



ipb

INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA
Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Otimização dos Parâmetros de Maquinagem para Minimizar as Vibrações no Processo de Fresagem

Nuno José Lopes Paulo

Relatório da dissertação apresentada à

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Industrial

Área de especialização em Engenharia Mecânica

Outubro de 2016

Otimização dos Parâmetros de Maquinagem para Minimizar as Vibrações no Processo de Fresagem

Nuno José Lopes Paulo

Relatório da dissertação apresentada à

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Industrial

Área de especialização em Engenharia Mecânica

Orientadores: Prof. Dr. Manuel Brás César

Prof. Dra. Ana Isabel Pereira

Esta dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo Júri

Outubro de 2016

O que ouço, esqueço. O que vejo, lembro. Mas o que faço, aprendo.
(Albert Einstein)

Agradecimentos

Esta tese é mais um capítulo que estou a fechar e quero agradecer a um conjunto de pessoas que me apoiaram e contribuíram e tornaram mais fácil consolidar esta fase da minha vida. Em especial:

Aos meus orientadores, Professor Doutor Manuel Brás César e à Professora Doutora Ana Isabel Pereira pelo seu incessável empenho, inesgotável dedicação, pelo vasto conhecimento transmitido e a constante motivação que me transmitiram ao longo do meu percurso académico.

Ao professor Hernâni Lopes pela ajuda prestada e por todo o apoio que proporcionou.

Ao Engenheiro Jorge Meireles e Engenheiro Jorge Paulo, (técnicos de laboratório) pela disponibilidade prestada durante todos os ensaios que foi necessários fazer no laboratório.

À Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Bragança, do Instituto Politécnico de Bragança, pela disponibilidade dos equipamentos e consumíveis.

À PALBIT pela oferta dos materiais, nomeadamente as pastilhas para a CNC.

Não podia deixar de agradecer aos meus pais e irmã, pelo constante apoio, compreensão e amor transmitidos ao longo desta importante etapa da minha vida, inclusive a restante família sempre por todo o apoio.

Por fim, não poderia deixar de agradecer aos meus amigos e colegas por toda a sua amizade, companheirismo, solidariedade e espírito de entreajuda que se estabeleceu entre nós, ajudando assim à conclusão do curso.

Resumo

Atualmente o aumento da produtividade no menor tempo possível e com elevada qualidade é sem dúvida um dos maiores desafios para a indústria. Neste sentido, a indústria tem recorrido com muita frequência a máquinas CNC, uma vez que estes equipamentos trabalham de forma automática sendo capazes de alcançar elevada precisão, com um elevado desempenho e rendimento. Os níveis de vibração nestes sistemas têm-se apresentado ao longo das últimas décadas como um dos principais fatores limitantes para a melhoria da produtividade, especialmente em operações de maquinagem. Este trabalho contribui para o estudo do comportamento dinâmico de um equipamento CNC para a diminuição das vibrações, através da utilização de métodos de otimização que minimizam parâmetros associados às vibrações em operações de fresagem (velocidade de corte, velocidade de avanço, penetração axial e penetração radial) relacionados com a área da secção de corte. No presente estudo apresenta-se uma análise teórica sobre os materiais e ferramentas utilizadas ao longo dos ensaios experimentais, bem como dos métodos e programas utilizados. Neste caso utilizaram-se dois métodos de otimização, o método de Taguchi e o método das Superfícies de Resposta.

Para testar a fiabilidade da máquina estudou-se a ressonância, entre a frequência de funcionamento e a frequência natural (deve ser menor que a unidade em todas as frequências de funcionamento utilizadas). Como não existe ressonância (o rácio de frequências está longe de 1), as vibrações não são significativas para a máquina com este equipamento.

O método de Taguchi foi utilizado para diminuir o número de combinações possíveis e, conseqüentemente, o número de ensaios a realizar. No decorrer dos ensaios é feita a gravação das vibrações na direção x, y e z ocorridas durante o tempo do ensaio. Neste caso foi possível

observar que a combinação dos parâmetros de fresagem que causou os menores valores de vibração para as três direções é o correspondente ao ensaio 12, os níveis de vibração para as direções x, y e z foram $1,944 \text{ m/s}^2$, $1,949 \text{ m/s}^2$ e $5,818 \text{ m/s}^2$, respectivamente. Outra observação sobre o nível de vibração no método de Taguchi é que a média dos dezasseis ensaios de cada direção, o valor médio para a direção x é $4,351 \text{ m/s}^2$, direção y é $4,386 \text{ m/s}^2$ e para a direção z é $9,999 \text{ m/s}^2$. Por outras palavras, os valores médios para o x e y são muito próximos, ao mesmo tempo para o z tem um valor médio que é mais do dobro dos outros. O método das Superfícies de Resposta foi utilizado com o intuito de comparar os resultados obtidos com o método de Taguchi. De acordo com alguns trabalhos referidos na bibliografia especializada, o método de Superfícies de Resposta converge mais rapidamente para um valor ótimo. Como os valores medidos são relativos a três direções (x, y e z) para obter uma otimização genérica das vibrações foi necessário encontrar parâmetros de entrada que reduzissem as vibrações em ambos os sentidos. Assim, utilizou-se o módulo entre os eixos y e z.

Finalmente, utilizou-se o método de superfícies de resposta para otimizar os resultados das vibrações medidas ao longo da fresagem, a qual foi efetuada através dos ensaios resultantes da matriz ortogonal de Taguchi. Com base nos resultados obtidos concluiu-se que se obtiveram resultados bastante satisfatórios em relação com os resultado obtidos utilizando o primeiro método.

Palavras Chave: Fresagem, parâmetros de fresagem, vibrações, frequências de ressonância, método de Taguchi, método das superfícies da resposta.

Abstract

In nowadays the increasing productivity in the shortest possible time and with high quality is undoubtedly one of the biggest challenges for the industry. Recently, the industry has turned to CNC machines very often, since they work automatically and are able to achieve high precision with a high performance. In this sense, the vibration has been presented during the last decades as one of the main limiting factors for the improvement of productivity, especially in machining operations. This work contributes to the reduction of vibrations, proposing the use of optimization methods to minimize vibrations using milling parameters (cutting speed, feed speed, axial penetration and radial penetration) related to the section area. This study presents a theoretical analysis on the materials and tools used throughout the experimental trials, as well as the methods and programs used. During this study, two optimization methods were used: the Taguchi method and the Response Surfaces method.

To test the machine reliability it was found that there was no resonance, ie the ratio of operating frequency to natural frequency is always less than 1 at all operating frequencies used. Since there is no resonance the vibrations do not become as intense as if there were resonances.

The Taguchi method was used to decrease the number of possible combinations and, consequently, the number of tests to be performed. In the course of the tests, the vibrations in the X, Y and Z direction during the test time are recorded. Where it is possible to observe that the combination of the milling parameters which caused the lowest vibration values for the three directions corresponds to the test 12. In this case, the vibration levels for the x, y and z directions were $1,944 \text{ m/s}^2$, $1,949 \text{ m/s}^2$ and $5,818 \text{ m/s}^2$, respectively. Another observation about the vibration level in the Taguchi method is that the mean of the sixteen tests of each direction, the mean value for the x direction is $4,351 \text{ m/s}^2$, the y direction is $4,386 \text{ m/s}^2$ and for z direction is $9,999$

m/s². In other words, the mean values for the x and y are very closed; at the same time for the z has an average value that is more than double of the others.

The Response Surfaces method was used in order to compare the results obtained with the Taguchi method, according to some works referenced in the specialized bibliography, the Response Surfaces method converges more quickly to a (x, y and z) to obtain a generic optimization of the vibrations, it was necessary to obtain input parameters that reduce the vibrations in both senses, and the solution obtained was to perform the Between the y and z axis.

Finally, the Response Surfaces method was used to optimize the results of vibrations verified during the milling that was performed through the tests resulting from the orthogonal matrix of Taguchi, from which were obtained quite satisfactory results in relation to some obtained through the first method.

Keywords: Milling, milling parameters, vibrations, resonance frequency, Taguchi method, Response Surfaces method.

Índice

Agradecimentos	iv
Resumo	vi
Abstract.....	viii
Índice	x
Lista de figuras	xiii
Lista de tabelas	xv
Abreviaturas.....	xvi
Símbolos	xvii
Capítulo 1	1
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos	7
1.3. Estrutura	7
Capítulo 2	9
2. Bases Teóricas	9
2.1. Processos de maquinagem.....	9
2.2. Fresagem	10
2.2.1. Processos de fresagem	11
2.2.2. Tipos de fresadoras	12

2.3.	Parâmetros de maquinagem controláveis	15
2.4.	Aquisição de dados.....	17
2.4.1.	Sensores	17
2.4.2.	Placas e dispositivos DAQ.....	18
2.4.3.	Computadores e software.....	19
2.5.	Software LabVIEW.....	20
2.6.	Método de Taguchi.....	21
2.7.	Método de Superfícies de Resposta	24
2.8.	Vibrações na maquinagem	27
2.8.1.	Vibrações livres e forçadas	28
2.8.2.	Origem das vibrações.....	32
2.8.3.	Influência dos parâmetros de corte sobre a estabilidade.....	34
Capítulo 3	36
3.	Ensaaios experimentais	36
3.1.	Procedimento experimental segundo Taguchi	36
3.2.	Procedimento experimental pelo Método de Superfícies de Resposta	40
3.2.1.	Métodos de otimização usados	40
3.2.2.	Modelação do problema.....	42
3.3.	Materiais e ferramentas utilizados.....	45
Capítulo 4	50
4.	Resultados Obtidos	50
4.1.	Resultados obtidos segundo o método de Taguchi	50
4.2.	Resultados obtidos segundo o método de Superfícies de resposta.....	53
4.3.	Análise das vibrações em frequência	55
Capítulo 5	57
5.	Análise e Discussão de Resultados.....	57

5.1. Método de Taguchi.....	57
5.1.1. Razão sinal-ruído.....	58
5.1.2. Média das vibrações	61
5.1.3. Análise ANOVA.....	63
5.2. Método das Superfícies de Resposta.....	65
Capítulo 6	67
6. Conclusões e propostas para trabalhos futuros.....	67
6.1. Conclusões	67
6.2. Sugestões para trabalhos futuros.....	69
Referências	70
Anexos	73
Anexo I- Dados técnicos Deckel Maho DMC 63V.....	73
Anexo II- Dados técnicos da ferramenta de fresagem.	74
Anexo III- Propriedades da pastilha de fresagem.	74

Lista de figuras

Figura 1: Fresagem cilíndrica e fresagem frontal [24].....	11
Figura 2: Tipos gerais de fresas de topo [25].	12
Figura 3: Fresagem cilíndrica numa fresadora horizontal [17].....	13
Figura 4: Fresagem frontal numa fresadora vertical[17].	14
Figura 5:Fresadora universal [19].	14
Figura 6:Parâmetros de corte [27].	15
Figura 7: Gráfico de Contornos e de superfície de resposta[14].....	27
Figura 8: Trajetória da ferramenta para processo com vibrações[36].....	28
Figura 9: Representação de um sistema com um grau de liberdade[37].....	29
Figura 10: Partes imaginárias e reais da função de transferência [36].....	31
Figura 11: Análise modal experimental [37].....	31
Figura 12: Efeito regenerativo [42].	33
Figura 13: Diagrama.....	41
Figura 14: Instrumentação para medição das frequências próprias (a) Acelerómetro (b) PCB 86C03 e (c) NI 4431 USB	46
Figura 15: Bloco de aço para ensaio.....	46
Figura 16: Fresadora CNC DECKEL MAHO DMC 63V (LTM-IPB).....	47
Figura 17: Posicionamento do acelerómetro triaxial para captação das vibrações durante os ensaios, adaptado de [43].....	48
Figura 18: Ferramenta de fresagem[45]	49
Figura 19: (a) Representação gráfica das pastilhas WNHU[46] e (b) pastilhas montadas na ferramenta.	49
Figura 20: Diagrama.....	51
Figura 21: O S/N da vibração na direção X (a), direção Y (b) e direção Z (c).	61

Figura 22: Gráfico da média das vibrações para cada ensaio pelo método de Taguchi.	61
Figura 23: Gráfico da comparação da média das vibrações entre método de Taguchi e o método de Superfícies de Resposta	62

Lista de tabelas

Tabela. 1: Sensores comuns [28]	18
Tabela. 2: Valores dos parâmetros de corte	37
Tabela. 3: Tabela de Taguchi para seleção da matriz ortogonal	37
Tabela. 4: Matriz L16 de Taguchi	38
Tabela. 5: Matriz L16 de Taguchi com os valores dos parâmetros do fabricante	38
Tabela. 6: Matriz L16 de Taguchi com os valores em unidades SI	39
Tabela. 7: Resultado para 10 dos 16 ensaios	44
Tabela. 8: Resultado para 16 dos 16 ensaios	44
Tabela. 9: Composição química do aço 1.2738 [44].	47
Tabela. 10: Resultados das vibrações	52
Tabela. 11: o módulo M entre os eixos y e z.	54
Tabela. 12: Vibrações obtidos através dos ensaios de verificação e respectivos parâmetros de entrada.	55
Tabela. 13: Frequência	56
Tabela. 14: Resultados dos testes e a relação S/N	58
Tabela. 15: Relação média de S/N para RMS das vibrações	59
Tabela. 16: Resultados da ANOVA para a direção X	63
Tabela. 17: Resultados da ANOVA para a direção Y	64
Tabela. 18: Resultados da ANOVA para a direção Z	65
Tabela. 19: Resultados finais pelo método de superfícies de resposta	66

Abreviaturas

<i>ae</i>	Penetração axial;
<i>ap</i>	Penetração radial;
<i>CNC</i>	Controlo numérico computadorizado (<i>Computer Numeric Control</i>);
<i>D</i>	Diâmetro;
<i>d</i>	profundidade;
<i>fz</i>	Avanço por dente;
<i>MRR</i>	Taxa de remoção do material;
<i>mm</i>	Milímetros;
<i>N</i>	Velocidade de rotação;
<i>RMS</i>	Valor eficaz;
<i>RSM</i>	Método das Superfícies de Resposta;
<i>Tm</i>	Tempo da peça de trabalho;
<i>Vc</i>	Velocidade de corte;
<i>Vf</i>	Velocidade de avanço;
<i>Zn</i>	Número de dentes.

Símbolos

ω	Frequência angular
\bar{y}	Média dos dados observados;
s_y^2	Variância de y ;
n	Número de observações;
x_k	Variáveis independentes;
β_i	Coefficientes a serem estimados;
k	Número de variáveis independentes;
ε	Erro experimental;
η_m	Média total da razão S/N;
ζ	Amortecimento
$\bar{\eta}_i$	Razão S/N média para o nível ótimo;
$\hat{\eta}$	Razão S/N estimada.
ω_n	Frequência natural

Capítulo 1

1. Introdução

1.1. Enquadramento

As tecnologias envolvidas em operações por arranque de apara, também conhecidas por maquinagem, têm sofrido enormes avanços nas últimas décadas e as máquinas têm apresentado enormes mudanças desde a incorporação do controlo numérico. Precisão, flexibilidade e produtividade são constantemente aperfeiçoadas com soluções inovadoras para atender às exigências do mercado garantindo deste modo uma posição aceitável num mercado onde a concorrência tenta, de várias formas, chegar mais longe, procurando sempre aumentar a qualidade e reduzir o prazo de entrega, satisfazendo assim as exigências do cliente.

As máquinas-ferramentas de arranque de apara são muito utilizadas no processo de maquinagem, destinadas ao acabamento de peças pela remoção de material não necessário, este processo permite a produção de peças de forma complexa com um bom acabamento superficial, bem como com um elevado rigor geométrico e dimensional. Para isso é necessário que a estrutura das máquinas ferramentas apresente uma elevada rigidez estática à flexão e à torção, características dinâmicas apropriadas (bom amortecimento), estabilidade dimensional, bem como baixo coeficiente de dilatação térmica.

Relacionadas com as características dinâmicas estão as vibrações geradas durante o processo de maquinagem pois podem comprometer o acabamento superficial e as tolerâncias dimensionais da peça, bem como o desgaste e fratura das ferramentas de corte.

Contudo, os avanços no estudo dos efeitos da vibração na maquinagem só foram possíveis graças ao aprofundamento do conhecimento dos fundamentos físicos e mecânicos do arranque da apara, especialmente na relação entre a ferramenta de corte e material a cortar. Nesse sentido, foram desenvolvidas ferramentas de corte com diferentes geometrias e materiais mais adequados a cada tipo de material a maquinar. Para efetuar estes estudos têm sido desenvolvidos sensores e técnicas de processamento de sinais para diagnosticar aspetos de acabamento superficial, integridade e dimensão superficial da peça, deteção do desgaste ou quebra da ferramenta de corte, identificação de vibrações em maquinagem ou ainda a análise de componentes da máquina [1].

Apesar destes avanços tecnológicos, as vibrações na maquinagem continuam a ter um efeito nefasto, limitando a produtividade e a qualidade superficial das peças [2]. As primeiras investigações de vibrações em máquinas-ferramentas apareceram no início do século XX como resultado do aumento das taxas de remoção de material. Neste mesmo século, as máquinas-ferramentas experimentaram um avanço considerável tornando-se mais potentes, precisas, rígidas e com elevado grau de automatização. Este crescimento foi estimulado pelo desenvolvimento da indústria de forma geral, mas especialmente em alguns segmentos, como aeroespacial, moldes e matrizes, bem como a automóvel. Com estas melhorias na indústria de fabrico por arranque de apara, novas limitações e desafios se têm apresentado. Considerando o facto de que as máquinas ferramentas não são corpos rígidos, que podem sofrer deformações, sendo que as suas formas geométricas em função das forças internas ou externas, e podem apresentar deslocamentos relativos entre os componentes, assim a sua análise estrutural passa a ser mais complexa que o de uma estrutura que pode ser um corpo rígido [3]. Devido a estas forças internas e externas a estrutura da máquina tende a mover-se, e este tipo de movimento é dominado pelas características dinâmicas da estrutura, as quais determinam os modos de vibração mecânica.

Em 1904, Taylor estabeleceu que o conceito de vibração seria o mais delicado e obscuro de todos os problemas enfrentados nas operações de maquinagem, sendo que, atualmente, muitos autores ainda continuam a referir que as vibrações são um limitador do processo de maquinagem e um dos desafios mais importantes a serem superados.

A maquinagem pode resultar em três diferentes tipos de vibrações que podem aumentar com a baixa rigidez dinâmica de um ou mais elementos da estrutura, como o eixo-árvore, o mandril

da ferramenta ou mesmo a ferramenta de corte. Estes três tipos de vibração podem ser descritos por vibrações livres, forçadas e auto-excitadas [4]. As vibrações livres ocorrem quando um sistema mecânico é transferido de sua condição de equilíbrio e a sua vibração surge livremente sem excitação externa. Pode-se citar, como exemplo, uma operação de maquinagem em que uma coordenada é programada incorretamente e ocorre uma colisão entre a ferramenta e a peça ou mesmo após a quebra de uma aresta de corte de uma fresa de topo. As vibrações forçadas aparecem devido a fontes externas, que podem ser originárias da entrada das arestas de corte de uma fresa de topo no material a ser removido da peça ou ainda devido à falta de balanceamento do eixo-árvore da máquina. Já as vibrações auto-excitadas, conhecidas pelo termo em inglês *chatter*, têm a propriedade de retirar energia do sistema ao iniciar e depois aumentar o nível de energia empregado devido às interações da ferramenta com a peça durante o processo de maquinagem [5]. Este tipo de vibração faz com que o processo fique instável e, portanto, é o mais indesejável e difícil de controlar. Em ambientes industriais ainda é comum que utilizadores de máquinas-ferramentas selecionem parâmetros de corte conservadores, ou seja, muito inferiores aos limites de resistência mecânica da ferramenta e abaixo dos limites do binário e potencia da máquina-ferramenta, justamente para evitar vibrações e em alguns casos operações de polimento manual são utilizadas para retirar as marcas residuais de vibração no acabamento final.

Prever o aparecimento de vibrações durante o processo de maquinagem é essencial para garantir a melhor aplicação dos parâmetros de corte e conseqüentemente, maximizar a produtividade de um determinado sistema máquina-fixação-ferramenta. A previsão da estabilidade da maquinagem, que geralmente produz um diagrama que relaciona a rotação do eixo-árvore com a profundidade de maquinagem limite, conhecido como diagrama de lóbulos de estabilidade é um método muito utilizado para evitar o aparecimento de vibrações. Para sua obtenção, no entanto, são necessárias informações de características do material a ser maquinado, da geometria do corte e da dinâmica do sistema [6]. Sabendo que é um método que possibilita a escolha correta dos melhores parâmetros de corte de um determinado processo de maquinagem e sistema máquina-fixação-ferramenta, o diagrama de lóbulos não permite aumentar os limites de estabilidade do processo de maquinagem a que se refere, pois não existe modificação nas características dinâmicas do sistema ou controle do mecanismo que desencadeia o fenómeno de regeneração das vibrações autoexcitadas.

Vários estudos vêm sendo conduzidos ao longo dos últimos anos com o objetivo de aumentar os limites de estabilidade do processo de maquinagem, o que pode ser realizado basicamente de dois modos: de forma passiva, ou de forma ativa. Os métodos passivos, normalmente, alteram as características dinâmicas do sistema máquina-fixação-ferramenta, aumentando sua rigidez dinâmica, ou seja, sua capacidade de resistir ou absorver vibrações, melhorando os limites de estabilidade no processo de maquinagem de maneira geral [7]. Em contrapartida, nos métodos ativos as vibrações são vigiadas durante o processo de maquinagem e as características dinâmicas do sistema máquina-fixação-ferramenta podem ser alteradas de acordo com a necessidade. Nestes processos existem vantagens e desvantagens na aplicação dos dois modos de supressão de vibrações. Entre elas pode-se destacar que o método passivo possui como vantagens o facto de a sua aplicação ser geralmente mais simples e com menor custo, uma vez que não existe a necessidade de medição da vibração durante a maquinagem ou de uma atuação em tempo real, porém a desvantagem pode ser que em alguns casos pode transformar um processo estável em instável, dependendo da forma como interage com o sistema ou mesmo a limitação na melhoria da estabilidade, pois não atua no sistema proporcionalmente à necessidade do processo. Os métodos ativos possuem algumas vantagens em relação ao passivo. Onde é possível destacar algumas que, por monitorizar os níveis de vibração, este não atua em processos que possuem níveis de vibração considerados estáveis [8]. Mesmo assim, permite atuar no sistema de forma proporcional à necessidade apresentada, tendo uma abrangência maior do que soluções de controle passivo. Entretanto, o método ativo possui a desvantagem de ser, geralmente, de maior custo. Havendo a necessidade de medição e atuação durante a maquinagem e, portanto, são necessários sensores e atuadores. Essa aplicação também requer métodos mais complexos, como requisitos de controlo [1]. Contudo, com o avanço nas tecnologias de sensores e métodos computacionais, as técnicas ativas de supressão de vibrações têm se mostrado cada vez mais viáveis economicamente para a aplicação industrial e por isso passam a ser ainda mais exploradas no âmbito académico.

Uma outra maneira de reduzir ou eliminar as vibrações no processo de maquinagem é por meio da interrupção do mecanismo de regeneração ou autoexcitação ao invés de se alterar as características dinâmicas do sistema máquina-fixação-ferramenta. Para isso é necessário a atuação em parâmetros do processo de maquinagem como a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de maquinagem. Esse método pode ser utilizado de forma ativa ou passiva. Como a

alteração dos parâmetros de maquinagem, pode influenciar as tolerâncias dimensionais e geométricas da peça, o que pressupõe os maiores cuidados com a amplitude das variações de tais parâmetros. Possui a vantagem de não necessitar de adição de mecanismos de atuação capazes de alterar o sistema dinâmico, o que o torna de forma geral uma solução que necessita menor investimento financeiro e menor complexidade de aplicação, visto que não são necessárias alterações estruturais na máquina-ferramenta. A abordagem que se adotou para a realização deste trabalho foi baseada neste método, isto é, foram implementados um conjunto de alterações, de forma sistemática, de alguns parâmetros de maquinagem e avaliou-se o nível de vibrações na árvore da máquina-ferramenta, bem como, o grau de qualidade do acabamento superficial da peça maquinada. Contudo, para minimizar o número de ensaios experimentais utilizaram dois métodos de otimização, que foram o método de Taguchi e o método de Superfície de Resposta.

O método de Taguchi é fundamentado na concepção estatística de ensaios que podem satisfazer economicamente o processo para otimização do fabrico de uma peça. Uma das vantagens deste método é que vários fatores são considerados de uma vez, incluindo os fatores de ruído [9], [10]. Este método é considerado uma ferramenta muito poderosa, necessitando de ser combinada com outras ferramentas estatísticas, como a análise da variância (ANOVA), análise de componentes principais (PCA), para analisar os resultados do método de Taguchi.

Têm sido feitos vários estudos para otimizar os parâmetros controláveis mais comuns na maquinagem, como a velocidade de corte, velocidade de avanço, a penetração axial e radial [11]. Ao alterar esses parâmetros o principal objetivo é a redução das vibrações, através da aplicação do método baseado em Taguchi e a maior razão sinal-ruído para a vibração da máquina-ferramenta.

Tal como o método de Taguchi, também o Método de Superfícies de Resposta (RSM) é um poderoso método de otimização. O método de Superfícies de Resposta revela-se um método muito importante na formulação, desenvolvimento e análise de produtos científicos. Este é um método bastante eficaz na melhoria de estudos e produtos já existentes, e normalmente é utilizado em muitos setores industriais onde há espaço para o desenvolvimento e otimização de processos de fabrico [12].

O método de Superfícies de Resposta foi introduzido por GEP Box e KB Wilson em 1951 quando propuseram a utilização de polinómios do primeiro grau para aproximar a variável da resposta. Para obter uma resposta ótima através deste método é necessário utilizar uma sequência de experiências planeadas, onde Box e Wilson ainda sugeriram o uso de um modelo polinomial do segundo grau para o efeito. Através destes autores sabe-se que este modelo é apenas de aproximação e não de certeza, sendo bastante utilizado porque é fácil de estimar e aplicar, mesmo quando pouco se sabe sobre o processo.

Inúmeros trabalhos relacionados com a metodologia de superfícies de resposta têm aparecido nos tempos mais recentes, grande parte produzidos por Box, juntamente com seus colaboradores. Dentre os trabalhos que abordam esse tema estão os de Hinkelmann e Kempthorne (1994), Grosh e Rao (1996), Mason, Gunst e Hess (2003), Montgomery e Myers (2005), Montgomery e Anderson-Cook (2009), cada um com abordagens específicas mostrando a viabilidade do emprego da metodologia [10], [13]–[15].

Os últimos avanços da metodologia de superfícies de resposta aparecem ligados à arte e ciência da planificação que engloba quer a capacidade de integrar todo o conhecimento não estatístico, a qual possa ser útil à definição dos objetivos e uma escolha experimental dos fatores e das variáveis de resposta, quer os aspetos logísticos no decorrer de uma experiência. Hoje a metodologia de superfícies de resposta é usada na generalidade na indústria e nos centros de investigação industrial como a nanotecnologia, exigem o rigor e precisão que esta metodologia permite. Esta metodologia é encarada como um processo completo, global, de planificação de experiências produtivas nos vários setores da atividade económica; um meio de controlo contínuo de garantia de conformidade aos objetivos de qualidade fixados [16].

Durante uma fase inicial este processo foi aplicada na indústria química com um considerável sucesso, observa-se que durante os últimos 20 anos, esta encontrou uma aplicação extensiva numa enorme variedade de indústrias, bem longe das suas origens, processo químico, destacando-se a sua importância em áreas que incluem os semicondutores e produtos eletrónicos, maquinaria, corte de ligas ferrosas, processos de fusão, nanotecnologia, otimização para análise numérica e na indústria automóvel, entre outros. Alguns dos desenvolvimentos mais recentes podem ser lidos em Myers e Montgomery [10], [14], [15].

1.2. Objetivos

No presente trabalho, propõe-se um método para otimizar os parâmetros de maquinagem de forma a minimizar as vibrações nos processos de fresagem, por meio da variação dinâmica dos parâmetros relacionados com a velocidade de rotação, velocidade de avanço, penetração axial e penetração radial.

O Objetivo proposto será abordado por meio das seguintes etapas:

- Determinar a frequência de ressonância da ferramenta de corte utilizada, na fresadora CNC do Laboratório de Tecnologia Mecânica(IPB).
- Caracterizar os principais parâmetros de maquinagem que influenciam as vibrações na árvore da máquina-ferramenta durante o processo de corte da apara. Para diminuir o número de ensaios foram utilizados dois algoritmos de otimização: método de Taguchi e de Superfície de Resposta.
- Análise estatística dos dados recorrendo à análise da variância (ANOVA). Determinar os principais parâmetros que influenciam a vibração da máquina CNC, bem como, estabelecer a relação entre os parâmetros nas características de qualidade a analisar.
- Comparação da eficiência dos dois métodos de otimização.

1.3. Estrutura

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

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

O segundo capítulo apresenta uma base teórica que descreve todas as escolhas efetuadas ao longo do trabalho, no qual se apresenta uma breve descrição dos principais processos de maquinagem, associados a propriedades de ferramentas de corte, principalmente a fresagem. É também feita a descrição dos métodos de otimização utilizados ao longo do trabalho (método

de Taguchi e método de superfícies de resposta), bem como uma análise teórica da influência dos diferentes parâmetros de maquinagem nas vibrações da máquina-ferramenta.

No terceiro capítulo, faz-se a descrição completas de todos as escolhas efetuadas no procedimento experimental segundo Taguchi, bem como o procedimento experimental pelo método de superfícies de resposta. Depois disso e ainda no terceiro capítulo descrevem-se algumas características dos materiais e ferramentas utilizadas neste estudo.

No quarto capítulo expõe os resultados obtidos através dos dois métodos de otimização.

No quinto capítulo é efetuada a análise dos ensaios, bem como algumas conclusões.

Por fim, no sexto capítulo apresentam-se as principais conclusões resultantes do desenvolvimento deste trabalho, são feitas também algumas sugestões de trabalho futuro.

Capítulo 2

2. Bases Teóricas

Este capítulo estuda alguns conceitos teóricos importantes para a correta compreensão do estudo desenvolvido ao longo do trabalho. Primeiro vai-se apresentar uma breve descrição dos processos de maquinagem, seguindo-se a descrição dos seus principais parâmetros e técnicas, bem como a descrição das técnicas de Taguchi, o método da Superfície de Resposta e termina com o estudo das vibrações

2.1. Processos de maquinagem

Os processos de maquinagem (corte por arranque de aparas) são processos de fabricação que normalmente são definidos como processos de remoção de material que resultam do movimento relativo entre a peça a maquinar e a ferramenta de corte [17].

Os processos de maquinagem com arranque de aparas [18]:

- Torneamento;
- Furação;
- Fresagem;
- Aplainamento;
- Serragem;
- Retificação;
- Electro-erosão.

Na maquinagem o movimento relativo entre a peça e a ferramenta é composto, e pode ser exposto por movimentos simples com correspondência nos parâmetros processuais das máquinas de forma que para gerar uma superfície é necessário, no mínimo dois movimentos simples, o movimento de corte e o movimento de avanço [17].

O movimento de corte é o movimento principal da máquina, mas é sempre um movimento simples, sendo que dependendo do processo de maquinagem poderá ser:

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

O movimento de avanço é o que corresponde a uma mudança de posição relativa da peça e da ferramenta, durante a geração de uma superfície de corte. O movimento de avanço pode ser composto, capaz de se decompor nos movimentos simples e correspondentes.

Finalmente considera-se o movimento de penetramento, o que corresponde à espessura da camada de material a retirar durante o corte.

2.2. Fresagem

A fresagem é uma operação em que o material é levantado por uma ferramenta rotativa, fresa, de aresta múltipla [19], este método consiste em mecanizar superfícies, geralmente planas, e obtenção de peças de formas muito diversas [20].

A fresagem envolve a realização de operações simples de facejamento e contorno, mas também a maquinagem de uma grande variedade de formas complexas [19], tais como ranhuras, encaixes, hélices, etc. Todas estas operações podem ser realizadas através da fresa, sendo que esta pode ter diversas formas em consequência da diversidade de consequência de cada caso. Sendo que em geral a fresa é uma ferramenta múltipla, quer dizer que é uma ferramenta que é composta por diversos fios de corte e disposta de forma radial por uma circunferência [20]. Cada aresta

de corte arranca uma pequena quantidade de material por cada rotação do eixo onde a ferramenta é fixada, conseguindo o objetivo final, que é mecanizar a superfície [17], [20].

O tipo de operações a efetuar no processo de fresagem relaciona-se com o tipo de máquina a utilizar. Na figura 2 podem observar-se alguns exemplos de peças fresadas.

2.2.1. Processos de fresagem

A fresagem pode decorrer de dois modos distintos, de forma cilíndrica ou tangencial, e frontal ou plano, tal como se pode ver na figura 1 [19]. Outros métodos de fresagem que existem podem ser considerados variações desses dois e dependem do tipo de peça e ferramenta utilizados [21].

A fresagem cilíndrica, ou tangencial caracteriza-se pelo facto do eixo da fresa se encontrar disposto de forma paralela à superfície de trabalho da peça [22], onde a operação de corte é concretizada pela zona periférica da ferramenta [19], sendo que a secção transversal da superfície fresada corresponde ao contorno da fresa ou à combinação de fresas utilizadas [21], [23].

A fresagem frontal ou de topo o eixo da fresa é perpendicular à superfície a maquinar. Neste processo o corte pode ser realizado pelo topo da ferramenta, e pela periferia da mesma [19].

A figura 1 representa estes dois tipos de fresagem.

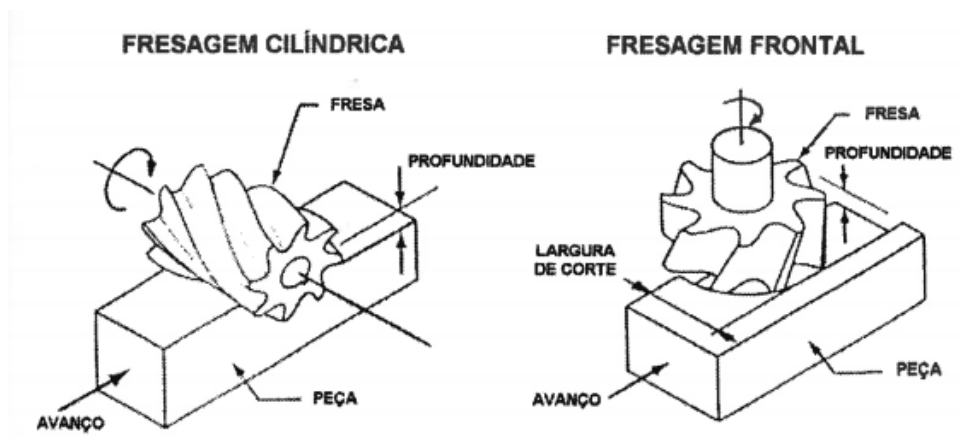


Figura 1: Fresagem cilíndrica e fresagem frontal [24].

É de salientar que sempre que possível, devem maquinar-se as superfícies planas pelo processo de maquinagem frontal ou de topo [18].

Verifica-se ainda a existência de dois tipos de movimentos da fresa em relação à peça. Estes diferentes movimentos originam, conseqüentemente dois tipos de fresagem distintos, a concordante “a puxar”, onde a fresa gira a favor do avanço, e a discordante “a empurrar”, onde a fresa gira contra o avanço [17].

A fresagem de topo é um processo contínuo, circunferencial e frontal que emprega uma fresa de topo. Ele é utilizado com vantagem na execução de superfícies de forma livre, bem como rasgos e cortes de todos os tipos e tamanhos. As fresas de topo possuem pastilhas tanto na sua periferia quanto na sua face. Podem ser produzidas com topo simples ou duplo, haste e corpo cilíndricos ou cônicos, em diversos diâmetros e comprimentos, possuir dois, três, quatro, seis ou mais canais, sendo que na maioria estes são helicoidais e, em alguns casos, retos [23]. O topo pode ser reto, semiesférico ou toroidal. Construtivamente as fresas de topo podem ser inteiriças, com insertos ou gumes brasados, ou ainda com insertos ou pastilhas intercambiáveis [21], [23], [25], como mostra na figura 2.

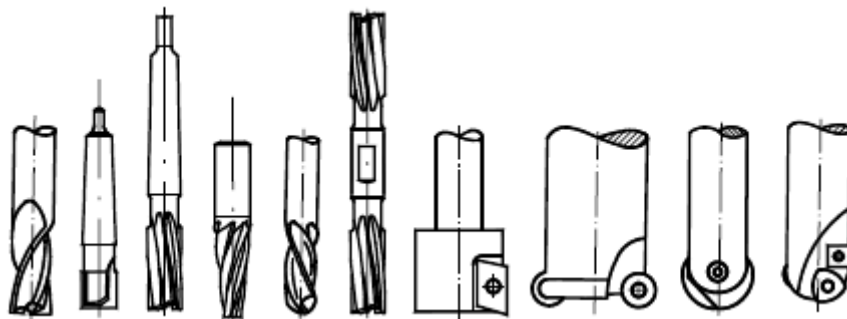


Figura 2: Tipos gerais de fresas de topo [25].

2.2.2. Tipos de fresadoras

As fresadoras têm todas as partes construtivas parecidas entre si, mas distinguem-se em função da posição da árvore principal:

- Nas fresadoras horizontais a posição da árvore porta-fresas está apoiada na posição horizontal. Presta-se para todo o tipo de trabalhos de fresagem. Na figura 3 é possível observar a representação esquemática de fresadora horizontal e o seu princípio de funcionamento.

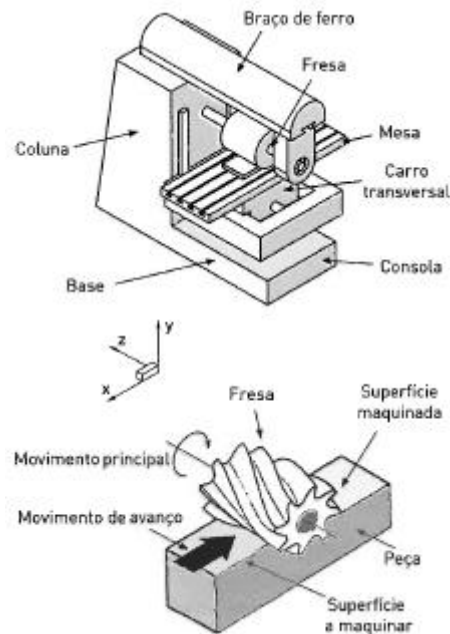


Figura 3: Fresagem cilíndrica numa fresadora horizontal [17].

- As fresadoras verticais têm a posição normal da árvore porta-fresas montada na posição vertical. Executa, preferencialmente, trabalhos de fresagem frontal. O cabeçote é giratório, de tal maneira que a árvore pode também tomar uma posição inclinada, tal como se pode ver na figura 4.

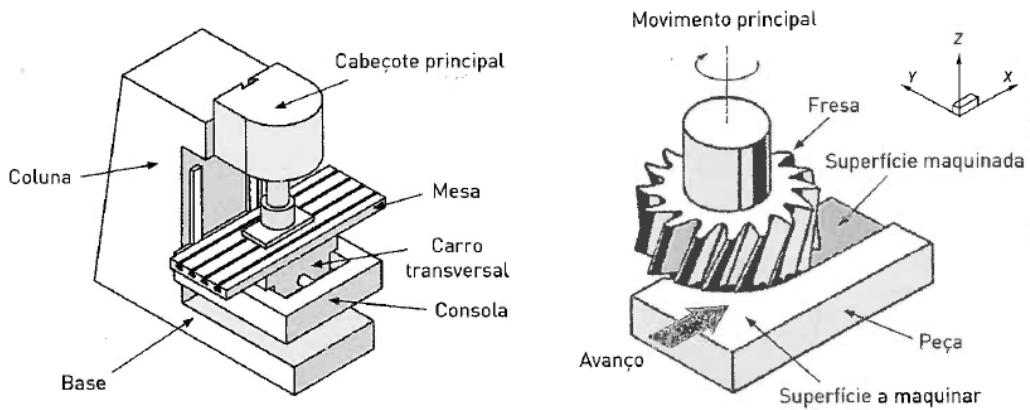


Figura 4: Fresagem frontal numa fresadora vertical[17].

- Nas fresadoras universais a árvore pode tomar qualquer orientação no espaço, ou seja, a mesa de fresar além de ter movimentos verticais, longitudinais e transversais, pode rodar para a esquerda ou para a direita, observar a figura 5. Assim permite a execução de muitos trabalhos, como a fresagem de ranhuras helicoidais. Estas fresadoras podem ser do tipo vertical ou horizontal.

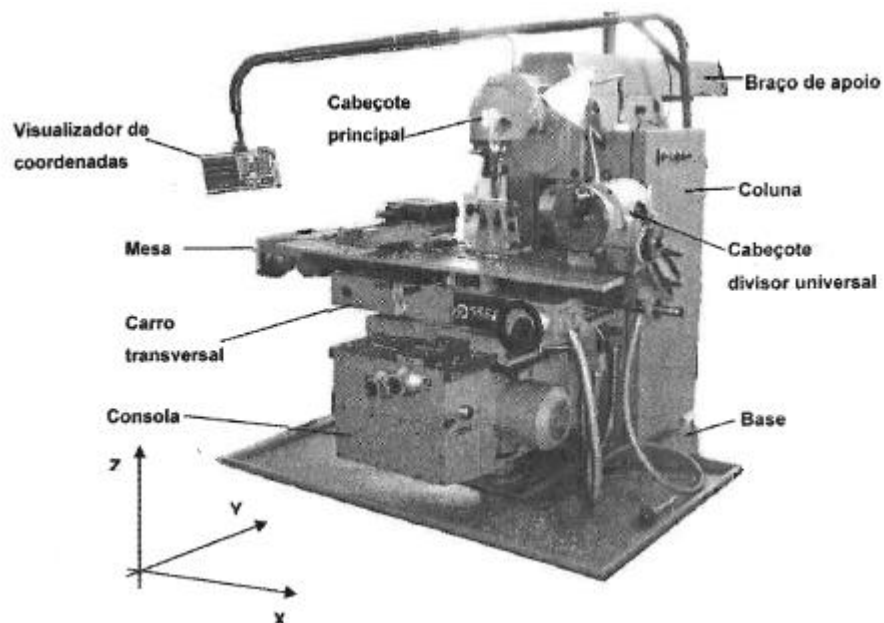


Figura 5:Fresadora universal [19].

2.3. Parâmetros de maquinagem controláveis

Sabendo que este trabalho tem por base estudar a influência dos parâmetros de maquinagem nas vibrações da ferramenta e determinar qual a combinação ótima de parâmetros para minimizar as vibrações na fresa e garantir, deste modo, um melhor acabamento superficial da peça e a máxima vida da ferramenta. Nesse sentido, selecionaram-se os seguintes parâmetros de maquinagem para controlo:

- Velocidade de corte (v_c);
- Velocidade de avanço (v_f);
- Penetração Axial (a_e);
- Penetração Radial (a_p)[26];

Para definir as condições úteis de fresamento existem algumas equações que são descritas através do diagrama esquemático da figura 6 [27].

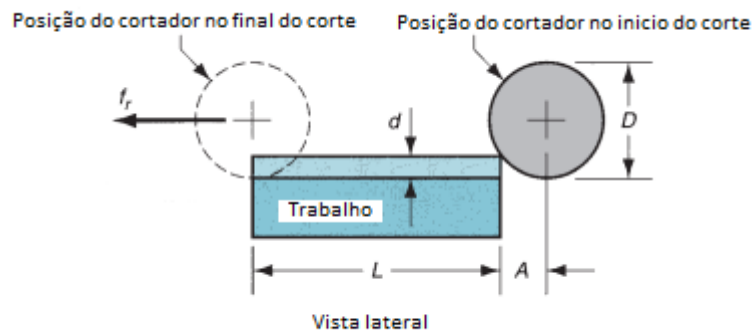


Figura 6:Parâmetros de corte [27].

Segundo Groover [27], a velocidade de corte (v) é determinada pelo diâmetro (D) de uma fresa e é convertida em velocidade de rotação do eixo (N), que é mais fácil de controlar utilizando a equação (1).

$$N = \frac{v}{\pi * D} \quad (1)$$

O tipo de fresa vai influenciar a velocidade de avanço, profundidade de corte, qualidade de acabamento, potência da máquina e material da fresa e da peça, definida em [mm/min]. Sendo que este valor se determina através da equação (2).

$$f_r = N * n_1 * f \quad (2)$$

Onde:

f_r = Velocidade de avanço [mm/min];

N = Velocidade de rotação [rpm];

n_1 = Número de dentes;

f = Avanço por dente [mm/t]

Outro parâmetro importante é a taxa de remoção de material (MRR), que pode ser determinado com a equação (3), ou seja, usando o produto da área transversal do corte e a taxa de alimentação.

$$MRR = w * d * f_r \quad (3)$$

Onde:

w = Largura;

d = Profundidade;

f_r = Velocidade de avanço;

Para se determinar o tempo que é necessário para fresar uma peça com o comprimento L , deve-se contabilizar a distância de aproximação necessária para envolver completamente a parte de corte. Considerando o caso da espessura de fresagem e do diâmetro da ferramenta representados na figura 6, o tempo para executar a operação que é preciso para atingir a profundidade de corte completo é dado pela equação (4).

$$A = \sqrt{d(D - d)} \quad (4)$$

Onde:

A = Distância [mm]

d = profundidade de corte [mm].

D = diâmetro da fresa [mm].

Por fim, utilizando a equação seguinte determina-se o tempo que demora a maquinar a peça de trabalho T_m .

$$T_m = \frac{L + A}{f_r} \quad (5)$$

2.4. Aquisição de dados

A aquisição de dados (DAQ) é o processo de medição de um fenômeno elétrico ou físico, como tensão, corrente, temperatura, pressão ou som, com o uso de um computador. Um sistema DAQ é formado por sensores, hardware de aquisição e medição de dados e um computador com software programável. Em comparação com os sistemas tradicionais de medição, os sistemas DAQ baseados em PC exploram a capacidade de processamento, produtividade, sistemas de visualização e recursos de conectividades dos computadores padrão da indústria. Com isso, temos uma solução de medição mais poderosa, flexível e de melhor custo-benefício [28].

2.4.1. Sensores

A medição de um fenômeno físico, como a temperatura de uma sala, intensidade de uma fonte luminosa ou força aplicada a um objeto, começa pelo sensor. Um sensor, também chamado de transdutor, converte um fenômeno físico em um sinal elétrico mensurável. Depen-

dendo do tipo de sensor, sua saída elétrica pode ser uma característica de tensão, corrente, resistência ou outro atributo elétrico que varie com o tempo. Alguns sensores podem exigir componentes e circuitos adicionais para fornecerem um sinal que possa ser lido com exatidão e segurança por um dispositivo DAQ, alguns tipos de sensores e a sua função estão expressos na Tabela 1[28].

Tabela. 1: Sensores comuns [28]

Sensor	Fenómeno
Termopar, RTD, termistor	Temperatura
Fotossensor	Luz
Microfone	Som
Strain gage, transdutor piezoelétrico	Força e pressão
Potenciômetro, LVDT, ecoder óptico	Posição e deslocamento
Acelerômetro	Aceleração
Eletrodo de pH	pH

2.4.2. Placas e dispositivos DAQ

O hardware DAQ atua como a interface entre um computador e sinais do mundo exterior. Ele funciona basicamente como um dispositivo que digitaliza sinais analógicos de entrada de forma que um computador possa interpretá-los. Os três componentes principais de um dispositivo DAQ usados para medir um sinal são os circuitos eletrônicos de condicionamento de sinais, conversor analógico-digital (ADC) e o barramento do computador. Muitos dispositivos DAQ contêm outras funções, para a automação de sistemas e processos de medição. Por exemplo, conversores digital-analógico (DACs) fornecem sinais analógicos, linhas de E/S digital fornecem sinais digitais em suas entradas e saídas e os contadores/temporizadores contam e geram pulsos digitais[28].

Os principais componentes de medição de um dispositivo DAQ:

- Condicionamento de sinais: os sinais dos sensores ou do mundo externo podem ser ruidosos demais ou demasiadamente perigosos para serem medidos diretamente. Os circuitos de condicionamento de sinais colocam o sinal em um formato adequado para

a entrada em um ADC. Esses circuitos podem incluir amplificação, atenuação, filtragem e isolamento. Alguns dispositivos DAQ contêm condicionamento de sinais projetado para a medição com tipos específicos de sensores.

- Conversor analógico-digital (ADC): sinais analógicos dos sensores devem ser convertidos em digitais antes de serem manipulados por equipamentos digitais, como os computadores. Um ADC é um chip que fornece a representação digital de um sinal analógico em um instante do tempo. Na prática, os sinais analógicos variam continuamente ao longo do tempo e um ADC coleta "amostras" periódicas de um sinal em uma taxa predefinida. Essas amostras são transferidas por um barramento ao computador, onde o sinal original é reconstruído a partir das amostras do software.
- Barramento do computador: os dispositivos DAQ são conectados ao computador por um slot ou porta. O barramento do computador atua como interface de comunicação entre o dispositivo DAQ e o computador, para transmitir instruções e dados de medição. São oferecidos dispositivos DAQ para os barramentos de computador mais comuns, incluindo USB, PCI, PCI Express e Ethernet. Mais recentemente, surgiram dispositivos DAQ para comunicações sem fio no padrão 802.11 Wi-Fi. Há muitos tipos de barramentos; cada um deles oferece diferentes vantagens para diferentes tipos de aplicações [28].

2.4.3. Computadores e software

Um computador com software programável controla a operação do dispositivo DAQ, sendo usado para o processamento, visualização e armazenamento de dados de medição. Diferentes tipos de computadores são usados em diferentes tipos de aplicações. Um desktop pode ser usado em um laboratório, por sua capacidade de processamento, um laptop pode ser usado em campo, por sua portabilidade, ou um computador industrial pode ser usado em uma fábrica, por sua robustez.

Componentes de software em um sistema DAQ:

Software de driver: O software de driver permite que o software de aplicação interaja com um dispositivo DAQ. Ele simplifica a comunicação com o dispositivo DAQ, abstraindo comandos de hardware de baixo nível e a programação no nível do registro. Tipicamente, o software de driver para a aquisição de dados expõe uma interface de programação de aplicações (API) que é usada em um ambiente de programação para a construção de software de aplicação.

Software de aplicação: O software de aplicação facilita a interação entre o computador e o usuário na aquisição, análise e apresentação dos dados da medição. Ele é uma aplicação pré-construída, com funções predefinidas, ou um ambiente de programação destinado ao desenvolvimento de aplicações com funções customizadas. Aplicações customizadas são muitas vezes usadas para automatizar diversas funções de um dispositivo DAQ, executar algoritmos de processamento de sinais e exibir interfaces de usuário customizadas [28].

2.5. Software LabVIEW

O programa LabVIEW é uma linguagem de programação gráfica originária da National Instruments [29] e é utilizado para uma grande variedade de aplicações e setores da indústria, fator pelo qual se torna um desafio conseguir descreve-lo [28]. A primeira versão surgiu em 1986 para o Macintosh, e atualmente existem também ambientes de desenvolvimento gráfico integrados para os sistemas Operacionais Windows, Linux e Solaris [29].

O LabVIEW é um ambiente de desenvolvimento altamente produtivo, para a criação de aplicações customizadas e que interagem com os dados ou sinais do mundo real, em áreas como ciência e engenharia, sendo que os principais campos de aplicação são a realização de medições [28], [29]. Com esta ferramenta é possível elaborar projetos com maior qualidade, podendo ser completados em menos tempo e sem a necessidade de tanta mão de obra. A programação é feita de acordo com o modelo de fluxo de dados, o que oferece a esta linguagem vantagens para a aquisição de dados e para a sua manipulação [29], a produtividade é o principal benefício, mas essa é uma afirmação muito ampla e genérica, porque o que realmente têm atraído engenheiros e cientistas para esse produto desde 1986, e o fato de no final do dia, engenheiros e cientistas

terem um trabalho a fazer, ou seja, terem que deixar algo pronto, assim sendo necessitam mostrar os resultados do que fizeram, necessitando ferramentas que os ajudem a fazer isso. Entre diferentes indústrias, as ferramentas e componentes que eles precisam para atingir o sucesso variam muito, e pode ser um desafio assustador encontrar e utilizar em conjunto todos esses itens dispersos. O LabVIEW é único, pois faz com que essa grande variedade de ferramentas esteja disponível em um único ambiente, garantindo que a compatibilidade é apenas uma questão de desenhar conexões entre funções.

O LabVIEW, por si só, é um ambiente de desenvolvimento de software que contém numerosos componentes, dos quais muitos são necessários para qualquer tipo de aplicação de teste, medição ou controle, a essência do programa é a linguagem de programação G, com o uso desta linguagem podem-se aliar rapidamente tarefas como a aquisição de dados, análise e operações lógicas, e ainda compreender como os dados estão sendo modificados. O programa além de exibir os dados ao mesmo tempo em que sua aplicação está sendo executada, também contém diversas opções para geração de relatórios com base nos dados testados ou adquiridos. Você pode enviar relatórios simples diretamente para uma impressora ou um arquivo HTML, gerar documentos do Microsoft Office automaticamente ou integrar essas informações com o NI DI-Adem, para relatórios mais avançados. Painéis frontais remotos e suporte para Web services permitem que você publique os dados através da Internet com o servidor Web já embutido, sendo este um ambiente gráfico que é tão complexo quanto se precisar que ele seja [28].

2.6. Método de Taguchi

O método de Taguchi foi desenvolvido a partir da década de 1950, por Genichi Taguchi que foi um engenheiro e estatístico que nasceu em Tokamachi no Japão (1 de janeiro de 1924 - 2 de junho de 2012), este desenvolveu uma metodologia que utilizava a aplicação de métodos estatísticos tendo como objetivo melhorar a qualidade dos produtos manufaturados, estes métodos trouxeram controvérsias em relação aos métodos obtidos anteriormente por alguns estudiosos mais convencionais, mas mesmo assim a inovação de Taguchi trouxe conceitos e extensões que apresentam o objetivo deste conhecimento [30].

Desde 1950, que foram introduzidos diversos conceitos estatísticos, que têm sido úteis à engenharia no campo da melhoria da qualidade. Um dos principais intervenientes neste processo foi o Dr. Genichi Taguchi que criou um método conhecido mundialmente como Método Taguchi. Após a 2ª Guerra Mundial, as forças aliadas concluíram que a qualidade dos telefones japoneses era muito pobre e insuficiente para os propósitos pretendidos na altura. Para melhorar o sistema, os aliados propuseram aos Japoneses a criação de um centro de investigação semelhante aos Laboratórios Bell nos Estados Unidos. Fundou-se assim a ELC (Electrical Communication Laboratories) com o Dr. Taguchi como responsável da produção e da qualidade. Ele constatou que existiam muitos recursos despendidos na engenharia de experiências e na fase de testes. Mas muito pouco ênfase era colocada na sistematização e melhoria dessas fases. O Dr. Taguchi começou a desenvolver novos métodos para otimização dos processos de engenharia de experiências. A maior contribuição do método que criou, reside não só na formulação matemática dos desenhos de experiências, mas principalmente na filosofia de qualidade que acompanha o método. A sua abordagem é mais do que um método de desenho de experiências, é um conceito que produz uma disciplina original e poderosa na melhoria de qualidade completamente diferente das práticas tradicionais. Desde então muitos fabricantes Japoneses passaram a utilizar os seus métodos para melhorar a qualidade do produto e processo com grande sucesso. Apesar de no ocidente o método dar alguma controvérsia no que respeita à sua origem e também às próprias considerações matemáticas, este conseguiu transformar significativamente a engenharia de qualidade nos EUA. Este método consiste em desenhar e parametrizar a qualidade de um produto ou processo com base no planeamento de experiências, enquanto que as outras práticas coincidem apenas a 21 inspeção final do produto/processo. O próprio Taguchi classificou o método de "Off-line quality control", pois a sua aplicação é realizada recorrendo a uma pequena amostra proveniente de uma fase experimental, que tem níveis de qualidade com uma variância elevada quando comparada com as peças obtidas já em linha de produção ("on-line quality control"). A qualidade ideal seria, no limite, obtida fazendo com que todas as combinações possíveis de regulação do processo fossem testadas e analisadas. No entanto, isso iria implicar longos tempos de preparação e obviamente custos insuportáveis [31].

O método de taguchi é considerado um método de desenho de experiências, sendo este um teste ou uma série de testes em que são realizadas alterações deliberadas nas variáveis de entrada de um processo ou de um sistema de modo a que se possa observar e identificar as razões para as

alterações nas variáveis de saída ou respostas [32]. O método Taguchi é um método de desenho de experiências de fatoriais fracionado, ou seja, é somente executada uma fração do número total de combinações das variáveis de entrada [33]. Para isso o Dr. Genichi Taguchi propôs a utilização de matrizes compostas por vetores ortogonais para definir os testes a serem realizados.

A ideia fundamental é de que a qualidade está relacionada com a perda que pode ocorrer durante o ciclo de vida de um produto para a sociedade. Um produto de elevada qualidade originará uma menor perda para a sociedade. A perda pode ser medida em diferentes parâmetros como o tempo, ruído, etc. Em geral, se o resultado do produto não é como o consumidor espera, a perda é grande visto que a qualidade está muito longe das expectativas do consumidor. Assim, a baixa qualidade não é desejável para a indústria, nem para a sociedade.

Tendo em conta a qualidade necessária, Taguchi inclui no seu método algumas funções de perda que reconhecem o desejo dos clientes em adquirir produtos mais consistentes com o seu desejo e ao mais baixo custo.

Filosofia de Taguchi diz que a qualidade deve ser projetada em um produto, não inspecionado dentro dele. A maneira de fazer isso é através do sistema design, design de parâmetro e tolerância. Se um produtor decide escolher a qualidade "inspecionado" em um produto, significa que o produto é produzido aleatoriamente níveis de qualidade e aqueles estão muito longe dos níveis de usuário desejado. Qualidade é mais facilmente alcançada, minimizando o desvio de um alvo, evitando a influência de fatores incontroláveis. A relação sinal-ruído que define a qualidade do produto e a relação de fatores incontroláveis, deve ser alta.

Existem três relações de sinal-ruído para o parâmetro desejado:

- Nominal é o melhor:

$$S/N_t = 10 * \log\left(\frac{\bar{y}^2}{s_y^2}\right) \quad (6)$$

- Maior é o melhor (maximo):

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

- Menor é o melhor (minimo):

$$S/N_s = -10 * \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right) \quad (8)$$

Onde:

\bar{y} = Média dos dados observados;

s_y^2 = Variância de y ;

n = Número de observações;

y = Dados observados.

O objetivo da função S/N_t é reduzir a variabilidade em torno de um alvo específico, a função S/N_L diz se o sistema é otimizado quando a resposta é tão grande quanto possível e S/N_s se o sistema é otimizado quando a resposta é tão pequena quanto possível. Quanto maior a relação S/N melhor é o resultado [34].

2.7. Método de Superfícies de Resposta

Segundo Myers e Montgomery (1995), a *Metodologia de Superfície de Resposta* (MSR) surge na literatura da respetiva especialidade conhecida internacionalmente como *Response Surface Methodology* (RSM) e é uma coleção de técnicas e estatísticas que são utilizadas para modelar e analisar problemas nos quais a resposta de interesse é influenciada por muitas variáveis sendo

que a resposta deva alcançar um ótimo valor, e a forma de relacionamento entre a variável de resposta e as variáveis independentes seja desconhecida [15].

Segundo Montgomery [14], as equações definidas pelas respostas de superfícies podem ser representadas graficamente de forma a:

- Descrever como as variáveis em teste afetam as respostas;
- Determinar as inter-relações entre as variáveis em teste;
- Descrever efeitos combinados de todas as variáveis em teste sobre a resposta;

A principal vantagem do método da superfície de resposta é que os seus resultados são resistentes às condições não ideais, podem ocorrer erros aleatórios e pontos influentes, uma vez que esta metodologia é robusta. Outra vantagem é a simplicidade analítica da resposta da superfície obtida, pois esta metodologia cria polinômios. De um modo geral, polinômios de duas ou mais variáveis, são funções contínuas e após o ajuste do modelo, é possível estimar a sensibilidade da resposta aos fatores, além de determinar os níveis dos fatores nos quais a resposta é ótima sendo ela máxima ou mínima [13].

Na maioria dos problemas de superfície de resposta, a forma de relação entre a resposta e as variáveis independentes é desconhecida. Assim, o primeiro passo neste método é encontrar uma aproximação adequada para o verdadeiro relacionamento funcional entre y e o conjunto de variáveis independentes. Geralmente é empregado um polinômio de ordem inferior em alguma região das variáveis independentes. Se a resposta é bem modelada por uma função linear das variáveis independentes, em seguida, a aproximação função é a modelação de primeira ordem. Em k variáveis de entrada pode ser representada pela equação (9):

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \epsilon \quad (9)$$

Onde:

y =Resposta de interesse;

x_k =Variáveis independentes;

β_i = Coeficientes a serem estimados;

ε = Erro experimental;

Se houver curvatura no sistema, em seguida, um polinómio de grau mais elevado tem de ser utilizado, com a equação (10):

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (10)$$

Atualmente no mercado globalizado onde reina a lei do mais forte, qualquer ganho de produtividade, qualquer diminuição dos custos de produção, qualquer inovação, podem destacar a diferença entre o sucesso e o insucesso. Falar na metodologia de superfícies de resposta é um sonho e implementar esta metodologia é antecipar o sucesso. Para resolver um problema desta natureza inicia-se pela interpretação do problema, definição clara do objetivo e identificação dos fatores que o influenciam. Numa primeira fase, um modelo de primeira ordem é normalmente suficiente para modelar o processo, uma regressão múltipla estabelece a relação entre o objetivo e os fatores identificados como relevantes. Verificados os pressupostos de aplicação do modelo e a linearidade do processo, surge caminhar no sentido da resposta de superfície, que presumivelmente, contém o valor ótimo sendo ele máximo ou mínimo. Para uma regressão múltipla estabelece a relação entre o objetivo e os fatores identificados como relevantes, isso procura-se o máximo incremento na resposta pelo método da máxima inclinação ascendente, se se procurar um ponto máximo, ou pelo método da máxima inclinação descendente, caso se procure um mínimo [13].

Quando se chega à resposta de superfície ou é ajustado um novo modelo de primeira ordem ou então realizam-se experiências adicionais, particularmente ajustando um polinómio 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 no âmbito da indústria.

Geralmente representa-se graficamente o método de superfície de resposta, como se representa no gráfico da figura 7. Para ajudar a visualizar a forma de uma superfície de resposta, muitas vezes traçam-se os contornos da superfície de resposta [14].

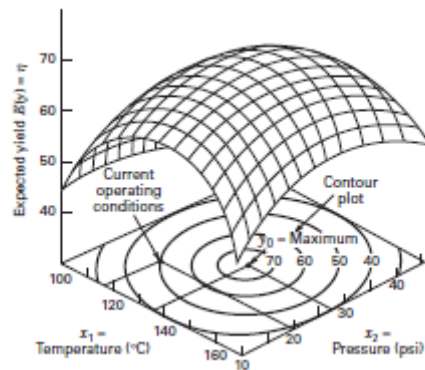


Figura 7: Gráfico de Contornos e de superfície de resposta[14].

A metodologia de superfícies de resposta enquadrada nos delineamentos experimentais, onde se revela um método importante na conceção, formulação, desenvolvimento e análise de produtos científicos, um método igualmente eficaz na melhoria de estudos e produtos 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 [13]

2.8. Vibrações na maquinagem

A maquinagem dos materiais é constantemente acompanhada de vibrações entre a peça e a ferramenta. O nível máximo das vibrações tolerável, ou seja, a máxima amplitude das vibrações num processo de maquinagem, depende da sua aplicação, podendo ser dividido em dois níveis:

- Em operações de desbaste, o que determina o efeito das vibrações é principalmente a vida da ferramenta.
- Em operações de acabamento, a qualidade da superfície e precisão dimensional são os parâmetros que determinam o nível máximo das vibrações [35].

Existe uma relação entre as vibrações durante o processo e o resultado de trabalho, sendo que em trabalhos isentos de vibrações, o movimento relativo entre a ferramenta e a peça é dado pela

combinação do avanço e da velocidade de corte. A rugosidade cinemática pode ser teoricamente calculada em função do diâmetro da ferramenta e do avanço por dente. A parte superior da figura 8 mostra as relações geométricas para esta condição. Contudo, sendo sobrepostas a este movimento as vibrações da ferramenta, que apresentam uma componente na direção normal a de avanço, altera-se a estrutura do acabamento superficial original na parte inferior da figura 8. Isso resulta numa pior qualidade da superfície, que pode ser empregada na avaliação da dinâmica do processo. Os valores da rugosidade representam uma medida relativa para a estabilidade do processo. Neste contexto, a noção de estabilidade não é empregada no sentido da técnica de controle, mas sob o aspecto tecnológico, priorizando o resultado de trabalho. Um processo estável pode ser caracterizado relativamente por boa qualidade da superfície e reduzido desgaste de ferramenta, enquanto que um instável é associado a um acabamento de superfície deteriorado e desgastes pronunciados de ferramenta [36].

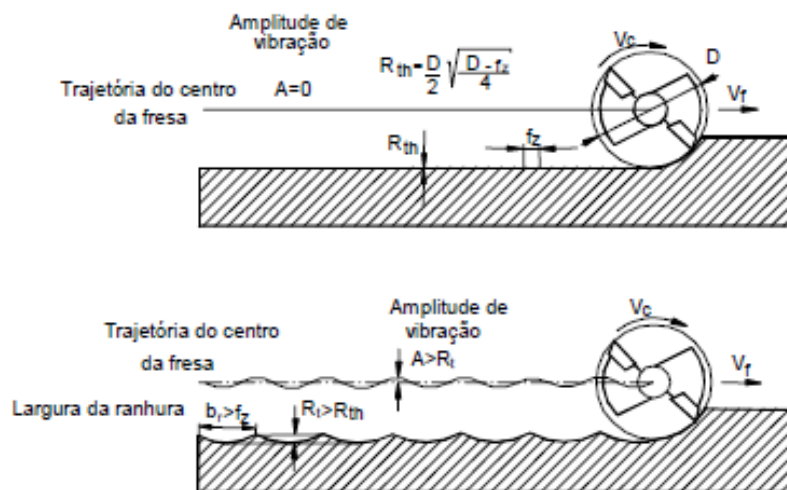


Figura 8: Trajetória da ferramenta para processo com vibrações[36].

2.8.1. Vibrações livres e forçadas

Uma estrutura com um sistema de um grau de liberdade pode ser modelada pela combinação de uma massa (m), uma mola (k) e um amortecedor (c), conforme mostrado na figura 9. Quando

uma força externa $F(t)$ é aplicada na estrutura, o seu movimento é descrito pela seguinte equação diferencial:

$$mx'' + cx' + kx = F(t) \quad (11)$$

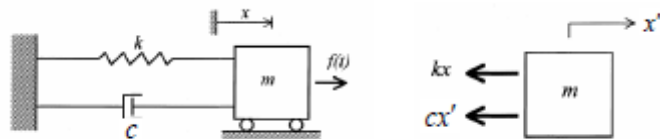


Figura 9: Representação de um sistema com um grau de liberdade[37].

Quando o sistema recebe um impacto, ou quando está em repouso e é estaticamente retirado do seu equilíbrio, o sistema entra em movimento sem excitações, ou seja, entra em vibração livre. A amplitude das vibrações diminui com o tempo em função da constante de amortecimento do sistema[36]–[38]. A frequência das vibrações é dominada pela rigidez e pela massa e é pouco influenciada pela constante de amortecimento, que é muito pequena em estruturas mecânicas [36]. Quando a constante de amortecimento é nula ($c = 0$), o sistema oscila na sua frequência natural, que pode ser determinada por:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (12)$$

A razão do amortecimento é definida como: $\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}$ [36]. A frequência natural da estrutura é definida por:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (13)$$

Um sistema excitado por uma força $F(t)$ designa-se por sistemas com vibração forçada.

Segundo Altintas [36], as excitações externas associadas à máquina são geralmente periódicas, mas não harmônicas. As forças de fresamento, que são periódicas com a frequência de passagem dos dentes, podem ser representadas pelas componentes da série de Fourier [39].

Matematicamente é mais conveniente usar funções harmônicas complexas em vibrações forçadas. A força harmônica expressa-se por $F(t) = F_0 e^{i\alpha} e^{i\omega t}$, onde F_0 é a amplitude da Força, ω é a frequência de excitação e α é a fase medida a partir de um tempo de referência ou posição angular em um plano complexo [36].

A resposta harmônica correspondente é $x(t) = X e^{i(\omega t + \phi)}$, e quando esta é substituída na equação de movimento (11) obtém-se:

$$(k - \omega^2 m + j\omega c) X e^{i\phi} e^{i\omega t} = F(t) = F_0 e^{i\alpha} e^{i\omega t} \quad (14)$$

Assim, a amplitude resultante e a fase das vibrações harmônicas são respetivamente,

$$|\Phi(\omega)| = \left| \frac{X}{F_0} \right| = \frac{1}{k} \frac{1}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (15)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{-2\zeta r}{1 - r^2} + \alpha \quad (16)$$

Onde a relação entre frequência de excitação natural é dada por $r = \omega / \omega_n$. A equação (15) representa a função de transferência, função de resposta da estrutura. A função de transferência $\Phi(\omega)$ pode ser separada em componentes real $Re[\Phi]$ e imaginária $Im[\Phi]$ [36]. As partes imaginárias e reais da função são mostradas separadamente na figura 10.

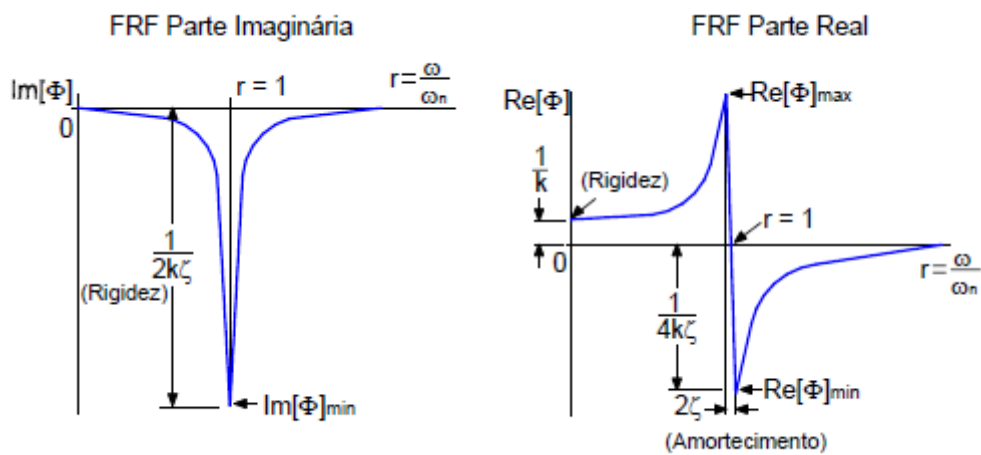


Figura 10: Partes imaginárias e reais da função de transferência [36].

A razão de amortecimento, rigidez e frequência natural pode ser estimada a partir da função de transferência sendo que as funções de transferência dos sistemas de múltiplos graus de liberdade são identificadas por testes dinâmicos. Os instrumentos de excitação mais efetivos são os “shakers” eletromagnéticos ou electro-hidráulicos, as quais são capazes de gerar forças numa ampla gama de frequências contendo os modos naturais dominantes das estruturas.

Alternativamente, pode ser utilizado um martelo de impacto associado a um transdutor de força piezolétrico pode ser usado como mostra na figura 11[37].

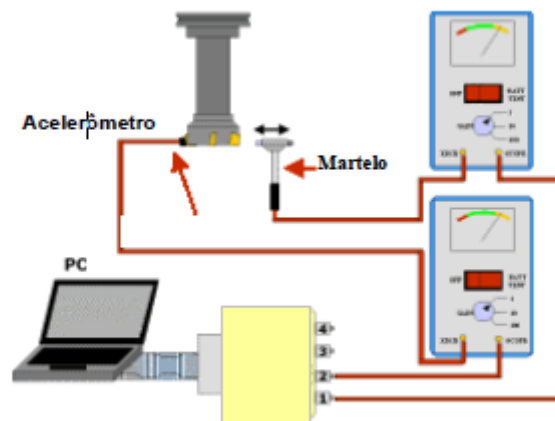


Figura 11: Análise modal experimental [37].

A massa do martelo e o material fixado ao sensor de impacto de força devem ser selecionados de acordo com a massa, rigidez e material da estrutura excitada. As vibrações resultantes são medidas com sensores de deslocamento, velocidade e aceleração.

O uso de acelerômetros é mais comum na medição de vibrações. A massa e a faixa de frequência do acelerômetro devem ser escolhidas adequadamente. Estes sensores são montados na estrutura, adicionam massa, podendo assim alterar as medidas frequências naturais. A fixação e os materiais entre a estrutura e o acelerômetro também devem ser selecionados adequadamente para se obter medidas precisas [40].

A frequência natural é a frequência de um corpo em vibração livre, que é determinada pelas características do sistema, nomeadamente a rigidez e a massa. Um método de identificação dessa frequência consiste em impactar o sistema de análise e, com isso, excitar a sua frequência de ressonância. Quando um corpo sofre uma vibração forçada em que a frequência é igual à frequência natural, ocorre ressonância. Nesse caso, uma reduzida vibração pode produzir vibrações mais intensas, uma vez que o sistema recebe energia da fonte externa periodicamente.

2.8.2. Origem das vibrações

As vibrações podem ter origem em mais que uma fonte:

- Vibrações externas à máquina-ferramenta;
- Vibrações geradas pela própria maquinagem;
- Vibrações por falta de homogeneidade da peça;
- Vibrações por corte interrompido;
- Vibrações geradas pela máquina-ferramenta [38], [41];

a) Vibrações externas à máquina-ferramenta

As vibrações externas às máquinas-ferramentas, são normalmente geradas por outras máquinas (prensa, motores, compressores e outras máquinas que operam em conjunto com a ferramenta), transmitidas pelo solo e pelas suas fundações. As vibrações têm um espectro de frequência muito alargado, de forma que a frequência natural de qualquer componente da máquina-ferramenta pode estar contida nesta ampla gama de frequência. Assim, os componentes podem apresentar

níveis de frequência muito altos e influenciar negativamente os resultados do processo [38], [41].

b) Vibrações geradas pela própria maquinagem

As vibrações criadas pela própria máquina ou vibrações regenerativas ou autoexcitadas não são causadas por forças externas, mas sim por forças resultantes do próprio corte do material pela ferramenta.

Segundo Altintas[36], estas vibrações resultam de um mecanismo de autoexcitação que surge na geração da avara durante as operações de maquinagem. Inicialmente um dos modos estruturais do sistema máquina-ferramenta-peça é excitado por forças de corte. Uma superfície ondulada pode ser melhorada com uma passagem da fresa, mas esta passagem também deixa uma superfície ondulada devido a vibrações estruturais. Dependendo da diferença de fase entre duas ondulações sucessivas, as vibrações podem ser atenuadas ou ampliadas. As vibrações crescentes elevam as componentes da força de maquinagem e podem provocar desgaste excessivo ou quebra da ferramenta e agravamento na qualidade da superfície e na dimensão da peça.

A figura 12 mostra como ocorre o efeito regenerativo. Segundo Tlustý [42], embora sejam assumidas as vibrações, em (1) as ondas produzidas pelos dois dentes consecutivos quando estão em fase, isso faz com que não ocorra nenhuma variação da espessura da avara, portanto não há variação de força. As vibrações não são excitadas novamente e desaparecem. No segundo caso (2), as ondas produzidas pelos dois dentes consecutivos não estão em fase, e a variação na espessura da avara ocorre com o dobro da amplitude, resultando numa grande variação da força que excita futuras vibrações.

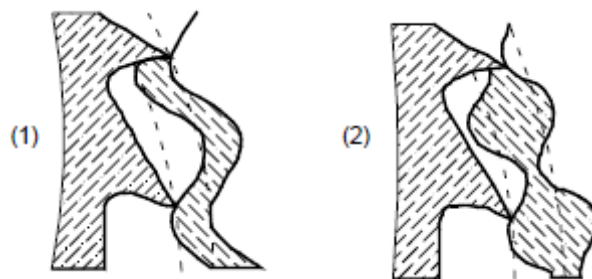


Figura 12: Efeito regenerativo [42].

c) Vibrações por falta de homogeneidade da peça

A presença de regiões de diferentes durezas numa peça causa pequenos choques sobre a ferramenta. Resultando em vibrações quando estes impactos são absorvidos, os efeitos não são consideráveis, fazendo parte apenas do “ruído de fundo” da maquinagem. Entretanto, se estes pequenos choques sobre a ferramenta não forem rapidamente amortecidos, originam vibrações de grande amplitude que podem ser prejudiciais ao processo [38], [41].

d) Vibrações por corte interrompido

Na maquinagem com corte interrompido a ferramenta sofre impactos consideráveis que podem levar a níveis indesejados de vibrações. No fresamento, as vibrações forçadas são excitadas pela componente periódica da força de maquinagem na frequência da passagem dos dentes [38], [41].

e) Vibrações geradas pela máquina-ferramenta

Vibrações provocadas pela máquina surgem em acionamentos de componentes dotados de movimento rotativo e em acionamento de componentes com movimento de translação. Estas vibrações podem-se apresentar sob duas formas já descritas anteriormente: livres e forçadas. As vibrações forçadas são causadas por rotação de massas desequilibradas, acionamentos por engrenagens e correias, rolamentos com irregularidades e por forças periódicas nos próprios motores de acionamento [38], [41].

2.8.3. Influência dos parâmetros de corte sobre a estabilidade

a) Profundidade de corte axial

A profundidade de corte axial representa o ganho no processo de autoexcitação das vibrações. Assim, quando ocorrem vibrações e conseqüentemente variações na espessura da peça, a realimentação fornecida pela variação da força gerada é proporcional à profundidade de corte axial. Para um valor suficientemente pequeno da profundidade de corte axial, o processo é sempre estável. Quando o seu valor limite é ultrapassado o processo torna-se instável [4], [36], [42].

b) Profundidade de corte radial

Geralmente os efeitos das profundidades de corte radial e axial sobre a estabilidade, em processos de fresamento são similares. Logo, o produto de ambas determina a estabilidade, isto significa que, para uma determinada condição de avanço e velocidade de corte, este produto indica uma taxa de remoção de material limite constante independente da combinação das profundidades de corte [4], [42].

c) Velocidade de corte

A velocidade de corte afeta a estabilidade de duas formas distintas: a primeira delas está associada ao processo de amortecimento que ocorre em velocidades de corte muito baixas, tipicamente abaixo de 25 m/min, onde o aumento da estabilidade é bastante significativo, o outro efeito ocorre em velocidades de corte mais elevadas, e está associado à diferença de fase entre as ondulações referentes a cortes subsequentes [4], [42].

d) Avanço

O efeito do avanço sobre a estabilidade geralmente não é muito forte e está relacionado principalmente ao seu efeito sobre a pressão específica de corte [36], [42]. Em operações de torneamento e mandrilamento, ocorre aumento da estabilidade para avanços maiores. Geralmente as profundidades de corte limites são menores para avanços pequenos e operações com aparas de pequena espessura (fresamento de engrenagens) e são mais propensas ao surgimento de vibrações. Contudo, este efeito não se aplica necessariamente as restantes operações de fresamento, onde as vibrações geralmente se elevam com o aumento do avanço [42].

e) Número de dentes da fresa

Quanto maior o número de dentes maquinando simultaneamente maior é a tendência do surgimento das vibrações regenerativas, devido ao efeito acumulativo da diferença de fase entre as ondulações de cortes subsequentes [4], [42].

Capítulo 3

3. Ensaaios experimentais

Ao longo deste capítulo descrevem-se os estudos realizados na configuração experimental e os ensaios efetuados no decorrer deste trabalho.

Na fase inicial serão apresentados os valores dos parâmetros de maquinagem e respetiva construção da matriz de Taguchi, já com os valores dos parâmetros definidos. Na segunda parte descreve-se a peça em estudo, bem como as ferramentas de posicionamento e o processo de medição das vibrações. Por fim, na terceira fase apresenta-se todo o procedimento experimental pelo método de superfícies de resposta.

3.1. Procedimento experimental segundo Taguchi

O método Taguchi é uma ferramenta poderosa para a otimização do planeamento de experiências e que foi usada neste trabalho para determinar os parâmetros de corte que reduzem os efeitos da vibração e a qualidade de superfície.

A relação S/N que vamos usar nos testes de vibrações é quanto menor melhor, pois deseja-se reduzir o nível de vibrações durante a maquinagem da peça. Sabendo que se pretende melhorar o acabamento final da peça e que isso está diretamente relacionado com o nível de vibrações existentes, quando menores forem as vibrações melhor vai ser o acabamento final [43]. Para a análise das vibrações e sabendo que a peça a maquinar tem geometria circular, são introduzidos

os parâmetros de maquinagem já descritos anteriormente, ou seja, a Velocidade de corte (V_c), Velocidade de avanço (F_z), Penetração axial (a_p) e Penetração Radial (a_e). A *Palbit*, empresa que proporcionou este estudo e fornecedora das pastilhas para efetuar o desbaste da peça, definiu intervalos para os parâmetros de maquinagem:

- Velocidade de Corte – 200-300 [mm/min];
- Velocidade de avanço – 0.10-0.30 [mm/t];
- Penetração radial – 1-2 [mm];
- Penetração axial – 0.10-0.35 [mm];

Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros de maquinagem selecionados para este estudo (nível 1 e nível 2), ou seja, o máximo e o mínimo dos parâmetros estabelecidos pela *Palbit*.

Tabela. 2: Valores dos parâmetros de corte

Parâmetros	Nível 1	Nível 2
Velocidade de corte [mm/min]	200	300
Velocidade de avanço [mm/t]	0,10	0,30
Penetração axial [mm]	0,10	0,35
Penetração radial [mm]	1	2

Sabendo que o número de parâmetros e o número de níveis, a matriz ortogonal adequada pode ser selecionada usando a ajuda da Tabela 3.

Tabela. 3: Tabela de taguchi para seleção da matriz ortogonal

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

Sabendo que o arranjo ortogonal de Taguchi a usar é uma matriz L16, existem 4 parâmetros com 2 níveis diferentes, isto quer dizer que são necessárias dezasseis combinações de parâmetros, conforme está representado na Tabela 4.

Tabela. 4: Matriz L16 de Taguchi

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

Depois de definir a matriz de Taguchi, os níveis de cada parâmetro foram substituídos pelos valores limite dos parâmetros definidos pela *Palbit*, ficando como se representa Tabela 5.

Tabela. 5: Matriz L16 de Taguchi com os valores dos parâmetros do fabricante

Número de ensaio	Velocidade de corte [m/min]	Velocidade de avanço [mm/t]	Penetração Axial [mm]	Penetração Radial [mm]
1	200	0,10	0,10	1
2	200	0,10	0,10	2
3	200	0,10	0,35	1
4	200	0,10	0,35	2
5	200	0,30	0,10	1
6	200	0,30	0,10	2

7	200	0,30	0,35	1
8	200	0,30	0,35	2
9	300	0,10	0,10	1
10	300	0,10	0,10	2
11	300	0,10	0,35	1
12	300	0,10	0,35	2
13	300	0,30	0,10	1
14	300	0,30	0,10	2
15	300	0,30	0,35	1
16	300	0,30	0,35	2

Com os valores da Tabela 5, e utilizando as equações (1) e (2) é possível obter os valores re-presentados na Tabela 6, que definem os parâmetros de corte já definidos na Tabela anterior, mas agora expressos em unidades SI.

Tabela. 6: Matriz L16 de Taguchi com os valores em unidades SI

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

Na primeira fase deste estudo experimental pretendem-se realizar os dezasseis ensaios definidos pelo método de Taguchi e verificar qual deles apresenta menor vibração. Sendo que depois de analisados os valores das vibrações, consegue-se escolher qual a combinação dos parâmetros que menos afeta a máquina-ferramenta, sabendo assim quais os parâmetros que originam menores vibrações.

3.2. Procedimento experimental pelo Método de Superfícies de Resposta

Neste método de otimização o método das superfícies de resposta foi elaborado e implementado através do *Matlab R2015a*, sendo que a função modelada foi definida pelas variáveis z e x .

A variável z tem quatro componentes que representam:

- z_1 – Velocidade de corte;
- z_2 – Velocidade de avanço;
- z_3 – Penetração axial;
- z_4 – Penetração radial;
- z_5 – Vibrações;

A variável x tem cinco componentes que representam o peso de cada componente da variável z . Onde x_5 representa o ajuste final da função.

3.2.1. Métodos de otimização usados

Neste trabalho serão usados dois métodos de otimização: o método de Nelder-Mead e o método dos Algoritmos Genéticos (GA).

O método Nelder-Mead é utilizado para minimizar a função, $f(z)$, de onde se obtém os valores ótimos para os parâmetros a fim de se realizarem os novos ensaios. Para otimizar os parâmetros de entrada resultantes da matriz de Taguchi e para testar a fiabilidade do método de otimização de Nelder-Mead utilizamos os dados gravados pelo acelerómetro triaxial. Como os dados estão divididos em três séries distintas (X, Y e Z), vai ser utilizado só o RMS de um dos eixos.

O método do Algoritmo Genético é utilizado para otimizar ainda mais o problema, uma vez que o método de Nelder-Mead utilizado anteriormente verificou-se que não era o melhor método para otimizar o caso em estudo, uma vez que os valores dados para os parâmetros de corte apenas variavam na casa das milésimas. Para a resolução do problema foi então usado um segundo método: o Algoritmo Genético (GA). Este método é definido como um método global, e abrange uma grande área, que se baseia na geração de famílias para encontrar uma solução próxima do ótimo para o problema.

Depois de definir todas as variáveis, executa-se o programa, de onde resultam os valores otimizados para o novo ensaio. Após realizar o primeiro ensaio, é dado o valor das vibrações e posteriormente o valor é introduzido no programa voltando-o a executar, para obter novos valores para os parâmetros de corte do segundo ensaio. Este procedimento repete-se tantas vezes como ensaios que se realizem, a fim de se comparar entre os dois métodos de otimização aquele que apresenta menores valores para as vibrações.

Como para testar a fiabilidade do método só foi utilizado o RMS de um dos eixos, para obter os resultados finais e de forma a ter uma otimização genérica das vibrações foi necessário obter parâmetros de entrada que reduzissem as vibrações em ambos os sentidos, sendo que a solução obtida foi efetuar o módulo entre o eixo Y e Z, ou seja, $M = \|\text{RMS}_Y, \text{RMS}_Z\|$, como mostra na figura 13 e equação (17).

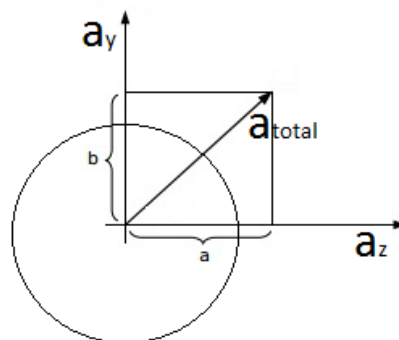


Figura 13: Diagrama

$$M = \sqrt{(RMS_y)^2 + (RMS_z)^2} \quad (17)$$

3.2.2. Modelação do problema

Para modelar o problema em questão, foram definidos dois problemas distintos. O primeiro para determinar a melhor modelação, ou seja, para determinar qual a função que apresenta menor erro. O segundo problema para determinar os valores das variáveis z que apresenta os valores ótimos dos referidos parâmetros, uma vez que não pode apresentar valores negativos, mas quanto mais próximo de zero melhor, a função apresenta-se em módulo.

Problema 1

A variável x tem entre cinco e vinte e cinco componentes, cujo mínimo depende da função, que representa o ajuste da função aos dados fornecidos.

Inicialmente, foram testadas diversas funções para modelar a vibração da ferramenta. Assim, foram testadas as seguintes funções:

- $f_1(x) = (x_1 \times z_1 + x_2 \times z_2 + x_3 \times z_3 + x_4 * z_4 + x_5);$
- $f_2(x) = (x_1 \times z_1^2 + x_2 \times z_2^2 + x_3 \times z_3^2 + x_4 \times z_4^2 + x_5 \times z_1 \times z_2 + x_6 \times z_1 \times z_3 + x_7 \times z_1 \times z_4 + x_8 \times z_2 \times z_3 + x_9 \times z_2 \times z_4 + x_{10} \times z_3 \times z_4 + x_{11} \times z_1 + x_{12} \times z_2 + x_{13} \times z_3 + x_{14} \times z_4 + x_{15});$
- $f_3(x) = (x_1 \times z_1^2 + x_2 \times z_2^2 + x_3 \times z_3^2 + x_4 \times z_4^2 + x_5 \times z_1 + x_6 \times z_2 + x_7 \times z_3 + x_8 \times z_4 + x_9);$

- $f_4(x) = (x_1 \times z_1^3 + x_2 \times z_2^3 + x_3 \times z_3^3 + x_4 \times z_4^3 + x_5 \times z_1^2 + x_6 \times z_2^2 + x_7 \times z_3^2 + x_8 \times z_4^2 + x_9 \times z_1 \times z_2 + x_{10} \times z_1 \times z_3 + x_{11} \times z_1 * z_4 + x_{12} \times z_2 \times z_3 + x_{13} \times z_2 \times z_4 + x_{14} \times z_3 \times z_4 + x_{15} \times z_1 + x_{16} \times z_2 + x_{17} \times z_3 + x_{18} \times z_4 + x_{19});$
- $f_5(x) = (x_1 \times z_1^3 + x_2 \times z_2^3 + x_3 \times z_3^3 + x_4 \times z_4^3 + x_5 \times z_1^2 + x_6 \times z_2^2 + x_7 \times z_3^2 + x_8 \times z_4^2 + x_9 \times z_1^2 * z_2 + x_{10} \times z_1^2 \times z_3 + x_{11} \times z_1^2 \times z_4 + x_{12} \times z_2^2 \times z_3 + x_{13} \times z_2^2 \times z_4 + x_{14} \times z_3^2 \times z_4 + x_{15} \times z_1 \times z_2 + x_{16} \times z_1 \times z_3 + x_{17} \times z_1 * z_4 + x_{18} \times z_2 \times z_3 + x_{19} \times z_2 \times z_4 + x_{20} \times z_3 \times z_4 + x_{21} \times z_1 + x_{22} \times z_2 + x_{23} \times z_3 + x_{24} \times z_4 + x_{25});$
- $f_6(x) = (x_1 \times z_1^3 + x_2 \times z_2^3 + x_3 \times z_3^3 + x_4 \times z_4^3 + x_5 \times z_1^2 + x_6 \times z_2^2 + x_7 \times z_3^2 + x_8 \times z_4^2 + x_9 \times z_1^2 * z_2 + x_{10} \times z_1^2 \times z_3 + x_{11} \times z_1^2 \times z_4 + x_{12} \times z_2^2 \times z_3 + x_{13} \times z_2^2 \times z_4 + x_{14} \times z_3^2 \times z_4 + x_{15} \times z_1 + x_{16} \times z_2 + x_{17} \times z_3 + x_{18} \times z_4 + x_{19});$
- $f_7(x) = (x_1 \times z_1^3 + x_2 \times z_2^3 + x_3 \times z_3^3 + x_4 \times z_4^3 + x_5 \times z_1^2 + x_6 \times z_2^2 + x_7 \times z_3^2 + x_8 \times z_4^2 + x_9 \times z_1 + x_{10} \times z_2 + x_{11} \times z_3 + x_{12} \times z_4 + x_{13});$
- $f_8(x) = (x_1 \times z_1^3 + x_2 \times z_2^3 + x_3 \times z_3^3 + x_4 \times z_4^3 + x_5 \times z_1 + x_6 \times z_2 + x_7 \times z_3 + x_8 \times z_4 + x_9);$

Para a escolha do melhor modelo foram considerados n ensaios de forma a resolver o problema de otimização da equação (18):

$$\min \sum_{i=1}^n (f(x) - z(5))^2 \quad (18)$$

Onde z_5 representa o valor das vibrações na ferramenta.

Para a resolução do problema de otimização da equação (18) será utilizado o método de Nelder-Mead implementado na *toolbox Optimization do software Matlab*.

Inicialmente foram usados 10 ($n=10$) ensaios para a seleção da melhor função e foram usados 6 novos ensaios para validar as funções estudadas.

Tabela. 7: Resultado para 10 dos 16 ensaios

Função	Fval	Nº iterações	Funcount	Extflag
$f_1(x)$	5.22×10^1	140	262	1
$f_2(x)$	$6.81 * 10^7$	2187	3000	0
$f_3(x)$	4.18×10^2	881	1380	1
$f_4(x)$	$4.85 * 10^{12}$	2776	3800	0
$f_5(x)$	$5.71 * 10^{14}$	3888	5000	0
$f_6(x)$	$5.92 * 10^{14}$	2877	3800	0
$f_7(x)$	$5.40 * 10^3$	1604	2451	1
$f_8(x)$	$2.02 * 10^7$	719	1280	1

Analisando a Tabela 7, verificou-se que as funções $f_1(x)$, $f_3(x)$ e $f_7(x)$ foram as que tiveram menor erro, ou seja, são as nossas melhores funções.

Posteriormente foram usados 16 ($n=16$) ensaios para selecionar qual das três funções seria a melhor. Da validação das funções foram obtidos os valores da Tabela 8.

Tabela. 8: Resultado para 16 dos 16 ensaios

Função	Fval	Nº iterações	Funcount	Extflag
$f_1(x)$	9.46×10^1	151	264	1
$f_3(x)$	$1.43 * 10^3$	744	1206	1
$f_7(x)$	$1.86 * 10^5$	1672	2554	1

Observando a Tabela 8, verifica-se que a função $f_1(x)$ é a que apresenta um menor erro, logo vai utilizar-se a melhor função usando treze dos dezasseis ensaios e depois efetuar a verificação para os dezasseis como está representado.

Como $f_1(x)$ é a melhor função é a que vai ser utilizada ao longo da otimização.

Através do método de superfície de resposta, pretende-se determinar para o Problema 1 quais os coeficientes ótimos $[x_1$ a $x_5]$ e para $[z_1$ a $z_5]$, respetivamente, de maneira que o erro quadrático médio seja o menor possível.

Problema 2

Após a determinação dos parâmetros ótimos obtidos no problema 1, para os quais as vibrações são menores, resolve-se o problema 2. Sabendo o valor dos parâmetros ótimos para os quais a vibração é menor, assim define-se novamente a função $f_1(x)$.

$$f(x) = |x_1 * z_1 + x_2 * z(2) + x_3 * z(3) + x_4 * z(4) + x_5 - z(5)| \quad (19)$$

Apresenta-se o valor absoluto, uma vez que se pretende obter o mínimo valor das vibrações, e este parâmetro não pode ter valores negativos, mas sim o mais próximo de zero.

3.3. Materiais e ferramentas utilizados

Os ensaios experimentais foram realizados no Laboratório de Tecnologia Mecânica (LTM), da Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTIG) do Instituto Politécnico de Bragança (IPB) e o objetivo pretendido era otimizar os valores das vibrações ao maquinar com uma fresadora CNC um bloco de aço cilíndrico.

Através do método de Taguchi foram feitos ensaios com os valores estabelecidos nos parâmetros da matriz ortogonal L16, sendo que, para o método de superfícies, os ensaios foram realizados tendo em vista os parâmetros obtidos no Matlab R2015a.

Para avaliar a frequência própria do sistema e mais propriamente da ferramenta. Foram realizados ensaios com martelo de impacto. Depois da ferramenta estar montada na árvore da máquina, colocou-se um acelerómetro uniaxial colado na ferramenta. A estrutura foi excitada e foi determinada a frequência após uma excitação feita pelo martelo de impacto como mostra na figura 14.

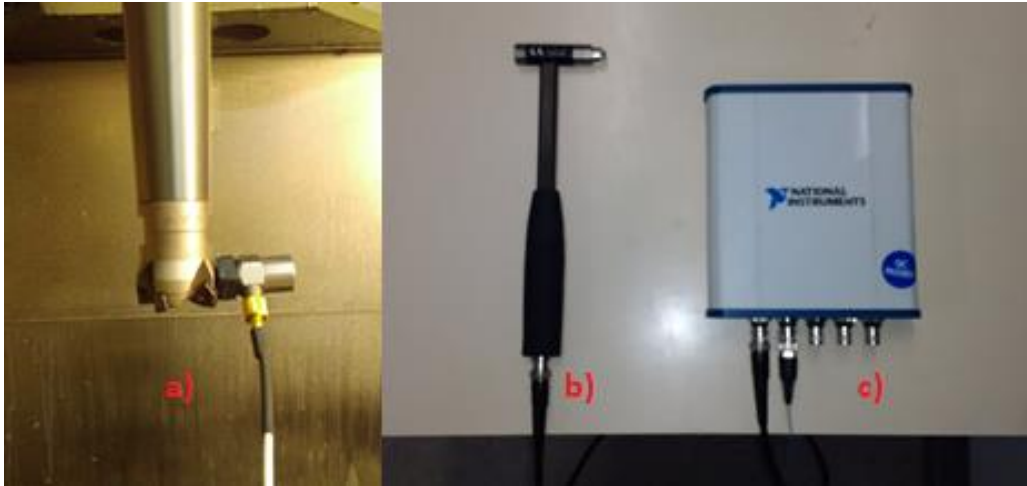


Figura 14: Instrumentação para medição das frequências próprias (a) Acelerómetro (b) PCB 86C03 e (c) NI 4431 USB

Para a medição das vibrações durante a maquinagem foi utilizado um acelerómetro triaxial ligado a uma placa de aquisição. O tratamento da resposta foi realizado com o software *labView*. Os dados foram tratados de forma a obter média dos valores nos intervalos de funcionamento/maquinagem pretendidos. O bloco de aço cilíndrico é apresentado na figura 15. Este bloco tinha inicialmente dimensões de 219 mm de diâmetro e 40 mm de altura, composto por um aço muito duro (dureza de 45 Rockwell C), e constituído pelos seguintes valores na sua composição química 1,2738 (código WNR) representados na tabela 9.

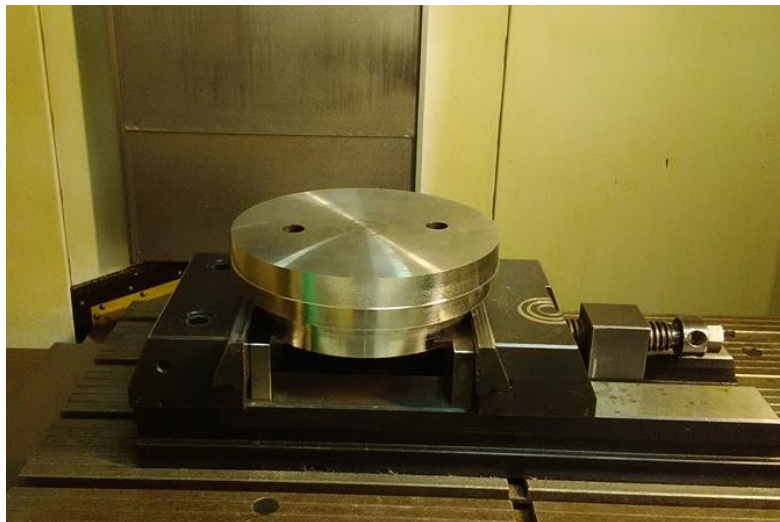


Figura 15: Bloco de aço para ensaio

Tabela. 9: Composição química do aço 1.2738 [44].

Composição química (%)	
C	0,35 – 0,45
Si	0,20 – 0,40
Mn	1,30 – 1,60
P	Max 0,035
S	Max 0,035
Cr	1,80 – 2,10
Ni	0,90 – 1,20
Mo	0,15 – 0,25

Todos os ensaios foram realizados na fresadora CNC presente no LTM, (Deckel Maho DMC 63V) representada na figura 20.



Figura 16: Fresadora CNC DECKEL MAHO DMC 63V (LTM-IPB)

As pastilhas modelo WNHU04T310 utilizadas ao longo dos ensaios, foram fornecidas e fabricadas pela *Palbit*, uma empresa Portuguesa com sede em Albergaria-a-Velha. As operações de fresagem foram realizadas utilizando uma trajetória circular no sentido horário e em torno do perímetro do bloco. No anexo I estão apresentados os dados técnicos da fresadora CNC e no anexo II os dados técnicos das ferramentas de fresagem.

Para medir as vibrações produzidas durante o processo de fresagem foi utilizado um acelerómetro triaxial (PCB Piezotronics, modelo 356B18), colocado no centro do eixo da máquina, o mais próximo possível da ferramenta de corte (figura 21). O sinal resultante do acelerómetro foi obtido com recurso a uma placa de aquisição de sinal para a vibração USB NI-4431 que depois foi processado através do LabView. Os valores observados foram a amplitude de vibração e o RMS no período de medição.



Figura 17: Posicionamento do acelerómetro triaxial para captação das vibrações durante os ensaios, adaptado de [43].

As pastilhas representam um papel importante durante o processo de maquinagem, por isso, devem ser corretamente posicionadas e fixadas à ferramenta de fresagem como representado na

figura 18. A constituição das pastilhas está indicada no anexo III, e as características geométricas estão representadas na Figura 19.

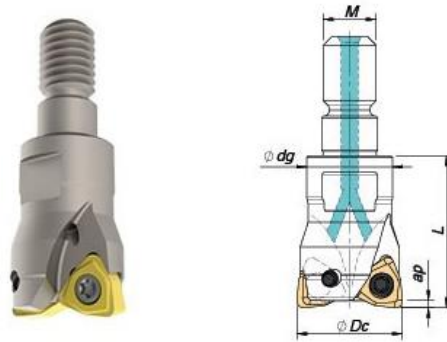
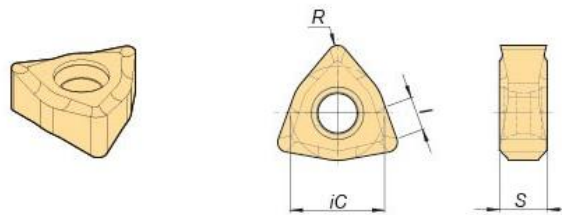


Figura 18: Ferramenta de fresagem[45]



(a)



(b)

Figura 19: (a) Representação gráfica das pastilhas WNHU[46] e (b) pastilhas montadas na ferramenta.

Capítulo 4

4. Resultados Obtidos

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos no estudo das vibrações medida ao longo dos ensaios, para o método de Taguchi e para o método das superfícies de resposta.

4.1. Resultados obtidos segundo o método de Taguchi

Para cada ensaio foi gravado uma série de dados para os eixos x, y e z através do acelerómetro triaxial com as direções apresentadas na figura 17. Como a gravação dos dados foi efetuada com uma amostragem muito 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 acelerações 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.

De seguida descreve-se o procedimento utilizado para determinar o valor RMS para o primeiro ensaio.

Ensaio 1

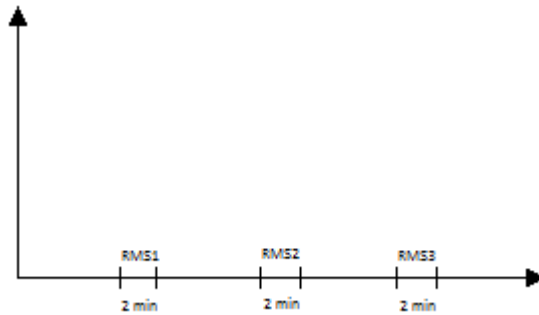


Figura 20: Diagrama

Nº pontos do ensaio- 13589000. A série de dados é dividida em 4 períodos

1º Período (2 min)

- Para X

$$RMS (Acceleration(\frac{size}{4}: (120000 + \frac{size}{4}), 1))$$

- Para Y

$$RMS (Acceleration(\frac{size}{4}: (120000 + \frac{size}{4}), 2))$$

- Para Z

$$RMS (Acceleration(\frac{size}{4}: (120000 + \frac{size}{4}), 3))$$

2º Período (2 min)

$$RMS (Acceleration((2 * \frac{size}{4}): (120000 + (2 * \frac{size}{4})), 1))$$

3º Período (2 min)

$$RMS (Acceleration((3 * \frac{size}{4}): (120000 + (3 * \frac{size}{4})), 1))$$

Todos os ensaios recorrem a este procedimento para chegar ao resultado final. Na Tabela 10 está apresentado o valor RMS para cada período (RMS 1, RMS 2 e RMS 3) e o valor RMS para cada eixo (x, y e z). Os cálculos foram efetuados através do Software MatLab.

Tabela. 10: Resultados das vibrações

Ensaio	Eixo	RMS 1	RMS 2	RMS 3	Média RMS
1	X	4,0528	3,6157	3,4069	3,6918
	Y	3,9976	3,6552	3,4405	3,6978
	Z	10,9811	7,9809	7,4694	8,8105
2	X	4,0120	5,0596	5,2503	4,7740
	Y	4,1999	5,2282	5,7018	5,0433
	Z	10,0538	11,0059	11,7068	10,9222
3	X	4,2523	4,2799	4,0277	4,1866
	Y	3,8668	3,9901	3,8484	3,9018
	Z	10,0220	10,4866	9,0084	9,8390
4	X	4,0221	4,0790	4,1301	4,0771
	Y	3,8463	4,7393	4,3180	4,3012
	Z	9,9687	9,8711	10,3850	10,0749
5	X	4,1494	4,4264	3,7373	4,1044
	Y	3,9095	4,8361	3,7149	4,1535
	Z	10,4433	13,4818	3,2507	9,0586
6	X	4,0086	5,7489	5,8755	5,2110
	Y	4,1016	6,1293	6,0269	5,4193
	Z	10,1703	14,0718	14,0645	12,7689
7	X	4,1350	5,2228	5,2228	4,8602
	Y	4,1586	5,1437	5,1437	4,8153
	Z	9,0774	9,9782	9,9782	9,6779
8	X	8,7300	8,7994	8,7994	8,7763
	Y	10,1613	10,1382	10,1382	10,1459
	Z	15,1549	17,4858	17,4858	16,7088
9	X	8,7994	8,7573	9,9490	9,1686
	Y	10,1382	10,2355	10,9231	10,4323
	Z	17,4858	17,1186	16,5662	17,0569
10	X	3,1697	3,0592	3,0063	3,0784
	Y	2,9517	2,8805	2,5001	2,7774

	Z	9,1993	9,3120	7,9237	8,8117
11	X	2,7539	2,7287	2,7287	2,7371
	Y	2,3237	2,2898	2,2898	2,3011
	Z	6,1379	8,3776	8,3776	7,6310
12	X	1,5649	2,0372	2,2295	1,9439
	Y	1,7076	1,9886	2,1505	1,9489
	Z	5,5600	6,1296	5,9588	5,8828
13	X	3,1357	3,1025	3,0950	3,1111
	Y	2,5511	2,7486	2,7586	2,6861
	Z	7,3454	8,2228	9,1139	8,2274
14	X	3,2596	3,1755	3,2018	3,2123
	Y	2,8991	2,8193	2,8293	2,8492
	Z	8,5946	9,1966	8,5611	8,7841
15	X	3,5508	3,4431	3,5172	3,5037
	Y	3,1370	3,0864	3,0458	3,0897
	Z	8,7372	8,1738	8,2734	8,3948
16	X	3,3731	3,1857	3,0075	3,1888
	Y	2,8079	2,5868	2,4641	2,6196
	Z	7,6007	7,2222	7,1641	7,3290

Analisando a Tabela 10 é possível observar que a combinação dos parâmetros de fresagem que causou os menores valores de vibração para as três direções é o correspondente ao ensaio 12. Neste caso, os níveis de vibração para as direções x, y e z foram $1,944 \text{ m/s}^2$, $1,949 \text{ m/s}^2$ e $5,818 \text{ m/s}^2$, respetivamente, tendo a norma euclidiana de $3,237 \text{ m/s}^2$.

Outra observação sobre o nível de vibração é a diferença entre os valores médios de cada direção. O valor médio para a direção x é $4,316 \text{ m/s}^2$, direção y é $4,386 \text{ m/s}^2$ e para z direção é $9,999 \text{ m/s}^2$. Ou seja, os valores médios para o x e y são muito próximos, ao mesmo tempo para o z tem um valor médio que é mais do dobro dos outros.

4.2. Resultados obtidos segundo o método de Superfícies de resposta

A Tabela 11 apresenta o RMS_y , RMS_z e o valor de M representa a norma do vetor (RMS_y, RMS_z) , calculado com a seguinte formula: $M = \|(RMS_y, RMS_z)\| = \sqrt{(RMS_y)^2 + (RMS_z)^2}$, como referida anteriormente a necessidade de calcular o módulo entre

os dois eixos. Sabendo que é necessário determinar os valores do referido módulo para efetuar a comparação com os valores obtidos pelo método de superfícies de resposta.

Tabela. 11: o módulo M entre os eixos y e z.

Ensaio	Média		M
	RMS _y	RMS _z	
1	3,698	8,810	9,555
2	5,043	10,922	12,030
3	3,902	9,839	10,584
4	4,301	10,075	10,955
5	4,154	9,059	9,965
6	5,419	12,769	13,871
7	4,815	9,678	10,810
8	10,146	16,709	19,548
9	10,432	17,057	19,994
10	2,777	8,812	9,239
11	2,301	7,631	7,970
12	1,949	5,883	6,197
13	2,686	8,227	8,655
14	2,849	8,784	9,235
15	3,090	8,395	8,945
16	2,620	7,329	7,783

Para identificar o valor ótimo para z_1 , z_2 , z_3 e z_4 , isto é, valores da velocidade de corte (z_1), velocidade de avanço (z_2), penetração axial (z_3) e penetração radial (z_4), onde foi usada a função $f_1(x)$ e treze ensaios.

Para executar o programa através do *software matlab*, utilizou-se no problema 1 a função $f_1(x)$ e usando treze (1,2,3,4,5,6,7,9,11,13,14,15,16) dos dezasseis ensaios (estes foram selecionados aleatoriamente). Nos ensaios de verificação (EV1, EV2) no problema 1, foi resolvido com o método de *Nelder-Mead* e no problema 2 foi resolvido com o método de GA. Fez-se também um terceiro ensaio de verificação (EV3), no entanto verificou-se que os valores obtidos eram muito idênticos aos já existentes, logo apresentaria valores das vibrações similares aos testes já realizados.

Da execução destes problemas resultaram os valores de entrada e as vibrações apresentadas na Tabela 12.

Tabela. 12: Vibrações obtidos através dos ensaios de verificação e respetivos parâmetros de entrada.

Ensaio	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5
1	2546	1018,4	0,1	2,0	9,6
2	2546	1018,4	0,1	4,0	12,0
3	2546	1018,4	0,4	2,0	10,6
4	2546	1018,4	0,4	4,0	11,0
5	2546	4584,0	0,1	2,0	10,0
6	2546	4584,0	0,1	4,0	13,9
7	2546	4584,0	0,4	2,0	10,8
9	3820	1018,4	0,1	2,0	20,0
11	3820	1018,4	0,4	2,0	8,0
13	3820	4584,0	0,1	2,0	8,7
14	3820	4584,0	0,1	4,0	9,2
15	3820	4584,0	0,4	2,0	8,9
16	3820	4584,0	0,4	4,0	7,8
EV1	2546	4440,7	0,1	2,0	8,9
EV2	2644	4272,5	0,3	2,0	8,5

4.3. Análise das vibrações em frequência

Sabe-se que o rácio entre frequência de funcionamento e as frequência natural ($r = \omega / \omega_n$) representa a média da oscilação, se esse valor for $r = 1$ existe ressonância.

Para avaliar a frequência própria da máquina e em particular da ferramenta, após ter sido montada a ferramenta na árvore da máquina, colocou-se o acelerómetro uniaxial na extremidade da ferramenta como mostra na figura 14 a) e exerceu-se o impacto com o martelo que tinha acoplada uma ponta mole. A medição detetou frequências próprias a 99.97, 200, 297.33, 399.33 e 467.33 Hz. Sabendo que durante os ensaios a máquina só funcionou em três rotações diferentes, 2546, 2644 e 3820 rpm, ou seja, 42.41, 44.04 e 63.63 Hz, respetivamente, analisando a Tabela

13 verifica-se que não existe ressonância porque os valores do rácio são todos inferiores a 1, assim e como já esperado o conjunto máquina ferramenta apresenta uma boa rigidez.

Tabela. 13: Frequência

Modo	Frequência (Hz)	Rácio		
		42,41	44,04	63,63
1	99,97	0,42	0,44	0,64
2	200,00	0,21	0,22	0,32
3	297,33	0,14	0,15	0,21
4	399,33	0,11	0,11	0,16
5	467,33	0,09	0,09	0,14

Capítulo 5

5. Análise e Discussão de Resultados

5.1. Método de Taguchi

A análise do método de Taguchi pode ser descrita em três etapas: na primeira é implementada a avaliação Sinal-Ruído (S/N) que permite definir o nível de variação para cada parâmetro, de seguida realiza-se uma comparação do valor RMS entre todos os testes e finalmente realiza-se uma análise da variância, que é usado para definir a influência de cada parâmetro.

O S/N definido por Taguchi é uma medida robusta utilizada para identificar fatores de controlo que diminuem a variabilidade num processo, minimizando assim os efeitos de fatores não controláveis ou fatores de ruído. No método de Taguchi é possível identificar os fatores de ruído, podendo-se efetuar variações. Assim, a partir dos resultados identifica-se o fator de controlo ideal que tornam o processo mais resistente á variação dos fatores de ruído. Taguchi considerou três categorias da característica de desempenho na análise do S/N, nomeadamente nominal, maior e menor. A equação (20) define matematicamente a categoria usada neste trabalho, sabendo-se que, quanto menor for a vibração da ferramenta melhor será o resultado.

Neste caso, a categoria Menor corresponde à melhor relação S/N,

$$S/N_s = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (20)$$

Na Tabela 13 são apresentados os níveis de vibração RMS tirados durante uma duração de 120s da parte inicial, intermédia e final, (RMS1, RMS2 e RMS3, respetivamente), os quais foram gravados para cada teste experimental.

Tabela. 14: Resultados dos testes e a relação S/N

Nº Teste	RMS1 [m/s ²]			RMS2 [m/s ²]			RMS3 [m/s ²]			S/N [dB]		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	4.05	3.99	10.98	3.62	3.66	7.98	3.41	3.44	7.47	-11.37	-11.38	-19.03
2	4.01	4.20	10.05	5.06	5.23	11.01	5.25	5.70	11.71	-13.64	-14.12	-20.78
3	4.25	3.87	10.02	4.28	3.99	10.49	4.03	3.85	9.01	-12.44	-11.83	-19.88
4	4.02	3.85	9.97	4.08	4.74	9.87	4.13	4.32	10.39	-12.21	-12.70	-20.07
5	4.15	3.91	10.44	4.43	4.84	13.48	3.74	3.72	3.25	-12.29	-12.43	-20.02
6	4.01	4.10	10.17	5.75	6.13	14.07	5.88	6.03	14.06	-14.45	-14.81	-22.21
7	4.14	4.16	9.08	5.22	5.14	9.98	5.22	5.14	9.98	-13.78	-13.69	-19.72
8	8.73	10.16	15.16	8.80	10.14	17.49	8.80	10.14	17.49	-18.87	-20.13	-24.48
9	8.80	10.14	17.47	8.76	10.24	17.12	9.95	10.92	16.57	-19.26	-20.37	-24.64
10	3.17	2.95	9.20	3.06	2.88	9.31	3.01	2.50	7.92	-9.77	-8.89	-18.92
11	2.75	2.32	6.14	2.73	2.29	8.38	2.73	2.29	8.38	-8.75	-7.24	-17.73
12	1.56	1.71	5.56	2.04	1.99	6.13	2.23	2.15	5.96	-5.86	-5.83	-15.40
13	3.14	2.55	7.34	3.10	2.75	8.22	3.09	2.76	9.11	-9.86	-8.59	-18.34
14	3.26	2.90	8.60	3.18	2.82	9.20	3.20	2.83	8.56	-10.14	-9.10	-18.88
15	3.55	3.14	8.74	3.44	3.09	8.17	3.52	3.05	8.27	-10.89	-9.80	-18.48
16	3.37	2.81	7.60	3.19	2.59	7.22	3.01	2.46	7.16	-10.08	-8.38	-17.30

5.1.1. Razão sinal-ruído

Nos ensaios realizados ao longo desta dissertação, pretendeu-se minimizar as vibrações existentes na máquina. Dessa forma a fresadora pode ser mais eficiente e pode-se obter um melhor acabamento. A razão S/N é aplicado com o objetivo de minimizar as vibrações na ferramenta. Os resultados das dezasseis combinações (L16) estão apresentados na Tabela 13. Estas análises

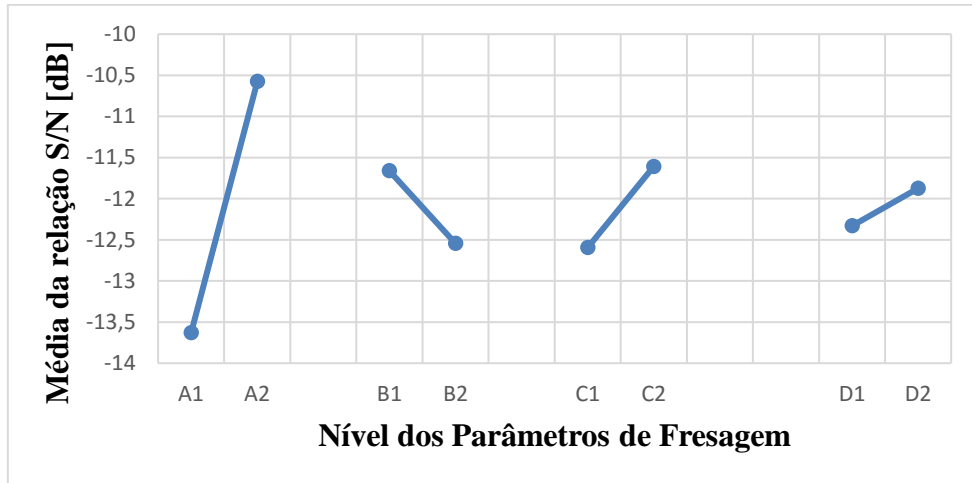
permitem dividir o efeito de cada parâmetro de corte para os diferentes níveis. A média da relação S/N para cada parâmetro de corte nos níveis 1 e 2 obtém-se calculando a média dos rácios de S/N para os ensaios correspondentes. A média de cada nível de parâmetros de corte estão apresentados na Tabela 14. A média total da vibração para a relação S/N na direção x - 12.103 dB, na direção y -11.830 dB e na direção z -19.743 dB.

Na figura 21 está representado o gráfico com o rácio do S/N para as vibrações. Para melhorar os parâmetros de maquinagem e identificar quais são as melhores combinações dos níveis de corte, utilizou-se a análise ANOVA.

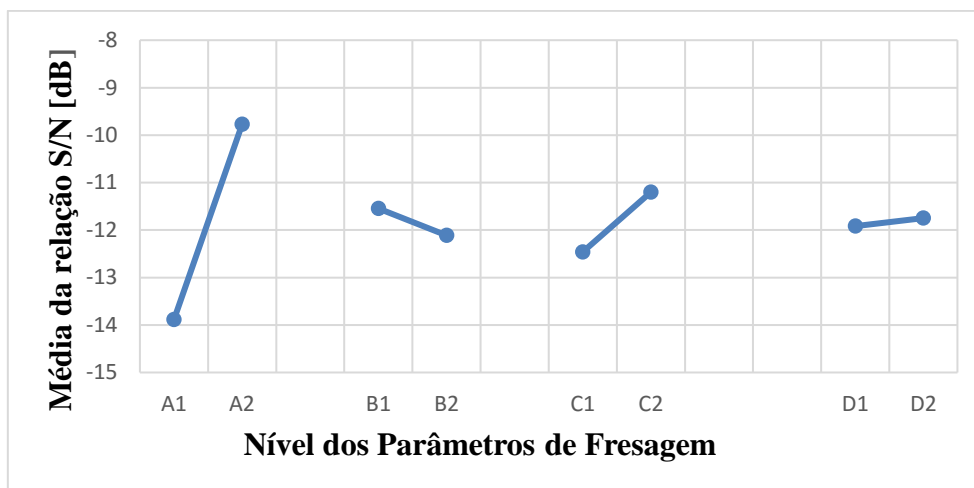
Tabela. 15:Relação média de S/N para RMS das vibrações

Símbolo	Parâmetros de corte	Direção	Média da relação S/N [dB]		
			Nível 1	Nível 2	max-min
A	Velocidade de corte [m/min]	X	-13.629	-10.576	3.053
		Y	-13.885	-9.775	4.110
		Z	-20.774	-18.713	2.061
B	Velocidade de Avanço [mm/tooth]	X	-11.661	-12.544	0.883
		Y	-11.546	-12.114	0.568
		Z	-19.557	-19.930	0.373
C	Profundidade de corte radial [mm]	X	-12.596	-11.610	0.986
		Y	-12.460	-11.200	1.260
		Z	-20.353	-19.133	1.220
D	Profundidade de corte axial [mm]	X	-12.329	-11.876	0.453
		Y	-11.915	-11.745	0.170
		Z	-19.731	-19.756	0.025

Na Tabela 14 e na figura 21 observa-se que a combinação ideal para a vibração é a mesma nas direções x e y (RMS_x e RMS_y), A2B1C2D2 e ligeiramente diferente para a vibração na direção z (RMS_z), que é A2B1C2D1. Neste caso, o nível de parâmetro D (profundidade axial de corte) é 1 (0,1 mm) para direção-Z em vez disso, o nível 2 (0,35 mm) observadas na direção x e z.

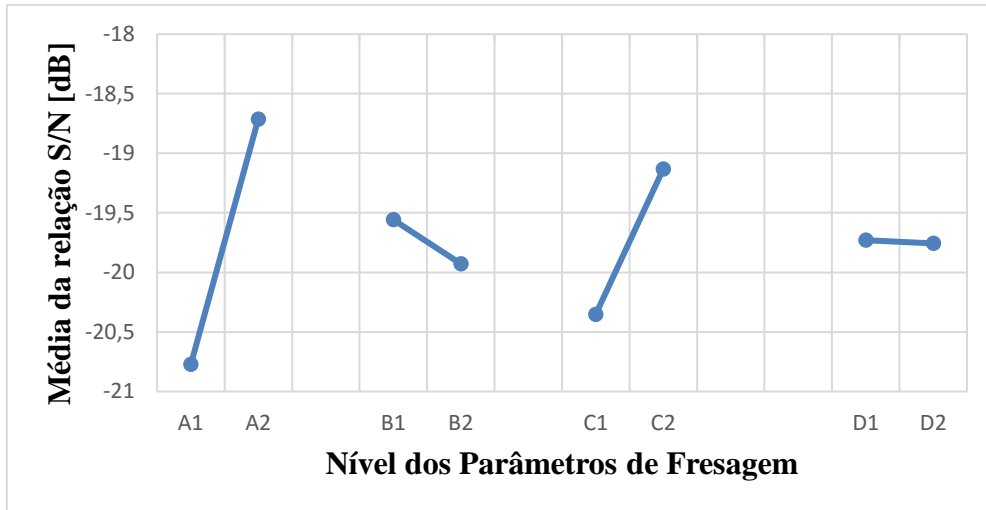


(a)



(b)

A relação S/N da vibração RMS pode ser analisada observando a figura 21 e a Tabela 14. A velocidade de corte (parâmetro A) é o parâmetro mais influente dos níveis de vibração para as três direções. A relação média máxima para a relação S/N ocorre para a direção Y (RMS_Y) e tem um valor de 4,110 dB. Por outro lado, a penetração de corte (parâmetro D), tem uma influência muito baixa na variação da média da relação S/N e a diferença entre os dois níveis é apenas 0,025dB para a direção Z (RMS_Z).



(c)

Figura 21: O S/N da vibração na direção X (a), direção Y (b) e direção Z (c).

5.1.2. Média das vibrações

A figura 22 apresenta um gráfico com a média das vibrações obtidas com os dezasseis ensaios realizados depois de efetuar a norma dos eixos x e y, utilizando os parâmetros associados ao método de Taguchi.

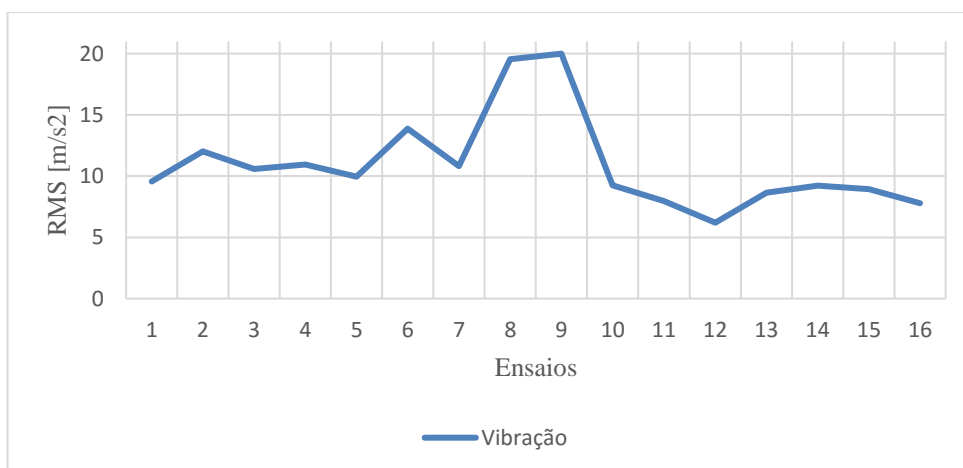


Figura 22: Gráfico da média das vibrações para cada ensaio pelo método de Taguchi.

Analisando o gráfico, observa-se que o ensaio 12 é o que apresenta um menor valor das vibrações, com um valor RMS de 6,19 m/s², enquanto que o ensaio 9 é o que apresenta o maior valor com um valor RMS de 19,99 m/s².

Apesar de estes dois ensaios apresentarem um valor RMS muito diferente, estes apresentam uma velocidade de rotação e uma velocidade de avanço iguais, modificando apenas a penetração axial e a penetração radial.

Pelo método das superfícies pode-se verificar que o ensaio de verificação 1 e 2 apresentam valores relativamente baixos comparados com alguns valores apresentados nos ensaios do método de Taguchi como se pode verificar no gráfico da figura 23.

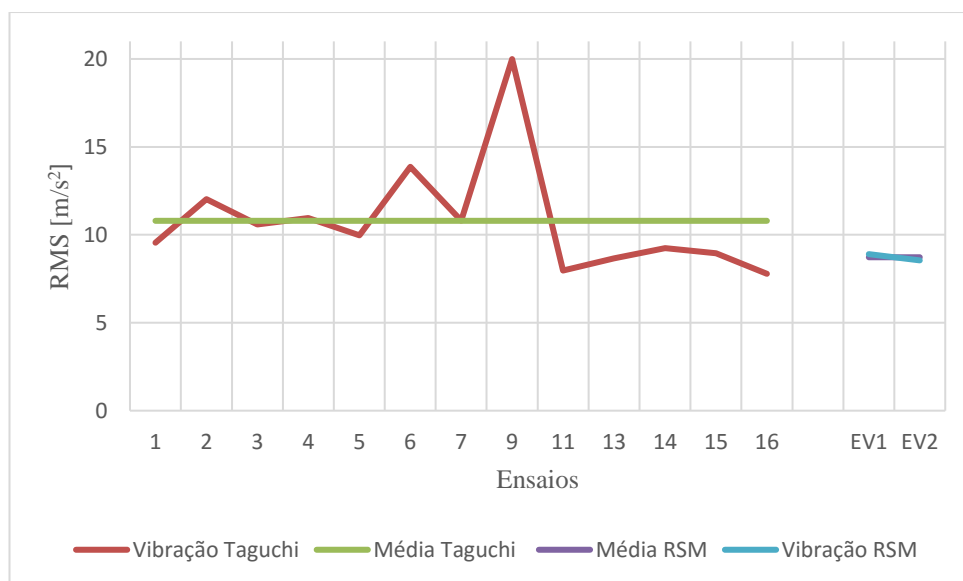


Figura 23: Gráfico da comparação da média das vibrações entre método de Taguchi e o método de Superfícies de Resposta

Analisando o gráfico da figura 23, pode-se confirmar que através dos ensaios de verificação se obtiveram bons resultados, ou seja, os ensaios de verificação EV1 e EV2 obtiveram valores RMS de 8,9 m/s² e 8,5 m/s². Assim Taguchi obteve uma média de 10,8 m/s² e o método de superfícies de resposta de 8,7 m/s².

Logo, o método de superfícies de resposta apresenta valores inferiores à média de RMS dos valores obtidos através do método de Taguchi. Como o método de superfícies de resposta estava a convergir para valores muito parecidos com os existentes decidiu-se parar com a verificação. Uma vez que os dados são gravados a três dimensões (X, Y e Z), os resultados poderão conter ruídos nas três dimensões tornando assim difícil a otimização ideal do problema.

5.1.3. Análise ANOVA

O objetivo da análise de variância é determinar quais os parâmetros de projeto que afetam significativamente a vibração. Os resultados de variância de cada parâmetro de corte e as suas interações são mostradas na Tabela 16, 17 e 18.

O teste F é uma ferramenta estatística para verificar quais os parâmetros de projeto mais significativos para a característica de qualidade. Este é definido como a razão da média dos quadrados desvios para o erro quadrático médio. Geralmente, quando mostra um valor maior do que quatro, isso significa que a variação do parâmetro de criação ou de corte tem um importante impacto na característica de qualidade.

Nas Tabelas seguintes 16, 17 e 18, Df representa os graus de liberdade, Sq a soma dos quadrados e Md a média dos quadrados.

Tabela. 16: Resultados da ANOVA para a direção X

Grupo	Df	Sq	Md	Valor F	Contribuição (%)
A	1	37.297	37.297	9.020	20.9
B	1	3.121	3.121	0.760	1.7
C	1	3.890	3.889	0.940	2.2
D	1	0.820	0.820	0.200	0.5
AxB	1	9.620	9.620	2.330	5.4
AxC	1	22.562	22.562	5.460	12.6
AxD	1	30.784	30.784	7.450	17.2
BxC	1	29.330	29.330	7.100	16.4
BxD	1	18.203	18.203	4.400	10.2

CxD	1	2.205	2.205	0.530	1.2
Resíduo	5	20.664	4.133		11.6
Total	15	178.496			100.0

Tabela. 17: Resultados da ANOVA para a direção Y

Grupo	Df	Sq	Md	Valor F	Contribuição (%)
A	1	67.560	67.560	10.330	25.9
B	1	1.292	1.292	0.200	0.5
C	1	6.355	6.355	0.970	2.4
D	1	0.116	0.116	0.020	0.0
AxB	1	19.156	19.156	2.930	7.4
AxC	1	28.406	28.406	4.340	10.9
AxD	1	42.999	42.999	6.570	16.5
BxC	1	36.723	36.723	5.620	14.1
BxD	1	18.397	18.397	2.810	7.1
CxD	1	6.670	6.670	1.020	2.6
Resíduo	5	32.699	6.540		12.6
Total	15	260.372			100.0

Da Tabela 16 é possível verificar quais as contribuições mais importantes para minimizar a vibração da ferramenta na direção X. A velocidade de rotação, a interação entre a velocidade de rotação e a profundidade do corte e a interação entre a velocidade de avanço e a penetração axial são os fatores mais significativos com uma contribuição de quase 21%, 17%, 16%, respectivamente.

A Tabela 17 mostra a contribuição de cada parâmetro de corte e sua interação para valor de vibração RMS na direção Y. Observa-se que a velocidade de rotação a interação entre a velocidade de rotação e a profundidade do corte e a interação entre a velocidade de avanço e a penetração axial tem contribuição de 26%, 17%, 14%, respectivamente. Para as direções X e Y,

os parâmetros de corte ideal para minimizar a vibração são a velocidade de rotação nível 2, a velocidade de avanço de nível 1, a profundidade de corte de nível 2 e a penetração axial do corte de nível 2.

Tabela. 18: Resultados da ANOVA para a direção Z

Grupo	Df	Sq	Md	Valor F	Contribuição (%)
A	1	16.996	16.996	9.470	19.3
B	1	0.557	0.557	0.310	0.6
C	1	5.957	5.957	3.320	6.8
D	1	0.002	0.002	0.000	0.0
AxB	1	6.717	6.717	3.740	7.6
AxC	1	12.176	12.176	6.790	13.8
AxD	1	19.314	19.314	10.770	21.9
BxC	1	7.348	7.340	4.100	8.3
BxD	1	9.635	9.635	5.370	10.9
CxD	1	0.443	0.443	0.250	0.5
Resíduo	5	8.970	1.794		10.2
Total	15	88.115			100.0

A influência dos parâmetros individuais de maquinagem e sua interação, para a vibração da ferramenta na direção-Z é mostrada na Tabela 18. É possível verificar que a contribuição mais importante é a interação entre a velocidade de rotação e a profundidade de corte (22%), seguindo com a velocidade de rotação (19%) e a interação entre a velocidade de rotação e a penetração axial (14%). Além disso, pode-se identificar que os parâmetros de corte ideal para esta vibração são a velocidade de rotação de nível 2, a velocidade de avanço de nível 1, a profundidade de corte de nível 2 e a penetração axial de nível 1.

5.2. Método das Superfícies de Resposta

Através dos ensaios de verificação efetuados através do método de superfícies de resposta obtiveram-se os valores apresentados na Tabela 19:

Tabela. 19: Resultados finais pelo método de superfícies de resposta.

Ensaio	EV1	EV2
Vel. Rotação [rpm]	2546	2644,3
Vel. Avanço [mm/min]	4440,7	4272,5
Penetração Axial [mm]	0,1	0,3
Penetração de Corte [mm]	2	2
Vibração RMS	8,9020	8,5466

Para os ensaios de verificação EV1 e EV2 obtiveram-se resultados satisfatórios em relação com alguns obtidos através do método de Taguchi. Mas, como nestes dois primeiros ensaios de verificação se observou que o método convergia, apresentando valores de entrada muito parecidos, logo ia apresentar valores das vibrações também muito similares.

Como os dados de entrada obtidos no terceiro ensaio de verificação eram similares aos dois ensaios anteriores e os resultados das vibrações iam ser também muito parecidos, resolveu-se terminar assim a verificação. Sabendo que estamos a utilizar as direções x, y e z dos resultados de Taguchi e como no método das superfícies de resposta só pode ser otimizado o valor de um dos eixos individualmente ou como foi feito do módulo de dois dos eixos, os resultados podem não estar totalmente apurados.

Mas mesmo assim foram obtidos valores das vibrações bastante baixos relativamente a alguns obtidos através do método de Taguchi.

Capítulo 6

6. Conclusões e propostas para trabalhos futuros

6.1. Conclusões

O trabalho aqui apresentado teve como principal objetivo a utilização do método de Taguchi e do método de Superfícies de Resposta onde se verifica que é possível otimizar os parâmetros no processo de fresagem.

Na medição das frequências de ressonância detetaram-se frequências próprias a 99.97, 200, 297.33, 399.33 e 467.33 Hz, e sabendo que durante os ensaios a máquina só funcionou em três rotações diferentes, 2546, 2644 e 3820 rpm, verificou-se que não existe ressonância dado que os valores do rácio são todos inferiores a, e como já era esperado o conjunto máquina ferramenta apresenta uma boa rigidez.

Tendo em conta os resultados obtidos com o acelerómetro triaxial é possível verificar que o método de Taguchi tem elevada robustez uma vez que permite determinar a contribuição de cada um dos parâmetros de maquinagem e a sua interação direta. Dos dezasseis ensaios efetuados através do método de Taguchi verifica-se que o ensaio 12 é o que apresenta menor valor das vibrações nas direções x, y e z verificando valores RMS de 1,944 m/s², 1.949 m/s² e 5.818 m/s², mas uma vez que foi necessário efetuar o módulo entre RMS_y, RMS_z, como referido anteriormente, o valor equivalente das vibrações para os dois eixos é de 6,2 m/s². Pode também

ser observado que o que obtém maior vibração é o ensaio 9 com um valor da vibração de 19.9 m/s², sendo a média dos dezasseis ensaios de 10.9 m/s².

Através da análise ANOVA verificaram-se quais as contribuições mais importantes para minimizar a vibração da ferramenta para cada um dos eixos, para x a velocidade de rotação, a interação entre a velocidade de rotação e a profundidade do corte e a interação entre a velocidade de avanço e a penetração axial são os fatores mais significativos com uma contribuição de quase 21%, 17%, 16%, respetivamente. Para y observa-se que a velocidade de rotação a interação entre a velocidade de rotação e a profundidade do corte e a interação entre a velocidade de avanço e a penetração axial tem contribuição de 26%, 17%, 14%, respetivamente. E por fim para z, verifica-se a interação entre a velocidade de rotação e a profundidade de corte (22%), seguindo com a velocidade de rotação (19%) e a interação entre a velocidade de rotação e a penetração axial (14%). Os parâmetros de corte ideal dados pela média da relação S/N para minimizar a vibração na direção x são a velocidade de rotação nível 2 (-10.576 dB), a velocidade de avanço de nível 1(-11.661 dB), a profundidade de corte de nível 2 (-11.610 dB) e a penetração axial do corte de nível 2 (-11.876 dB), para a direção y a velocidade de rotação nível 2 (-9.775 dB), a velocidade de avanço de nível 1(-11.546), a profundidade de corte de nível 2 (-11.200 dB) e a penetração axial do corte de nível 2 (-11.745 dB) e para a direção z pode-se identificar que os parâmetros de corte ideal para esta vibração são a velocidade de rotação de nível 2 (-18.713 dB), a velocidade de avanço de nível 1 (-19.557 dB), a profundidade de corte de nível 2 (-19.133 dB) e a penetração axial de nível 1(-19.731 dB).

O método de Superfícies de Resposta foi utilizado no decorrer do trabalho não só para otimizar os valores das vibrações, mas também com o intuito de o comparar com o método de Taguchi. Dos ensaios realizados neste trabalho, e comparado com o método de Taguchi, o método de Superfícies de Resposta parece ser mais favorável, porque, com apenas dois ensaios, verificaram-se valores inferiores à média dos valores verificados através de Taguchi, o que implica menor tempo de processamento, menos gastos de ferramenta e redução do material utilizado. Com o método de Superfícies de Resposta verificaram-se bons resultados de vibração nos dois primeiros ensaios (EV1 e EV2) e parou-se o processo de otimização devido aos valores obtidos serem similares. Os valores das vibrações para os ensaios de vibração EV1 e EV2 são 8.9 m/s² e 8.5 m/s², respetivamente.

Sabendo que estamos a utilizar x, y e z dos resultados de Taguchi e como no método das Superfícies de Resposta só pode ser otimizado o valor de um dos eixos individualmente ou como foi feito do módulo de dois dos eixos, os resultados podem não estar totalmente apurados.

6.2. Sugestões para trabalhos futuros

Para um trabalho futuro seria importante implementar o método de Taguchi com um número de níveis superior, utilizando o mesmo número de parâmetros utilizados neste trabalho e tendo como sugestão utilizar uma matriz ortogonal L27.

Como o objetivo deste estudo era otimizar os parâmetros de entrada de forma a melhorar o valor das vibrações, e como não foi possível otimizar o valor dos três eixos, propõe-se que se otimizem as vibrações nos três eixos e assim obter melhores resultados, testando novas modelações e novos algoritmos.

Seria também importante efetuar os ensaios utilizando novos materiais e começar logo a otimização no início dos ensaios.

Referências

- [1] M. P. Siddhpura, “A review of chatter vibration research in turning” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 61, pp. 27–47, 2012.
- [2] M. R.-S. Miguélez, “Improvement of chatter stability in boring operations with passive vibration absorbers” *Int. J. Mech. Sci.*, 2010.
- [3] G. C. Quintana, “Chatter in machining processes: A review” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 51, pp. 363–367, 2011.
- [4] S. Tobias, “*Machine Tool Vibration Blackie and Sons Ltda.* ”, 1965.
- [5] Y. Altintas, “*Manufacturing Technology*”, 2008.
- [6] R. C. Santos, “A contribution to Improve the Accuracy of Chatter Prediction in Machine Tools Using the Stability Lobe Diagram” *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 136, no. 2, 2014.
- [7] M. Z. Wang, “Design and implementation of non- linear TMD for chatter suppression: an application in turning processes” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 50, pp. 474–479, 2010.
- [8] K. H. Hajikolaie, “Spindle speed variation and adaptive force regulation to suppress regenerative chatter in the turning process” *J. Manuf. Process.*, vol. 12, pp. 106–115, 2010.
- [9] Phillip J. Ross, “*Taguchi techniques for quality engineering*”, 2^a Edição. .
- [10] M. R., M. D.C., and C. Anderson-Cook, “*Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Design of Experiments* 3^a edição”.
- [11] H. Gerling, “*Alrededor de las máquinas herramientas*”, 1957.
- [12] G. Box and N. Draper, “*Empirical Model-Building and Response Surfaces*”, 1^a edição. .

- [13] D. Montgomery, “*Design and Analysis of Experiments*” Jhon Wiley & Sons, Inc, vol. 5th. p. 684, 2001.
- [14] D. C. Montgomery, “*Design and Analysis of Experiments*”, 8th ed., 2013.
- [15] Douglas C. Montgomery, “*Introduction to Statistical Quality Control*”, 6th ed. 2009.
- [16] N. Costa, “*Multiple response optimization: methods and results*” *Int. J. Ind. Syst. Eng.*, vol. 5, pp. 442–459, 2010.
- [17] A. F. A. Completo, João Paulo Davim, “*Tecnologia de Fabrico*”.
- [18] J. Ribeiro, “*Tecnologia Mecânica II*” 2013.
- [19] J. P. Correia, “*Maquinagem de Alta Velocidade - Fresagem / CNC*”, 2006.
- [20] S. B. (2013) Gil, “*Processos de Mecanizado*”, 2013.
- [21] C. Drozda, T. J., & Wock, “*Tool and Manufacturing Engineers Handbook – Machining*”, 1983.
- [22] C. Relvas, “*Controlo Numérico Computorizado: Conceitos Fundamentais*. 2012.
- [23] C. E. Stemmer, “*Ferramentas de corte II*” 1995.
- [24] K. W. Boothroyd G., “*Fundamentals of machining and machine tools*”, 1989.
- [25] N. L. Dinis, A. E., Marcondes, F. C., & Coppini, “*Tecnologia da usinagem dos materiais*”, 1999.
- [26] A. Krelling, “*Parâmetros de corte no processo de usinagem: fresamento*” 2016. [Online]. Available: <http://moodle.joinville.ifsc.edu.br/>.
- [27] M. P. Groover, “*Fundamentals_of_Modern_Manufacturing*”, 2010.
- [28] “National Instruments,” 2016. [Online]. Available: <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/pt/>.
- [29] “Wikipedia LabView,” 2016. [Online]. Available: <https://pt.wikipedia.org/wiki/LabVIEW>.
- [30] “Wikipedia Taguchi,” 2016. [Online]. Available: https://pt.wikipedia.org/wiki/Genichi_Taguchi.
- [31] C. Tzenga, “*Optimization of turning operations with multiple performance characteristics using the Taguchi method and Grey relational analysis*” *J. Mater. Process. Technol.*, 2009.
- [32] W. T. Yang, “*Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method*” *J. Mater. Process. Technol.*, pp. 122–129, 1998.

- [33] B. M. Gopalsamy, “*Taguchi method and ANOVA: An approach for process parameters optimization of hard machining while machining hardened steel*” *J. Sci. Ind. Res. (India)*, 2009.
- [34] J.C., “*Método de Taguchi; Qualidade voltada para o projeto do produto e do processo*” *Revista da administração*, pp. 62–68, 1989.
- [35] H. H. Schulz, “*High-Speed Machining. Munchen: Carl Hanser Verlag*”, 1996.
- [36] Y. Altintas, “*Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Designer*”, 2000.
- [37] D. J. Ewis, “*Modal Testing Theory and Practice. Letchworth*”.
- [38] C. M. Crede, C. E., & Harris, “*Shock and Vibration Handbook*”.
- [39] B. E. Altintas Y., “*Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling*”, 1996.
- [40] T. Schultz, H., & Wurz, “*Balancing Requirements for Fast Rotating Tools and Spindle Systems*”, 1997.
- [41] H. B. Muhle, “*Mandrillamento com Cabeçotes de Excentricidade Regulável e Sistema de Balanceamento*” 2000.
- [42] G. Tlustý, “*Manufacturing Process and Equipment*”, 2000.
- [43] T. Dias, N. Paulo, L. Queijo, H. Lopes, M. B. César, and J. Ribeiro, “*Milling Parameters Optimization for Minimize the Chatter Effect in Surface Quality. CONTROLO 2016 - Proceedings of the 12th Portuguese Conference on Automatic Control*, 2016.
- [44] “steel-grades.” [Online]. Available: <http://www.steel-grades.com/Steel-grades/Tool-steel-Hard-alloy/1-2738.html>. [Accessed: 20-Jun-2007].
- [45] “Palbit Plus 49095.” [Online]. Available: <http://www.palbit.pt/en/products.7/cutting-tools.813/milling.814/profiling.823/plus-49095-%7C-wnhu-04t310.a4844.html>.
- [46] “Palbit WNHU.” [Online]. Available: <http://www.palbit.pt/en/products.7/cutting-tools.813/inserts.897/milling-inserts.898/wnhu.a5197.html>.

Anexos

Anexo I- Dados técnicos Deckel Maho DMC 63V.

Tabela I- Dados técnicos Deckel Maho DMC 63V.

Dados técnicos	
Fabricante	Deckel Maho
Modelo	DMC 63V
Tipo CNC	Siemens Sinumerik 810D
Ano	1998
Peso	4200 kg
Medidas	L 2700 x W 1900 x H 2400 mm
Especificações	Sistema de refrigeração
	Sk40
	Digital display
	24 specialized tool change
	380 Volt
	Feeds X Y Z feed automatically
	Stepless gearbox 0-8000 rev / min
	Processing area x 630 y 500 z 500 mm
	Table size 800 x 500 mm
	Table load 500 kg

Anexo II- Dados técnicos da ferramenta de fresagem.

Tabela II- Dados técnicos da ferramenta de fresagem.

Milling tool PLUS 49095	
Order code	181030500
Reference	025R49095-04-07-M12030
K_r (°)	95°
D_c (mm)	25
M	M12
dg (mm)	21
L (mm)	30
ap (mm)	0.3
Z effective cutting edge	4
Coupling type	Threaded Coupling
Axial (°)	-7°
Tool hand	Right
Weight (kg)	0.09

Anexo III- Propriedades da pastilha de fresagem.

Tabela III- Propriedades da pastilha de fresagem [34].

WNHU	
Order code	1110783M6
Reference	INSERTS WNHU 04T310 PH6103
IC (mm)	6.35
S (mm)	3,97
I (mm)	2.8
R (mm)	1
Z effective cutting edge	6
Tolerance class insert	H
Coating	PVD

Work hand	L,R	
CUTTING CONDITIONS		
P = Steel	P	01 – 05
	Vc	200 – 300 m/min
	fz	0,1 – 0,3 mm/t
	ap	
K = Cast Iron	K	01 – 05
	Vc	200 – 300 m/min
	fz	0,1 – 0,3 mm/t
	ap	
H = Hardened steel	Vc	120 – 180 mm/min