

Ferramenta Computacional para Auxílio na Tomada de Decisão no Processo de Fresagem

Romulo Matheus Emmerick Martins

Trabalho realizado sob a orientação de

Prof. Dra. Ana Isabel Pereira

Prof. Dr. João Eduardo Ribeiro

Prof. Dr. David Lira Nuñez

Mestrado em Engenharia Industrial

2019-2020

Ferramenta Computacional para Auxílio na Tomada de Decisão no Processo de Fresagem

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e de Gestão de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Industrial pelo programa de dupla diplomação entre o Instituto Politécnico de Bragança e Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Romulo Matheus Emmerick Martins

Trabalho realizado sob a orientação de

Prof. Dra. Ana Isabel Pereira

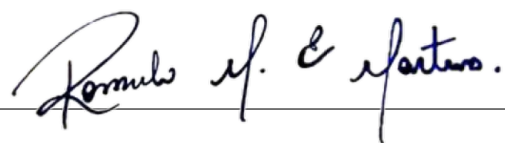
Prof. Dr. João Eduardo Ribeiro

Prof. Dr. David Lira Nuñez

2019-2020

A Escola Superior de Tecnologia e de Gestão não se responsabiliza pelas opiniões expressas neste relatório.

Declaro que o trabalho descrito neste relatório é da minha autoria e é da minha vontade que o mesmo seja submetido a avaliação.



Romulo M. E. Martins.

Romulo Matheus Emmerick Martins

Dedicatória

Dedico este trabalho em primeiro lugar à minha família, em especial, à minha mãe, irmã e sobrinhos. Aos amigos com os quais pude compartilhar alegrias, conquistas e também tristezas. E, aos professores que tanto contribuíram para que eu chegasse até aqui.

Agradecimentos

A Deus, que esteve sempre do meu lado e a quem devo tudo. À minha mãe, à minha irmã, ao meu cunhado, à minha avó, meu porto seguro, minha referência. A Universidade Tecnológica Federal do Paraná e ao departamento de Engenharia Mecânica do campus Guarapuava pelas oportunidades proporcionadas durante a graduação. Ao Instituto Politécnico de Bragança pelo acolhimento como estudante de dupla diplomação. Aos meus orientadores Professora Dra. Ana Isabel Pereira, Professor Dr. João Eduardo Ribeiro e Professor Dr. David Lira Nuñez por incentivarem minhas escolhas; pelas leituras atentas do meu trabalho, pelas sugestões e pelas críticas sempre construtivas. Aos tios Elaine e Pedro que foram incentivadores da minha formação acadêmica. E aos demais familiares e amigos, que aqui não foram citados, mas que são lembrados com gratidão, pelo apoio inestimável e pela torcida.

Resumo

A crescente procura das indústrias por melhorias da eficiência produtiva tem se tornado, cada vez mais, um incentivador ao aumento investigação com foco na otimização de processos para o aumento da qualidade ao menor tempo e custo possível. Nesse cenário, o setor industrial tem procurado sistemas inteligentes, capazes de auxiliar no suporte à decisão, como parte de seus negócios e planos de crescimento. No presente trabalho, desenvolveu-se um software baseado no método de otimização de superfícies de resposta combinado com o algoritmo genético para apoiar a identificação de parâmetros ótimos para a diminuição dos níveis vibratórios no processo de fresagem numa CNC. O software prevê os parâmetros de fresagem - velocidade de corte, velocidade de avanço, penetração axial e radial - que resultariam nos menores níveis de vibração e, conseqüentemente resultando no aumento da qualidade superficial da peça produzida.

A fim de comprovar a fiabilidade do software de otimização, comparou-se os resultados obtidos com os melhores resultados experimentais, obtidos anteriormente pelo método de Taguchi. Da comparação verificou-se a fiabilidade da solução proposta.

Palavras-chave: Otimização, Algoritmo Genético, Software, Fresagem.

Abstract

The growing demand from industries for improvements in production efficiency has increasingly become an incentive to increase research focused on optimizing processes to increase quality in the shortest possible time and at the lowest possible cost. In this scenario, the industrial sector has been looking for intelligent systems capable of assisting in decision support as part of its business and growth plans. In the present work, software based on the method of optimization of response surfaces combined with a genetic algorithm has been developed to support the identification of optimal parameters for reducing vibration levels in the milling process in a CNC. The software predicts the milling parameters - cutting speed, feed speed, axial and radial penetration - which would result in the lowest vibration levels and consequently, increasing the surface quality of the produced part.

In order to prove the reliability of the optimization software, the results obtained were compared with the best experimental results, previously obtained by the Taguchi method. From the comparison, the reliability of the proposed solution was verified.

Keywords: Optimization, Genetic Algorithm, Software, Milling.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos	3
1.3	Estrutura da Dissertação	4
2	Fundamentos Teóricos	7
2.1	Processos de Maquinagem	7
2.2	Comando Numérico Computadorizado	9
2.3	Fresagem	9
2.3.1	Parâmetros de Fresagem	11
2.3.2	Rugosidade	13
2.4	Vibrações na Fresagem	15
2.4.1	Origem das Vibrações	17
2.4.2	Influencia dos Parâmetros de Corte para a Estabilidade	18
2.5	Método de Taguchi	19
2.5.1	Função Perda da Qualidade	20
2.5.2	Relação Sinal-Ruído	22
2.5.3	Arranjo Ortogonal de Taguchi	23
2.6	Método de Superfície de Resposta	24
2.7	Algoritmo Genético	27
2.8	Otimização na Maquinagem	27

3	<i>Design</i> de Experiências	31
3.1	Estudo de Caso para Rugosidade	31
3.1.1	Método de Taguchi para Rugosidade	31
3.1.2	Método de Superfície de Resposta para Rugosidade	33
3.2	Estudo de Caso para Vibração	35
3.2.1	Método de Taguchi para Vibração	35
3.2.2	Método de Superfície de Resposta para Vibração	36
4	<i>Design</i> de Experiências Automatizado	39
4.1	Fluxo de Funcionamento do Software	39
4.2	Critério de Seleção do Equacionamento	41
4.3	Armazenamento	43
4.3.1	Caso 1 - Primeira Utilização	43
4.3.2	Caso 2 - Utilização Global	43
4.4	Interface e Comando Executável	44
4.5	Cuidados	44
5	Manual do Utilizador e Resultados	47
5.1	Manual do Utilizador	47
5.1.1	Utilização Global	47
5.1.2	Primeira Utilização	53
5.2	Estudo de Caso para Vibração	54
5.3	Estudo de Caso para Rugosidade	57
6	Considerações Finais	61
6.1	Conclusões	61
6.2	Trabalhos Futuros	63

Lista de Tabelas

2.1	Classe de rugosidade [37]	15
2.2	Tabela de Taguchi para seleção da matriz ortogonal	23
3.1	Valores dos parâmetros de fresagem	32
3.2	Matriz L16 de Taguchi com os valores nas unidades SI	32
3.3	Resultados da rugosidade nos ensaios pelo método de Taguchi	33
3.4	Resultados da rugosidade nos ensaios pelo Método de Superfície de Resposta	34
3.5	Ensaio de Taguchi para RMS médio de vibração	35
3.6	Resultados vibratórios nos ensaios pelo Método de Superfície de Resposta [20]	37
5.1	Matriz L16 de Taguchi com os valores máximos e mínimos para a vibração	55
5.2	Ensaio 1 de vibração: Sugestões do software para os parâmetros de maquinagem na CNC	55
5.3	Ensaio 2 de vibração: Sugestões do software para os parâmetros de maquinagem na CNC	56
5.4	Ensaio 3 de vibração: Sugestões do software para os parâmetros de maquinagem na CNC	56
5.5	Matriz L16 de Taguchi com os valores máximos e mínimos para a rugosidade	57
5.6	Ensaio 1 de rugosidade: Sugestões do software para os parâmetros de maquinagem na CNC	58
5.7	Ensaio 2 e 3 de rugosidade: Sugestões do software para os parâmetros de maquinagem na CNC	58

Lista de Figuras

2.1	Fresagem discordante (a) e fresagem concordante (b) [29].	10
2.2	Fresagem cilíndrica (a) e fresagem frontal (b) [29].	11
2.3	Parâmetros de corte [33].	13
2.4	Forças na maquinagem [30].	16
2.5	Gráfico de contornos e de superfície de resposta[60].	26
4.1	Fluxo funcional do software.	40
4.2	Distribuição dos problemas na modelação do software	42
5.1	Ícone da aplicação.	48
5.2	Entrada de parâmetros mínimos para CNC.	49
5.3	Entrada de parâmetros máximos para CNC.	49
5.4	Aviso que está a calcular a melhor função.	50
5.5	Aviso que está a calcular o melhor coeficiente.	50
5.6	Aviso que está a calcular os novos melhores parâmetros.	51
5.7	Opção de iniciar outra otimização.	51
5.8	Recomendação de novos parâmetros.	51
5.9	Parâmetros para utilização na CNC.	52
5.10	Resultado da vibração na CNC.	53

Siglas

R_a Rugosidade média.

a_e penetramento axial.

a_p penetramento radial.

F_a Força de corte axial.

F_r Força de corte radial.

F_t Força de corte tangencial.

V_a Velocidade de avanço.

V_c Velocidade de Corte.

ANOVA análise de variância.

CNC Comando Numérico Computadorizado.

DOE *design* de experiências.

EA Algoritmos Evolucionários.

ESTiG Escola Superior de Tecnologia e Gestão.

GA Algoritmos Genético.

IPB Instituto Politécnico de Bragança.

LTM Laboratório de Tecnologia Mecânica.

MCU Unidade de Controle da Máquina.

MSR Método de Superfície de Resposta.

NC Comando Numérico.

PCA análise do componente principal.

rpm rotação por minuto.

TRM Taxa de Remoção de Material.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

As condições atuais e futuras do setor industrial forçam as empresas que querem manter-se competitivas a investirem em estudos, pesquisas e novas tecnologias capazes de atender a rigorosas especificações de qualidade e ainda aumentar as taxas de produtividade com custos mínimos [1][2].

Em relação à qualidade, [3] afirma que o nível de rugosidade é importante tanto para a qualidade quanto para a eficiência dos objetos produzidos, Routara et al. [4] complementa que o custo de produção é altamente influenciado pela qualidade do acabamento superficial. Os autores clarificam também que a rugosidade aparente influencia diretamente na estrutura e no desempenho dos componentes que estão a ser produzidos, explicando sobre as atribuições de falhas repentinas à qualidade superficial das peças gerando altos custos às empresas.

Outro fator que, segundo Feng [5], interfere diretamente na qualidade é a amplitude das vibrações geradas durante o processo de maquinagem. Em concordância, Lamraoui et al. [6] diz que por meio da correta escolha dos parâmetros de maquinagem é possível chegar a uma boa qualidade do acabamento das partes mecânicas e, que, a detecção das trepidações e/ou vibrações é parte crucial para a otimização do processo, prolongamento

da vida útil das ferramentas e redução da probabilidade das falhas.

O aumento da taxa produtiva com custo mínimo é de grande importância para as empresas que visam ser líderes do mercado e, para tal, é necessário conhecer a modelagem da função de produção que melhor se adequa ao seu modelo produtivo. Heshmati [7], além de apresentar modelos de medição de produtividade teóricos e empíricos, considerados nesse trabalho, apresenta uma ampla bibliografia que suporta o entendimento e aplicabilidade de métodos para ganhos na taxa de produtividade.

Procurando o aumento produtivo e da qualidade dos produtos as companhias de manufatura tem investido em equipamentos de Comando Numérico Computadorizado (CNC) [8], sistemas nos quais as movimentações são provenientes da leitura de códigos numéricos que entram no sistema, tanto pela inserção humana quanto pela própria leitura do equipamento [9].

Para Sethi [10] a introdução de sistemas computadorizados de produção é a chave para os processos de projeto, gestão e fabricação, dessa forma os sistemas se tornam mais flexíveis, ou seja, a partir de códigos, programações, é possível realizar simulações, testes e acompanhamentos sem a necessidade frequente de intervenções humanas. Browne et al. [11] demonstra que pode-se aplicar modelagens para que o sistema, de maneira autônoma, possa interagir com o meio e obter o resultado esperado da maneira mais eficiente possível.

Como base para ações autônomas por meio de comandos numéricos estão as metodologias e modelagens numéricas que fomentam o desenvolvimento tecnológico, Box e Draper [12] e Myers [13] apresentam uma ferramenta matemática amplamente utilizada na indústria para melhorias dos processos produtivos, denominada Método de Superfície de Resposta (MSR). Para Onwubolu e Kumar [14], MSR pode ser entendida como uma técnica, conjunto de modelagens matemáticas, que procura uma relação de causa e efeito, ou seja, relacionar as variáveis que influenciam o sistema ao resultado obtido dentro do experimento executado.

Estudos como os de Routara et al. [15] e Raju et al. [8] fazem a junção do MSR com outro procedimento matemático, estatístico, para otimização da variável resposta esperada, conhecido como Algoritmo Genético (GA). Os autores demonstram que essa junção

torna-se uma ferramenta poderosa e robusta para otimizar problemas da engenharia pelo método de procura baseado na evolução natural.

Outra abordagem usual para reduzir a quantidade de ensaios e encontrar as melhores características em um processo de fabrico é a utilização do Método de Taguchi, a partir da realização de ensaios com a alterações, de forma sistemática, de alguns parâmetros de maquinagem. Ghani et al. [16] consideraram a utilização do método para a fresagem de um aço temperado. Pang [17] utilizou do método de Taguchi como ferramenta para otimização no processo de fresagem de um compósito híbrido entre epóxi e alumínio.

Dentro do contexto de equipamentos auxiliados por comandos numéricos, Zhang et al. [18] e Moshat et al. [19] abordam a importância da fresagem para o processo de fabricação de peças mecânicas, tendo em vista que o processo produtivo é bastante versátil, possui capacidade de produzir peças geometricamente complexas com boa tolerância dimensional e permitindo bom acabamento superficial.

Segundo Ghani et al. [16] a parte mais importante para a realização de experiências é a correta escolha das variáveis de controlo e parâmetros que serão abordados, devem ser incluídos o maior número de variáveis possíveis, atentando ao fato de ser controlável ou não e, ao grau de interferência da mesma sobre a variável resposta. Em observância aos trabalhos desenvolvidos por Paulo [20] e Dias [21] destaca-se como parâmetros para otimização: velocidade de corte, velocidade de avanço, penetração radial e penetração axial.

1.2 Objetivos

Mediante as literaturas apresentadas e as necessidades atuais do setor mecânico objetivo geral dessa dissertação é a entrega de um software, uma ferramenta computacional de otimização, para auxiliar na tomada de decisão dos parâmetros ótimos no processo de fresagem. Para a construção do software será necessário:

- Estudar e otimizar códigos, previamente desenvolvidos em trabalhos anteriores [20] e [21], para desenvolvimento de uma programação capaz de prever os parâmetros

ótimos para utilização em um processo de fresagem;

- Ampliar e facilitar a utilização da programação otimizada, através do desenvolvimento de uma interface amigável entre a programação e o usuário;
- Transformar as programações desenvolvidas em um software capaz de prever os parâmetros ótimos para utilização em um processo de fresagem com base de dados própria e de execução independente, sem necessidade de licenças e softwares adicionais para sua utilização;
- Validar funcionamento do software pela comparação entre os resultados de ensaios laboratoriais realizados em [20] e o sistema aqui desenvolvido.

1.3 Estrutura da Dissertação

Este trabalho está dividido em seis capítulos, organizados da seguinte forma:

O primeiro capítulo é de carácter introdutório, tem por finalidade fazer o enquadramento da dissertação, referenciar quais os objetivos do trabalho e uma breve descrição sobre a estrutura da dissertação.

O segundo capítulo apresenta a base teórica utilizada para o desenvolvimento do trabalho e embasamento do problema estudado, apresentando uma breve descrição dos principais processos de maquinagem dando foco à fresagem. Uma sucinta explicação sobre a influência dos diferentes parâmetros de maquinagem nas vibrações. E, também, descreve-se sobre os métodos de otimização utilizados ao longo do trabalho: Método de Taguchi e Método de Superfície de Resposta.

O terceiro capítulo traz uma análise detalhada de dois projetos que serviram de base para essa dissertação. Focou-se na descrição completa de todas as escolhas efetuadas no procedimento experimental segundo Taguchi, bem como o procedimento experimental pelo MSR. Faz-se uma análise dos resultados obtidos pelo processo de maquinagem em ambos os métodos de otimização.

O quarto capítulo descreve o fluxo de funcionamento da automatização desenvolvida, descrevendo os critérios e conceitos que foram pertinentes para delimitar a criação da aplicação de otimização. Também detalha-se os pontos que exigem maior atenção para utilização do software desenvolvido.

O quinto capítulo apresenta o resultado da criação do software de otimização em um formato desenvolvido para ser aplicado como um manual de utilizador. Optou-se pela apresentação do funcionamento do software de maneira que o usuário aprendesse como utilizá-lo.

O sexto e último capítulo apresenta as considerações finais, com os pontos mais relevantes do trabalho, e também, sugestões para possíveis trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentos Teóricos

Neste capítulo serão apresentados os conceitos e fundamentos teóricos do processo de maquinagem com ênfase a fresagem. Apresentam-se os principais parâmetros da fresagem, o fator de influência dos parâmetros sobre o processo e de que maneira contribuem para a rugosidade e acabamento superficial. Utilização de comando numérico computadorizado e seus efeitos sobre as vibrações e, também, modelos matemáticos de otimização para o processo de fabrico.

2.1 Processos de Maquinagem

O termo maquinagem refere-se ao processo de remoção mecânica de material de uma peça de trabalho, usualmente sob a forma de aparas, a fim de obter uma peça com dimensões, forma e qualidade desejados. A operação pode ocorrer de forma tradicional por meio de corte ou abrasão, ou então de forma não tradicional, por meio de fontes de energia (elétrica, química) [22].

A maquinabilidade de determinado produto, segundo Homem [23], pode ser definida como a capacidade que o material apresenta para ser fabricado com uma ferramenta de corte, tendo sua forma modificada através do processo de corte por arranque de aparas. Esse processo objetiva a precisão dimensional, geométrica e a qualidade superficial da

peça, que dependerão diretamente do tipo de operação, material a maquirar, máquina-ferramenta, condições de corte, ferramentas e refrigeração da máquina.

A influência das diferentes propriedades dos materiais e de suas aptidões ao corte por arranque de apara podem ser analisadas através dos seguintes indicadores de maquinabilidade [23]:

- Desgaste da ferramenta;
- Qualidade superficial;
- Forças de corte;
- Tipo de apara produzida;
- Volume de apara removida por unidade de tempo;
- Potência de corte;
- Tendência para formação de aresta postiça de corte e,
- Maquinabilidade relativa.

Tratando dos processos de corte destacam-se o torneamento, a fresagem, a furação e a retificação. Estas operações são executadas nas chamadas máquinas-ferramenta, que apresentam características apropriadas a cada uma delas. Atualmente, é utilizado Comando Numérico Computadorizado (CNC) para comandar as máquinas-ferramentas, responsáveis em controlar os drivers dos motores, os meios de comunicação, os sistemas de segurança e o software de apoio ao desenvolvimento do produto [24].

Entretanto, como a maquinagem é um processo muito específico, se torna necessário observar alguns parâmetros como a profundidade e velocidade de corte, o avanço sob a peça, além de ser essencial ter conhecimento do material e dos objetivos pretendidos ao final das operações. Com isso, a elaboração de uma estratégia adaptada à realidade produtiva se torna mais simples, podendo se obter um tempo de ciclo reduzido, e também um custo de produção reduzido [25].

2.2 Comando Numérico Computadorizado

O Comando Numérico (NC), por meio de instruções codificadas em forma de números, letras e símbolos, usualmente representando distâncias, posições, funções ou movimentos, é responsável por operar determinada máquina, desde que a Unidade de Controle da Máquina (MCU) consiga processar. É chamado de Comando Numérico Computadorizado (CNC) quando este controle é efetuado por um computador [26].

Com essa tecnologia é possível armazenar o programa na memória e utilizá-lo diversas vezes, editar e otimizar o programa no próprio controlador da máquina, detectar colisões, criar rotinas standard para furação, que podem ser usados como sub-programas, analisar o desgaste de ferramentas, além de obter informações que podem ser usadas no planeamento do processo [27].

Entre as principais vantagens do CNC pode-se incluir a eliminação do erro do operador, baixo custo de trabalho, aumento do tempo de vida da ferramenta, flexibilidade na alteração dos projetos e desenhos, e também o *scheduling* e organização dos custos [27].

Em relação às linguagens de programação, a maioria das máquinas CNC ainda utiliza a linguagem seguindo a norma ISO 6983-1, de códigos G. Esta programação não é totalmente universal, porque cada máquina tem seus próprios códigos G. Portanto, foi criada a norma ISO 10303-238, a fim de tentar uniformizar a linguagem das máquinas CNC [28].

Na fresagem, as ferramentas que utilizam o CNC têm sido utilizadas para a automação total do processo, porque aumentam a qualidade das peças, melhorando a produtividade e exigindo menos dos operadores [8].

2.3 Fresagem

Com a evolução tecnológica na área das ferramentas e equipamentos, a fresagem tem sido cada vez mais abrangente e exigente, sendo um dos processos mais utilizados na indústria automobilística, aeroespacial e na produção de moldes, devido à capacidade de se atingir uma elevada qualidade de acabamento e à possibilidade de se obter geometrias

diversas [29].

Para tanto, a fresagem é um processo de maquinagem que consiste na retirada do excesso de material existente na peça a ser trabalhada, através da combinação do movimento da rotação da ferramenta fresa e da movimentação da mesa da fresadora, capaz de produzir peças com os mais variados formatos e acabamentos desejados [30].

Os processos de fresagem variam de acordo com as fresadoras, sendo classificados em função da posição do eixo das ferramentas em relação à mesa de trabalho, podem ser cilíndricos ou frontais [30].

A fresadora horizontal caracteriza a fresagem cilíndrica, ou tangencial, possuindo o eixo das ferramentas paralelo à mesa de trabalho do equipamento. Neste caso, o movimento de rotação da fresa pode ser contrário ao movimento de avanço (fresagem discordante) conforme Figura 2.1(a), onde as forças de corte são mais baixas, ou a favor do movimento de avanço (fresagem concordante) Figura 2.1(b), com uma taxa remoção mais elevada (cerca de 20%)[31]. Pode também apresentar uma superfície final ondulada devido a carga ser exercida irregularmente, como mostra a Figura 2.2(a). Já a fresadora vertical, Figura 2.2(b), caracteriza a fresagem frontal, ou de topo, com o eixo das ferramentas perpendicular à mesa da máquina, apresentando uma taxa de remoção maior em relação à fresagem cilíndrica [25][29][30].

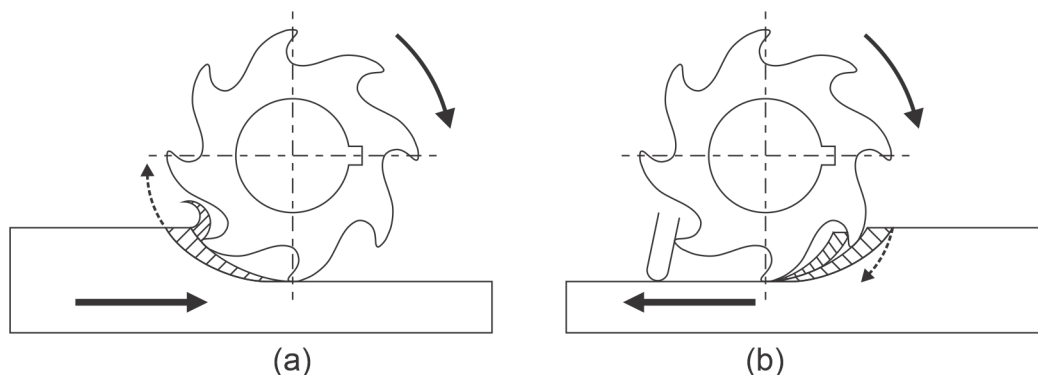


Figura 2.1: Fresagem discordante (a) e fresagem concordante (b) [29].

Além disso, existe a fresadora universal, que apresenta os dois eixos. O horizontal se localiza na mesa da fresadora, enquanto o vertical se localiza no cabeçote da máquina, ou

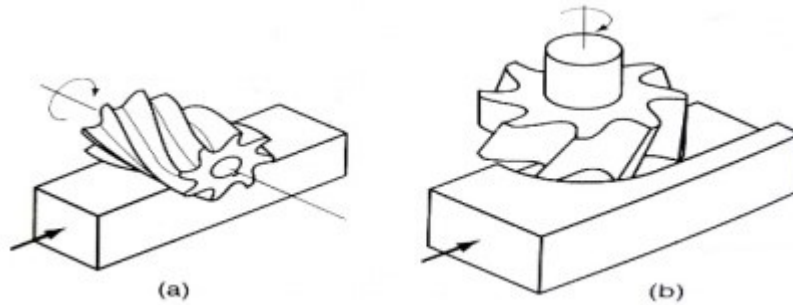


Figura 2.2: Fresagem cilíndrica (a) e fresagem frontal (b) [29].

seja, esse tipo de equipamento apresenta alto nível de flexibilidade produtiva.

Para que os cortes sejam realizados conforme o desejado, é preciso escolher a fresa certa para cada operação. Elas podem ser feitas de vários materiais, incluindo aço rápido (HSS - *High Speed Steel*) ou com revestimento de tungstênio, além de terem diversas finalidades como: as fresas de perfil constante, para abrir canais ou gerar engrenagens, por exemplo; as planas, para rasgos e canais em superfícies planas; as angulares, para perfis em ângulos (rasgos prismáticos); para rasgos de chaveta, ranhuras retas ou em T; para desbaste (maquinagem pesada); ou com dentes postiços (cabecote de fresamento) [30].

2.3.1 Parâmetros de Fresagem

Na Figura 2.3 é possível observar os principais parâmetros do processo de fresagem. Primeiro temos a Velocidade de Corte (V_c), que é a velocidade em que a ferramenta corta a superfície da peça de trabalho e será diferente para diferentes materiais, que pode ser calculada conforme a Equação 2.1 [25]. A variável V_r é dada em rotação por minuto (rpm) e é calculada a partir da velocidade de corte recomendada para determinada operação. Consiste no número de rotações que a fresa faz por minuto, dependendo da capacidade da máquina, do material a maquinar e da ferramenta [32].

$$V_c = \frac{\pi \times D \times V_r}{1000} \quad (2.1)$$

Onde:

- V_c : Velocidade de corte [mm/min];
- D : Diâmetro da fresa [mm] e,
- V_r : Velocidade de rotação [rpm]

A Velocidade de avanço (V_a), calculada por meio da Equação 2.2, trata do deslocamento relativo da ferramenta em relação à peça para uma determinada distância ou para uma rotação, sendo importante para determinar o tempo de corte, a Taxa de Remoção de Material (TRM), entre outros. Com o número total de arestas efetivamente cortantes na ferramenta (Z_c) é possível ter conhecimento do avanço em [mm/min] da fresa, auxiliando na determinação da taxa de remoção da peça [25].

$$V_a = V_r \times Z_c \times fz \quad (2.2)$$

Onde:

- V_a : Velocidade de avanço [mm/min];
- Z_c : Número de dentes (arestas cortantes);
- V_r : Velocidade de rotação [rpm] e,
- fz : Avanço por dente [mm/t].

O penetramento de corte diz respeito à quantidade de material retirado, isto é, a diferença entre a altura da peça por maquinar e a altura da peça maquinada podendo ocorrer nas direções radial ou axial. O penetramento radial (a_p) é a medida perpendicular ao eixo de rotação da ferramenta. Para a fresagem, é medido sobre o diâmetro da ferramenta sendo no máximo igual a este valor. Já o penetramento axial (a_e) é medido paralelamente ao eixo de rotação da ferramenta [25].

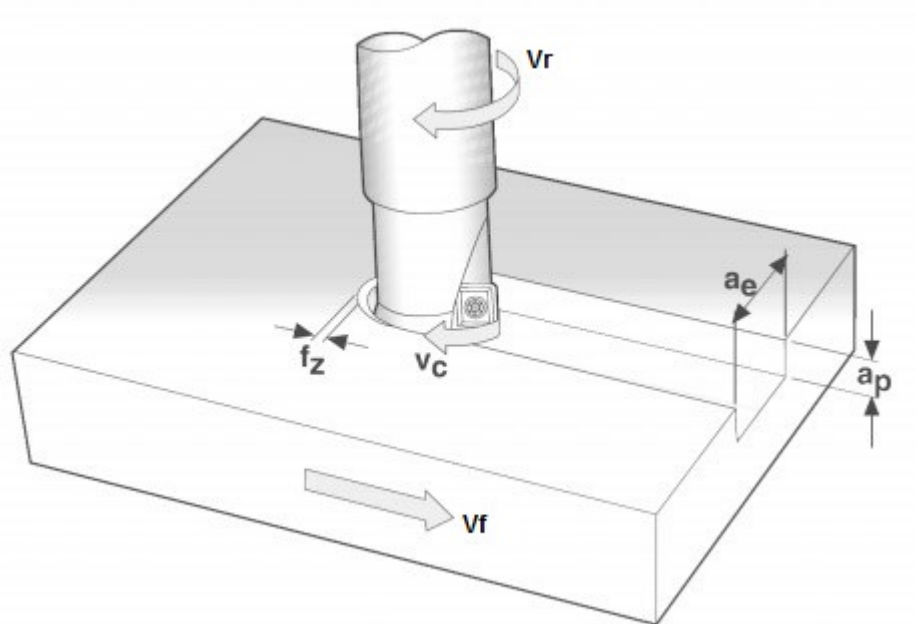


Figura 2.3: Parâmetros de corte [33].

Uma maneira para a escolha da estratégia do processo é entender a interação entre os três parâmetros de corte, uma vez que o tempo de vida útil da ferramenta é mais afetado pela velocidade de corte, seguida pelo avanço e então pela profundidade de corte [29]. Com isso, se cria a sequência:

1. Determinar a profundidade máxima de corte, de acordo com a maquinagem;
2. Determinar a velocidade de avanço, dependendo dos requisitos de acabamento e rigidez da ferramenta, peça a maquinar e máquina-ferramenta;
3. Determinar a velocidade de corte.

2.3.2 Rugosidade

A rugosidade superficial pode ser entendida como uma constituição de erros microgeométricos, irregularidades finas, resultantes do processo de corte. É intrínseco ao processo de maquinagem, em seus diversos tipos de operações, que durante o processo de avanço

sobre a peça e a formação de arestas postiças acabem por causar marcas, ranhuras, irregularidades sobre a superfície do material que está a ser maquinado [34].

O método escolhido para o processo de fabrico interfere na funcionalidade, aparência e características gerais da peça acabada, aliado com os parâmetro da escolha da máquina-ferramenta, geometria do material e da ferramenta, material a maquinar são parâmetros que diretamente afetam a qualidade da superfície, ou seja, esses fatores contribuem para a qualidade do acabamento superficial com maiores ou menores níveis de rugosidade [35].

O critério de rugosidade é um dos parâmetros para as análises de performance da maquinagem, uma vez que essa irregularidade pode formar pontos suscetíveis às quebras ou corrosões. As diversas combinações dos parâmetros de fresagem geram uma rugosidade na superfície maquinada, além do desgaste na ferramenta de corte. Entretanto, é difícil e dispendioso controlar o processo para evitar as rugosidades, e definir a melhor combinação que apresente um valor inferior de rugosidade superficial e um ciclo de vida maior da ferramenta de corte [36].

Para controlo da rugosidade pode ser utilizado o parâmetro da Rugosidade média (R_a) em que sua unidade de medida é expressa no Sistema Internacional como micrômetro (μm). Geralmente utiliza-se a R_a nos casos em que o acabamento das superfícies apresentam pequenas saliências, como nos casos do torneamento e fresagem e, também, nas linhas de produção quando é necessário o controlo contínuo da rugosidade [37].

Matematicamente, a rugosidade média é descrita pela Equação 2.3 :

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (2.3)$$

Onde:

- y_i : Desvio do perfil de rugosidade e,
- n : Quantidade de desvios.

A Norma ISO 1302:2002 define duas formas de representar a rugosidade:

1. A apresentação do valor nominal da medida seguido pela unidade no Sistema Internacional, micrómetro (μm);
2. Através da classificação entre níveis de rugosidade que variam de N1 a N12 conforme Tabela 2.1 em que a R_a pode variar entre 0,025 e 50 μm [37].

De 1978 a 2001 a ISO 1302 apenas contemplava a segunda forma, supracitada, para classificação dos níveis de rugosidade. Porém, devido aos avanços tecnológicos, que permitem alcançar diversos valores de rugosidade, em 2002, foi atualizada para apresentação do valor nominal da medida seguido pela unidade no Sistema Internacional, micrómetro (μm).

Tabela 2.1: Classe de rugosidade [37]

Classe de Rugosidade	Valor de R_a [μm]
N12	50
N11	25
N10	12,5
N9	6,3
N8	3,2
N7	1,6
N6	0,8
N5	0,4
N4	0,2
N3	0,1
N2	0,05
N1	0,025

2.4 Vibrações na Fresagem

As vibrações entre peça e ferramenta ocorrem, frequentemente, na maquinagem dos materiais. A máxima amplitude tolerável das vibrações num processo depende da sua aplicação, podendo ser consideradas as operações de desbaste, onde o efeito das vibrações é determinado pela vida da ferramenta, no caso de um equipamento com alto desgaste e/ou muito antigo, e as operações de acabamento, onde o nível máximo das vibrações variam com os parâmetros da qualidade da superfície e precisão dimensional [38].

Na maquinagem interna é possível decompor as forças de corte em Força de corte tangencial (F_t), Força de corte radial (F_r) e Força de corte axial (F_a), como mostra a Figura 2.4. Enquanto a força tangencial reage flexionando a ferramenta para baixo, reduzindo o ângulo de folga da mesma e o ângulo de folga da pastilha, a força radial é a flexão da ferramenta para o centro da peça. As flexões radial e axial na ferramenta implicam uma profundidade de corte reduzida, podendo induzir vibrações [30].

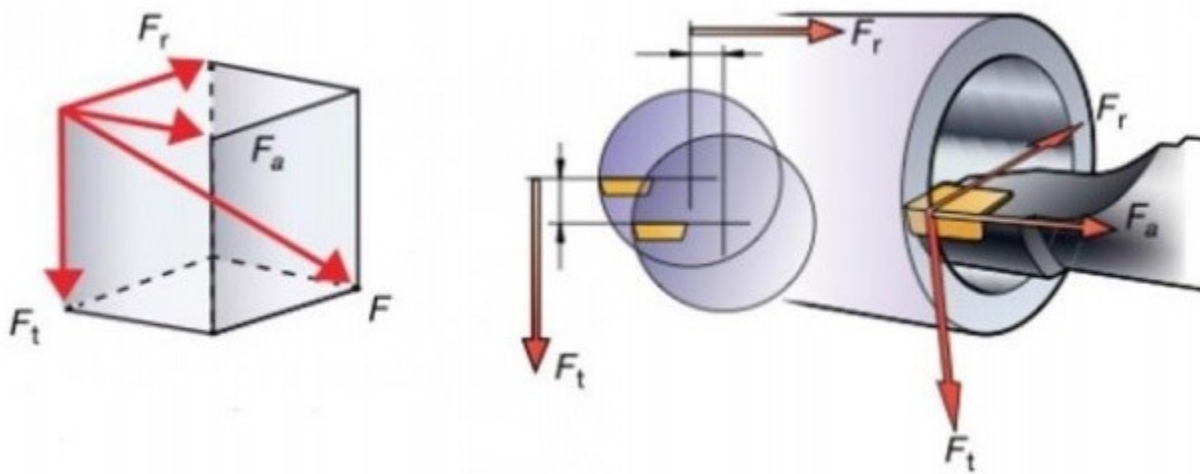


Figura 2.4: Forças na maquinagem [30].

A medição convencional das vibrações das máquina-ferramentas usualmente utiliza sensores de contato como acelerômetros, sensores piezoelétricos e sensores de radiação. Recentemente, vibrômetros Doppler a laser têm sido utilizados como sensores de não-contato para medir a vibração de ferramentas de corte giratórias [39].

Um processo estável se associa relativamente à boa qualidade da superfície e o desgaste reduzido da ferramenta, enquanto que um processo instável se caracteriza por um acabamento de superfície deteriorado e por desgastes da ferramenta [40]. Para isso, é necessário escolher a ferramenta anti vibratória e estratégia correta. Para a maquinagem externa, essa ferramenta deve ser capaz de suportar as forças e tensões do processo, além da vibração não poder ser influenciada pelo tamanho da peça. Em relação à maquinagem interna, a ferramenta é mais específica devido ao diâmetro e comprimento do furo da peça, podendo tornar frágil o corpo da mesma caso a combinação escolhida para esses

parâmetros seja equivocada [41].

2.4.1 Origem das Vibrações

A origem da vibração nos processos de fabrico podem ser classificadas basicamente por: 1) Vibrações externas à máquina-ferramenta, 2) Vibrações geradas pela própria maquinagem, 3) Vibrações por falta de homogeneidade da peça, 4) Vibrações por corte interrompido e 5) Vibrações geradas pela máquina-ferramenta. A combinação entre as origens das vibrações é que exerce influencia sobre o resultado final da peça [42][43].

1. **Vibrações externas à máquina-ferramenta:** Normalmente são geradas por outras máquinas e transmitidas pelo solo e pelas suas fundações, apresentando um largo espectro de frequência, influenciando negativamente nos resultados do processo pois a frequência natural da máquina-ferramenta se encontra dentro dessa frequência [42];
2. **Vibrações geradas pela própria maquinagem:** Vibrações regenerativas ou autoexcitadas, geradas por forças resultantes durante o corte da peça pela máquina-ferramenta [42];
3. **Vibrações por falta de homogeneidade da peça:** Ocorre devido às regiões de diferentes durezas na peça que geram pequenos impactos sobre a ferramenta, provocando vibrações de maior amplitude quando não são amortecidas, podendo prejudicar o processo [42];
4. **Vibrações por corte interrompido:** Quando a maquinagem se dá por corte interrompido, gerando impactos consideráveis podendo levar a níveis indesejados de vibrações. Essas vibrações, na fresagem, são excitadas pela componente periódica da força de acordo com a frequência da passagem dos dentes [42] e,
5. **Vibrações geradas pela máquina-ferramenta:** Esse tipo de vibração surge em acionamentos de componentes que apresentam movimento rotativo e em acionamentos de componentes com movimento de translação, podendo ser do tipo livre ou

forçada [42].

2.4.2 Influencia dos Parâmetros de Corte para a Estabilidade

É possível caracterizar cada uma das propriedades e efeitos que cada um dos parâmetros impõem sobre os resultados, porém, entende-se que o melhor resultado pode vir pela combinação ótima entre eles [44], [45]. Entre os mais usados e estudados pela indústria têm-se:

- **Profundidade de corte axial:** Representa o ganho no processo de autoexcitação das vibrações, ou seja, a retroalimentação observada pela variação da força gerada se torna proporcional à profundidade de corte axial caso ocorram variações na espessura das aparas devido as vibrações. Quando essa profundidade é pequena, o processo é estável [40];
- **Profundidade de corte radial:** Para certa condição de avanço e velocidade de corte, o produto entre as profundidades radial e axial determina uma taxa de remoção de material limite constante, pois nos processos de fresagem, usualmente os efeitos para essas profundidades são similares [40];
- **Velocidade de corte:** Afeta a estabilidade através do processo de amortecimento, que ocorre em velocidades de corte muito baixas (< 25 m/min), proporcionando maior estabilidade, e também através das velocidades de corte mais elevadas, por causa da diferença de fase entre as ondulações de cortes subsequentes [46];
- **Avanço:** Esse efeito normalmente não é muito forte e se relaciona ao efeito sobre a pressão específica de corte. Para avanços pequenos e processos com aparas de pequena espessura, as profundidades de corte são menores e mais capazes de gerar vibrações, e o contrário também é observado, ou seja, com o aumento do avanço as vibrações aumentam [46] e,
- **Número de dentes da fresa:** A probabilidade de aumentar as vibrações regenerativas aumenta conforme o número de dentes maquinando, causada pelo efeito

acumulativo da diferença de fase entre as ondulações de cortes subsequentes [46].

2.5 Método de Taguchi

Genichi Taguchi (1924 - 2012) criou uma metodologia, baseada em análises estatísticas, que considera múltiplos fatores em uma só análise, o engenheiro e também estatístico, nascido em Tokamachi no Japão, foi o responsável pela criação da metodologia de experimentação que pode ser combinada com outras ferramentas estatísticas. Como por exemplo: A análise de variância (ANOVA) [36], a análise do componente principal (PCA) ou ainda análise relativa de Grey [47], se tornando uma ferramenta muito poderosa na otimização dos parâmetros de maquinagem, a qual ficou conhecida por Método de Taguchi.

Por volta de 1950 pode-se dizer que a engenharia de qualidade passou por uma evolução muito significativa, em face das necessidades evolutivas e tecnológicas da 2ª Guerra Mundial, o setor de produção necessitou passar por melhorias. O principal exemplo pelo qual Taguchi se destaca, trata-se do caso em que as forças aliadas determinaram que a qualidade dos telefones japoneses era inferior ao necessário para os projetos pretendidos e criaram um centro de investigação em que tinham como responsável de produção e qualidade Dr. Taguchi. Genichi observava que havia muito investimento da realização das experiências, mas pouco era feito para a melhoria sistêmica dos ensaios. Sendo assim focou-se em desenvolver novos métodos de otimização dos processos de engenharia de experiências [48].

A técnica de *design* de experiências (DOE), tem sido muito utilizada para estudar diversos fatores de operação e suas interações, solucionando os problemas com análises estatísticas [49], otimizando a qualidade e produção dos materiais sem alterar o tempo e o custo do experimento [50].

Por meio de um conjunto de matrizes compostas por colunas ortogonais, o método propõe a execução de apenas uma fração do número total de combinações das variáveis que entram na análise, fazendo com que o arranjo seja insensível às variações no ambiente

e outros efeitos de ruído. Por isso, o próprio Taguchi caracterizou a técnica de *off-line quality control*, devido a variância elevada da qualidade das frações testadas [51].

Conceitualmente, para Taguchi, as perdas que podem ocorrer durante o ciclo de vida de um produto estão intimamente relacionado com a qualidade que o produto possui. Elementos de qualidade elevada tendem a gerar menos perdas para a sociedade. O critério de perda pode ser mensurado em diversos parâmetros, como por exemplo, tempo do ciclo de vida, oxidação, ruído entre outros. Deve-se ter em mente que a qualidade do produto está relacionada com os valores atribuídos pelos consumidores, sendo assim, produtos que apresentem resultados abaixo do esperado pelos que o consumirão tendem a trazer grandes perdas para a sociedade e para a indústria [52].

2.5.1 Função Perda da Qualidade

Trata-se de uma fórmula matemática para quantificar a economia da aplicação do DOE, com a conseqüente redução da variação. Quando o custo da qualidade não é atingido, é necessário observar o todo, pois podem existir outros custos além da fabricação, como na manutenção, suspensão do funcionamento e perda de negócios no decorrer de seu ciclo de vida [53]. A função perda se dá de acordo com a qualidade desejada [54]:

- **Nominal é melhor:** Quando o valor nominal das características funcionais é o mais desejado pelo consumidor, Equação 2.4. Por exemplo, dimensão, pressão, viscosidade, cor de um produto, força e a composição química de um material.

$$L(y)_{LeM} = k(y_i - y_0)^2 \quad (2.4)$$

- **Menor é melhor:** Quando as características funcionais alegam o valor zero como o mais desejado pelo consumidor, Equação 2.5. Por exemplo, vibração, nível de impureza, desgaste, deterioração, consumo de combustível e tempo de espera.

$$L(y)_{neM} = k \times y_i^2 \quad (2.5)$$

- **Maior é melhor:** Quanto maiores as características funcionais, maior é o desejo do consumidor, Equação 2.6. Por exemplo, resistência mecânica, aderência de adesivos, vida útil e rendimento de combustíveis.

$$L(y)_{MeM} = k \left(\frac{1}{y_i^2} \right) \quad (2.6)$$

Onde:

- k : Constante de custo;
- y_i : Característica mensurável do produto ou processo em nível i e,
- y_0 : Característica nominal do produto ou do processo.

Para determinar k é necessário levar em consideração as características de desempenho do produto ou de variação do processo, porque a taxa de aumento da perda varia com a relevância financeira do tipo de qualidade considerada [55]. A Equação 2.7 mostra essa relação:

$$k = \frac{A_0}{\Delta_0^2} \quad (2.7)$$

Onde:

- A_0 : Perda para o consumidor e,
- Δ_0^2 : Tolerância funcional.

A perda para o consumidor é a perda média originada quando a tolerância funcional é excedida pelo desvio da característica, caracterizando o custo médio que o consumidor tem para substituir ou consertar o produto, considerando sua insatisfação. A tolerância funcional é o valor máximo admissível de desvio do valor objetivo de uma característica devido ao mal funcionamento de um produto médio, considerando o ponto de vista de um consumidor médio [56].

2.5.2 Relação Sinal-Ruído

Essa razão entre o sinal e o ruído trata-se de uma função logarítmica que objetiva otimizar o processo ou projeto do produto, reduzindo sua variação. A técnica permite reduzir o ruído, pois ele causa variabilidade no produto. Ele pode ser classificado em externo (ar, temperatura, poeira), interno (fricção, desgaste de peças) ou de unidade a unidade (variações na máquina, erro de medição). Pode ser classificado em três tipos de relação *signal-to-noise* (S/N) [57]:

- **Nominal é melhor:** o processo será melhor quanto mais próximo estiver do exigido, Equação 2.8. A relação S/N_t é utilizada para reduzir a variabilidade de um alvo específico.

$$S/N_t = 10 \times \log \left(\frac{\bar{y}^2}{s_y^2} \right) \quad (2.8)$$

- **Menor é melhor:** O processo será melhor quanto menor for o exigido para o valor resposta, Equação 2.9. A relação S/N_L é utilizada caso o sistema seja otimizado procurando a maior resposta possível.

$$S/N_L = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (2.9)$$

- **Maior é melhor:** o processo será melhor quanto maior for o exigido para o valor resposta, Equação 2.10. A relação S/N_S é utilizada caso o sistema seja otimizado procurando a menor resposta possível.

$$S/N_S = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2.10)$$

Onde:

- \bar{y} : Média dos dados;
- s_y^2 : Variância de y ;

- n : Número de observações e,
- y : Dados observados.

2.5.3 Arranjo Ortogonal de Taguchi

O método Taguchi é uma ferramenta poderosa para a otimização do planejamento de experiências, diminui os custos de amostragens e torna mais rápida a determinação da combinação entre fatores que afetam o comportamento da variável resposta [58].

A metodologia propõe uma matriz que melhor se adeque as experiências de acordo com a quantidade de parâmetros e o número de variações que cada parâmetro pode receber. A Tabela 2.2 apresenta como orientar-se para a escolha da matriz ortogonal que mais se adequa ao ensaio pretendido:

Tabela 2.2: Tabela de Taguchi para seleção da matriz ortogonal

Nº Parâmetros	Número de Níveis		
	2	3	4
2	L4	L4	L8
3	L9	L9	L9
4	L16	L32	L16

Esse *design* de experiências permite, de maneira mais simples, estudar o comportamento dos materiais segundo as variáveis que possui. Inicialmente, é necessário definir quais as variáveis que influenciam no resultado do estudo. Essas variáveis, também chamadas de parâmetros, são definidas pelo utilizador e variam de acordo com o processo investigado. Cada um dos parâmetros pode transitar entre limites previamente definidos, normalmente máximos e mínimos, que são chamados de níveis. O modelo propõe, por exemplo, que se o estudo contempla a análise de 3 parâmetros, que podem variar entre 4 níveis, pela Tabela 2.2, através do cruzamento entre as linhas com a quantidade de parâmetros e as colunas com a quantidade de níveis, entende-se que deve ser realizados 9 ensaios.

2.6 Método de Superfície de Resposta

O Método de Superfícies de Resposta (MSR) apresenta alta eficiência, possibilita modelagens e análises dos processos desenvolvidos. Isso se deve ao fato de o método se caracterizar por um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas de planejamento de processos, experiências e métodos de otimização, baseando-se no ajuste de dados variáveis e desconhecidos, a fim de obter uma resposta de valor ótimo. Ou seja, quantifica e interpreta a interação entre as respostas e os efeitos dos fatores [28][58].

Para a análise dessa técnica, inicialmente é necessário projetar uma série de experiências capazes de medir, de forma adequada e correta, a resposta verdadeira. Em seguida, determina-se o modelo matemático que melhor se ajusta aos dados, para determinar a série de valores ótimos para a resposta. Por fim, entre os melhores parâmetros, representa-se os efeitos diretos e interativos das variáveis em gráficos bi e tridimensionais [36].

É possível representar as equações geradas pelas respostas de superfícies através da descrição de como as variáveis influenciam as respostas, determinando suas inter-relações e observando os efeitos combinados sobre as respostas [49].

Para utilizar o MSR deve-se encontrar uma aproximação, o mais verossímil possível, para o relacionamento entre os fatores (parâmetros) e a variável de resposta (y). Geralmente utiliza-se a regressão polinomial de baixo grau em alguma região das variáveis independentes. A forma geral para o modelo de primeira ordem em x variáveis de entrada pode ser representada pela Equação 2.11 [59].

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_kx_k + \epsilon \quad (2.11)$$

Onde:

- y : Resposta de interesse;
- x : Variáveis independentes;
- β : Coeficiente a ser estimado;

- k : Número de variáveis independentes e,
- ϵ : Erro experimental.

Na falta de conhecimento suficiente acerca da forma verdadeira da resposta da superfície, geralmente tenta-se a aproximação pelo modelo de primeira ordem. Quando o modelo de primeira ordem apresenta falta de ajuste para a superfície, incorpora-se termos de ordem superior conforme pode-se ver na Equação 2.12.

$$y = -\beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (2.12)$$

Inicialmente, uma regressão múltipla estabelece a relação entre o objetivo e os fatores identificados como relevantes. Validados os pressupostos de aplicação do modelo e a linearidade do processo, pode-se seguir no sentido da resposta de superfície, que presumivelmente, contém o valor ótimo sendo ele máximo ou mínimo. Para uma regressão múltipla estabelecida, na relação objetivo e fatores identificados, procura-se o máximo incremento na resposta pelo método da máxima inclinação ascendente, ou pelo método da máxima inclinação descendente, caso o objetivo seja encontrar o mínimo [59].

Após chegar em uma solução da superfície pode-se ajustar um novo modelo de primeira ordem, realizar experiências adicionais ou ajustar um novo polinômio de segunda ordem para obter uma estimativa mais precisa do valor ótimo. A metodologia de superfície de resposta é um processo sequencial cujo algoritmo descreve-se através de um caso prático industrial.

Graficamente, o MSR pode ser representado conforme Figura 2.5. Para ajudar a visualizar a forma de uma superfície de resposta, muitas vezes traçam-se os contornos da superfície de resposta [60].

Para trabalhar com o MSR deve-se saber que, geralmente, o verdadeiro relacionamento funcional entre a resposta e o conjunto de variáveis independentes é desconhecido [61]. Sendo assim, para modelar um problema pelo MSR é usual que sejam definidas pelo menos duas etapas diferentes para encontrar a solução do problema global:

- A primeira etapa consiste em determinar qual função melhor se aproxima do resultado esperado, ou seja, escolher a função que apresenta menor erro e, consequentemente, encontrar o valor ótimo através da minimização (Equação 2.13) das funções propostas, sejam elas de primeira ordem (Equação 2.11) ou de ordem superior (Equação 2.12).

$$\min_x \sum_{i=1}^k (r - y)^2 \quad (2.13)$$

Onde:

– r : Valor real do ensaio.

- A segunda etapa do problema é a determinação dos valores ótimos para os parâmetros da função y conforme Equação 2.14.

$$\min(y) \quad (2.14)$$

O Método de Superfície de Resposta é enquadrada nos delineamentos experimentais, onde se revela um método importante na concepção, formulação, desenvolvimento e análise de produtos científicos, um método igualmente eficaz na melhoria de estudos e produtos

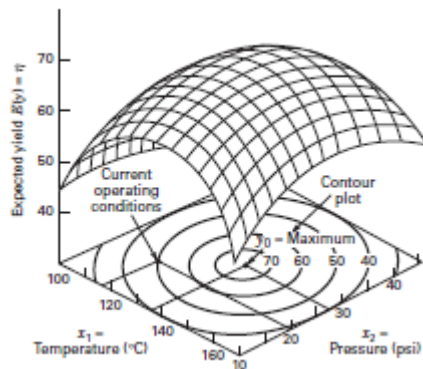


Figura 2.5: Gráfico de contornos e de superfície de resposta[60].

já existentes, sendo usada em muitos setores industriais, onde há espaço para o desenvolvimento e otimização de processos de fabrico, mesmo no sector primário onde ocorrem experiências agrícolas e na indústria extrativa onde se procura a racionalização dos processos [60].

2.7 Algoritmo Genético

Algoritmos Genético (GA) são algoritmos matemáticos inspirados na genética e no princípio Darwiniano da evolução das espécies. Baseados na seleção natural e seleção genética, fornecem um mecanismo de procura paralela e adaptativa. Eles são considerados uma classe particular dos Algoritmos Evolucionários (EA), que utilizam técnicas como herança, mutação, seleção e crossover [62].

As análises se iniciam com uma população de soluções, cada uma representada por um cromossomo. A cada geração, a aptidão dos cromossomos é avaliada, selecionando-se os mais aptos para seguir, sofrendo crossovers e mutações. Os cromossomos com mais descendentes apresentam maiores chances de perpetuar seus códigos genéticos nas próximas gerações, além disso, os novos cromossomos serão mais aptos que os da antiga geração. Esse processo de evolução continua até que uma condição ótima seja alcançada [62].

Essa técnica é utilizada na computação para encontrar soluções de otimização ou problemas, de forma exata ou aproximada, sendo utilizada de forma crescente em áreas como a modelagem de sistemas envolvendo aleatoriedade. No processo de fresagem, esses algoritmos foram desenvolvidos a fim de otimizar os parâmetros de corte, minimizando o tempo e maximizando o tempo de vida das ferramentas para um ótimo trabalho [63].

2.8 Otimização na Maquinagem

Em termos gerais, a utilização do MSR parte da interpretação do problema, definição sucinta do que se objetiva e identificação dos fatores que devem influenciar o problema.

Em trabalhos anteriores [20] e [21], para modelar o problema de otimização do processo de maquinagem os autores utilizaram da técnica disposta na Secção 2.6, ou seja, definiram duas etapas diferentes para encontrar a solução geral. Nesta abordagem foram considerados os seguintes parâmetros de análise da otimização: Velocidade de corte (Vc), velocidade de avanço (Va), penetração axial (a_e) e penetração radial (a_p) representados por z_1 , z_2 , z_3 e z_4 respetivamente. A primeira etapa tem como objetivo a identificação da melhor função, e conseqüentemente estimar os coeficientes ótimos do modelo. Na segunda etapa do problema determinaram os valores ótimos para os parâmetros z através da fixação da variável x e resolução do módulo da função encontrada na primeira etapa.

Em [20], por exemplo, com o objetivo de determinar qual a função apresentaria o menor erro e demonstrar melhor modelação para a otimização na fresagem, foram realizados ensaios de 8 funções que servem como base para este trabalho:

- $f_1(x, z) = x_1z_1 + x_2z_2 + x_3z_3 + x_4z_4 + x_5$
- $f_2(x, z) = x_1z_1^2 + x_2z_2^2 + x_3z_3^2 + x_4z_4^2 + x_5z_1z_2 + x_6z_1z_3 + x_7z_1z_4 + x_8z_2z_3 + x_9z_2z_4 + x_{10}z_3z_4 + x_{11}z_1 + x_{12}z_2 + x_{13}z_3 + x_{14}z_4 + x_{15}$
- $f_3(x, z) = x_1z_1^2 + x_2z_2^2 + x_3z_3^2 + x_4z_4^2 + x_5z_1 + x_6z_2 + x_7z_3 + x_8z_4 + x_9$
- $f_4(x, z) = x_1z_1^3 + x_2z_2^3 + x_3z_3^3 + x_4z_4^3 + x_5z_1^2 + x_6z_2^2 + x_7z_3^2 + x_8z_4^2 + x_9z_1z_2 + x_{10}z_1z_3 + x_{11}z_1z_4 + x_{12}z_2z_3 + x_{13}z_2z_4 + x_{14}z_3z_4 + x_{15}z_1 + x_{16}z_2 + x_{17}z_3 + x_{18}z_4 + x_{19}$
- $f_5(x, z) = x_1z_1^3 + x_2z_2^3 + x_3z_3^3 + x_4z_4^3 + x_5z_1^2 + x_6z_2^2 + x_7z_3^2 + x_8z_4^2 + x_9z_1^2z_2 + x_{10}z_1^2z_3 + x_{11}z_1^2z_4 + x_{12}z_2^2z_3 + x_{13}z_2^2z_4 + x_{14}z_3^2z_4 + x_{15}z_1z_2 + x_{16}z_1z_3 + x_{17}z_1z_4 + x_{18}z_2z_3 + x_{19}z_2z_4 + x_{20}z_3z_4 + x_{21}z_1 + x_{22}z_2 + x_{23}z_3 + x_{24}z_4 + x_{25}$
- $f_6(x, z) = x_1z_1^3 + x_2z_2^3 + x_3z_3^3 + x_4z_4^3 + x_5z_1^2 + x_6z_2^2 + x_7z_3^2 + x_8z_4^2 + x_9z_1^2z_2 + x_{10}z_1^2z_3 + x_{11}z_1^2z_4 + x_{12}z_2^2z_3 + x_{13}z_2^2z_4 + x_{14}z_3^2z_4 + x_{15}z_1 + x_{16}z_2 + x_{17}z_3 + x_{18}z_4 + x_{19}$
- $f_7(x, z) = x_1z_1^3 + x_2z_2^3 + x_3z_3^3 + x_4z_4^3 + x_5z_1^2 + x_6z_2^2 + x_7z_3^2 + x_8z_4^2 + x_9z_1 + x_{10}z_2 + x_{11}z_3 + x_{12}z_4 + x_{13}$

- $f_8(x, z) = x_1 z_1^3 + x_2 z_2^3 + x_3 z_3^3 + x_4 z_4^3 + x_5 z_1 + x_6 z_2 + x_7 z_3 + x_8 z_4 + x_9$

A variável x , que representa os coeficientes do modelo, irá variar entre cinco e vinte e cinco elementos, na qual o mínimo irá depender da função em estudo, a qual representa o ajuste da função aos dados em estudo.

Fixados os parâmetros de z_1 a z_4 é possível encontrar os valores de x e a função associada através da resolução da Equação 2.15 e, assim sendo, solucionar o problema 1.

$$\min_x \sum_{i=1}^k (M_i - f_j(x, z_i))^2 \quad (2.15)$$

Onde:

- z_i : Parâmetro que influencia diretamente no problema;
- x : Carga do componente variável z_i e,
- M_i : Medida.

O conceito de medida (M_i) pode ser entendido como o registro de um valor real obtido nos ensaios. A medida deve ser um parâmetro com valor único, por exemplo, nos casos em que se estuda a qualidade do acabamento superficial utiliza-se a rugosidade média como medida. Nos casos em que haja a análise de mais de uma resposta, como por exemplo investigações vibratórias tridimensionais é importante que a medida seja um valor calculado a partir da interação entre os eixos e resulte em um valor único.

As medidas que demonstraram-se pertinentes ao processo e que farão parte da solução proposta nessa dissertação são:

$$M_1 = \min(RMS_y, RMS_z) \quad (2.16)$$

$$M_2 = \sqrt{(RMS_y)^2 + (RMS_z)^2} \quad (2.17)$$

$$M_3 = |RMS_y| + |RMS_z| \quad (2.18)$$

$$M_4 = \max(RMS_y, RMS_z) \quad (2.19)$$

Para dar continuidade à otimização é necessário encontrar a solução do problema 2, ou seja, encontrar os valores ótimos para a variável de interesse através da Equação 2.20.

$$y = \min |f_j(x, z_i)| \quad (2.20)$$

Capítulo 3

Design de Experiências

Este capítulo apresenta uma descrição detalhada dos estudos realizados previamente, nos quais, foram utilizados o MSR, bem como, as ferramentas utilizadas nas soluções para os quais essa dissertação pretende implementar melhorias.

3.1 Estudo de Caso para Rugosidade

Dias, em [21], partiu do pressuposto de que a qualidade da rugosidade da superfície é uma das características mais importantes nos processos de maquinagem para inferir de que forma e, qual o fator de influência dos principais parâmetros da fresagem sobre os resultados da rugosidade sobre a superfície maquinada.

3.1.1 Método de Taguchi para Rugosidade

Com o objetivo de determinar os valores dos parâmetros que minimizam a rugosidade da superfície pelo método de Taguchi [21] utilizou-se da velocidade de corte (V_c), velocidade de avanço (V_a), penetração radial (a_p) e penetração axial (a_e). Os valores dos parâmetros de maquinagem utilizados nos ensaios foram definidos pelo fabricante, Palbit® [64] que recomenda para a penetração radial (a_p) um intervalo compreendido entre 1-2 [mm], penetração axial (a_e) 0,10-0,35 [mm], velocidade de corte (V_c) 200-300

[mm/min] e velocidade de avanço (V_a) 0,10-0,30 [mm/t] [64]. A Tabela 3.1 apresenta os valores recomendados pela fabricante das pastilhas no Sistema Internacional [65].

Tabela 3.1: Valores dos parâmetros de fresagem

Parâmetros	Limite Inferior	Limite Superior
Velocidade de Corte (V_c) [rpm]	2546	3820
Velocidade de Avanço (V_a) [mm/min]	1018	4584
Penetração Axial (a_e) [mm]	0,1	0,35
Penetração Radial (a_p) [mm]	1,0	2,0

Segundo o Método de Taguchi e, em observância a Tabela 2.2, o modelo da matriz que mais se adequou ao estudo foi o L16, ou seja, foi necessária realização de 16 experiências, pois têm-se a definição de 4 parâmetros com 2 níveis diferentes.

Com base nos valores da Tabela 3.1 foram realizados os 16 ensaios para verificar qual a combinação de parâmetros que proporcionavam um melhor acabamento superficial e, buscou-se observar qual disposição apresentaria como resultado um menor valor de rugosidade aparente. A Tabela 3.2 demonstra a matriz que melhor se adequou ao estudo.

Tabela 3.2: Matriz L16 de Taguchi com os valores nas unidades SI

Número de Ensaio	Velocidade de Corte [rpm]	Velocidade de Avanço [mm/min]	Penetração Axial[mm]	Penetração Radial[mm]
1	2546	1018,4	0,1	1
2	2546	1018,4	0,1	2
3	2546	1018,4	0,35	1
4	2546	1018,4	0,35	2
5	2546	4584	0,1	1
6	2546	4584	0,1	2
7	2546	4584	0,35	1
8	2546	4584	0,35	2
9	3820	1018,4	0,1	1
10	3820	1018,4	0,1	2
11	3820	1018,4	0,35	1
12	3820	1018,4	0,35	2
13	3820	4584	0,1	1
14	3820	4584	0,1	2
15	3820	4584	0,35	1
16	3820	4584	0,35	2

Os ensaios foram realizados na fresadora CNC Deckel Maho DMC 63V, as pastilhas utilizadas para a fresa foram WNHU 04T310, fabricadas pela Palbit® com um bloco de aço (GMTC 1.2738) com dureza de 45 Rockell C, 219mm de diâmetro e 40mm de

altura. Com intuito de melhorar, normalizar variações, a rugosidade foi verificada em três pontos diferentes (P1,P2 e P3), espaçados a 120°, uns dos outros. Na Tabela 3.3 podemos verificar o valor resposta da rugosidade em cada um dos pontos medidos e ainda a média dos 3 pontos em relação aos parâmetros de entrada.

Tabela 3.3: Resultados da rugosidade nos ensaios pelo método de Taguchi

Número de Ensaio	P1[μm]	P2[μm]	P3[μm]	Rugosidade Média[μm]
1	1,05	1,13	1	1,06
2	1,26	1,59	1,99	1,61
3	4,06	3,56	3,9	3,84
4	4,45	3,73	4,03	4,07
5	1,49	1,29	1,13	1,3
6	2,61	2,27	2,2	2,36
7	4,11	3,67	3,23	3,67
8	3,13	2,57	2,2	2,63
9	1,25	1,26	1,27	1,26
10	3,65	3,3	4,21	3,72
11	2,86	2,01	2,75	2,54
12	1,08	0,91	1,18	1,05
13	1,07	1,16	1,08	1,1
14	1,3	1,46	1,21	1,32
15	3	2,91	3,2	3,04
16	2,21	1,62	2,2	2,01

De acordo com [21] e pela Tabela 3.2 verifica-se que os melhores resultados, em termos de menores valores de rugosidade foram obtidos nas experiências 12, 01 e 13 com valores de 1,05 [μm], 1,06 [μm] e 1,10 [μm] respectivamente. Os ensaios 1 e 12 distinguem-se apenas no valor da penetração e velocidade de avanço, enquanto o ensaio 13 comparado com o ensaio 1 e 12 apenas tem a penetração radial como igual parâmetro.

Em concordância com os resultados obtidos para a rugosidade a razão Sinal-Ruído utilizada foi a maior melhor descrita pela Equação 2.10 e que procura a menor resposta possível. O melhor resultado foi obtido no ensaio 1, seguido do ensaio 12 com valores de -0,517 e -0,527dB.

3.1.2 Método de Superfície de Resposta para Rugosidade

Dos métodos utilizados em [21] além de Taguchi, utilizou-se também o Método de Superfície de Resposta. Fez sua implementação em duas fases no Matlab[®], sendo que

na primeira fase determinou-se a melhor modelação, que apresenta menor erro e, foram definidos os parâmetros ótimos para: z_1 , z_2 , z_3 e z_4 que são respetivamente: Velocidade de corte (Vc), velocidade de avanço (Va), penetração axial (a_e) e penetração radial (a_p). Nesta fase, optou-se pela escolha de um modelo linear para caracterizar a rugosidade do material em função dos parâmetros $z^1 \dots, z^4$, definido pela função:

$$f(x) = x_1z_1 + x_2z_2 + x_3z_3 + x_4z_4 + x_5 \quad (3.1)$$

- A variável x tem cinco coordenadas que representam o peso de cada parâmetro z e x_5 representa o ajuste do modelo.

Com a definição do modelo feita, de acordo com os valores ótimos dos parâmetros, foram realizados 5 ensaios cujos valores encontram-se dispostos na Tabela 3.4

Tabela 3.4: Resultados da rugosidade nos ensaios pelo Método de Superfície de Resposta

Número de Ensaio	Vc[m/min]	F_z [mm/t]	a_e [mm]	a_p [mm]	Rugosidade Média[μ m]
1	200	0,10	0,10	2	1,06
2	254	0,10	0,10	2	1,03
3	262	0,10	0,10	3	1,09
4	200	0,25	0,25	2	1,19
5	200	0,25	0,25	3	1,21

Segundo Dias [21], os 5 ensaios realizados pelo GA foram bastante satisfatórios, valores sempre inferiores aos obtidos com Taguchi, sendo suficiente para o estudo do método.

A título de comparação vale destacar que o ensaio 2 pelo MSR demonstrou resultados semelhantes aos obtidos nas experiências pelo Método de Taguchi, correspondentes às combinações 12, 01 e 13 com valores de 1,05 [μ m], 1,06 [μ m] e 1,10 [μ m] respetivamente. Verificou que o ensaio 2 por MSR possui resultado muito próximo ao ensaio 12 de Taguchi, com 1,03 [μ m] para superfície de respostas e 1,05 [μ m] para Taguchi com os parâmetros bastante similares, à exceção da penetração axial e radial. Observou ainda, que na comparação entre os métodos, o MSR demonstrou-se mais eficaz pela rápida determinação dos valores ótimos, redução de tempo, material e gastos com materiais.

3.2 Estudo de Caso para Vibração

3.2.1 Método de Taguchi para Vibração

Semelhantemente a [21], em [20] foi utilizado o Método de Taguchi para propor uma forma de minimizar as vibrações nos processos de fresagem, por meio da variação dinâmica dos parâmetros relacionados com a área e a velocidade de corte. Para seu estudo, em concordância com Dias [21] empregou em seus ensaios os mesmos parâmetros: Velocidade de corte (V_c), velocidade de avanço (V_a), penetração axial (a_e) e penetração radial (a_p).

Para cada um dos 16 ensaios realizados por Paulo [20] gravou-se uma série de dados para os eixos X,Y e Z através do acelerómetro triaxial. Como a gravação dos dados foi efetuada com uma amostragem reduzida, foi necessário definir três períodos ao longo da série de dados. Cada período tem a duração de dois minutos, sendo que ao longo desses dois minutos foram gravadas mil valores de aceleração por cada segundo, ou seja, 120000 valores durante cada período. Para tratar esses dados determinou-se o valor eficaz ou RMS de cada um dos três períodos e, por fim, determinou-se o valor RMS dos três períodos como pode-se ver na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Ensaio de Taguchi para RMS médio de vibração

Ensaio	Média RMS	Média RMS	Média RMS
	Eixo X	Eixo Y	Eixo Z
1	3,6918	3,6978	8,8105
2	4,7740	5,0433	10,9222
3	4,1866	3,9018	9,8390
4	4,0771	4,3012	10,0749
5	4,1044	4,1535	9,0586
6	5,2110	5,4193	12,7689
7	4,8602	4,8153	9,6779
8	8,7763	10,1459	16,7088
9	9,1686	10,4323	17,0569
10	3,0784	2,7774	8,8117
11	2,7371	2,3011	7,6310
12	1,9439	1,9489	5,8828
13	3,1111	2,6861	8,2274
14	3,2123	2,8492	8,7841
15	3,5037	3,0897	8,3948
16	3,1888	2,6196	7,3290

Para Paulo [20], com auxílio da Tabela 3.5, a combinação dos parâmetros de fresagem

que causou os menores valores de vibração para as três direções foi o correspondente ao ensaio 12. Neste caso, os níveis de vibração para as direções X, Y e Z foram 1,9439 m/s², 1,9489 m/s² e 5,8828 m/s², respectivamente, tendo a norma euclidiana de 3.2585 m/s².

3.2.2 Método de Superfície de Resposta para Vibração

Para a resolução do problema de otimização da Equação 2.15, [20] utilizou o método de Nelder-Mead implementado na *toolbox Optimization do software Matlab®*. Para a seleção da melhor função, utilizou dos dezasseis ensaios para cada uma das funções dispostas na Secção 2.8. As funções que apresentaram os melhores resultados foram as $f_1(x, z)$, $f_3(x, z)$ e $f_7(x, z)$ com valores de $9,46 \times 10$, $1,43 \times 10^3$ e $1,86 \times 10^5$ respetivamente. Sendo assim, a função escolhida para dar continuidade a otimização foi a $f_1(x, z)$ que apresentou o menor erro. Vale ressaltar que a função definida como sendo a melhor para otimizar a vibração em [20] foi a mesma utilizada por [21] para a otimização da rugosidade.

A partir da definição da melhor função para o estudo foi possível resolver o problema 1, ou seja, a identificação dos coeficientes ótimos de x_1 a x_5 e para z_1 a z_5 . Posteriormente resolveu-se o problema 2, que consistiu em definir novamente a função $f_1(x, z)$ como sendo:

$$f_1(x, z) = |x_1z_1 + x_2z_2 + x_3z_3 + x_4z_4 + x_5 - z(5)| \quad (3.2)$$

para encontrar o valor absoluto mínimo das vibrações. Para a resolução do segundo problema [20] optou pelo método de Algoritmo Genético.

Para identificar o valor ótimo para Velocidade de corte (V_c), velocidade de avanço (V_a), penetração axial (a_e) e penetração radial (a_p), respectivamente: z_1 , z_2 , z_3 e z_4 foram selecionados 13 ensaios laboratoriais (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 13, 14, 15, 16) entre os 16 da Tabela 3.5. Durante a análise observou que os valores médios das vibrações nos eixos X e Y eram muito semelhantes com 4.316 [m/s²] para X e 4.386 [m/s²] para Y e, que para Z os resultados eram mais que o dobro, correspondente ao valor médio de 9.9999 [m/s²]. Sendo assim, definiu como sua medida (z_5) a norma do vetor (RMS_y, RMS_z) conforme demonstra a Equação 3.3:

$$z_5 = \sqrt{(RMS_y)^2 + (RMS_z)^2} \quad (3.3)$$

Foram realizados dois ensaios de verificação do método, cujos valores encontram-se dispostos na Tabela 3.6, [20] inferiu que tanto o Ensaio 1 quanto o Ensaio 2 demonstraram resultados satisfatórios em relação aos obtidos através do Método de Taguchi e, que ambos ensaios convergiam. A critério de comparação: No segundo ensaio realizado pelo Método de Superfície de Resposta o resultado da Equação 3.3, que representa o resultado final da vibração do ensaio, foi melhor no MSR do que 11 de 13 ensaios realizados pelo Método de Taguchi.

Tabela 3.6: Resultados vibratórios nos ensaios pelo Método de Superfície de Resposta [20]

	Ensaio 1	Ensaio 2
Velocidade de Corte (V_c) [rpm]	2546	2644,3
Velocidade de Avanço (V_a) [mm/min]	4440,7	4271,5
Penetração Axial (a_e) [mm]	0,1	0,3
Penetração Radial (a_p) [mm]	2	2
Resultado da Vibração [m/s^2]	8,9020	8,5466

Por apresentarem valores de entrada e resultados das vibrações muito parecidos decidiu-se finalizar os ensaios pelo Método de Superfície de Resposta.

Os estudos apresentados anteriormente [20] e [21], demonstraram-se bastante eficazes e eficientes pela utilização do MSR através do Matlab. Os autores estiveram bastante atentos e trouxeram resultados que demonstram fiabilidade no método, razão pela qual decidiu-se por dar continuidade na exploração do método como uma ferramenta robusta e capaz de trazer melhorias nos processos de maquinagem.

Capítulo 4

Design de Experiências

Automatizado

Com base nos bons resultados apresentados pelo método de otimização baseado em GA, no presente trabalho optou-se por trabalhar na otimização do código no que diz respeito à usabilidade e vulnerabilidade. Sabendo que a maioria dos usuários comuns necessitam de soluções mais rápidas, independente do processo, focou-se na melhora da interface do software para o usuário final.

4.1 Fluxo de Funcionamento do Software

Uma das etapas mais importantes na modelação é a definição clara e objetiva do resultado que se pretende alcançar. É necessário esquematizar passo-a-passo como o projeto se deve comportar mediante os diferentes casos possíveis.

No arranque do software, é esperado que o mesmo permita a definição dos limites dos parâmetros do processo de maquinagem e inicie imediatamente o processo de otimização. Deve utilizar o banco de dados como base de cálculos e sugerir ao usuário quais valores deve introduzir na CNC para que a maquinagem alcance os resultados esperados. Ao final da primeira sugestão o software deve permitir a possibilidade de que o usuário realize uma nova otimização baseada nos valores obtidos nos ensaios até o momento. A Figura

4.1 apresenta o fluxograma completo de funcionamento do software. No capítulo 5 são apresentadas as telas correspondentes a cada passo do fluxograma.

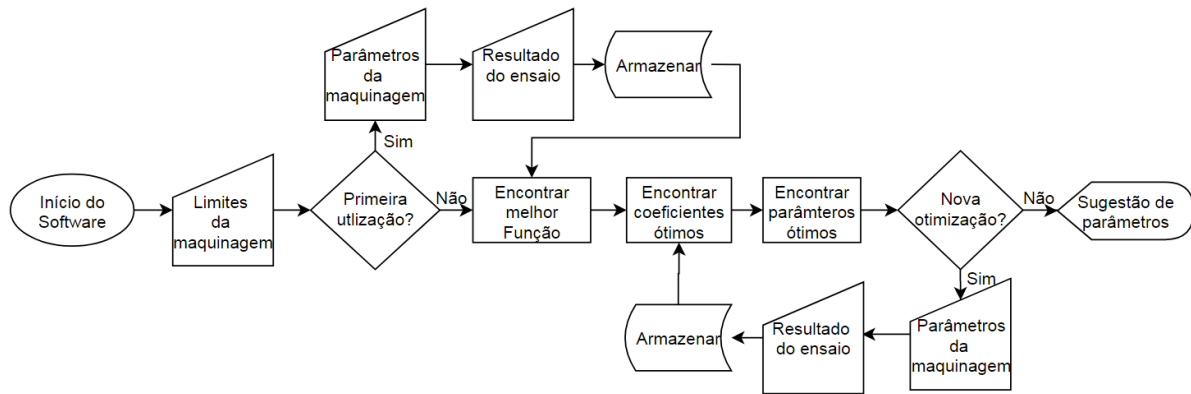


Figura 4.1: Fluxo funcional do software.

- **Início do Software:** Trata-se da primeira etapa do processo, é quando o usuário decide procurar pelos parâmetros ótimos de maquinagem;
- **Limites de maquinagem:** Etapa em que o usuário define os níveis que serão trabalhados pela otimização, ou seja, fornece ao sistema os limites mínimos e máximos dos parâmetros de maquinagem. Geralmente, são propostos nos catálogos dos fornecedores das ferramentas.
- **Primeira Utilização:** Validados os limites, o software procura pelo banco de dados com as informações de otimizações anteriores. Caso seja uma primeira utilização, em que não haverá banco de dados para realizar diretamente a otimização, o programa solicitará ao usuário as informações diretas sobre os resultados do primeiro ensaio. Caso haja um banco de dados ativo prossegue-se para encontrar a melhor função;
- **Parâmetros de maquinagem:** Nessa etapa o software solicitará ao usuário que forneça quais valores foram utilizados no processo de maquinagem;
- **Resultado do ensaio:** Após realizar o ensaio o utilizador deverá fornecer ao programa quais foram os valores reais obtidos na experiência;

- **Armazenar:** O software ao identificar que trata-se de sua primeira utilização, automaticamente criará seu ficheiro de banco de dados para salvar as experiências seguintes. Caso exista o banco de dados, o programa seleciona os dados resultantes do processo de maquinação e os guarda;
- **Encontrar melhor função:** Nesse momento o software procurará no seu banco de dados e, através dos critérios de seleção estabelecidos na Secção 4.2, determinará a função que melhor se adequa ao problema de otimização;
- **Encontrar coeficientes ótimos:** Nesta etapa o software utilizará a melhor função identificada para calcular os valores ótimos para o coeficiente x ;
- **Encontrar parâmetros ótimos:** Com os valores ótimos para os coeficientes e com a função que melhor descreve o problema fixados, a aplicação iniciará o processo iterativo para encontrar o valor ótimo para os parâmetros do processo a ser trabalhado;
- **Nova otimização:** O programa permitirá ao utilizador escolher entre realizar, ou não, outra otimização e,
- **Sugestão de parâmetros:** Caso o usuário decida não realizar nova otimização o software demonstrará a sugestão e encerrará sua atividade.

4.2 Critério de Seleção do Equacionamento

Um diferencial em relação aos estudos apresentados nas secções anteriores é que, nessa dissertação para a modelação da função que melhor representa o problema estudado, não é necessário que o usuário escolha entre uma das funções disponíveis pois todas são automaticamente analisadas. A Figura 4.2 auxilia na percepção de como foi distribuída a problemática da modelação na otimização pelo software.

Em um primeiro momento, para seleção da melhor função, decidiu-se que o software deve solucionar a Equação 2.15 com todas as 8 funções e 4 medidas dispostas na Secção

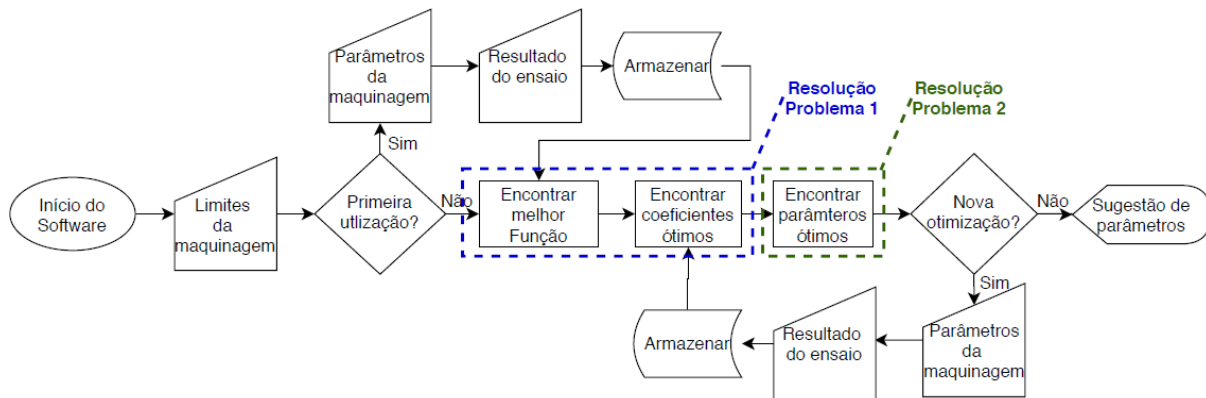


Figura 4.2: Distribuição dos problemas na modelação do software

2.8. Vale ressaltar que o processo se realiza pela experimentação de cada uma das funções com cada uma das medidas. Realizados os cálculos, o programa armazena a informação de qual foi a combinação, entre função e medida, que apresentou o menor erro. Esta etapa é a que mais consome tempo para ser processada, são 8 funções diferentes para 4 parâmetros de maquinagem com coeficientes que podem variar entre 5 e 25 variáveis. Como o objetivo nessa etapa é verificar qual a combinação que apresenta o menor erro, definiu-se que 5 iterações seriam suficientes para garantir a função que melhor representaria o problema.

Após definir da melhor função e medida, o software reinicia o cálculo da Equação 2.15, porém, agora para definição dos valores ótimos para os coeficientes x . Tendo em vista que nesses cálculos deve-se aproximar ao máximo dos valores que representam a função e não mais o erro da função, definiu-se que o software deveria realizar 50 iterações para apresentar um resultado mais fiável. Vale ressaltar que a quantidade de iterações, aqui definidas, foi proposta por apresentar, durante testes, respostas satisfatórias com um tempo de execução não muito longo, ou seja, após diversos testes observou-se que 50 iterações era suficiente para respostas fiáveis sem demasiado tempo de cálculo. Sabendo a melhor função e os coeficientes ótimos tem-se por resolvido o problema 1.

A resposta para o problema 2, isto é, definição dos parâmetros ótimos para o processo de maquinagem, se dá pela resolução da Equação 2.20 com a fixação da melhor função e dos coeficientes ótimos de x , encontrados na solução do problema 1. Nessa etapa foi definido a mesma quantidade de iterações utilizada na procura dos melhores coeficientes,

ou seja, 50 iterações.

4.3 Armazenamento

O método de resolução baseado no Algoritmo Genético é iterativo e utiliza um banco de dados para afinar as soluções. Sendo assim, com o objetivo de tornar a aplicação mais usual para o maior número de projetos possível decidiu-se trabalhar com o armazenamento de dados de duas formas.

4.3.1 Caso 1 - Primeira Utilização

Sempre que iniciado um novo projeto o software, automaticamente, gera um ficheiro de excel, denominado "Dados.xlsx" em que cria e armazena as colunas correspondentes ao número da operação/experiência, a velocidade de rotação e avanço, a penetração axial e radial, a vibração nos eixos x , y e z e, por fim, as 4 medidas do ensaio. Esse caso funcional de armazenamento acontece somente na primeira utilização da aplicação. Após criar o ficheiro as utilizações ocorrem conforme Caso 2.

4.3.2 Caso 2 - Utilização Global

Havendo um banco de dados, conforme a Figura 4.2, a aplicação imediatamente inicia a procura pelos parâmetros ótimos para o processo de maquinagem. Caso o utilizador queira realizar um novo processo de otimização, ao dar entrada no sistema dos parâmetros de maquinagem e inserindo os resultados obtidos pelo processo, a aplicação acessa o banco de dados e armazena os valores inseridos, que servirão de base para melhorar as próximas otimizações. Esse processo ocorrerá todas as vezes em que o utilizador optar por realizar uma nova otimização.

4.4 Interface e Comando Executável

Como alternativa ao método de linha de comando, no qual o utilizador tem acesso ao código e poderia, acidentalmente, mudar alguma programação, ou então, não saber precisamente como iniciar a programação, foi utilizada a ferramenta *deploytool* do Matlab®, a qual permitiu a criação de um executável independente com uma interface gráfica para facilitar sua operação.

As principais vantagens do software ter sido desenvolvido com auxílio dessa ferramenta são:

- O software pode ser utilizado por pessoas que não possuam o Matlab® instalado;
- Fácil distribuição do software;
- Não há necessidade de nenhum tipo de licença;
- Proteção ao código original;
- Manutenção dos direitos autorais e,
- Utilização com visual limpo e intuitivo.

4.5 Cuidados

Para execução do software são recomendados os seguintes requisitos mínimos:

- **Sistema:** Windows 7 ou superior;
- **Processador:** Intel ou AMD x86-64;
- **Espaço no Disco Rígido:** 1-2 GB para instalação e,
- **Memória RAM:** Mínimo de 4 GB.

Nas caixas de diálogo em que os usuários devem entrar com valores para sistema, o único marcador que deve ser utilizado é o separador decimal por ponto.

Como parte do código no software está direcionada à criação de um banco de dados, ao acesso ao banco de dados e ao envio de mensagens ao utilizador, a fim de evitar qualquer bloqueio com possíveis proteções existentes no sistema do usuário, deve, sempre, executar o software como administrador.

Capítulo 5

Manual do Utilizador e Resultados

Neste capítulo optou-se por demonstrar os resultados obtidos pela criação da aplicação em forma sequencial de funcionamento, de modo que, os resultados obtidos são apresentados em cada etapa com o intuito de que o futuro usuário possa aprender como utilizar a aplicação.

O capítulo foi dividido em duas secções, a primeira secção é o "Manual do Utilizador" na qual a primeira subsecção será a "Utilização Global" que descreve como a aplicação funciona quando há banco de dados disponível, correspondente a maior parte das utilizações da aplicação. A segunda subsecção apresenta as informações para a primeira utilização, detalhando o processo de quando se está a iniciar um novo projeto, no qual não há base de dados disponível. A segunda secção apresenta os resultados obtidos para o estudo de caso da vibração e, posteriormente, para a rugosidade.

A aplicação está disponível em: <https://cutt.ly/YyAxDwb>

5.1 Manual do Utilizador

5.1.1 Utilização Global

Após baixar e instalar a aplicação, deve-se clicar no arquivo executável gerado com o nome "Optimization", conforme Figura 5.1. Atenção a subsecção 4.5 que informa sobre a

necessidade de executar o software como administrador.

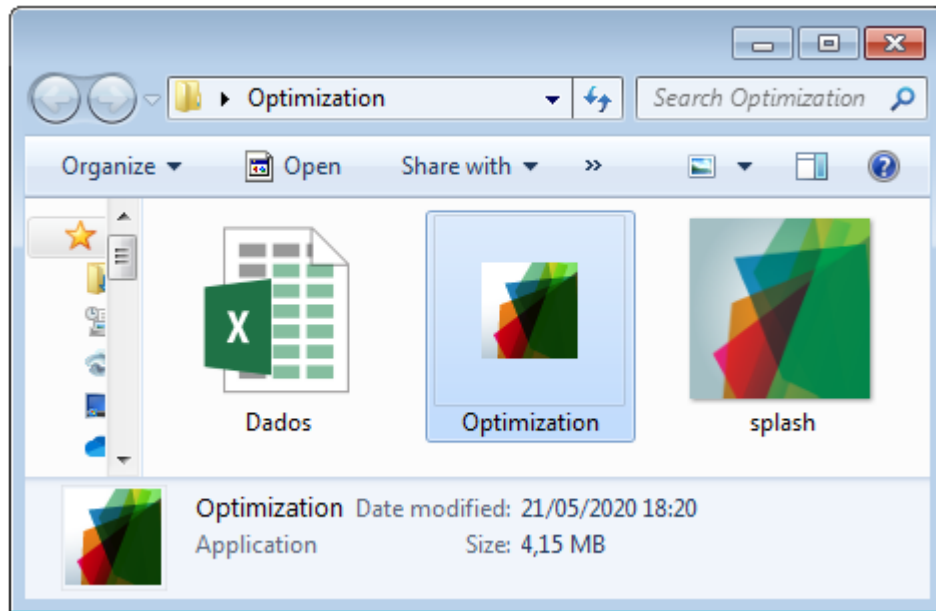


Figura 5.1: Ícone da aplicação.

A primeira tela da aplicação solicitará que o usuário entre com os valores mínimos indicados pelo fabricante da ferramenta para os parâmetros da maquinagem, conforme pode ser visto na Figura 5.2. Os valores deverão ser preenchidos de acordo com a orientação abaixo:

- *Minimum Cutting Speed*: Entrar com o valor mínimo do parâmetro de velocidade de corte para CNC [rpm];
- *Minimum Feed Rate*: Entrar com o valor mínimo do parâmetro de velocidade de avanço para CNC [mm/min];
- *Minimum Step Over*: Entrar com o valor mínimo do parâmetro de penetração axial para CNC [mm] e,
- *Minimum Depth of Cut*: Entrar com o valor mínimo do parâmetro de penetração radial para CNC [mm/min].

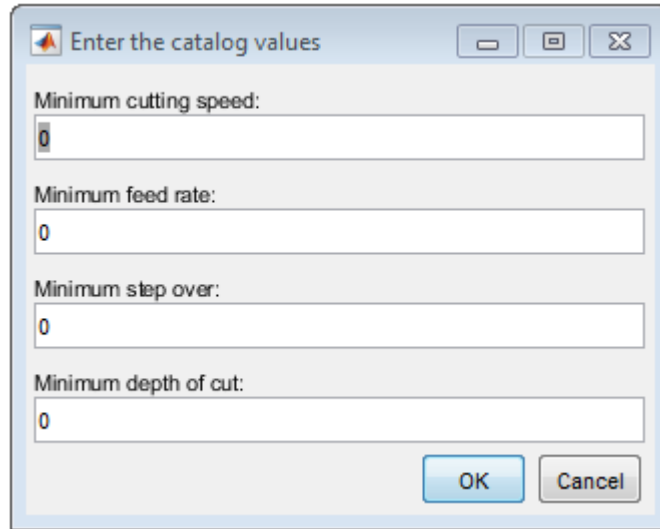


Figura 5.2: Entrada de parâmetros mínimos para CNC.

Após entrar com os parâmetros mínimos para a maquinagem o usuário deverá inserir na aplicação os valores máximos indicados pelo fabricante da ferramenta para os parâmetros utilizados conforme Figura 5.3. Os valores deverão ser preenchidos de acordo com a orientação abaixo:

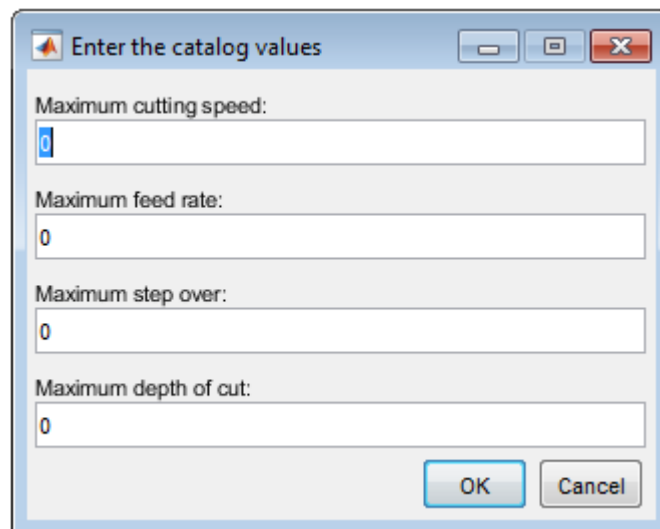


Figura 5.3: Entrada de parâmetros máximos para CNC.

- *Maximum Cutting Speed:* Entrar com o valor máximo do parâmetro de velocidade de corte para CNC [rpm];

- *Maximum Feed Rate*: Entrar com o valor máximo do parâmetro de velocidade avanço para CNC [mm/min];
- *Maximum Step Over*: Entrar com o valor máximo do parâmetro de penetração axial para CNC [mm] e,
- *Maximum Depth of Cut*: Entrar com o valor máximo do parâmetro de penetração radial para CNC [mm].

Dadas as entradas dos parâmetros máximos e mínimos a aplicação automaticamente inicia a procura pela função que melhor descreve o problema, enquanto realiza os cálculos, envia ao utilizador uma mensagem de que está a calcular, conforme Figura 5.4.

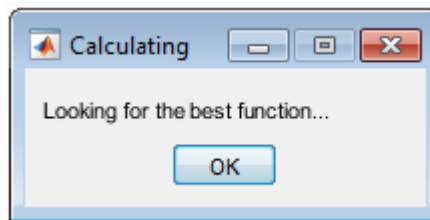


Figura 5.4: Aviso que está a calcular a melhor função.

Ao definir a função que melhor se adequa ao projeto, o programa inicia a procura pelos valores ótimos para os coeficientes x . A aplicação alerta ao usuário sobre o processo conforme Figura 5.5.

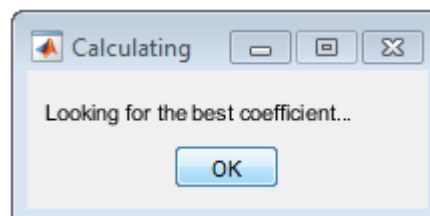


Figura 5.5: Aviso que está a calcular o melhor coeficiente.

Definidos os melhores coeficientes com a melhor função, a aplicação calcula os valores ótimos para o usuário introduzir na CNC e realizar a maquinagem. Enquanto o processo

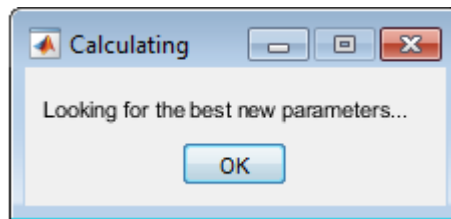


Figura 5.6: Aviso que está a calcular os novos melhores parâmetros.

de cálculo ocorre é inserido no ecrã a mensagem de que está a calcular os parâmetros ótimos conforme Figura 5.6.

Finalizados os cálculos dos melhores parâmetros para maquinagem é necessário que o usuário informe a aplicação se deseja realizar outro processo de otimização, conforme Figura 5.7

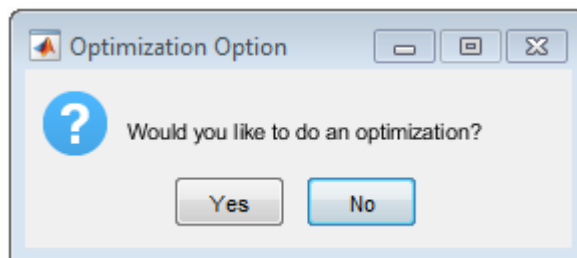


Figura 5.7: Opção de iniciar outra otimização.

Caso o usuário opte em não realizar um novo processo de otimização, imediatamente aparece a mensagem com a recomendação dos melhores parâmetros encontrados pela aplicação, conforme Figura 5.8.

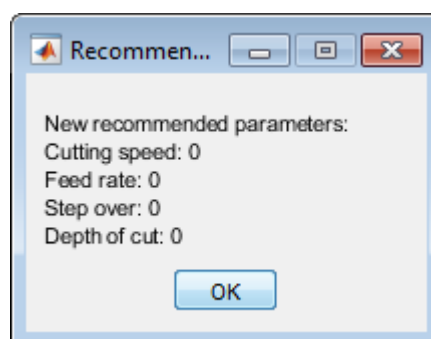


Figura 5.8: Recomendação de novos parâmetros.

Caso o usuário opte por realizar um novo processo de otimização, ao clicar em "Yes", a aplicação envia uma mensagem solicitando quais os valores que serão utilizados na CNC, conforme Figura 5.9. Os valores que aparecem nessa janela são os valores calculados na etapa anterior e recomendados como ótimos pela aplicação. Dessa maneira, o usuário tem duas opções: Seguir com os cálculos aceitando a sugestão do programa ou, pode realizar alterações nos valores dos parâmetros antes de continuar os cálculos.

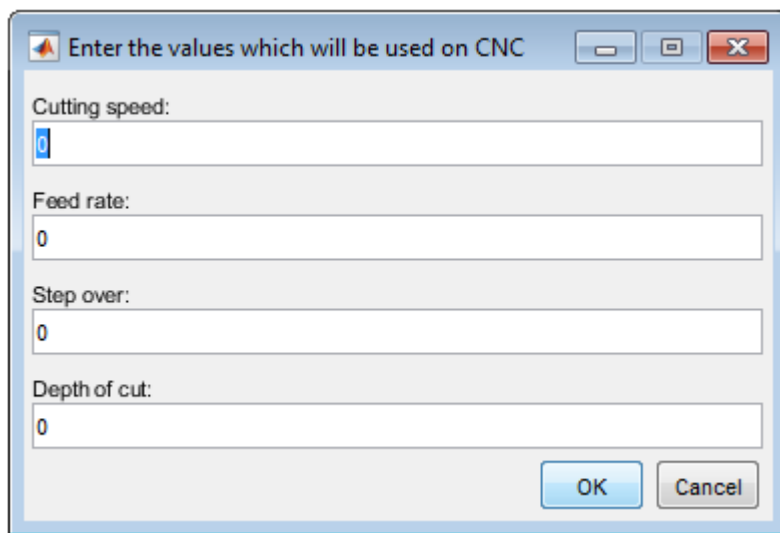
A screenshot of a Windows-style dialog box titled "Enter the values which will be used on CNC". The dialog box has a standard title bar with minimize, maximize, and close buttons. Inside, there are four text input fields, each with a label above it: "Cutting speed:" (value: 0), "Feed rate:" (value: 0), "Step over:" (value: 0), and "Depth of cut:" (value: 0). At the bottom right, there are two buttons: "OK" and "Cancel".

Figura 5.9: Parâmetros para utilização na CNC.

Após inserir os parâmetros sugeridos pela aplicação na CNC e realizar o processo de maquinagem, deverá inserir na aplicação os valores de vibração gerados nos três eixos, conforme Figura 5.10.

Ao receber os valores da vibração a aplicação atualiza sua base de dados com todos os valores introduzidos e, já tendo calculado a função que melhor se adequou ao problema, inicia a procura pelos novos coeficientes que melhor se ajustem ao problema. O processo torna-se iterativo, ou seja, repete-se da etapa de procurar pelo melhor coeficiente (Figura 5.5) até questionar os valores resultantes da vibração (Figura 5.10) por quantas vezes o usuário desejar.

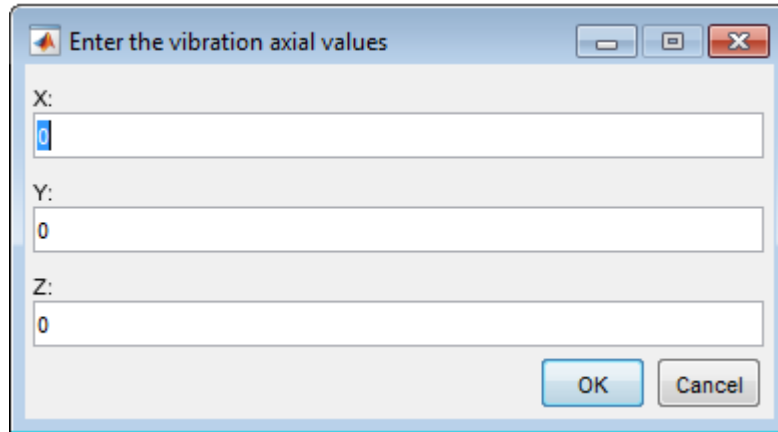


Figura 5.10: Resultado da vibração na CNC.

5.1.2 Primeira Utilização

A diferença entre a primeira utilização e as demais é a ordem de inserção dos dados na aplicação. Neste caso, ao invés do sistema iniciar os cálculos pelos melhores parâmetros de maquinagem após definição dos limites dos parâmetros, deverá questionar ao usuário sobre os primeiros parâmetros utilizados.

Conforme demonstrado na Figura 4.1 é necessário:

- Definir para o sistema os valores máximos e mínimos dos parâmetros de maquinagem para a ferramenta no processo de maquinagem;
- Realizar o primeiro ensaio, sem recomendações da aplicação, e inserir na aplicação os valores reais dos parâmetros utilizados na CNC e,
- Inserir na aplicação o resultado da vibração no primeiro ensaio.

Após o utilizador definir para o sistema os valores dos parâmetros e das vibrações resultantes do primeiro processo de maquinagem, a aplicação cria o banco de dados e está apta a procurar as novas recomendações de parâmetros ótimos para o processo de maquinagem.

A partir da etapa de armazenamento dos dados resultantes do primeiro processo de maquinagem, a aplicação passa a trabalhar no regime da utilização global, na qual, a cada

arranque do software, após introdução dos limites, há recomendações da aplicação para os parâmetros a serem utilizados na CNC e a possibilidade de realizar novas otimizações.

5.2 Estudo de Caso para Vibração

Inicialmente era previsto validar o funcionamento do software através da utilização da CNC no Laboratório de Tecnologia Mecânica (LTM), da Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTiG) do Instituto Politécnico de Bragança (IPB), porém, devido ao cenário mundial de pandemia, causada pela propagação do SARS-CoV-2, optou-se por seguir as recomendações locais de distanciamento social e realizar a validação do funcionamento do software por meio da comparação com os resultados previamente obtidos pelos autores [20] e [21].

Relembrando que GA é um método estatístico estocástico, ou seja, com origem em eventos aleatórios, que podem ser limitados a um intervalo. E, que não seriam realizados ensaios laboratoriais, foi necessário definir um critério de comparação e de paragem para execução aplicação. A partir dos conceitos apresentados por [35] sobre a necessidade de ter uma série de experiências realizadas antes da utilização do MSR e a influência de cada um dos parâmetros da maquinagem sobre o efeito das vibrações [39] e [45], optou-se pela obtenção dos resultados através da análise de comportamento de cada um dos parâmetros em seus limites inferiores (mínimos) e limites superiores (máximos).

Tendo em consideração que, pela matriz de Taguchi, é possível observar o comportamento de todos os parâmetros em todas as combinações possíveis entre máximo e mínimo, os resultados aqui apresentados foram obtidos pela aproximação das recomendações fornecidas pelo software aos limites dos parâmetros de maquinagem. Ou seja, para cada uma das sugestões fornecidas pela aplicação, fez-se a aproximação para o valor máximo ou mínimo permitido para cada um dos parâmetros. Por exemplo, sabendo que a velocidade de corte varia entre o mínimo (limite inferior) de 2546[rpm] e o máximo (limite superior) de 3820[rpm] e, que o software faça a sugestão de 2850[rpm], como o valor está mais próximo do limite inferior será aproximado para o mínimo de 2546[rpm]. Sendo assim, é possível

fazer a análise e comparação pelos máximos e mínimos de cada um dos parâmetros.

Uma vez que não há entrada de novos valores resultantes de ensaios laboratoriais, a cada iteração são inseridos valores pré-existentes da matriz de Taguchi (Tabela 3.2), definindo-se como critério de paragem a repetição de sugestões de ensaios, sendo assim, encerra-se o ensaio quando a aplicação repete uma sugestão.

A Tabela 5.1 é a adaptação da Tabela 3.2 para [20] e apresenta os resultados obtidos pelo método de Taguchi consoante o comportamento de máximo ou mínimo dos parâmetros para a vibração.

Tabela 5.1: Matriz L16 de Taguchi com os valores máximos e mínimos para a vibração

Número de Ensaio	Velocidade de Corte	Velocidade de Avanço	Penetração Axial	Penetração Radial	Vibração (z_5) [m/s^2]
1	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Mínimo	9,5550
2	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Máximo	12,0303
3	Mínimo	Mínimo	Máximo	Mínimo	10,5844
4	Mínimo	Mínimo	Máximo	Máximo	10,9546
5	Mínimo	Máximo	Mínimo	Mínimo	9,9654
6	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	13,8713
7	Mínimo	Máximo	Máximo	Mínimo	10,8096
8	Mínimo	Máximo	Máximo	Máximo	19,5479
9	Máximo	Mínimo	Mínimo	Mínimo	19,9942
10	Máximo	Mínimo	Mínimo	Máximo	9,2390
11	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	7,9703
12	Máximo	Mínimo	Máximo	Máximo	6,1972
13	Máximo	Máximo	Mínimo	Mínimo	8,6547
14	Máximo	Máximo	Mínimo	Máximo	9,2346
15	Máximo	Máximo	Máximo	Mínimo	8,9453
16	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo	7,7830

A Tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos no Ensaio 1 com as sugestões dadas pelo software após sua primeira execução com os treze ensaios utilizados por Paulo [20] (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 13, 14, 15, 16).

Tabela 5.2: Ensaio 1 de vibração: Sugestões do software para os parâmetros de maquiagem na CNC

Número de Ensaio	Velocidade de Corte	Velocidade de Avanço	Penetração Axial	Penetração Radial	Vibração (z_5) [m/s^2]
Sugestão 1	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Mínimo	9,5550
Sugestão 2	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo	7,7830
Sugestão 3	Máximo	Máximo	Máximo	Mínimo	8,9453
Sugestão 4	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Mínimo	9,5550

Pode-se observar por meio da Tabela 5.2 que a "Sugestão 2" apresenta o comportamento que resultou no segundo melhor resultado obtido pelas experiências de Taguchi. Após realizar três sugestões de parâmetros para utilização na CNC, o software, na quarta sugestão repetiu o padrão da "Sugestão 1". Sendo assim, encerrou-se o Ensaio 1.

A Tabela 5.3 apresenta os resultados obtidos no Ensaio 2 com as sugestões dadas pelo software após sua segunda execução com os treze ensaios utilizados por Paulo [20].

Tabela 5.3: Ensaio 2 de vibração: Sugestões do software para os parâmetros de maquiagem na CNC

Número de Ensaio	Velocidade de Corte	Velocidade de Avanço	Penetração Axial	Penetração Radial	Vibração (z_5) [m/s^2]
Sugestão 1	Máximo	Mínimo	Máximo	Máximo	6,1972
Sugestão 2	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	7,9703
Sugestão 3	Máximo	Mínimo	Máximo	Máximo	6,1972

A Tabela 5.3 demonstra que a "Sugestão 1" apresenta o comportamento que resultou no melhor resultado obtido pelas experiências de Taguchi e, que a "Sugestão 2" apresenta o comportamento que resultou no terceiro melhor resultado. Após realizar duas sugestões de parâmetros para utilização na CNC, o software, na terceira sugestão repetiu o padrão da "Sugestão 1". Sendo assim, encerrou-se o Ensaio 2. Vale destacar que, nesse ensaio, o software indica diretamente como primeira opção o comportamento do ensaio 12 de Taguchi (que apresentou melhor resultado laboratorial), ainda que esse ensaio não estivesse inserido no banco de dados do software.

A Tabela 5.4 apresenta os resultados obtidos no Ensaio 3 com as sugestões dadas pelo software após sua terceira execução com os treze ensaios utilizados por Paulo [20].

Tabela 5.4: Ensaio 3 de vibração: Sugestões do software para os parâmetros de maquiagem na CNC

Número de Ensaio	Velocidade de Corte	Velocidade de Avanço	Penetração Axial	Penetração Radial	Vibração (z_5) [m/s^2]
Sugestão 1	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	7,9703
Sugestão 2	Máximo	Mínimo	Máximo	Máximo	6,1972
Sugestão 3	Máximo	Máximo	Máximo	Mínimo	8,9453
Sugestão 4	Máximo	Máximo	Máximo	Mínimo	8,9453

Pode-se identificar pela Tabela 5.4 que a "Sugestão 1" apresenta o comportamento que

resultou no terceiro melhor resultado e, que a "Sugestão 2" apresenta o comportamento que resultou no melhor resultado obtido pelas experiências de Taguchi. Após realizar três sugestões de parâmetros para utilização na CNC, o software, na quarta sugestão repetiu o padrão da "Sugestão 3". Como tal, encerrou-se o Ensaio 3.

5.3 Estudo de Caso para Rugosidade

Para comparação de resultados com o estudo da rugosidade foi adotado exatamente a mesma metodologia aplicada à comparação para o estudo de caso da vibração, ou seja, os resultados apresentados foram obtidos pela aproximação das recomendações fornecidas pelo software aos limites dos parâmetros de maquinagem. O critério de paragem permaneceu sendo a repetição de sugestões de ensaios, encerrando o ensaio quando a aplicação repete uma sugestão.

A Tabela 5.5 é a adaptação da Tabela 3.2 para Dias [21] e apresenta os resultados obtidos pelo método de Taguchi consoante o comportamento de máximo ou mínimo dos parâmetros para a rugosidade.

Tabela 5.5: Matriz L16 de Taguchi com os valores máximos e mínimos para a rugosidade

Número de Ensaio	Velocidade de Corte	Velocidade de Avanço	Penetração Axial	Penetração Radial	Rugosidade Média (z_5)[μm]
1	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Mínimo	1,0600
2	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Máximo	1,6133
3	Mínimo	Mínimo	Máximo	Mínimo	3,8400
4	Mínimo	Mínimo	Máximo	Máximo	4,0700
5	Mínimo	Máximo	Mínimo	Mínimo	1,3033
6	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	2,3600
7	Mínimo	Máximo	Máximo	Mínimo	3,6700
8	Mínimo	Máximo	Máximo	Máximo	2,6333
9	Máximo	Mínimo	Mínimo	Mínimo	1,2600
10	Máximo	Mínimo	Mínimo	Máximo	3,7200
11	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	2,5400
12	Máximo	Mínimo	Máximo	Máximo	1,0567
13	Máximo	Máximo	Mínimo	Mínimo	1,1033
14	Máximo	Máximo	Mínimo	Máximo	1,3233
15	Máximo	Máximo	Máximo	Mínimo	3,0367
16	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo	2,0100

Para executar a aplicação e verificar quais as sugestões do software, foram considerados

os dezasseis ensaios realizados pelo Método de Taguchi, bem como realizado por Dias [21].

A Tabela 5.6 apresenta os resultados obtidos no Ensaio 1 para a rugosidade com as sugestões dadas pelo software após a sua primeira execução com os dezasseis ensaios utilizados por Dias [21].

Tabela 5.6: Ensaio 1 de rugosidade: Sugestões do software para os parâmetros de maquinagem na CNC

Número de Ensaio	Velocidade de Corte	Velocidade de Avanço	Penetração Axial	Penetração Radial	Rugosidade Média (z_5) [μm]
Sugestão 1	Máximo	Máximo	Mínimo	Mínimo	1,1033
Sugestão 2	Máximo	Máximo	Máximo	Máximo	2,0100
Sugestão 3	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Mínimo	1,0600
Sugestão 4	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Mínimo	1,0600

Pode-se identificar pela Tabela 5.6 que a "Sugestão 1" apresenta o comportamento que resultou no terceiro melhor resultado e, que a "Sugestão 3" apresenta o comportamento que resultou no segundo melhor resultado obtido pelas experiências de Taguchi. Após realizar três sugestões de parâmetros para utilização na CNC, o software, na quarta sugestão repetiu o padrão da "Sugestão 3". Sendo assim, encerrou-se o Ensaio 1. Vale observar que a segunda melhor opção sugerida pelo software pouco dista da melhor solução, há apenas 0,003 μm de diferença entre a melhor e a segunda melhor opção.

A Tabela 5.7 apresenta os resultados obtidos no Ensaio 2 e Ensaio 3 para a rugosidade com as sugestões dadas pelo software após sua segunda e terceira execução com os dezasseis ensaios utilizados por Dias [21].

Tabela 5.7: Ensaio 2 e 3 de rugosidade: Sugestões do software para os parâmetros de maquinagem na CNC

Número de Ensaio	Velocidade de Corte	Velocidade de Avanço	Penetração Axial	Penetração Radial	Rugosidade Média (z_5) [μm]
Sugestão 1	Máximo	Máximo	Mínimo	Mínimo	1,1033
Sugestão 2	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	2,3600
Sugestão 3	Máximo	Mínimo	Máximo	Máximo	1,0567
Sugestão 4	Mínimo	Máximo	Mínimo	Mínimo	1,3033
Sugestão 5	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Máximo	1,6133
Sugestão 6	Mínimo	Mínimo	Mínimo	Máximo	1,6133

Observa-se pela Tabela 5.7 que a "Sugestão 1" apresenta o comportamento que resultou no terceiro melhor resultado e, que a "Sugestão 3" apresenta o comportamento que resultou

no melhor resultado obtido pelas experiências de Taguchi. Após realizar cinco sugestões de parâmetros para utilização na CNC, o software, na sexta sugestão repetiu o padrão da "Sugestão 5". Sendo assim, encerrou-se o Ensaio 2 que foi idêntico aos comportamentos sugeridos pelo software no Ensaio 3.

Capítulo 6

Considerações Finais

6.1 Conclusões

A dissertação aqui apresentada atingiu os quatro objetivos dispostos, ou seja, atendeu ao objetivo geral que era o desenvolvimento e a validação de uma ferramenta computacional para auxílio na tomada de decisão para parâmetros ótimos no processo de fresagem com CNC. Utilizou-se de uma base de dados, sugerida pelos fabricantes das pastilhas, proveniente de ensaios previamente realizados pelo método de Taguchi para validação do funcionamento através de comparação entre os resultados de Taguchi e os resultados obtidos pelo MSR.

Para validação, buscou-se analisar se os resultados apresentados pelo software eram semelhantes aos melhores resultados do método de Taguchi. Assim sendo, pode-se verificar que a utilização do software para o estudo de caso da vibração mostrou-se bastante satisfatória. Em todos os ensaios realizados, o software, no máximo na segunda iteração, sugeriu o comportamento (máximo ou mínimo) dos parâmetros que representavam o melhor, ou o segundo melhor, valor obtido nos ensaios laboratoriais pelo método de Taguchi. No ensaio 2, por exemplo, o software primeiramente sugeriu como comportamento o valor mínimo para a velocidade de avanço, máximo para velocidade de corte, penetração axial e radial. O padrão sugerido, corresponde ao Ensaio 12 pelo método de Taguchi,

que apresentou os menores valores das vibrações nas direções X, Y e Z com valores de 1,994 [m/s^2], 1,949 [m/s^2] e 5,818 [m/s^2], o que resultou na vibração equivalente aos eixos Y e Z de 6,197 [m/s^2]. Tanto no Ensaio 2 quanto no Ensaio 3, o software foi capaz de sugerir o comportamento do Ensaio 12 de Taguchi mesmo que o Ensaio 12 não estivesse contemplado no banco de dados do software.

Semelhantemente ao ocorrido no estudo de caso da vibração, no estudo de caso da rugosidade o software demonstrou-se igualmente eficiente. No máximo na terceira iteração sugeriu o comportamento dos parâmetros que resultam no melhor, ou o segundo melhor, resultado da rugosidade. Tanto no Ensaio 2 quanto no Ensaio 3 o software sugeriu como comportamento ótimo o valor mínimo para a velocidade de avanço, máximo para a velocidade de corte e máximo para a penetração axial e radial. Sendo o padrão correspondente ao Ensaio 12 de Taguchi que apresentou o menor nível de rugosidade, com valor de 1,0567 [μm].

O comportamento do software desenvolvido demonstrou-se bastante estável e eficiente. De modo igual ao apresentado aqui, nos mais de 100 ensaios realizados para a validação da programação, o software sempre fez sugestões de comportamentos para os parâmetros de maquinagem que apresentassem os melhores resultados esperados, tanto para a rugosidade quanto para a vibração. Em todos os ensaios o software jamais sugeriu qualquer ensaio que representasse resultados acima do valor médio obtido pelas experiências realizadas pelo método de Taguchi.

Com a realização deste trabalho, foi possível o desenvolvimento de um software de interface simples, prático e intuitivo, facilitando sua utilização sem a necessidade de formações complexas e licenças adicionais. Por fim, o software desenvolvido é uma ferramenta auxiliar à tomada de decisão, capaz de acelerar e simplificar a escolha dos melhores parâmetros para a fresagem, reduzindo desperdícios e aumentando a qualidade dos projetos executados.

Com o software desenvolvido, reduzida a vulnerabilidade de códigos, dada a praticidade de execução e instalação, sem necessidade de licenças adicionais, tem-se como concluído o presente trabalho, presumindo que a utilização do software é altamente capaz

de auxiliar na tomada de decisão por parâmetros ótimos para a fresagem, redução de desperdícios e aumento da qualidade dos projetos a serem executados.

6.2 Trabalhos Futuros

Um dos objetivos desse trabalho era a experimentação laboratorial dos valores sugeridos pelo software, viabilizando a realização da comparação entre os resultados obtidos pelo método de Taguchi e MSR, visando também, a constatação de qual método iria convergir mais rapidamente para os parâmetros ótimos no processo de fresagem. No entanto, em virtude do cenário de pandemia e respeitando as sugestões dos órgãos de saúde, preferiu-se pela não realização dos ensaios. Assim, propõe-se para os trabalhos futuros a experimentação dos valores sugeridos pelo software em uma fresadora CNC.

Sugere-se também a utilização do software em outros processos de maquinagem, como o torneamento, assim como a adaptação metodológica, de modo que o usuário possa escolher qual processo de maquinagem irá realizar, e receber os possíveis parâmetros ótimos para este processo. Também é proposto a utilização do software em teste-piloto com parceria de empresas a fim de verificar os benefícios de sua utilização ao longo do tempo.

Bibliografia

- [1] E. Shehab e H. Abdalla, “Manufacturing cost modelling for concurrent product development”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 17, n.° 4, pp. 341–353, 2001.
- [2] M. O’Mahony e B. Van Ark, “EU productivity and competitiveness: an industry perspective”, *Can Europe resume the catching-up process*, 2003.
- [3] M. Lamraoui, M. Thomas, M. El Badaoui e F. Girardin, “Indicators for monitoring chatter in milling based on instantaneous angular speeds”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 44, n.° 1-2, pp. 72–85, 2014.
- [4] B. Routara, A. Bandyopadhyay e P. Sahoo, “Roughness modeling and optimization in CNC end milling using response surface method: effect of workpiece material variation”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 40, n.° 11-12, pp. 1166–1180, 2009.
- [5] C. X. Feng, “An experimental study of the impact of turning parameters on surface roughness”, em *Proceedings of the industrial engineering research conference*, vol. 2036, 2001.
- [6] M. Lamraoui, M. Barakat, M. Thomas e M. E. Badaoui, “Chatter detection in milling machines by neural network classification and feature selection”, *Journal of Vibration and Control*, vol. 21, n.° 7, pp. 1251–1266, 2015.

- [7] A. Heshmati, “Productivity growth, efficiency and outsourcing in manufacturing and service industries”, *Journal of economic surveys*, vol. 17, n.º 1, pp. 79–112, 2003.
- [8] K. V. M. K. Raju, G. R. Janardhana, P. N. Kumar e V. D. P. Rao, “Optimization of cutting conditions for surface roughness in CNC end milling”, *International journal of precision engineering and manufacturing*, vol. 12, n.º 3, pp. 383–391, 2011.
- [9] M. Kutz, *Mechanical Engineers Handbook, Volume 2: Design, Instrumentation, and Controls*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2015.
- [10] A. K. Sethi e S. P. Sethi, “Flexibility in manufacturing: a survey”, *International journal of flexible manufacturing systems*, vol. 2, n.º 4, pp. 289–328, 1990.
- [11] J. Browne, D. Dubois, K. Rathmill, S. P. Sethi, K. E. Stecke et al., “Classification of flexible manufacturing systems”, *The FMS magazine*, vol. 2, n.º 2, pp. 114–117, 1984.
- [12] G. E. Box e N. R. Draper, “A basis for the selection of a response surface design”, *Journal of the American Statistical Association*, vol. 54, n.º 287, pp. 622–654, 1959.
- [13] R. H. Myers, *Response surface methodology*. Boston: Allyn & Bacon, 1971.
- [14] G. C. Onwubolu e S. Kumar, “Response surface methodology-based approach to CNC drilling operations”, *Journal of materials processing technology*, vol. 171, n.º 1, pp. 41–47, 2006.
- [15] B. Routara, A. Sahoo, A. Parida e P. Padhi, “Response surface methodology and genetic algorithm used to optimize the cutting condition for surface roughness parameters in CNC turning”, *Procedia engineering*, vol. 38, pp. 1893–1904, 2012.
- [16] J. A. Ghani, I. Choudhury e H. Hassan, “Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters”, *Journal of materials processing technology*, vol. 145, n.º 1, pp. 84–92, 2004.

- [17] J. Pang, M. Ansari, O. S. Zaroog, M. H. Ali e S. Sapuan, “Taguchi design optimization of machining parameters on the CNC end milling process of halloysite nanotube with aluminium reinforced epoxy matrix (HNT/Al/Ep) hybrid composite”, *HBRC Journal*, vol. 10, n.º 2, pp. 138–144, 2014.
- [18] J. Z. Zhang, J. C. Chen e E. D. Kirby, “Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method”, *Journal of materials processing technology*, vol. 184, n.º 1-3, pp. 233–239, 2007.
- [19] S. Moshat, S. Datta, A. Bandyopadhyay e P. Pal, “Optimization of CNC end milling process parameters using PCA-based Taguchi method”, *International journal of engineering, science and technology*, vol. 2, n.º 1, pp. 95–102, 2010.
- [20] N. J. L. Paulo, *Otimização dos parâmetros de maquinagem para minimizar as vibrações no processo de fresagem*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Industrial, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2016. URL: <http://hdl.handle.net/10198/14081>.
- [21] T. M. C. Dias, *Otimização dos parâmetros de maquinagem no processo de fresagem*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Industrial, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, jul. de 2016. URL: <http://hdl.handle.net/10198/13192>.
- [22] H. A. Youssef e H. El-Hofy, *Machining technology: machine tools and operations*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2008.
- [23] R. A. C. Homem, “Estudo do processo de maquinagem de ligas de titânio”, 2014.
- [24] M. Groover, M. Weiss, R. Nagel e N. Odrey, *Industrial Robotics: Technology, Programming, and Applications*, sér. CAD/CAM, robotics, and computer vision. University of Michigan, Michigan: McGraw-Hill, 1986, ISBN: 9780071004428.
- [25] S. Coromant, “Manual técnico de usinagem”, *São Paulo*, vol. 16, 2005.
- [26] S. F. Krar, A. Gill e P. Smid, *Computer numerical control simplified*. New York: Industrial Press Inc., 2001.

- [27] B. Pabla e M. Adithan, *CNC Machines*. New Delphi: Wiley Eastern, Limited, 1994, ISBN: 9788122406696.
- [28] L. C. P. L. Oliveira, *Maquinagem de superfícies complexas com recurso a sistema robótico*, Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2013.
- [29] J. P. M. D. Antunes, *Programação de robôs industriais em operações de maquinagem*, Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2015.
- [30] W. A. Knight e G. Boothroyd, *Fundamentals of metal machining and machine tools*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2005, vol. 198.
- [31] H. Gerling e F. F. da Conceição, *A volta de máquina-ferramenta*. Braunschweig, Germany: Reverté, 1967.
- [32] S. C. (Firm), *Modern metal cutting: a practical handbook*. Sandvik Coromant, 1994.
- [33] M. Kuruc, M. Vozár, V. Šimna, T. Vopát, J. Moravčíková e J. Peterka, “Comparison of high feed mmachining with conventional milling in terms of surfacequality and Productivity.”, *Annals of DAAAM & Proceedings*, vol. 30, 2019.
- [34] Á. R. Machado, R. T. Coelho, A. M. Abrão e M. B. da Silva, *Teoria da usinagem dos materiais*. São Paulo: Editora Blucher, 2015.
- [35] H. D. O. Mendes, *Otimização de parâmetros de corte no processo de torneamento CNC*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Industrial, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2019. URL: <http://hdl.handle.net/10198/19831>.
- [36] 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”, *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, vol. 61, n.º 1, pp. 30–35, 2017.
- [37] P. Guedes, “Metrologia industrial”, *Portugal–Liboa. Ed. ETEP*, 2011.
- [38] H. Schulz, “High-Speed Machining, 1996”, *Carl Hanser, Munchen*, p. 22,

- [39] K. V. Rao e P. Murthy, “Modeling and optimization of tool vibration and surface roughness in boring of steel using RSM, ANN and SVM”, *Journal of intelligent manufacturing*, vol. 29, n.º 7, pp. 1533–1543, 2018.
- [40] Y. Altintas e A. Ber, “Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design”, *Appl. Mech. Rev.*, vol. 54, n.º 5, B84–B84, 2001.
- [41] B. M. Nicolau, *Estudo das vibrações no processo de fresagem de peças com baixa espessura*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Industrial, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2017. URL: <http://hdl.handle.net/10198/14925>.
- [42] C. M. Harris e C. E. Crede, *Shock and vibration handbook vol I basic theory and measurements*. New York: McGraw-Hill Book Company Incorporated, 1961.
- [43] H. B. Mühle et al., *Mandrillamento com cabeçotes de excentricidade regulável e sistema de balanceamento*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, 2000.
- [44] M. Sukumar, P. V. Ramaiah e A. Nagarjuna, “Optimization and prediction of parameters in face milling of Al-6061 using Taguchi and ANN approach”, *Procedia Engineering*, vol. 97, pp. 365–371, 2014.
- [45] J. Yan e L. Li, “Multi-objective optimization of milling parameters—the trade-offs between energy, production rate and cutting quality”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 52, pp. 462–471, 2013.
- [46] J. Tlustý, *Manufacturing processes and equipment*. 2000.
- [47] D. Pereira, L. Queijo e J. Ribeiro, “Otimização de parâmetros de fresagem usando o método de Taguchi com a análise relacional de Grey”, *Iberoamerican Journal of Industrial Engineering*, vol. 10, n.º 19, pp. 56–70, 2018.
- [48] 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”, *Journal of materials processing technology*, vol. 209, n.º 6, pp. 2753–2759, 2009.

- [49] L. C. Campanelli, U. F. H. Suhuddin, J. F. d. Santos e N. G. d. Alcântara, “Parameters optimization for friction spot welding of AZ31 magnesium alloy by Taguchi method”, *Soldagem & Inspeção*, vol. 17, n.º 1, pp. 26–31, 2012.
- [50] V. B. d. S. Lima, P. P. Balestrassi e A. P. d. Paiva, “Otimização do desempenho de amplificadores de radiofrequência banda larga: uma abordagem experimental”, *Production*, vol. 21, n.º 1, pp. 118–131, 2011.
- [51] R. J. C. Carbas et al., “Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de Taguchi”, 2008.
- [52] H. S. de Almeida e J. C. de Toledo, “Método Taguchi: Qualidade voltada para o projeto do produto e do processo”, *Revista de Administração da Universidade de São Paulo*, vol. 24, n.º 4, 1989.
- [53] R. K. Roy, “A Primer on the Taguchi Method. 2nd”, *Dearborn, MI: Society of Manufacturing Engineers*, 2010.
- [54] P. J. Ross, *Aplicações das técnicas Taguchi na engenharia da qualidade*. São Paulo: Makron Books, 1991.
- [55] L. A. Ealey, *Quality by design: Taguchi methods and US industry*. ASI Press Dearborn, Michingan, 1988.
- [56] L. A. Ealey, *Quality by design Taguchi methods and US industry*. Dearborn, Michigan: Sidney: Irwin professional publishing e ASI Press, 1994.
- [57] H. J. C. De Souza, C. B. Moyses, F. J. Pontes, R. N. Duarte, C. E. S. Da Silva, F. L. Alberto, U. R. Ferreira e M. B. Silva, “Molecular assay optimized by Taguchi experimental design method for venous thromboembolism investigation”, *Molecular and Cellular Probes*, vol. 25, n.º 5-6, pp. 231–237, 2011.
- [58] J. L. Rosa, A. Robin, M. Silva, C. A. Baldan e M. P. Peres, “Electrodeposition of copper on titanium wires: Taguchi experimental design approach”, *Journal of materials processing technology*, vol. 209, n.º 3, pp. 1181–1188, 2009.

- [59] D. C. Montgomery, “Design and analysis of experiments. John Wiley & Sons”, *Inc.*, *New York*, vol. 1997, pp. 200–1, 2001.
- [60] D. C. Montgomery, “Montgomery Design and Analysis of Experiments Eighth Edition. Arizona State University”, *Copyright*, vol. 2009, n.º 2005, p. 2001, 2013.
- [61] P. Ross, *Taguchi techniques for quality engineering (2nd ed'95)*, Chicago, 1995.
- [62] M. Kumar, M. Husain, N. Upreti e D. Gupta, “Genetic algorithm: Review and application”, *Available at SSRN 3529843*, 2010.
- [63] P. Palanisamy, I. Rajendran e S. Shanmugasundaram, “Optimization of machining parameters using genetic algorithm and experimental validation for end-milling operations”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 32, n.º 7-8, pp. 644–655, 2007.
- [64] Palbit, *Milling catalogue*, www.palbit.pt/en/downloads.803/cutting-tools.932/catalogs.936/milling-downloads.950.html, ago. de 2014.
- [65] I. B. of Weights, Measures, B. N. Taylor e A. Thompson, *The international system of units (SI)*. US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards e Technology, 2001.