

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MARCELLO VINÍCIUS VEIGA RIVELLO GUEDES

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NA RUGOSIDADE
DE SUPERFÍCIE NO TORNEAMENTO CILÍNDRICO DO AÇO ABNT 1045
ATRAVÉS DO MÉTODO ESTATÍSTICO TAGUCHI**

JUIZ DE FORA

2019

MARCELLO VINÍCIUS VEIGA RIVELLO GUEDES

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NA RUGOSIDADE
DE SUPERFÍCIE NO TORNEAMENTO CILÍNDRICO DO AÇO ABNT 1045
ATRAVÉS DO MÉTODO ESTATÍSTICO TAGUCHI**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado
à Faculdade de Engenharia da
Universidade Federal de Juiz de Fora,
como requisito parcial
para a obtenção do título de Engenheiro
mecânico.

Orientador: Carlos Renato Pagotto

JUIZ DE FORA

2019

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Guedes, Marcello Vinícius Veiga Rivello.

Análise da influência dos parâmetros de corte na rugosidade de superfície no torneamento cilíndrico do aço ABNT 1045 através do método estatístico Taguchi / Marcello Vinícius Veiga Rivello Guedes. -- 2019.
55 f.

Orientador: Carlos Renato Pagotto
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2019.

1. Usinagem. 2. Torneamento cilíndrico. 3. Método Taguchi. 4. Aço ABNT 1045. 5. DOE. I. Pagotto, Carlos Renato, orient. II. Título.

MARCELLO VINÍCIUS VEIGA RIVELLO GUEDES

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CORTE NA RUGOSIDADE
DE SUPERFÍCIE NO TORNEAMENTO CILÍNDRICO DO AÇO ABNT 1045
ATRAVÉS DO MÉTODO ESTATÍSTICO TAGUCHI**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado
à Faculdade de Engenharia da
Universidade Federal de Juiz de Fora,
como requisito parcial
para a obtenção do título de Engenheiro
mecânico.

Aprovada em 08 de novembro de 2019.

BANCA EXAMINADORA

Carlos Renato Pagotto – Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Raphael Fortes Marcomini
Universidade Federal de Juiz de Fora

Moisés Luiz Lagares Júnior
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus pela oportunidade de estudar e fazer um curso superior.

A minha mãe Vanderléa e a minha esposa Dandara por me incentivarem a não desistir nunca e pela confiança no meu potencial.

Ao técnico Guilherme pela ajuda ao realizar os experimentos no laboratório.

Aos amigos da UFJF que tive a honra de conhecer ao longo desses anos, jamais vou esquecer de vocês!

E por último, não menos importante ao meu orientador Carlos Renato Pagotto, pela atenção, preocupação e compreensão que teve comigo nessa caminhada para a conclusão do trabalho.

RESUMO

A usinagem é um processo de fabricação que existe há muitos anos e é essencial para a confecção de peças seja em escala industrial ou em manufatura. Em virtude disso, vários modelos estatísticos são empregados nesse processo a fim de fornecer melhorias contínuas e diminuir os custos de fabricação para poder atender a principalmente as indústrias de médio e pequeno porte de maneira cada vez mais satisfatória. A qualidade do acabamento superficial das peças submetidas a um processo de torneamento é de vital importância na indústria metal mecânica e em virtude disso foi analisada neste trabalho. Durante o torneamento cilíndrico, foi utilizado o aço ABNT 1045, que além de ser muito empregado possui boa usinabilidade. Alguns parâmetros de corte foram analisados para entender o que acontece com a rugosidade, que é o conceito chave para a análise do acabamento da superfície. Os experimentos foram avaliados de maneira simultânea, por meio da metodologia *Design of Experiments* (DOE). O método estatístico utilizado foi o MÉTODO DE TAGUCHI e foram realizados 27 experimentos.

Palavras-chave: Usinagem. Torneamento cilíndrico. Método Taguchi. Aço ABNT 1045. DOE.

ABSTRACT

Machining is a manufacturing process that has been around for many years and is essential for making parts on an industrial scale or in manufacturing. As a result, various statistical models are employed in this process in order to provide continuous improvements and lower manufacturing costs in order to be able to serve the medium and small industries in an increasingly satisfactory manner. The quality of the surface finish of parts subjected to a turning process is of vital importance in the metalworking industry and will therefore be analyzed in this paper. During cylindrical turning, ABNT 1045 steel was used, which besides being widely used has good machinability. Some cutting parameters were analyzed to understand what happens to roughness, which is the key concept for surface finish analysis. The experiments were evaluated simultaneously using the *Design of Experiments (DOE) methodology*. The statistical method used was the TAGUCHI METHOD and 27 experiments were performed.

Key-words: Machining. Cylindrical turning. Taguchi Method. ABNT 1045 steel. DOE.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Movimentos diretos no processo de usinagem [2]	16
Figura 2 - Velocidade de corte (V_c), avanço (f) e profundidade de corte (ap). [1]	18
Figura 3 - Classificação da integridade superficial [2]	19
Figura 4 - Estruturas que compõem uma superfície. [24].....	20
Figura 5 - Representação da rugosidade longitudinal e transversal. [1].....	21
Figura 6 - Representação do sistema da linha média M [25]	21
Figura 7 - Componentes de instrumentos de medição de rugosidade [26]	22
Figura 8 - Representação da Rugosidade R_a [2]	23
Figura 9 - Representatividade de um sistema ou de um processo. [13].....	24
Figura 10 - Arranjos ortogonais em um experimento. [26]	26
Figura 11 - Avaliação da significância de fatores e interações em um experimento fatorial com dois fatores. [22]	30
Figura 12 - Corpo de prova no ensaio experimental com locais de medição dos parâmetros de Rugosidade R_a (A, B e C). Fonte: Próprio autor.....	32
Figura 13 - Torno mecânico utilizado no trabalho. Fonte: Próprio autor.....	33
Figura 14 - Ferramenta de corte utilizada nos experimentos. Fonte: Próprio autor...	34
Figura 15 - Rugosímetro utilizado nos experimentos. Fonte: Próprio Autor.	34
Figura 16 - Gráfico de probabilidade normal dos resíduos. Fonte: Próprio Autor.....	37
Figura 17 - Efeitos dos fatores na rugosidade para as médias. Fonte: Próprio autor	38
Figura 18 - Efeitos das interações na rugosidade para as médias. Fonte: Próprio autor.	39
Figura 19 - Efeito dos fatores na rugosidade em relação ao sinal-ruído (S/R). Fonte: Próprio autor.....	42
Figura 20 - Efeito das interações na rugosidade em relação ao sinal-ruído (S/R). Fonte: Próprio autor.....	43
Figura 21 - Parâmetros de otimização da rugosidade R_a . Fonte: Próprio Autor	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço ABNT 1045.....	31
Tabela 2 - Limites de escoamento do aço ABNT 1045.	31
Tabela 3 - Especificações da ferramenta de corte	33
Tabela 4 - Fatores e níveis dos experimentos.....	35
Tabela 5 - Arranjo ortogonal L27, médias e razões sinal-ruído.....	36
Tabela 6 - Resposta para as médias.....	40
Tabela 7 - Tabela de interações para as médias	40
Tabela 8 - Anova para a rugosidade Ra em relação à média.	41
Tabela 9 - Resposta para Razões sinal-ruído: Menor é melhor	44
Tabela 10 - Tabela de interações sinal-ruído (S/R).....	44
Tabela 11 - ANOVA para a rugosidade Ra em relação a razão sinal-ruído (S/R).....	45
Tabela 12 - Níveis e fatores na regressão linear múltipla.	47
Tabela 13 - Comparação entre as médias, a razão sinal-ruído e o método da regressão.	47

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

V_c	Velocidade de corte [m/min]
d	Diâmetro inicial da peça [mm]
n	Rotação da peça [rpm]
V_f	Velocidade de avanço [mm/min]
f	Avanço [mm/volta]
ap	Profundidade de corte [mm]
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DOE	<i>Design of experiments</i>
R_a	Rugosidade média
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
L	Designação genérica de um arranjo ortogonal
\bar{n}	Número de ensaios realizados
S	Sinal
R	Ruído
r	Número de repetições num experimento
\bar{y}	Média das observações num experimento.
y_i	Observação i
S'	Variância das observações
SQ_{TOTAL}	Variabilidade total dos dados
SQ_A	Variabilidade devido ao fator A
SQ_B	Variabilidade devido ao fator B

SQ_{erro}	Variabilidade devido ao erro aleatório
SQ_{CE}	Variabilidade nas condições experimentais
A	Fator A
B	Fator B
N	Número total de observações.
R_{2aj}	Coefficiente de determinação múltipla ajustado

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	14
INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Objetivo geral.....	14
1.2 Objetivos específicos	15
CAPÍTULO 2	15
REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1 USINAGEM E SEUS PROCESSOS	15
2.1.1 Movimentos na usinagem	16
2.1.2 Parâmetros e grandezas de corte na usinagem.....	17
2.2 INTEGRIDADE SUPERFICIAL	18
2.2.1 Acabamento superficial	19
2.2.2 Rugosidade superficial	20
2.2.3 Medição da rugosidade	21
2.2.4 Parâmetros de avaliação da rugosidade	22
2.3 Design of Experiments (DOE).....	23
2.4 MÉTODO TAGUCHI	24
2.4.1 Experimentos fatoriais fracionados	25
2.4.2 Arranjos ortogonais	26
2.4.3 Razão sinal – ruído	27
2.4.4 Análise da variância (ANOVA)	28
CAPÍTULO 3	30
METODOLOGIA.....	30
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS	30
3.1.1 Materiais.....	30
3.1.2 Máquina ferramenta	32
3.1.3 Ferramenta de corte.....	33
3.1.4 Rugosímetro.....	34
3.2 MÉTODOS E PARÂMETROS	35
CAPÍTULO 4	36
DISCUSSÕES E RESULTADOS	36
4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS	36
4.1.1 Análise dos resíduos	37
4.1.2 Comportamento da rugosidade R_a em relação à média	38

4.1.3 Comportamento da rugosidade Ra em relação à razão Sinal-Ruído (S/R)	42
4.1.4 Otimização da rugosidade Ra	46
4.1.5 Comparação do método das médias e da razão Sinal-Ruído (S/R) com o método da Regressão Linear Múltipla	46
CAPÍTULO 5	48
CONCLUSÕES	48
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
APÊNDICE A – MATRIZ DE EXPERIMENTOS REALIZADOS	54
ANEXO 1 – Termo de Autenticidade	55

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O processo de usinagem é responsável pela maioria dos processos de melhoria da qualidade superficial nas indústrias metal mecânica, dentre eles está o torneamento. Este é usado para a fabricação de peças cilíndricas e tem uma vasta importância no acabamento superficial com o melhoramento contínuo no processo produtivo.

Ao analisar um material, constata-se que ele é formado por vales e picos, que constituem o que é conhecido como rugosidade superficial. A rugosidade é muito importante pois ela influencia em muitas propriedades dos materiais, como o desgaste, a resistência a corrosão e fadiga de uma peça.

Em virtude disso, diversas ferramentas estatísticas de experimentos existem para investigar a influência dos parâmetros de corte entre eles rotação, profundidade de usinagem e avanço, na rugosidade superficial, a fim de obter dados que possam melhorar o processo de torneamento.

O DOE é uma destas ferramentas cujo objetivo é planejar os experimentos que gerem dados necessários para a validação estatística. O método estatístico TAGUCHI será importante para obter resultados da rugosidade superficial com base nos parâmetros de corte selecionados para a quantidade de experimentos realizados.

Com o objetivo de obter uma qualidade superficial mais refinada a análise da rugosidade é imprescindível. Através do DOE e do método de TAGUCHI (experimentos fatoriais com matrizes ortogonais), serão analisados como os parâmetros de corte utilizados influenciam neste processo.

1.1 Objetivo geral

O objetivo principal desta monografia é a utilização da ferramenta DOE em que planejamento fatorial dos experimentos será associado ao método estatístico TAGUCHI para a compreensão da rugosidade obtida no torneamento do aço ABNT

1045 com base nos parâmetros da usinagem: avanço, rotação e profundidade de corte.

1.2 Objetivos específicos

- Analisar como os parâmetros de corte influenciam na rugosidade através da ferramenta DOE e do método TAGUCHI;
- Com os dados obtidos da rugosidade no torneamento, da ferramenta e do método aplicados (essenciais), estudar melhorias para obter uma qualidade superficial mais refinada;
- Avaliar como o método Taguchi pode otimizar esse processo;
- Comparar os resultados do método TAGUCHI com os resultados do método da Regressão Linear Múltipla utilizado no Trabalho “Análise dos Parâmetros de corte na rugosidade superficial no torneamento do aço SAE 1045 utilizando a metodologia de planejamento de experimentos (DOE)”.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo aborda os conceitos essenciais literários para facilitar a compreensão e o entendimento do objeto de estudo tanto a teoria quanto os experimentos e os resultados. Alguns conceitos serão abordados entre eles a Usinagem, o torneamento, as ferramentas e os métodos estatísticos.

2.1 USINAGEM E SEUS PROCESSOS

Usinagem é todo processo que produz cavaco, quando se quer conferir à uma peça: a forma, o acabamento ou as dimensões [1]. O cavaco é o material de geometria irregular retirado pela ferramenta na operação.

Existem diversos processos de usinagem, alguns exemplos são: Perfilamento, aplainamento, furação, alargamento, mandrilamento, fresamento, torneamento etc. Neste trabalho será utilizado, como antes citado, o torneamento.

O torneamento cilíndrico é o processo em que a ferramenta se desloca segundo uma trajetória paralela ao eixo principal de rotação da máquina considerada [1].

2.1.1 Movimentos na usinagem

Nas operações de usinagem, os movimentos são relativos entre a aresta de corte e a peça considerada estacionária [2]. Há dois tipos de movimentos: os movimentos diretos, que resultam diretamente na saída do cavaco, e os movimentos indiretos, que como o próprio nome diz, não influenciam diretamente nestes.

Os movimentos diretos são compreendidos por:

- Movimento de corte: é o movimento realizado entre a peça e a aresta cortante;
- Movimento de avanço: é o movimento realizado entre a aresta de corte e a peça, e que devido ao movimento cortante, resulta a retirada linear de cavaco;
- Movimento efetivo: é o movimento que compreende o resultado entre os movimentos de corte e avanço, realizados simultaneamente.

Na figura abaixo estão representados os tipos de corte:

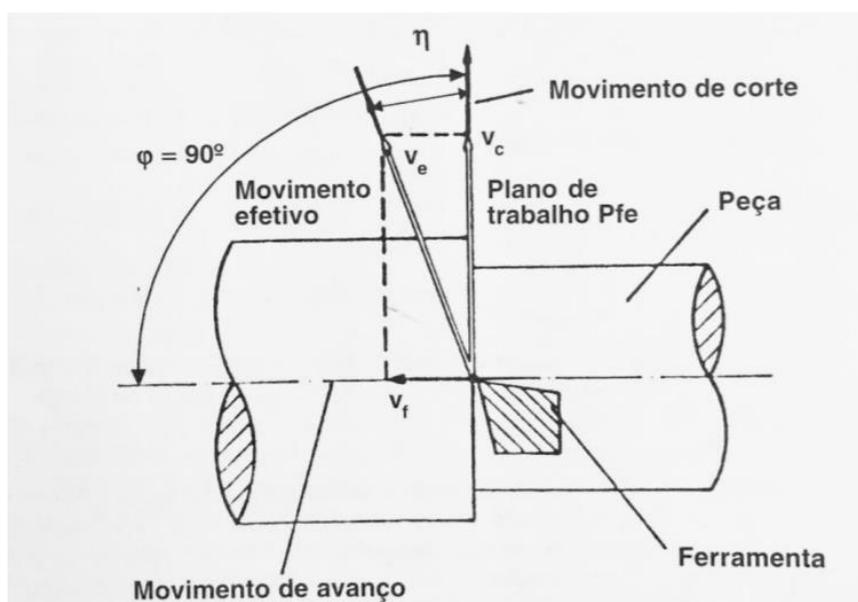


Figura 1 - Movimentos diretos no processo de usinagem [2]

Os movimentos indiretos são compreendidos por:

- Movimento de recuo: é o movimento de afastamento da ferramenta em relação a peça depois da operação de usinagem.
- Movimento de correção: é o movimento para compensar o desgaste provocado na ferramenta.
- Movimento de ajuste: é o movimento para determinar a quantidade de material- a espessura- a ser retirado no processo.
- Movimento de aproximação: é o movimento no qual a ferramenta avança em relação a peça.

2.1.2 Parâmetros e grandezas de corte na usinagem

Neste trabalho serão considerados três parâmetros de corte: velocidade, avanço e a profundidade de corte.

- **VELOCIDADE DE CORTE (V_c):** é a velocidade instantânea do ponto referencial da aresta de corte, segundo a direção e o sentido cortante. Pode ser calculada pela seguinte equação:

$$V_c = (\pi d n) / 1000 \quad (2.1)$$

Onde:

V_c = velocidade de corte [m/min]

d = diâmetro inicial da peça [mm]

n = rotação da peça [rpm]

- **VELOCIDADE DE AVANÇO (V_f):** compreende a velocidade de percurso da ferramenta seguindo uma trajetória paralela a peça. Pode ser calculada pela seguinte equação:

$$V_f = n f \quad (2.2)$$

Onde:

V_f = velocidade de avanço [mm/min]

f = avanço [mm/volta]

- **PROFUNDIDADE DE CORTE (a_p):** É a profundidade de penetração da aresta principal cortante, medida numa direção perpendicular ao plano de trabalho. Sua unidade é em milímetros. A seguir, na figura, os parâmetros de corte:

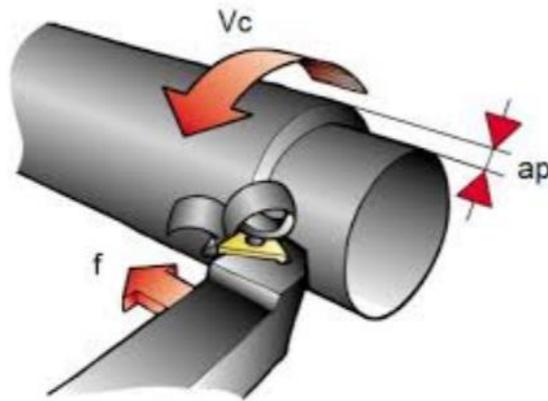


Figura 2 - Velocidade de corte (V_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p). [1]

2.2 INTEGRIDADE SUPERFICIAL

O termo integridade superficial é utilizado para descrever a qualidade em uma superfície, incluindo um número elevado de alterações sofridas por ela, isto é, esse conceito não pode ser definido só em uma dimensão e não analisa somente a textura superficial ou a sua geometria. O termo engloba outras características de superfície [5].

A figura 3 mostra alterações que podem ser geradas em superfícies que foram usinadas e suas especificações:

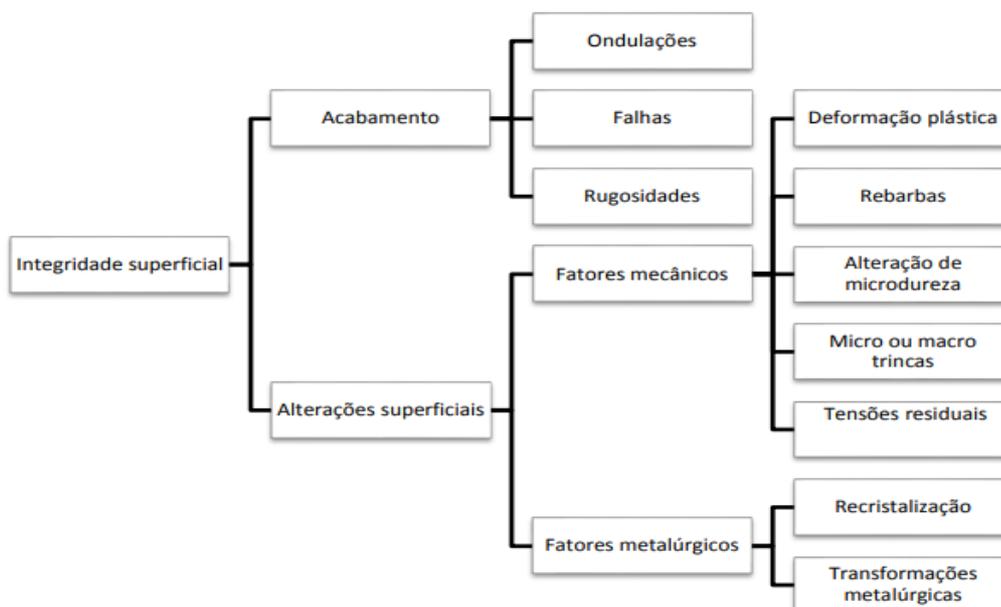


Figura 3 - Classificação da integridade superficial [2]

Percebe-se, na figura 3, que a rugosidade está ligada ao acabamento superficial. Desta forma é necessário entender, brevemente, este conceito.

2.2.1 Acabamento superficial

O acabamento superficial é de suma importância na análise da qualidade da peça a ser gerada no processo de torneamento. Nos dias atuais, as indústrias focam, principalmente, em estudar e analisar mecanismos cada vez mais eficientes para a obtenção de uma superfície com maior qualidade possível.

A análise desse acabamento é indispensável quando houver atrito, corrosão, desgaste, aparência irregular, transmissão de calor, resistência à fadiga, escoamento de fluidos e necessidade das superfícies serem medidas seja com micrômetros, paquímetros, entre outros. [3]

Uma superfície é composta por três componentes (esquematisadas na figura 4):

- Forma: é o componente com maior facilidade de observação, é a mais grosseira. Pode ser plana, esférica, cilíndrica etc. [4]
- Ondulação: é constituída de estruturas ainda menores, pequenos vales e picos.
- Rugosidade: É formada por vales e picos ainda menores que a ondulação.

Neste trabalho, o foco de estudo será a rugosidade no aço ABNT 1045.

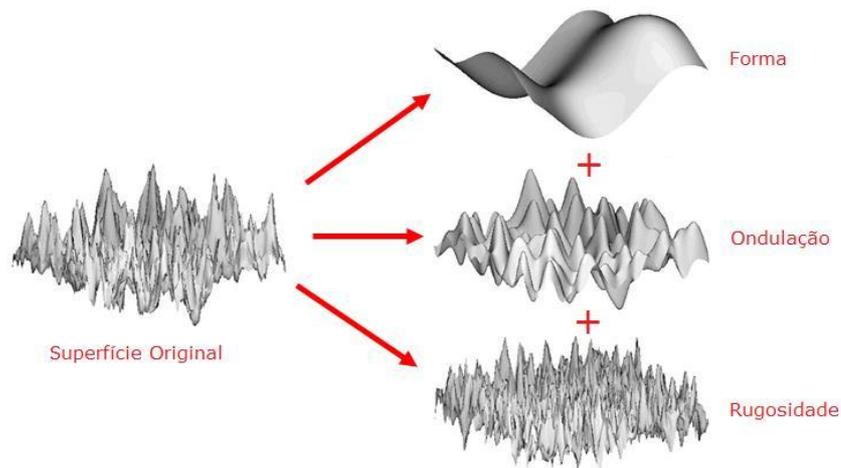


Figura 4 - Estruturas que compõem uma superfície. [24]

2.2.2 Rugosidade superficial

As superfícies reais se diferenciam das superfícies ideais (ou teóricas), através dos erros de sua forma, sejam eles macro ou micro geométricos.[3] Estes erros micro geométricos formam a rugosidade superficial que só pode ser mensurada por meio de aparelhos de medição específicos. [6] A grandeza, o grau e a orientação de irregularidade da rugosidade podem indicar algumas de suas causas, tais como:

- Imperfeições nos mecanismos das máquinas-ferramenta;
- Desgaste das ferramentas;
- Vibrações no sistema peça-ferramenta;
- No próprio método de conformação da peça.

A rugosidade é classificada, de maneira geral, em longitudinal e transversal. A primeira encontra-se na direção do movimento de corte na usinagem, já a segunda encontra-se na direção do movimento de avanço da ferramenta.[7]

De acordo com o processo, pode predominar um ou outro tipo de rugosidade. No torneamento especificamente, a rugosidade máxima é obtida geralmente na direção de avanço, ou seja, a rugosidade transversal.[7]

A figura 5 mostra as rugosidades longitudinal e transversal:

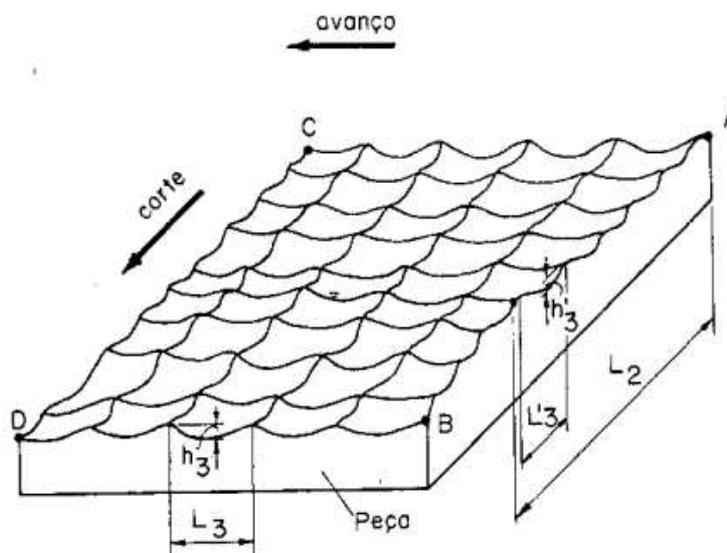


Figura 5 - Representação da rugosidade longitudinal e transversal. [1]

2.2.3 Medição da rugosidade

O sistema de medição de rugosidade mais utilizado em todos os países é o da linha média M. No Brasil ele é regido pela ABNT NBR 6405-1985 em que O sistema da linha média M compreende a linha paralela ao perfil ideal, no comprimento de amostragem, definida de tal maneira que a soma das áreas superiores é igual a soma das áreas inferiores contidas no perfil, conforme a figura:

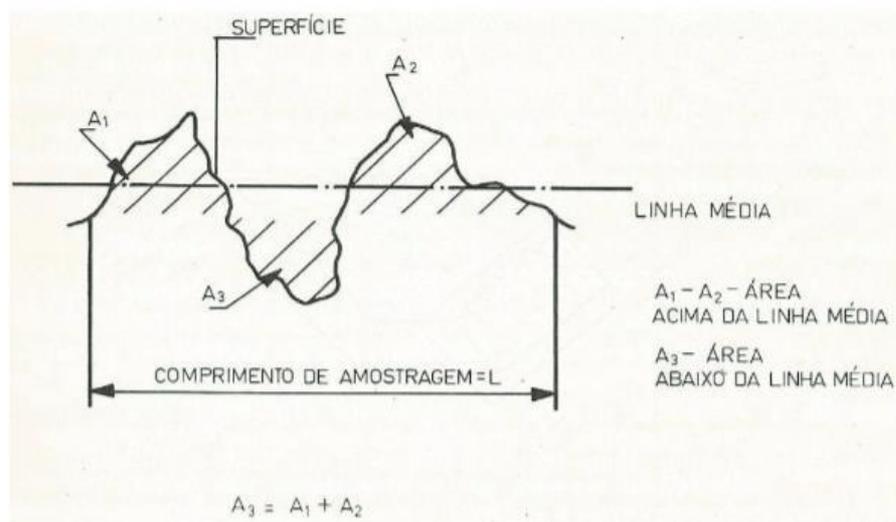


Figura 6 - Representação do sistema da linha média M [25]

Para a medição da rugosidade deve haver uma separação desta com a ondulação e dos desvios macro geométricos. Esta separação é realizada com a filtragem: um filtro específico separa o perfil de rugosidade dos demais desvios de forma.[7]

O comprimento de onda do filtro, determina o que deve passar e o que não deve. O sinal da rugosidade apresenta altas frequências (baixos comprimentos de onda), e as ondulações apresentam baixas frequências (altos comprimentos de onda).[7]

O aparelho utilizado no trabalho para a medição foi um rugosímetro por sensor de contato cuja função é analisar as variações de relevo de superfícies. Ele utiliza filtros que permitem a passagem dos sinais de alta frequência e eliminam os sinais de baixa frequência.

O processo de funcionamento consiste em percorrer a superfície que será analisada com o apalpador (dispositivo que desliza sobre a superfície, levando os sinais da agulha apalpadora até o amplificador), junto a uma guia que ajuda ele a se mover na mesma direção. O movimento da agulha é convertido em impulsos de eletricidade e assim gerado no display do aparelho.[9]

A seguir uma figura que mostra os componentes de instrumentos de medição da rugosidade:

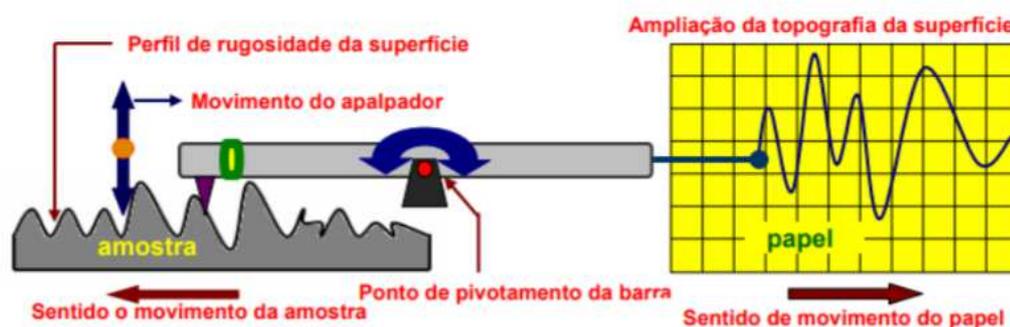


Figura 7 - Componentes de instrumentos de medição de rugosidade [26]

2.2.4 Parâmetros de avaliação da rugosidade

Nas operações envolvendo acabamento superficial, a variável mais importante de peças numa produção é a rugosidade.[3] Logo, é necessário analisar e conhecê-lo, este é a rugosidade R_a .

A rugosidade média R_a é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas dos afastamentos dos pontos do perfil de rugosidade, em relação a linha média, considerando um percurso de medição, demonstrados na figura a seguir.[8]

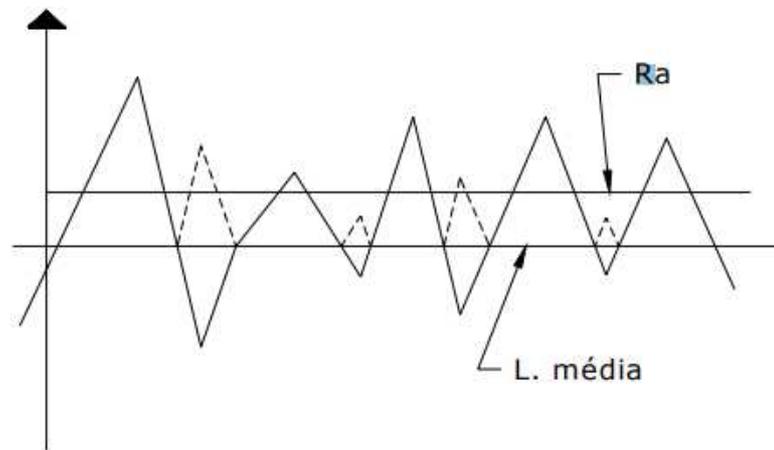


Figura 8 - Representação da Rugosidade Ra [2]

2.3 Design of Experiments (DOE)

O objetivo principal de um projeto experimental é gerar a máxima quantidade de informação com o menor número de experimentos possível. [11] O experimento planejado é uma série de testes nos quais são induzidas deliberadas mudanças nas variáveis de entrada do processo ou sistema, de modo que seja possível identificar e observar os motivos das mudanças nas respostas ou variáveis de saída. [12]

O planejamento de experimentos DOE é uma técnica utilizada para definir quais dados, em que quantidade e em que condições devem ser coletados durante um determinado experimento, para chegar em dois principais objetivos: a melhor precisão estatística possível na resposta e o menor custo. [10]

Além desses objetivos, a técnica estatística DOE permite a determinação das variáveis que exercem uma influência maior no desempenho de um processo, tendo como resultados:

- Redução da variação do processo e melhor aproximação entre os valores obtidos e os valores pretendidos;
- Redução do tempo do processo;
- Melhoria no rendimento do processo.

Quando se busca analisar a influência de mais de um fator, é recomendável utilizar a metodologia DOE com planejamento fatorial, ou seja, experimentos da forma N^K , Onde "N" é o número de níveis dos fatores relacionados aos experimentos e "K" é a quantidade de fatores. Para a utilização desse método os fatores devem ter níveis fixos, o experimento poderá ser totalmente aleatorizado e a normalidade deve ser um parâmetro satisfeito. [14]

Para este estudo, o DOE foi aplicado sem replicação, ou seja, cada condição de ensaio que representa uma determinada combinação de fatores foi realizada somente uma vez sem repetição. A replicação não foi utilizada, pois a ferramenta não iria satisfazer com qualidade a obtenção dos valores das rugosidades. Foram realizados 27 (vinte e sete) experimentos nesse trabalho.

2.4 MÉTODO TAGUCHI

No final da década de 70, houve um aumento do interesse da indústria na melhoria da qualidade com a utilização do planejamento de experimentos e um dos precursores dessa nova fase foi Genichi Taguchi. Taguchi defendeu a aplicação de experimentos projetados, que ele denominou de projeto robusto, em que os processos se tornam insensíveis a fatores ambientais ou demais fatores que são difíceis de controlar (chamados de fatores de ruído). Ele sugere, ainda, matrizes ortogonais e experimentos fatoriais fracionários, juntamente com métodos estatísticos para solucionar esses problemas. [13]

A figura a seguir mostra um modelo representativo de um processo ou sistema:

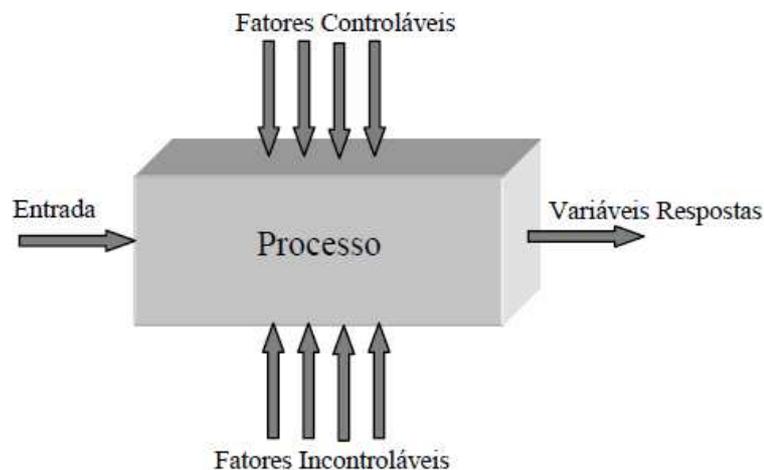


Figura 9 - Representatividade de um sistema ou de um processo. [13]

O método de Taguchi proporcionou um crescimento rápido das indústrias japonesas, pois na época, havia uma grande necessidade de melhoria na qualidade de seus produtos. [13]

Para Genichi, a qualidade pode ser dividida em duas importantes áreas, a primeira é o controle da qualidade fora da linha produtiva e a segunda é o controle da qualidade na linha. O primeiro é aplicado nos estágios de desenvolvimento do produto e processo, já o segundo controla a qualidade na linha e aplica na produção de produtos ou nos processos de produção, onde se monitora os processos industriais para verificar a qualidade produzida. [15]

A metodologia de Taguchi pode ser dividida basicamente em duas:

- Redução na variabilidade: utilização da engenharia da qualidade no produto ou processo, buscando melhorias contínuas e menor desperdício para a empresa;
- Aplicação do planejamento estratégico: desenvolvimento de novas pesquisas, com o objetivo de otimizar o processo e a redução de experimentos em situações reais repercutindo, assim, em diminuição de custos.[19]

2.4.1 Experimentos fatoriais fracionados

Alguns estatísticos desenvolveram planejamentos designados como fatorial fracionado, que utilizam apenas uma parte de todas as possíveis combinações para estimar os principais efeitos do fator e alguns efeitos das interações. [15]

O Planejamento fracionário é utilizado principalmente para selecionar quais fatores apresentam os maiores efeitos no experimento. Na etapa inicial de um planejamento com diversas variáveis independentes, as mais relevantes são detectadas e um novo planejamento é realizado considerando apenas essas variáveis.[20]

A aplicação do planejamento fatorial fracionado implica, entretanto, em prejuízo da análise estatística, porque se confunde os efeitos dos fatores com os das interações.[22]

2.4.2 Arranjos ortogonais

Taguchi desenvolveu um tipo de matriz que pode ser utilizado em diversas situações. Essas matrizes são conhecidas como arranjos ortogonais.[16] A importância da utilização do arranjo ortogonal consiste na habilidade de avaliar vários fatores com um número mínimo de testes.[17]

Para a escolha do arranjo ortogonal adequado, o qual representa o nº de experimentos a serem ensaiados, utiliza-se como base a tabela abaixo. O arranjo ortogonal escolhido depende do número de fatores e do número de níveis de cada fator. [18]

Arranjo Ortogonal	Número de experimentos	Número de fatores	Máximo número de colunas na matriz			
			2 níveis	3 níveis	4 níveis	5 níveis
L4	4	3	3	-	-	-
L8	8	7	7	-	-	-
L9	9	4	-	4	-	-
L12	12	11	11	-	-	-
L16	16	15	15	-	-	-
L'16	16	5	-	-	5	-
L18	18	8	1	7	-	-
L25	25	6	-	-	-	6
L27	27	13	-	13	-	-
L32	32	31	31	-	-	-
L'32	32	10	1	-	9	-
L36	36	23	11	12	-	-
L'36	36	16	3	13	-	-
L50	50	12	1	-	-	11
L54	54	26	1	25	-	-
L64	64	63	63	-	-	-
L'64	64	21	-	-	21	-
L81	81	40	-	40	-	-

Figura 10 - Arranjos ortogonais em um experimento. [26]

Para definir os experimentos, são utilizados diversos arranjos ortogonais (matrizes experimentais), genericamente designados por L_n , onde " \bar{n} " representa o número de ensaios a serem realizados. As matrizes mais utilizadas são as L4, L8, L9, L12, L16, L18, L27 e L32 para fatores de dois e três níveis. As matrizes são utilizadas no projeto de experimentos, com a finalidade de estudar as variáveis significativas e suas interações, que ocorrem simultaneamente.[16]

Após a escolha do arranjo ortogonal, os fatores e as interações que se desejam analisar deverão ser atribuídos cada um em uma coluna, respectivamente. Porém

para esta distribuição de interação deve ser utilizada uma das ferramentas propostas por Taguchi.[15]

Taguchi forneceu duas ferramentas para auxiliar na determinação de fatores e interações aos arranjos. Cada arranjo ortogonal possui uma série diferente de gráficos lineares e uma tabela triangular associada a ela. Os gráficos lineares indicam as diversas colunas às quais os fatores podem estar atribuídos, e as colunas avaliam a interação desses fatores, já as tabelas triangulares contêm todas as interações possíveis entre estes.[15]

2.4.3 Razão sinal – ruído

O método Taguchi utiliza a chamada razão Sinal – Ruído (S/R), que é uma função logarítmica usada para otimizar o projeto ou processo do produto, minimizando a variabilidade. Esta grandeza é medida em decibel (dB) e é derivada da indústria de comunicações que já a utilizava por quase um século. [16]

Taguchi se refere a fatores de ruído como as causas de variabilidade no desempenho, pois os produtos podem obter falhas. Desta forma, o ruído faz com que o produto ou processo com características mensuráveis, se desvie do seu valor desejado.[19]

A relação sinal-ruído apresenta três condições:

- Menor-melhor: o objetivo é minimizar a variável resposta, como por exemplo, impurezas, nível de perturbação e deterioração. A equação é dada por:

$$S/R = -10 \log \left(\frac{1}{r} \sum_i^r = 1 y_i^2 \right) \quad (2.3)$$

- Nominal-melhor: Essa condição é utilizada quando se deseja atingir um valor alvo para a variável resposta, como por exemplo, folgas, dimensões e viscosidade. A equação é dada por:

$$S/R = -10 \log \left(\bar{y} / s'^2 \right) \quad (2.4)$$

- Maior-melhor: Essa condição é utilizada quando se deseja maximizar a variável resposta, como por exemplo, no rendimento de combustíveis e na resistência dos materiais. A equação é dada por:

$$S/R = -10 \log \left(\frac{1}{r} \sum_i^r = \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (2.5)$$

Onde:

S/R = razão sinal-ruído

r = número de repetições num experimento (número de repetições independente dos níveis de ruído).

\bar{y} = média das observações num experimento.

y_i = observação i , sendo $i = (1, \dots, r)$

S' = variância das observações.

Essa relação sinal-ruído (S/R) pode ser utilizada como resultado do experimento. Ela constitui a medida de variação dentro dele quando há fatores de ruído presentes e concentra as repetições e o efeito dos níveis de ruído em um único valor observado. Para complementar os resultados dos efeitos encontrados com a relação sinal-ruído, pode-se aplicar a análise de variância (ANOVA) com o objetivo de identificar quais fatores contribuem para o aumento do valor médio da relação sinal-ruído. Dessa maneira, têm-se uma redução da variabilidade no processo.[15]

2.4.4 Análise da variância (ANOVA)

A ANOVA é um método estatístico utilizado para a interpretação dos dados experimentais nas tomadas de decisão e para avaliar estatisticamente as médias dos resultados obtidos.[15] Esse método pode ser utilizado de maneira complementar ao método Taguchi, com a utilização do teste F de nível de significância, para demonstrar quais fatores realmente são importantes no processo. [22]

A ANOVA se baseia na relação entre a variação dentro do tratamento (devido ao erro aleatório) e a variação entre eles (obtida pela diferença entre as médias). [13] A equação que representa a variabilidade total dos dados experimentais é dada por:

$$SQ_{total} = SQ_{CE} + SQ_{erro} \quad (2.6)$$

Onde:

SQ_{TOTAL} = variabilidade total dos dados

SQ_{CE} = variabilidade com base nas condições experimentais

SQ_{erro} = variabilidade devido ao erro aleatório

Um aspecto importante a ser analisado na utilização da ANOVA é o grau de liberdade. Quando se analisa estatisticamente, um grau de liberdade está associado a cada parcela de informação dos dados. [15] A fórmula dos graus de liberdade está na figura 11.

Para completar os cálculos da ANOVA, um teste é aplicado. Esse teste se chama teste F, que é uma ferramenta que tem como objetivo proporcionar uma decisão com um nível de confiança relevante, quanto ao fato dessas estimativas serem significativamente diferentes e consiste na razão de variâncias amostrais.[15]

A equação do teste F é dada por:

$$F = \frac{SQ_{\text{Fonte de variação}} / gl_{\text{Fonte de variação}}}{SQ_{\text{Erro}} / gl_{\text{Erro}}} \quad (2.7)$$

Onde:

$SQ_{\text{Fonte de variação}}$ = soma dos quadrados

$gl_{\text{Fonte de variação}}$ = graus de liberdade [21]

Para a determinação do valor crítico de F, que pode ser comparado com o valor obtido na ANOVA, deve-se analisar três aspectos:

- Nível de confiança desejado
- Graus de liberdade associados a fonte de variação
- Graus de liberdade associados ao erro.

Considera-se que apenas os fatores que possuam uma razão F maior que a $F_{\text{crítica}}$ exerçam uma influência sobre o valor da média. [21]

A figura 11 mostra a associação do teste F com os graus de liberdade na análise de variância (ANOVA).

Fontes de Variação	Soma de Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade (gl)	Quadrado Médio (QM)	F
Total	SQ_{Total}	$A'B'N - 1$		
Condição Experimental	SQ_{CE}	$A'B' - 1$		
A	SQ_A	$A' - 1$	SQ_A / gl_A	QM_A / QM_{Erro}
B	SQ_B	$B' - 1$	SQ_B / gl_B	QM_B / QM_{Erro}
AB	$SQ_{CE} - SQ_A - SQ_B$	$(A' - 1)(B' - 1)$	SQ_{AB} / gl_{AB}	QM_{AB} / QM_{Erro}
Erro	$SQ_{Total} - SQ_{CE}$	$A'B'(N - 1)$	SQ_{Erro} / gl_{Erro}	

Figura 11 - Avaliação da significância de fatores e interações em um experimento fatorial com dois fatores. [22]

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

Este capítulo tem como objetivo mostrar e explicar sobre os materiais utilizados durante os experimentos, bem como a ferramenta de corte, os equipamentos e o planejamento fatorial utilizados a fim de obter a influência dos parâmetros de corte na rugosidade superficial do aço ABNT 1045.

Os ensaios de usinagem foram realizados no laboratório de processos de fabricação da faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Juiz de Fora.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Esta seção aborda os materiais que foram usados durante os experimentos e algumas de suas características técnicas.

3.1.1 Materiais

O material escolhido para ser usado nos experimentos foi o Aço ABNT 1045, pois ele possui boa usinabilidade, média resistência mecânica e pouca temperabilidade. Por isso, também, é utilizado em componentes estruturais e de máquinas, virabrequim, eixos, engrenagens comuns e peças forjadas. As tabelas 1 e

2 abaixo mostram a composição química e os limites de escoamento do aço ABNT 1045.

Tabela 1 - Composição química do aço ABNT 1045.

ELEMENTO	COMPOSIÇÃO (%)
Manganês, Mn	0,60 a 0,90
Carbono, C	0,42 a 0,50
Enxofre, S	0,05 (max)
Fósforo, P	0,04 (max)
Ferro, Fe	O que sobra

Fonte: retirado do site <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-1045-propriedades-mecanicas.html>, acessado em 16/09/2019.

Tabela 2 - Limites de escoamento do aço ABNT 1045.

Tipo de aço	SAE 1045
Limite de Elasticidade - F_{el} (GPa)	250
Limite de escoamento - F_y (MPa)	310
Limite de resistência a tração - F_u (MPa)	560
Alongamento - (%)	17

Fonte: retirado do site <https://www.acoespecial.com.br/aco-1045.php> acessado em 16/09/2019.

No experimento, foi usado como corpo de prova uma barra de aço ABNT 1045 com 190mm de comprimento e 75mm de diâmetro. A figura 12 mostra o corpo de prova utilizado no ensaio experimental.

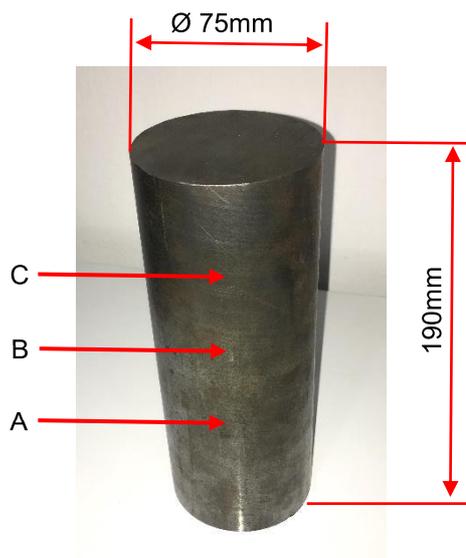


Figura 12 - Corpo de prova no ensaio experimental com locais de medição dos parâmetros de Rugosidade R_a (A, B e C). Fonte: Próprio autor

3.1.2 Máquina ferramenta

O modelo do torno utilizado nesse Trabalho de Conclusão de Curso foi o modelo TIMEMASTER. Este torno possui as seguintes características:

- Rotação de até 1255 rpm.
- Placa com 3 e 4 castanhas.
- Barramento em ferro fundido com guias temperadas e retificadas.
- Permite roscas métricas, polegadas e módulos.
- Porta ferramenta de 4 posições.
- Contraponta e luneta para usinagem dos eixos longos.
- Freio com acionamento via pedal.
- Lubrificação e iluminação da peça usinada.
- Desengate do avanço automático via alavanca



Figura 13 - Torno mecânico utilizado no trabalho. Fonte: Próprio autor

3.1.3 Ferramenta de corte

A ferramenta de corte utilizada nos experimentos é de Inserto de Metal Duro para Aço TNMG 160408 L da marca *Rocast perfection* (Figura 14). Esta é de corte de metal duro revestido, indicado para operações de acabamento. Possui alta resistência ao desgaste e tenacidade e especificações vide tabela 3.

Tabela 3 - Especificações da ferramenta de corte

Ângulo de folga	0°
Ângulo de saída	6°
Espessura da pastilha [mm]	4,76
Diâmetro do furo de fixação [mm]	3,81
Raio de ponta da ferramenta [mm]	0,8
Forma	Triangular
Quebra cavaco	Ambos os lados
Aresta da pastilha [mm]	16

Fonte: Próprio Autor



Figura 14 - Ferramenta de corte utilizada nos experimentos. Fonte: Próprio autor.

3.1.4 Rugosímetro

O rugosímetro utilizado é da marca INSTRUTHERM, modelo RP-100 (Figura 15). Este instrumento possibilita medir dois tipos de rugosidade: a rugosidade R_a (foco deste trabalho), com faixa de medição entre $0,1 - 50\mu\text{m}$ e a rugosidade R_z .

Segundo a ISO 4297/1:1996, seu comprimento amostral é de 6mm com velocidade de deslocamento da agulha de 1mm/s e possui precisão classe 3, com captador do tipo piezoelétrico e a ponta do traçador de diamante (raio de 10mm). O rugosímetro é alimentado por duas baterias recarregáveis de 3,6V e a temperatura de operação varia entre 0° e 40° graus.



Figura 15 - Rugosímetro utilizado nos experimentos. Fonte: Próprio Autor.

3.2 MÉTODOS E PARÂMETROS

Para os ensaios realizados foi utilizada a metodologia DOE com planejamento fatorial completo para 3 (três) fatores e 3(três) níveis para cada variável, totalizando 27 (vinte e sete) experimentos. Desta forma, o arranjo ortogonal L27 foi selecionado pois comporta de maneira satisfatória os fatores e os seus níveis.

Os parâmetros de corte foram definidos com base nas especificações do torno mecânico e de acordo com 2 (dois) níveis presentes no Trabalho de Conclusão de Curso “*Análise dos Parâmetros de corte na rugosidade superficial no torneamento do aço SAE 1045 utilizando a metodologia de planejamento de experimentos (DOE)*” para realizar a comparação entre os métodos de Taguchi e da Regressão. Estes estão representados na tabela 4.

Tabela 4 - Fatores e níveis dos experimentos

Parâmetros	Nível 1	Nível 2	Nível 3
Rotação n [rpm]	460	755	1255
Profundidade de usinagem a_p [mm]	0,30	0,40	0,50
Avanço f [mm/volta]	0,174	0,261	0,696

Fonte: Próprio autor

Os parâmetros escolhidos, conforme a tabela mostra, foram: rotação, profundidade de corte e avanço. Para cada experimento, foram coletados 3 (três) vezes o resultado para a variável resposta Rugosidade (R_a) e tirada a média para ter uma melhor precisão e confiança nos resultados.

A equação utilizada para os cálculos das razões sinal-ruído no método Taguchi foi a de **MENOR - MELHOR**, pois o objetivo do presente estudo é minimizar a variação R_a .

Após os valores serem coletados para o sinal-ruído, houve a verificação destes no sistema ANOVA e, ainda, uma comparação com os valores das médias das rugosidades e com os resultados do Trabalho de Conclusão de Curso antes citado.

CAPÍTULO 4

DISCUSSÕES E RESULTADOS

Nesta seção, serão abordados os resultados obtidos pelas análises dos experimentos, bem como as suas discussões pertinentes.

4.1 RESULTADOS DOS ENSAIOS

A partir da tabela “Matriz de experimentos realizados” (Apêndice A), com o auxílio do *software* MINITAB®19 versão estudante, foi gerado o arranjo ortogonal L27 (tabela 5) com as médias e razões sinal-ruído (S/R) para a rugosidade R_a .

Tabela 5 - Arranjo ortogonal L27, médias e razões sinal-ruído.

Rotação n [rpm]	Avanço f [mm/volta]	Profundidade a_p [mm]	Média R_a [μm]	Razão S/R [dB]
460	0,696	0,30	6,76	-16,59
460	0,696	0,40	7,34	-17,31
460	0,696	0,50	6,72	-16,54
460	0,174	0,30	1,53	-3,69
460	0,174	0,40	1,56	-3,86
460	0,174	0,50	1,62	-4,19
460	0,261	0,30	1,87	-5,43
460	0,261	0,40	2,04	-6,19
460	0,261	0,50	2,15	-6,64
755	0,696	0,30	7,24	-17,19
755	0,696	0,40	7,51	-17,51
755	0,696	0,50	7,00	-16,90
755	0,174	0,30	1,26	-2,00
755	0,174	0,40	1,19	-1,51
755	0,174	0,50	1,58	-3,97
755	0,261	0,30	1,87	-5,43
755	0,261	0,40	1,98	-5,93
755	0,261	0,50	2,03	-6,14

1255	0,696	0,30	7,58	-17,59
1255	0,696	0,40	7,29	-17,25
1255	0,696	0,50	7,37	-17,34
1255	0,174	0,30	1,34	-2,54
1255	0,174	0,40	1,11	-0,90
1255	0,174	0,50	1,41	-2,98
1255	0,261	0,30	1,89	-5,52
1255	0,261	0,40	1,70	-4,60
1255	0,261	0,50	1,94	-5,75

Fonte: Próprio autor

4.1.1 Análise dos resíduos

Ao analisar o DOE, os resíduos das respostas são fundamentais para a verificação da qualidade dos resultados obtidos. Esta análise se torna importante para testar a normalidade dos dados e ver se os valores experimentais são reais.

A figura abaixo mostra o gráfico de probabilidade normal dos resíduos.

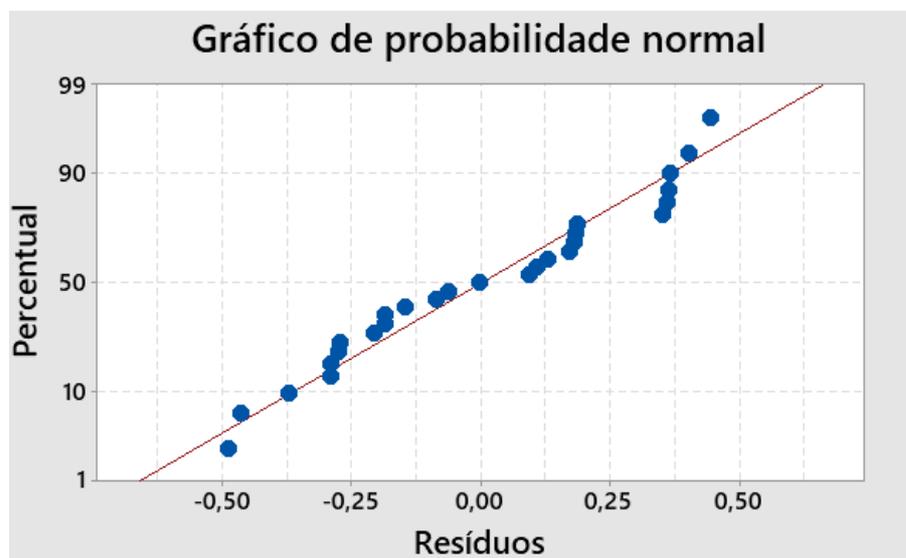


Figura 16 - Gráfico de probabilidade normal dos resíduos. Fonte: Próprio Autor

Conforme o gráfico, pode-se observar que os resíduos estão distribuídos de maneira linear (mesmo havendo poucos pontos *outliers*, mas estes distam da linha de

maneira irrisória), indicando que não há problema com a normalidade dos dados. Dessa maneira, conclui-se que o método utilizado satisfaz a validação do experimento realizado.

4.1.2 Comportamento da rugosidade R_a em relação à média

A partir dos resultados obtidos nos experimentos, e com o auxílio do MINITAB®19 versão estudante, encontrou-se os efeitos dos fatores e das interações em relação à média para a rugosidade R_a . As figuras 17 e 18 exemplificam esses efeitos.

Vale ressaltar que um teste de adequação para o modelo em questão para validar o experimento é o de coeficiente de determinação múltipla ajustado (R_{2aj}). Em relação à média, o valor encontrado pelo software MINITAB®19 versão estudante foi de 0,9981, que mostra que a confiança no modelo proposto é alta.

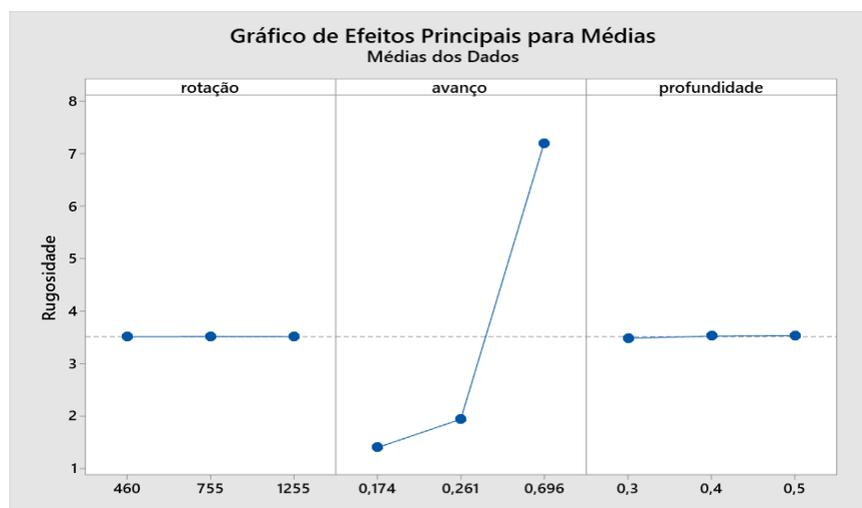


Figura 17 - Efeitos dos fatores na rugosidade para as médias. Fonte: Próprio autor

Ao analisar a figura 17, percebe-se que o fator que mais influenciou na rugosidade R_a foi o avanço, já a rotação e a profundidade quase não influenciaram, sendo a rotação o parâmetro que menos influenciou para a análise da média.

Gráfico a)

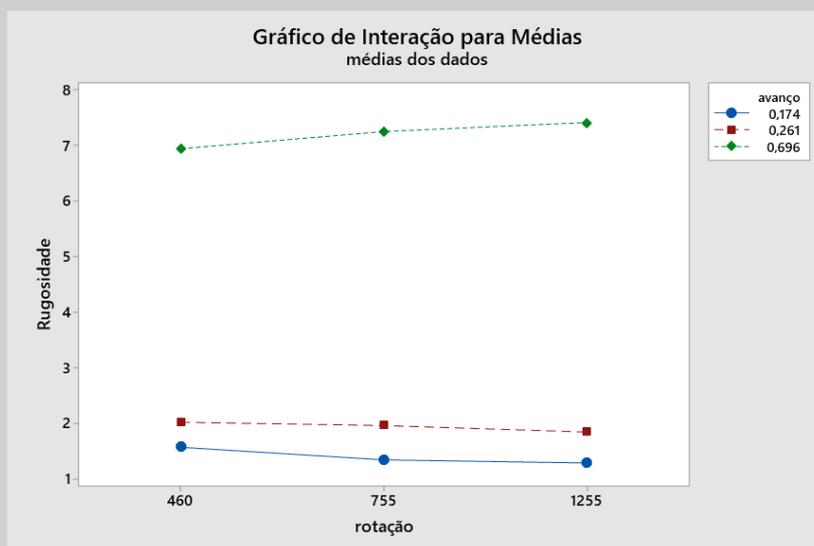


Gráfico b)

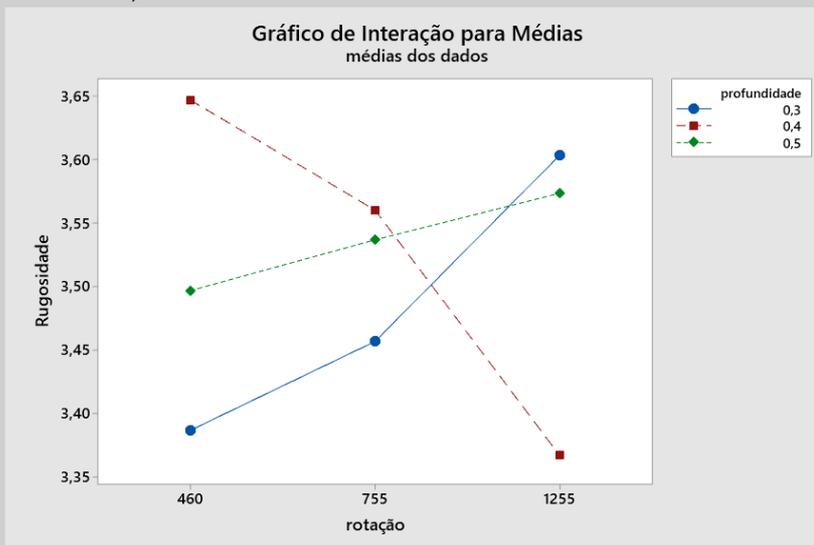


Gráfico c)

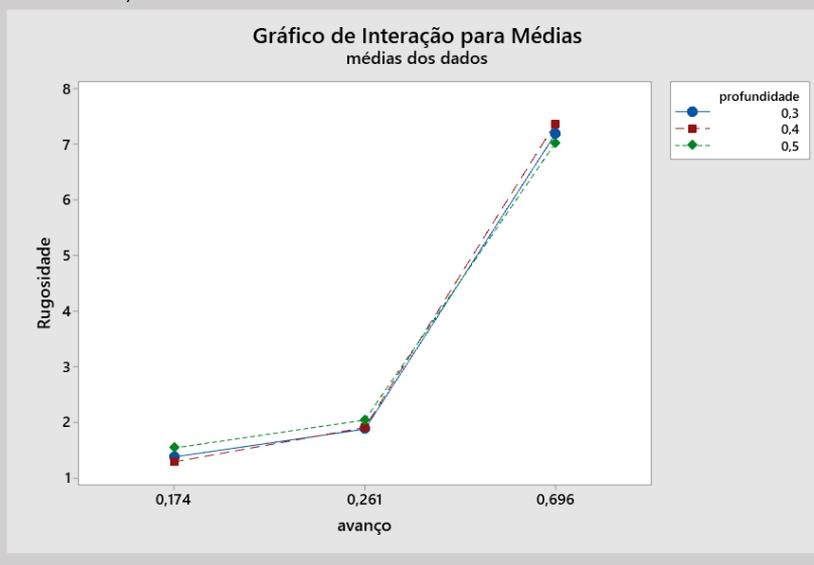


Figura 18 - Efeitos das interações na rugosidade para as médias. Fonte: Próprio autor.

Na figura 18 é possível observar três gráficos ('a', 'b' e 'c') que representam as interações das médias. O gráfico 'a' da interação rotação x avanço e o gráfico 'c' da interação avanço x profundidade demonstram uma grande variação da rugosidade R_a , pois são as interações que mais interferiram no experimento para o comportamento das médias. Já o gráfico 'b' demonstra que a interação rotação x profundidade não teve influência significativa.

As tabelas 6 e 7, a seguir, resumem os gráficos das figuras 17 e 18, respectivamente.

Tabela 6 - Resposta para as médias.

Nível	Rotação	Avanço	Profundidade
1	3,510	1,400	3,482
2	3,518	1,941	3,524
3	3,514	7,201	3,536
Delta	0,008	5,801	0,053
Posto	3	1	2

Fonte: Próprio autor

Nesta tabela a resposta para médias confirma as respectivas influências citadas, sendo delta a estatística que analisa e compara a magnitude relativa dos efeitos de cada nível e posto a posição da influência de cada fator no processo.

Tabela 7 - Tabela de interações para as médias

Interações	Varição R_a (μm)	Posto
Rotação*Avanço	6,127	1
Avanço*Profundidade	6,094	2
Rotação*Profundidade	0,279	3

Fonte: Próprio autor

Na tabela 7 pode-se analisar os efeitos das interações entre os fatores. A interação dos parâmetros rotação x avanço foi que a teve uma influência mais significativa para a variação da rugosidade R_a . Já a interação rotação x profundidade não demonstra uma influência significativa na variação de R_a .

Apesar da análise feita através dos gráficos dos fatores e suas interações, é importante realizar uma análise da ferramenta estatística ANOVA para testar se os resultados obtidos com os gráficos são significativos.

A tabela 8 mostra a ANOVA para a rugosidade R_a em relação à média, realizada com o auxílio do software MINITAB®19 versão estudante:

Tabela 8 - Anova para a rugosidade R_a em relação à média.

Fonte	GL	SQ S_{eq}	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	F	P
Rotação	2	0,000	0,000	0,0001	0,01	0,990
Avanço	2	184,840	184,840	92,4199	6703,39	0,000
Profundidade	2	0,014	0,014	0,0071	0,52	0,615
Rotação*Avanço	4	0,530	0,530	0,1325	9,61	0,004
Rotação*Profundidade	4	0,205	0,205	0,0513	3,72	0,054
Avanço*Profundidade	4	0,311	0,311	0,0778	5,65	0,019
Erro de Resíduos	8	0,110	0,110	0,0138		
Total	26	186,011				

Fonte: Próprio autor

De acordo com a tabela 8, utiliza-se o teste F com o objetivo de proporcionar uma decisão com um nível de confiança relevante para os fatores e as interações.

Ao considerar 95% (noventa e cinco por cento) de confiança, observa-se que o fator avanço é o mais significativo na variação da rugosidade R_a tanto na análise do P_{value} ($p \leq 0,05$) quanto pelo teste F (6703,39). Já para a rotação e a profundidade, não houve influência para P_{value} , enquanto para o teste F a profundidade exerce uma influência maior que a rotação.

Em relação as interações, nota-se que em relação ao P_{value} , as interações rotação x avanço e avanço x profundidade são significantes no processo, assim como no teste F. Para a análise da variância, conclui-se que o avanço e a interação rotação x avanço são os maiores influenciadores para a rugosidade R_a .

4.1.3 Comportamento da rugosidade R_a em relação à razão Sinal-Ruído (S/R)

O comportamento da rugosidade R_a em relação à razão sinal-ruído (S/R) é o mais importante a ser considerado, pois consiste na principal característica do método Taguchi para uma análise de experimentos. O coeficiente de determinação múltipla ajustado (R_{2aj}) encontrado para o método da razão sinal-ruído foi de 0,9976 mostrando a alta confiabilidade no modelo proposto.

Antes de qualquer análise, é importante lembrar que quanto maior a razão sinal-ruído, menor a variabilidade do processo e conseqüentemente melhor o resultado. Foi adotada como base de cálculo para a elaboração dos gráficos, através do software MINITAB®19 versão estudante, a equação MENOR-MELHOR pois o objetivo é reduzir a variável R_a . As figuras 19 e 20 representam esses efeitos:

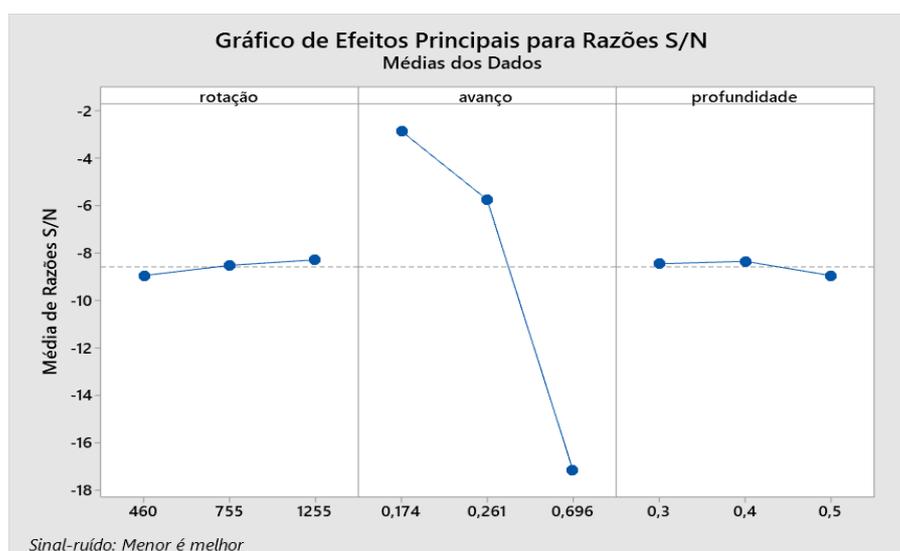


Figura 19 - Efeito dos fatores na rugosidade em relação ao sinal-ruído (S/R). Fonte: Próprio autor

Ao analisar a figura 19, percebe-se que o fator que mais influenciou na rugosidade R_a foi o avanço, já a rotação e a profundidade quase não influenciaram, sendo a profundidade o parâmetro que menos influenciou para a análise da média.

Gráfico d)

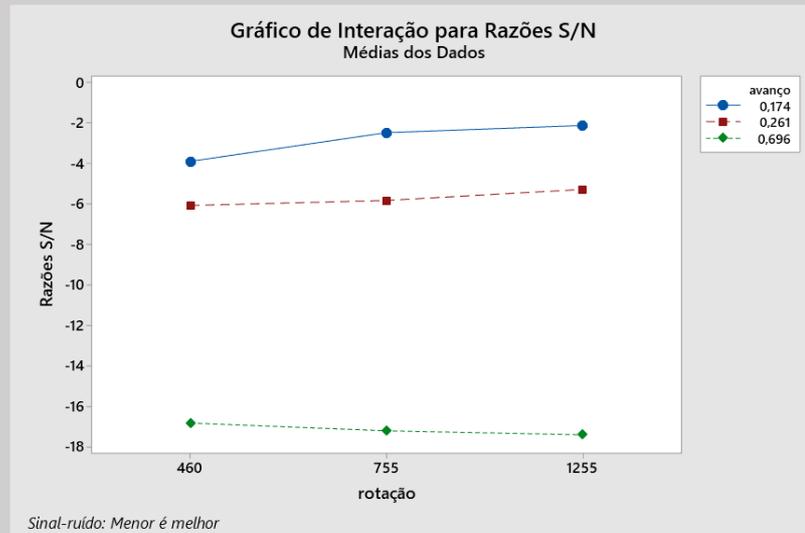


Gráfico e)

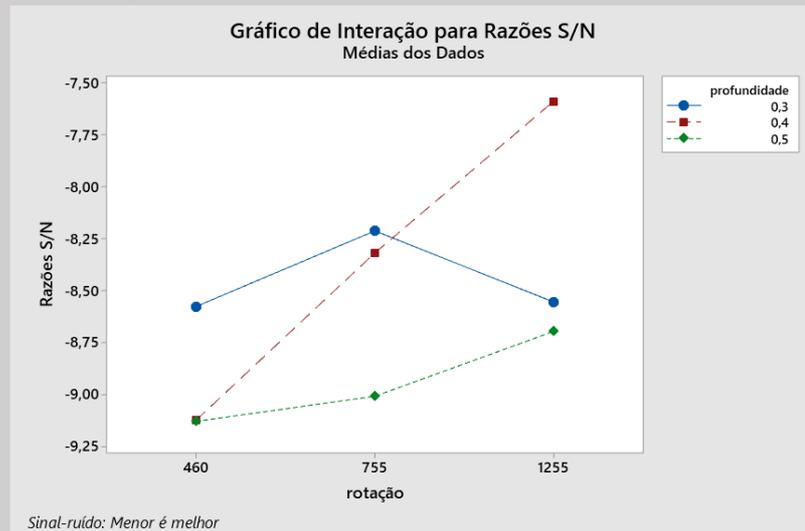


Gráfico f)

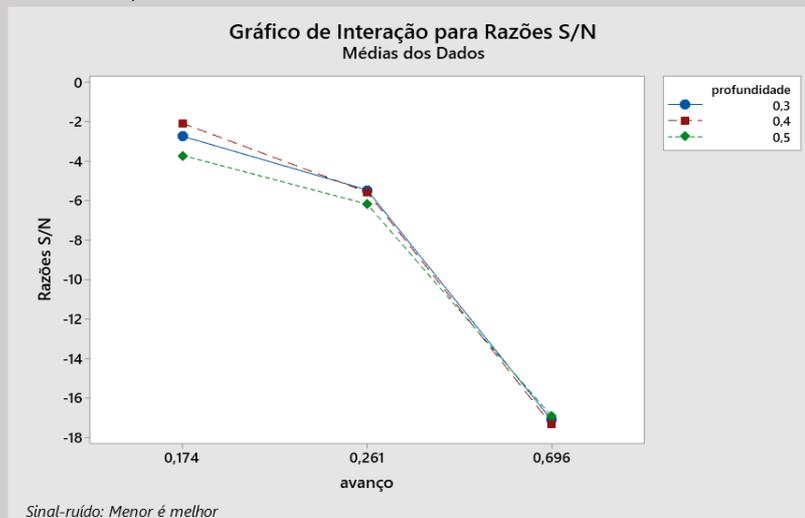


Figura 20 - Efeito das interações na rugosidade em relação ao sinal-ruído (S/R). Fonte: Próprio autor

Na figura 20 é possível observar três gráficos ('d', 'e' e 'f') que representam as interações da razão sinal-ruído. O gráfico 'd' da interação rotação x avanço e o gráfico 'f' da interação avanço x profundidade demonstram uma grande variação da rugosidade R_a , pois são as interações que mais interferiram no experimento para o comportamento da razão sinal-ruído. Já o gráfico 'e' demonstra que a interação rotação x profundidade não teve influência significativa.

As tabelas 9 e 10, a seguir, resumem os gráficos das figuras 19 e 20, respectivamente.

Tabela 9 - Resposta para Razões sinal-ruído: Menor é melhor

Nível	Rotação	Avanço	Profundidade
1	-8,943	-2,852	-8,448
2	-8,513	-5,744	-8,344
3	-8,280	-17,141	-8,945
Delta	0,662	14,288	0,601
Posto	2	1	3

Fonte: Próprio autor.

Nesta tabela a resposta para a razão sinal-ruído confirma as respectivas influências citadas antes citadas.

Tabela 10 - Tabela de interações sinal-ruído (S/R).

Interações	Variação Sinal-ruído (dB)	Posto
Rotação*Avanço	15,254	1
Avanço*Profundidade	15,250	2
Rotação*Profundidade	1,530	3

Fonte: Próprio autor

Na tabela 10 pode-se analisar os efeitos das interações entre os fatores. As interações dos parâmetros rotação x avanço e avanço x profundidade tiveram uma influência significativa, pois apresentaram altas variações das razões sinal-ruído. Já interação rotação x profundidade não exerceu influência significativa para esse método.

A ANOVA foi feita para julgar se os resultados obtidos demonstram uma confiabilidade, estes estão resumidos na tabela 11 obtidos através do software MINITAB®19 versão estudante.

Tabela 11 - ANOVA para a rugosidade Ra em relação a razão sinal-ruído (S/R).

Fonte	GL	SQ S_{eq}	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	F	P
Rotação	2	2,03	2,03	1,016	7,58	0,014
Avanço	2	1027,24	1027,024	513,662	3833,79	0,000
Profundidade	2	1,85	1,85	0,927	6,92	0,018
Rotação*Avanço	4	4,75	4,75	1,188	8,87	0,005
Rotação*Profundidade	4	2,04	2,04	0,511	3,81	0,051
Avanço*Profundidade	4	3,31	3,31	0,829	6,18	0,014
Erro de Resíduos	8	1,07	1,07	0,134		
Total	26	1042,31				

Fonte: Próprio autor.

De acordo com a tabela acima, a análise é realizada observando os valores de F e em relação a P_{value} ($p \leq 0,05$). Para ambos os testes o fator que mais influenciou na variação de R_a foi o avanço. Para o teste F a rotação e a profundidade também influenciaram nos resultados, porém de forma menos significativa. Já para P_{value} , estes fatores influenciaram de maneira significativa, mas a rotação foi mais influente que a profundidade.

Em relação as interações, nota-se que tanto para P_{value} quanto para o teste F as interações rotação x avanço e avanço x profundidade são significantes no processo.

Torna-se importante frisar que ao realizar a ANOVA, a interação rotação x avanço se mostrou mais influente na rugosidade que a interação avanço x profundidade, o que não se obteve antes. As divergências nas influências em relação aos gráficos anteriores se dão por possíveis alterações nos resultados durante a análise experimental, tal como a vibração da máquina. Desta forma, utiliza-se os dados obtidos pela ANOVA como resultados, pois esta é uma ferramenta estatística bastante confiável.

Em relação a análise da variância, conclui-se que o avanço e a interação rotação x avanço são os maiores influenciadores para a rugosidade R_a .

4.1.4 Otimização da rugosidade R_a

A rugosidade é uma medida que necessita ser a menor possível. Portanto, é imprescindível tentar encontrar os parâmetros de corte ideais para otimizar os resultados da rugosidade. Utiliza-se o software MINITAB®19 versão estudante, para obter os parâmetros que vão atender a esse objetivo (figura 21).

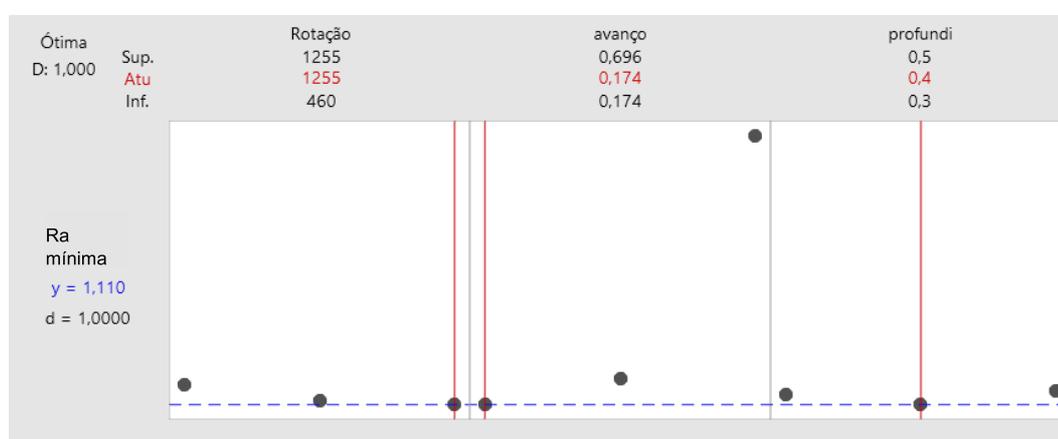


Figura 21 - Parâmetros de otimização da rugosidade R_a . Fonte: Próprio Autor

De acordo com os dados obtidos no gráfico da figura 21, os parâmetros que apresentam o menor valor para a rugosidade são: Rotação = 1255 rpm, avanço = 0,174 mm/volta e profundidade = 0,4mm. O valor encontrado pelo *software* para a rugosidade R_a foi de 1,110 μm . Esse valor é igual ao encontrado no experimento. A confiança é de 95%, isso demonstra alta credibilidade no gráfico gerado.

4.1.5 Comparação do método das médias e da razão Sinal-Ruído (S/R) com o método da Regressão Linear Múltipla

A partir dos resultados obtidos na análise do comportamento das médias e da razão Sinal-Ruído em relação aos parâmetros: rotação, avanço e profundidade de corte, compara-se com os resultados obtidos no Trabalho de Conclusão de Curso “Análise dos parâmetros de corte na rugosidade superficial no torneamento do aço SAE 1045 utilizando a metodologia do planejamento de experimentos (DOE)”. A tabela 12 mostra os níveis e os fatores utilizados no experimento do trabalho citado:

Tabela 12 - Níveis e fatores na regressão linear múltipla.

Parâmetros do Processo	Símbolo	Unidade	Níveis dos Fatores	
-	-	-	-1	1
(A) Rotação	n	rpm	460	1255
(B) Avanço	f	Mm/rot	0,174	0,696
(C) Profundidade de corte	a_p	mm	0,3	0,5

Fonte: [23].

De acordo com a tabela, pode-se observar que os valores utilizados são familiares, pois utiliza-se os mesmos dois níveis e dois fatores utilizados neste trabalho, porém neste trabalho houve a inclusão de mais um fator com os valores de: 755 rpm (rotação), 0,261 mm/volta (avanço) e 0,4mm (profundidade). O planejamento fatorial utilizado no trabalho da regressão linear foi o fatorial 2^3 , isto é, com 2 níveis e 3 fatores e com réplica, logo o número de experimentos foi igual a 16.

A tabela abaixo mostra a variação dos resultados para as médias, para a razão sinal-ruído (S/R) e para o método da regressão linear múltipla em relação aos parâmetros.

Tabela 13 - Comparação entre as médias, a razão sinal-ruído e o método da regressão.

Parâmetros	Varição R_a - Para as médias (μm)	R_a - Razão sinal-ruído (dB)	R_a - Método da Regressão linear múltipla (μm)
Avanço	5,801	14,28	6,220
Rotação	0,008	0,662	0,040
Profundidade	0,053	0,601	0,380
Avanço x Rotação	6,127	15,254	6,200

Fonte: Próprio autor

Com base na tabela, pode-se concluir que o avanço é o fator mais importante na rugosidade R_a para as três análises. A rotação e a profundidade de corte são fatores menos influentes quando comparadas ao avanço. Para os três métodos, os maiores influenciadores para a rugosidade R_a são o avanço e a interação avanço x rotação, o que demonstra uma confiabilidade nos dados gerados.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Nesta seção, com todos os experimentos realizados e resultados obtidos, é possível tirar as seguintes conclusões:

- A metodologia DOE é bastante utilizada e requisitada no universo dos experimentos e foi importante para análise da razão sinal-ruído do método Taguchi.
- O método da razão sinal-ruído Taguchi é bastante válido uma vez que analisa a qualidade da variável resposta e obteve-se como principal influenciador para a rugosidade R_a o avanço, o que comprova a literatura abordada.
- O comportamento das médias é levado em consideração no trabalho pois é um método de comparação bastante aplicado quando se analisa Taguchi.
- O método Taguchi apresenta a vantagem em relação ao comportamento das médias pois utiliza uma equação qualitativa para descrever as variáveis de saída.
- Em comparação ao comportamento das médias, em ambos o avanço foi o fator mais influente para a rugosidade R_a , porém no método Taguchi a rotação influenciou mais que a profundidade.
- A profundidade de corte teve uma influência ligeiramente menor que a rotação para o método Taguchi.
- Em relação as interações dos fatores, a interação que mais influenciou na variação da rugosidade R_a foi a interação rotação x avanço, e a interação que não teve papel significativo foi a interação rotação x profundidade.
- Em relação a comparação com o método da regressão linear múltipla, verificou-se, também, o avanço e a interação rotação x avanço como os maiores influenciadores para a rugosidade R_a .
- A vantagem do método TAGUCHI em relação ao da REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA é a diminuição da quantidade dos experimentos para obtenção dos resultados.

- Para casos de operação de acabamento é necessário trabalhar com o menor avanço possível.
- As diferenças entre alguns resultados se devem a possíveis variações indesejadas no processo, como vibrações da máquina e, também, na realização dos ensaios com maior rotação e avanço.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Aplicar réplica a fim de obter mais dados e conseqüentemente um maior refinamento nos resultados.
- Considerar a vibração da máquina como um fator no experimento a fim de analisar a influência na rugosidade.
- Realizar a aplicação do método da razão sinal-ruído para outros materiais sem ser o aço.
- Avaliar os dados obtidos alterando os valores dos parâmetros utilizados.
- Realizar o experimento com adição de fluidos de corte a fim de investigar a influência na rugosidade utilizando o método Taguchi.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blucher, p. 10, 595 – 609, 1977.

[2] MACHADO A. R.; ABRÃO A. M.; COELHO R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**: 1.ed. São Paulo: Blucher 2, 2009.

[3] **Tolerâncias de acabamento superficial – rugosidade**. Disponível em: <http://moldesinjecaoplasticos.com.br/tolerancias-de-acabamento-superficial-rugosidade>. Acesso em: 10 jul. 2019.

[4] **Rugosidade de uma superfície**. Disponível em: <http://engenheirodemateriais.com.br/2017/02/08/rugosidade-de-uma-superficie>. Acesso em: 11 jul. 2019.

[5] DEVERAS, Andressa Mayara. **Estudo da rugosidade superficial no torneamento do aço AISI 8640 com ferramentas alisadora e convencional**. 2016. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

[6] GEPROS. **Gestão da Produção, Operações e Sistemas**. Bauru, Ano 12, nº 2, abr-jun/2017, p. 141.

[7] NUNES, L. T. **Análise estatística da influência dos parâmetros de corte na rugosidade no torneamento do aço microligado DIN 38MnSiVS5**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

[8] **Tolerâncias de acabamento superficial**. Disponível em: <https://ufpemecanica.files.wordpress.com/2011/07/rugosidade.pdf>. Acesso em: 11 jul. 2019.

[9] **Rugosímetro: como funciona**. Disponível em: <http://blog.instrusul.com.br/rugosimetro-como-funciona>. Acesso em: 12 jul. 2019.

- [10] NETO W. S.; ARENCIBIA R. V.; ARANTES L. J. **Avaliação do efeito da ponta do apalpador na rugosidade Ra, Rq, Rv, Rz, Rt, Rp, Rsk e Rku**. Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia, 2016.
- [10] ARANDA, M. H.; JUNG, C. F.; CATEN, C. S. **Determinação dos parâmetros operacionais de uma inovação tecnológica através da utilização do Design of Experiments – DOE**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.
- [11] JAIN, R. **The Art of Computer Systems Performance Analysis: techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling**. Wiley, 1991.
- [12] GALDAMÉZ, E. V. C. **Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.
- [13] MONTGOMERY, D.C. **Introduction to statistical quality control**, John Wiley and Sons, 5th edition, p. 699, 2001.
- [14] MONTGOMERY, D.C. **Design and analysis of experiments**, John Wiley and Sons, 5th edition, p. 730, 2000.
- [15] ROSS, P. J. **Aplicações das Técnicas Taguchi na Engenharia da Qualidade**. Editora Makron, McGraw-Hill. São Paulo, 1991.
- [16] PIMENTA, C. D.; SILVA, M. B.; RIBEIRO, R. B.; CLARO, F. A. E. **Método Taguchi aplicado na identificação dos fatores causadores da descarbonetação do arame de aço SAE 51B35, durante tratamento térmico de esferoidização**. GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas, Ano 7, nº 2, abr-jun/2012, p. 97-100, UNESP, 2012.

- [17] LOPES, A. A. P. **Uma análise emparelhada entre delineamento de experimentos clássico e de Taguchi**. Trabalho de graduação em Engenharia de Produção. Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 2008.
- [18] REZENDE, B.; SILVEIRA, M.; RUBIO, J. C. C. **Aplicação do método Taguchi na otimização dos parâmetros da operação de furação de um material sanduíche**. IFMG, 2018.
- [19] OZBAY, E.; OZTAS, A.; OZBEBEK, H. **Investigating mix proportions of high strength self compacting concrete by using Taguchi method**. *Construction and building materials*, v.23, p. 694-702, 2009.
- [20] CALADO, V., MONTGOMERY, D.C. **Planejamento de experimentos usando estatística**. Editora E – papers serviços editoriais, p. 260, Rio de Janeiro, 2003.
- [21] MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. **Estatística aplicada e probabilidade pra engenheiros**. 4ª edição, LTC, 2009.
- [22] MATTOS, V. L. D. **Identificação de efeitos de dispersão em experimentos com poucas replicações**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- [23] GABRIEL, L.S. **Análise DOS Parâmetros de corte na rugosidade superficial no torneamento do aço SAE 1045 utilizando a metodologia de planejamento de experimentos (DOE)**. Dissertação (graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Juiz de Fora. 2019.
- [24] JOSSO, Bruno; BURTON, David R.; LALOR, Michael J. **Frequency normalised wavelet transform for surface roughness analysis and characterisation**, 2002.
- [25] Agostinho, O. L., Rodrigues, A. C. S. e Lirani, J., **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**. Edgard Blücher, 1977. 295p

[26] SANTOS, C.; SALES W. F..**Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**, 1o ed. São Paulo; Editora Artiliber Ltda, 2007.

APÊNDICE A – MATRIZ DE EXPERIMENTOS REALIZADOS

Rotação n [rpm]	Avanço f [mm/volta]	Profundidade a_p [mm]	Ra_1	Ra_2	Ra_3	Média Ra
460	0,696	0,30	6,74	6,59	6,95	6,76
460	0,696	0,40	7,57	7,41	7,05	7,34
460	0,696	0,50	6,56	6,89	6,71	6,72
460	0,174	0,30	1,55	1,55	1,48	1,53
460	0,174	0,40	1,53	1,51	1,64	1,56
460	0,174	0,50	1,61	1,68	1,58	1,62
460	0,261	0,30	1,90	1,82	1,90	1,87
460	0,261	0,40	2,08	2,05	2,00	2,04
460	0,261	0,50	2,15	2,15	2,15	2,15
755	0,696	0,30	7,23	7,24	7,26	7,24
755	0,696	0,40	7,44	7,55	7,55	7,51
755	0,696	0,50	7,18	7,23	6,60	7,00
755	0,174	0,30	1,17	1,19	1,43	1,26
755	0,174	0,40	1,19	1,22	1,17	1,19
755	0,174	0,50	1,57	1,59	1,58	1,58
755	0,261	0,30	1,89	1,87	1,85	1,87
755	0,261	0,40	1,95	1,92	2,08	1,98
755	0,261	0,50	2,00	2,05	2,05	2,03
1255	0,696	0,30	7,80	7,47	7,47	7,58
1255	0,696	0,40	7,05	7,46	7,36	7,29
1255	0,696	0,50	7,41	7,37	7,33	7,37
1255	0,174	0,30	1,31	1,33	1,38	1,34
1255	0,174	0,40	1,17	1,11	1,06	1,11
1255	0,174	0,50	1,56	1,43	1,25	1,41
1255	0,261	0,30	1,84	1,94	1,90	1,89
1255	0,261	0,40	1,72	1,71	1,66	1,70
1255	0,261	0,50	1,97	1,92	1,94	1,94

ANEXO 1 – Termo de Autenticidade



UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA

Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia de Produção é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.

Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.

Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral¹ e criminais previstas no Código Penal², além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, 8 de Novembro de 2019.

Marcello Vinícius Veiga Rivello Guedes

Marcello Vinícius Veiga Rivello Guedes – Discente

Matrícula: 201071042 - CPF: 051.429.817-07

¹ LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

² Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena – detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.