



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Mestrado-Doutorado

MODELAGEM E ANÁLISE DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DO AÇO ABNT 1045
TRATADO TERMICAMENTE

Edleusom Saraiva da Silva

Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para obtenção do
Grau de Mestre

JOÃO PESSOA

2017

**MODELAGEM E ANÁLISE DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DO AÇO ABNT 1045
TRATADO TERMICAMENTE**

Dissertação apresentada ao programa de
Pós-graduação em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal da Paraíba, em
cumprimento as exigências para a
obtenção do grau de mestre.

Orientador: Professor Dr. José Hilton Ferreira da Silva

JOÃO PESSOA

2017

S586m Silva, Edleusom Saraiva da.

Modelagem e análise da rugosidade superficial do aço ABNT
1045 tratado termicamente / Edleusom Saraiva da Silva.-
João Pessoa, 2017.
82 f. : il.-

Orientador: Profº. Drº. José Hilton Ferreira da Silva.
Dissertação (Mestrado) – UFPB/CT

1. Usinagem. 2. Rugosidade Superficial. 3. Modelo Matemático
4. Microestrutura. I. Título.

UFPB/BC

CDU: 621(043)

MODELAGEM E ANÁLISE DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DO AÇO ABNT 1045 TRATADO TERMICAMENTE

por

Edleusom Saraiva da Silva

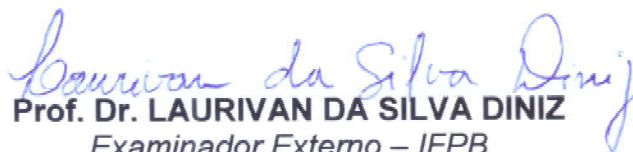
Dissertação aprovada em 12 de abril de 2017



Prof. Dr. JOSÉ HILTON FERREIRA DA SILVA
Orientador – UFPB



Prof. Dr. JOSINALDO PEREIRA LEITE
Examinador Interno - UFPB



Prof. Dr. LAURIVAN DA SILVA DINIZ
Examinador Externo – IFPB

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Antônio Saraiva Neto e Edileusa Saraiva da Silva.
À minha irmã Layanne Saraiva da Silva

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, primeiramente, por sempre ter me dado forças para seguir em frente.

À minha família, que sempre me apoiou e me deu forças para seguir adiante, em especial a meus pais, minha irmã e meus avós Antônio Primo da Silva e Dulcinéa Alves da Silva.

Ao professor José Hilton Ferreira da Silva pelo apoio e orientação durante o andamento do trabalho.

Aos professores Laurivan da Silva Diniz e Romualdo Campos da Fonseca pela ajuda e suporte durante a execução dos experimentos, declaro-me agradecido.

À Rebecca Malzac Pontes pelo apoio incondicional à realização da pesquisa no quesito dos tratamentos térmicos e nos ensaios.

Ao Professor Francisco Augusto Vieira da Silva e a Misael Souto de Oliveira pela ajuda oferecida na parte final do trabalho, minha gratidão.

Aos amigos Daniel Beltrão, José Josimar, Daniel Lira e Júlio César, meu sincero agradecimento.

Agradeço aos responsáveis do Programa CNPq pela concessão da bolsa de estudos que possibilitou a realização deste trabalho de mestrado.

MODELAGEM E ANÁLISE DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL DO AÇO ABNT 1045 TRATADO TERMICAMENTE

RESUMO

Os processos de usinagem são amplamente utilizados no meio industrial e têm como objetivo a alteração das dimensões de uma peça a partir da remoção de material. Atualmente, qualquer aprimoramento que seja realizado na máquina, material, ferramenta ou processo, pode gerar uma redução no custo de fabricação. O acabamento superficial de cada peça fabricada deve ser adequado de acordo com a função que a mesma irá exercer, desse modo, a rugosidade superficial tem uma elevada importância quando as exigências do projeto crescem. Este trabalho tem como objetivo analisar e modelar matematicamente a rugosidade superficial do aço ABNT 1045 sob diferentes estados metalúrgicos. Para a realização dos experimentos o aço foi torneado com ferramentas de metal duro classe P com cobertura. Um planejamento fatorial 2^2 foi utilizado no desenvolvimento dos experimentos. Como variáveis de influência foram analisados o avanço e o raio de ponta da ferramenta; as variáveis de resposta foram os parâmetros de rugosidade superficial R_a e R_T . Um Software comercial foi usado para o desenvolvimento dos modelos matemáticos através do projeto de experimentos (DOE) e para análise de variância (ANOVA) para uma confiança de 95% nos resultados. Os resultados mostraram que o estado metalúrgico da peça tem influência sobre a rugosidade; o comportamento da rugosidade no aço como recebido e no aço normalizado não seguiram o que geralmente é descrito na literatura e que os modelos matemáticos desenvolvidos são promissores para prever e estimar rugosidades superficiais, pois se mostraram mais precisos do que os modelos teóricos obtidos na literatura.

Palavras Chave: Usinagem, rugosidade superficial, modelo matemático, microestrutura.

MODELING AND ANALYSIS OF SURFACE ROUGHNESS OF STEEL ABNT 1045 TREATED THERMICALLY

ABSTRACT

The machining processes are widely used in the industrial environment and aim to change the dimensions of a piece. At present, any improvements made to the machine, material, tool or process can lead to a reduction in manufacturing cost. The surface finish of each manufactured piece must be adequate according to the function that it will exert, thus, the surface roughness is of high importance when the requirements of the project grow. This work aims to analyze and model the surface roughness of ABNT 1045 steel under different metallurgical conditions. For the accomplishment of the experiments the steel was machined with tools of hard metal class P with covering. A factorial design 2^2 was used in the development of the experiments. As influencing variables, the feed, and nose radius of the tool were analyzed; the response variables were the surface roughness parameters R_a and R_T . A commercial software was used for the development of mathematical models through the design of experiments (DOE) and for analysis of variance (ANOVA) for a confidence of 95% in the results. The results showed that the metallurgical state of the part has influence on the roughness; The behavior of the roughness in the steel as received and in the normalized steel did not follow what is generally described in the literature and that the mathematical models developed are promising to predict and estimate surface roughness, since they were more accurate than the theoretical models obtained in the literature.

Keywords: Machining, surface roughness, mathematical models, microstructure.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	II
AGRADECIMENTOS.....	III
RESUMO	IV
ABSTRACT	V
SUMÁRIO.....	VI
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS.....	X
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	2
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1. Introdução.....	3
2.2. Usinagem.....	3
2.3. O Processo de Torneamento.....	3
2.3.1. Parâmetros de Corte na Operação de Torneamento	4
2.3.1.1. Velocidade de Corte (VC).....	4
2.3.1.2. Profundidade de Corte (A_p).....	5
2.3.1.3. Avanço (f)	5
2.3.2. Ferramenta de Corte	5
2.4 Rugosidade	7
2.4.1 Parâmetros de Rugosidade	8
2.4.1.1. Rugosidade Média (R_a).....	8
2.4.1.2. Altura Total do Perfil (R_t).....	9
2.4.1.3. Desvio Médio Quadrático (R_q)	9
2.4.1.4. Altura Máxima do Pico do Perfil (R_p)	10
2.4.1.5. Profundidade Máxima do Vale do Perfil (R_v)	10
2.4.1.6. Altura Máxima do Perfil (R_z)	11
2.4.2. Influência das Variáveis de Usinagem na Rugosidade	11
2.5. Regressão Linear Múltipla	15
2.6. Planejamento Experimental.....	16
2.7 Planejamentos Fatoriais 2^K	17
2.8 Modelagem Matemática no Processo de Usinagem.....	18
3. MATERIAIS E MÉTODOS	20

3.1. Introdução.....	20
3.2. Equipamentos	20
3.2.1 Máquina-ferramenta	20
3.2.2. Ferramentas de Corte	21
3.2.2. Rugosímetro	22
3.3. Material	22
3.4. Planejamento Experimental.....	24
3.4.1. Procedimentos Experimentais	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
4.1. Introdução.....	28
4.2. Microestruturas do Aço ABNT 1045 com e sem Tratamentos Térmicos.....	28
4.3. Ensaio de dureza do aço ABNT 1045 com e sem tratamentos térmicos	31
4.4. Análise dos Parâmetros de Rugosidade Superficial para o Aço ABNT 1045	32
4.4.1. Aço ABNT 1045 Como Recebido	34
4.4.1.1. Rugosidade Ra.....	34
4.4.1.2. Rugosidade Rt	37
4.4.2. Aço ABNT 1045 recozido.....	40
4.4.2.1 Rugosidade Ra.....	40
4.4.2.2. Rugosidade Rt	43
4.4.3. Aço ABNT 1045 normalizado	45
4.4.3.1. Rugosidade Ra.....	45
4.4.3.2 Rugosidade Rt	48
4.4.4 Aço ABNT 1045 Temperado e Revenido	50
4.4.4.1 Rugosidade Ra.....	50
4.4.4.2 Rugosidade Rt	53
4.5. Modelos Matemáticos	55
4.5.1. Modelagem matemática para o aço ABNT 1045 como recebido	55
4.5.2. Modelagem matemática para o aço ABNT 1045 recozido	57
4.5.3. Modelagem matemática para o aço ABNT 1045 normalizado	58
4.5.4. Modelagem matemática para o aço ABNT 1045 temperado e revenido	59
5. CONCLUSÕES.....	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Parâmetros de corte do processo de torneamento, (n) rotação; (f) avanço; (ap) profundidade de corte.....	5
Figura 2.2 – Ângulos e superfícies que compõem uma ferramenta de corte.	6
Figura 2.3 – Princípio de operação de um rugosímetro com apalpador mecânico.	7
Figura 2.4 – Comprimento de avaliação (lm) e comprimento de amostragem (le).	8
Figura 2.5 – Percurso de medição da rugosidade Ra.	9
Figura 2.6 – Parâmetro de rugosidade Rt.....	9
Figura 2.7 – Altura máxima dos picos do perfil.....	10
Figura 2.8 – Profundidade máxima do vale do perfil.....	10
Figura 2.9 – Parâmetro Rz em um perfil de rugosidade.....	11
Figura 2.10 – Perfil teórico de uma peça durante o processo de torneamento.....	12
Figura 3.1 – Torno CNC LOGIC 195III.	20
Figura 3.2 – Insertos ISO DNMG 15 06 04 - PF 4225	21
Figura 3.3 – Insertos ISO VBMT 16 04 08 - PF 4225.....	21
Figura 3.4 – Rugosímetro digital TR200 utilizado nos ensaios.	22
Figura 3.5 – Croqui do corpo de prova utilizado nos experimentos.	23
Figura 3.6 – Corpo de prova desenvolvido para a realização dos experimentos	24
Figura 3.7 – Representação do planejamento experimental utilizado para a avaliação dos parâmetros de rugosidade.....	25
Figura 3.8 – Corpo de prova fixado para a realização dos experimentos	26
Figura 3.9 – Rugosímetro medindo a rugosidade superficial de um corpo de prova usinado.	26
Figura 4.1 – Diagramas temperatura x tempo para cada tratamento térmico.	29
Figura 4.2 – Microestrutura dos aços ABNT 1045: a) como recebido, b) recozido, c) normalizado e d) temperado e revenido.	29
Figura 4.3 – Gráfico dos valores de dureza Rockwell D das amostras.	31
Figura 4.4 – Parâmetro de rugosidade Ra do aço ABNT 1045 nos quatro estados metalúrgicos analisados.	33
Figura 4.5 – Parâmetro de rugosidade Rt do aço ABNT 1045 nos 4 estados metalúrgicos analisados.	34
Figura 4.6 – Superfície de resposta da rugosidade Ra do aço como recebido.	35
Figura 4.7 – Curvas de nível da rugosidade Ra do aço como recebido.	35

Figura 4.8 – Gráfico de Pareto - Correlação f , r_ϵ e interação $f \times r_\epsilon$ com o parâmetro R_a do aço como recebido.	37
Figura 4.9 – Superfície de resposta da rugosidade R_t do aço como recebido.	38
Figura 4.10 – Curvas de nível da rugosidade R_t do aço como recebido.	38
Figura 4.11 – Gráfico de Pareto - Correlação f , r_ϵ e interação $f \times r_\epsilon$ com o parâmetro R_t do aço como recebido.	40
Figura 4.12 – Superfície de resposta da rugosidade R_a do aço recozido.	41
Figura 4.13 – Curvas de nível da rugosidade R_a do aço recozido.	41
Figura 4.14 – Gráfico de Pareto - Correlação f , r_ϵ e interação $f \times r_\epsilon$ com o parâmetro R_a do aço recozido.	42
Figura 4.15 – Curvas de nível da rugosidade R_t do aço recozido.	43
Figura 4.16 – Curvas de nível da rugosidade R_t do aço recozido.	44
Figura 4.17 – Gráfico de Pareto - Correlação f , r_ϵ e interação $f \times r_\epsilon$ com o parâmetro R_t do aço recozido.	45
Figura 4.18 – Superfície de resposta da rugosidade R_a do aço normalizado.	46
Figura 4.19 – Curvas de nível da rugosidade R_a do aço normalizado.	46
Figura 4.20 – Gráfico de Pareto - Correlação f , r_ϵ e interação $f \times r_\epsilon$ com o parâmetro R_a do aço normalizado.	47
Figura 4.21 – Superfície de resposta da rugosidade R_t do aço normalizado.	48
Figura 4.22 – Curvas de nível da rugosidade R_t do aço normalizado.	49
Figura 4.23 – Gráfico de Pareto - Correlação f , r_ϵ e interação $f \times r_\epsilon$ com o parâmetro R_t do aço normalizado.	50
Figura 4.24 – Superfície de resposta da rugosidade R_a do aço temperado e revenido.	51
Figura 4.25 – Curvas de nível da rugosidade R_a do aço temperado e revenido.	51
Figura 4.26 – Gráfico de Pareto - Correlação f , r_ϵ e interação $f \times r_\epsilon$ com o parâmetro R_a do aço temperado e revenido.	52
Figura 4.27 – Superfície de resposta da rugosidade R_t do aço temperado e revenido.	53
Figura 4.28 – Curvas de nível da rugosidade R_t do aço temperado e revenido.	53
Figura 4.29 – Gráfico de Pareto - Correlação f , r_ϵ e interação $f \times r_\epsilon$ com o parâmetro R_t do aço temperado e revenido.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Posicionamento e geometria do Inserto ISO DNMG 15 06 04 - PF 4225.	21
Tabela 3.2 – Posicionamento e geometria do Inserto ISO DNMG 16 04 08 - PF 4225.	22
Tabela 4.1 – Dureza HRD do aço ABNT 1045.....	31
Tabela 4.2 – Parâmetros Ra e Rt médios do aço ABNT 1045 como recebido.	32
Tabela 4.3 – Parâmetros Ra e Rt médios do aço ABNT 1045 recozido.	32
Tabela 4.4 – Parâmetros Ra e Rt médios do aço ABNT 1045 normalizado.	33
Tabela 4.5 – Parâmetros Ra e Rt médios do aço ABNT 1045 temperado e revenido.	33
Tabela 4.6 – ANOVA para o parâmetro Ra do aço ABNT 1045 como recebido.....	36
Tabela 4.7 – ANOVA para o parâmetro Rt do aço ABNT 1045 como recebido.....	39
Tabela 4.8 – ANOVA para o parâmetro Ra do aço ABNT 1045 recozido.....	42
Tabela 4.9 – ANOVA para o parâmetro Rt do aço ABNT 1045 recozido	44
Tabela 4.10 – ANOVA para o parâmetro Ra do aço ABNT 1045 normalizado.....	47
Tabela 4.11 – ANOVA para o parâmetro Rt do aço ABNT 1045 normalizado.	49
Tabela 4.12 – ANOVA para o parâmetro Ra do aço ABNT 1045 temperado e revenido.	52
Tabela 4.13 – ANOVA para o parâmetro Rt do aço ABNT 1045 temperado e revenido.....	54
Tabela 4.14 – Coeficientes de regressão da rugosidade Ra para o aço ABNT 1045 como recebido.	56
Tabela 4.15 – Coeficientes de regressão da rugosidade Rt para o aço ABNT 1045 como recebido.	56
Tabela 4.16 – Coeficientes de regressão da rugosidade Ra para o aço ABNT 1045 recozido.....	57
Tabela 4.17 – Coeficientes de regressão da rugosidade Rt para o aço ABNT 1045 recozido.	57
Tabela 4.18 – Coeficientes de regressão da rugosidade Ra para o aço ABNT 1045 normalizado.....	58
Tabela 4.19 – Coeficientes de regressão da rugosidade Rt para o aço ABNT 1045 normalizado.....	58
Tabela 4.20 – Coeficientes de regressão da rugosidade Ra para o aço ABNT 1045 temperado e revenido.	59
Tabela 4.21 – Coeficientes de regressão da rugosidade Rt para o aço ABNT 1045 temperado e revenido.....	59
Tabela 4.22 – Resultados de Ra e Rt teóricos, modelados e experimentais para o aço ABNT 1045 como recebido.	60

Tabela 4.23 – Resultados de Ra e Rt teóricos, modelados e experimentais para o aço ABNT 1045 recozido.	61
Tabela 4.24 – Resultados de Ra e Rt teóricos, modelados e experimentais para o aço ABNT 1045 normalizado.	61
Tabela 4.25 – Resultados de Ra e Rt teóricos, modelados e experimentais para o aço ABNT 1045 temperado e revenido.	61
Tabela A.1 – Rugosidade superficial para o aço ABNT 1045 como recebido.	68
Tabela A.2 – Rugosidade superficial para o aço ABNT 1045 recozido.	68
Tabela A.3 – Rugosidade superficial para o aço ABNT 1045 normalizado	69
Tabela A.4 – Rugosidade superficial para o aço ABNT 1045 temperado e revenido.	69

LISTA DE SÍMBOLOS

V_c – Velocidade de corte

a_p – Profundidade de corte

f – Avanço

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

m/min – Metros por minuto

mm – Milímetros

mm/volta – Milímetros por volta

mm/min – Milímetros por minuto

R_a – Rugosidade média

R_t – Altura máxima do perfil

r_ϵ - Raio de ponta

APC – Aresta postiça de corte

DOE – Projeto de experimentos

CNC – Comando Numérico Computadorizado

RPM – Rotações por Minuto

ISO – International Organization for Standardization

μm – Micrometros

$\varnothing$ –Diâmetro

χ_r – Ângulo de posição

ϵ_r – Ângulo de ponta da ferramenta

χ_r' – Ângulo de posição da aresta secundária da ferramenta

α – Ângulo de folga da ferramenta

β – Ângulo de cunha

γ – Ângulo de saída

1. INTRODUÇÃO

Atualmente o número de trabalhos relacionados com o estudo da usinagem cresce cada vez mais. As pesquisas realizadas analisam a resposta das variações das ferramentas juntamente com a variação dos parâmetros de usinagem que agem durante o processo. As pesquisas em usinagem possuem como foco principal, o aperfeiçoamento destes processos, através da melhoria da qualidade dos produtos e/ou pela redução do tempo necessário de produção.

Existem diversos parâmetros que interferem no processo de usinagem, no torneamento tem-se: a velocidade de corte (V_c), que é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça, o avanço (f), definido como a distância percorrida pela ferramenta por revolução da peça ou por unidade de tempo, e a profundidade de corte (a_p) que representa a espessura ou profundidade de penetração da ferramenta medida perpendicularmente ao plano de trabalho, que é definido pelas direções de avanço e pela velocidade de corte da ferramenta (DOTTO *et al*, 2014).

A rugosidade pode ser definida como o conjunto de erros microgeométricos, caracterizado pela presença de saliências e reentrâncias na superfície de um componente (ALMEIDA *et al*, 2015).

Diniz *et al* (2014) afirmam que os parâmetros de usinagem que mais influenciam na rugosidade superficial da peça é o avanço da ferramenta e o seu raio de ponta, pois, os mesmos contribuem geometricamente à rugosidade superficial da peça.

Além dos parâmetros de corte descritos anteriormente, a geometria da ferramenta de corte terá influência significativa na qualidade da superfície gerada. Espanhol (2008) afirma que o aumento do ângulo de saída provoca uma diminuição nas ondulações na superfície da peça, o raio de ponta deve ser suficientemente grande para diminuir o efeito das marcas geradas pelo avanço, melhorando assim o acabamento da superfície usinada, o ângulo de posição tem pouca influência na rugosidade, porém, uma redução desse ângulo diminui as marcas do avanço e melhora o escoamento do cavaco, por consequência, o acabamento superficial.

De acordo com Montgomery (2009) um experimento planejado é um teste, ou série de testes, no qual são feitas mudanças propositalmente nas variáveis de entrada de um processo, de modo a podermos observar e identificar mudanças correspondentes na resposta de saída.

A partir de um planejamento experimental é possível definir um modelo matemático capaz de prever o valor das variáveis de saída em qualquer ponto na região experimental original. Devido a isso, diversos pesquisadores utilizam esse tipo de metodologia para a otimização de processos de usinagem, a fim de se obter uma combinação ideal dos parâmetros de usinagem estudados.

A motivação dessa pesquisa resultou em um processo de análise experimental, que tem como finalidade a obtenção da real influência do avanço e do raio de ponta na rugosidade superficial no aço ABNT 1045 com tratamentos térmicos distintos após o processo de torneamento, além da obtenção de um modelo matemático que irá descrever o comportamento da rugosidade com relação aos parâmetros de usinagem estudados.

1.1. Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivos:

- Analisar a influência do avanço e do raio de ponta da ferramenta sobre a rugosidade superficial do aço ABNT 1045 submetido ao processo de torneamento externo;
- Avaliar como o estado metalúrgico da peça, decorrente de tratamentos térmicos, pode influenciar a sua rugosidade superficial;
- Modelar matematicamente os efeitos das variáveis de usinagem e do estado metalúrgico da peça sobre a rugosidade da mesma;
- Comparar os modelos matemáticos desenvolvidos com os modelos descritos na literatura.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Introdução

Neste capítulo é feita uma revisão bibliográfica que irá servir de base para o entendimento de todo o trabalho. Será abordado de uma forma geral o conceito de usinagem e rugosidade, juntamente com os parâmetros envolvidos no processo, além do planejamento fatorial que será realizado a partir dos resultados obtidos nos experimentos.

2.2. Usinagem

Šalak *et al.* (2006) definem usinagem como um processo de corte que envolve operações com ferramentas de geometria definida e não definida, cujo objetivo é conferir dimensões finais, características geométricas, e o acabamento superficial para qual foram projetadas as peças.

Segundo Ferraresi (1970), o processo de usinagem pode ser dividido em processos de corte, processos abrasivos e processos não tradicionais como: químicos, elétricos e ópticos. Dentro dos processos de corte, encontram-se diversas formas de remoção de material, sendo o torneamento, o fresamento e a furação, os mais comuns na indústria metal-mecânica.

Durante a usinagem, o contato entre a ferramenta e a peça ocasiona a retirada de material na forma de cavaco, termo esse que é definido como a porção de material da peça que é removido pela ferramenta, tendo como característica apresentar forma geométrica irregular.

2.3. O Processo de Torneamento

O torneamento é uma das operações de usinagem mais empregadas atualmente na indústria. O material a ser usinado é fixado em uma placa rotativa, enquanto que a ferramenta de corte se move em um plano que contém o eixo rotativo da peça.

Amorim (2002) destaca algumas características que ocorrem no processo de torneamento, são elas:

- O corte normalmente é contínuo;

- O corte pode ser descrito em coordenadas cilíndricas (coordenadas polares para a seção reta da peça em rotação e mais uma coordenada de profundidade para designar o movimento da ferramenta);
- Ocorrem simultaneamente, movimentos da peça e da ferramenta (rotação da peça e translação da ferramenta).

Pode-se classificar as operações de torneamento como de desbaste, nesta operação a peça é usinada com o intuito de se aproximar das características geométricas e dimensionais desejadas, e como torneamento de acabamento, que é posterior ao desbaste, e confere a peça as tolerâncias e dimensões finais (SANTOS, 2008).

2.3.1. Parâmetros de corte na operação de torneamento

Existe uma série de grandezas associadas ao processo de torneamento, elas podem ser grandezas de avanço, de penetração e de corte (SANTOS, 2008). Dentre essas grandezas, existem aquelas que são definidas no torno antes da operação de torneamento, como é o caso do avanço, da profundidade de corte e da rotação. Já a velocidade de corte é obtida através de relações matemáticas.

Diniz *et al.* (2014) e Ferraresi (1970) definem o avanço (f), a profundidade de corte (a_p) e a velocidade de corte (v_c) como sendo as grandezas com maior importância no processo de torneamento.

2.3.1.1. Velocidade de corte (V_c)

Velocidade de corte é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça, para operações do tipo torneamento, fresamento ou furação, onde os movimentos de avanço e de corte ocorrem concomitantemente (DINIZ *et al.*, 2014). No torneamento a velocidade de corte é definida a partir da relação entre o diâmetro da peça (d) que está sendo usinada e a rotação (n) que a mesma se encontra. A velocidade de corte é dada em metros/minuto (m/min) e pode ser obtida de acordo com a Equação 2.1.

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (2.1)$$

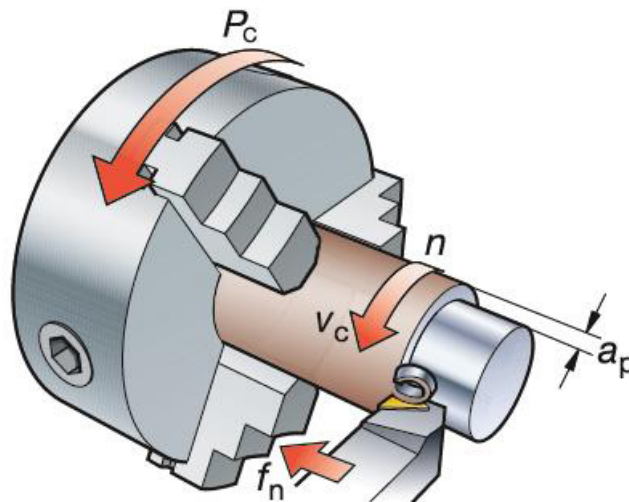
2.3.1.2. Profundidade de corte (a_p)

É a profundidade de penetração da ferramenta em relação à peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho. A unidade da profundidade de corte é dada em milímetros (mm) (DINIZ *et al.*, 2014; FERRARESI, 1970).

2.3.1.3. Avanço (f)

O avanço (f) é o percurso de avanço em cada volta ou em cada curso da ferramenta, sua unidade é dada em milímetro por volta (mm/volta), (DINIZ *et al.*, 2014; FERRARESI, 1970). A Figura 2.1 mostra esquematicamente os parâmetros de usinagem contidos no processo de torneamento.

Figura 2.1 – Parâmetros de corte do processo de torneamento, (n) rotação; (f) avanço; (a_p) profundidade de corte.



Fonte – Sandvik Coromant (2017).

2.3.2. Ferramenta de Corte

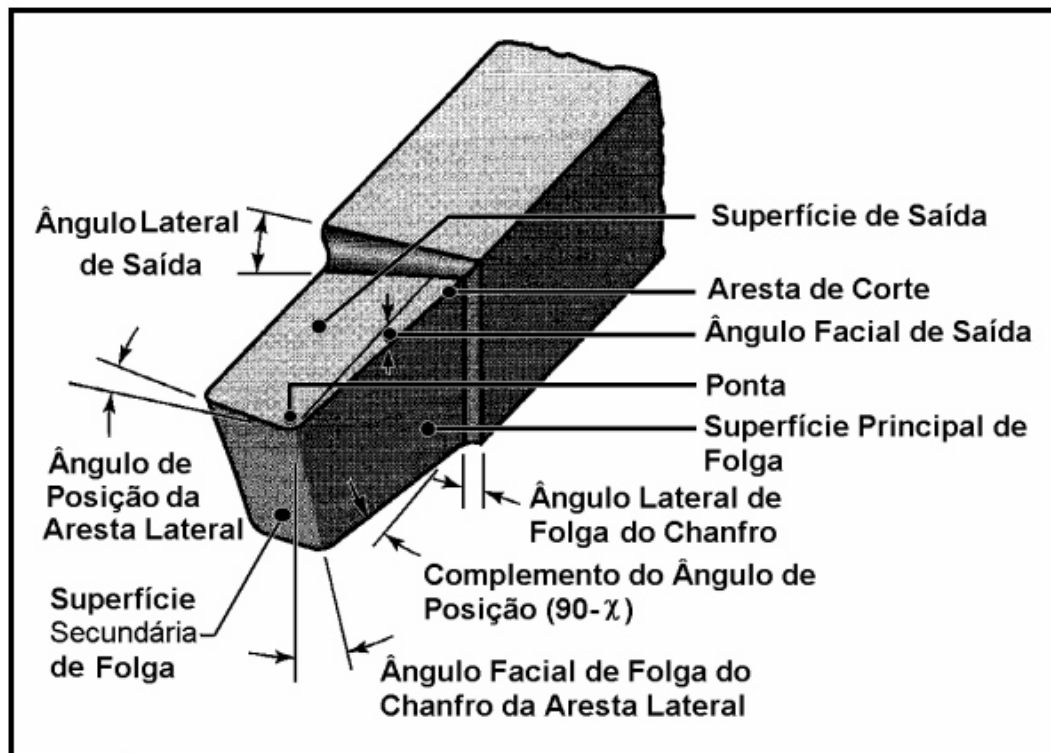
A ferramenta de corte é a principal responsável pela remoção do material da peça na forma de cavaco. Vários pesquisadores (Espanhol, 2008; Reis e Silva, 2001; Bezerra e Machado, 2008; Junior, 2013; Loureiro, 2015; Reis, 2015; Matosinhos *et al.*, 2002; Yen *et al.*, 2004) observaram que o material que compõe a ferramenta, sua geometria e seu

posicionamento no torno podem influenciar no resultado do processo de usinagem, mais especificamente na deformação da peça junto à região de corte e na distribuição das tensões e temperaturas, afetando diretamente o acabamento superficial da peça usinada.

Existe uma grande complexidade nas ferramentas utilizadas no processo de usinagem, devido a grande quantidade de ângulos e superfícies que as mesmas possuem, pois cada superfície que compõe a ferramenta desempenha um papel fundamental no processo de usinagem, juntamente com o material do qual a peça é constituída.

Ferraresi (1970) e Diniz *et al.* (2014) afirmam que esses parâmetros afetam diretamente o processo de corte, estando relacionados com o atrito entre a ferramenta e a peça, o desgaste da ferramenta, a temperatura no processo e a forma de cavaco produzido durante o processo. A Fig. 2.2 ilustra uma ferramenta de corte usada no processo de usinagem dando ênfase nas superfícies e ângulos que a compõem.

Figura 2.2 – Ângulos e superfícies que compõem uma ferramenta de corte.



Fonte - Santos, 2008.

A geometria da ferramenta de corte apresenta-se como uma variável relevante no comportamento do material quando usinado, uma vez que pequenas alterações dimensionais e

nos ângulos resultam em condições distintas quanto ao comportamento do material (SANTOS, 2008).

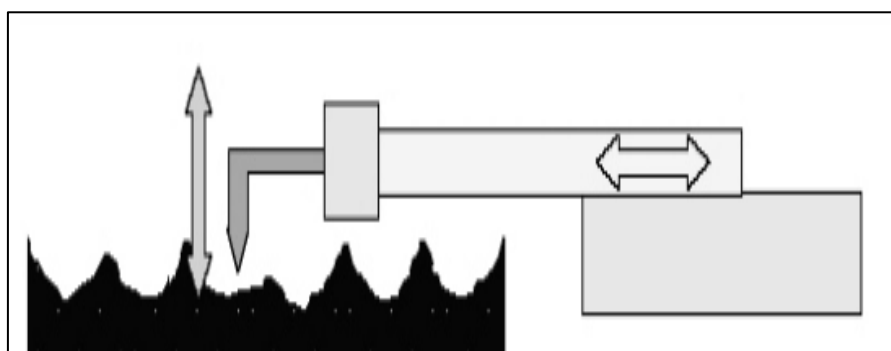
2.4 Rugosidade

Espanhol (2008) afirma que a rugosidade de uma peça é definida a partir das irregularidades finas ou dos erros microgeométricos da ação gerada pelo processo de fabricação. No processo de usinagem especificamente, a rugosidade da peça é causada pelas impressões deixadas pela ferramenta podendo ser quantificada com o auxílio de aparelhos de medição chamados rugosímetro.

Durante a medição da rugosidade, o apalpador do rugosímetro percorre o comprimento de medição seguindo uma trajetória linear com uma velocidade constante.

Segundo Nicola (2008) as saliências contidas na superfície da peça fazem com que o apalpador tenha movimentos verticais, movimentos esses que são convertidos em um sinal elétrico, que é amplificado, filtrado e armazenado na forma de pares de pontos que podem ser expostos graficamente na forma de um perfil de rugosidade que representa a seção da superfície analisada na forma bidimensional. A Fig. 2.3 ilustra o princípio de operação do rugosímetro com apalpador.

Figura 2.3 – Princípio de operação de um rugosímetro com apalpador mecânico.



Fonte - Adaptado de Nicola, 2008.

Os dois tipos de rugosímetros mais utilizados atualmente é o rugosímetro 3D, também chamado de perfilômetro óptico, que efetua as medições de rugosidade a partir de princípios físicos relacionados a luz e o rugosímetro digital descrito anteriormente.

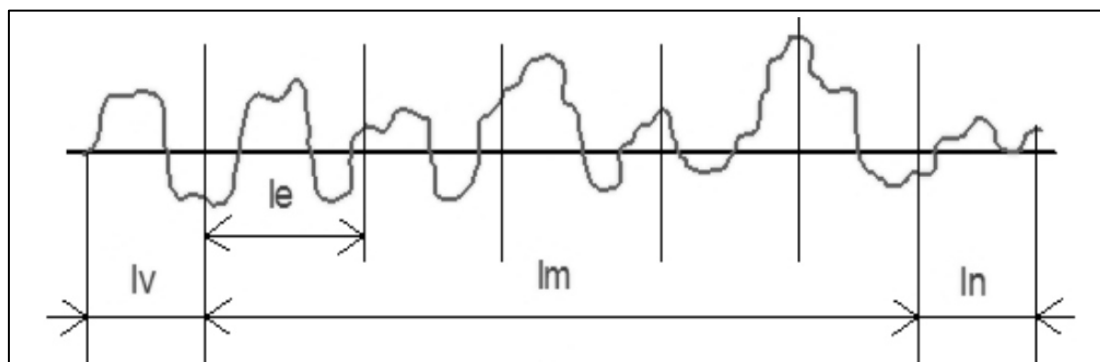
Domingos *et al.* (2014) realizaram a análise metrológica do rugosímetro digital e 3D, os autores encontraram uma incerteza pouco mais de três vezes maior do rugosímetro 3D quando

comparado ao rugosímetro digital, contrariando a ideia de que o rugosímetro 3D teria incertezas menores, já que o mesmo é tecnologicamente mais recente.

2.4.1 Parâmetros de rugosidade

Toma-se o perfil efetivo de uma superfície num comprimento l_m , dado como o comprimento total de avaliação. Chama-se o comprimento l_e de comprimento de amostragem (*cut-off*) conforme a Fig. 2.4 (NICOLA, 2008). Como o perfil apresenta rugosidade e ondulação (l_v e l_n), o comprimento de amostragem filtra a ondulação. O comprimento total de avaliação é igual a cinco vezes o valor do *cut-off*.

Figura 2.4 – Comprimento de avaliação (l_m) e comprimento de amostragem (l_e).



Fonte - Adaptado de Nicola, 2008.

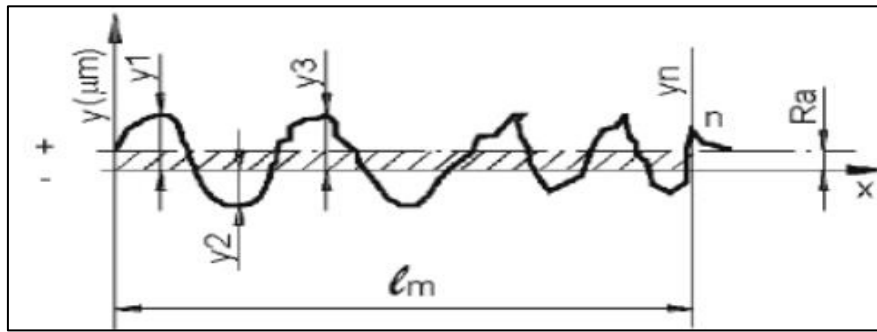
O perfil de rugosidade da superfície de uma peça pode ser avaliado por um conjunto de parâmetros que serão descritos nos tópicos a seguir.

2.4.1.1. Rugosidade Média (R_a)

Este parâmetro é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (DOTTO *et al*, 2014).

Essa grandeza pode corresponder à altura de um retângulo, cuja área é igual a soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento o percurso de medição (ESPANHOL, 2008). A Fig. 2.5 exemplifica o percurso de medição da rugosidade R_a .

Figura 2.5 – Percurso de medição da rugosidade Ra.



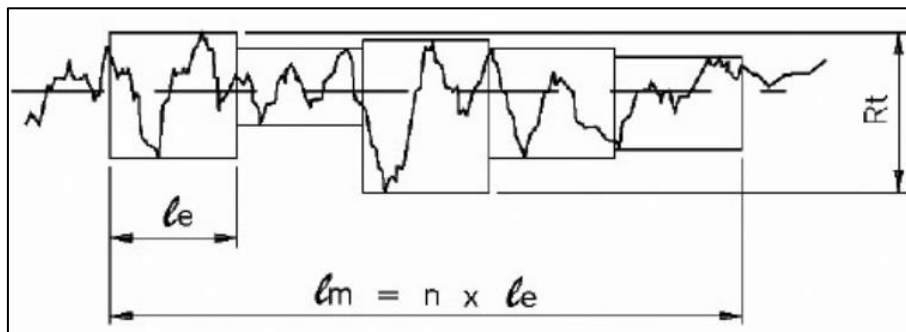
Fonte - Adaptado de Espanhol, 2008.

Diversos autores (Dotto *et al.*, 2014; Amorim, 2002; Ranganath e Vipin, 2014; Singh *et al.*, 2016) utilizaram o parâmetro Ra como foco principal para a análise de seus trabalhos.

2.4.1.2. Altura Total do Perfil (Rt)

Esse parâmetro é definido como a soma das maiores alturas de pico do perfil e das maiores profundidades dos vales do perfil no comprimento de avaliação (ISO 4287). A Figura 2.6 fornece um perfil de rugosidade, frisando o parâmetro Rt.

Figura 2.6 – Parâmetro de rugosidade Rt.



Fonte - Adaptado de Espanhol, 2008.

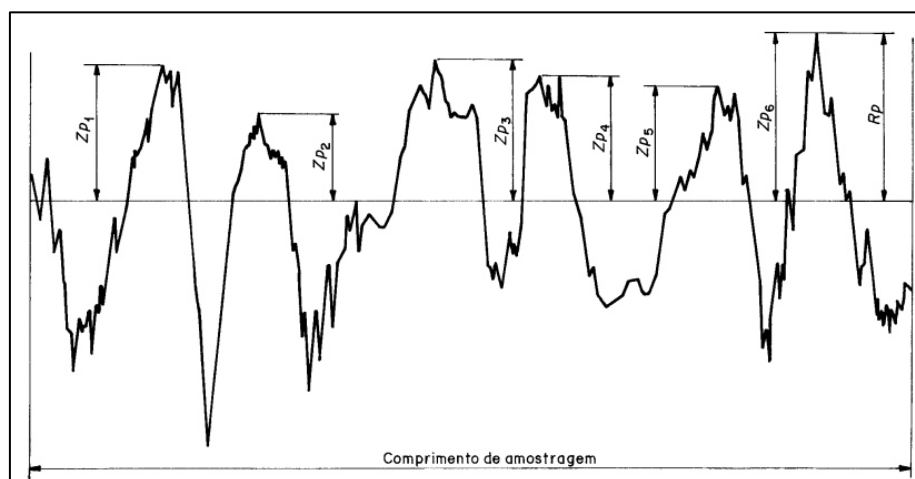
2.4.1.3. Desvio Médio Quadrático (Rq)

Define-se como a raiz quadrada da média dos quadrados das ordenadas do perfil efetivo (medido) em relação à linha média em um comprimento de amostragem. Seu valor é cerca de 11 % maior que o valor medido em Ra, pois a elevação ao quadrado amplifica o efeito das irregularidades (PEREIRA, 2006).

2.4.1.4. Altura Máxima do Pico do Perfil (R_p)

Maior altura dos picos do perfil Z_p do comprimento de amostragem.

Figura 2.7 – Altura máxima dos picos do perfil.

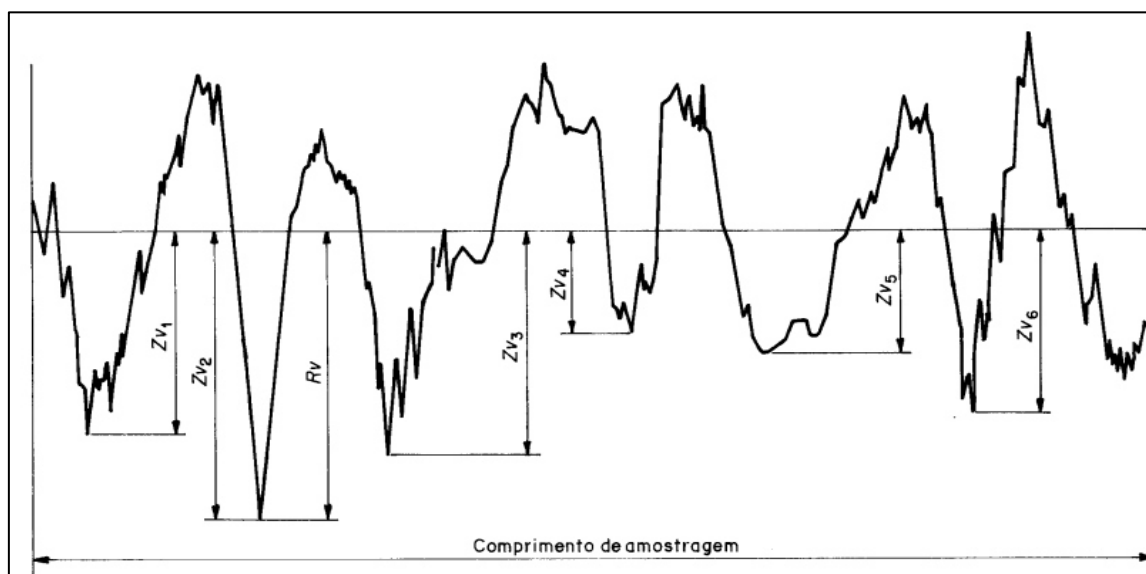


Fonte - ISO 4287/2002.

2.4.1.5. Profundidade Máxima do Vale do Perfil (R_v)

Maior profundidade do vale do perfil no comprimento da amostragem.

Figura 2.8 – Profundidade máxima do vale do perfil.

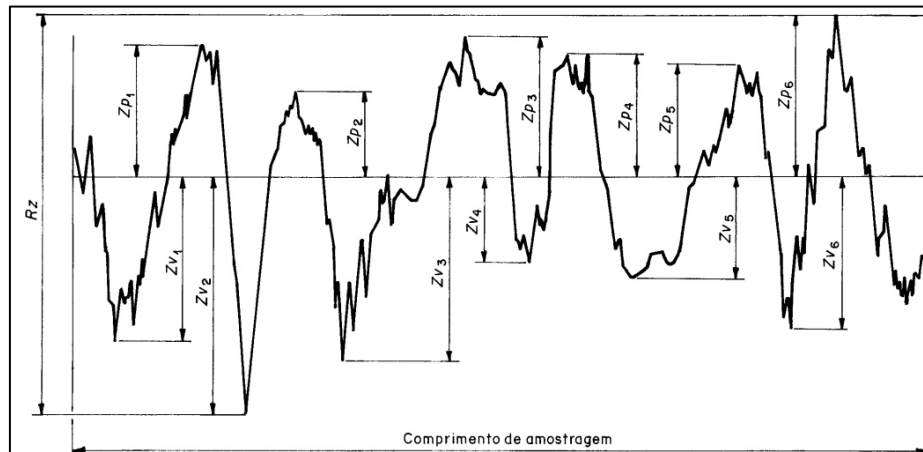


Fonte - ISO 4287/2002.

2.4.1.6. Altura Máxima do Perfil (R_z)

É definido como a distância entre o vale mais profundo e o maior pico existente no comprimento de amostragem. A Figura 2.9 mostra o parâmetro R_z em um perfil de rugosidade.

Figura 2.9 – Parâmetro R_z em um perfil de rugosidade.



Fonte - ISO 4287/2002.

2.4.2. Influência das Variáveis de Usinagem na Rugosidade

As condições de corte empregadas na usinagem podem criar vários perfis e valores para os parâmetros de rugosidade (LOUREIRO, 2015).

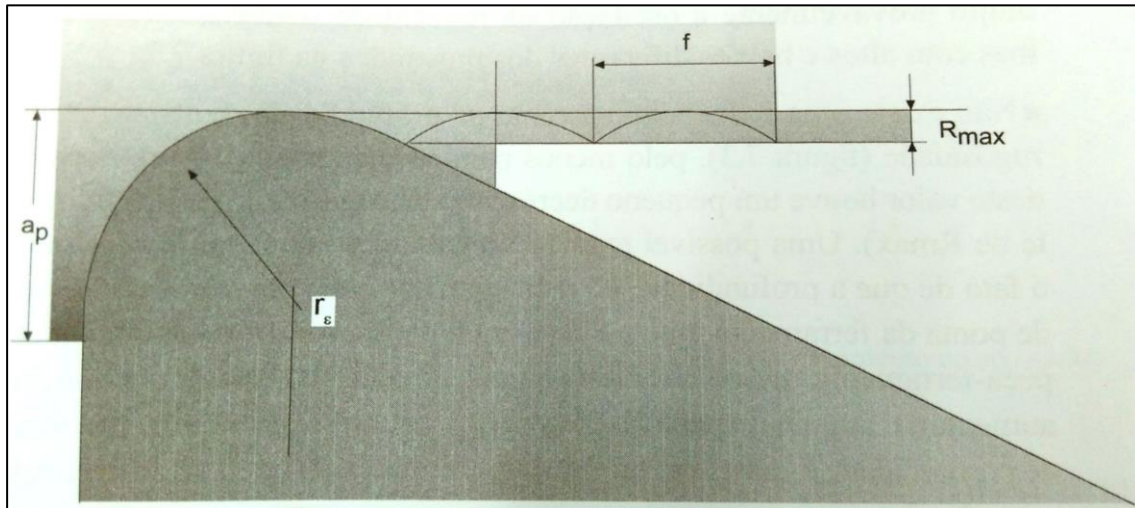
Machado *et al* (2009) afirma que em uma operação de torneamento realizada com uma ferramenta sem desgastes, a rugosidade é teoricamente formada apenas por marcas ou sulcos causados na peça pela ferramenta. A Figura 2.10 explana com mais detalhes a contribuição geométrica da ferramenta à rugosidade superficial da peça, onde f é o avanço, a_p é a profundidade de corte e r_e representa o raio de ponta da ferramenta.

Em um contexto geral, são obtidos os menores valores de rugosidade, quando algumas situações são encontradas, tais como (MACHADO *et al*, 2009):

- A ponta da ferramenta possui um raio de arredondamento;
- Flexões geradas por esforço de corte ou vibrações são pequenas;
- O material da peça é intrinsicamente puro e livre de defeitos superficiais;
- A ferramenta e a peça estão centradas e posicionadas corretamente;

- A usinagem ocorre sem a formação de aresta postiça de corte (APC);
- O eixo principal da máquina operatriz possui adequado alinhamento e as guias não estão desgastadas;
- A aresta de corte está sem desgastes ou danos.

Figura 2.10 – Perfil teórico de uma peça durante o processo de torneamento.



Fonte - Diniz *et al.*, 2014.

Segundo Diniz *et al* (2014), Amorim (2002) e Machado *et al.* (2009), o raio de ponta juntamente com o avanço são os parâmetros com as maiores influências na rugosidade em uma operação de torneamento. Diniz *et al* (2014) e Machado *et al.* (2009), afirmam que em um processo de torneamento em que o avanço é menor que o raio de ponta os valores máximos teóricos de R_t e R_a são calculados pelas equações 2.2 e 2.3 respectivamente.

$$R_{t\text{teor}} = \frac{f^2}{8r_\epsilon} \quad (2.2)$$

$$R_{a\text{teor}} = \frac{f^2}{18\sqrt{3}.r_\epsilon} \quad (2.3)$$

A diminuição da rugosidade com o aumento de r_ϵ é observado, mas até um determinado ponto crítico, já que o aumento da força de usinagem, consequente do aumento do raio de ponta da ferramenta, pode causar vibrações e afetar de forma negativa a rugosidade (AMORIM, 2002; ESPANHOL, 2008).

Normalmente a rugosidade real é maior que a descrita na Figura 2.7. DINIZ *et al.* (2014) afirmam que isso ocorre devido a fatores como vibração, pois um raio de ponta grande, diminui a rugosidade da peça por causa da contribuição geométrica, por outro lado, aumenta a rugosidade devido ao acréscimo da vibração, mesmo assim, o aumento de raio de ponta diminui a rugosidade, mas não como descrito nas Eqs. 2.1 e 2.2.

O acabamento superficial é um dos critérios de análise da qualidade de uma peça fabricada pelo processo de usinagem, devido a isso, diversos pesquisadores analisaram a influência de distintos parâmetros de usinagem na rugosidade superficial de peças submetidas ao processo de usinagem. A seguir segue alguns exemplos de pesquisas que envolveram a rugosidade superficial como fator a ser analisado.

Ranganath e Vipin (2014) realizaram uma investigação experimental e análise paramétrica da rugosidade superficial de uma superfície que passou pelo torneamento CNC usando planejamento experimental. Os principais parâmetros discutidos foram velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, raio de ponta e ângulo de saída. Os experimentos foram desenvolvidos segundo um Planejamento Fatorial (PF) para estudar o impacto de parâmetros de torneamento na rugosidade superficial das peças usinadas. As seguintes conclusões foram apresentadas com base nos resultados obtidos e na análise realizada: o aumento da velocidade de corte melhorou o acabamento superficial, diminuindo assim o valor médio de rugosidade da superfície; o aumento da profundidade de corte afetou negativamente o acabamento superficial numa pequena extensão, mas à medida que a profundidade de corte aumentou a partir de certo valor, a rugosidade diminuiu; um pequeno aumento no avanço causou um grande aumento no acabamento superficial em comparação a mesma quantidade de aumento da profundidade de corte; a rugosidade da superfície também diminuiu à medida que o raio de ponta aumentou. Com o aumento do ângulo de saída a rugosidade da superfície diminuiu e melhorou o acabamento superficial. Por fim os autores concluíram que o avanço foi o fator mais influente, seguido pela profundidade de corte, velocidade de corte, raio de ponta e ângulo de saída.

Vikram e Ratnam (2012) investigaram os parâmetros de usinagem que afetam a rugosidade de superfícies produzidas pelo processo de torneamento a seco utilizando o aço EN8, uma liga de alumínio e uma liga de cobre. Os autores analisaram a influência da velocidade de corte, do avanço e da dureza do material. Os resultados mostraram que o avanço é o fator mais influente na rugosidade superficial, seguido pela velocidade de corte e pela dureza do material.

Nascimento *et al.* (2015) analisaram a influência do raio de ponta e da profundidade de corte na rugosidade superficial da liga aeronáutica AL2011F após o processo de torneamento. Os autores apuraram que o maior raio de ponta resultou em um valor de rugosidade superficial mais baixo, com a maior profundidade de corte foi observado também um aumento nesta variável.

Dotto *et al.* (2014) estudou o efeito da velocidade de corte e da profundidade de corte na rugosidade superficial do aço ABNT 1045 com o intuito de avaliar a relação da rugosidade superficial com os parâmetros de usinagem estudados. Como conclusões do trabalho os autores afirmaram que há uma considerável relação da rugosidade com a velocidade e profundidade de corte, onde, aumentando a rotação e, diminuindo ou encontrando uma profundidade adequada tem-se uma menor rugosidade superficial.

Espanhol (2008) testou diferentes velocidades de corte, além da profundidade de corte e do avanço, com a finalidade de avaliar os efeitos desses parâmetros nos esforços de corte gerados durante os ensaios e na rugosidade superficial da peça usinada.

Kulshreshtha (2013) analisou a velocidade de corte, o avanço e a profundidade de corte na rugosidade superficial da liga de níquel EN 36, o autor observou que avanço causou um aumento nas forças de corte e na vibração do sistema, ocasionando assim um maior nível de rugosidade. O aumento da profundidade de corte ocasionou uma elevação da resistência do material ao corte e consequentemente uma maior amplitude de vibrações no sistema, como consequência, a temperatura de corte aumentou. Com isso, o autor afirma que a qualidade superficial irá piorar com o aumento da profundidade de corte. O aumento da velocidade de corte causou uma melhora na rugosidade superficial. Por fim, Kulshreshtha (2013) afirmou que o avanço foi o parâmetro com maior influência na rugosidade superficial, seguida pela profundidade de corte. A velocidade de corte foi o parâmetro com menor influência no processo.

Chou e Song (2004) investigaram os efeitos do raio de ponta da ferramenta no acabamento do torneamento com ferramentas cerâmicas. Neste estudo, o acabamento superficial, desgaste da ferramenta e as forças de corte e camadas brancas foram avaliados em diferentes condições de usinagem. Os resultados mostram que maiores valores do raio de ponta da ferramenta não só dão um acabamento superficial mais fino, mas também um desgaste considerável da ferramenta em comparação com as ferramentas de menor raio de ponta. A energia de corte específica também aumentou ligeiramente com o raio de ponta da ferramenta.

Mital e Mehta (1988) realizaram um levantamento de modelos de predição de superfície desenvolvidos e fatores que influenciam a rugosidade da superfície. Eles desenvolveram os modelos de acabamento de superfície para liga de alumínio 390, ferro fundido dúctil, aço de liga de carbono médio 4130 e inonel 718 para uma ampla gama de condições de usinagem definidas pela velocidade de corte, avanço e raio de ponta da ferramenta. A análise estatística dos dados experimentais indicaram que o acabamento da superfície é fortemente influenciado pelo tipo do metal, a velocidade de avanço e o raio da ponta da ferramenta. Embora os efeitos do avanço e do raio da ponta da ferramenta no acabamento da superfície fossem geralmente consistentes para todos os materiais.

2.5. Regressão Linear Múltipla

Muitas aplicações da análise de regressão envolvem situações em que há mais de um regressor. Um modelo de regressão que contenha mais de um regressor é chamado de um modelo de regressão múltipla (MONTGOMERY e RUNGER, 2009).

Sassi *et al.* (2011) define a regressão linear múltipla como uma técnica multivariada, cuja finalidade principal é obter uma relação matemática entre uma das variáveis estudadas (variável dependente ou resposta) e o restante das variáveis que descrevem o sistema (variáveis independentes), assim como, reduzir um grande número de variáveis para poucas dimensões com o mínimo de perdas de informação, permitindo a detecção dos principais padrões de similaridade, associação e correlação entre as variáveis. Sua principal aplicação, após encontrar a relação matemática é produzir valores para a variável dependente quando se tem as variáveis independentes.

A inclusão de novas variáveis na equação de ajuste pode ser feita para aumentar o grau de correlação entre os dados teóricos e reais (REIS, 2015).

Geralmente, o relacionamento entre as variáveis dependentes é desconhecido. Desse modo, Paiva (2008) afirma que a primeira etapa da metodologia é achar uma aproximação razoável do relacionamento real entre as respostas (y) e o conjunto de variáveis independentes (x). Se a resposta for bem modelada por uma função linear das variáveis independentes, então a função de aproximação será o modelo de primeira ordem descrito na Eq. 2.4 (MONTGOMERY e RUNGER, 2009; PAIVA, 2008).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (2.4)$$

Os parâmetros β_j , $j = 0, 1, \dots, k$; são os coeficientes de regressão. O modelo descrito acima descreve um hiperplano do espaço K dimensional das variáveis regressoras X_j , quando todos os outros regressores restantes forem mantidos constantes (MONTGOMERY e RUNGER, 2009).

2.6. Planejamento Experimental

Muitos pesquisadores não contam com uma metodologia de planejamento experimental que seja ao mesmo tempo útil e simples, e estes em geral, apresentam dificuldades para escolher um modelo físico-matemático que represente de maneira adequada os fenômenos que se deseja estudar (CUNICO *et al.*, 2008).

Um experimento planejado é um teste, ou série de testes, no qual são feitas mudanças propositalmente nas variáveis de entrada de um processo, de modo a podermos observar e identificar mudanças correspondentes na resposta de saída (MONTGOMERY, 2009).

A grande maioria dos experimentos que tem por objetivo a melhoria de um processo envolve um determinado número de variáveis distintas, nesses casos os planejamentos experimentais fatoriais são os mais indicados quando se desejam possíveis melhorias no processo em análise.

Existem diversas vantagens na utilização do planejamento fatorial, Montgomery e Runger (2011) destacam principalmente:

- Redução do número de ensaios sem prejuízo da qualidade da informação;
- Estudo simultâneo de diversas variáveis, separando seus efeitos;
- Determinação da confiabilidade dos resultados;
- Realização da pesquisa em etapas, num processo iterativo de acréscimo de novos ensaios;
- Seleção das variáveis que influenciam um processo com número reduzido de ensaios;
- Representação do processo estudado através de expressões matemáticas;
- Elaboração de conclusões a partir de resultados qualitativos.

A execução dos experimentos de acordo com o planejado, detectar, documentar e analisar as variações que ocorrerão na condução experimental são fatores preponderantes para o sucesso no estudo.

Após a execução dos experimentos, é necessário a análise dos resultados usando um método estatístico adequado para que seja possível estimar os efeitos dos fatores que foram incluídos no modelo experimental. Por fim, a interpretação dos dados é de fundamental importância para as melhorias do processo em questão.

Para que seja possível a execução dos experimentos, Paiva (2004, 2008) definem que existem três estratégias que podem ser adotadas ou combinadas antes das realizações dos experimentos, são elas:

➤ **Réplicas** – Quando um experimento é repetido n vezes, um conjunto de fatores está sendo aplicado em uma unidade experimental, criando-se uma variação para a variável de resposta que pode ser utilizada para se avaliar a significância estatística do incremento experimental;

➤ **Aleatorização** – Quando um experimento é aleatorizado, a sua validade é aumentada devido ao aumento da chance dos efeitos desconhecidos serem distribuídos através dos níveis dos fatores analisados. A aleatorização garante que o resultado do experimento seja independente da ordem na qual ele foi executado.

➤ **Blocagem** – Quando não for possível manter a homogeneidade das condições experimentais, deve-se empregar a blocagem. Esta técnica estatística permite avaliar se a falta de homogeneidade interfere nos resultados. Um bloco consiste de uma parte do experimento completo, que se presume ser mais uniforme do que o todo.

Uma vez selecionados os fatores e seus respectivos níveis, passa-se à fase de execução dos experimentos. Como todos os fatores podem ser alterados simultaneamente, existem diversas maneiras de combiná-los (PAIVA, 2004, 2008).

2.7 Planejamentos Fatoriais 2^K

Planejamentos fatoriais são frequentemente usados nos experimentos envolvendo vários fatores em que é necessário estudar o efeito conjunto dos mesmos sobre uma resposta. Entretanto, vários casos especiais do planejamento fatorial, em geral são importantes pelo fato de serem largamente empregados em trabalhos de pesquisa, e devido ao fato de formarem a base de outros planejamentos de considerável valor prático (MONTGOMERY e RUNGER, 2009).

Segundo Montgomery e Runger (2009) e Paiva (2008), o planejamento fatorial mais amplamente utilizado é aquele com K fatores, em particular os fatoriais em dois níveis. O número de experimentos (N) que é necessário para a avaliação dos K fatores é definido por $N=2^K$.

Os estudos dos processos de usinagem possuem natureza complexa por apresentarem inúmeros parâmetros influentes e variáveis de saída essenciais para caracterizar o processo (LIMA *et al.*, 2013). A aplicação de um planejamento experimental apresenta-se viável por minimizar o número de ensaios experimentais necessários para modelagem e otimização do processo. Com base nessas informações, diversos autores estudam o processo de usinagem a partir de um planejamento experimental, a fim de verificar um ou mais parâmetros de respostas com relação a variação de parâmetros de usinagem.

Gosai e Bhavsar (2016) analisaram a temperatura gerada durante o processo de usinagem, onde os parâmetros que foram variados propositalmente foram a velocidade de corte, a profundidade de corte e o avanço. Os autores utilizaram um planejamento experimental 2^3 , onde cada variável de influência foi variada em três níveis.

Lima *et al.* (2012) estudaram o efeito da profundidade de corte e do avanço por dente na força de corte do fresamento de faceamento, os autores utilizaram um planejamento fatorial 2^2 com uma réplica por experimento de forma aleatória.

2.8 Modelagem Matemática no Processo de Usinagem

Como foi visto durante o trabalho, o processo de usinagem envolve um grande número de variáveis e parâmetros. O estudo da rugosidade superficial de uma peça submetida ao processo de torneamento pode levar em conta a influência de diversos fatores que envolvem o processo de usinagem. Na análise convencional da influência destes fatores num processo de usinagem, geralmente é estudada a influência de cada um deles isoladamente, o que demanda um grande número de ensaios, elevado consumo de material de usinagem e ferramentas, além da necessidade de utilização de muitas horas-máquina, o que em geral torna os custos com a experimentação inviáveis. Dentro destes aspectos, a preocupação em atuar simultaneamente sobre a qualidade e o custo de cada processo obriga as empresas a usarem técnicas não triviais de planejamento e melhoria da qualidade (CAMPOS, 2011).

Para a obtenção das características desejadas em um procedimento industrial, muitos processos tem utilizado a modelagem experimental como meio de se obter níveis satisfatórios na resposta do processo em análise. Os modelos matemáticos podem ser obtidos através da

observação da resposta de experimentos planejados. Um experimento planejado é um teste ou uma série de testes, no qual são feitas mudanças propositalmente nas variáveis de entrada de um processo, de modo a podermos observar e identificar mudanças correspondentes na resposta de saída (MONTGOMERY, 2009).

Campos *et al* (2011) realizaram a modelagem matemática de R_a e R_t no torneamento duro com cerâmica mista alisadora utilizando projetos de experimentos (DOE). Durante o trabalho os autores analisaram a influência do avanço, da profundidade e da velocidade de corte do aço ABNT 52100 endurecido. As conclusões finais do trabalho mostraram que o avanço foi o fator que mais influenciou na rugosidade R_a , seguido pela velocidade de corte e pela interação dos três parâmetros de usinagem. Na rugosidade R_t o fator que mais influenciou foi o avanço. Por fim, os autores apresentaram os modelos matemáticos que apresentam uma análise de variância de segunda ordem obtida através de um projeto de experimentos com composto central.

Singh *et al.* (2016) analisaram o efeito das condições de corte (avanço, velocidade e profundidade de corte) além do raio de ponta na rugosidade superficial do alumínio (6061) que passou pelo processo de torneamento a seco. Por fim os autores identificaram que o raio de ponta foi o parâmetro mais significativo, sendo que o valor da rugosidade superficial diminuiu com o aumento do raio de ponta. Os autores afirmaram que o modelo matemático obtido é estatisticamente significativo para todos os parâmetros analisados, podendo ser utilizado para futuras análises ou para prever resultados dentro do intervalo de valores estudados.

Pode-se concluir que, os modelos matemáticos tem um papel fundamental no que diz respeito à análise de um processo que envolve um grande número de variáveis como por exemplo, os processos de usinagem.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Introdução

Este capítulo apresenta os materiais, equipamentos e metodologia utilizados na execução dos ensaios experimentais, além de todos os procedimentos que foram necessários para a realização dos mesmos. O foco principal desse capítulo é descrever os procedimentos, com a finalidade de facilitar o entendimento dos métodos experimentais utilizados no trabalho, possibilitar a repetição ou reprodução dos experimentos descritos por qualquer interessado, além de dar credibilidade aos resultados obtidos durante os experimentos.

3.2. Equipamentos

3.2.1 Máquina-ferramenta

Os ensaios experimentais foram realizados em um torno CNC modelo LOGIC 195 III, conforme mostrado na Fig. 3.1. O LOGIC III é um torno CNC com operação em dois eixos, tendo 7,5 KW de potência em seu motor principal; o mesmo pode trabalhar em uma faixa de velocidades entre 21 a 3500 RPM.

Figura 3.1 – Torno CNC LOGIC 195III.



Fonte – Autoria própria.

3.2.2. Ferramentas de Corte

Na execução dos experimentos foram utilizados dois insertos de metal duro classe P com cobertura (CVD $\text{Ti}(\text{C},\text{N})+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$) em formato de losango. Ambas as ferramentas possuem quebra-cavacos em sua geometria.

O inserto ISO DNMG 15 06 04 - PF 4225 está mostrado na Fig. 3.2.

A Tabela 3.1 apresenta o posicionamento e a geometria do inserto.

Figura 3.2 – Insertos ISO DNMG 15 06 04 - PF 4225.



Fonte – Sandvik Coromant, 2017.

Tabela 3.1 – Posicionamento e geometria do Inserto ISO DNMG 15 06 04 - PF 4225.

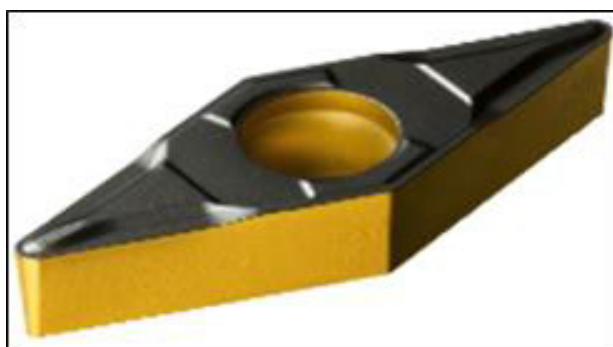
χ_r	ϵ_r	χ_r'	α	β	γ	r_ϵ
93°	55°	32°	0°	$> 90^\circ$	negativo	0,4 mm

Fonte – Sandvik Coromant (2017).

O inserto ISO VBMT 16 04 08 - PF 4225 está mostrado na Fig. 3.3.

A Tabela 3.2 apresenta o posicionamento e a geometria do inserto.

Figura 3.3 – Insertos ISO VBMT 16 04 08 - PF 4225.



Fonte – Sandvik Coromant, 2017

Tabela 3.2 – Posicionamento e geometria do Inserto ISO DNMG 16 04 08 - PF 4225.

χ_r	ϵ_r	χ_r'	α	β	γ	r_ϵ
93°	35°	52°	5°	< 90°	positivo	0,8 mm

Fonte – Sandvik Coromant (2017).

As ferramentas foram escolhidas com essas configurações com o intuito de avaliar os efeitos que a variação do raio de ponta irá causar na rugosidade superficial dos corpos de prova analisados.

3.2.2. Rugosímetro

Para que fosse possível a aquisição dos valores dos parâmetros de rugosidade superficial avaliados, foi utilizado um rugosímetro digital modelo TR 200, como pode ser observado na Fig. 3.4. O rugosímetro possui filtro digital de ondulação, que pode trabalhar com um *cut-off* de 0,25 mm, 0,8 mm e 2,5 mm com uma resolução de 0,001 μm .

Figura 3.4 – Rugosímetro digital TR200 utilizado nos ensaios.



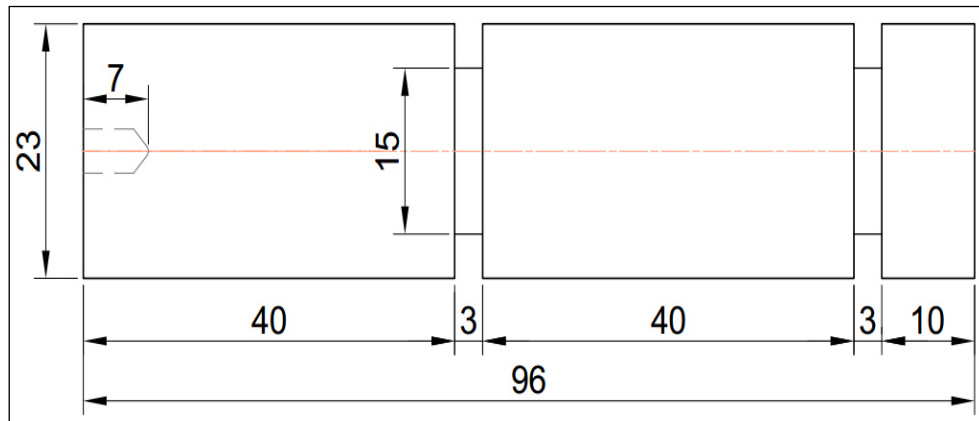
Fonte – Autoria própria.

3.3. Material

O aço ABNT 1045 foi selecionado para a realização dos trabalhos, tendo em vista que o mesmo já é bastante difundido no mercado atual, sendo amplamente utilizado na fabricação

de componentes de uso geral onde é necessária uma resistência mecânica superior a dos aços de baixo carbono convencionais. O corpo de prova utilizado pode ser visto na Fig. 3.5. É possível ver todas as dimensões iniciais dos corpos de prova.

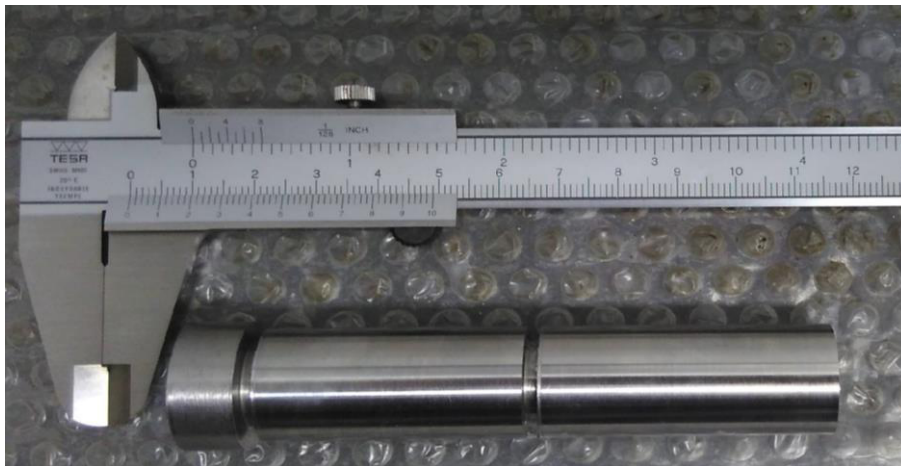
Figura 3.5 – Croqui do corpo de prova utilizado nos experimentos.



Fonte – Autoria própria.

Inicialmente os corpos de prova tinham as dimensões $\varnothing 23 \times 96$ mm, sendo que a cada 40 mm existe um canal com 3 mm de espessura e 8 mm de profundidade, esses canais servem para diferenciar os dois ensaios realizados no mesmo corpo de prova, pois, quando a usinagem chegar no primeiro canal, os parâmetros de corte irão mudar de acordo com o planejamento experimental utilizado e assim tornar o desenvolvimento experimental mais objetivo e econômico. Segundo Junior (2013), o não uso dos canais no corpo de prova, podem gerar rebarbas que podem causar danos na ferramenta e na peça, fazendo com que desse modo os resultados da rugosidade obtidos possam ser afetados. A Figura 3.6 apresenta um corpo de prova utilizado nos ensaios.

Figura 3.6 – Corpo de prova desenvolvido para a realização dos experimentos.



Fonte – Autoria própria.

3.4. Planejamento Experimental

Como foco principal deste trabalho, foi decidido realizar o estudo dos efeitos do avanço e do raio de ponta da ferramenta sobre os parâmetros de rugosidade R_a e R_t no aço ABNT 1045 como recebido e com o tratamento térmico da normalização, do recozimento e da têmpera.

Dentre todos os parâmetros de rugosidade, o parâmetro R_a foi selecionado para análise devido ao mesmo ser bastante empregado em controles continuados em linhas de produção para avaliação da rugosidade em superfícies que apresentem sulcos bem definidos, sendo peças torneadas exemplos clássicos (AMORIM, 2002).

Além da rugosidade R_a , o comportamento da rugosidade R_t também será estudada, pois, Diniz et al. (2014) afirma que o valor de R_t em uma peça que passou pelo processo de torneamento, depende principalmente do avanço e do raio de ponta da ferramenta.

Os parâmetros de corte foram definidos com base nas recomendações do fabricante e também no que o torno CNC poderia nos oferecer. Com isso a velocidade de corte em 200 m/min e a profundidade de corte em 0,5 mm foram fixadas para todos os ensaios.

Para o desenvolvimento experimental, foi utilizado um planejamento fatorial $2^2 \times 4^1$. As variáveis de entrada foram:

- Raio de ponta da ferramenta (r_e): $r_e = 0,4$ mm e $r_e = 0,8$ mm;
- Avanço (f) : $f = 0,075$ mm/volta e $f = 0,125$ mm/volta;

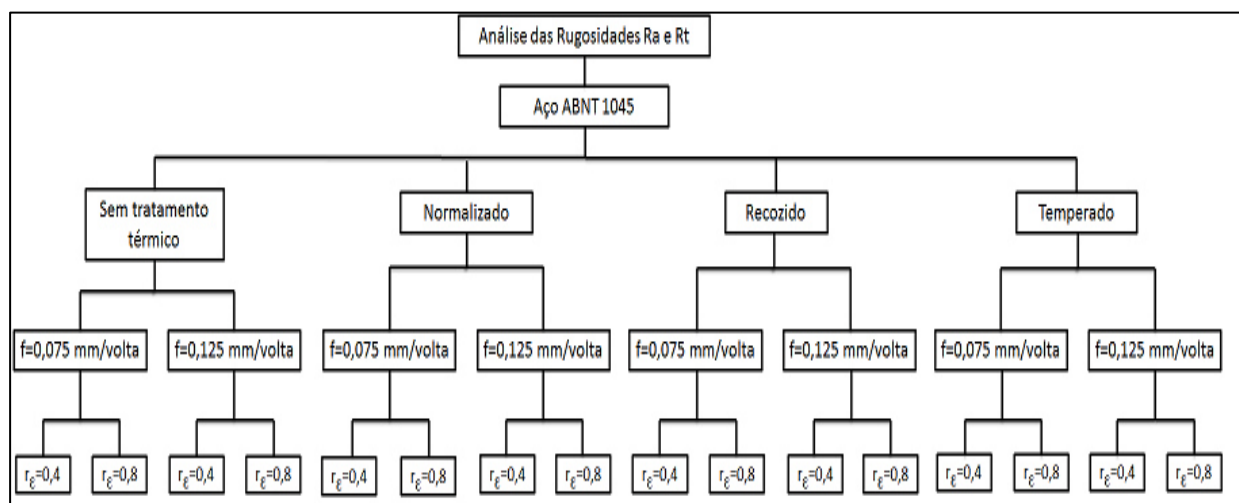
- Aço ABNT 1045: na condição como recebido, como fornecido pelo fabricante e após os tratamentos térmicos de recozimento, normalização e têmpera.

Como variáveis de respostas foram analisados os parâmetros de rugosidades Ra e Rt.

Foram realizadas 3 (três) réplicas de cada condição experimental, totalizando 48 ensaios. Para cada repetição dos ensaios foi utilizada uma nova aresta de corte.

As variáveis de usinagem avanço e o raio de ponta foram selecionadas por serem os parâmetros que mais influenciam na rugosidade superficial da peça (Diniz *et al.*, 2014 e Machado *et al.* 2004). A Figura 3.7 ilustra um fluxograma com o planejamento experimental.

Figura 3.7 – Representação do planejamento experimental utilizado para a avaliação dos parâmetros de rugosidade.



Fonte – Autoria própria.

3.4.1. Procedimentos Experimentais

O procedimento adotado na execução dos experimentos foi o mesmo para todas as condições definidas. Durante o processo de torneamento, foi utilizado fluido de corte.

Antes da execução de cada ensaio, o corpo de prova era fixado na placa do torno, em seguida utilizou-se uma contra ponta para ser ter uma maior rigidez da peça e minimizar possíveis deflexões e vibrações que pudessem ocorrer durante a operação de torneamento. A Figura 3.8 mostra o corpo de prova fixado no torno CNC.

Figura 3.8 – Corpo de prova fixado para a realização dos experimentos.



Fonte – Autoria própria.

Durante os experimentos, cada corpo de prova era usinado utilizando duas combinações de variáveis de entrada (avanço e raio de ponta), na qual, essa combinação era alterada quando o torneamento passava de um lado para outro do canal situado na peça.

No final de cada bateria de ensaios, os corpos de prova tiveram sua rugosidade superficial medida como mostrado na Fig. 3.9. Para a coleta de dados, o rugosímetro foi configurado para trabalhar com um *cut-off* de 0,8mm seguindo a norma ISO. Cada medição foi realizada três vezes, sendo que a cada verificação o eixo era girado em 120°, fazendo com que a coleta fosse realizada em três pontos distintos. O resultado final foi a média aritmética das três medições efetuadas.

Figura 3.9 – Rugosímetro medindo a rugosidade superficial de um corpo de prova usinado.



Fonte – Autoria própria.

Como foi utilizado um torno CNC durante os ensaios, após a análise da rugosidade, os mesmos corpos de prova foram novamente submetidos ao processo de torneamento, pois, o torno CNC é capaz de conservar os parâmetros de usinagem (V_c e f), mesmo que os corpos de prova tenham tido alterações em suas dimensões.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Introdução

Neste capítulo estão apresentados os resultados do desenvolvimento experimental. São analisados e discutidos: microestrutura e dureza do Aço ABNT 1045 antes e após os tratamentos térmicos; os parâmetros de rugosidade Ra e Rt em função do avanço, do raio de ponta da ferramenta e do estado metalúrgico da peça. Os resultados são fornecidos na forma de imagens, tabelas e gráficos. Um software comercial é utilizado para análise estatística dos resultados e desenvolvimentos dos modelos matemáticos.

4.2. Microestruturas do Aço ABNT 1045 com e sem Tratamentos Térmicos

O aço ABNT 1045 foi submetido a três tratamentos térmicos: recozimento, normalização e têmpera.

Para a realização do tratamento, os corpos de prova foram aquecidos e mantidos no forno modelo JUNG 0912 a 870°C, temperatura suficientemente alta para a completa austenitização destes, e deixados nessa temperatura por 1 hora e dez minutos.

Chiaverini (1986) recomenda que, para que ocorra a completa homogeneização da estrutura do material, o mesmo deve ser mantido à temperatura de austenitização por ao menos 1 hora para cada polegada de diâmetro da seção transversal.

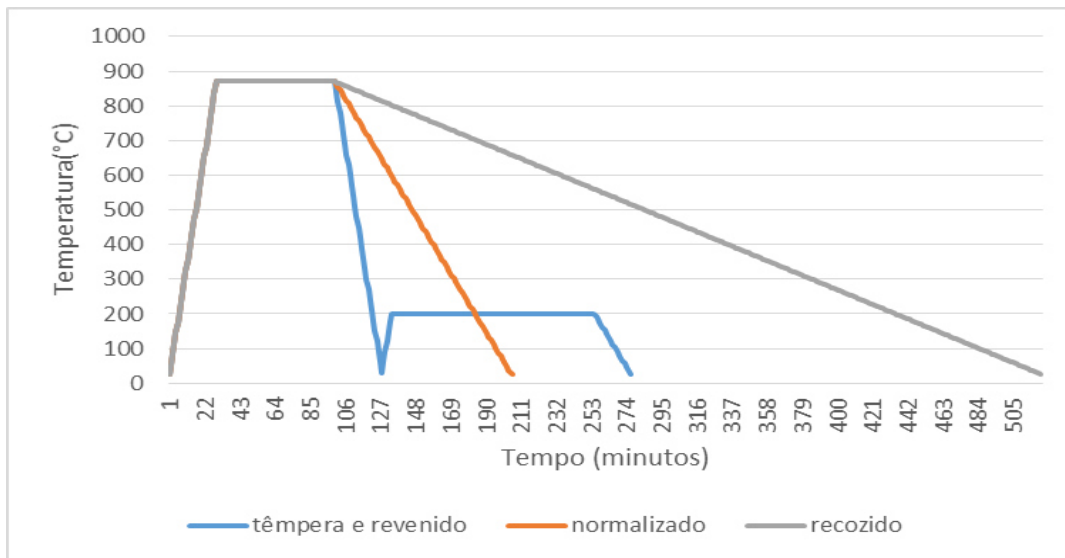
Após a completa austenitização do material, os corpos de prova foram divididos em 3 grupos:

- Os resfriados dentro do forno para resfriar junto com o mesmo – recozidos;
- Os resfriados ao ar – normalizados;
- Os resfriados em água na temperatura ambiente – temperados e revenidos, após o tratamento térmico de têmpera.

Posteriormente, os corpos de prova temperados foram submetidos a um processo de revenimento. A temperatura utilizada foi de 200°C, e os corpos foram mantidos nesta temperatura por 2 horas, uma hora para cada polegada de diâmetro, mas com um tempo mínimo de 2 horas (Chiaverini, 1986).

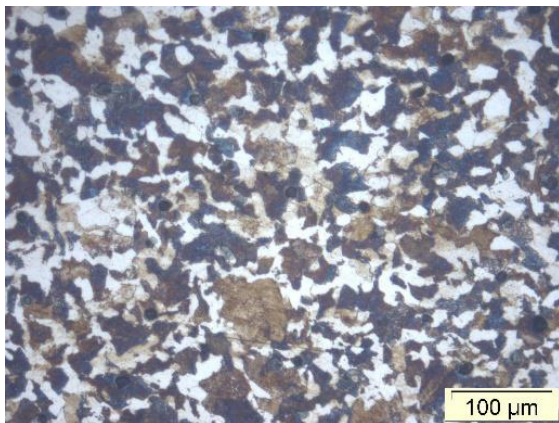
A Figura 4.1 mostra os diagramas temperatura x tempo para cada tratamento térmico. Já na Fig. 4.2 pode-se observar as microestruturas do aço com diferentes estados metalúrgicos.

Figura 4.1 – Diagramas temperatura x tempo para cada tratamento térmico.

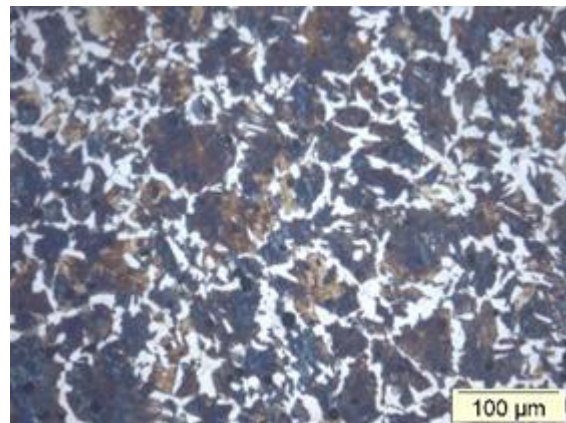


Fonte – Autoria própria.

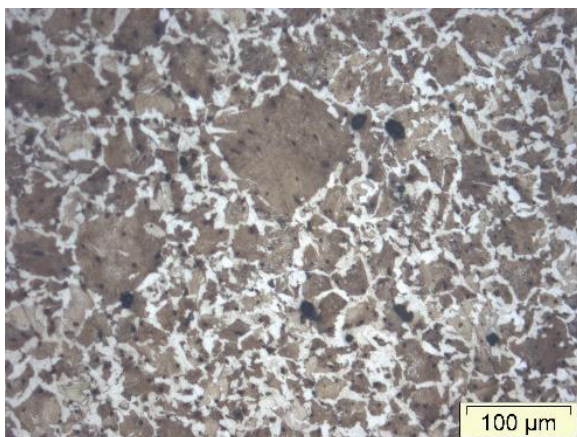
Figura 4.2 – Microestrutura dos aços ABNT 1045: a) como recebido, b) recozido, c) normalizado e d) temperado e revenido.



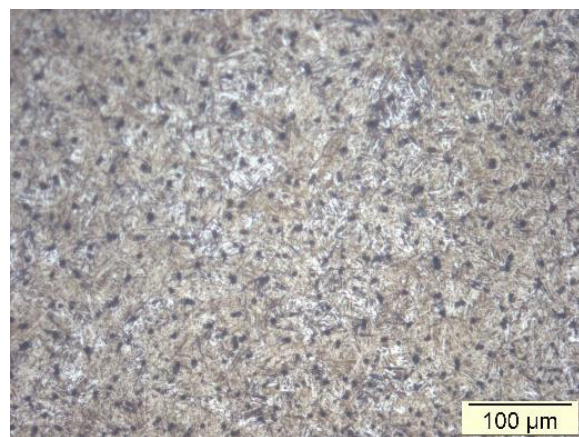
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte – Autoria própria.

Ao analisar a Figura 4.2 (a) do aço ABNT na condição bruta, como fornecida pelo fabricante; pode-se ver a matriz ferrítica, a parte clara, e os grãos de perlita, a parte escura. A equiaxidade dos grãos não define se houve trabalhos a frio, pois a microestrutura foi analisada na seção transversal da amostra.

Comparando-se as microestruturas das amostras recozidas, Fig. 4.2 (b), e sem tratamento, Fig. 4.2 (a), percebe-se que os grãos obtidos no recozimento são maiores que no estado bruto. Isso se deve à recristalização que acontece ao fim da austenitização do processo de recozimento.

Da análise da Fig. 4.2 (c) observa-se que no estado apenas normalizado, os grãos são menores que no estado bruto, Fig. 4.2 (a) e que no estado recozido, Fig. 4.2 (b). Isso se deve ao início do processo de recristalização que, assim como no recozimento, está presente na normalização, logo após a austenitização completa da estrutura cristalina do aço. Como o resfriamento do recozimento é mais lento, dentro do forno, as altas temperaturas favoreceram um crescimento de grão não notado na normalização, na qual a taxa de resfriamento é mais alta uma vez que as amostras são resfriadas ao ar quiescente.

A diferença entre as taxas de resfriamento da normalização e do recozimento implicam em estruturas distintas para cada um desses tratamentos. O recozimento favorece a formação de perlita grosseira que consiste em lamelas espessas tanto de ferrita quanto de cementita. Elevadas taxas de difusão estão associadas às temperaturas de transformações isotérmicas inerentes ao processo de recozimento, permitindo que os átomos de carbono percorram distâncias relativamente longas, o que resulta na formação de lamelas grossas. Com a diminuição da temperatura, a taxa de difusão do carbono diminui, e as camadas se tornam progressivamente mais finas. Essa estrutura é chamada de perlita fina e é obtida com o tratamento térmico de normalização. Tal disparidade é pouco visível nas fotos das micrografias, possibilitando apenas notar que na normalização as lamelas de perlitas são tão finas que não são visíveis na ampliação de 500x. No entanto, a Tab. 4.1 que contém os valores de dureza, torna mais clara a diferença. Uma estrutura perlítica com lamelas mais finas possuem maior dureza que uma perlita grosseira, como pôde ser visto.

A Figura 4.2 (d) mostra a microestrutura do aço ABNT 1045 temperado e revenido. O tratamento térmico de têmpera em água, seguido do revenido, forneceu a microestrutura martensítica revenida, a estrutura em forma de agulhas é a martensita, uma estrutura tetragonal de corpo centrado, muito dura.

4.3. Ensaio de dureza do aço ABNT 1045 com e sem tratamentos térmicos

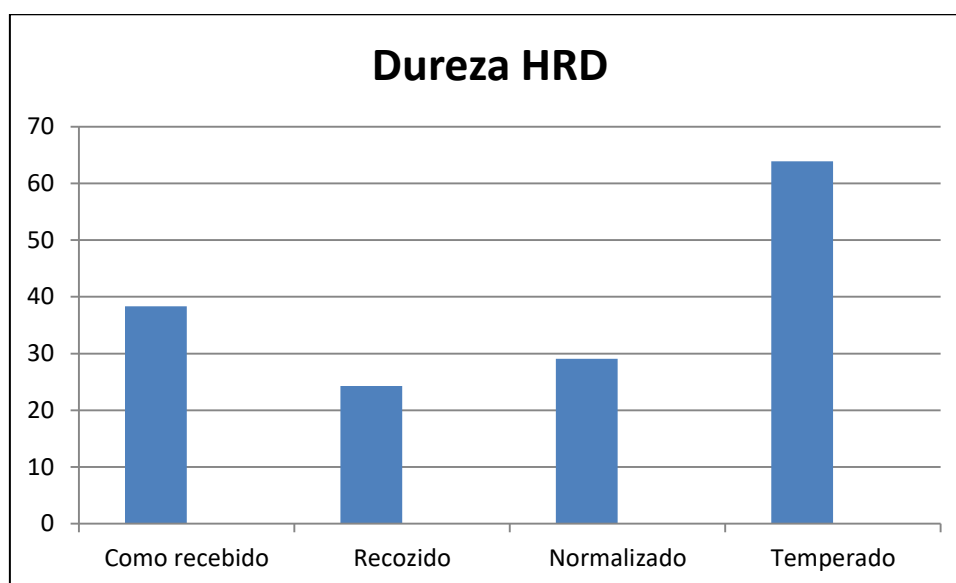
Na Tabela 4.1 estão apresentados os resultados dos ensaios de dureza do aço ABNT 1045, com tratamento térmico e como recebido, realizados no durômetro Pantec modelo RASN RBD na escala Rockwell D onde foram realizadas 7 (sete) medições para cada amostra. Para uma melhor avaliação e comparação, os resultados de dureza (HRD) são mostrados na Fig. 4.3.

Tabela 4.1 – Dureza HRD do aço ABNT 1045.

Estado metalúrgico	Ensaio							Média
	1	2	3	4	5	6	7	
Como recebido	38,4	39,8	38,0	39,8	39	36,4	40,4	38,3
Recozido	24,5	22,8	24,2	24,4	24,8	24,8	24,3	24,3
Normalizado	29,9	27,8	29,4	29,8	29,2	28,7	29,0	29,1
Temperado	61,2	65,7	64,6	65,2	63,6	63,4	63,3	63,9

Fonte – Autoria própria.

Figura 4.3 – Gráfico dos valores de dureza Rockwell D das amostras.



Fonte – Autoria própria.

Observa-se na Figura 4.3 a diferença substancial entre as durezas das amostras do aço ABNT 1045, nitidamente se percebe uma diferença de dureza, como consequência da microestrutura correspondente ao estado metalúrgico do aço. A martensita, resultado dos tratamentos de têmpera, tem dureza mais elevada que grãos de perlita grosseira ou fina em

matriz ferrítica, característica dos tratamentos de recozimento e normalização para esse material. A amostra sem tratamento tem origem num processo de trabalho a quente e/ou a frio e, portanto, também possuem dureza inferior às temperadas, com uma estrutura de grãos de perlita em matriz ferrítica, porém maior do que a amostra recozida e normalizada.

4.4. Análise dos Parâmetros de Rugosidade Superficial para o Aço ABNT 1045

Após a realização de cada bateria de ensaios, os corpos de prova tiveram sua rugosidade superficial medida. Todos os parâmetros de rugosidade foram medidos três vezes em todos os corpos de prova. Todos os valores de Ra e Rt para os ensaios e as réplicas realizados estão nas Tabelas A1, A2, A3 e A4 do anexo A.

Para analisar de forma geral se o tipo de tratamento térmico tem influência direta na qualidade superficial do material, os valores médios da rugosidade superficial foram medidos.

A Tabelas 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 apresentam os valores médios para cada repetição e réplica dos parâmetros de rugosidade Ra e Rt do aço ABNT como recebido, recozido, normalizado e temperado e revenido, respectivamente.

Tabela 4.2 – Parâmetros Ra e Rt médios do aço ABNT 1045 como recebido.

Interações	f (mm/rot)	r _e (mm)	Ra (μm)	Rt (μm)
[1]	0,075	0,4	0,432	3,149
a	0,125	0,4	0,725	4,803
b	0,075	0,8	0,732	7,463
ab	0,125	0,8	0,793	5,514

Fonte – Autoria própria.

Tabela 4.3 – Parâmetros Ra e Rt médios do aço ABNT 1045 recozido.

Interações	f (mm/rot)	r _e (mm)	Ra (μm)	Rt (μm)
[1]	0,075	0,4	0,635	4,625
a	0,125	0,4	0,939	6,185
b	0,075	0,8	0,506	3,639
ab	0,125	0,8	0,787	4,756

Fonte – Autoria própria.

Tabela 4.4 – Parâmetros Ra e Rt médios do aço ABNT 1045 normalizado.

Interações	f (mm/rot)	r _e (mm)	Ra (μm)	Rt (μm)
[1]	0,075	0,4	0,435	3,379
a	0,125	0,4	0,848	5,45
b	0,075	0,8	0,920	8,236
ab	0,125	0,8	0,869	5,415

Fonte – Autoria própria.

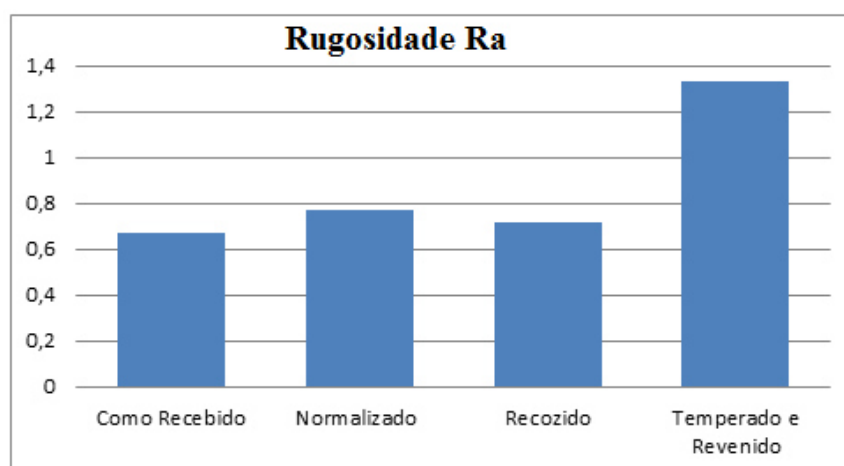
Tabela 4.5 – Parâmetros Ra e Rt médios do aço ABNT 1045 temperado e revenido.

Interações	f (mm/rot)	r _e (mm)	Ra (μm)	Rt (μm)
[1]	0,075	0,4	0,887	8,327
a	0,125	0,4	1,707	13,226
b	0,075	0,8	0,857	4,718
ab	0,125	0,8	1,873	8,06

Fonte – Autoria própria.

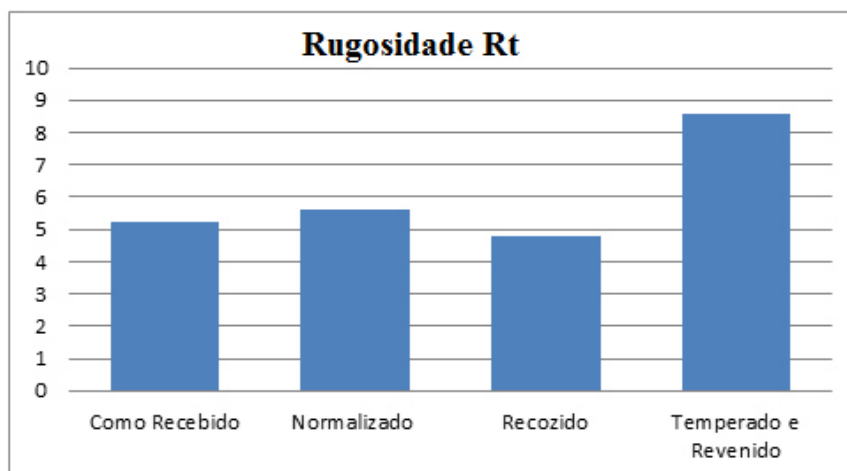
As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam a média final das rugosidades Ra e Rt obtidas experimentalmente para os diferentes estados metalúrgicos do aço ABNT 1045.

Figura 4.4 – Parâmetro de rugosidade Ra do aço ABNT 1045 nos quatro estados metalúrgicos analisados.



Fonte – Autoria própria.

Figura 4.5 – Parâmetro de rugosidade R_t do aço ABNT 1045 nos 4 estados metalúrgicos analisados.



Fonte – Autoria própria.

A análise das Figuras 4.4 e 4.5 mostra que o aço ABNT 1045 temperado e revenido apresenta os maiores valores de rugosidade, independentemente do parâmetro de rugosidade analisado, quando comparado aos outros estados metalúrgicos do aço. Segundo Stemmer (2001), de um modo geral, alta dureza, resistência e baixa ductilidade resultam em bom acabamento superficial. No entanto, o aço temperado e revenido apresentou maiores valores de rugosidade, muito provavelmente, pelo fato das ferramentas de corte utilizadas nos ensaios não serem recomendadas para usinar aços nesse estado metalúrgico e, conseqüentemente, sofrem grande desgaste abrasivo, resultando em um pior grau de rugosidade superficial.

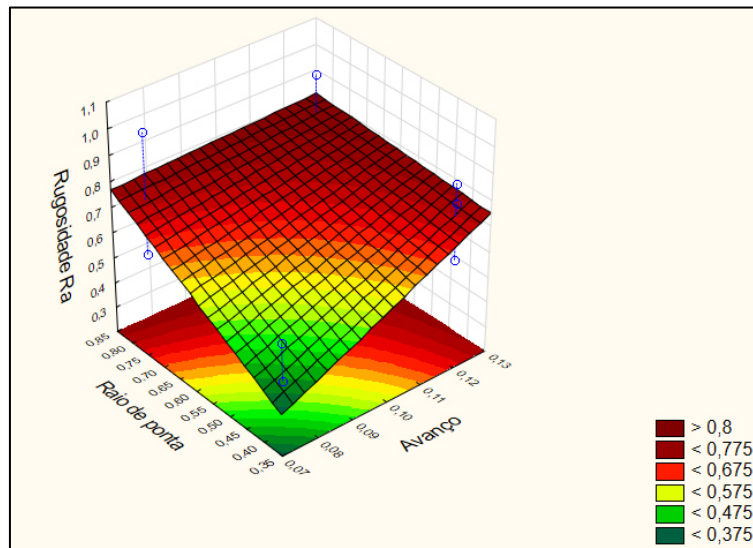
4.4.1. Aço ABNT 1045 como recebido

4.4.1.1. Rugosidade R_a

A partir dos dados obtidos experimentalmente foi possível realizar uma análise estatística (ANOVA) dos resultados. A partir do software utilizado foi possível obter diversos tipos de gráficos, como superfícies de respostas e curvas de níveis, que permitem uma melhor visualização e análise direta do comportamento da variável de resposta em função das variáveis de entrada.

As Figuras 4.6 e 4.7 ilustram a superfície de resposta e as curvas de nível da rugosidade R_a do aço como recebido.

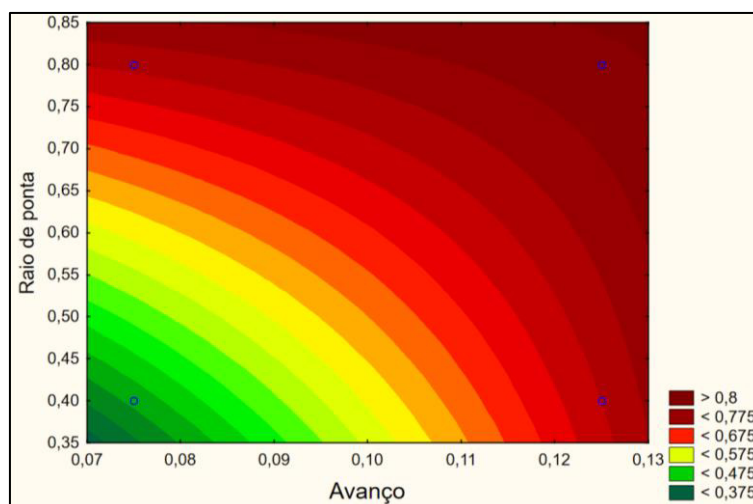
Figura 4.6 – Superfície de resposta da rugosidade Ra do aço como recebido.



Fonte – Autoria própria.

Pode ser observado na Figura 4.6 que há uma tendência de menores valores de Ra quando foram usados o menor raio de ponta (0,4 mm) e o menor avanço (0,075 mm/volta), esse comportamento está contrário com a literatura (Diniz *et al.*, 2014 e Machado *et al.* 2004), segundo a qual, geralmente, maiores raios de pontas em conjunto com baixos avanços, promovem menores rugosidades superficiais na peça.

Figura 4.7 – Curvas de nível da rugosidade Ra do aço como recebido.



Fonte – Autoria própria.

A análise da Figura 4.7 confirma a análise da superfície de resposta mostrada na Fig. 4.6, tanto o aumento do avanço quanto do raio de ponta resulta numa tendência de aumento no parâmetro Ra do aço como recebido. Essa conclusão pode ser verificada pela mudança de tonalidade nas figuras, pois, a legenda afirma que a cor verde indica menores valores de rugosidade, enquanto que a cor vermelha representa um aumento no parâmetro de rugosidade estudado.

A ANOVA para a variável de resposta Ra em função dos fatores avanço e raio de ponta da ferramenta é mostrado na Tab. 4.6. Nela pode-se observar que mesmo havendo uma tendência de aumento da rugosidade Ra com o aumento do raio de ponta e diminuição do avanço, para as condições estudadas nesta pesquisa não há influência desses fatores sobre a variável de resposta para uma confiança de 95%. O Valor P para os fatores avanço e raio de ponta e sua interação é maior do que 0,05 ($\alpha = 5\%$).

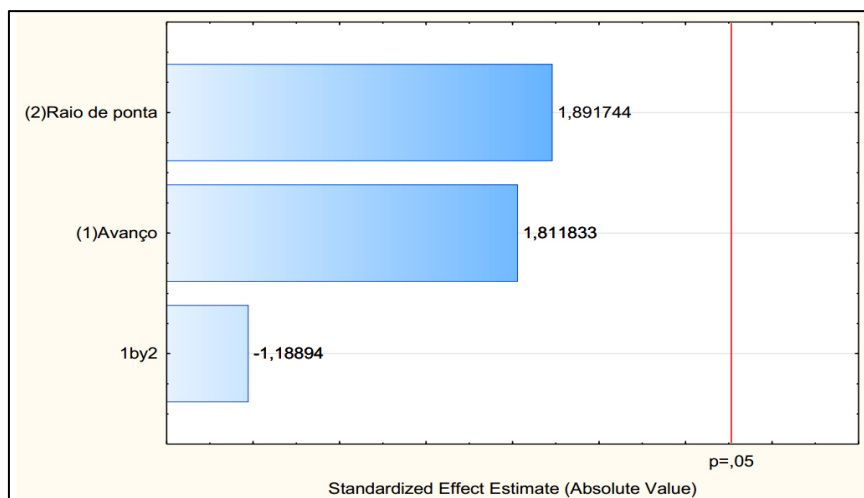
Tabela 4.6 – ANOVA para o parâmetro Ra do aço ABNT 1045 como recebido.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F ₀	Valor P
f	0,093828	1	0,093828	3,282738	0,107589
r _ε	0,102287	1	0,102287	3,578695	0,095170
Interação f x r _ε	0,040403	1	0,040403	1,413567	0,268556
Erro	0,228657	8	0,028582		
Total	0,465175	11			

Fonte – Autoria própria.

A Figura 4.8 apresenta o gráfico de Pareto para os efeitos principais e para as interações das condições de corte (avanço e raio de ponta) da rugosidade Ra do aço como recebido.

Figura 4.8 – Gráfico de Pareto - Correlação f , r_e e interação $f \times r_e$ com o parâmetro R_a do aço como recebido.



Fonte – Autoria própria.

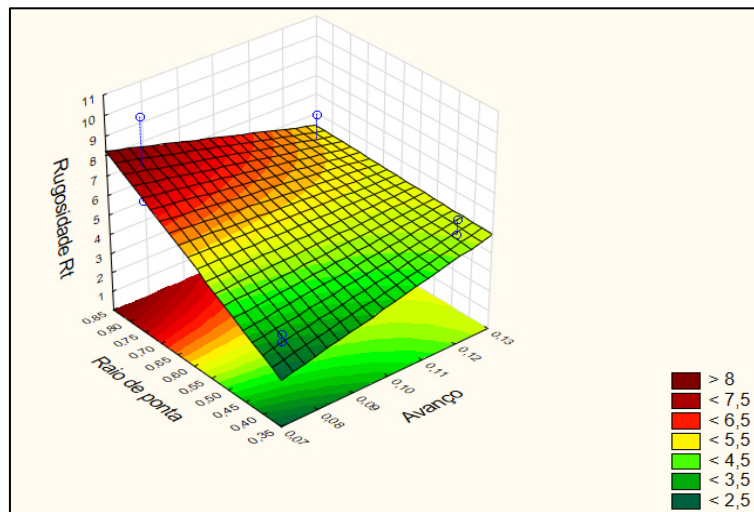
O gráfico de Pareto visto na Fig. 4.8 permite confirmar que as variáveis de entrada (fatores) avanço e raio de ponta, e sua interação $f \times r_e$ não têm influência sobre a rugosidade superficial do aço, para uma confiança de 95%. No gráfico de Pareto observa-se que os efeitos estimados padronizados do raio de ponta, do avanço e de suas interações não ultrapassam o limite de $P = 0,05$.

4.4.1.2. Rugosidade R_t

Utilizando os dados fornecidos na Tab. A1 foi possível realizar uma análise estatística (ANOVA) dos resultados, traçar as superfícies de resposta, as curvas de nível e o gráfico de Pareto da rugosidade R_t do aço como recebido.

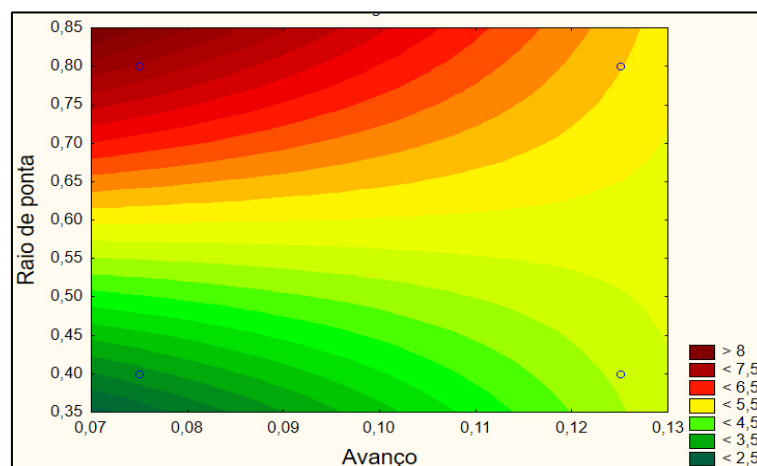
As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam a superfície de resposta e as curvas de nível, respectivamente.

Figura 4.9 – Superfície de resposta da rugosidade R_t do aço como recebido.



Fonte – Autoria própria.

Figura 4.10 – Curvas de nível da rugosidade R_t do aço como recebido.



Fonte – Autoria própria.

Pode ser observado nas Figuras 4.9 e 4.10 que quando o raio de ponta da ferramenta aumenta de 0,4 mm para 0,8 mm há uma tendência de aumento do parâmetro de rugosidade R_t , independentemente do avanço utilizado. Já o aumento do avanço de 0,075 mm/rot para 0,125 mm/rot proporcionou um comportamento divergente; para ferramenta com raio de ponta de 0,4 mm, o aumento do avanço tende a aumentar o parâmetro R_t , enquanto para o raio de ponta de 0,8 mm, observa-se um comportamento contrário, ou seja o aumento do avanço resulta numa tendência de diminuição do parâmetro R_t .

O aumento do parâmetro de rugosidade R_t com o aumento do avanço difere do comportamento que é normalmente esperado, ou seja, menores avanços resultam em menores

níveis de rugosidade superficial da peça usinada. Algumas razões para esse comportamento são apresentadas na literatura.

Stadtlober *et al.* [S/D] analisaram a relação da rugosidade superficial de tarugos do aço torneados com o avanço e o raio de ponta da ferramenta. Os autores usaram vários valores de avanço que variaram de 0,05 até 0,55 (mm/rot). Foram utilizadas ferramentas com raio de ponta de 0,4, 0,8 e 1,2 mm para os ensaios. Um detalhe observado foi que para valores de avanço menores que 0,2 mm/rot a rugosidade teve um comportamento aleatório.

Davim *et al.* (2008) estudaram o efeito do avanço, da velocidade de corte e da profundidade de corte nos parâmetros Ra e Rt em um aço torneado. Durante os ensaios, os autores variaram os valores de avanço em 0,1, 0,16 e 0,25 mm/rot. Pôde ser observado que em alguns casos os valores de rugosidade diminuía quando existia o acréscimo do avanço de 0,1 para 0,16 mm/rot.

A ANOVA para a variável de resposta Rt em função dos fatores avanço e raio de ponta da ferramenta é mostrado na Tab. 4.7.

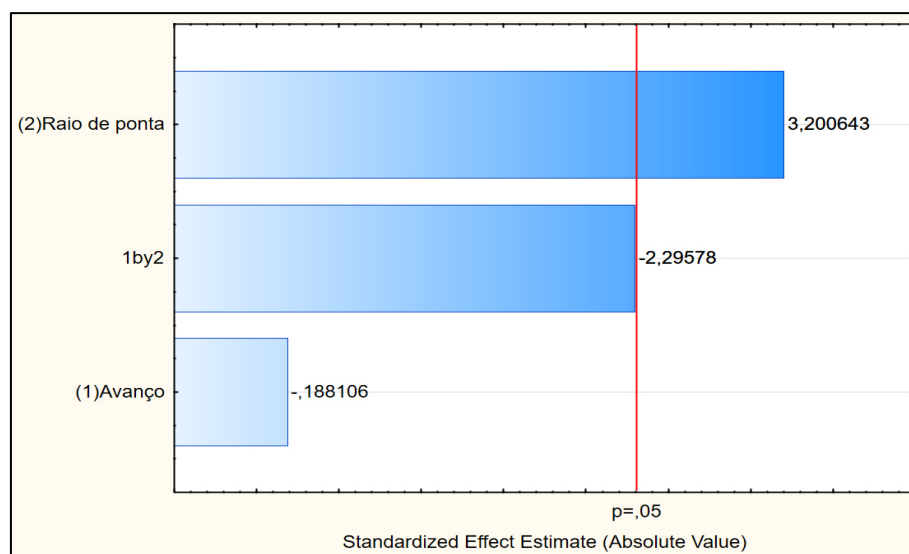
Tabela 4.7 – ANOVA para o parâmetro Rt do aço ABNT 1045 como recebido.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F ₀	Valor P
f	0,06542	1	0,06542	0,03538	0,855478
r _e	18,93897	1	18,93897	10,24412	0,0126
Interação f x r _e	9,74413	1	9,74413	5,27062	0,050804
Erro	14,79013	8	1,84877		
Total	43,53865	11			

Fonte – Autoria própria.

A Figura 4.11 mostra o gráfico de Pareto para os efeitos principais e para as interações das condições de corte (avanço e raio de ponta) da rugosidade Rt do aço como recebido.

Figura 4.11 – Gráfico de Pareto - Correlação f , r_e e interação $f \times r_e$ com o parâmetro R_t do aço como recebido.



Fonte – Autoria própria.

A Tabela 4.7 e a Figura 4.11 mostram que apenas o raio de ponta da ferramenta tem influência sobre a rugosidade R_t da peça, para uma confiança de 95%. Apenas o Valor P para raio de ponta é menor do que 0,05 ($\alpha = 5\%$) na ANOVA e apenas o efeito estimado padronizado do raio de ponta ultrapassa o limite de $P = 0,05$ no gráfico de Pareto.

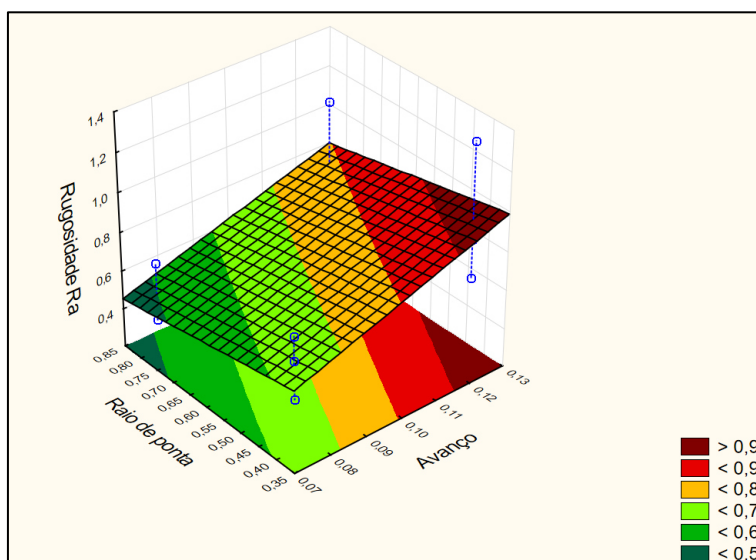
4.4.2. Aço ABNT 1045 recozido

4.4.2.1 Rugosidade R_a

A Superfície de resposta e as curvas de nível da rugosidade R_a do aço recozido estão dispostas nas Fig. 4.12 e Fig. 4.13, respectivamente.

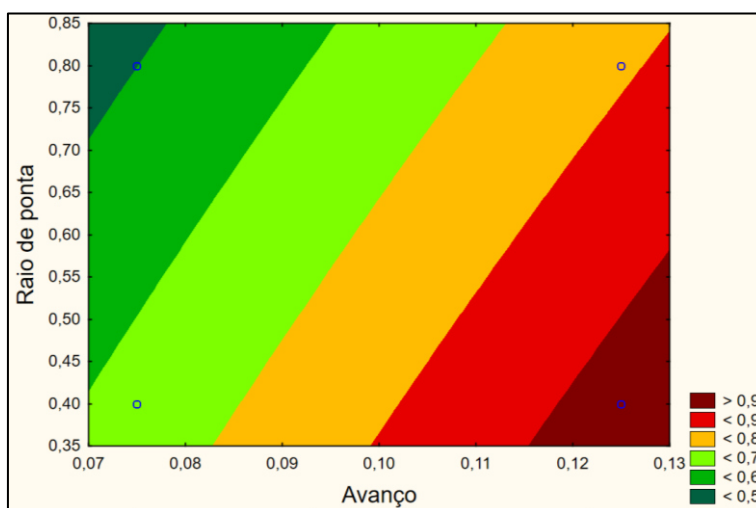
Nas Figuras 4.12 e 4.13 pode ser observado que o aumento do raio de ponta e a diminuição do avanço tende a diminuir a rugosidade. Esse comportamento está de acordo com a literatura (Diniz *et al.*, 2014 e Machado *et al.* 2004), segundo a qual, geralmente, maiores raios de pontas e menores avanço, promovem menores valores de rugosidades superficiais na peça.

Figura 4.12 – Superfície de resposta da rugosidade Ra do aço recozido.



Fonte – Autoria própria.

Figura 4.13 – Curvas de nível da rugosidade Ra do aço recozido.



Fonte – Autoria própria.

A ANOVA para a variável de resposta Ra em função dos fatores avanço e raio de ponta da ferramenta está exposta na Tab. 4.8.

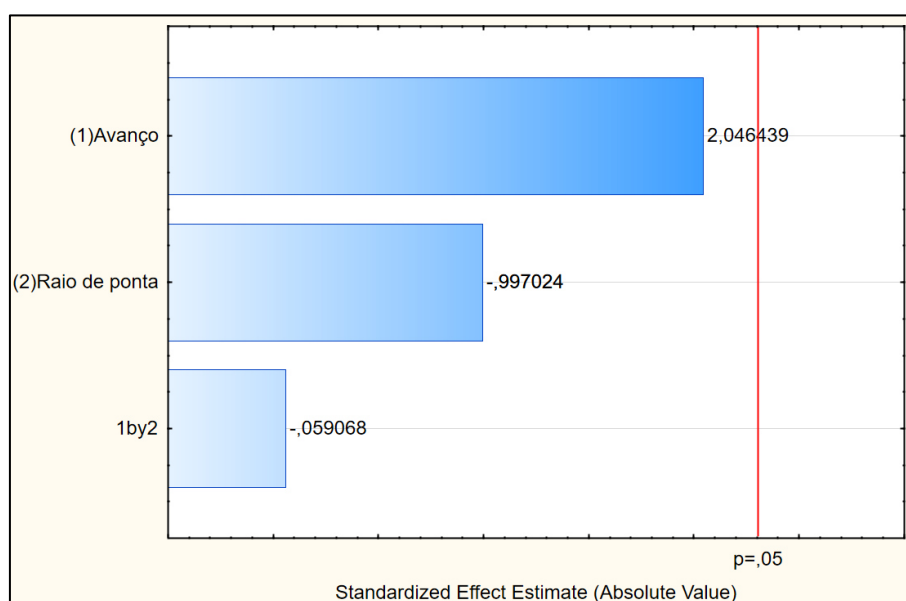
Tabela 4.8 – ANOVA para o parâmetro Ra do aço ABNT 1045 recozido

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F ₀	Valor P
f	0,263233	1	0,263233	4,187912	0,074921
r _ε	0,062482	1	0,062482	0,994058	0,347950
Interação f x r _ε	0,000219	1	0,000219	0,003489	0,954346
Erro	0,502843	8	0,062855		
Total	0,828777	11			

Fonte – Autoria própria.

A Figura 4.14 mostra o gráfico de Pareto para os efeitos principais e para as interações das condições de corte (avanço e raio de ponta) da rugosidade Ra do aço recozido.

Figura 4.14 – Gráfico de Pareto - Correlação f, r_ε e interação f x r_ε com o parâmetro Ra do aço recozido.



Fonte – Autoria própria.

As análises da Tabela 4.8 e da Figura 4.14 indicam que mesmo havendo uma tendência de diminuição da Rugosidade Ra do aço ABNT 1045 no estado metalúrgico recozido, quando o raio de ponta da ferramenta é aumentado de 0,4 mm para 0,8 e o avanço é diminuído de 0,125 mm/rot para 0,075 mm/rot; no entanto a ANOVA e o gráfico de Pareto mostram que

não há influência desses parâmetros sobre a Rugosidade Ra, para uma confiança nos resultados de 95%.

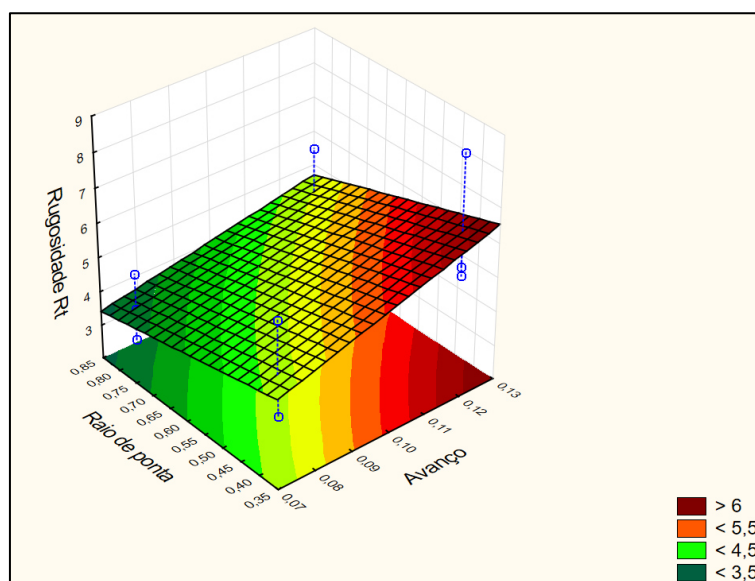
4.4.2.2. Rugosidade Rt

As Figuras 4.15 e 4.16 mostram a superfície de resposta e as curvas de nível da rugosidade Rt do aço recozido.

Observa-se nas Figuras 4.15 e 4.16 que o aumento do raio de ponta e a diminuição do avanço tende a diminuir a rugosidade Rt do aço ABNT 1045 no estado metalúrgico recozido.

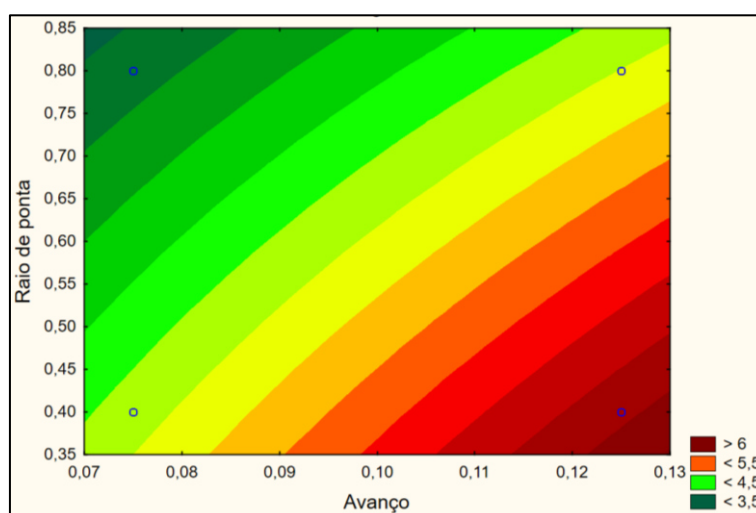
Para avaliar se realmente os parâmetros de usinagem (avanço e raio de ponta) têm influência sobre a rugosidade Rt do aço ABNT 1045 recozido, a Tab. 4.9 apresenta a ANOVA para a variável de resposta Rt em função dos fatores avanço e raio de ponta da ferramenta.

Figura 4.15 – Curvas de nível da rugosidade Rt do aço recozido.



Fonte – Autoria própria.

Figura 4.16 – Curvas de nível da rugosidade R_t do aço recozido.



Fonte – Autoria própria.

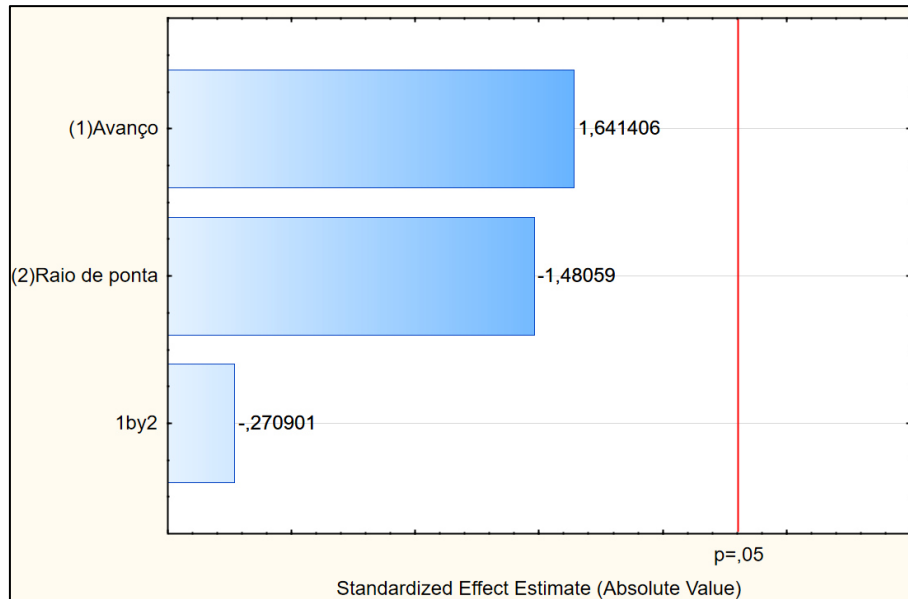
Tabela 4.9 – ANOVA para o parâmetro R_t do aço ABNT 1045 recozido

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F_0	Valor P
f	5,37675	1	5,376755	2,694214	0,139341
r_ϵ	4,37477	1	4,374773	2,192135	0,176989
Interação f x r_ϵ	0,14646	1	0,146457	0,073387	0,793326
Erro	15,96534	8	1,995668		
Total	25,86332	11			

Fonte – Autoria própria.

Para comprovar os resultados da ANOVA, mostrada na Tab. 4.9, a Fig. 4.17 exibe o gráfico de Pareto dos efeitos principais e das interações das condições de corte (avanço e raio de ponta) da rugosidade R_t do aço recozido.

Figura 4.17 – Gráfico de Pareto - Correlação f , r_e e interação $f \times r_e$ com o parâmetro R_t do aço recozido.



Fonte – Autoria própria.

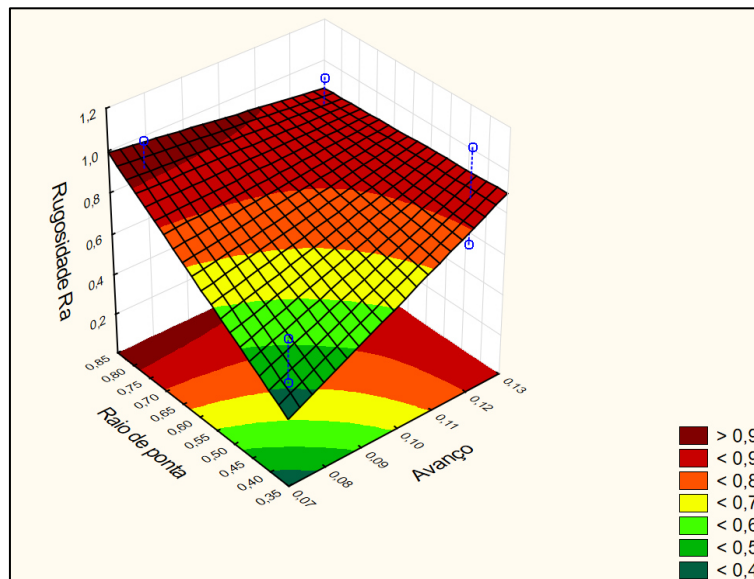
Assim como aconteceu para o parâmetro R_a , a análise da Tab. 4.9 e da Fig. 4.17 mostra que mesmo havendo uma tendência de diminuição da Rugosidade R_t do aço ABNT 1045 no estado metalúrgico recozido, com o aumento do raio de ponta da ferramenta e a diminuição do avanço, a ANOVA e o gráfico de Pareto mostram que não há influência desses parâmetros sobre a Rugosidade R_a , para uma confiança nos resultados de 95%. Na ANOVA, os valores P para raio de ponta, avanço e sua interação são todos maiores do que 0,05 ($\alpha = 5\%$); já no gráfico de Pareto, observa-se que nenhum dos efeitos estimados padronizados ultrapassou o limite de $P = 0,05$.

4.4.3. Aço ABNT 1045 normalizado

4.4.3.1. Rugosidade R_a

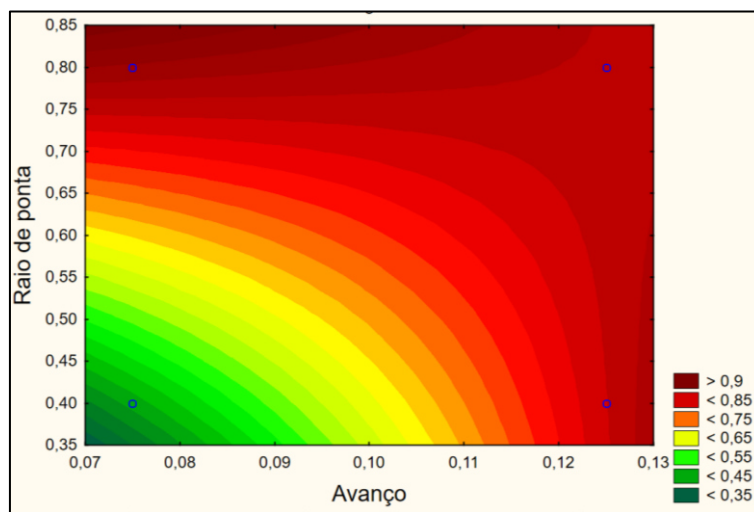
A Superfície de resposta e as curvas de nível da rugosidade R_a do aço normalizado estão ilustradas nas figuras 4.18 e 4.19 a seguir.

Figura 4.18 – Superfície de resposta da rugosidade Ra do aço normalizado.



Fonte – Autoria própria.

Figura 4.19 – Curvas de nível da rugosidade Ra do aço normalizado.



Fonte – Autoria própria.

Pode ser observado nas Figuras 4.18 e 4.19 que o aumento do raio de ponta de 0,4 mm para 0,8mm provocou um aumento no parâmetro de rugosidade Ra. Analisando a variação do avanço de 0,075 mm/rot para 0,125 mm/rot na ferramenta com raio de ponta de 0,4mm pode ser notado que existe uma tendência de elevação dos valores de Ra quando o avanço cresce. Já para a ferramenta com raio de ponta de 0,8 mm é observado que há uma tendência na diminuição da rugosidade Ra com o aumento do avanço.

O comportamento da rugosidade Ra contraria o comportamento normalmente esperado, pois, menores valores de avanço e maiores valores do raio de ponta, tendem a proporcionar menores níveis de rugosidade superficial de uma peça que passou pelo processo de torneamento.

A ANOVA disposta na Tab. 4.10 apresenta a real influência que os parâmetros de usinagem analisados (avanço e raio de ponta) exercem sobre a rugosidade Ra do aço ABNT 1045 normalizado.

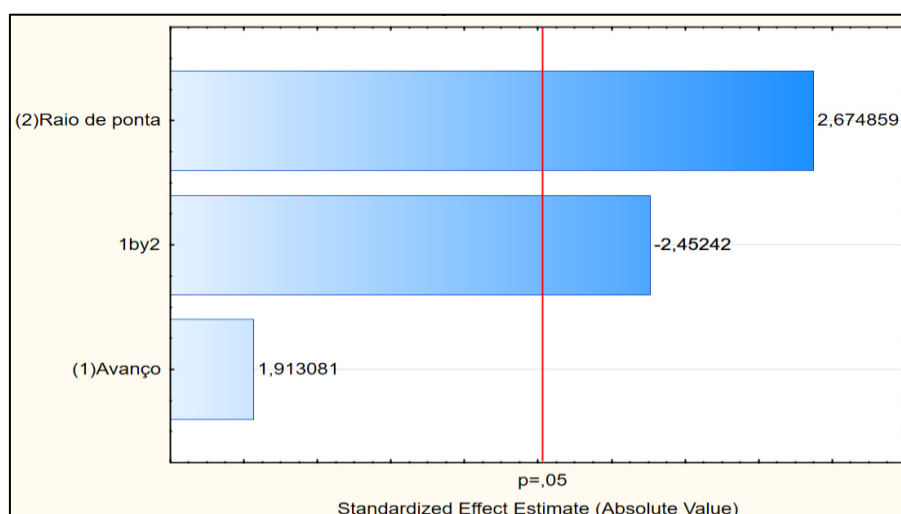
Tabela 4.10 – ANOVA para o parâmetro Ra do aço ABNT 1045 normalizado

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F ₀	Valor P
f	0,098174	1	0,098174	3,659879	0,092093
r _e	0,191926	1	0,191926	7,15487	0,028149
Interação f x r _e	0,161333	1	0,161333	6,014383	0,039786
Erro	0,214596	8	0,026825		
Total	0,666029	11			

Fonte – Autoria própria.

Para reforçar os resultados da ANOVA, mostrada na Tab. 4.10, a Fig. 4.20 apresenta o gráfico de Pareto dos efeitos principais e das interações das condições de corte (avanço e raio de ponta) da rugosidade Ra do aço normalizado.

Figura 4.20 – Gráfico de Pareto - Correlação f, r_e e interação f x r_e com o parâmetro Ra do aço normalizado.



Fonte – Autoria própria.

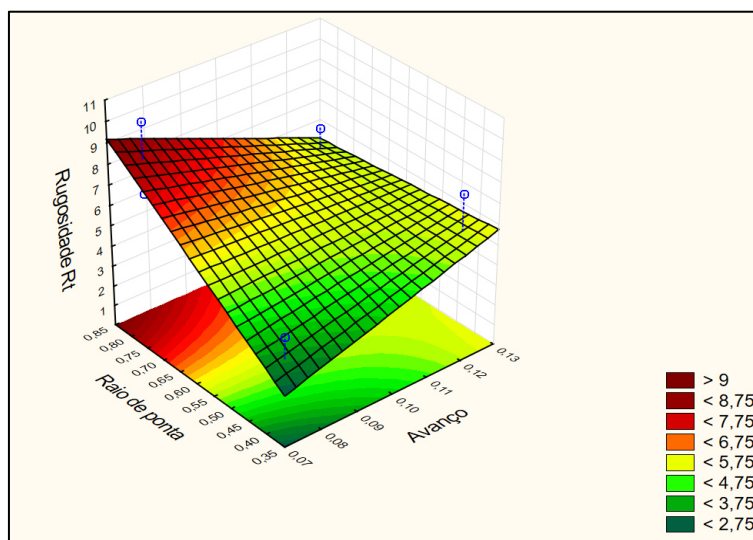
Analisando a Tab. 4.9 e a Fig. 4.20 é possível constatar que o raio de ponta da ferramenta juntamente com a interação entre raio de ponta e avanço têm influência sobre a rugosidade R_a , para uma confiança de 95%, pois, apenas o valor P do raio de ponta e da interação $f \times r_e$ são menores que 0,05 ($\alpha = 5\%$) na ANOVA e apenas os efeitos estimados padronizados do raio de ponta e da interação $f \times r_e$ ultrapassa o limite de $P = 0,05$ no gráfico de Pareto.

4.4.3.2 Rugosidade R_t

A Superfície de resposta juntamente com as curvas de nível da rugosidade R_t do aço normalizado podem ser vistas nas figuras 4.21 e 4.22 respectivamente.

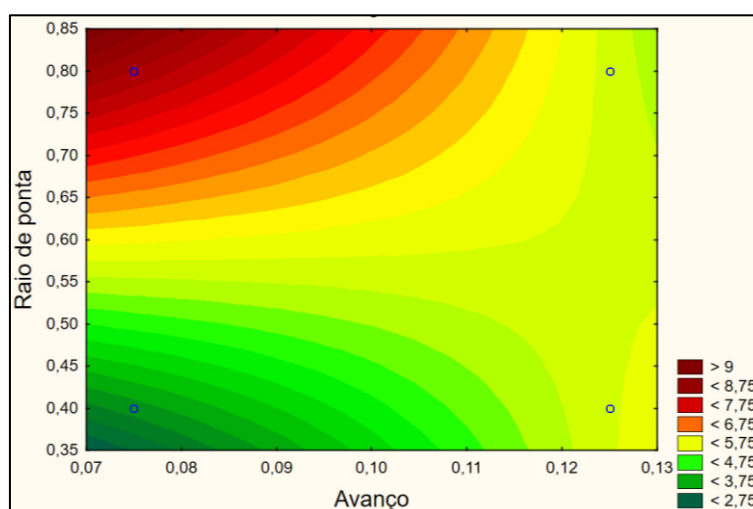
Analisando as Figuras. 4.21 e 4.22 é possível observar que quando o raio de ponta da ferramenta aumenta de 0,4 mm para 0,8 mm existe uma tendência no aumento do parâmetro de rugosidade R_t do aço normalizado, independentemente do avanço utilizado. Já o aumento do avanço de 0,075 mm/rot para 0,125 mm/rot proporcionou um comportamento divergente quando o raio de ponta da ferramenta foi variado de 0,4mm para 0,8mm, pois, para a ferramenta com raio de ponta de 0,4 mm, o aumento do avanço proporcionou o aumento de R_t , já para a ferramenta com raio de ponta de 0,8 mm o aumento do avanço proporcionou uma diminuição no parâmetro de rugosidade R_t .

Figura 4.21 – Superfície de resposta da rugosidade R_t do aço normalizado.



Fonte – Autoria própria.

Figura 4.22 – Curvas de nível da rugosidade Rt do aço normalizado.



Fonte – Autoria própria.

Da mesma forma que o parâmetro Ra, o comportamento da rugosidade Rt está contrário com o que era esperado, pois, o aumento do raio de ponta em conjunto com a diminuição do avanço, deveriam proporcionar melhores níveis de acabamento superficial.

A ANOVA disposta na Tab. 4.10 exhibe a real influência dos parâmetros de usinagem estudados (avanço e raio de ponta) sobre a rugosidade Rt do aço normalizado.

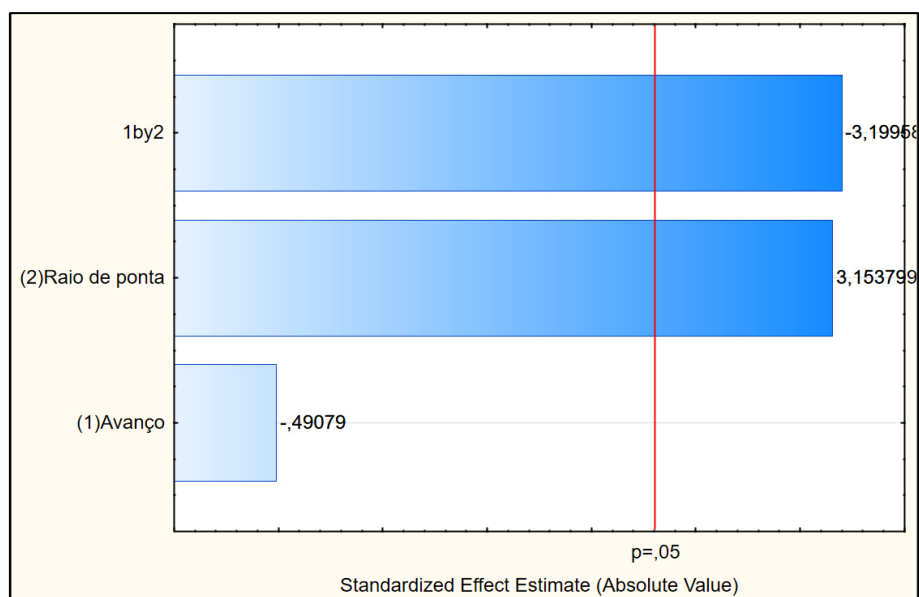
Para evidenciar os resultados da ANOVA, mostrada na Tab. 4.11, a Fig. 4.23 apresenta o gráfico de Pareto dos efeitos principais bem como as interações das condições de corte (avanço e raio de ponta) da rugosidade Rt do aço normalizado.

Tabela 4.11 – ANOVA para o parâmetro Rt do aço ABNT 1045 normalizado.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F ₀	Valor P
f	0,42229	1	0,42229	0,24087	0,636754
r _e	17,43756	1	17,43756	9,94645	0,013521
Interação f x r _e	17,94753	1	17,94753	10,23734	0,012620
Erro	14,02515	8	1,75314		
Total	49,83252	11			

Fonte – Autoria própria.

Figura 4.23 – Gráfico de Pareto - Correlação f , r_e e interação $f \times r_e$ com o parâmetro R_t do aço normalizado.



Fonte – Autoria própria.

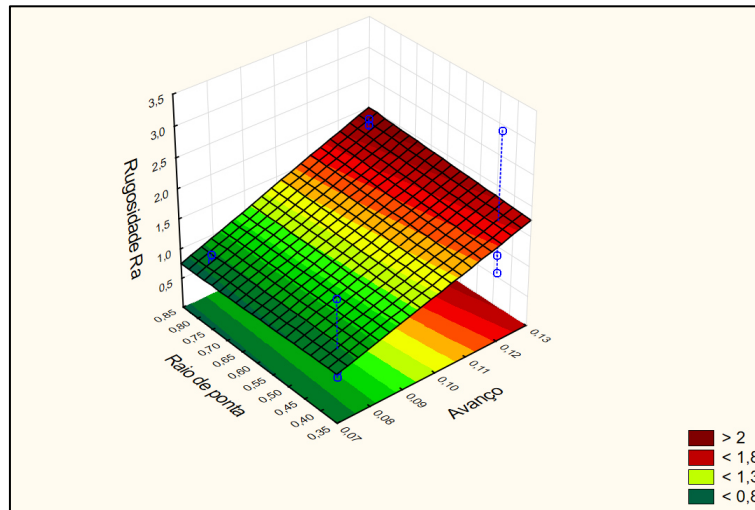
Após a análise da Tab. 4.10 e da Fig. 4.23 pode ser deduzido que a interação $f \times r_e$ e o raio de ponta da ferramenta tiveram influência sobre a rugosidade R_t do aço normalizado, para uma confiança de 95%. Pode ser visto que o Valor P para a interação $f \times r_e$ e para o raio de ponta é menor do que 0,05 ($\alpha = 5\%$) na ANOVA (Tab. 4.11) da mesma forma que apenas os efeitos estimados padronizados do raio de ponta e da interação $f \times r_e$ ultrapassam o limite de $P = 0,05$ no gráfico de Pareto (Fig. 4.23).

4.4.4 Aço ABNT 1045 Temperado e Revenido

4.4.4.1 Rugosidade R_a

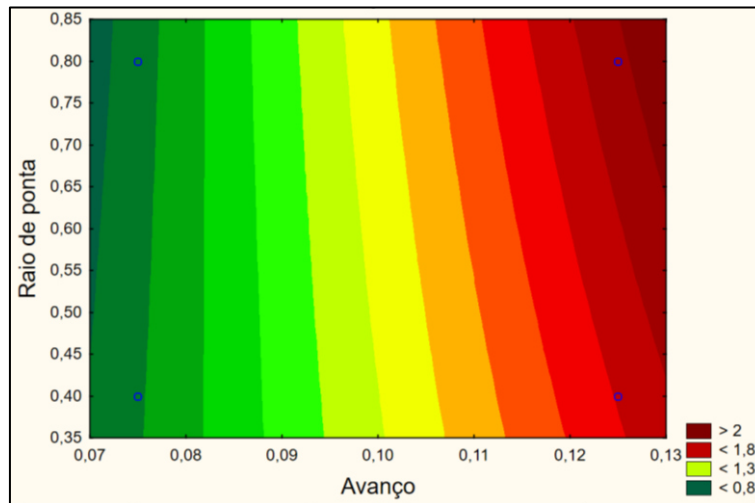
A superfície de resposta e as curvas de nível da rugosidade R_a do aço temperado e revenido podem ser vistas nas figuras 4.24 e 4.25 respectivamente.

Figura 4.24 – Superfície de resposta da rugosidade Ra do aço temperado e revenido.



Fonte – Autoria própria.

Figura 4.25 – Curvas de nível da rugosidade Ra do aço temperado e revenido.



Fonte – Autoria própria.

Após a análise das Figuras. 4.24 e 4.25 é possível concluir que o aumento do raio de ponta proporciona uma tendência de diminuição da rugosidade em baixos valores de avanço, em contra partida, para valores de avanço altos o aumento do raio de ponta proporcionou um aumento no parâmetro Ra. Independentemente do valor do raio de ponta o crescimento do avanço tende a aumentar o valor de Ra.

A ANOVA para a variável de resposta Ra em função dos fatores avanço e raio de ponta da ferramenta pode ser vista na Tab. 4.12 a seguir.

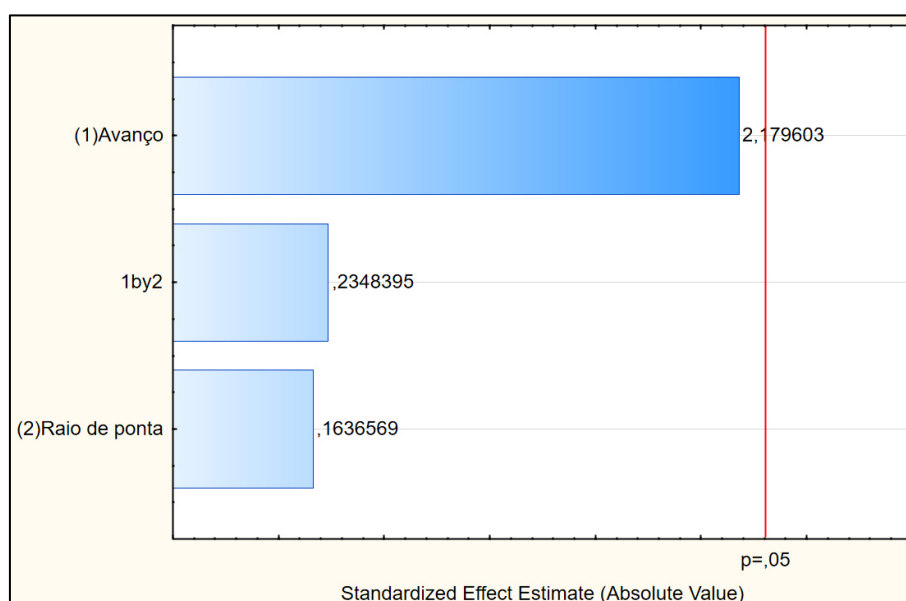
Tabela 4.12 – ANOVA para o parâmetro Ra do aço ABNT 1045 temperado e revenido.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F ₀	Valor P
f	2,537084	1	2,537084	4,750669	0,060900
r _ε	0,014304	1	0,014304	0,026784	0,874060
Interação f x r _ε	0,029453	1	0,029453	0,055150	0,820233
Erro	4,272382	8	0,534048		
Total	6,853223	11			

Fonte – Autoria própria.

A Figura 4.26 ilustra o gráfico de Pareto dos efeitos principais e das interações das condições de corte (avanço e raio de ponta) da rugosidade Ra do aço temperado.

Figura 4.26 – Gráfico de Pareto - Correlação f, r_ε e interação f x r_ε com o parâmetro Ra do aço temperado e revenido.



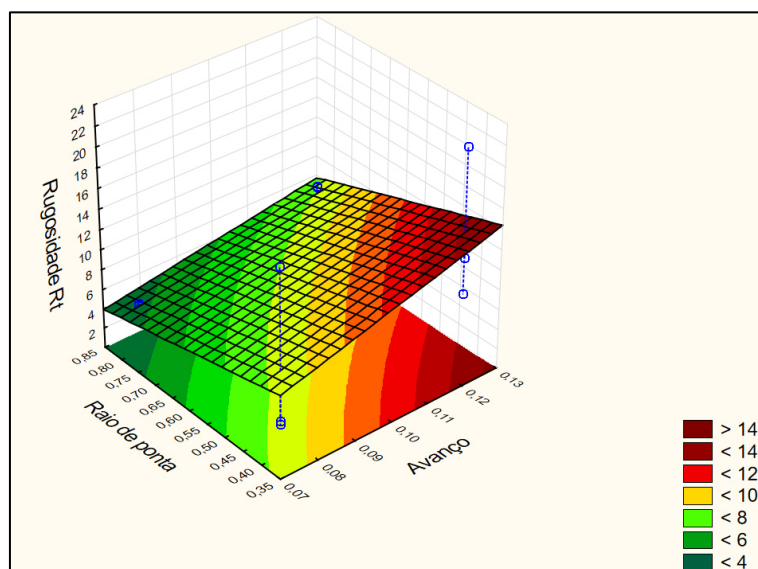
Fonte – Autoria própria.

As conclusões obtidas a partir das análises realizadas na Tab. 4.12 e na Fig. 4.26 mostram que os parâmetros analisados (avanço e raio de ponta) não tiveram influência sobre a rugosidade Ra, para uma confiança nos resultados de 95%, pois, o Valor P dos parâmetros são todos maiores que 0,05 ($\alpha = 5\%$) na ANOVA e para reforçar ainda mais essa conclusão, nenhum efeito estimado padronizado do gráfico de Pareto ultrapassou o limite de $P = 0,05$.

4.4.4.2 Rugosidade R_t

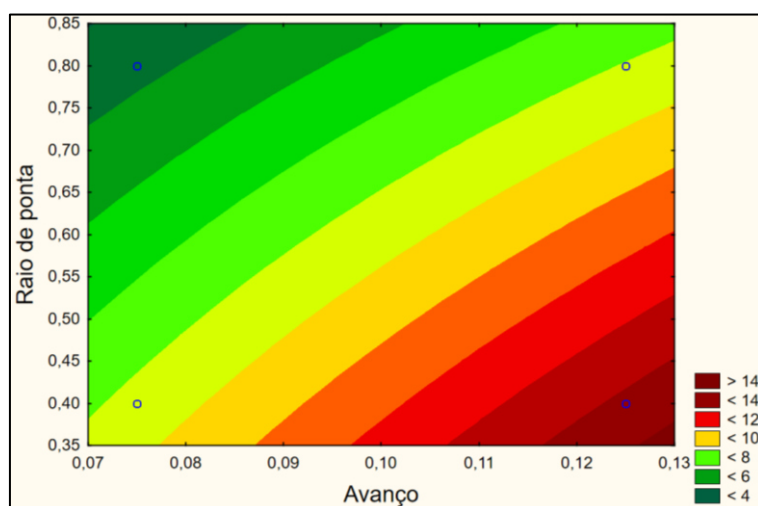
A Superfície de resposta e as curvas de nível da rugosidade R_t do aço temperado e revenido podem ser analisadas a partir das Figuras. 4.27 e Fig. 4.28, respectivamente.

Figura 4.27 – Superfície de resposta da rugosidade R_t do aço temperado e revenido.



Fonte – Autoria própria.

Figura 4.28 – Curvas de nível da rugosidade R_t do aço temperado e revenido.



Fonte – Autoria própria.

A partir das Figuras. 4.27 e 4.28 é possível concluir que o aumento do raio de ponta em conjunto com a diminuição do avanço proporcionou uma diminuição na rugosidade R_t . Esse comportamento corrobora com o que é descrito na literatura (Diniz *et al.*, 2014 e Machado *et*

al. 2004), pois, geralmente, maiores valores de raio de ponta juntamente com menores valores de avanço proporcionam menores valores de rugosidade superficial nas peças torneadas.

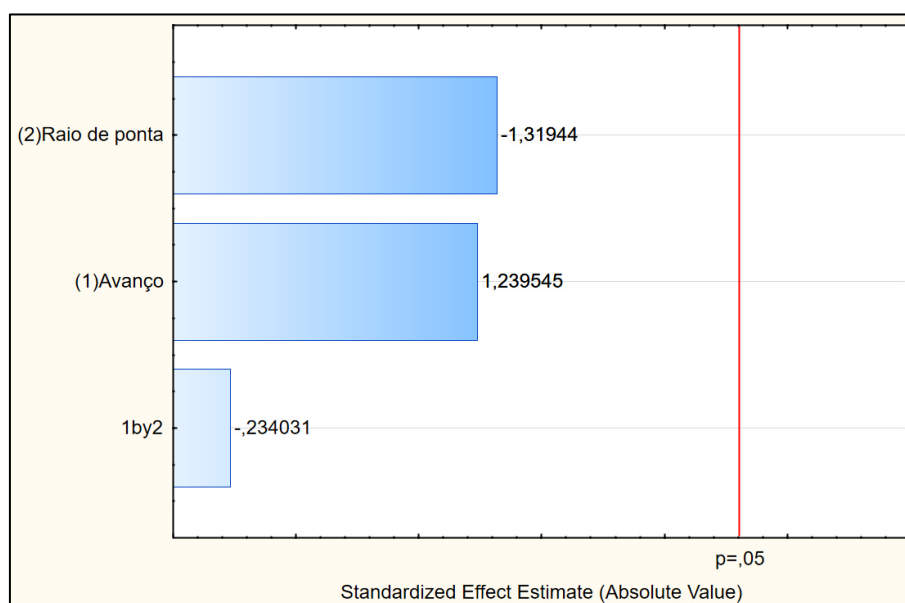
A ANOVA obtida para a variável de resposta R_t em função do avanço e do raio de ponta estudados está disposta na Tab.4.13. Para ratificar os resultados da ANOVA, apresentada na Tab. 4.13, o gráfico de Pareto que está disposto na Fig. 4.29 mostra os efeitos principais e os efeitos das interações das condições de corte (avanço e raio de ponta) da rugosidade R_t do aço temperado e revenido.

Tabela 4.13 – ANOVA para o parâmetro R_t do aço ABNT 1045 temperado e revenido

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F_0	Valor P
f	50,9508	1	50,95081	1,536473	0,250271
r_e	57,7307	1	57,73073	1,740928	0,223530
Interação f x r_e	1,8162	1	1,81624	0,054771	0,820839
Erro	265,2872	8	33,16090		
Total	375,7849	11			

Fonte – Autoria própria.

Figura 4.29 – Gráfico de Pareto - Correlação f, r_e e interação f x r_e com o parâmetro R_t do aço temperado e revenido.



Fonte – Autoria própria.

As análises das Figuras. 4.27 e 4.28 indicam que mesmo havendo uma tendência de diminuição da rugosidade R_t do aço ABNT 1045 no estado metalúrgico temperado e revenido, quando o raio de ponta da ferramenta é aumentado de 0,4 mm para 0,8 e o avanço é diminuído de 0,125 mm/rot para 0,075 mm/rot; no entanto a ANOVA (Tab. 4.12) e o gráfico de Pareto (Fig. 4.29) mostram que não há influência desses parâmetros sobre a Rugosidade R_t , para uma confiança nos resultados de 95%, já que o Valor P dos parâmetros são todos maiores que 0,05 ($\alpha = 5\%$) na ANOVA e nenhum efeito estimado padronizado do gráfico de Pareto passou o limite de $P = 0,05$.

4.5. Modelos Matemáticos

A otimização das condições de usinagem deve apoiar-se em modelos matemáticos fidedignos, conforme sugerem Chua *et al.* (1993). Os modelos matemáticos desenvolvidos para os parâmetros de rugosidade R_a e R_t do aço ABNT 1045 em diferentes estados metalúrgicos têm como finalidade estimar os níveis de rugosidade dentro do intervalo de valores estudados e, também, serem úteis na comparação com modelos teóricos já conhecidos na literatura.

4.5.1. Modelagem matemática para o aço ABNT 1045 como recebido.

Para desenvolvimento do modelo matemático dos parâmetros de rugosidade R_a e R_t em função dos parâmetros de usinagem avanço (f) e raio de ponta da ferramenta (r_e), foi utilizado um Software comercial para determinar os coeficientes de regressão.

As Tabelas 4.14 e 4.15 foram obtidas através do Software utilizado e elas apresentam os valores dos coeficientes obtidos para R_a e R_t , respectivamente.

Tabela 4.14 – Coeficientes de regressão da rugosidade Ra para o aço ABNT 1045 como recebido.

Fatores	Coeficientes de regressão	Erro padrão	t	p	Limite de confiança (-95%)	Limite de confiança (+95%)
Efeito médio geral	-0,6560	0,636329	-1,03091	0,332738	-2,1234	0,81138
f	10,5000	6,173294	1,70087	0,127384	-3,7356	24,73564
r _ε	1,6221	1,006124	1,61225	0,145572	-0,6980	3,94225
Interação f x r _ε	-11,6050	9,760835	-1,18894	0,268556	-34,1135	10,90352

Fonte – Autoria própria.

Tabela 4.15 – Coeficientes de regressão da rugosidade Rt para o aço ABNT 1045 como recebido.

Fatores	Coeficientes de regressão	Erro padrão	t	p	Limite de confiança (-95%)	Limite de confiança (+95%)
Efeito médio geral	-9,054	5,11770	-1,76918	0,114829	-20,856	2,7473
f	105,181	49,64898	2,11849	0,066983	-9,310	219,6714
r _ε	24,304	8,09179	3,00351	0,016981	5,644	42,9635
Interação f x r _ε	-180,223	78,50193	-2,29578	0,050804	-361,249	0,8024

Fonte – Autoria própria.

A partir dos valores dos coeficientes de regressão apresentados nas Tabelas. 4.14 e 4.15 foi possível desenvolver os modelos matemáticos para as rugosidades Ra e Rt, conforme mostrado abaixo:

$$Ra = -0,656 + 10,5 * f + 1,6221 * r_{\epsilon} - 11,605 * f * r_{\epsilon} \quad (4.1)$$

$$Rt = -9,054 + 105,181 * f + 24,304 * r_{\epsilon} - 180,223 * f * r_{\epsilon} \quad (4.2)$$

4.5.2. Modelagem matemática para o aço ABNT 1045 recozido

Os coeficientes de regressão da rugosidade Ra e Rt, para o aço ABNT 1045 no estado metalúrgico recozido, estão mostrados nas Tabelas. 4.16 e 4.17, respectivamente.

Tabela 4.16 – Coeficientes de regressão da rugosidade Ra para o aço ABNT 1045 recozido.

Fatores	Coeficientes de regressão	Erro padrão	t	p	Limite de confiança (-95%)	Limite de confiança (+95%)
Efeito médio geral	0,288167	0,94364	0,305379	0,767872	-1,8879	2,46420
f	6,437333	9,15463	0,703178	0,501892	-14,6733	27,54794
r _ε	-0,275292	1,49202	-0,184509	0,858206	-3,7159	3,16532
Interação f x r _ε	-0,855000	14,47474	-0,059068	0,954346	-34,2338	32,52381

Fonte – Autoria própria.

Tabela 4.17 – Coeficientes de regressão da rugosidade Rt para o aço ABNT 1045 recozido.

Fatores	Coeficientes de regressão	Erro padrão	t	p	Limite de confiança (-95%)	Limite de confiança (+95%)
Efeito médio geral	2,6103	5,31714	0,490922	0,636664	-9,651	14,8716
f	40,0320	51,58382	0,776057	0,460041	-78,920	158,9845
r _ε	-0,8095	8,40713	-0,096282	0,925665	-20,196	18,5774
Interação f x r _ε	-22,0950	81,56117	-0,270901	0,793326	-210,175	165,9854

Fonte – Autoria própria.

Os modelos matemáticos para a rugosidade Ra e Rt desenvolvidos com os valores dos coeficientes de regressão apresentados nas Tabelas. 4.16 e 4.17 estão mostrados a seguir:

$$Ra = 0,288167 + 6,437333 * f - 0,275292 * r_{\epsilon} - 0,855 * f * r_{\epsilon} \quad (4.3)$$

$$Rt = 2,6103 + 40,032 * f - 0,8095 * r_{\epsilon} - 22,095 * f * r_{\epsilon} \quad (4.4)$$

4.5.3. Modelagem matemática para o aço ABNT 1045 normalizado

São apresentados nas Tabelas 4.18 e 4.19 os coeficientes de regressão dos parâmetros de rugosidade Ra e Rt, respectivamente, para o aço ABNT 1045 no estado metalúrgico normalizado.

Tabela 4.18 – Coeficientes de regressão da rugosidade Ra para o aço ABNT 1045 normalizado.

Fatores	Coeficientes de regressão	Erro padrão	t	p	Limite de confiança (-95%)	Limite de confiança (+95%)
Efeito médio geral	-1,3641	0,616453	-2,21282	0,057826	-2,7856	0,05744
f	17,5320	5,980468	2,93154	0,018953	3,7410	31,32298
r _ε	2,9513	0,974697	3,02795	0,016360	0,7037	5,19899
Interação f x r _ε	-23,1900	9,455951	-2,45242	0,039786	-44,9955	-1,38454

Fonte – Autoria própria.

Tabela 4.19 – Coeficientes de regressão da rugosidade Rt para o aço ABNT 1045 normalizado.

Fatores	Coeficientes de regressão	Erro padrão	t	p	Limite de confiança (-95%)	Limite de confiança (+95%)
Efeito médio geral	-11,921	4,98359	-2,39209	0,043713	-23,413	-0,4290
f	139,251	48,34796	2,88019	0,020506	27,761	250,7419
r _ε	30,486	7,87975	3,86896	0,004748	12,316	48,6572
Interação f x r _ε	-244,592	76,44484	-3,19958	0,012620	-420,874	-68,3096

Fonte – Autoria própria.

São apresentados abaixo os modelos matemáticos para as rugosidades Ra e Rt desenvolvidos com os valores dos coeficientes de regressão apresentados nas Tabelas. 4.18 e 4.19.

$$Ra = -1,3641 + 17,532 * f + 2,9513 * r_e - 23,19 * f * r_e \quad (4.5)$$

$$Rt = -11,921 + 139,251 * f + 30,486 * r_e - 244,592 * f * r_e \quad (4.6)$$

4.5.4. Modelagem matemática para o aço ABNT 1045 temperado e revenido

Os coeficientes de regressão dos parâmetros de rugosidade Ra e Rt para o aço ABNT 1045 no estado metalúrgico temperado e revenido são apresentados nas Tabelas. 4.20 e 4.21.

Tabela 4.20 – Coeficientes de regressão da rugosidade Ra para o aço ABNT 1045 temperado e revenido.

Fatores	Coeficientes de regressão	Erro padrão	t	p	Limite de confiança (-95%)	Limite de confiança (+95%)
Efeito médio geral	-0,01618	2,75058	-0,005884	0,995450	-6,3590	6,3267
f	12,44733	26,68452	0,466463	0,653323	-49,0873	73,9820
r _e	-0,81821	4,34905	-0,188135	0,855455	-10,8471	9,2107
Interação f x r _e	9,90833	42,19193	0,234840	0,820233	-87,3864	107,2031

Fonte – Autoria própria.

Tabela 4.21 – Coeficientes de regressão da rugosidade Rt para o aço ABNT 1045 temperado e revenido.

Fatores	Coeficientes de regressão	Erro padrão	t	p	Limite de confiança (-95%)	Limite de confiança (+95%)
Efeito médio geral	2,2526	21,6744	0,103930	0,919783	-47,729	52,2339
f	129,1073	210,2725	0,614000	0,556268	-355,782	613,9966
r _e	-3,1860	34,2702	-0,092968	0,928215	-82,213	75,8412
Interação f x r _e	-77,8083	332,4700	-0,234031	0,820839	-844,486	688,8689

Fonte – Autoria própria.

Os modelos matemáticos para as rugosidades Ra e Rt desenvolvidos com os valores dos coeficientes de regressão apresentados nas Tabelas. 4.20 e 4.21 estão apresentados abaixo.

$$Ra = -0,01618 + 12,44733 * f - 0,81821 * r_e + 9,90833 * f * r_e \quad (4.7)$$

$$Ra = 2,2526 + 129,1073 * f - 3,186 * r_e - 77,8083 * f * r_e \quad (4.8)$$

4.6. Comparação Modelos Experimentais Versus Modelos Teóricos

As Tabelas 4.22, 4.23, 4.24 e 4.25 apresentam os resultados dos parâmetros de rugosidade Ra e Rt, em função do avanço e do raio de ponta da ferramenta, obtidos para o aço ABNT 1045 nos diversos estados metalúrgicos analisados.

Os resultados foram calculados da seguinte forma:

- Ra_{exp} e Rt_{exp} experimental – resultados dos valores experimentais;
- Ra_{teor} e Rt_{teor} – determinados pelas Equações teóricas (2.2) e (2.3);
- Ra_{mod} e Rt_{mod} – determinados pelos modelos matemáticos desenvolvidos neste trabalho.

Tabela 4.22 – Resultados de Ra e Rt teóricos, modelados e experimentais para o aço ABNT 1045 como recebido.

f (mm/rot)	r_e (mm)	Ra_{exp} (μm)	Ra_{teor} (μm)	Ra_{mod} (μm)	Rt_{exp} (μm)	Rt_{teor} (μm)	Rt_{mod} (μm)
0,075	0,4	0,432	0,451	0,432	3,149	1,757	3,149
0,125	0,4	0,725	1,252	0,725	4,803	4,882	4,804
0,075	0,8	0,732	0,225	0,732	7,463	0,878	7,464
0,125	0,8	0,793	0,626	0,793	5,514	2,441	5,514

Fonte – Autoria própria.

Tabela 4.23 – Resultados de Ra e Rt teóricos, modelados e experimentais para o aço
ABNT 1045 recozido.

f (mm/rot)	r _ε (mm)	Ra _{exp} (μm)	Ra _{teor} (μm)	Ra _{mod} (μm)	Rt _{exp} (μm)	Rt _{teor} (μm)	Rt _{mod} (μm)
0,075	0,4	0,635	0,451	0,6352	4,625	1,75	4,626
0,125	0,4	0,939	1,252	0,939	6,185	4,882	6,185
0,075	0,8	0,506	0,225	0,499	3,639	0,878	3,639
0,125	0,8	0,787	0,626	0,787	4,756	2,441	4,757

Fonte – Autoria própria.

Tabela 4.24 – Resultados de Ra e Rt teóricos, modelados e experimentais para o aço
ABNT 1045 normalizado.

f (mm/rot)	r _ε (mm)	Ra _{exp} (μm)	Ra _{teor} (μm)	Ra _{mod} (μm)	Rt _{exp} (μm)	Rt _{teor} (μm)	Rt _{mod} (μm)
0,075	0,4	0,435	0,451	0,435	3,379	1,757	3,379
0,125	0,4	0,848	1,252	0,848	5,450	4,882	5,45
0,075	0,8	0,920	0,225	0,920	8,236	0,878	8,236
0,125	0,8	0,869	0,626	0,869	5,415	2,441	5,414

Fonte – Autoria própria.

Tabela 4.25 – Resultados de Ra e Rt teóricos, modelados e experimentais para o aço
ABNT 1045 temperado e revenido.

f (mm/rot)	r _ε (mm)	Ra _{exp} (μm)	Ra _{teor} (μm)	Ra _{mod} (μm)	Rt _{exp} (μm)	Rt _{teor} (μm)	Rt _{mod} (μm)
0,075	0,4	0,887	0,451	0,887	8,327	1,757	8,326
0,125	0,4	1,707	1,252	1,707	13,226	4,882	13,226
0,075	0,8	0,857	0,225	0,857	4,718	0,878	4,718
0,125	0,8	1,873	0,626	1,876	8,06	2,441	8,061

Fonte – Autoria própria.

Da análise das Tabelas 4.22, 4.23, 4.24 e 4.25 pode ser observado que:

- i. Os valores teóricos do parâmetro de rugosidade superficial R_t são sempre menores do que os valores reais (valores obtidos experimentalmente). De acordo com Diniz *et al.* (2014) e Machado *et al.* (2009) o valor de R_t teórico não leva em consideração a dinâmica do processo de usinagem, por isso é sempre menor do que os valores reais, servindo apenas para estimar a rugosidade.
- ii. Quando é analisado o parâmetro R_a , observa-se um comportamento parecido com o do R_t , no entanto algumas divergências são observadas, ou seja, a rugosidade R_a teórica apresenta-se maior do que a rugosidade R_a real, esse comportamento é observado nos mesmos resultados dos ensaios que divergiram dos comportamentos geralmente esperados.
- iii. Quando são comparados os valores de rugosidade preditos pelos modelos teóricos e pelos modelos matemáticos desenvolvidos neste trabalho experimentais a partir dos dados experimentais, os modelos matemáticos mostram-se bastante precisos, no entanto deve ser ressaltado que os mesmos devem ainda ser validados para condições de avanço e raio de ponta diferentes daquelas utilizadas no desenvolvimento do modelo. As condições de validação do modelo deve estar entre os níveis usados para o avanço (0,075 mm/rot e 0,125 mm/rot) e para o raio de ponta da ferramenta (0,4 mm e 0,8 mm), pois o planejamento fatorial que foi usado neste trabalho é um modelo de efeitos fixos.

5. CONCLUSÕES

Ao final deste trabalho, cabe lembrar que o intuito de se trabalhar com o aço em diferentes estados metalúrgicos foi motivada pela necessidade de se investigar a relação entre os parâmetros de rugosidade R_a e R_t com o avanço e o raio de ponta da ferramenta.

Os objetivos propostos, a metodologia adotada, os resultados obtidos e discutidos neste trabalho permitem concluir que:

- A rugosidade superficial mostrou-se dependente do estado metalúrgico da peça.
- Em geral, a diminuição do avanço tende a proporcionar uma diminuição dos parâmetros de rugosidade superficial R_a e R_t do aço ABNT 1045 nas condições analisadas.
- A rugosidade superficial do aço ABNT 1045 tende a sofrer influência do avanço e do raio de ponta da ferramenta, mas a influência só foi verificada nas amostras como recebido influência do raio de ponta sobre R_t , e na amostra normalizada, influência do raio de ponta e da interação entre avanço e raio de ponta sobre R_t , para uma confiança de 95% dos resultados.
- Os modelos teóricos não foram eficientes em estimar a rugosidade para o aço no estado metalúrgico como recebido e normalizado.
- Os modelos matemáticos desenvolvidos mostraram-se promissores na predição de rugosidades superficiais dentro do intervalo de valores estudados, independentemente do estado metalúrgico da peça.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amorim, H. J., 2002 “Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro”, Dissertação de mestrado, UFRGS, Porto Alegre, Brasil.
- Almeida, S. L. R., Filho, M. S., Stipkovic, M. A., Bordinassi, C., Delijaicov, S., 2015 “Modelo numérico experimental da rugosidade no fresamento frontal de acabamento do aço AISI 4140 endurecido”, Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia, Lisboa, Portugal.
- Bezerra, D. C., Machado, I. F.,[s/d], “Avaliação da usinabilidade em torneamento de aço ABNT 1045, para diferentes velocidades de corte e ferramentas”, Disponível em: httpsites.poli.usp.br/dpme26002008ArtigosArt_TCC_018_2008.pdf, Acesso em: 18/10/2016.
- Campos, P. H. S., Paiva, A. P., Ferreira, J. R., Balestrassi, P. P., 2011 “Modelagem da rugosidade (Ra, Rt) no torneamento duro com cerâmica mista alisadora utilizando projetos de experimentos (DOE)”, XXXI ENEGEP, Belo Horizonte, Brasil.
- Cunico, M. W. M., Cunico, M. M., Miguel, O. G., Zawadzki, S. F., Zamora, P., Volpato, N., 2008 “Planejamento fatorial: uma ferramenta estatística valiosa para a definição de parâmetros experimentais empregados na pesquisa científica”, Visão acadêmica, v. 9, n.1, p. 23–32.
- Davim, J. P., Gaitonde, V. N., Karnik, S. R., 2008 “Investigations into the effect of cutting conditions on surface roughness in turning of free machining steel by ANN models” Journal of Materials Processing Technology, v. 205.
- Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L., 2014 " Tecnologia da usinagem dos materiais" Ed. Artliber, 9º Ed., São Paulo, Brasil.
- Domingos, F. C., Freitas, S. V. C, Neto, V. M., 2014, “Análise Metrológica de Rugosímetros”, 3º Congresso Internacional de Metrologia Mecânica (3º CIMMEC), Gramado, Brasil.
- Dotto, A. R., Seimetz, A. C., Carlin, A. C., Führ, H. K., Gelatti, M. R., Alves, V. J., 2014 "Influência das condições de usinagem por torneamento na rugosidade da peça", 4º semana de engenharia e economia FAHOR, Rio Grande do Sul, Brasil.
- Espanhol, V., 2008 “Análise dos esforços de corte e acabamento superficial no torneamento de aço com ferramenta de superfície lisa e com quebra-cavaco”, Dissertação de mestrado, UFRGS, Porto Alegre, Brasil.

- Ferraresi, D., 1970 “Fundamentos da usinagem dos metais” Editora Edgard Blucher, São Paulo, Brasil.
- Gosai, M., Bhavsar, S. N., 2016 “Experimental Study on Temperature Measurement in Turning Operation of Hardened Steel (EN36)”, *Procedia Technology*, v. 23, p. 311–318.
- Junior, C. A. O., 2013 "Torneamento do aço inoxidável super duplex UNS S32750 e influência na resistência à corrosão", Dissertação de mestrado, Unicamp, Campinas, Brasil.
- Kulshreshtha, M., 2013 “Analysis of the Effect of Machining Parameters on Surface Roughness of EN 36 Nickel Steel”, *International Journal of Advanced Information Science and Technology (IJAIST)*, v. 16, n. 16, p. 1–7.
- Lima, F. C., Pereira, R. B. D., Braga, D. U., Moraes, R. F., 2013 “Modelagem das componentes da força de usinagem no torneamento do aço ABNT 1045 através de metodologia de superfície de resposta”, 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (VIII COBEF), Rio de Janeiro, Brasil.
- Lima, D. O., Araujo, A. C., Silveira, J. L. L., 2012 “Influência da profundidade de corte e do avanço na força de corte no fresamento de faceamento. VII congresso nacional de engenharia mecânica (CONEM 2012), São Luís, Brasil.
- Loureiro, D., 2015 “Influência da geometria da ferramenta e das condições de usinagem nas características de superfícies torneadas da liga 625 de Ni” Dissertação de mestrado, Unicamp, Campinas, Brasil.
- Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., Silva, M. B., 2009 "Teoria da usinagem dos materiais", Ed. BLUCHER, 1º Ed., São Paulo, Brasil.
- Matosinhos, F. C. C. C., Silva, R. B., Abrão, A. M., 2002 “Torneamento do aço ABNT 1045 com ferramentas de metal duro e cermet”, II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (II CONEM), João Pessoa, Brasil.
- Montgomery, D. C., 2009 "Introdução ao controle estatístico da qualidade" Ed. LTC, 4º Ed., Rio de Janeiro, Brasil.
- Montgomery, D. C., Runger, G. C., 2009 “Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros”, LTC, 4º Ed., Rio de Janeiro, Brasil.
- Nascimento, M. R., Toloczko, F. R., Suyama, D. I. Hassui, A. 2015 " Estudo comparativo entre a influência do raio de ponta no torneamento da liga AL2011F", 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Bahia, Brasil.
- Nicola, G. L., 2008 “Análise de superfícies fresadas por diferentes estratégias em aço AISI H13 endurecido”, Dissertação de mestrado, UCS, Caxias do Sul, Brasil.

- Paiva, A. P., 2004 “Estudo da minização de erro nas medições de concentração de emulsões por titração Karl-fischer utilizando-se projeto de experimentos”, Dissertação de mestrado, UNIFEI, Itajubá, Brasil.
- Paiva, E. J., 2008 “Otimização de processos de manufatura com múltiplas respostas baseada em índices de capacidade” Dissertação de mestrado, UNIFEI, Itajubá, Brasil.
- Pereira, J. C. C., 2006 “Determinação de modelos de vida de ferramenta e rugosidade no torneamento do aço ABNT 52100 endurecido utilizando a metodologia de superfície de resposta (DOE)” Dissertação de mestrado, UNIFEI, Itajubá, Brasil.
- Ranganath, R. M., Vipin, V. P., 2014 “Effect of rake angle on surface roughness in cnc turning” International Journal of Advance Research and Innovation, v. 2, p. 522-530.
- Reis, A. M., Silva, M. B., 2001 “Análise das superfícies usinadas em presença de aresta postiça de corte”, 1º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (1º COBEF), Curitiba, Brasil.
- Reis, R., 2015 “Estudo da influência da cunha da ferramenta de aço rápido na usinagem do aço abnt 1045 em diferentes condições lubri-refrigerantes” Dissertação de mestrado, UFU, Uberlândia, Brasil.
- Šalak, A., Vasilko, K., Selecká, M. Danninger, H., 2006 “New short time face turning method for testing the machinability of PM steels”. Journal of Materials Processing Technology, v. 176, p. 62–69.
- Sandvik Coromant, Disponível em: <http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/>, Acessado em: 19/02/2017.
- Santos, D. F. G., 2008 “Caracterização microestrutural, mecânica e durante o processo de torneamento de aços ABNT 1045 e ABNT 1145 para avaliação do efeito de enxofre”, Dissertação de mestrado, USP, São Paulo, Brasil.
- Sassi, C. P. Perez, F.G. Myazato, L., Ye, X., Silva P. H. F., Louzada, F., [s.d.] “Modelos de regressão linear múltipla utilizando os softwares R e STATISTICA: Uma aplicação a dados de conservação de frutas” Disponível em: http://conteudo.icmc.usp.br/CMS/Arquivos/arquivos_enviados/BIBLIOTECA_113_RT_377.pdf, Acessado em: 18/10/2016.
- Shabgard, M. R. & Shotorbani, R. M., 2009, “Mathematical Modeling of Machining Parameters in Electrical Discharge Machining of FW4 Welded Steel”. World Academy of Science, Engineering and Technology 52.

- Singh, D., Chadha, V., Msingari, R., 2016 "Effect of nose radius on surface roughness during CNC turning using response surface methodology". International Journal of Recent Advances in Mechanical Engineering, v. 5, n. 2, p. 31–45.
- Stadtlober, A. S., Trevisan, E., Silveira, L. G., Dillschneider, L. H., Rosa, V. B., [S/D] "Análise de rugosidade superficial de superfície torneada em função do avanço e do raio de ponta da ferramenta" Disponível em: https://www.academia.edu/4874452/AN%C3%81LISE_DE_RUGOSIDADE, Disponível em: 03/02/2017.
- Stemmer, C. E., 2001 "Ferramentas de Corte I" Editora da UFSC, 5º Ed., Florianópolis, Brasil.
- Vikram, K. A., Ratnam, C., 2012 "Empirical model for surface roughness in hard turning based on analysis of machining parameters and hardness values of various engineering materials". v. 2, n. 3, p. 3091–3097.
- Yen, Y. C.; Jain, A.; Altan, T., 2004 "A finite element analysis of orthogonal machining using different tool edge geometries" Journal of Materials Processing Technology, v. 146, p. 72–81.

Anexo A

Tabela A.1 – Rugosidade superficial para o aço ABNT 1045 como recebido.

Réplicas	Ensaio	Interações	f (mm/rot)	r_ϵ (mm)	Ra (μm)	Rt (μm)
1	1	[1]	0,075	0,4	0,333	2,439
	2	a	0,125	0,4	0,773	4,746
	3	b	0,075	0,8	0,67	10,08
	4	ab	0,125	0,8	0,773	5,056
2	5	[1]	0,075	0,4	0,554	3,702
	6	a	0,125	0,4	0,849	5,539
	7	b	0,075	0,8	0,998	6,419
	8	ab	0,125	0,8	0,944	6,800
3	9	[1]	0,075	0,4	0,409	3,306
	10	a	0,125	0,4	0,553	4,126
	11	b	0,075	0,8	0,529	5,892
	12	ab	0,125	0,8	0,662	4,686

Tabela A.2 – Rugosidade superficial para o aço ABNT 1045 recozido.

Réplicas	Ensaio	Interações	f (mm/rot)	r_ϵ (mm)	Ra (μm)	Rt (μm)
1	1	[1]	0,075	0,4	0,782	6,172
	2	a	0,125	0,4	0,843	5,192
	3	b	0,075	0,8	0,384	2,692
	4	ab	0,125	0,8	0,559	3,712
2	5	[1]	0,075	0,4	0,660	4,265
	6	a	0,125	0,4	1,330	8,419
	7	b	0,075	0,8	0,477	3,599
	8	ab	0,125	0,8	0,701	4,566
3	9	[1]	0,075	0,4	0,463	3,44
	10	a	0,125	0,4	0,645	4,946
	11	b	0,075	0,8	0,657	4,626
	12	ab	0,125	0,8	1,101	5,992

Tabela A.3 – Rugosidade superficial para o aço ABNT 1045 normalizado

Réplicas	Ensaio	Interações	f (mm/rot)	r_{ε} (mm)	Ra (μm)	Rt (μm)
1	1	[1]	0,075	0,4	0,395	2,952
	2	a	0,125	0,4	0,63	4,399
	3	b	0,075	0,8	0,824	6,74
	4	ab	0,125	0,8	0,998	5,093
2	5	[1]	0,075	0,4	0,607	4,319
	6	a	0,125	0,4	1,093	7,279
	7	b	0,075	0,8	1,065	7,813
	8	ab	0,125	0,8	0,819	6,406
3	9	[1]	0,075	0,4	0,304	2,866
	10	a	0,125	0,4	0,821	4,672
	11	b	0,075	0,8	0,871	10,156
	12	ab	0,125	0,8	0,79	4,746

Tabela A.4 – Rugosidade superficial para o aço ABNT 1045 temperado e revenido.

Réplica	Ensaio	Interações	Avanço (mm/r)	Raio de ponta	Ra (μm)	Rt (μm)
1	1	[1]	0,075	0,4	0,533	3,446
	2	a	0,125	0,4	1,137	10,849
	3	b	0,075	0,8	0,958	4,98
	4	ab	0,125	0,8	2,06	8,785
2	5	[1]	0,075	0,4	1,703	18,369
	6	a	0,125	0,4	3,142	21,583
	7	b	0,075	0,8	0,837	4,756
	8	ab	0,125	0,8	1,595	6,752
3	9	[1]	0,075	0,4	0,426	3,166
	10	a	0,125	0,4	0,844	7,246
	11	b	0,075	0,8	0,776	4,419
	12	ab	0,125	0,8	1,965	8,645