

Otimização dos Parâmetros de Maquinagem no Processo de Fresagem

Tânia Maria Costa Dias

Relatório da Dissertação Final 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

Julho de 2016

Otimização dos Parâmetros de Maquinagem no Processo de Fresagem

Tânia Maria Costa Dias

Relatório da Dissertação Final 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

Orientador: Prof. Dr. João Pinto Castro Ribeiro

Co-orientador: Prof. Dr. Hernâni Miguel Reis Lopes

Prof. Dr. Luís Miguel Cavaleiro Queijo

Julho de 2016

“Determinação coragem e confiança são fatores decisivos para o sucesso. Se estamos possuídos por uma inabalável determinação conseguiremos superá-los. Independentemente das circunstâncias, devemos ser sempre humildes, recatados e despidos de orgulho”.

(Dalai Lama- Citacões, 2016)

Agradecimentos

Abraçar e concluir este desafio não foi deveras fácil, contudo, não seria possível alcançá-lo sem a ajuda e a presença de algumas pessoas que durante estes anos estiveram incondicionalmente a meu lado.

Em primeiro lugar quero agradecer ao Professor João Ribeiro pelo apoio, por toda a ajuda prestada, pela sua disponibilidade e por estar sempre pronto a ajudar durante o desenvolvimento deste trabalho.

À professora Ana Isabel, sempre com um sorriso na cara e disposta a ouvir-me, obrigada por aceitar este desafio já quase a meio do semestre, pela sua disponibilidade, pela preocupação e ajuda do trabalho a ser desenvolvido.

Aos meus pais, que me transmitiram que o “saber” não ocupa lugar e que por isso só alentaram ainda mais a minha vontade de vencer. E por todo o sacrifício que fizeram para eu concluir os estudos.

Ao Cláudio, meu companheiro e especialmente meu grande amigo, aquele que percorreu a mesma estrada e que me incutiu a certeza de ser capaz, basta para isso acreditar e me apoiar em todos os momentos.

Ao meu irmão, por toda a força que me deu e por me dizer sempre que desistir nunca é o caminho.

Ao Engenheiro Meireles e ao Engenheiro Jorge pela disponibilidade prestada para fazerem os ensaios no laboratório de Tecnologia Mecânica.

À empresa Palbit® pela disponibilidade das ferramentas utilizadas na realização deste trabalho.

Um agradecimento muito sentido aos meus amigos, em especial à Margarida e Flávia que acompanharam direta ou indiretamente o meu percurso académico e que para todo o sempre estarão nas minhas memórias.

De todos e muito importantes destaco para expressar a mais profunda gratidão, à minha amiga Mónica, companheira neste percurso, depositária de horas boas e más, conselheira e crítica nos momentos oportunos.

Muito Obrigado a todos.

Resumo

Cada vez mais, os principais objetivos na indústria é a produção a baixo custo, com a máxima qualidade e com o tempo de fabrico o mais curto possível. Para atingir esta meta, a indústria recorre, frequentemente, às máquinas de comando numérico (CNC), uma vez que com esta tecnologia torna se capaz alcançar uma elevada precisão e um tempo de processamento mais baixo.

As máquinas ferramentas CNC podem ser aplicadas em diferentes processos de maquina-gem, tais como: torneamento, fresagem, furação, entre outros. De todos estes processos, o mais utilizado é a fresagem devido à sua versatilidade. Utiliza-se normalmente este processo para maquinar materiais metálicos como é o caso do aço e dos ferros fundidos.

Neste trabalho, são analisados os efeitos da variação de quatro parâmetros no processo de fresagem (velocidade de corte, velocidade de avanço, penetração radial e penetração axial), individualmente e a interação entre alguns deles, na variação da rugosidade num aço endurecido (aço 12738). Para essa análise são utilizados dois métodos de otimização: o método de Taguchi e o método das superfícies. O primeiro método foi utilizado para diminuir o número de combinações possíveis e, conseqüentemente, o número de ensaios a realizar é denominado por método de Taguchi. O método das superfícies ou método das superfícies de resposta (RSM) 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 RSM converge mais rapidamente para um valor ótimo.

O método de Taguchi é muito conhecido no setor industrial onde é utilizado para o controlo de qualidade. Apresenta conceitos interessantes, tais como robustez e perda de qualidade, sendo bastante útil para identificar variações do sistema de produção, durante o processo industrial, quantificando a variação e permitindo eliminar os fatores indesejáveis. Com este método foi

construída uma matriz ortogonal L16 e para cada parâmetro foram definidos dois níveis diferentes e realizados dezasseis ensaios. Após cada ensaio, faz-se a medição superficial da rugosidade da peça. Com base nos resultados obtidos das medições da rugosidade é feito um tratamento estatístico dos dados através da análise de variância (*Anova*) a fim de determinar a influência de cada um dos parâmetros na rugosidade superficial. Verificou-se que a rugosidade mínima medida foi de $1,05\mu\text{m}$.

Neste estudo foi também determinada a contribuição de cada um dos parâmetros de maquiagem e a sua interação. A análise dos valores de “F-ratio” (*Anova*) revela que os fatores mais importantes são a profundidade de corte radial e da interação entre profundidade de corte radial e profundidade de corte axial para minimizar a rugosidade da superfície. Estes têm contribuições de cerca de 30% e 24%, respetivamente. Numa segunda etapa este mesmo estudo foi realizado pelo método das superfícies, a fim de comparar os resultados por estes dois métodos e verificar qual o melhor método de otimização para minimizar a rugosidade.

A metodologia das superfícies de resposta é baseada num conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas úteis para modelar e analisar problemas em que a resposta de interesse é influenciada por diversas variáveis e cujo objetivo é otimizar essa resposta. Para este método apenas foram realizados cinco ensaios, ao contrário de Taguchi, uma vez que apenas em cinco ensaios consegue-se valores de rugosidade mais baixos do que a média da rugosidade no método de Taguchi. O valor mais baixo por este método foi de $1,03\mu\text{m}$. Assim, conclui-se que RSM é um método de otimização mais adequado do que Taguchi para os ensaios realizados. Foram obtidos melhores resultados num menor número de ensaios, o que implica menos desgaste da ferramenta, menor tempo de processamento e uma redução significativa do material utilizado.

Palavras-chave: Fresagem, parâmetros de fresagem, método de Taguchi, análise da variância, método das superfícies da resposta.

Abstract

Increasingly, the main objectives in the industry is the production at low cost, with the highest quality and the manufacturing time as short as possible. To achieve this goal, the industry uses, often, the numerical control (CNC) machines, since this technology becomes able to achieve a high accuracy and a lower processing time.

The CNC machine tools can be applied to various machine-gem processes such as turning, milling, drilling, among others. In all these processes the most used is the milling because of its versatility. Use normally this process for machining metallic materials such as steel and cast iron.

In this work, the effects of varying four parameters in the milling process (cutting speed, feed rate, radial penetration and axial penetration) are analyzed individually and the interaction between some of them, in the roughness variation in hardened Steel (steel 1.2738). For this analysis used two optimization methods: the Taguchi method and the method of surfaces. The first method was used to decrease the number of possible combinations and therefore the number of tests to be performed is called by Taguchi method. The method of surfaces or method of response surfaces (RSM) was used in order to compare the results obtained with the Taguchi method, according to some studies referred to in the relevant literature, RSM converges faster a great value.

The Taguchi method is well known in the industry where it is used to control it quality. It presents interesting concepts such as loss of strength and quality, and useful to identify the production system changes during the industrial process, quantizing the variation and allowing eliminate undesirable factors. With this method was built a L16 orthogonal matrix and for each parameter were defined two different levels and made sixteen trials.

After each test, there was the surface roughness measurement of the workpiece. Based on the results obtained from surface roughness measurements it is made a statistical treatment of data by analysis of variance (*Anova*) to determine the influence of each parameter in surface roughness. It is noted that the minimum roughness was measured $1.05\mu\text{m}$

This study also determined the contribution of each of the m-bending parameters and their interaction. The analysis of F-ratios (*Anova*) revealed that the most important factors are the depth and radial cutting depth of the interaction between the color you radial and axial depth of cut to minimize surface roughness. These contributions have about 30% and 24%, respectively. In a second step this study was conducted by the method of surfaces, in order to compare the results of these two method and check which of the best optimization method to minimize the surface roughness.

The methodology of the response surface is based on a set of mathematical techniques and useful statistics to model and analyze problems where the answer is interest influences of several variables to which the goal is to optimize this response. For this method were only performed five tests were not made more, unlike Taguchi, since these assays can be lower roughness value than the average roughness of the Taguchi method. The lowest value is $1.03\mu\text{m}$. This concludes the RSM is a more suitable optimization method than for the tests performed Taguchi, better results are obtained in a smaller number of tests which implies less wear of the tool, the lowest processing time and a significant reduction of the material used.

Key-words: Milling, milling parameters, Taguchi's method, variance analysis, Surface Response Methodology.

Índice

Agradecimentos	iv
Resumo	v
Abstract.....	v
Índice	vii
Abreviaturas.....	x
Símbolos	xi
Lista de figuras	xii
Lista de tabelas	xiv
Capítulo 1	1
1. Introdução	1
1.1 Estado de arte	1
1.2 Objetivos	5
1.3 Estrutura	6
Capítulo 2	7
2. Introdução teórica	7
2.1 Processos de Maquinagem.....	7
2.1.1 Fresagem	10
2.1.2 Parâmetros de funcionamento na Fresagem.....	12
2.1.3 Processos de maquinagem controláveis	13

2.2 Taxa de produtividade.....	15
2.3 Rugosidade da Superfície	15
2.3.1 Rugosímetro	17
2.4 Método de Taguchi	17
2.4.1 Perspetiva História	18
2.4.2 Função perda na qualidade de Taguchi	20
2.4.3 Taguchi e razão sinal-ruído	20
2.5 Método da superfície da resposta.....	22
Capítulo 3	25
3. Ensaio Experimentais	25
3.1 Matrizes para os ensaios experimentais pelo método de Taguchi	25
3.2 Procedimento experimental pelo método das Superfícies de Resposta	28
3.2.1 Método de Nelder-Mead	28
3.2.2 Método de Programação Sequencial	29
3.2.3 Método de otimização baseado no Algoritmo Genético	29
3.3 Materiais e ferramentas	30
Capítulo 4	33
4. Resultados dos ensaios.....	33
4.1 Resultados obtidos através do método de Taguchi	33
4.2 Resultados obtidos através do método de Superfícies de resposta.....	35
Capítulo 5	36
5. Análise e discussão dos resultados	36
5.1 Método de Taguchi.....	36
5.1.1 Razão Sinal-Ruido.....	36
5.1.3 Análise Anova	39
5.1.4 Confirmação dos ensaios.....	40

5.2 Método das Superfícies	42
Capítulo 6	47
6. Conclusões e propostas para trabalhos futuros	47
6.1 Conclusões	47
6.2 Sugestões para Futuros Trabalhos	48
7. Referências Bibliográficas	49
8. Anexos	54
8.1 Anexo I- Dados técnicos Deckel Maho DMC 63V	54
8.2 Anexo II- Dados técnicos da ferramenta de fresagem.	54
8.1 Anexo III- Propriedades da pastilha de fresagem.	55
8.3 Anexo IV- Valores e média dos três pontos da rugosidade.	56
8.4 Anexo V- Código Matlab para o método das Superfícies	62

Abreviaturas

ae - Profundidade de corte axial;

ap - Profundidade de corte radial;

CNC- Controlo numérico computadorizado (*Computer Numeric Control*);

D- Diâmetro;

fz- Avanço por dente;

MRR- Taxa de remoção do material;

mm- Milímetros;

m- Metros;

RSM- Método das Superfícies de resposta;

N- Velocidade de rotação;

Ra- Rugosidade da superfície;

SI - Sistema Internacional;

Tp- Taxa de produção;

Tm- Tempo da peça de trabalho;

Vc- Velocidade de corte;

Vf- Velocidade de avanço;

W- Largura;

Zn- Número de dentes.

Símbolos

\bar{y} - Média dos dados observados;

s_y^2 - Variância de y ;

n - Número de observações;

x_k - Variáveis independentes;

β_i - Coeficientes a serem estimados;

k - Número de variáveis independentes;

ε - Erro experimental;

η_m - Média total da razão S/N;

$\bar{\eta}_i$ - Razão S/N média para o nível ótimo;

$\hat{\eta}$ - Razão S/N estimada.

Lista de figuras

Figura 1- Fresadora Universal.....	8
Figura 2- Torno Paralelo Convencional.	8
Figura 3-Furadora.....	9
Figura 4- Retificadora Plana (http://www.solucoesindustriais.com.br).	9
Figura 5- Serrote Mecânico.....	9
Figura 6-Operações de fresagem: a) movimento de avanço; b) movimento principal ou de corte; c) curso útil de uma navalha [44].	10
Figura 7- Processos de Fresagem: a) Fresagem cilíndrica; b) Fresagem frontal ou de topo [45].	10
Figura 8- Parâmetros de fresagem, adaptado de [47].....	12
Figura 9- Parâmetros de fresagem [48].	14
Figura 10- Rugosímetro [50].....	17
Figura 11- Genichi Taguchi (http://www.skymark.com).....	17
Figura 12- Gráfico função-perda (www.datalyzer.com).....	20
Figura 13- Gráfico de contornos (à esquerda) e gráfico de superfície de resposta (à direita) [41].	24
Figura 14- Bloco na mesa da CNC: detalhes de pontos de medição de rugosidade.	30
Figura 15- Colocação do equipamento para medição de rugosidade.....	31
Figura 16- Ferramenta de fresagem [48].....	31
Figura 17- Pormenores das pastilhas WNHU [48].....	32
Figura 18- Variação da taxa de produtividade em relação à razão S/NL.....	35
Figura 19- Valor médio S/Ns para os diferentes níveis de parâmetros.....	37

Figura 20- Gráfico da rugosidade para cada ensaio pelo método de Taguchi.	38
Figura 21 - Gráfico da rugosidade média para cada ensaio pelo método das Superfície.....	38
Figura 22- Gráfico 3D Velocidade de avanço-Penetração Axial para a Rugosidade.	43
Figura 23- Gráfico 3D Penetração Radial-Velocidade de avanço para a Rugosidade.....	43
Figura 24- Gráfico 3D Velocidade de rotação-Velocidade de avanço para a Rugosidade.	44
Figura 25- Gráfico 3D Velocidade rotação-Penetração radial para a Rugosidade	44
Figura 26- Gráfico 3D Velocidade de rotação-Penetração Axial para a Rugosidade.....	45
Figura 27- Gráfico 3D Penetração Radial-Penetração Axial para a Rugosidade.....	45
Figura 28– Gráfico de contorno velocidade de rotação-velocidade de avanço para a rugosidade.	46

Lista de tabelas

Tabela 1– Valores dos parâmetros de corte.	26
Tabela 2-Tabela de Taguchi para seleção da matriz ortogonal.	26
Tabela 3- Matriz L16 de Taguchi.....	26
Tabela 4- Matriz L16 de Taguchi com os valores dos parâmetros do fabricante.	27
Tabela 5- Matriz L16 de Taguchi com os valores nas unidades SI.....	27
Tabela 6- Composição química do aço 1.2738 [57].....	30
Tabela 7- Matriz experimental e medição da rugosidade dos 16 ensaios	33
Tabela 8- Valores da Taxa de produtividade.	34
Tabela 9- Valores dos ensaios pelo método de superfície de resposta.....	35
Tabela 10-Valor médio da rugosidade e razão S/Ns.	36
Tabela 11-Resultados da ANOVA para a rugosidade da superfície.	39
Tabela 12- Resultados S/N para rugosidade de superfície.	41
Tabela 13-Resultados dos testes de confirmação para a rugosidade de superfície.	41
Tabela 14- Resultados finais dos ensaios pelo método das superfícies de resposta.	42
Tabela 15-Comparação dos ensaios com menor rugosidade.	42

Capítulo 1

1. Introdução

1.1 Estado de arte

No mundo global a chave da competitividade entre as empresas é a capacidade de cada uma se adaptar e distinguir-se conforme os mercados exigem.

Um estudo realizado pela ASQ (*American Society for Quality*), sobre o futuro da qualidade para as primeiras duas décadas do século XXI, afirma que "a procura da qualidade deve mudar, tornar-se mais inovadora, flexível e rápida na implementação de soluções eficazes que conduzam a resultados nos negócios e reflitam os desejos do consumidor". Tal investigação descreve que a inovação, a flexibilidade e a velocidade são os fatores críticos para o sucesso das empresas em adquirir vantagem competitiva, apercebem-se que mudanças são inevitáveis para que possam acompanhar todas as evoluções do mercado [1].

Entre as diferentes áreas industriais, uma das mais importantes no setor da metalomecânica são as indústrias que utilizam processos de fabrico por arranque de aparas, também conhecidos por processos de maquinagem. Por esta razão, procuram-se empresas industriais de maquinagem com maior produtividade, flexibilidade de sistemas de produção, redução de custos e obtenção de peças fabricadas com melhor qualidade superficial e dimensional [2].

Grande parte das indústrias utilizam diferentes técnicas de maquinagem, nomeadamente, a furação, o torneamento, a fresagem, entre outras, bem como, a combinação destas técnicas. No entanto, a eficiência não é a mesma em todas as técnicas, dito por outras palavras, para se obter a mesma peça existe uma técnica de maquinagem mais adequada que

permite uma melhor qualidade para o tempo de maquinagem e um menor consumo de energia. A melhor técnica depende do objetivo a ser alcançado. Atualmente, o processo de maquinagem mais utilizado na indústria é fresagem devido à sua elevada flexibilidade, especialmente se estiver associado ao comando numérico. São vários os estudos que se focam no processo de fresagem [3- 6].

No entanto, uma questão que surge frequentemente é a forma como evoluíram estas novas tecnologias na indústria. Nesse contexto, o adequado planeamento de experiências apresenta-se como uma das formas para se alcançar as características de competitividade ou os fatores críticos citados pela ASQ (inovação, flexibilidade e velocidade) [1].

O uso do método científico na implementação de projetos experimentais surge associado aos fundamentos da moderna estatística, teórica e experimental, iniciada a partir do século XX e deve-se em muito a Ronald Fisher. Fisher foi quem desenvolveu e usou pela primeira vez a técnica Anova como ferramenta primária para a análise estatística do projeto experimental, que passou a ser amplamente utilizada na análise estatística de dados de experiências e a técnica de polinómios ortogonais para o uso de características ambientais [7].

Statistical Methods for Research Workers (1925) e *The Design of Experiments* (1935) são duas obras de Fisher, onde este explana as suas ideias sobre os métodos estatísticos que perspetiva como um todo [8].

Em 1933 leva o seu trabalho para a Universidade de Londres, onde o DOE (do inglês *Design of Experiments*) foi aplicado e obteve enorme sucesso. Esta metodologia, desenvolvida entre 1920 e 1930 por Fisher, foi posteriormente aperfeiçoada por outros importantes investigadores como Box, Hunter e Taguchi, entre outros. A primeira aplicação prática do DOE realiza-se na British Textile em 1930 [9]. A partir das contribuições relevantes de Fisher, muitos delineamentos experimentais foram desenvolvidos para as mais variadas situações. Benardos e Vosniakos utilizaram DOE para prognóstico do mecanismo de formação da rugosidade superficial na fresagem facial numa liga de alumínio, normalmente utilizada na indústria aeroespacial [1]. Já Yih-Fong utiliza a técnica DOE para obter a melhor precisão dimensional na maquinagem dos materiais SKD-11 e SKD-61 utilizando uma CNC [10], enquanto Chang e Kuo utilizam DOE para a avaliação da rugosidade superficial na maquinagem com laser em cerâmica de óxido de alumínio [11]. Todos estes trabalhos

têm o mesmo objetivo, a otimização de processos de maquinagem obtidos a partir de arranjos experimentais previamente elaborados num trabalho *offline*, com resultados plenamente satisfatórios.

De acordo com o objetivo de maquinagem e a escolha de uma ferramenta de corte, existem diferentes combinações de parâmetros, como a velocidade de corte, avanço, profundidade axial ou radial para obter-se resultados diferentes em termos de qualidade da superfície maquinada e desgaste da ferramenta. Cada combinação dos parâmetros de corte vai resultar numa rugosidade da superfície e influenciar a vida da ferramenta. No entanto, é muito difícil definir a melhor combinação que proporciona um valor inferior de rugosidade e uma vida máxima da ferramenta. Além disso, é essencial reduzir os custos, sem reduzir a qualidade dos resultados.

A qualidade da superfície maquinada é avaliada através da medição da rugosidade da superfície, sendo esta uma característica fundamental da qualidade. Normalmente, este parâmetro é obtido experimentalmente, no entanto, alguns investigadores têm tentado prever a rugosidade da superfície do processo de maquinagem por meio de algoritmos matemáticos [12- 14], mas estes estudos são muito lentos e dispendiosos.

Para obter a melhor combinação dos parâmetros é necessário testar um elevado número de combinações, o que é impraticável para a indústria. As técnicas de otimização são uma solução interessante para minimizar o número de combinações de ensaios experimentais.

Nas últimas décadas, foram desenvolvidas muitas técnicas de otimização aplicadas à maquinagem [15], sendo as mais utilizadas a lógica fuzzy [16], os algoritmos genéticos [17], o método de Taguchi [18, 19], análise relacional [20] e o método de resposta de superfície [21]. Neste trabalho foi implementada a técnica de Taguchi e o método de resposta das superfícies de para a otimização da rugosidade superficial numa operação de fresagem.

O método de Taguchi [21, 22] é baseado na conceção 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. Este método é uma ferramenta poderosa, mas precisa de ser combinada com outras ferramentas estatísticas, como análise de variância (ANOVA), análise de componentes principais (PCA) [23] ou análise relacional [24], para analisar os resultados do método de Taguchi.

Alguns autores têm estudado o processo de maquinagem associando o método de Taguchi [25-32] para otimizar os parâmetros controláveis mais comuns, como velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. O objetivo em todas elas é a redução da rugosidade da superfície, através da aplicação do método baseado em Taguchi e a maior razão sinal-ruído para a rugosidade da superfície. No entanto, existem alguns fatores incontroláveis, como temperatura, vibrações e desgaste da ferramenta. Tal como Taguchi, o método das superfícies é também um poderoso método de otimização.

A Metodologia da Superfície de Resposta enquadrada nos delineamentos experimentais, revela-se um método importante na concepção, formulação, desenvolvimento e análise de produtos científicos. Este é um método igualmente eficaz na melhoria de estudos e produtos já existentes, sendo usada em muitos sectores industriais onde há espaço para o desenvolvimento e otimização de processos de fabrico [33].

A Metodologia das Superfícies de Resposta foi introduzida por GEP Box e KB Wilson em 1951 quando propuseram a utilização de polinómios do primeiro grau para aproximar a variável da resposta. A ideia principal da RSM é usar uma sequência de experiências planeadas para obter uma resposta ótima. Box e Wilson sugeriram ainda o uso de um modelo polinomial do segundo grau para o efeito. Eles reconhecem que este modelo é apenas uma aproximação e não uma certeza, mas usam-no porque tal modelo é fácil de estimar e aplicar, mesmo quando pouco se sabe sobre o processo. No entanto, de acordo com Meal e Pike (1989) a origem da RSM salientar-se a 1930 com o uso das Curvas de Resposta [35, 36]. Esta metodologia surgiu a partir de estudos relativos a problemas levantados por Hotelling e Friedman e Savage, que procuravam nos seus trabalhos de investigação, a realização de experiências para a obtenção de condições ótimas. Nesta investigação é realçada a contribuição importante de Hartley, que prestou um enorme contributo à eficiência e economicidade do modelo, cujos testemunhos se encontram disseminados na literatura e no terreno [37].

Inúmeros trabalhos relacionados com a metodologia RSM 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 [38-41].

Nos anos 80, o sucesso dos engenheiros e cientistas Japoneses alcançado pelo uso prático do projeto experimental e pela determinação das condições ótimas, vieram reanimar o interesse por RSM. Os últimos avanços da RSM 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 RSM é usada na generalidade na indústria e nos centros de investigação industrial como a nanotecnologia, exigem o rigor e precisão que esta metodologia permite. A RSM 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 [42].

Inicialmente 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 [40,41,43].

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é determinar os principais parâmetros de maquinaria que influenciam a rugosidade de superfícies fresadas, bem como, determinar a combinação ótima para a obtenção da menor rugosidade. Um outro objetivo importante é avaliar a influência da interação entre diferentes parâmetros de maquinaria no acabamento superficial das peças. Para efetuar esses estudos utilizaram-se dois métodos distintos de otimização, o método de Taguchi e o método de resposta das superfícies. Pelo método de Taguchi, definem-se os parâmetros do processo e respetivos níveis, bem como, a matriz ortogonal para a realização dos ensaios experimentais e a análise estatística dos dados pelo método da análise da variância (ANOVA). Com o método das superfícies de resposta realizam-se novos ensaios e compararam-se os resultados finais entre estes dois métodos com o objetivo de determinar qual o método de otimização mais adequado para o caso em estudo.

1.3 Estrutura

O primeiro capítulo tem por finalidade apresentar um enquadramento do trabalho, fazendo referência aos seus objetivos, metodologias seguidas para os atingir e uma breve descrição da estrutura da dissertação apresentada, para que o leitor tenha desde logo uma visão alargada do trabalho.

Após a introdução deste trabalho, no capítulo 2 encontra-se uma base teórica que, cientificamente, suporta todas as escolhas feitas durante o trabalho. Neste capítulo, apresenta-se uma breve descrição dos principais processos de maquinagem associados a propriedades de ferramentas de corte, principalmente a fresagem.

É também feita uma descrição dos métodos de otimização utilizados neste trabalho, o método de Taguchi e o método das superfícies. É também realizada uma análise teórica da influência dos diferentes parâmetros de maquinagem na rugosidade

No capítulo 3, numa primeira parte faz-se uma descrição completa do procedimento de trabalho, começando com as particularidades de cada ensaio e a metodologia a ser utilizada. Numa segunda parte deste terceiro capítulo, descreve-se algumas características dos materiais e ferramentas utilizadas neste estudo.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos através dos dois métodos onde são analisadas no capítulo seguinte.

O capítulo 5 é dedicado às análises dos ensaios, sendo apresentadas algumas conclusões preliminares.

Finalmente, no capítulo 6 são discutidas as principais conclusões deste trabalho e algumas sugestões são feitas a fim de fazer melhorias em estudos futuros.

Capítulo 2

2. Introdução teórica

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos teóricos considerados importantes para a correta compreensão do estudo apresentado neste trabalho. No início, apresenta-se uma descrição dos principais parâmetros de maquinagem e a sua influência nas técnicas de maquinagem. Seguindo-se de uma breve introdução histórica de como e o porquê surgir o método de Taguchi e o método das superfícies, como se desenvolveu e qual a sua importância atual.

2.1 Processos de Maquinagem

Maquinagem é um termo que abrange vários processos de fabrico desenvolvidos para a remover o material indesejado, geralmente sob a forma de aparas.

A maquinagem é usada para converter peças de fundição, forjamento ou mesmo blocos de metal nas geometrias pretendidas, com tamanho e acabamento específico a fim de atender os requisitos de projeto. Quase todos os produtos fabricados têm componentes que necessitam de ser maquinadas, muitas vezes com grande rigor dimensional. Portanto, este conjunto de processos são dos mais importantes no fabrico devido ao valor acrescentado que conferem ao produto final [44].

A maioria das aplicações industriais de maquinagem recai sobre os metais. Contudo, o processo de corte de metal tem resistido à análise teórica devido em parte à sua grande complexidade. A aplicação destes processos está bastante generalizada no mundo industrial.

Os processos de maquinagem são realizados numa grande variedade de máquinas ferramenta. Alguns exemplos de máquinas ferramenta básicas são [44]:

- As fresadoras (fresagem): A fresadora é uma máquina ferramenta que pode ser utilizada para as seguintes operações: superfícies planas ou curvas; entalhes ou ranhuras; serragem; roscagem, etc.



Figura 1- Fresadora Universal.

- Tornos (torneamento): O torno é uma máquina-ferramenta utilizada na produção de peças com forma de corpos de revolução. O torno permite as seguintes operações: torneamento de superfícies cilíndricas ou cónicas, facejamento de superfícies planas, entre outras.



Figura 2- Torno Paralelo Convencional.

Furadoras (furação): A furadora é essencialmente utilizada em operações de furação, mandrilagem e roscagem.



Figura 3-Furadora.

- Retificadoras (retificação): A retificação é um processo de fabrico por arranque de apara que se utiliza para melhorar o acabamento e aumentar a precisão dimensional das peças. Tal como nas ferramentas de corte utiliza-se um disco rotativo a que se dá o nome de mó.



Figura 4- Retificadora Plana (<http://www.solucoesindustriais.com.br>).

- Serrotes mecânicos (corte): Serrotes mecânicos são máquinas ferramentas que permitem o corte de materiais de diferentes dimensões, no qual a ferramenta (serra) é fornecida de movimento retilíneo alternativo.



Figura 5- Serrote Mecânico.

2.1.1 Fresagem

Um dos processos mais utilizados de maquinagem é a fresagem, este método é descrito como um processo de obtenção de superfícies maquinadas por remoção de uma quantidade de material com uma ferramenta de fresagem específica, como se apresenta na figura 6. Neste processo a ferramenta realiza o movimento de corte, enquanto a peça de trabalho (a mesa da máquina onde a peça de trabalho está montada) executa o movimento de avanço. As técnicas de fresagem são definidas de acordo com a orientação do eixo da ferramenta relativamente à peça e forma da mesma [45].

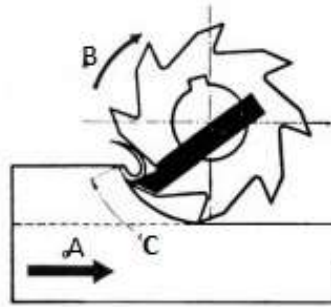


Figura 6-Operações de fresagem: a) movimento de avanço; b) movimento principal ou de corte; c) curso útil de uma navalha [44].

Os processos de Fresagem podem classificar-se em:

- Fresagem Cilíndrica: o eixo da fresa está disposto paralelamente à superfície de trabalho da peça;
- Fresagem Frontal ou de Topo: o eixo da fresa está disposto perpendicularmente à superfície de trabalho.

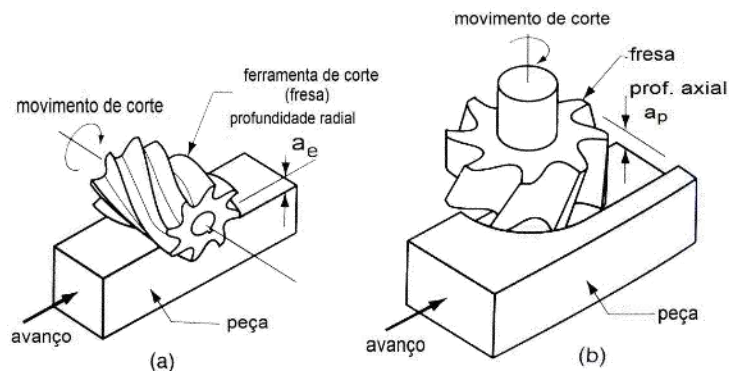


Figura 7- Processos de Fresagem: a) Fresagem cilíndrica; b) Fresagem frontal ou de topo [45].

Comparando estes dois tipos de processos é de notar que na fresagem cilíndrica a fresadora suporta uma carga irregular em virtude da forma em vírgula das aparas e, além disso, as superfícies maquinadas apresentam-se ligeiramente onduladas, enquanto numa fresadora frontal cada navalha arranca uma apara de espessura uniforme pelo que a carga que a fresadora suporta é uniforme [46].

Também, o rendimento de corte da apara é em geral 15 a 20% mais elevado do que no caso da fresagem cilíndrica. O acabamento superficial é superior com o processo de fresagem frontal. Sempre que possível, devem maquinar-se as superfícies planas pelo processo de maquinagem frontal ou de topo.

As vantagens do processo de fresagem são [46]:

- Possuir grande aplicação para a maquinagem de peças;
- Variedade de formas e superfícies que podem ser produzidas;
- Qualidade do acabamento superficial; e
- Alta taxa de remoção de aparas (alta produtividade, rapidez).

As desvantagens do processo de fresagem são [46]:

- A ferramenta tem a tendência a mover-se;
- A peça de trabalho tem a tendência de ser puxada para cima, sendo importante uma fixação adequada; e
- Desgaste mais rápido da ferramenta.

As ferramentas utilizadas na fresagem são, normalmente, designadas por fresas. Os materiais mais utilizados nas fresas são os aços rápidos (séries T e M) e carbonetos sintetizados (metal duro). Atendendo ao elevado preço dos aços rápidos e do metal duro, as fresas são fabricadas com o corpo em aço de construção, no qual se inserem navalhas de aço rápido ou metal duro [44].

2.1.2 Parâmetros de funcionamento na Fresagem

Existem algumas equações úteis para a determinação de alguns parâmetros de maquinagem [47]. Estes, podem ser descritos com base no diagrama esquemático apresentado na figura 8.

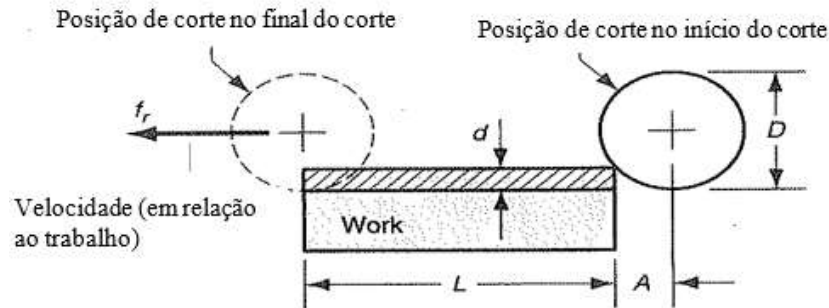


Figura 8- Parâmetros de fresagem, adaptado de [47].

A velocidade de corte (v) é convertida em velocidade de rotação do eixo (N), que é mais fácil de controlar, utilizando a equação 1.

$$N = \frac{v}{\pi * D} \quad \text{Equação [1]}$$

A velocidade de rotação (N) pode ser definida como o número de rotações da velocidade de corte admissível e do diâmetro da fresa (D).

A velocidade de avanço depende do tipo de fresa, profundidade de corte, qualidade de acabamento, potência da máquina e material da fresa e da peça, definida em milímetros por minuto [mm/min]. Este valor determina-se pela equação 2.

$$f_r = N * n_1 * f \quad \text{Equação [2]}$$

Onde:

f_r = Velocidade de avanço [mm / min];

N = Velocidade de rotação [rpm];

n_1 = Número de dentes;

f = Avanço por dente [mm/t].

A taxa de remoção de material (MRR) é outro parâmetro importante e pode ser determinada com a equação 3, ou seja, utilizando o produto da área da secção transversal do corte e a velocidade de avanço.

$$MRR = w * d * f_r \quad \text{Equação [3]}$$

Em que w representa a largura, d a profundidade da peça de trabalho e f_r a velocidade de avanço.

O tempo que será necessário para a fresagem de uma peça com um comprimento L , deve ter em conta a distância de aproximação necessária para envolver completamente o dispositivo de corte. Por exemplo, considerando o caso da espessura de fresagem e do diâmetro da ferramenta representados na figura 8, o tempo para executar a operação que é preciso para atingir a profundidade de corte completo é dado pela equação 4.

$$A = \sqrt{d(D - d)} \quad \text{Equação [4]}$$

onde:

d : profundidade de corte [mm].

D : diâmetro da fresa [mm].

Finalmente, para determinar o tempo para a peça de trabalho, T_m , usa se a equação 5.

$$T_m = \frac{L + A}{f_r} \quad \text{Equação [5]}$$

2.1.3 Processos de maquinagem controláveis

O principal objetivo deste trabalho é analisar os efeitos de quatro parâmetros controláveis sobre a rugosidade superficial para a maquinagem na fresagem. Esses quatro parâmetros são:

- Velocidade de corte;
- Velocidade de avanço;
- Penetração Axial; e
- Penetração Radial.

A velocidade de corte encontra-se normalmente em metros por minuto [m / min], por outro lado, as fresadoras usam na maioria das vezes a velocidade de rotação da árvore, em vez de a velocidade de corte. No entanto, a maior parte dos catálogos de ferramentas usam a velocidade de corte, por isso, é essencial relacionar estes dois parâmetros. A equação 6 dá esta relação e a figura 9 representa esquematicamente os principais parâmetros de maquinagem.

$$n = \frac{V_c * 1000}{\pi * D_c} \quad \text{Equação [6]}$$

onde:

n : Velocidade de rotação [rpm];

V_c : Velocidade de corte [m/min]; e

D_c : Diâmetro de corte [mm].

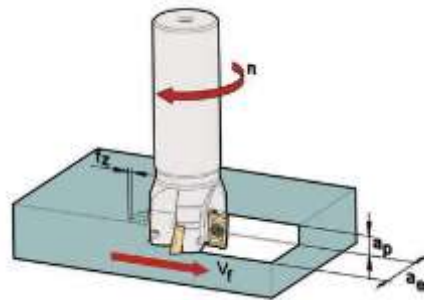


Figura 9- Parâmetros de fresagem [48].

Um outro parâmetro muito útil para a realização dos trabalhos de maquinagem é velocidade de avanço. No entanto, nos catálogos da ferramenta é mais comum a representação de avanço por dente e os dois parâmetros estão interligados pela equação 7.

$$V_f = n * Z_n * f_z \quad \text{Equação [7]}$$

onde:

V_f : velocidade de avanço [mm / min];

n : velocidade da árvore [rpm];

Z_n : número de dentes;

f_z : avanço por dente [mm / t].

A profundidade do parâmetro de corte é dada normalmente em milímetros e na fresagem deve ser definido em duas direções: axial e radial. No trabalho apresentado neste relatório, a penetração axial varia entre 0,10-0,35 [mm] enquanto a penetração radial entre 1-2 [mm].

2.2 Taxa de produtividade

A taxa de produção (Tp) diz respeito à velocidade de processamento com que uma máquina, um posto de trabalho ou um qualquer sistema, se processa durante um período de tempo [30]. No entanto, o que interessa é maximizar os proveitos, isto é, a taxa de produção (volume de material removido por unidade de tempo), apresentada na equação 8.

$$Tp = (ap * ae * F)/1000 \quad \text{Equação [8]}$$

onde:

Tp : taxa de produção [cm^3/min];

ap : Profundidade de corte radial [mm];

ae : Profundidade de corte axial [mm]; e

F : Velocidade de avanço [m/min].

Para velocidades inferiores à velocidade de menor desgaste implica um débito da ferramenta e uma taxa de produção também baixa [44]. Para velocidades superiores à velocidade de menor desgaste, o menor débito da ferramenta é compensado, pelo menos até um certo limite, pela maior taxa de produção, reduzindo os custos de produção ou aumentar os lucros.

2.3 Rugosidade da Superfície

A rugosidade é uma medida das variações do relevo (irregularidades), isto é, pequenas saliências (picos) e reentrâncias (vales) que caracterizam uma superfície [49].

O parâmetro Ra (Rugosidade) pode ser usado nos seguintes casos:

- Quando é necessário o controlo contínuo da rugosidade nas linhas de produção;
- Em superfícies em que o acabamento apresenta sulcos de maquinagem bem orientados (torneamento, fresagem etc.); e
- Em superfícies de pouca responsabilidade, como no caso de acabamentos com fins apenas estéticos.

Um valor de rugosidade elevada é muitas vezes indesejável, pode ser difícil e caro para controlar no fabrico. Geralmente, a diminuição da rugosidade superficial faz com que aumente os custos de fabrico. Existe assim uma relação entre o custo de fabrico e a qualidade da superfície de um componente [49].

No Sistema Internacional, a unidade de rugosidade é o micrómetro [μm] ou micron (1 micron = 0,000001 m = 0,001 mm).

Os valores de rugosidade média (R_a) em função da operação ou processo de fabrico constam em diversas tabelas, variando entre 0,012 e 50 μm . As representações típicas são:

- Superfície maquinada: 12,5 μm .
- Superfície lisa: 3,2 μm .
- Superfície polida: 0,8 μm .

A definição matemática deste parâmetro é dada pela equação 9.

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad \text{Equação [9]}$$

Onde:

n : número de parâmetros; e

y_i : desvios do perfil de rugosidade.

A rugosidade desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos, ela influi na qualidade de deslizamento, resistência ao desgaste e resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes.

Algumas vantagens do parâmetro, R_a são:

- Aplicável à maioria dos processos de fabrico;
- É o parâmetro de medição mais utilizado em todo o mundo;
- Devido à sua grande utilização, quase todos os equipamentos apresentam esse parâmetro (de forma analógica ou digital eletrónica).

Desvantagens do parâmetro R_a :

- O valor de Ra em um comprimento de amostra indica a média da rugosidade. Por isso, se um pico aparecer na superfície, o valor da média não sofrerá grande alteração, ocultando o defeito.
- O valor de Ra não define a forma das irregularidades do perfil. Dessa forma, pode-se ter um valor de Ra para superfícies originadas de processos diferentes de maquinar.

2.3 Rugosímetro

O rugosímetro é uma ferramenta para medir e avaliar micro-irregularidades de uma superfície. Elas podem ser medidas com uma exatidão até ao milésimo do micron. A caneta (ponta) apresenta-se normal à superfície, com velocidade constante, como representado na figura 10 [50].

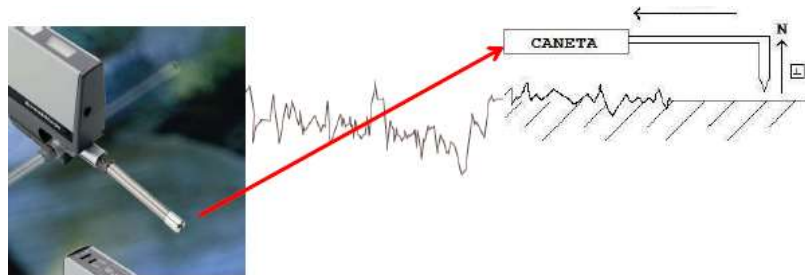


Figura 10- Rugosímetro [50].

2.4 Método de Taguchi

Genichi Taguchi (Tokamachi, Japão, 1924-2012) foi um estatístico e um engenheiro. Ele desenvolveu uma metodologia para melhorar a qualidade dos produtos fabricados pela aplicação de alguns conceitos estatísticos.



Figura 11- Genichi Taguchi (<http://www.skymark.com>).

Taguchi teve uma contribuição influente para as estatísticas industriais. Os elementos-chave da sua filosofia de qualidade incluem o seguinte:

- A filosofia de controlo de qualidade *off-line*, projeto robusto de produtos e processos;

- Função de perda de Taguchi; e
- As inovações na conceção estatística de testes experimentais.

Um método de planeamento de experiências é 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 [51]. O método de Taguchi é um método de planeamento de experiências de factuais fracionado, ou seja, é somente executada uma fração do número total de combinações das variáveis de entrada [52]. Para isso o Dr. Genichi Taguchi propôs a utilização de matrizes compostas por vetores ortogonais para definir os testes a serem realizados.

2.4.1 Perspetiva História

Desde 1940 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 de 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. Taguchi começou a desenvolver novos métodos para a otimização dos processos de engenharia de experiências. A maior contribuição do método que criou reside não só na formulação matemática para o planeamento de experiências, mas principalmente na filosofia de qualidade que acompanha o método. A sua abordagem é mais do que um método de projeto de experiências, é um conceito que produz uma disciplina original e poderosa na melhoria de qualidade a baixo custo para o fabricante [52,53].

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 dum produto ou processo com base no planeamento de experiências.

2.4.2 Função perda na qualidade de Taguchi

Genichi Taguchi popularizou recentemente a sua metodologia da qualidade com o conceito da função perda, focalizando o impacto da variação da qualidade. Ele tem retratado a ideia de que a variação do alvo desejado acarreta perdas para a sociedade. Apesar de ser uma ferramenta passiva, na medida que ela sozinha não proporciona melhorias no processo, promove mais efeitos nos produtos do que qualquer outro conceito ou método individual apresentado [53]. A figura 12 mostra a evolução da função perda de Taguchi.

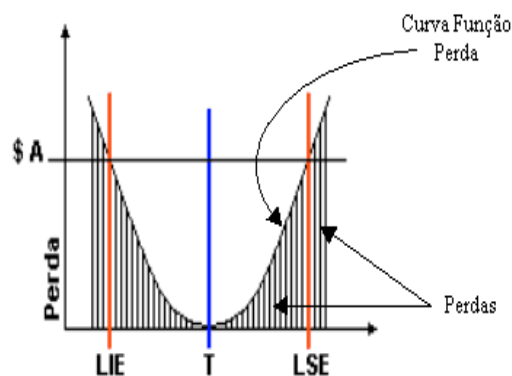


Figura 12- Gráfico função-perda (www.datalyzer.com).

Taguchi aponta que mesmo o produto estando dentro dos limites de especificação, há um custo definido para a sociedade se a característica não está exatamente no valor nominal, quanto mais longe do nominal, maior esse o custo.

2.4.3 Taguchi e razão sinal-ruído

Taguchi classificou o método de "Offline quality control", pois a sua aplicação é realizada recorrendo a uma pequena amostra proveniente duma fase experimental, que tem níveis de qualidade com uma variância elevada quando comparada com as peças obtidas já em linha de produção ("online 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 incomportáveis [54].

Tendo em conta a qualidade necessária, Taguchi incluiu no seu método algumas funções perda que fazem o cliente reconhecer o desejo de ter produtos que são mais consistentes e o desejo de fazer um produto a baixo custo.

A filosofia de Taguchi diz que a qualidade deve ser projetada em um produto, não inspecionada para ele. A forma de concretizar é através de projetos de sistemas, design de parâmetros de tolerância. Se um produtor decide escolher a qualidade de "inspeção" de um produto, significa que o produto é produzido com níveis de qualidade aleatórios e aqueles estão muito longe dos níveis desejados por quem o usa. Consegue-se mais facilmente atingir a qualidade minimizando o desvio a partir de um alvo evitando a influência de fatores incontroláveis. Assim, a razão sinal-ruído que define a relação de qualidade do produto e fatores incontroláveis deve ser elevada [55].

Existem três relações sinal-ruído para o parâmetro desejado:

- Nominal é o melhor;

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

- Maior é a melhor (maximizar);

$$S/N_L = -10 * \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad \text{Equação [11]}$$

- Menor é a melhor (minimizar).

$$S/N_s = -10 * \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad \text{Equação [12]}$$

onde:

\bar{y} - Média dos dados observados;

s_y^2 - Variância de y ;

n - Número de observações; e

y_i - 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.

2.5 Método da superfície da resposta

A metodologia da superfície da resposta (RMS) corresponde a um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas úteis para modelar e analisar problemas em que a resposta de interesse é influenciada por diversas variáveis e cujo objetivo é otimizar essa resposta [41].

Segundo Montgomery, as equações definidas pelas respostas de superfícies podem ser representadas graficamente e utilizadas de três formas:

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

Dentre as vantagens da metodologia da superfície da resposta, a principal é que os seus resultados são resistentes às condições não ideais, como 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. Em geral, polinômios de duas ou mais variáveis, são funções contínuas. 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 (por exemplo, máxima ou mínima) [51].

Na maioria dos problemas da superfície da resposta, a forma do relacionamento entre as variáveis dependentes e independentes é desconhecida. Assim, o primeiro passo é encontrar uma aproximação para o verdadeiro relacionamento entre a variável de resposta (y) e as variáveis independentes (fatores). Geralmente utiliza-se uma regressão polinomial de baixo grau em alguma região das variáveis independentes. A forma geral para o modelo de primeira ordem em x variáveis de entrada (independentes) pode ser representada pela equação 13 [56]:

$$y = \beta_0 + \beta_1 * x_1 + \beta_2 * x_2 + \dots + \beta_k * x_k + \epsilon \quad \text{Equação [13]}$$

sendo:

y - Resposta de interesse;

x - Variáveis independentes;

β - Coeficientes a serem estimados;

k - Número de variáveis independentes; e

ε - Erro experimental.

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

Caso exista curvatura no sistema, ou seja, se houver um polinômio de grau mais elevado, neste caso é usado um modelo de segunda ordem, representado pela seguinte modelo matemático:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i * x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ij} * x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} * x_i x_j + \varepsilon \quad \text{Equação [14]}$$

Na sociedade atual, orientada para um mercado globalizado onde impera a lei do mais forte, qualquer ganho de produtividade, qualquer diminuição dos custos de produção, qualquer inovação, podem marcar a diferença entre o sucesso e a fracasso. Falar em RSM é um sonho, implementar a metodologia é antecipar o sucesso.

O processo inicia-se com a interpretação do problema, definição clara do objetivo e identificação dos fatores que o influenciam. Num primeiro momento, 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, urge caminhar no sentido da resposta de superfície que, presumivelmente, contém o valor ótimo (máximo ou mínimo). Para 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 [56].

Chegados à resposta de superfície ou é ajustado um novo modelo de primeira ordem ou então realizam-se experiências adicionais, particularmente ajustando um polinômio de segunda ordem para obter uma estimativa mais precisa do valor ótimo. A RSM é um processo sequencial cujo algoritmo descreve-se através de um caso prático no âmbito da indústria.

A representação gráfica da resposta de superfícies pode ser feita por meio de gráficos de superfície 3D e gráficos de contornos (curvas de nível).

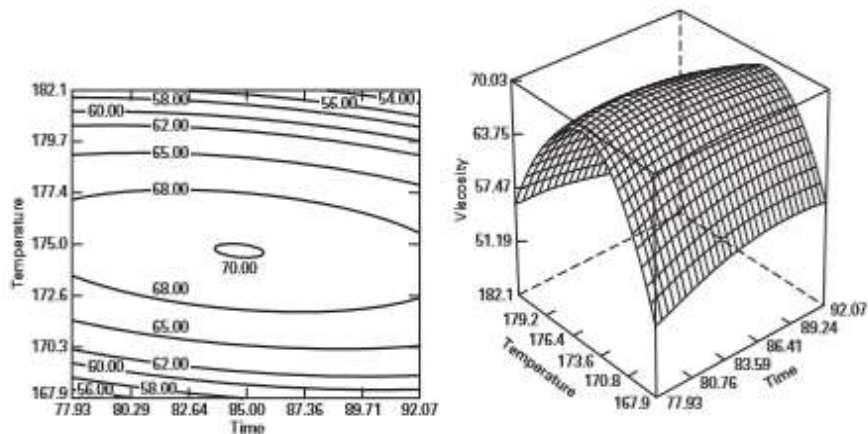


Figura 13- Gráfico de contornos (à esquerda) e gráfico de superfície de resposta (à direita) [41].

A Metodologia de Superfície de Resposta, enquadrada nos delineamentos experimentais, revela-se 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 acontece experiências agrícolas e na indústria extrativa onde se procura a racionalização dos processos [51].

As aplicações mais comuns da RSM centram-se na produção industrial nomeadamente no campo das Ciências Químicas, Biológicas e Clínicas, Ciências Sociais, Ciência dos Alimentos, Física e Ciências da Engenharia.

Capítulo 3

3. Ensaaios Experimentais

Este capítulo descreve a configuração experimental utilizada e os ensaios realizados neste trabalho pelos métodos de Taguchi e das superfícies de resposta. Numa primeira fase, são apresentados os valores dos parâmetros de maquinagem e a construção da matriz de Taguchi com os valores dos parâmetros definidos. Além disso, descreve-se a peça de trabalho em estudo, as ferramentas de posicionamento e o processo de medição. Numa segunda fase é apresentado todo o procedimento experimental pelo método das superfícies.

3.1 Matrizes para os ensaios experimentais pelo método de Taguchi

Nos ensaios experimentais pretende-se obter a menor rugosidade possível da superfície, de acordo com as especificações das ferramentas de fresagem. A característica da qualidade de rugosidade da superfície é uma das propriedades mais importantes nos processos de maquinagem, sendo o objetivo deste trabalho determinar os níveis dos parâmetros que minimizam a rugosidade da superfície.

A relação sinal-ruído que se utiliza no ensaio de rugosidade da superfície é a mais baixa. A mais baixa é a melhor, uma vez que queremos reduzir o nível de rugosidade numa peça maquinada. A razão S/Ns foi selecionado para este estudo uma vez que o objetivo é melhorar o acabamento de superfície através da medição da rugosidade.

A velocidade de corte (V_c), velocidade de avanço (F_z), a penetração radial (a_p) e penetração axial (a_e) são os parâmetros mais comuns nos processos de maquinagem, os quais foram definidos pelo fabricante, neste caso pela empresa *Palbit*®. A velocidade de corte está definida com o valor de 200-300 [mm/min], velocidade de avanço no intervalo 0,10-0,30 [mm/t], a penetração radial na faixa de 1-2 [mm] e, por último, a penetração axial entre 0,10-0,35 [mm]. Com estes valores, utilizando as equações 6 e 7, convertem-se as unidades para as definidas pelo Sistema Internacional (SI). Os quatro parâmetros de corte selecionados para este estudo são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1– 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

Neste momento conhece-se o número de parâmetros e o número de níveis necessários, o arranjo ortogonal adequado pode ser seleccionado utilizando a ajuda da tabela 2.

Tabela 2-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	L32	L16

Neste caso, existem 4 parâmetros com dois níveis diferentes, o arranjo ortogonal de Taguchi a usar é uma matriz L16. Isto significa que são necessárias dezasseis combinações de parâmetros, conforme está representado na tabela 3.

Tabela 3- 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

Após a definição da matriz de Taguchi, os níveis de cada parâmetro forma substituídos pelos valores limites definidos pelo fabricante, ficando definida como representa a tabela 4.

Tabela 4- 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 estes valores, utilizando as equações matemáticas 6 e 7 como referido anteriormente, as unidades são convertidas para as unidades do Sistema Internacional. Assim, a matriz de Taguchi fica definida de acordo a tabela 5.

Tabela 5- Matriz L16 de Taguchi com os valores nas 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

Numa primeira fase do trabalho, pelo método de Taguchi, pretende-se realizar os 16 ensaios e verificar qual é o que apresenta o menor valor da rugosidade. Determinados os valores da

rugosidade, consegue-se escolher uma combinação de parâmetros que, para a fresa e máquina-ferramenta em estudo, origina uma menor rugosidade.

3.2 Procedimento experimental pelo método das Superfícies de Resposta

O procedimento para o método das superfícies de resposta foi implementado no Matlab® 2015 em duas fases. Neste método de otimização a função modelada é definida pelas variáveis "z" e "x".

Numa primeira fase, definem-se os parâmetros de entrada que são a velocidade de corte (z^1), a velocidade de avanço (z^2), a penetração axial (z^3), a penetração radial (z^4) e a rugosidade (z^5). Nesta fase de trabalho opta-se pela escolha de um modelo linear para caracterizar a rugosidade do material em função dos parâmetros z^1, \dots, z^4 , definido pela função $g(z)$:

$$g(z) = x_1 * z^1 + x_2 * z(2) + x_3 * z(3) + x_4 * z(4) + x_5 \quad \text{Equação [15]}$$

onde x_1, \dots, x_5 são os pesos de cada parâmetro.

3.2.1 Método de Nelder-Mead

Como problema 1 pretende-se, através do método de superfícies, determinar os coeficientes óptimos, x_1, \dots, x_5 , para z^1, \dots, z^4 , respectivamente, de forma a que o erro quadrático seja o menor possível. Para tal, a função é minimizada, $\min |g(z)|$, sendo determinados os coeficientes óptimos que caracterizam a função $g(z)$.

Após a resolução do problema 1 para determinar os valores dos parâmetros ideais, para os quais a rugosidade é menor, basta resolver o problema 2. Neste problema a função $f(x)$ é caracterizada como uma função de segunda ordem, representando-se da seguinte forma:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (x_1 * z^1 + x_2 * z(2) + x_3 * z(3) + x_4 * z(4) + x_5 - z(5))^2 \quad \text{Equação [16]}$$

Com a função definida, executa-se o programa no Matlab® 2015 pelo método de Nelder-Mead, esta função é minimizada, $\min |f(x)|$, obtendo os valores ideais para os parâmetros a fim de se realizarem os novos ensaios. (Anexo V)

Sabendo o valor dos parâmetros ideais para os quais a rugosidade é menor, a função, $f(x)$, é novamente definida, de maneira diferente da anterior:

$$f(x) = |x_1 * z^1 + x_2 * z(2) + x_3 * z(3) + x_4 * z(4) + x_5 - z(5)| \quad \text{Equação [17]}$$

A função representa-se em módulo, como valor absoluto, uma vez que se pretende obter o valor mínimo de rugosidade e este parâmetro não pode ter valores negativos mas sim o mais próximo possível de zero.

3.2.2 Método de Programação Sequencial

Ao contrário do problema 1, em que foi usado o método de Nelder-Mead, utiliza-se agora outro método uma vez que existem restrições lineares de igualdade com limites simples. Para cada parâmetro existe um valor máximo e um mínimo ao qual se tem de fazer referência. É então utilizado o método da programação sequencial (SQP). Neste método são definidas as variáveis de entrada, que correspondem aos vetores dos limites inferiores e superiores dos parâmetros definidos.

Após todas as variáveis estarem definidas, executa-se o programa, obtendo assim os valores dos parâmetros para o novo ensaio. Realizado o primeiro ensaio, é dado o valor da rugosidade, posteriormente este valor é introduzido no programa e volta-se a executar a fim de se obter novos valores dos parâmetros para realizar um segundo ensaio. Este processo repete-se tantas vezes quantos os ensaios que se pretendem realizar, a fim de se comparar entre os dois métodos de otimização aquele que apresenta menores valores de rugosidade.

3.2.3 Método de otimização baseado no Algoritmo Genético

São realizados cinco ensaios e com os resultados obtidos verifica-se que este método não é a melhor solução para o caso em estudo. Os valores dados para os parâmetros apenas se diferenciam na casa das milésimas, o que corresponde a uma baixa convergência do método. SQP é considerado um método de aproximação do problema inicial por um problema mais simples de programação quadrática, sendo a convergência realizada para a situação próxima de um ponto ótimo local. Como os diferentes ensaios conduziram a uma baixa convergência do método, não podemos afirmar que o resultado obtido corresponde ao ótimo global do problema.

Assim, foi usado um segundo método baseado no algoritmo Genético, *Ga*. O Algoritmo Genético é definido como um método global, abrange uma grande área, a qual se baseia na geração de famílias para encontrar uma solução próxima do ótimo para o problema. A aplicação dos algoritmos genéticos a cinco ensaios permitiu obter resultados bastante satisfatórios. (ver Anexo V)

3.3 Materiais e ferramentas

Os testes experimentais foram realizados através de uma operação de maquinagem, a fresagem, em torno de uma peça cilíndrica. No caso do método de Taguchi foram conduzidos de acordo com os valores dos parâmetros definidos pela matriz ortogonal de Taguchi, L16, e para o método das superfícies pelos valores dos parâmetros obtidos pelo Matlab®2015.

As dimensões iniciais do bloco de trabalho foram 219 mm de diâmetro e 40 mm de altura. A rugosidade foi medida em três pontos diferentes a 120° como representado na figura 14. Para cada ponto repetiram-se cinco medições e foi negligenciado o menor e o maior valor de rugosidade.



Figura 14- Bloco na mesa da CNC: detalhes de pontos de medição de rugosidade.

Para analisar o desgaste da ferramenta é importante o uso de um material muito duro, por essa razão, foi decidido usar um exemplar idêntico, um aço de molde (GMTC 1.2738), com uma dureza de 45 Rockwell C.

Os valores da composição química do aço 1.2738 (código WNR) são os representados na tabela 6:

Tabela 6- Composição química do aço 1.2738 [57].

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

Os dezasseis ensaios foram realizados na *CNC*, Deckel Maho DMC 63V representada na figura 1. As pastilhas utilizadas para a fresa foram WNHU 04T310, fabricadas pela *Palbit*®, uma empresa Portuguesa localizada em Albergaria-a-Velha. As operações de fresagem foram realizadas utilizando uma trajetória circular no sentido horário em torno do perímetro do bloco.

Os dados técnicos da máquina *CNC* e das ferramentas de fresagem estão apresentados no anexo I e anexo II respetivamente. Para medir o perfil de rugosidade, o sensor foi ligado com o auxílio de um bloco de elevada massa, evitando interferência humana como se apresenta na figura 15.



Figura 15- Colocação do equipamento para medição de rugosidade.

A ferramenta de fresagem é outra parte importante para este trabalho. As pastilhas para a fresagem (PLUS 49095 / WNHU 04T310) foram fornecidas pela *Palbit*®.

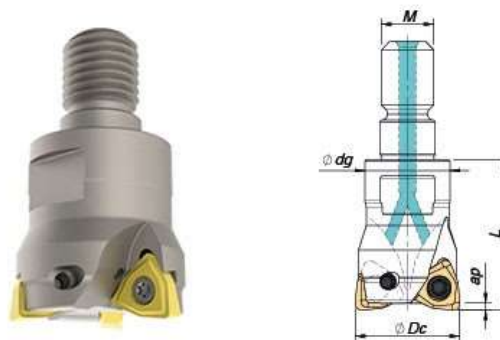


Figura 16- Ferramenta de fresagem [48].

É relevante mencionar que as pastilhas desempenham um papel importante durante a maquinação. Por isso, devem ser cuidadosamente posicionadas e fixadas fortemente à ferramenta de fresagem como representado na figura 16. As suas propriedades estão apresentadas no Anexo III, sendo as características geométricas representadas na figura 17.

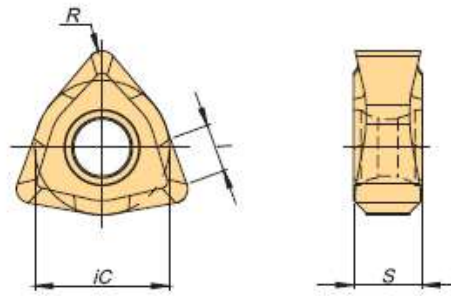


Figura 17- Pormenores das pastilhas WNHU [48].

Capítulo 4

4. Resultados dos ensaios

Neste capítulo são apresentados os resultados da rugosidade da superfície, medida após cada ensaio para o método de Taguchi e o método das superfícies e suas comparações.

4.1 Resultados obtidos através do método de Taguchi

Neste capítulo são apresentados os resultados da rugosidade da superfície, medida após cada teste. Para minimizar o erro de medição mediu-se em três locais diferentes do bloco, com posições angulares iguais espaçadas da peça de trabalho (0°, 120°, 240°), ver figura 14. Em cada local a rugosidade da superfície foi repetida cinco vezes negligenciado o menor e o maior valor.

Na tabela 7 é apresentada a matriz de Taguchi com a medida de rugosidade em cada ponto (P1, P2 e P3) e a média destes pontos. (Anexo IV).

Tabela 7- Matriz experimental e medição da rugosidade dos 16 ensaios

Número de ensaio	V _c [m/min]	F _z [mm/t]	A _e [mm]	A _p [mm]	P1 [μm]	P2 [μm]	P3 [μm]	Média da Rugosidade[μm]
1	200	0,10	0,1	1	1,05	1,13	1,00	1,06
2	200	0,10	0,1	2	1,26	1,59	1,99	1,61
3	200	0,10	0,35	1	4,06	3,56	3,90	3,84
4	200	0,10	0,35	2	4,45	3,73	4,03	4,07
5	200	0,30	0,1	1	1,49	1,29	1,13	1,30
6	200	0,30	0,1	2	2,61	2,27	2,20	2,36
7	200	0,30	0,35	1	4,11	3,67	3,23	3,67
8	200	0,30	0,35	2	3,13	2,57	2,20	2,63
9	300	0,10	0,1	1	1,25	1,26	1,27	1,26
10	300	0,10	0,1	2	3,65	3,30	4,21	3,72
11	300	0,10	0,35	1	2,86	2,01	2,75	2,54
12	300	0,10	0,35	2	1,08	0,91	1,18	1,05
13	300	0,30	0,1	1	1,07	1,16	1,08	1,10
14	300	0,30	0,1	2	1,30	1,46	1,21	1,32
15	300	0,30	0,35	1	3,00	2,91	3,20	3,04
16	300	0,30	0,35	2	2,21	1,62	2,20	2,01

A média da rugosidade dos dezasseis ensaios pelo método de Taguchi é $2,29\mu\text{m}$. O ensaio com menor rugosidade é o 12 com o valor de $1,05\mu\text{m}$, seguindo-se do ensaio 1 com valor de $1,06\mu\text{m}$.

Foi introduzido neste estudo um conceito importante, a Taxa de produtividade (T_p), ao qual também é calculada. Como foi abordado no capítulo 2 a taxa de produção diz respeito à velocidade de processamento e está relacionado com o período de tempo de maquinagem [29]. No entanto, ao nível produtivo o mais relevante é relacionar os valores de T_p com a razão S/NL (equação 12), os quais são apresentados na tabela 8.

Tabela 8- Valores da Taxa de produtividade.

Número de ensaio	F_z [mm/t]	A_e [mm]	A_p [mm]	T_p [cm ³ /min]	S/NL [dB]
1	0,10	0,10	2	0,204	-13,821
2	0,10	0,10	4	0,407	-7,800
3	0,10	0,35	2	0,713	-2,940
4	0,10	0,35	4	1,426	3,081
5	0,30	0,10	2	0,917	-0,754
6	0,30	0,10	4	1,834	5,267
7	0,30	0,35	2	3,209	10,128
8	0,30	0,35	4	6,418	16,148
9	0,10	0,10	2	0,204	-13,821
10	0,10	0,10	4	0,407	-7,800
11	0,10	0,35	2	0,713	-2,940
12	0,10	0,35	4	1,426	3,081
13	0,30	0,10	2	0,917	-0,754
14	0,30	0,10	4	1,834	5,267
15	0,30	0,35	2	3,209	10,128
16	0,30	0,35	4	6,418	16,148

O ensaio com maior taxa de produtividade é o ensaio 8 e 16, com o valor de $6,418 \text{ [cm}^3/\text{min]}$ ao qual também corresponde a melhor razão S/NL com o valor de $16,148 \text{ [dB]}$. Para estes ensaios corresponde uma velocidade de avanço de $0,30 \text{ [mm/t]}$, um valor de penetração axial de $0,35 \text{ [mm]}$ e radial de 4 [mm] . Na figura 18 apresenta-se o gráfico da variação da taxa de produtividade em relação à razão S/NL.

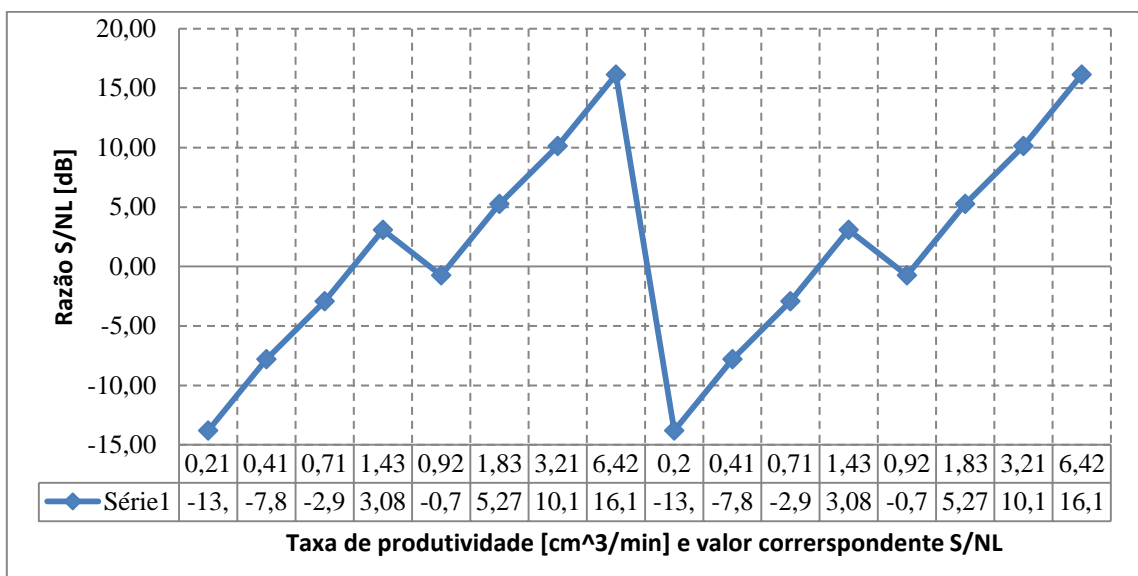


Figura 18- Variação da taxa de produtividade em relação à razão S/NL.

Conforme se pode constatar, o valor máximo corresponde aos ensaios 8 e 16, sendo que o menor valor corresponde aos ensaios 1 e 9.

4.2 Resultados obtidos através do método de Superfícies de resposta

Os resultados obtidos foram bastantes satisfatórios em apenas cinco ensaios. Pela Tabela 9 conclui-se que o ensaio 2, com rugosidade de $1,03\mu\text{m}$, é o que apresenta menor valor.

Tabela 9- Valores dos ensaios pelo método de superfície de resposta.

Ensaio	Vc [m/min]	F _z [mm/t]	A _e [mm]	A _p [mm]	\bar{R}_a [μm]
1	200	0,10	0,10	2	1,61
2	254	0,10	0,10	2	1,03
3	262	0,10	0,10	3	1,09
4	200	0,25	0,25	2	1,19
5	200	0,25	0,25	3	1,21

Estes ensaios conduziram a valores sempre inferiores aos obtidos pelo método de Taguchi, daí apenas se realizarem cinco. O ensaio 2 tem os valores dos parâmetros bastante similares aos do menor ensaio de Taguchi, à exceção da penetração axial e radial.

Capítulo 5

5. Análise e discussão dos resultados

5.1 Método de Taguchi

5.1.1 Razão Sinal-Ruído

No processo de fabrico por maquinagem um dos objetivos mais importantes é o de minimizar a rugosidade da superfície. Para esse fim, o fator de controlo mais apropriado é definido como o menor valor da relação sinal-para-ruído (S/R), definida pela equação 12. Onde n representa os tres pontos representados no bloco (P1, P2 e P3) para a medição da rugosidade e y_i o valor da rugosidade média em cada ponto definido no bloco.

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

Equação [12]

Foram determinadas as relações sinal-ruído para os dezasseis ensaios com a ajuda da tabela 7 onde estão representados os valores da rugosidade para os diferentes pontos. Segue-se o exemplo de como foi determinada a razão S / Ns para o ensaio número 1:

$$S/N_s = -10 * \log\left(\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 1.05^2 + 1.13^2 + 1.00^2\right) = -0.517 \text{ [dB]} \text{ Equação [12]}$$

Na tabela 10 estão apresentados os resultados da rugosidade média da superfície e a razão S/Ns obtidos para os dezasseis ensaios.

Tabela 10-Valor médio da rugosidade e razão S/Ns.

Número de ensaio	V _c [m/min]	F _z [mm/t]	A _e [mm]	A _p [mm]	R _a [μm]	S/Ns [dB]
1	200	0,10	0,10	1	1,06	-0,517
2	200	0,10	0,10	2	1,61	-4,301
3	200	0,10	0,35	1	3,84	-11,699
4	200	0,10	0,35	2	4,07	-12,215
5	200	0,30	0,10	1	1,30	-2,356

6	200	0,30	0,10	2	2,36	-7,483
7	200	0,30	0,35	1	3,67	-11,335
8	200	0,30	0,35	2	2,63	-8,501
9	300	0,10	0,10	1	1,26	-2,008
10	300	0,10	0,10	2	3,72	-11,455
11	300	0,10	0,35	1	2,54	-8,192
12	300	0,10	0,35	2	1,05	-0,527
13	300	0,30	0,10	1	1,10	-0,860
14	300	0,30	0,10	2	1,32	-2,460
15	300	0,30	0,35	1	3,04	-9,655
16	300	0,30	0,35	2	2,01	-6,145

A partir da tabela 10, pode-se identificar o ensaio número 1 como o que apresenta um valor de razão S/Ns mais elevado. Este resultado é confirmado pelo segundo menor valor da rugosidade média.

A razão S/Ns para os ensaios 1 e 12 são muito semelhantes, com uma pequena vantagem para o teste número 12, assim como os ensaios 3, 7 e 10 que apresentam valores muito próximos. A figura 19 apresenta os valores médios da razão S/Ns para os diferentes parâmetros analisados, onde A é definida como velocidade de corte, B velocidade de avanço, C penetração radial e D penetração axial.

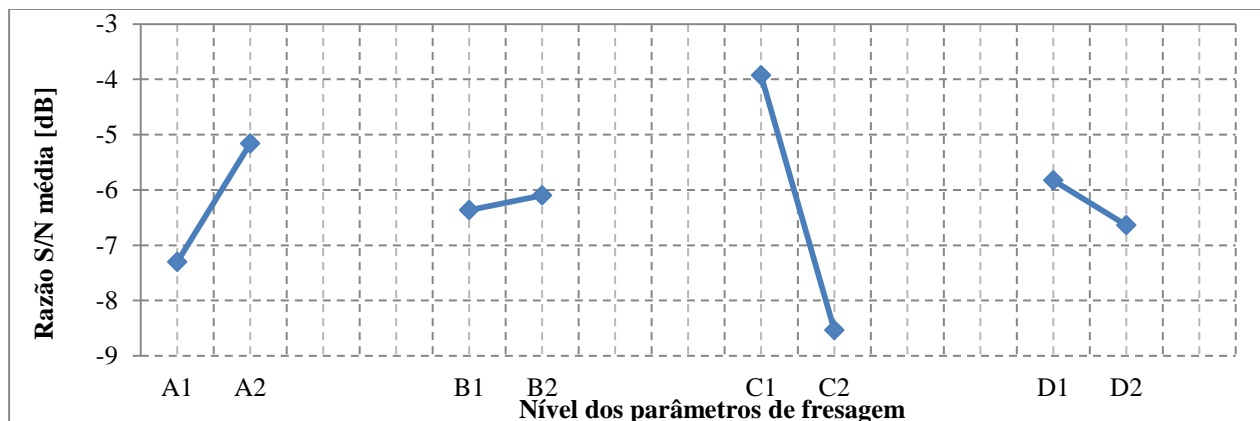


Figura 19- Valor médio S/Ns para os diferentes níveis de parâmetros.

Com a ajuda da tabela L16 definida em Taguchi e com o valor da razão S/Ns é possível calcular o valor médio para os diferentes parâmetros em diferentes níveis. Assim, verifica-se que a influência da velocidade de corte é substancialmente superior como resultado da grande variação observada no teste quando vai de cerca de 200 [m/min] a 300 [m/min]. Além disso, os

resultados indicam um melhor desempenho de maquinagem ao utilizar um nível alto de penetração radial de corte.

5.1.2 Rugosidade média

A média total de rugosidade da superfície pelo método de Taguchi para cada ensaio é apresentada na figura 20.

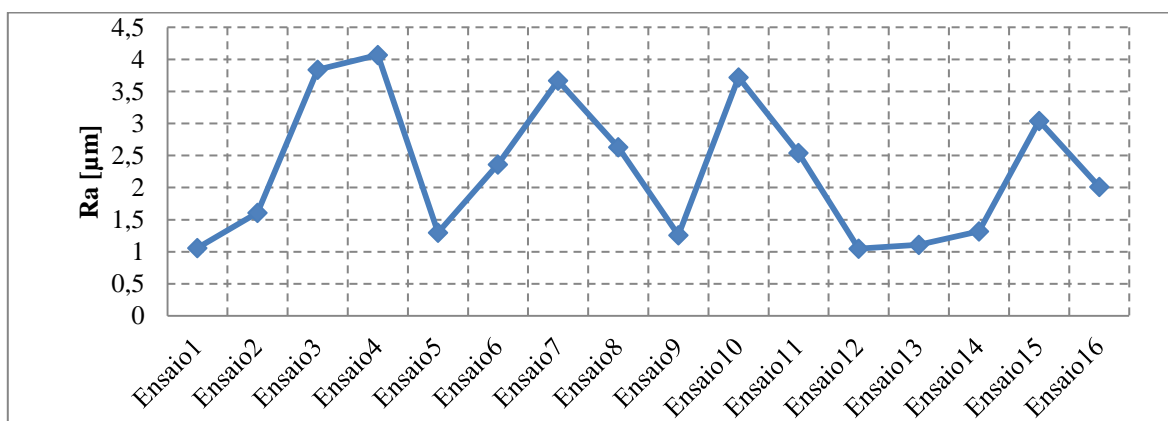


Figura 20- Gráfico da rugosidade para cada ensaio pelo método de Taguchi.

O menor valor para a rugosidade apresenta-se no ensaio 12 com o valor de $1,05\mu\text{m}$. Os ensaios com o número 1, 12 e 13 são os que apresentam menores valores de rugosidade.

Os ensaios 1 e 12 distinguem-se apenas no valor da penetração e velocidade de avanço, enquanto o ensaio 13 comparado com o ensaio 1 e 12 apenas tem a penetração radial como igual parâmetro.

Pelo método das superfícies é de notar que o valor da rugosidade para os cinco ensaios realizados é significativamente menor como é visível na figura 21.

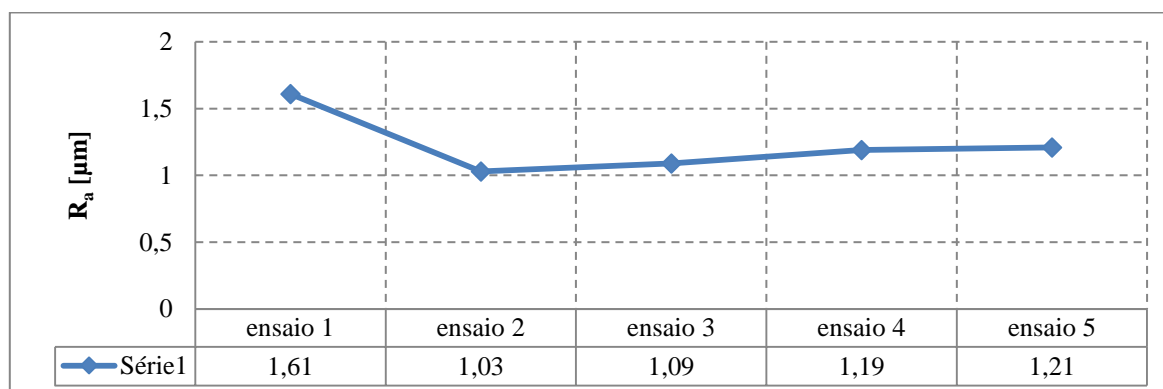


Figura 21 - Gráfico da rugosidade média para cada ensaio pelo método das Superfície

Em apenas cinco ensaios realizados pelo método das superfícies, os resultados da rugosidade foram significativamente menores. Para os métodos de Taguchi, as medições da rugosidade foram feitas com base nos valores dos parâmetros dados pelo fabricante de pastilhas, valores estes que podem variar devido a fatores externos, enquanto no método das superfícies os valores são calculados numericamente, daí esta diferença de valores de rugosidade entre os dois métodos.

5.1.3 Análise Anova

A análise Anova é realizada com base nos valores de rugosidade superficial indicado no anexo IV.

O objetivo da análise de variância é determinar quais os parâmetros de projeto que afetam significativamente a rugosidade da superfície. Os resultados de variância de cada parâmetro de corte e as suas interações são mostradas na tabela 11.

Tabela 11-Resultados da ANOVA para a rugosidade da superfície.

Grupo	Df	Sq	Md	Valor F	Contribuição (%)
Vc	1	18,287	18,287	1,27	6,4
Fz	1	0,281	0,281	0,02	0,1
Ap	1	84,772	84,772	5,9	29,6
Ae	1	2,612	2,612	0,18	0,9
VcxFz	1	1,002	1,002	0,07	0,4
VcxAp	1	28,505	28,505	1,99	10,0
VcxAe	1	2,822	2,822	0,2	1,0
FzxAe	1	4,124	4,124	0,29	1,4
FzxAp	1	2,029	2,029	0,14	0,7
AexAp	1	69,938	69,938	4,87	24,4
Resíduo	5	71,800	14,360		25,1
Total	15	286,171	18,287		100,0

Nesta tabela, Df representa os graus de liberdade, Sq a soma dos quadrados e Md a média dos quadrados. Este último parâmetro é obtido dividindo a soma de quadrados pelos graus de liberdade correspondentes.

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.

Neste estudo foi determinada a contribuição de cada um dos parâmetros de maquinagem e a sua interação. A análise dos valores de F-ratio revela que os fatores mais importantes são a penetração de corte radial e da interação entre penetração radial e a penetração axial para minimizar a rugosidade da superfície. Estes têm contribuições de cerca de 30% e 24%, respetivamente, como pode ser visto na Tabela 11.

Os parâmetros de corte ótimos para a rugosidade da superfície é a velocidade de corte de nível 2, a velocidade de avanço nível 2, a profundidade radial de corte de nível 1 e a profundidade axial de corte de nível 1 como é visível na tabela 12 uma vez que são os melhores resultados obtidos para cada parâmetro.

5.1.4 Confirmação dos ensaios

Uma vez selecionado o nível ideal dos parâmetros de projeto, a etapa final é validar a melhoria da qualidade do processo de fresagem usando o nível ideal dos parâmetros. A razão S/N estimada ($\hat{\eta}$) usando o nível ideal dos parâmetros de projeto pode ser calculada utilizando a equação 18 [58].

$$\hat{\eta} = \eta_m + \sum_{i=1}^q (\bar{\eta}_i - \eta_m) \quad \text{Equação [18]}$$

Onde:

η_m - Média total da razão S/N;

$\bar{\eta}_i$ - Razão S/N média para o nível ótimo; e

q - Número dos principais parâmetros de projeto que afetam a característica de qualidade. É útil para trabalhar com os dados S / N, como mostra a tabela 12.

Tabela 12- Resultados S/N para rugosidade de superfície.

Razão média S/N (dB)				
Parâmetros	Nível 1	Nível 2	Max-min	Média total
Velocidade de corte (V_c)	-7,301	-5,163	2,138	-6,232
Velocidade de avanço (f_z)	-6,364	-6,099	0,265	
Penetração Axial (a_e)	-3,930	-8,534	4,604	
Penetração Radial (a_p)	-5,828	-6,636	0,808	

A proporção estimada S / N utilizando os parâmetros de corte ótimos para a rugosidade de superfície (R_a) podem então ser obtidas e o valor de rugosidade correspondente (y) também pode ser calculado usando a equação 18.

Neste caso: $\eta = -6,232 + ((-5,163 + 6,232) + (-6,099 + 6,232) + (-3,930 + 6,232) + (-5,828 - 6,232)) = -2,32$ e o valor previsto é $y = 1,31$. Os resultados estão visíveis na tabela 13.

Analisando a tabela 13, chega-se à conclusão de que, como previsto, os níveis de parâmetros para a combinação A2B2C1D1 (parâmetro A, velocidade de corte nível 2, parâmetro B, velocidade de avanço nível 2, parâmetro C, penetração axial nível 1 e parâmetro D, penetração radial nível 1) correspondem ao número do ensaio 13, sendo este um dos melhores resultados obtidos. Como foi feita uma média dos três pontos da rugosidade ao fazer-se o teste de confirmação do valor previsto é mais difícil aproximar-se do valor real. Mesmo assim, o ensaio 13 é o terceiro ensaio com os melhores valores dados a nível da rugosidade e da razão S/Ns.

Realizou-se uma segunda vez o ensaio 13 a fim de se verificar se o valor de rugosidade se aproximava do valor previsto calculado anteriormente. No final do ensaio o valor da rugosidade é de $1,12 \mu\text{m}$, valor este que não se altera muito do valor real medido.

Tabela 13-Resultados dos testes de confirmação para a rugosidade de superfície.

Nível	A1B1C2D2	A2B2C1D1
Rugosidade (μm)	3,21	1.31
Razão S/N (dB)	-10,14	-2.32
Melhoria razão S/N		1,46 dB

5.2 Método das Superfícies

Os valores finais da rugosidade pelo método das superfícies é apresentado na tabela 14.

Tabela 14- Resultados finais dos ensaios pelo método das superfícies de resposta.

Ensaio	1	2	3	4	5
Velocidade de rotação [rpm]	2546	3241	3337	2547	2547
Velocidade avanço [mm/min]	1018,4	1299,7	1320,1	1018,4	1018,4
Penetração Axial [mm]	0,1	0,16	0,14	0,15	0,14
Penetração Radial [mm]	2	2	3	2	2
Rugosidade [μm]	1,61	1,03	1,09	1,19	1,21

Como os resultados obtidos são bastantes satisfatórios em apenas cinco ensaios é desnecessário realizarem-se mais ensaios, ao contrário do método de Taguchi em que foram feitos dezesseis ensaios. Normalmente a superfície de resposta pode ser visualizada graficamente quer através de gráficos 3D quer pelas suas projeções no plano, as curvas de nível. O gráfico de contornos corresponde a uma altura particular da superfície de resposta: trata-se de uma projeção no plano onde em cada linha a resposta é constante.

Na tabela 15 estão apresentadas as comparações entre os ensaios com menor rugosidade pelos dois métodos. Através desta tabela conclui-se que o método das superfícies é um método de otimização melhor comparado com o de Taguchi, são obtidos melhores resultados num menor número de ensaios o que implica menos desgaste da ferramenta, tempo de processamento mais baixo e uma redução significativa do material utilizado.

Tabela 15-Comparação dos ensaios com menor rugosidade.

Ensaio	Método de Taguchi (Ensaio 12)	Método da Superfície (Ensaio 2)
Velocidade de corte	3820 [rpm]	3241 [rpm]
Velocidade de avanço	1018,4 [mm/min]	1299,7 [mm/min]
Penetração Axial	0,35 [mm]	0,16 [mm]
Penetração Radial	4 [mm]	2 [mm]
Rugosidade	1,05 [μm]	1,03 [μm]

Comparando estes dois métodos verifica-se que para os valores de menor rugosidade, em Taguchi o caso do ensaio 12 e no método das superfícies de resposta o ensaio 2, os valores dos parâmetros são bastante similares à exceção da penetração axial e radial, como se observa na tabela 15.

Uma característica deste método é a superfície 3D. Esta superfície de resposta apresenta uma região com um valor ótimo (máximo ou mínimo) dos parâmetros em estudo. Os gráficos que se seguem, nas figuras 22 a 28 são obtidos no software estatístico *MiniTab* e têm por base os dados recolhidos de cada ensaio.

Por observação da figura 22 é visível a existência de uma região mais favorável para os parâmetros velocidade de avanço- penetração axial. Quanto maior a penetração axial menor é o valor da rugosidade.

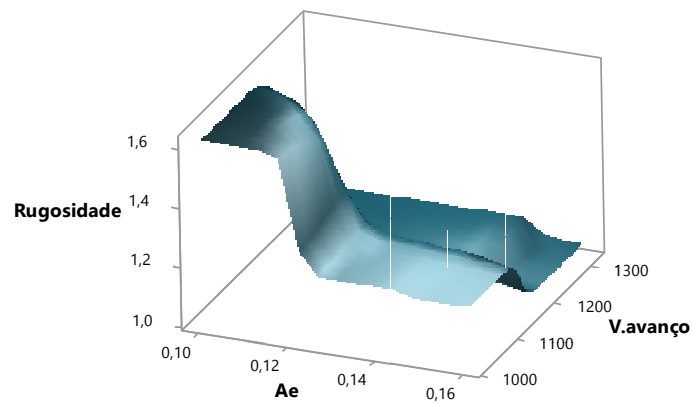


Figura 22- Gráfico 3D Velocidade de avanço-Penetração Axial para a Rugosidade.

A superfície 3D apresentada na figura 23 revela um valor mais elevado de rugosidade que corresponde a um valor inferior da penetração radial, sendo que o valor da rugosidade tende a diminuir com o aumento da penetração radial e velocidade de avanço.

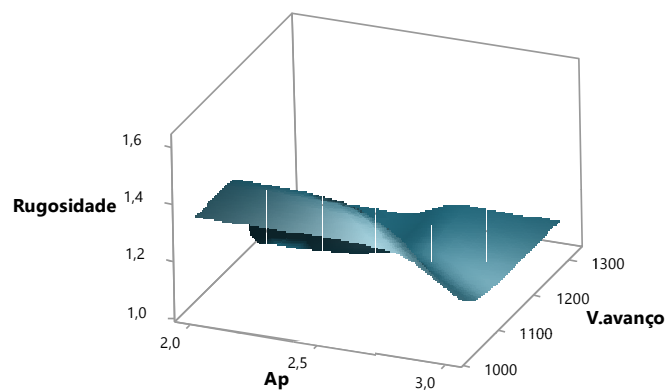


Figura 23- Gráfico 3D Penetração Radial-Velocidade de avanço para a Rugosidade.

Na figura 24 é possível visualizar um pico para a rugosidade com o valor de $1,60\mu\text{m}$ que corresponde ao valor mais baixo de velocidade de rotação e velocidade de avanço. Este foi o valor mais elevado dos ensaios para o método das superfícies. Segue-se um decréscimo da rugosidade à medida que aumenta a velocidade de rotação e a velocidade de avanço.

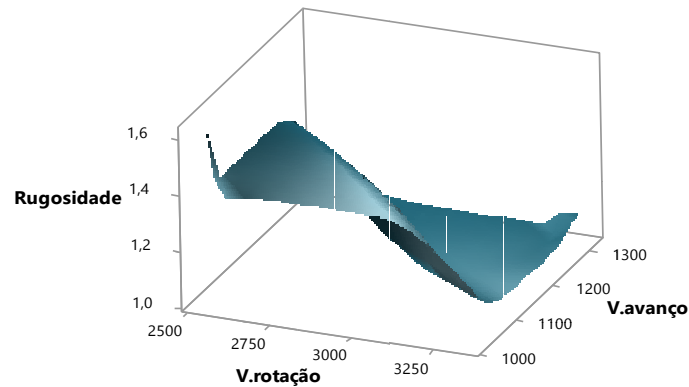


Figura 24- Gráfico 3D Velocidade de rotação-Velocidade de avanço para a Rugosidade.

A superfície da figura 25 tal como a figura 24 inicia-se com um pico que corresponde ao maior valor de rugosidade dada nos ensaios. Segue-se uma diminuição acentuada do valor da rugosidade e por fim uma região bastante favorável com valores muito inferiores de rugosidade que se identificam no intervalo de 3000-3250 [rpm] relativamente à velocidade de rotação e 2.0-2.5 [mm] para a penetração radial.

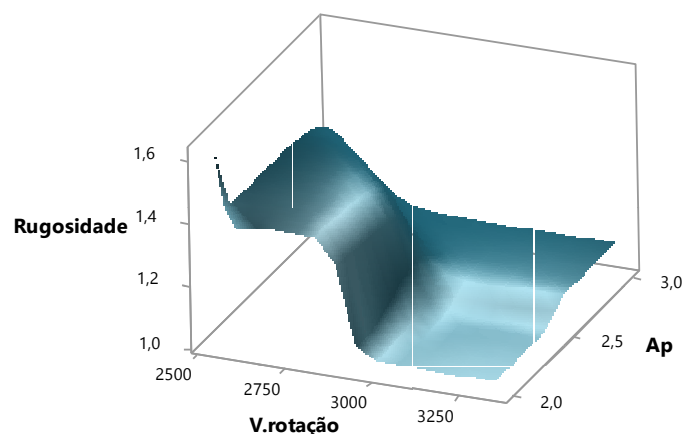


Figura 25- Gráfico 3D Velocidade rotação-Penetração radial para a Rugosidade

Na figura 26 à medida que a velocidade de rotação aumenta diminui o valor da rugosidade. Quanto à Penetração axial que se apresenta num intervalo de 0,10-0,16 [mm] os valores de

rugosidade correspondentes apresentam-se numa gama de valores próximos do valor ótimo, o zero.

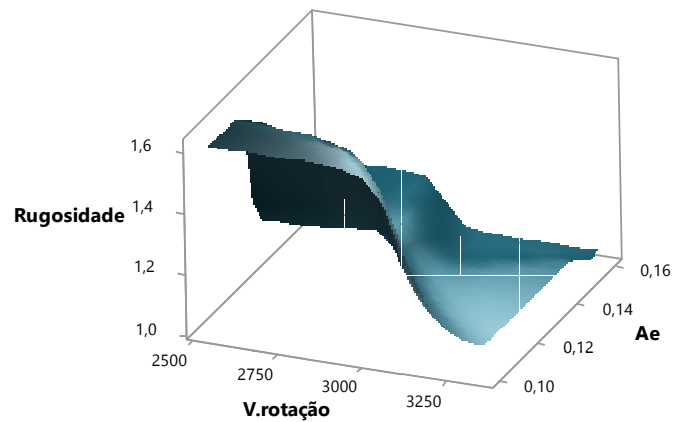


Figura 26- Gráfico 3D Velocidade de rotação-Penetração Axial para a Rugosidade.

A superfície 3D da figura 27 é bastante similar à figura 26. Para valores entre 2,0-2,5 [mm] de penetração radial os valores correspondentes da rugosidade são bastante elevados. Posteriormente existe uma diminuição acentuada dos valores de rugosidade. Para valores de penetração axial compreendidos entre 0,10-0,16 [mm] existe uma região bastante favorável dos valores de rugosidade.

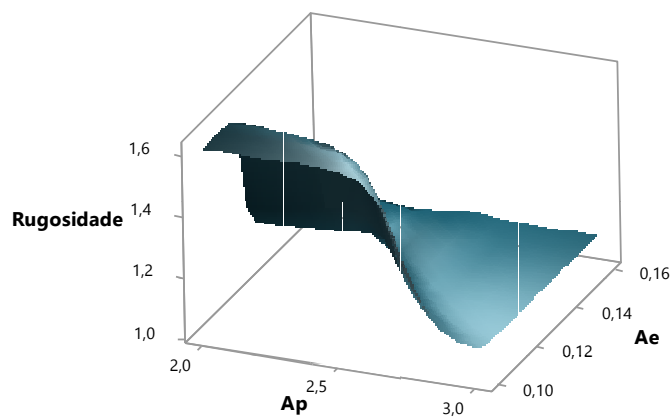


Figura 27- Gráfico 3D Penetração Radial-Penetração Axial para a Rugosidade.

Como foi dito anteriormente, estas superfícies de resposta podem representa-se por um gráfico de superfícies 3D ou através de um gráfico de contorno. Segue-se um exemplo na figura 28.

Relação Velocidade de rotação-Velocidade de avanço em relação à rugosidade

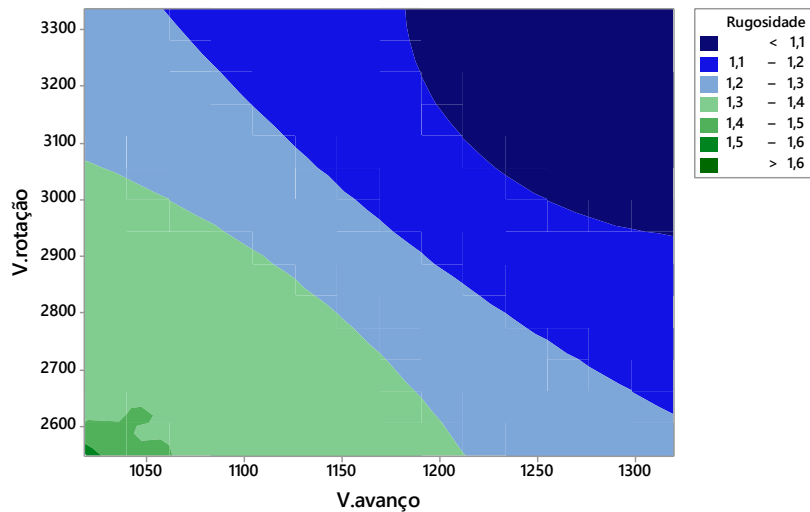


Figura 28– Gráfico de contorno velocidade de rotação-velocidade de avanço para a rugosidade.

Todos os gráficos têm perfil curvilíneo em conformidade com o modelo quadrático inicial. Por este método para a menor rugosidade corresponde o maior valor da penetração axial enquanto para os restantes parâmetros os valores variam.

O gráfico ao qual corresponde a relação velocidade de avanço-penetração axial é o mais distinto em relação aos restantes gráficos. Objetivamente procura-se um mínimo da rugosidade, em que se pretende a combinação de parâmetros que conduzem ao valor que mais se aproxime do ótimo (distância zero).

Capítulo 6

6. Conclusões e propostas para trabalhos futuros

6.1 Conclusões

A aplicação do método de Taguchi e o método das superfícies de comprovam que é possível otimizar os parâmetros no processo de fresagem. Com base nos resultados experimentais é possível retirar algumas conclusões: o método de Taguchi mostrou ser bastante robusto e permitiu neste estudo determinar a contribuição de cada um dos parâmetros de maquinagem e a sua interação. Através da análise dos valores revelam-se que os fatores mais importantes são a penetração de corte radial e da interação entre penetração radial e a penetração axial para minimizar a rugosidade da superfície. Estes têm contribuições de cerca de 30% e 24%, respetivamente.

Para um valor ótimo de rugosidade da superfície, os resultados do método de Taguchi e a análise *Anova* levam à combinação de uma velocidade de corte de 300mm/min, velocidade de avanço de 0,30mm/t, penetração axial 0,1mm e penetração radial 1mm. A confirmação dos ensaios foi feita, resultando assim a combinação A2B2C1D1 que diz respeito ao ensaio 13. Este ensaio foi o melhor da previsão feita. Este correspondeu ao terceiro ensaio com melhor valor de rugosidade e razão S/N, apresentando uma melhoria na razão S/N de 1,42dB comparando o valor real e o previsto.

Um conceito interessante e introduzido neste estudo é a Taxa de produtividade. O ensaio dezasseis é dado como o que obtém uma maior taxa de produtividade com o valor de 6,418 [cm³/min] ao qual também corresponde a melhor razão S/NL com o valor de 16,148[dB]. Neste ensaio a taxa é calculada através dos parâmetros velocidade de avanço, penetração axial e penetração radial todos eles de nível 2.

Neste estudo foi também introduzido o método da Superfície de Resposta com o objetivo de comparar com os resultados obtidos pelo método de Taguchi. Este é considerado um método de otimização mais favorável comparado com Taguchi uma vez que, em apenas cinco ensaios

consegue-se um valor de rugosidade menor do que a média do método de Taguchi, o que implica menor tempo de processamento, menos gastos de ferramenta e uma redução significativa do material utilizado. Com este método verificou que para um menor valor de rugosidade corresponde um valor elevado da penetração axial. O método da Superfície de Resposta permite representar a variação dos parâmetros de fresagem avaliados através de gráficos de superfície 3D.

Comparando os parâmetros dos ensaios com menor rugosidade dados pelos dois métodos de otimização: Taguchi e o método das superfícies, é de notar que os valores dos parâmetros são bastante similares à exceção da penetração axial e radial.

Com a realização deste projeto adquiriram-se novas competências a nível profissional. Esta mostrou-se também importante por permitir o desenvolvimento de capacidades na área da otimização e da sua aplicação ao processo de fresagem.

6.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

Um dos objetivos deste estudo foi avaliar o desgaste das pastilhas, mas devido ao baixo poder de nosso microscópio digital não foi possível alcançar este objetivo. Deste modo, propõe-se para futuros trabalhos que a análise da rugosidade da superfície seja complementada através da avaliação do desgaste da ferramenta utilizando um microscópio eletrónico.

Pela análise da Anova verificou-se que o valor do resíduo é muito elevado pelo que seria interessante fazer um estudo mais aprofundado para perceber e corrigir a origem deste erro tão elevado.

Num próximo trabalho seria importante implementar o método de Taguchi com um número de níveis superior. Optando por um número mínimo de 3 permite avaliar a tendência da rugosidade, especialmente se não tiver comportamento linear. Uma sugestão de matriz ortogonal, para o mesmo número de parâmetros utilizados neste trabalho, seria usar uma matriz L27.

7. Referências Bibliográficas

- [1] Annual Quality Congress, (2000); Foresight XXI website: <http://www.asq.org>.
- [2] BESSERIS, G. J. Product Screening to Multicustomer Preferences: Multiresponse Unreplicated Nested Super-ranking. *International Journal of Quality, Statistics, and Reliability*, 2008, v. 2008, 16p.
- [3] Wu, Y. & Wu, A. *Taguchi methods for robust design*. Asme Press.
- [4] Shivade, A.S., Bhagat, S., Jagdale, S., Nikam, A. & Londhe, P. (2014). *International journal of recent technology and engineering*, vol. 3, issue 1. 2277-3878.
- [5] Ghani, J.A., Choudhury, I.A. & Hassan, H.H. (2002). Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters. *Journal of materials processing technology* 145 (2004). 84-92.
- [6] Zhang, J.Z., Chen, J.C. & Kirby, E.D. (2006). Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method. *Journal of materials processing technology* 184 (2007). 233-239.
- [7] Anderson, M., Whitcomb, P. (2005). *RSM Simplified, Optimizing Processes Using Response Surface Methods for Design of Experiments*.
- [8] Costa, N. (2010). *Multiple response optimization: methods and results*. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, Vol. 5, No.4 pp. 442 - 459.
- [9] Box, G. E. P., Hunter, W. G., Hunter, J. S. (1978). *Statistics for Experimenters*. John Wiley & Sons, 1 edição.
- [10] YIH-FONG, T. (2006). Parameter design optimisation of computerised numerical control turning tool steels for high dimensional precision and accuracy. *Materials and Design*, v. 27, Issue 8, p. 665–675.
- [11] CHANG, C. W.; KUO, C. P. (2007). Evaluation of surface roughness in laser-assisted machining of aluminum oxide ceramics with Taguchi method. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 47, p.141–147.

- [12] Suresh, P.V., Rao, P.V., Deshmukh, S.G. (2002). A genetic algorithmic approach for optimization of surface roughness prediction model. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(6): 675-680.
- [13] Benardos, P.G., Vosniakos, G.C. (2003). Predicting surface roughness in machining: a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(8): 833-844.
- [14] Singh, D., Rao, P.V. (2007). A surface roughness prediction model for hard turning process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32(11-12): 1115-1124
- [15] Aggarwal, A., Singh, H. (2005). Optimization of machining techniques – A retrospective and literature review. *Sadhana*, 30(6): 699-711.
- [16] Palanikumar, K., Karunamoorthy, L., Karthikeyan. R., Latha B. (2006). Optimization of machining parameters in turning GFRP composites using a carbide (K10) tool based on the taguchi method with fuzzy logics. *Metals and Materials International*, 12(6): 483-491.
- [17] Wang, X., Jawahi, I.S. (2004). Web-based optimization of milling operations for the selection of cutting conditions using genetic algorithms. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 218: 647-655.
- [18] Yang, W.H., Tarn, Y.S. (1998). Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method. *Journal of Materials Processing Technology*, 84(1-3): 122-129.
- [19] Gopalsamy, B.M., Mondal, B., Ghosh, S. (2009). Taguchi method and ANOVA: An approach for process parameters optimization of hard machining while machining hardened steel. *Journal of Scientific and Industrial Research*, 68: 686-695.
- [20] Tzenga, C.J., et al. (2009). Optimization of turning operations with multiple performance characteristics using the Taguchi method and Grey relational analysis. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(6): 2753-2759.
- [21] Myers, R. H., Montgomery, D. C. (1995). *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Design of Experiments*. Wiley – Interscience. New York. 2ª Edição.
- [22] Ross, P.J. *Taguchi techniques for quality engineering (2nd Ed.)*. McGraw-Hill.

- [23] Moshat, S., Datta, S., Bandyopadhyay, A. & Pal, P.K. (2010). Optimization of CNC end milling process parameters using PCA-based Taguchi method. *International journal of engineering, science and technology*, vol.2, no.1. (2010). 92-102.
- [24] Lin, C.L. (2004). Use of the Taguchi Method and Grey Relational Analysis to Optimize Turning Operations with Multiple Performance Characteristics. *Materials and Manufacturing Processes*, 19:2. 209-220, DOI: 10.1081/AMP-120029852.
- [25] Nalbant, M., Gökkaya, H. & Sur, G. (2007). Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning. *Science Direct, materials and design* 28, 1379-1385
- [26] Lan, T. (2009). Taguchi optimization of multi-objective CNC machining using TOPSIS. *Information technology journal* 8 (6). 917-922.
- [27] Thamizhmanii, S., Saparudin, S. & Hasan, S. (2006). Analyses of surface roughness by turning process using Taguchi method. *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering*, volume 20, issues 1-2. January-February 2007.
- [28] Suhail, A.H., Ismail, N., Wong, S.V. & Abdul Jalil, N.A. (2010). Optimization of cutting parameters based on surface roughness and assistance of workpiece surface temperature in turning process. *American journal of engineering and applied sciences* 3 (1). 102-108.
- [29] Kirby, E.D., Zhang, Z., Chen, J.C. & Chen J. (2004). Optimizing surface finish in a turning operation using the Taguchi parameter design method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2006). 30: 1021-1029.
- [30] Haşçahk, A. & Çaydas U. (2007). Optimization of turning parameters for surface roughness and tool life based on the Taguchi method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2008). 38: 896-903.
- [31] Gopalsamy, B.M., Mondal, B. & Ghosh S. (2009). Taguchi method and ANOVA: An approach for process parameters optimization of hard machining while machining hardened steel. *Journal of scientific & industrial research*, vol. 68. (2009). 684-695.
- [32] Gerling “Alrededor de las máquinas-herramientas”, Editorial Reverté, S. A.
- [33] Box, G. E. P., Draper, N. R. (1987). *Empirical Model-Building and Response Surfaces*. John Wiley & Sons, 1 edição.

- [34] Dean, A., Voss, D. (1999). *Design and Analysis of Experiments*. Springer.
- [35] Anderson-Cook, C.M., Borror, C. M., Montgomery, D. C. (2009). *Response surface design evaluation and comparison (with discussion)*. Journal of Statistical Planning and Inference 139; 629 - 674.
- [36] Website: https://en.wikipedia.org/wiki/response_surface_methodology (acedido em Junho de 2016).
- [37] Anderson, M., Whitcomb, P. (2005). *RSM Simplified, Optimizing Processes Using Response Surface Methods for Design of Experiments*.
- [38] Anderson-Cook, C.M., Borror, C. M., Montgomery, D. C. (2009). *Response surface design evaluation and comparison (with discussion)*. Journal of Statistical Planning and Inference 139; 629 - 674.
- [39] Hinkelmann, Klaus e Kempthorne, Oscar (2008). *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, 2ª edição.
- [40] Myers, R. H., Montgomery, D. C. (1995). *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Design of Experiments*. Wiley – Interscience. New York. 2ª Edição.
- [41] Montgomery, D. C. (2005). *Introduction to Statistical Control*. 5ª edição. John Wiley&Sons.
- [42] Costa, N. (2010). *Multiple response optimization: methods and results*. International Journal of Industrial and Systems Engineering, Vol. 5, No.4 pp. 442 - 459.
- [43] Cheng, S., Wu, C. F. J. (2001). Factor Screening and Response Surface Exploration. *Statistica Sinica* 11(2001), 553-604.
- [44] Ribeiro, J. (2014). Soldadura. Apontamentos de Tecnologia Mecânica II, ESTIG-Instituto Politécnico de Bragança, Portugal.
- [45] DORMER. (2010). Technical Handbook. Sweden: DORMER.
- [46] Chiaverini, V. (1977). *Tecnologia Mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento* Vol. II, 2nd Ed. São Paulo: McGraw-Hill.
- [47] Groover, Mikell P. (2007). *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems*, 3rd ed. USA: John Wiley & sons, Inc.

- [48] Palbit (2014). Milling catalogue (Acedido em Novembro de 2015). Website: <http://www.palbit.pt/en/downloads.803/cutting-tools.932/catalogs.936/milling-downloads.950.html>
- [49] Neto, J.C (2012). Metrología e controle dimensional: conceitos, normas e aplicações (capítulo 3.8). 342-352.
- [50] Catálogo Mitutoyo (Acedido em Fevereiro de 2016). Website: http://www.eacampos.pt/fotos/editor2/metrologia/10_Medicao_Rugosidade_e_Forma_340-359_P14001.pdf
- [51] Montgomery, D. C. (1991). Design and Analysis of experiments, John Wiley & Sons Inc, 3ª Edição.
- [52] Aguiar, R. M. F. - Projeto robusto, Material de Apoio do curso no âmbito dos consultores em engenharia do valor.
- [53] Roy, R.K. - A Primer on the Taguchi Method, Van Nostrand Reinhold, New York.
- [54] Taguchi, G, Elsayed, E.A., Hsiang, T. (1990). Taguchi - Engenharia da Qualidade em Sistemas de Produção. São Paulo: Mc Graw Hill.
- [55] J.C. (1989) Método de Taguchi; Qualidade voltada para p projeto do produto e do processo. Revista da administração, v.24, p.62-68.
- [56] Montgomery, D. C. (2001). Design and Analysis of Experiments. John Wiley & Sons, 8ª Edição.
- [57] Steel grades (2011). Chemical composition, mechanical, physical and environmental properties of 1.2738, steel grades, tool steel and hard alloy. Acedido em Dezembro de 2015. Website: <http://www.steel-grades.com/Steel-grades/Tool-steel-Hard-alloy/1-2738.html>
- [58] Ascamm selector de materiales (2004). Guía de aceros y matrices. Acedido em Dezembro de 2015. http://selector.ascamm.org/material_detail.php?codigoWnr=1.2738

8. Anexos

8.1 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

8.2 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

8.1 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
	V_c	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

8.3 Anexo IV- Valores e média dos três pontos da rugosidade.

Tabela A1. Resultados da rugosidade 1º ensaio.

P1	P2	P3	
1,04	1,14	0,96	
1,05	1,13	1	
1,05	1,13	0,98	
1,05	1,13	1,02	
1,06	1,12	1,04	
Média			
P1	P2	P3	Média total
1,05	1,13	1	1,06

Tabela A2. Resultados da rugosidade 2º ensaio.

P1	P2	P3	
1,27	1,99	2	
1,26	1,98	1,99	
1,26	1,4	1,99	
1,26	1,4	1,98	
1,25	1,4	1,98	
Média			
P1	P2	P3	Média Total
1,26	1,59	1,99	1,61

Tabela A3. Resultados da rugosidade 3º ensaio.

P1	P2	P3	
4,08	3,68	3,99	
4,08	3,68	3,9	
4,08	3,5	3,9	
4,03	3,5	3,9	
4,03	3,5	3,89	
Média			
P1	P2	P3	Média total
4,06	3,56	3,90	3,84

Tabela A4. Resultados da rugosidade 4º ensaio.

P1	P2	P3	
4,46	3,76	4,07	
4,46	3,76	4,03	
4,45	3,71	4,03	
4,45	3,72	4,03	
4,45	3,62	3,99	
Média			
P1	P2	P3	Média total
4,45	3,73	4,03	4,07

Tabela A5. Resultados da rugosidade 5º ensaio

P1	P2	P3	
1,5	1,3	1,17	
1,49	1,29	1,14	
1,49	1,29	1,14	
1,49	1,29	1,1	
1,49	1,28	1,1	
Média			
P1	P2	P3	Média total

1,49	1,29	1,13	1,30
------	------	------	------

Tabela A6. Resultados da rugosidade 6º ensaio.

P1	P2	P3	
2,63	2,35	2,12	
2,62	2,27	2,19	
2,6	2,27	2,21	
2,6	2,27	2,21	
2,6	2,27	2,21	
Média			
P1	P2	P3	Média total
2,61	2,27	2,20	2,36

Tabela A7. Resultados da rugosidade 7º ensaio

P1	P2	P3	
4,29	3,7	3,23	
4,12	3,7	3,23	
4,1	3,7	3,23	
4,1	3,62	3,22	
4,1	3,62	3,22	
Média			
P1	P2	P3	Média total
4,11	3,67	3,23	3,67

Tabela A8. Resultados da rugosidade 8º ensaio

P1	P2	P3	
3,25	2,71	2,2	
3,2	2,7	2,2	
3,1	2,5	2,2	
3,1	2,5	2,2	
3,1	2,5	2,2	
Média			
P1	P2	P3	Média total
3,13	2,57	2,20	2,63

Tabela A9. Resultados da rugosidade 9º ensaio

P1	P2	P3
1,27	1,25	1,28
1,25	1,26	1,28
1,25	1,26	1,27
1,25	1,26	1,27

1,25	1,26	1,27	
Média			
P1	P2	P3	Média total
1,25	1,26	1,27	1,26

Tabela A10. Resultados da rugosidade 10º ensaio

P1	P2	P3	
3,68	3,51	4,24	
3,66	3,5	4,2	
3,65	3,2	4,24	
3,64	3,2	4,2	
3,64	3,2	4,2	
Repetição do ensaio			
P1	P2	P3	
3,2	2,61	2,14	
3,1	2,7	2,16	
3,1	2,59	2,21	
3,1	2,58	2,22	
3,1	2,58	2,24	
Média			
P1	P2	P3	Média total
3,65	3,30	4,21	3,72

Tabela A11. Resultados da rugosidade 11º ensaio

P1	P2	P3	
2,74	2,02	2,75	
2,74	2,01	2,74	
2,93	2,02	2,75	
2,9	2,01	2,75	
2,94	2	2,4	
Repetição do ensaio			
P1	P2	P3	
1,97	2,05	2,7	
1,96	2,04	2,69	
1,97	2,04	2,68	
1,96	2,03	2,68	
1,96	2,01	2,68	
Média			
P1	P2	P3	Média total
2,86	2,01	2,75	2,54

Tabela A12. Resultados da rugosidade 12º ensaio.

P1	P2	P3	
1,1	0,89	1021	
1,09	0,89	1,2	
1,07	0,91	1,17	
1,07	0,92	1,17	
1,07	0,93	1,17	
Repetição do ensaio			
1,21	1,32	1,02	
1,2	1,32	1,02	
1,19	1,31	1,01	
1,19	1,31	1	
1,18	1,3	0,98	
Média			
P1	P2	P3	Média total
1,08	0,91	1,18	1,05

Tabela A13. Resultados da rugosidade 13º ensaio

P1	P2	P3	
1,09	1,17	1,02	
1,09	1,16	1,08	
1,07	1,16	1,08	
1,06	1,17	1,08	
1,04	1,16	1,08	
Repetição do ensaio			
P1	P2	P3	
1,16	1,43	1,51	
1,14	1,37	1,42	
1,14	1,47	1,46	
1,13	1,4	1,43	
1,13	1,35	1,36	
Média			
P1	P2	P3	Média total
1,07	1,16	1,08	1,11

Tabela A14. Resultados da rugosidade 14º ensaio

P1	P2	P3
1,27	1,47	1,21
1,27	1,46	1,2
1,36	1,46	1,21
1,26	1,45	1,21

1,26	1,44	1,19	
Repetição do ensaio			
1,17	1,44	1,72	
1,16	1,43	1,69	
1,14	1,42	1,69	
1,14	1,4	1,68	
1,14	1,39	1,67	
Média			
P1	P2	P3	Media total
1,30	1,46	1,21	1,32

Tabela A15. Resultados da rugosidade 15º ensaio

P1	P2	P3	
3,2	2,97	3,39	
3,2	2,94	3,2	
2,9	2,9	3,2	
2,9	2,9	3,19	
2,9	2,9	3,19	
Repetição do ensaio			
3,09	3,23	3,13	
3,09	3,15	3,13	
3,09	3,15	3,12	
3,09	3,08	3,02	
3,08	3,07	3,02	
Média			
P1	P2	P3	Média total
3	2,91	3,20	3,04

Tabela A16. Resultados da rugosidade 16º ensaio

P1	P2	P3	
2,22	1,68	2,42	
2,2	1,64	2,23	
2,21	1,63	2,19	
2,21	1,6	2,19	
1,54	1,6	2,18	
Repetição do ensaio			
1,84	2,24	2,5	
1,8	2,29	2,48	
1,81	2,29	2,16	
1,81	2,29	2,46	

1,81	2,32	2,42	
Média			
P1	P2	P3	Média total
2,20	1,623	2,20	2,01

8.4 Anexo V- Código Matlab para o método das Superfícies

Problema 1- Método Nelder-Mead

Parte 1

```
function y=fun1(z,dados1)

vrd=dados1(2,:);
vad=dados1(3,:);
aed=dados1(4,:);
apd=dados1(5,:);
rud=dados1(6,:);

y=sum((z(1).*vrd+z(2).*vad+z(3).*aed+z(4).*apd+z(5)-rud).^2); % fun1

end

x0=ones(1,5); % Ter em atenção ao número de variáveis

[dados, Texto]=xlsread('dados1.xlsx');

fun1(x0,dados)
[z,fval,exitflag,output]=fminsearch(@(z) fun1(z,dados),x0)

fun1(z,dados)
```

Parte 2

```
function y=fun1(x,z)

y=abs(z(1).*x(1)+z(2).*x(2)+z(3).*x(3)+z(4).*x(4)+z(5));

end

A=[ ];
b=[ ];

%Restrições lineares de igualdade
Aeq=[ ];
beq=[ ];
```

```

% limites simples
lb=[2546;1018.4;0.10;2];
ub=[3820;4584;0.35;4];

x0=ones(1,4); % cuidado com o número de variáveis

[dados, Texto]=xlsread('dados1.xlsx');
format long
z

fun1b(x0,z)

% [x,fval,exitflag,output]=fminsearch(@(x) fun1b(x,z),x0)

```

Problema 2- Método GA

Parte 1

```

function y=fun1(z,dados1)

vrd=dados1(2,:);
vad=dados1(3,:);
aed=dados1(4,:);
apd=dados1(5,:);
rud=dados1(6,:);

y=sum((z(1).*vrd+z(2).*vad+z(3).*aed+z(4).*apd+z(5)-rud).^2); % fun1

end

```

```

x0=ones(1,5); % Ter em atenção ao número de variáveis

```

```

[dados, Texto]=xlsread('dados1.xlsx');

fun1(x0,dados)
[z,fval,exitflag,output]=ga(@(z) fun1(z,dados),5)
fun1(z,dados)

```

Parte 2

```

function y=fun1(x,z)

y=abs(z(1).*x(1)+z(2).*x(2)+z(3).*x(3)+z(4).*x(4)+z(5));

end

```

```

A=[];
b=[];

%Restrições lineares de igualdade
Aeq=[];
beq=[];

%limites simples
lb=[2546;1018.4;0.10;2];
ub=[3820;4584;0.35;4];

x0=ones(1,4); % cuidado com o número de variáveis

[dados, Texto]=xlsread('dados1.xlsx');
format long
z

fun1b(x0,z)

[x,fval,exitflag,output]=ga(@(x) fun1b(x,z),4,A,b,Aeq,beq,lb,ub)
fun1b(x,z)

```