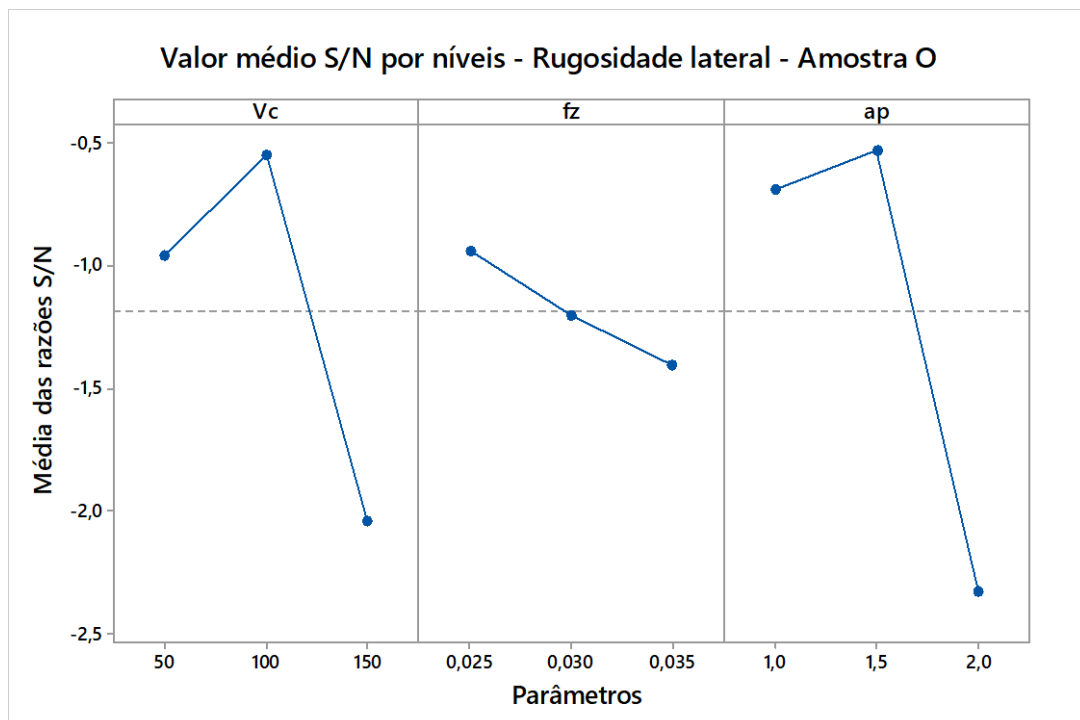


Figura 23 - Valor médio S/N por níveis - Rugosidade lateral - Amostra O.

Analisando a Figura 23, é possível concluir que a combinação A2B1C2 é a combinação ótima para a rugosidade lateral na amostra O, pois os fatores A2 ($V_c = 100$ [mm/mim]), B1 ($f_z = 0,025$ [mm/t]) e C2 ($a_p = 1,5$ [mm]) tem os maiores valores de S/N médio.

4.1.2 Taxa de produção

O segundo parâmetro estudado é a taxa de produção, essa é variável é de bastante importância durante a usinagem, pois ela trata da velocidade de usinagem que está relacionada ao tempo do processo. É importante destacar que, para a análise da taxa de produção, uma única medição foi realizada, portanto, não há necessidade de calcular a razão sinal/ruído, e podemos fazer a avaliação por meio das médias de níveis de cada parâmetro utilizando diretamente os dados da Tabela 17. Dessa forma, obtemos a Figura 24.

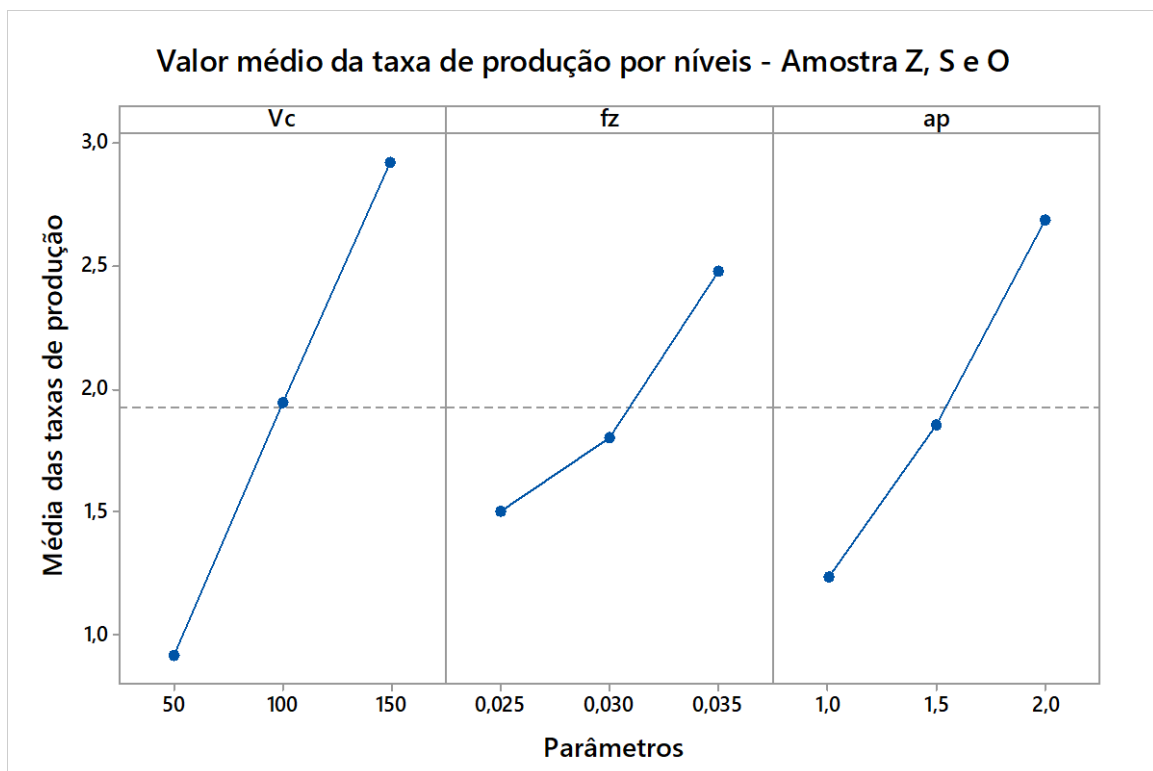


Figura 24 - Valor médio da taxa de produção por níveis - Amostra Z, S e O.

Examinando a Figura 24 pode-se inferir que a combinação A3B3C3 demonstra ser a mais eficaz para controlar a taxa de produção, uma vez que os níveis A3 ($V_c = 150$ [mm/min]), B3 ($f_z = 0,035$ [mm/tooth]) e C3 ($a_p = 2,0$ [mm]) apresentam os maiores valores médios de taxa de produção.

4.2 Análise ANOVA Taguchi

A Análise de Variância é utilizada para deduzir conclusões a partir da análise dos resultados experimentais. Essa técnica foi adotada para avaliar o grau de influência de cada fator de controle em uma resposta específica, ou seja, qual parâmetro que tem o maior impacto na taxa de produção, rugosidade superficial do fundo e lateral. Os cálculos da ANOVA foram realizados pelo *software* Minitab20.

4.2.1 ANOVA Rugosidade Superficial

- **Amostra Z**

Os resultados da análise da variância da amostra Z para a Rugosidade do fundo se encontram na Tabela 22 e para a rugosidade lateral na Tabela 23.

Tabela 22 - Valores da ANOVA para rugosidade do fundo - Amostra Z.

Valores da ANOVA para rugosidade do fundo - Amostra Z						
Grupo	Df	SS	MS	Valor F	Valor P	Contribuição [%]
Vc	2	0,545	0,272	36,670	0,027	15,30%
fz	2	2,438	1,219	164,050	0,006	68,44%
ap	2	0,564	0,282	37,980	0,026	15,85%
Erro	2	0,015	0,007			0,42%
Total	8	3,562				100,00%

Com a análise da Tabela 22, verifica-se que o parâmetro que apresenta maior influência na rugosidade do fundo da amostra Z é o avanço por dente (fz) com 68,44%, sendo que os outros dois fatores têm influência similar, com a velocidade de corte (Vc) com 15,30% e profundidade de corte(ap) com 15,85%.

Já analisando a Tabela 23 verifica-se que o parâmetro que apresenta maior influência na rugosidade lateral da amostra Z é o avanço por dente (fz) com 36,03%, seguido pela velocidade de corte (Vc) com 25,73% e por último a profundidade de corte (ap) com 19,00%.

Tabela 23 - Valores da ANOVA para rugosidade lateral - Amostra Z.

Valores da ANOVA para rugosidade lateral - Amostra Z						
Grupo	Df	SS	MS	Valor F	Valor P	Contribuição [%]
Vc	2	3,023	1,512	1,340	0,428	25,73%
fz	2	4,233	2,117	1,870	0,348	36,03%
ap	2	2,232	1,116	0,990	0,503	19,00%
Erro	2	2,258	1,129			19,22%
Total	8	11,747				100,00%

- Amostra S

Tabela 24 - Valores da ANOVA para rugosidade do fundo - Amostra S.

Valores da ANOVA para rugosidade do fundo - Amostra S						
Grupo	Df	SS	MS	Valor F	Valor P	Contribuição [%]
Vc	2	4,031	2,016	6,690	0,130	22,12%
fz	2	2,180	1,090	3,620	0,217	11,96%
ap	2	11,411	5,705	18,940	0,050	62,61%
Erro	2	0,603	0,301			3,31%
Total	8	18,224				100,00%

Observando a Tabela 24 verifica-se que o parâmetro que apresenta maior influência na rugosidade do fundo da amostra S é a profundidade de corte (ap) com 62,61%, seguido pela velocidade de corte (Vc) com 22,12% e por último o avanço por dente (fz) com 11,96%.

Tabela 25 - Valores da ANOVA para rugosidade lateral - Amostra S.

Valores da ANOVA para rugosidade lateral - Amostra S						
Grupo	Df	SS	MS	Valor F	Valor P	Contribuição [%]
Vc	2	0,163	0,081	0,220	0,821	1,71%
fz	2	0,229	0,114	0,310	0,765	2,39%
ap	2	8,410	4,205	11,290	0,081	88,10%
Erro	2	0,745	0,372			7,80%
Total	8	9,546				100,00%

Observando a Tabela 25 verifica-se que o parâmetro que apresenta maior influência na rugosidade lateral da amostra S é a profundidade de corte (ap) com 88,10%, em contrapartida, podemos ver que os outros dois parâmetros (Vc e fz) não possuem uma influência significativa na variável resposta, pois suas porcentagens estão abaixo do erro. Em outras palavras, a variação observada nas respostas não pode ser atribuída, de forma significativa, às variações nesses parâmetros específicos, e sim ao erro residual ou a outras fontes de variação não explicadas pelos fatores considerados na análise.

- **Amostra O**

Tabela 26 - Valores da ANOVA para rugosidade do fundo - Amostra O.

Valores da ANOVA para rugosidade do fundo - Amostra O						
Grupo	Df	SS	MS	Valor F	Valor P	Contribuição [%]
Vc	2	5,809	2,904	4,700	0,176	44,67%
fz	2	5,828	2,914	4,710	0,175	44,82%
ap	2	0,130	0,065	0,110	0,905	1,00%
Erro	2	1,237	0,618			9,51%
Total	8	13,004				100,00%

Observando a Tabela 26 verifica-se que o parâmetro que apresenta maior influência na rugosidade do fundo da amostra O é avanço por dente (fz) com 44,82%, seguido da velocidade de corte (Vc), com 44,67%. É importante enfatizar que a discrepância percentual entre os dois é mínima. Também podemos ressaltar que a profundidade de corte (ap) não possui uma influência significativa na variável resposta, devido à baixa porcentagem em relação ao erro.

Tabela 27 - Valores da ANOVA para rugosidade lateral - Amostra O.

Valores da ANOVA para rugosidade lateral - Amostra O						
Grupo	Df	SS	MS	Valor F	Valor P	Contribuição [%]
Vc	2	3,587	1,794	25,050	0,038	35,86%
fz	2	0,332	0,166	2,320	0,301	3,32%
ap	2	5,943	2,971	41,500	0,024	59,40%
Erro	2	0,143	0,072			1,43%
Total	8	10,005				100,00%

Observando a Tabela 27 verifica-se que o parâmetro que apresenta maior influência na rugosidade lateral da amostra O é a profundidade de corte (ap) com 59,40%, seguido pela velocidade de corte (Vc) com 35,86% e, por último, o avanço por dente (fz) com 3,32%.

4.2.2 ANOVA - Taxa de produção

Os resultados da análise da variância para a taxa de produção das amostras Z, S e O é encontrada na Tabela 28 abaixo:

Tabela 28 - Valores da ANOVA para a taxa de produção - Amostra Z, S e O.

Valores da ANOVA para a taxa de produção - Amostra Z, S e O						
Grupo	Df	SS	MS	Valor F	Valor P	Contribuição [%]
Vc	2	5,991	2,995	21,720	0,044	54,80%
fz	2	1,488	0,744	5,390	0,156	13,61%
ap	2	3,177	1,588	11,520	0,080	29,06%
Erro	2	0,276	0,138			2,52%
Total	8	10,931				100,00%

Ao analisar a Tabela 28 podemos verificar que o parâmetro que apresenta maior influência na taxa de produção para todas as amostras é a velocidade de corte (Vc) com 54,80%, seguido pela profundidade de corte (ap) com 29,06% e, por último, o avanço por dente (fz) com 13,61%.

4.3 Análise relacional de Grey

Para encontrar a combinação ótima visando todas as características de qualidade (rugosidade do fundo, rugosidade lateral e taxa de produção) utilizamos a análise relacional de Grey. Uma análise relacional de Grey foi utilizada para cada amostra (Z, S e O) com objetivo de encontrar a combinação ótima de parâmetros para cada caminho de ferramenta (*ZigZag* - Z, *Parallel Spiral* - S e *OneWay* - O). Na realização da análise relacional de Grey serão utilizadas todas as razões sinal-ruído calculadas para a rugosidade superficial lateral e do fundo encontradas na Tabela 18, Tabela 20 e Tabela 21 e as taxas de produção encontradas na Tabela 17. Para melhor entendimento de todos os passos da análise relacional de Grey será efetuada

uma descrição, pormenorizada, com a amostra Z e nas amostras seguintes apenas será apresentado o resultado final.

4.3.1 Amostra Z

Para a realização da análise relacional de Grey da amostra Z, utilizaremos os valores da Razões sinal-ruído da Tabela 18, em conjunto com as taxas de produção da Tabela 17. Juntando esses dados em uma só tabela, temos a Tabela 29.

Tabela 29 – Base de dados para análise relacional de Grey - Amostra Z.

Base de dados para análise relacional de Grey – Amostra Z			
Número do ensaio	S/N rugosidade do fundo	S/N rugosidade lateral	Taxa de produção
1	-7,3127	2,3221	0,74
2	-6,6690	1,8639	0,96
3	-5,7834	1,3593	1,06
4	-6,2778	0,7769	2,23
5	-6,2839	0,4148	2,55
6	-5,6344	0,6384	1,06
7	-6,2848	3,3947	4,46
8	-6,8215	2,5520	1,91
9	-5,0961	-0,4556	2,39

O primeiro passo envolve o reprocessamento dos dados para normalizar os resultados. Este procedimento visa eliminar os efeitos das variações nas respostas e torná-las adimensionais, padronizando os resultados em uma escala de 0 a 1. No nosso caso, a normalização é realizada utilizando a Equação (8) (característica "maior é melhor"), pois para a razão S/N e a taxa de produção pretende-se alcançar o maior valor possível. Os valores normalizados dos resultados estão apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 -Dados normalizados - Amostra Z.

Dados normalizados - Amostra Z			
Número do ensaio	S/N rugosidade do fundo	S/N rugosidade lateral	Taxa de produção
1	-7,3127	2,3221	0,7428
2	-6,6690	1,8639	0,9551
3	-5,7834	1,3593	1,0612
4	-6,2778	0,7769	2,2281
5	-6,2839	0,4148	2,5464
6	-5,6344	0,6384	1,0610
7	-6,2848	3,3947	4,4565
8	-6,8215	2,5520	1,9099
9	-5,0961	-0,4556	2,3874

Após termos os dados normalizados na Tabela 30 podemos calcular o coeficiente relacional de Grey com a utilização da Equação (11). Nesta equação temos o coeficiente ζ (zeta) que varia de 0 a 1, sendo que, para o presente caso de estudo, o valor adotado foi 1/3 para todas as características analisadas (Rugosidade de fundo, rugosidade lateral e taxa de produção), pois queremos uma divisão igual dos pesos atribuídos a cada características já que, ambas, têm o mesmo grau de importância.

Tabela 31 - Coeficiente relacional de Grey - Amostra Z.

Coeficiente relacional de Grey - Amostra Z			
Número do ensaio	S/N rugosidade do fundo	S/N rugosidade lateral	Taxa de produção
1	0,2498	0,2498	0,5445
2	0,3194	0,2610	0,4558
3	0,5178	0,2670	0,3865
4	0,3845	0,3569	0,3288
5	0,3833	0,3930	0,3008
6	0,5783	0,2670	0,3175
7	0,3831	1,0000	1,0000
8	0,2996	0,3269	0,6034
9	1,0000	0,3741	0,2498

Por último, utilizando os valores da Tabela 31 e aplicando a Equação (12) obtemos o grau relacional de Grey, este representa a média dos coeficientes relacionais de Grey para cada

ensaio. Na Tabela 32 podemos encontrar os valores calculados e a ordem do maior para o menor, pois quanto maior o grau relacional de Grey mais perto as características dos experimentos estão do valor ótimo.

Tabela 32 - Grau relacional de Grey e sua ordem - Amostra Z.

Grau relacional de Grey e sua ordem - Amostra Z		
Número do ensaio	Grau relacional de Grey	Ordem
1	0,3480	8
2	0,3454	9
3	0,3904	4
4	0,3567	7
5	0,3590	6
6	0,3876	5
7	0,7944	1
8	0,4100	3
9	0,5413	2

Podemos destaca que dentre as combinações o ensaio 7 foi tese o melhor desempenho. Com esses dados podemos calcular uma média de graus relacional de Grey para cada nível, fazendo a média aritméticas entre os graus encontrados nas amostras que aquele nível foi utilizado, e assim podemos formular a Figura 25. Essa métrica permite-nos identificar as melhores combinações, pois valores mais altos de grau relacional de Grey indicam um desempenho superior.

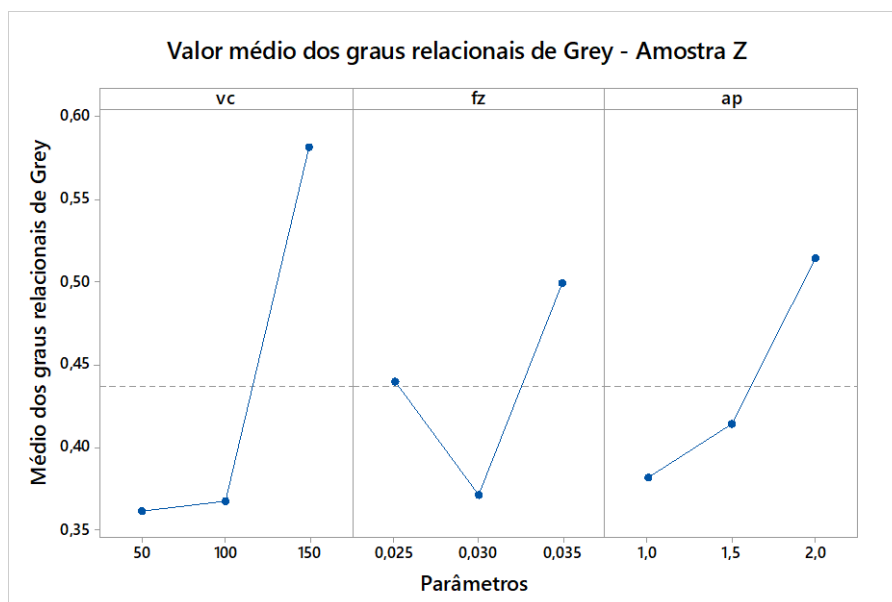


Figura 25 - Valor médio dos graus relacionais de Grey - Amostra Z.

Analisando os maiores valores da média dos Grau relacional de Grey, para cada parâmetro, podemos chegar à combinação ótima, que, neste caso, será A3B3C3, onde A3 ($V_c = 150$ [mm/mim]), B3 ($f_z = 0,035$ [mm/t]) e C3 ($a_p = 2,0$ [mm]). Esta combinação de níveis já foi realizada pelo ensaio 7, devido a isso, não é necessário a realização de um experimento comprovativo. Comparando o Grau relacional de Grey da combinação ótima com a média de todos os graus relacionais de Grey, podemos constatar que se verifica uma melhoria de 22%.

4.3.2 Amostra S

Aplicando os cálculos exemplificados na seção anterior podemos a chegar às médias dos Grau relacional de Grey para cada parâmetro e nível e retirar a combinação ótima.

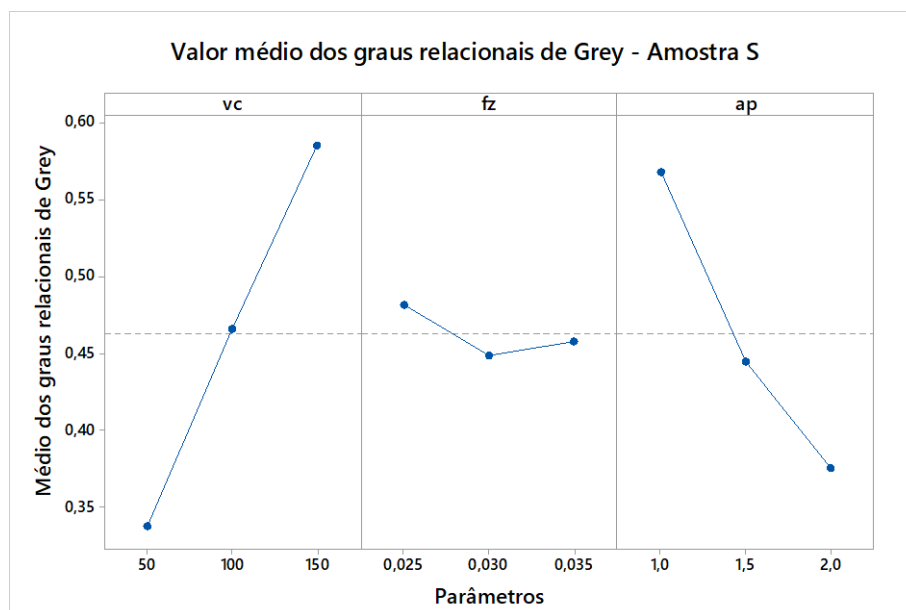


Figura 26 - Valor médio dos graus relacionais de Grey - Amostra S.

Analisando os maiores valores da média, podemos chegar à combinação ótima, que, neste caso, será A3B1C1, onde A3 ($V_c = 150$ [mm/mim]), B1 ($f_z = 0,025$ [mm/t]) e C1 ($a_p = 1,0$ [mm]). Esta combinação de níveis não foi realizada em nenhum dos ensaios, então, será necessário executar um experimento de confirmação de resultados.

4.3.2.1 Confirmação de resultados – Amostra S

Após confirmado que essa configuração de parâmetros não foi executada dentro de todos os ensaios determinados pelo arranjo ortogonal de Taguchi, primeiramente, foi realizado

o cálculo do grau relacional de Grey estimado (prognóstico) para a combinação ótima determinada. Podemos calcular esse valor usando a Equação (13), o cálculo fica:

$$\hat{\eta} = \eta_m + \sum_{i=1}^3 \bar{\eta}_i - \eta_m$$

$$\hat{\eta} = 0,437 + (582 - 0,437) + (0,500 - 0,437) + (0,515 - 0,437)$$

$$\hat{\eta} = 0,709$$

Em seguida, foram realizados três ensaios, utilizando a combinação ótima (A3B3C1), a partir dos resultados na rugosidade lateral e do fundo temos o S/N de cada ensaio, apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 - S/N rugosidade do fundo e lateral - Contraprova Amostra S.

S/N rugosidade do fundo e lateral - Contraprova Amostra S		
Número do ensaio	S/N rugosidade do fundo	S/N rugosidade lateral
Contraprova - 1	-0,5752	0,2270
Contraprova - 2	-0,5068	0,2212
Contraprova - 3	-0,5672	0,2214

Usando a mesma metodologia utilizada anteriormente, foi aplicada a análise relacional de Grey, utilizando os dados obtidos dos ensaios de contraprova, e encontrado o grau relacional de Grey do experimento. Com isso, podemos apresentar a Tabela 34, que informa a média dos Graus relacionais de Grey calculados inicialmente para a amostra S, o grau relacional de Grey estimado por cálculo e, por fim, o grau relacional de Grey do experimento de contraprova. Além disso, essa compara a melhoria em porcentagem do prognóstico calculado e da contraprova da combinação ótima com a média dos graus relacionais de Grey.

Tabela 34 - Comparação e melhoria entre graus relacionais de Grey – Amostra S.

Comparação e melhoria entre graus relacionais de Grey – Amostra S		
	Grau relacional de Grey	Melhoria em relação à média dos graus relacional de Grey
Média dos graus relacionais de Grey - Amostra S	0,463	-
Prognóstico (A3B1C1)	0,709	53%
Contraprova (A3B1C1)	0,667	44%

Pela análise feita na Tabela 34, podemos verificar que a utilização do método de Taguchi, em conjunto com a análise relacional de Grey, nos trouxe um melhoramento do processo em 44%, para a amostra S.

4.3.3 Amostra O

Aplicando os cálculos para os dados da amostra O, podemos chegar às médias do Grau relacional de Grey para cada parâmetro e nível e retirar a combinação ótima para essa amostra.

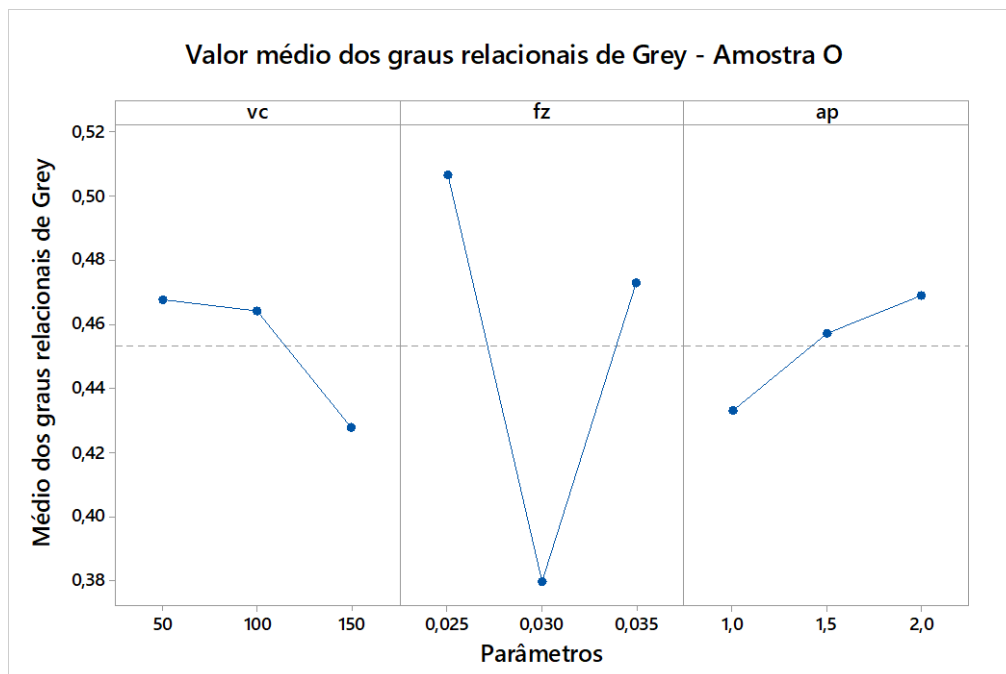


Figura 27 - Valor médio dos graus relacionais de Grey - Amostra O.

Observando os maiores valores da média, é possível chegar à combinação ótima, que, neste caso, será A1B1C3, onde A1 ($Vc = 50$ [mm/mim]), B1 ($fz = 0,025$ [mm/t]) e C3 ($ap = 2,0$ [mm]). Esta combinação de níveis já foi realizada pelo ensaio 3, devido a isso, não é necessário a realização do ensaio comprovativo. Podemos constatar, também, que a combinação ótima tem uma melhoria de 22%, pois seu grau relacional de Grey é 22% maior que a média dos graus relacionais de Grey.

4.4 ANOVA - Análise relacional de Grey

A Análise de variância também é implementada na análise relacional de Grey, neste caso, diferente da ANOVA aplicada no Taguchi. Assim, será avaliado o impacto dos parâmetros (velocidade de corte, avanço por dente e profundidade de corte) em relação a todos os fatores

de controle (taxa de produção, rugosidade superficial do fundo e lateral), ao mesmo tempo, não separadamente como no método de Taguchi.

4.4.1 Amostra Z

Os resultados da análise da variância da amostra Z utilizando os dados da análise relacional de Grey podem ser vistos na Tabela 35 abaixo:

Tabela 35 - Valores da ANOVA para a análise relacional de Grey - Amostra Z.

Valores da ANOVA para a análise relacional de Grey - Amostra Z						
Grupo	Df	SS	MS	Valor F	Valor P	Contribuição [%]
Vc	2	0,095	0,047	3,810	0,208	54,72%
Fz	2	0,025	0,012	1,000	0,501	14,30%
ap	2	0,029	0,014	1,160	0,463	16,62%
Erro	2	0,025	0,012			14,36%
Total	8	0,173				100,00%

Com a análise da Tabela 35, verifica-se que o parâmetro que apresenta maior influência na amostra Z foi a velocidade de corte (Vc) com 54,72%, seguido pela profundidade de corte (ap) com 16,62%, e, por último, o avanço por dente com 14,30%.

4.4.2 Amostra S

Os resultados da análise da variância da amostra S utilizando os dados da análise relacional de Grey podem ser vistos na Tabela 36 abaixo:

Tabela 36 - Valores da ANOVA para a análise relacional de Grey - Amostra S.

Valores da ANOVA para a análise relacional de Grey - Amostra S						
Grupo	Df	SS	MS	Valor F	Valor P	Contribuição [%]
Vc	2	0,091	0,046	10,910	0,084	57,69%
Fz	2	0,002	0,001	0,210	0,829	1,09%
ap	2	0,057	0,028	6,790	0,128	35,93%
Erro	2	0,008	0,004			5,29%
Total	8	0,158				100,00%

Com a análise da Tabela 36 verifica-se que o parâmetro que apresenta maior influência na amostra S foi a velocidade de corte (Vc) com 57,69%, seguido pela profundidade de corte (ap) com 35,93%, e podemos ressaltar que o avanço por dente (Fz) não possui influência significativa na variável resposta, visto que sua porcentagem está abaixo do erro. Ou seja, a variação nas respostas não pode ser significativamente atribuída às variações específicas desse parâmetro, mas sim ao erro residual ou a outras fontes de variação não explicadas pelos fatores considerados na análise.

4.4.3 Amostra O

Os resultados da análise da variância da amostra O utilizando os dados da análise relacional de Grey podem ser vistos na Tabela 37 abaixo:

Tabela 37 - Valores da ANOVA para a análise relacional de Grey - Amostra O.

Valores da ANOVA para a análise relacional de Grey - Amostra O						
Grupo	Df	SS	MS	Valor F	Valor P	Contribuição [%]
Vc	2	0,003	0,001	0,210	0,824	6,51%
Fz	2	0,026	0,013	1,920	0,342	58,49%
ap	2	0,002	0,001	0,150	0,870	4,56%
Erro	2	0,013	0,007			30,44%
Total	8	0,044				100,00%

Com a análise da Tabela 37 verifica-se que o parâmetro que apresenta maior influência na amostra O foi o avanço por dente (Fz) com 58,49%, por outro lado, podemos observar que os outros dois parâmetros (Vc e ap) não exercem uma influência significativa na variável resposta, uma vez que suas porcentagens estão abaixo do erro residual.

Um ponto a ressaltar na Tabela 37 é que o erro apresentou uma influência de 30,37% nos resultados. Este valor de erro residual, representa a variabilidade que permanece no modelo, após a identificação de todos os efeitos principais. Em outras palavras, quase um terço das variações dos resultados não é explicada pelo modelo selecionado.

Este erro pode estar relacionado com a seleção dos parâmetros e níveis que não conseguiram explicar o modelo. Por exemplo, a escolha de outros parâmetros, como tipos de pastilha, profundidade lateral de corte ou a utilização de outros níveis para os parâmetros analisado neste estudo poderiam diminuir a variabilidade do modelo. O uso de uma matriz

ortogonal maior poderia minimizar o erro residual, em contrapartida, tornaria o processo de otimização mais caro e demorado.

Além disso, podem surgir erros inerentes aos instrumentos utilizados, que são difíceis de mensurar, como, por exemplo, a vibração da Fresa CNC. Alguns erros podem resultar da falta de experiência no manuseio de certos equipamentos e da discrepância entre os valores configurados e os valores nominais dos equipamentos.

Apesar deste valor do erro, o modelo aplicado nas práticas experimentais proporcionou resultados que melhoraram as condições inicialmente definidas, demonstrando a eficácia do uso do método Taguchi e da análise relacional de Grey no planejamento de experimentos.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo, serão apresentadas as considerações finais do trabalho, incluindo a validação do método empregue, um resumo dos resultados obtidos e outros pontos de interesse identificados ao longo da execução. Em seguida, serão propostas algumas sugestões para futuros trabalhos relacionados com os temas abordados nesta dissertação.

5.1 CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo otimizar os parâmetros de usinagem para três tipos de caminhos de usinagem: *ZigZag* (amostra Z), *Parallel Spiral* (amostra S) e *Oneway* (amostra O), utilizando, como critérios, a rugosidade do fundo, rugosidade lateral e taxa de produção. Para isso, foram empregues o método de Taguchi para encontrar a combinação ótima de parâmetros para cada critério individual e a análise relacional de Grey para identificar a combinação ótima, considerando todos os critérios simultaneamente. Além disso, a análise de variância (ANOVA) foi utilizada para avaliar a influência de cada parâmetro nos resultados.

Os resultados mostraram que a combinação ótima de parâmetros variou conforme o tipo de caminho de usinagem e o critério considerado. Na amostra Z, a combinação ótima para a rugosidade do fundo foi $V_c = 150$ [mm/mim], $f_z = 0,025$ [mm/t] e $a_p = 1,5$ [mm], enquanto para a rugosidade lateral foi $V_c = 50$ [mm/mim], $f_z = 0,035$ [mm/t] e $a_p = 1,0$ [mm]. Na amostra S, a combinação ótima para ambos os tipos de rugosidade foi $V_c = 150$ [mm/mim], $B_3 f_z = 0,025$ [mm/t] e $a_p = 1,0$ [mm]. Já na amostra O, a combinação a ótima para a rugosidade do fundo foi $V_c = 50$ [mm/mim], $f_z = 0,025$ [mm/t] e $a_p = 2,0$ [mm], e para a rugosidade lateral foi $V_c = 100$ [mm/mim]), $f_z = 0,025$ [mm/t] e $a_p = 1,5$ [mm].

A análise de variância (ANOVA) revelou que diferentes parâmetros tiveram maior influência dependendo do critério e do caminho de usinagem. Por exemplo, na amostra Z, o avanço por dente (f_z) foi o parâmetro mais influente na rugosidade do fundo (68,44%), enquanto na rugosidade lateral, o mesmo parâmetro teve a maior influência (36,03%). Na amostra S, a profundidade de corte (a_p) foi o parâmetro mais influente tanto na rugosidade do fundo (62,61%) quanto na rugosidade lateral (88,10%). Já na amostra O, o avanço por dente (f_z) foi o parâmetro mais influente na rugosidade do fundo (44,82%) e a profundidade de corte (a_p) teve maior influência na rugosidade lateral (59,40%).

Para otimizar a taxa de produção, a combinação com $V_c = 150$ [mm/min], $f_z = 0,035$ [mm/tooth] $a_p = 2,0$ [mm] foi identificada como a mais eficaz. A análise de ANOVA indicou que a velocidade de corte (V_c) teve a maior influência na taxa de produção para todas as amostras, seguida pela profundidade de corte (a_p) e, por último, pelo avanço por dente (f_z).

A análise relacional de Grey foi crucial para identificar combinações ótimas que considerassem simultaneamente todos os critérios de qualidade. Para a amostra Z, a combinação ótima foi $V_c = 150$ [mm/min], $f_z = 0,035$ [mm/t] e $a_p = 2,0$ [mm]. Para a amostra S, a combinação ótima identificada foi $V_c = 150$ [mm/min], $f_z = 0,025$ [mm/t] e $a_p = 1,0$ [mm], e para a amostra O, a combinação ótima foi $V_c = 50$ [mm/min], $f_z = 0,025$ [mm/t] e $a_p = 2,0$ [mm]. Nos casos em que a combinação ótima não foi previamente testada, foram realizados experimentos de confirmação que validaram a eficácia das combinações previstas.

Os resultados deste estudo demonstram que a aplicação dos métodos de Taguchi e da análise relacional de Grey, em conjunto com a análise de variância, pode, efetivamente, melhorar o processo de usinagem. A otimização dos parâmetros resultou numa significativa melhoria na qualidade da superfície e na eficiência da produção. Por exemplo, para a amostra Z, o uso combinado dos métodos resultou num aprimoramento do processo em 82%. Na amostra S tivemos uma melhoria de 44%. Já na amostra O tivemos uma taxa de melhoria de 22% no processo.

Em conclusão, a combinação de técnicas estatísticas avançadas como o método de Taguchi, análise de variância e análise relacional de Grey fornece uma abordagem robusta para a otimização de parâmetros de usinagem. Esta abordagem não só identifica as melhores condições operacionais para critérios específicos, mas também considera a influência relativa de cada parâmetro e permite a otimização integrada para múltiplos critérios de desempenho. Este estudo contribui significativamente para o campo da engenharia de manufatura, oferecendo uma metodologia eficaz para a melhoria contínua de processos de usinagem, aumentando a competitividade e a eficiência na produção industrial.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

O objetivo deste estudo foi otimizar o processo de usinagem em relação a rugosidade superficial e a taxa de produção para cada tipo de trajetória da ferramenta, desta forma, foi encontrado a combinação ótima para cada caminho de ferramenta. Uma vertente de estudo que se pode seguir a partir disso é a comparação entre os tipos de trajetória, analisando os prós e

contras de cada um. Uma nova otimização também pode ser feita, mas com as trajetórias da ferramenta como um parâmetro de controle, dentro do arranjo ortogonal de Taguchi.

Outro estudo possível de se aprofundar é a análise de vibração da máquina, pois esse fator pode interferir consideravelmente na rugosidade superficial. Essa característica, geralmente, é umas das mais influentes na taxa de erro em análise de rugosidade, devido isso seu estudo se torna interessante.

Por fim, outro ramo de estudo que pode ser interessante ser adotado em trabalhos futuros seria acerca do desgaste de pastilha, é uma métrica importante no meio produtivo devido a ser diretamente proporcional ao tempo de parada de maquina para troca de ferramenta.

REFERÊNCIAS

- [1] *Quality Congress. ASQC... Annual Quality Congress Proceedings 2000: Vol 54 Table of Contents*. American Society for Quality, 2000. Acesso em: 28 de maio de 2024. [Online]. Disponível em: http://archive.org/details/sim_asq-world-conference-on-quality-and-improvement_2000_54_contents
- [2] E. M. Trent e P. K. Wright, *Metal Cutting*. Elsevier Science, 2000.
- [3] J. P. Soares, *Aços características Tratamentos*. Publindústria Pt.
- [4] M.-Y. Wang e H.-Y. Chang, “Experimental study of surface roughness in slot end milling AL2014-T6”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 44, n° 1, p. 51–57, jan. 2004, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2003.08.011.
- [5] A. Hatna, R. Grieve, e P. Broomhead, “Automatic CNC milling of pockets: geometric and technological issues”, *Comput. Integr. Manuf. Syst.*, vol. 11, n° 4, p. 309–330, out. 1998, doi: 10.1016/S0951-5240(98)00030-5.
- [6] I. Mukherjee e P. K. Ray, “A review of optimization techniques in metal cutting processes”, *Comput. Ind. Eng.*, vol. 50, n° 1, p. 15–34, maio 2006, doi: 10.1016/j.cie.2005.10.001.
- [7] H. D. O. Mendes, “Otimização de parâmetros de corte no processo de torneamento CNC”, masterThesis, 2019. Acesso em: 28 de maio de 2024. [Online]. Disponível em: <https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/19831>
- [8] P. J. Ross, *Taguchi Techniques for Quality Engineering: Loss Function, Orthogonal Experiments, Parameter and Tolerance Design*. McGraw Hill Professional, 1996.
- [9] J. Ribeiro, H. Lopes, L. Queijo, e D. Figueiredo, “Optimization of Cutting Parameters to Minimize the Surface Roughness in the End Milling Process Using the Taguchi Method”, *Period. Polytech. Mech. Eng.*, vol. 61, p. 30–35, jan. 2017, doi: 10.3311/PPme.9114.
- [10] H. S. Lu, C. K. Chang, N. C. Hwang, e C. T. Chung, “Grey relational analysis coupled with principal component analysis for optimization design of the cutting parameters in high-speed end milling”, *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, n° 8, p. 3808–3817, abr. 2009, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.08.030.
- [11] D. A. B. Pereira, “Estudo comparativo da vida útil das ferramentas e acabamento superficial para diferentes ferramentas de fresagem”, 2017.
- [12] J. Ribeiro, “Tecnologia Mecânica II”, Bragança, 2013.
- [13] A. Festas, A. Completo, e J. P. Davim, *Tecnologia de Fabrico*. Porto: Publindústria, 2009.
- [14] N. J. L. Paulo, “Otimização dos Parâmetros de Maquinagem para Minimizar as Vibrações no Processo de Fresagem”, IPB, Bragança, 2016.
- [15] L. Norberto López de Lacalle, F. J. Campa, e A. Lamikiz, “3 - Milling”, em *Modern Machining Technology: A Practical Guide*, Woodhead, 2011, p. 213–304.
- [16] J. P. Davim e A. E. Correia, *Maquinagem a alta velocidade: fresagem - CNC*. PUBLINDÚSTRIA, 2006.
- [17] F. F. da Silva, “Análise da estabilidade dinâmica do processo de fresamento com ferramenta de topo esférico do aço aisi d6 endurecido”, UTFPR, Curitiba, 2018.

- [18] M. H. M. Dib, “Fundamentos do fresamento: uma aplicação em microfresamento”, Mestrado em Manufatura, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013. doi: 10.11606/D.18.2013.tde-31102013-165527.
- [19] T. J. Drozda, *Tool and Manufacturing Engineers Handbook: Machining*. em Tool and Manufacturing Engineers Handbook, Fourth Edition. Society of Manufacturing Engineers, 1983.
- [20] C. Relvas, *Controlo Numérico Computorizado: Conceitos Fundamentais - 3ª edição*. Porto: Publindústria, 2012.
- [21] G. Boothroyd e W. A. Knight, *Fundamentals of machining and machine tools*, 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 1989.
- [22] M. P. Groover, *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*, 3rd ed. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons, 2007.
- [23] M. A. Hadi, J. A. Ghani, C. H. C. Haron, e M. S. Kasim, “Comparison between Up-milling and Down-milling Operations on Tool Wear in Milling Inconel 718”, *Procedia Eng.*, vol. 68, p. 647–653, jan. 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.12.234.
- [24] Altintas Y. ., Author e Ber AA ., Reviewer, *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*, vol. 54. 2001. Acesso em: 21 de dezembro de 2023. [Online]. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.1399383>
- [25] P. J. de O. Santos, “Tecnologia CAM aplicada no fabrico por fresagem de componentes mecânicos: caracterização do processo de fresagem e dos componentes produzidos”, masterThesis, 2013. Acesso em: 22 de março de 2024. [Online]. Disponível em: <https://comum.rcaap.pt/handle/10400.26/14186>
- [26] P. A. M. Loureiro, “Otimização da utilização de ferramentas de corte em fresagem CNC”, Universidade do Porto, 2020. [Online]. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/128387/2/411659.pdf>
- [27] “Soluções ideais de projeto e fabricação para usinagem precisa de cantos internos afiados”, Aria | Online Manufacturing For On-Demand Custom Services. Acesso em: 21 de maio de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.madearia.com/pt/blog/optimal-design-and-manufacturing-solutions-for-precise-machining-sharp-interior-corners/>
- [28] C. Gologlu e N. Sakarya, “The effects of cutter path strategies on surface roughness of pocket milling of 1.2738 steel based on Taguchi method”, *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 206, nº 1, p. 7–15, set. 2008, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.11.300.
- [29] M. Marques de Almeida Rosa da Cruz, “Influência no custo do processo devido a variação dos parâmetros de usinagem no fresamento de alumínio”, UTFPR, Pato Branco, 2019.
- [30] F. Miguel Ferreira Nascimento, “Processamento por Fricção Linear - Caracterização e análise de ligas de alumínio processadas AA5083-O e AA7022-T6”, UTL, Lisboa, 2007.
- [31] ABAL, “Fundamentos e Aplicações do Alumínio”. São Paulo - Brasil, 2017.
- [32] M. N. dos Reis, “Processo de produção e uso do alumínio na construção civil: contribuição à especificação das esquadrias de alumínio”, text, Universidade de São Paulo, 2006. doi: 10.11606/D.16.2006.tde-29112010-101045.
- [33] “ABAL - Associação Brasileira do Alumínio”, ABAL - Associação Brasileira do Alumínio. Acesso em: 2 de maio de 2024. [Online]. Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/>

- [34] R. B. Ferrari, “Caracterização de liga metálica a base de alumínio - magnésio obtida por método convencional após tratamentos termomecânicos visando estruturas microcristalinas”, text, Universidade de São Paulo, 2008. doi: 10.11606/D.85.2008.tde-27092009-083128.
- [35] D. Brito Colaço, “Caracterização e avaliação das tensões residuais em juntas da liga de alumínio aa 5083-o soldadas pelo processo FSW”, UFCG, Campina Grande - Brasil, 2019.
- [36] A. Rosato Júnior, “Estrutura integral por soldagem por atrito ‘friction stir welding - FSW’: requisitos básicos para o projeto estrutural.”, Dissertação, Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, São José dos Campos, 2003.
- [37] K. R. Van Horn, *Aluminum - Volume 1: Properties, Physical Metallurgy and Phase Diagrams*. Ohio: American Society for Metals, 1967.
- [38] Prodweb, “Ligas Al-Mg | Informações Técnicas | Alumínio | Metais & Ligas”, Infomet. Acesso em: 6 de maio de 2024. [Online]. Disponível em: <https://www.infomet.com.br/site/metais-e-ligas-conteudo-ler.php>
- [39] Metalthaga, “Tabela técnica - LIGA DE ALUMÍNIO 5083-H111”. Novo Hamburgo, 2024. Acesso em: 6 de janeiro de 2024. [Online]. Disponível em: <https://metalthaga.com.br/wp-content/uploads/2019/09/liga-de-aluminio-5083-h111.pdf>
- [40] I. J. Polmear, *Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals*, 3^o ed. London: Arnold, 1995.
- [41] “Ligas de Alumínio”, Metalthaga. Acesso em: 6 de maio de 2024. [Online]. Disponível em: <https://metalthaga.com.br/ligas-de-aluminio/>
- [42] A. Blanca, J. Meireles, H. Lopes, e J. E. Ribeiro, “Optimization of milling parameters to improve the surface roughness using the taguchi methodology”, *Int. Conf. Struct. Anal. Adv. Mater.*, p. 120–121, 2015.
- [43] J. C. da S. Neto, *Metrologia e Controle Dimensional*, 1^a edição. Elsevier, 2012.
- [44] Á. R. Machado, A. M. Abrão, R. T. Coelho, M. B. da Silva, e R. T. Ruffino, *Teoria da usinagem dos materiais*. São Paulo: Edgard Blücher, 2009. Acesso em: 3 de abril de 2024. [Online]. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/002126508>
- [45] R. Sousa, *Princípios da Maquinagem*, 1^a. Engebook, 2008.
- [46] S.-S. N. de A. Industrial, “Metrologia”. São Paulo: Escola Senai Roberto Simonsen, 2004.
- [47] S. Coromant, “Desgaste da ferramenta”. Sandvik Coromant. Acesso em: 20 de março de 2023. [Online]. Disponível em: http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/troubleshooting/tool_wear/pages/default.aspx.
- [48] P. Guedes, *Metrologia Industrial*. LIDEL, 2011.
- [49] Mitutoyo, “Catálogo Mitutoyo”. Acesso em: 20 de janeiro de 2024. [Online]. Disponível em: http://www.eacampos.pt/fotos/%0Aeditor2/metrologia/10_Medicao_Rugosidade_e_Forma_340-359_P14001.pdf.
- [50] W. H. Yang e Y. S. Tarn, “Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method”, *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 84, n^o 1, p. 122–129, dez. 1998, doi: 10.1016/S0924-0136(98)00079-X.
- [51] Y. Wu e A. Wu, *Taguchi Methods for Robust Design*. ASME Press, 2000. doi: 10.1115/1.801578.

- [52] A. C. O. Lopes, “Otimização dos parâmetros de furação utilizando o método de Taguchi”, masterThesis, 2017. Acesso em: 23 de maio de 2024. [Online]. Disponível em: https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/14785?locale=pt_PT
- [53] C.-J. Tzeng, Y.-H. Lin, Y.-K. Yang, e M.-C. Jeng, “Optimization of turning operations with multiple performance characteristics using the Taguchi method and Grey relational analysis”, *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, n° 6, p. 2753–2759, mar. 2009, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.06.046.
- [54] Y. F. Hsiao, Y. S. Tarng, e W. J. Huang, “Optimization of Plasma Arc Welding Parameters by Using the Taguchi Method with the Grey Relational Analysis”, *Mater. Manuf. Process.*, vol. 23, n° 1, p. 51–58, dez. 2007, doi: 10.1080/10426910701524527.
- [55] S. Pal, S. K. Malviya, S. K. Pal, e A. K. Samantaray, “Optimization of quality characteristics parameters in a pulsed metal inert gas welding process using grey-based Taguchi method”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 44, n° 11, p. 1250–1260, out. 2009, doi: 10.1007/s00170-009-1931-0.
- [56] C. R. de Lacerda, “Otimização de parâmetros de soldadura GMAW utilizando o método Taguchi com a análise relacional de Grey”, IPB, Bragança, 2021.
- [57] J. Deng, “Introduction to Grey system theory”, *J. Grey Syst.*, nov. 1989.
- [58] S. Liu e J. Forrest, *Grey Systems: Theory and Applications*. Springer Science & Business Media, 2010.
- [59] C.-C. Tsai, S.-C. Chuang, J.-C. Liang, e M.-J. Tsai, “Self-efficacy in Internet-based learning environments: A literature review”, *J. Educ. Technol. Soc.*, vol. 14, n° 4, p. 222–240, 2011.
- [60] Y. Kuo, T. Yang, e G.-W. Huang, “The use of grey relational analysis in solving multiple attribute decision-making problems”, *Comput. Ind. Eng.*, vol. 55, n° 1, p. 80–93, ago. 2008, doi: 10.1016/j.cie.2007.12.002.
- [61] S. V. Sapkal e M. Telsang, “Parametric optimization of MIG welding using Taguchi design method”, *Int. J. Adv. Eng. Res. Stud.*, vol. 1, jan. 2012.
- [62] W. Wu, “A Revised Grey Relational Analysis Method for Multicriteria Group Decision-Making with Expected Utility Theory for Oil Spill Emergency Management”, *Math. Probl. Eng.*, vol. 2021, p. 1–13, mar. 2021, doi: 10.1155/2021/6682332.
- [63] S.-T. Lin *et al.*, “Application of grey-relational analysis to find the most suitable watermarking scheme”, *Int. J. Innov. Comput. Inf. Control*, vol. 7, set. 2011.
- [64] S. A. N. Mohamed, E. S. Zainudin, S. M. Sapuan, M. A. Md. Deros, e A. M. Tajul Arifin, “Integration of Taguchi-Grey relational analysis technique in parameter process optimization for rice husk composite”, *BioResources*, vol. 14, n° 1, p. 1110–1126, dez. 2018, doi: 10.15376/biores.14.1.1110-1126.
- [65] S. R. A. Fisher, *Statistical Methods for Research Workers*. Oliver and Boyd, 1970.
- [66] *Robust Design and Analysis for Quality Engineering*. Acesso em: 28 de maio de 2024. [Online]. Disponível em: <https://link.springer.com/book/9780412556203>
- [67] J. C. Ferreira e C. M. Patino, “What does the p value really mean?”, *J. Bras. Pneumol.*, vol. 41, n° 5, p. 485–485, out. 2015, doi: 10.1590/S1806-37132015000000215.
- [68] SECO, “JSE514060D2C.0Z4 SIRA | Seco Tools”. Acesso em: 13 de janeiro de 2024. [Online]. Disponível em:

[https://www.secotools.com/article/p_10053061?productDetailsTab=cuttingData&pf=true
&language=pt](https://www.secotools.com/article/p_10053061?productDetailsTab=cuttingData&pf=true&language=pt)

Anexos

Anexo I – Valores das aferições de rugosidade

Rugosidade do Fundo Aferição ao meio	Rugosidade do Fundo Aferição ao canto	Rugosidade da lateral Aferição ao meio	Rugosidade da lateral Aferição ao canto
1,95	2,64	0,79	0,74
2,16	2,15	0,75	0,86
1,68	2,18	0,87	0,84
2,20	1,91	1	0,82
1,98	2,14	0,87	1,03
2,08	1,73	0,79	1,05
2,27	1,83	0,63	0,72
1,66	2,62	0,77	0,72
1,69	1,90	1,14	0,96