

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROJETO E PROCESSOS DE
FABRICAÇÃO - MESTRADO PROFISSIONAL

Ricardo Teran Muhl

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE USINAGEM DE
ACABAMENTO ATRAVÉS DA RUGOSIDADE NO TORNEAMENTO
DO AÇO ABNT 4340

Passo Fundo

2019

Ricardo Teran Muhl

**OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE USINAGEM DE
ACABAMENTO ATRAVÉS DA RUGOSIDADE NO TORNEAMENTO
DO AÇO ABNT 4340**

Orientador: Prof. Dr. Luiz Airton Consalter

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Passo Fundo

2019

Ricardo Teran Muhl

**OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE USINAGEM DE
ACABAMENTO ATRAVÉS DA RUGOSIDADE NO TORNEAMENTO
DO AÇO ABNT 4340**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Data de aprovação: 11 de julho de 2019.

Os componentes da Banca examinadora abaixo aprovaram a Dissertação:

Professor Doutor Luiz Airton Consalter
Orientador

Professor Doutor Rafael Santiago Floriani Pereira
Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina - IFSC

Professor Doutor Charles Leonardo Israel
Universidade de Passo Fundo - UPF

Professor Doutor Marcelo Hemkemeier
Universidade de Passo Fundo - UPF

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, por sempre guiar meus passos.

À minha esposa Angela e meus filhos Matheus e Livia pelo apoio, carinho e paciência com minha ausência neste período.

Aos meus pais Selmiro e Miraci pelo exemplo de vida e constante amparo que sempre me deram.

Ao professor orientador Prof. Luiz Ailton Consalter agradeço pelo conhecimento, paciência e sabedoria no desenvolvimento desta pesquisa.

À Universidade de Passo Fundo (UPF) pelo longo período que estive presente nesta instituição como colaborador e aluno. Em especial ao programa de Pós-Graduação em Projetos e Processos de Fabricação, possibilitando a realização deste trabalho de pesquisa.

À toda equipe técnica do Núcleo de Tecnologia Mecânica que sempre disponibilizaram equipamentos e máquinas para realização dos experimentos.

Ao prof. Me. Cláudio André Lopes de oliveira que sempre me incentivou aos estudos fazendo parte da minha formação acadêmica.

Ao meu colega prof. Me Claudio Marques Schaeffer pelo companheirismo, aprendizado e amizade.

A todos, que de alguma maneira contribuíram para que esse projeto de vida pudesse acontecer.

RESUMO

Neste estudo, foi avaliado o efeito dos parâmetros de usinagem velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e raio de ponta da ferramenta, sobre os parâmetros de rugosidade, R_a , R_z e R_{ku} , em torneamento a seco do aço endurecido ABNT 4340, com dureza de 55 HRc. O processo de usinagem foi realizado com ferramentas de cerâmica mista (70% de Al_2O_3 + 30% de TiC) com microgeometria de gume “S”. Os experimentos foram planejados e analisados com o auxílio da técnica do planejamento fatorial completo, utilizando a Metodologia de Superfície de Resposta, com a qual foi possível determinar a relação entre os fatores de entrada e os dados de saída. Os resultados observados durante a realização dos ensaios demonstram que o avanço foi o parâmetro que exerceu a maior influência sobre a rugosidade R_a seguido do raio de ponta da ferramenta. A velocidade de corte apresentou pouca significância para este parâmetro. Quando analisada a rugosidade R_z percebe-se que todos os fatores apresentam significância estatística sobre a rugosidade. Ao analisar o parâmetro R_{ku} percebe-se que o único fator significativo é o avanço. Como resultado final, foram delineados os parâmetros de corte ótimos para a condição ideal da rugosidade dentro das faixas analisadas.

Palavras-chave: Torneamento. Aço endurecido. Metodologia de Superfície de Resposta. Ferramenta de cerâmica mista. Rugosidade.

ABSTRACT

This study evaluates the effect of the machining parameters, cutting speed, feed rate, cutting depth and tool radius, over the roughness parameters R_a , R_z and R_{ku} , during the dry turning of hardened steel. The material used was ABNT 4340 with a hardness of 55 HRC. The machining was performed using mixed ceramic tools (70% Al_2O_3 + 30% TiC) with "S" edged microgeometry. The experiments were planned and analyzed with the technique of full factorial planning, using the Response Surface Methodology, where it was possible to determine the relationship between the input factors and the output data. The results observed during the tests showed that the feed rate was the parameter that exerted the greatest influence on the roughness R_a , followed by the tool tip radius. The cutting speed showed little significance. When analyzing the R_z roughness, it is possible to observe that all the factors present statistical significance. For the R_{ku} parameter, the only significant factor is the feed rate. As a final result, the optimal cutting parameters for the ideal roughness condition were delineated within the analyzed ranges.

Keywords: Turning. Hardened steel. Response Surface Methodology. Mixed ceramic tool. Roughness.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Perfil de Rugosidade R_a	16
Figura 2 – Perfil de rugosidade R_z	16
Figura 3 – Definição do parâmetro Kurtosis.....	17
Figura 4 – Mapa topológico de R_{sk} e R_{ku}	18
Figura 5 – Perfil teórico de rugosidade de uma peça torneada.....	25
Figura 6 – Fluxograma do procedimento experimental.....	34
Figura 7 – Corpo de prova.....	35
Figura 8 – Geometria ISO TNGA 1604XX S 01525 6050.....	36
Figura 9 – Comparação entre valores medidos e previstos para rugosidade R_a	45
Figura 10 – Influência dos parâmetros de corte sobre a rugosidade R_a	48
Figura 11 – Gráfico de Interações para Média R_a	49
Figura 12 – Gráfico dos efeitos de Pareto.....	50
Figura 13 – Gráfico de resíduos.....	50
Figura 14 – Gráfico de Efeitos Principais para Média R_a	52
Figura 15 – Otimização da Mínima Rugosidade R_a	53
Figura 16 – Comparação entre valores medidos e previstos para rugosidade R_z	56
Figura 17 – Influência dos parâmetros de corte sobre a rugosidade R_z	58
Figura 18 – Gráfico de interação dos fatores de entrada.....	59
Figura 19 – Gráfico dos efeitos de Pareto.....	59
Figura 20 – Gráfico dos resíduos.....	60
Figura 21 – Gráfico dos efeitos principais.....	61
Figura 22 – Otimização da mínima Rugosidade R_z	62
Figura 23 – Gráfico dos efeitos de Pareto.....	64
Figura 24 – Comparação entre valores medidos e previstos para rugosidade R_{ku}	65
Figura 25 – Otimização da mínima Rugosidade R_{ku}	65
Figura 26 – Gráfico de contorno da rugosidade R_a	74
Figura 27 – Gráfico de contorno da rugosidade R_z	76
Figura 28 – Influência dos parâmetros de corte sobre a rugosidade R_{ku}	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Alguns Parâmetros de rugosidade.	15
Tabela 2 – Composição química do aço ABNT 4340 deste experimento.....	35
Tabela 3 – Parâmetros de corte recomendados pela Sandvik.....	37
Tabela 4 – Parâmetros de corte utilizados e seus níveis.....	37
Tabela 5 – Planejamento de otimização.	38
Tabela 6 – Resultados dos ensaios RSM de rugosidade.....	40
Tabela 7 – Regressão de Superfície de Resposta: R_a versus V_c ; f ; a_p ; r_e	43
Tabela 8 – Otimização da Rugosidade.	53
Tabela 9 – Regressão de Superfície de Resposta: R_z versus v_c ; f ; a_p ; r_e	54
Tabela 10 – Otimização da Rugosidade R_z	62
Tabela 11 – Regressão de superfície de Resposta: R_{ku} versus V_c ; f , a_p ; r_e	63
Tabela 12 – Regressão de Superfície de resposta dos valores de R_a otimizados.	73
Tabela 13 – Regressão de Superfície de resposta dos valores de R_z otimizados.	75

NOMENCLATURA E SIMBOLOGIAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
Al ₂ O ₃	Óxido de Alumínio (Alumina)
a _p	Profundidade de Corte [mm]
CBN	Nitreto de Boro Cúbico
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
<i>f</i>	Avanço por Volta [mm/volta]
HRc	Escala de Dureza Rockwell-C
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JIS	<i>Japanese Industrial Standards</i>
MgO	Óxido de Magnésio
PCBN	Nitreto de Boro Cúbico Policristalino
r _ε	Raio de Ponta da Ferramenta [mm]
R _a	Parâmetro de Rugosidade Desvio Médio Aritmético [μm]
R _{ku}	Parâmetro de Kurtosis de Rugosidade Fator de Achatamento do Perfil.
R _q	Parâmetro de Desvio Médio Quadrático [μm]
RSM	Metodologia de Superfície de Resposta
R _z	Parâmetro de Rugosidade da Altura Total do Perfil [μm]
Si ₃ N ₄	Nitreto de Silício
SiO ₂	Dióxido de Silício
TiC	Carboneto de Titânio
TiN	Nitreto de Titânio
VB _c	Desgaste de Ponta
V _c	Velocidade de Corte [m/min]
Y ₂ O ₃	Óxido de Ítrio
α	Ângulo de Folga ou Incidência [°]
γ	Ângulo de Saída [°]
ε _r	Ângulo de Ponta da Ferramenta [°]
λ	Ângulo de Inclinação [°]
χ _r	Ângulo de Posição ou de Direção (entrada ou ataque) [°]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	O problema da pesquisa	12
1.2	Justificativa.....	13
1.3	Objetivos	13
1.3.1	Objetivo geral.....	13
1.3.2	Objetivos específicos	14
1.4	Estrutura da dissertação	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Rugosidade.....	15
2.2	Fatores que afetam a rugosidade no torneamento de acabamento	18
3	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1	Materiais e equipamentos.....	35
3.2	Métodos	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1	Resultados dos ensaios de rugosidade	40
4.2	Efeito dos parâmetros de corte sobre a rugosidade média R_a	42
4.3	Efeitos dos parâmetros de corte sobre a rugosidade média R_z.....	53
4.4	Efeitos dos parâmetros de corte sobre a rugosidade média R_{ku}	63
5	CONCLUSÕES.....	66
5.1	Sugestão de trabalhos futuros	67
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
5.2	APÊNDICE A – Resultados da Rugosidade R_a.....	73
5.3	APÊNDICE B – Resultados da rugosidade R_z	75
5.4	APÊNDICE C – Resultados da Rugosidade R_{ku}	77

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de ferramentas e máquinas mais rígidas tornaram possível o torneamento de acabamento de aços endurecidos, conseguindo precisão dimensional, forma e acabamento de superfícies, possibilitando a substituição das operações de retificação (DAVIM, 2008; HESSAINIA *et al.*, 2013). Ferramentas de cerâmicas vêm ganhando destaque nos estudos científicos devido a evolução em suas propriedades. Entre elas pode-se destacar as cerâmicas à base de alumina (Al_2O_3), sendo consideradas um dos materiais de ferramenta mais adequados para a usinagem de aços endurecidos, devido à sua elevada dureza a quente, resistência ao desgaste e inércia química, devendo suportar grandes cargas mecânicas, altas temperaturas e baixa taxa de desgaste (BENSOUILAH *et al.*, 2016; DAVOUDINEJAD; NOORDIN, 2014).

O processo de torneamento de acabamento de aços endurecidos difere do torneamento convencional, em função da dureza do material a ser usinado e dos mecanismos envolvidos no processo e da formação do cavaco (AGRAWAL, *et al.* 2015). Este processo tem proporcionado a substituição do processo de retificação cilíndrica, no qual é obrigatório a presença de fluido de corte, aumentando o custo do produto final. Desta maneira, o torneamento com ferramentas de cerâmica estabelece novas condições econômicas e de viabilidade técnica, com a eliminação do uso do fluido de corte no processo. Consequentemente ocasiona um processo de usinagem mais ecológico e sustentável (AOUICI *et al.* 2012).

O aço ABNT 4340, normalmente é utilizado na condição temperado e revenido, constituído pelas estruturas martensítica e/ou bainítica. Atualmente, este material é empregado em aplicações estruturais críticas, nas indústrias aeroespacial, automotiva e marítima, onde há condições severas de trabalho, nas quais são exigidos altos níveis de resistência mecânica sem perda de tenacidade, elevada temperabilidade e resistência à fadiga (BORBA, 2016).

Para implementar um sistema produtivo no torneamento de aços endurecidos com ferramentas de cerâmica, é fundamental a seleção adequada dos parâmetros de usinagem. Os efeitos dos parâmetros sobre a ferramenta e a peça vêm sendo estudados visando sempre sua otimização. Entre os parâmetros, pode-se citar que a velocidade de corte (V_c) possui um efeito mais significativo no desgaste da ferramenta. O avanço (f) e o raio de ponta (r_e) possuem maior influência sobre a rugosidade, enquanto a profundidade de corte (a_p) é o parâmetro de menor influência sobre o acabamento de superfície (BENSOUILAH *et al.* 2016).

Apesar destes benefícios apontados no torneamento cilíndrico de aço endurecidos com ferramentas de cerâmica, existe a necessidade de mais pesquisas, e ensaios para esclarecer a demanda de peças usinadas, e condições ideais para minimizar a rugosidade, desgaste de ferramentas e otimização dos novos parâmetros de corte no processo (KHELLAF *et al.* 2016). Dessa maneira, este trabalho vai ser aplicada a Metodologia de Superfície de Resposta (RSM), em diferentes parâmetros de usinagem, visando a otimização do processo sobre a rugosidade no torneamento do aço ABNT 4340 endurecido.

1.1 O problema da pesquisa

O torneamento de acabamento de aços endurecidos é utilizado para usinar materiais com dureza superior a 45 HRc. Este processo proporciona uma série de vantagens sobre o processo de retificação. Devido a sua versatilidade, permite uma taxa de remoção de material relativamente alta, possibilita a fácil adaptação em contornos complexos de peças e várias operações podem ser realizadas em um mesmo *setup* pois realiza o corte com geometria de ponta única.

A utilização do fluido de corte representa 22% do custo final do produto, pois envolve aquisição, armazenagem, preparo, manutenção e descarte. Oliveira e Alves (2007) estimam que 30% do consumo total anual de fluido de corte é perdido através da evaporação, cavaco, secagem de peças e resíduos gerados durante os processos de usinagem. Desta forma o processo de torneamento com ferramentas de cerâmica elimina a utilização do fluido de corte, fornece benefícios eco sustentáveis e ambientalmente amigável a saúde dos operadores, pois proporciona um corte ecologicamente correto proporcionando economias significativas nos custos (DAVIM, 2008; DENKENA; GROVE; MAISS, 2015).

O desgaste de ferramentas e a rugosidade são classificados entre os aspectos mais importantes no torneamento de aços endurecidos, sendo que o desgaste de ferramenta afeta a precisão dimensional do produto acabado, o acabamento, e a integridade da superfície, enquanto que a rugosidade afeta a resistência à corrosão, à resistência a fadiga e desgaste das peças usinadas (KHELLAF *et al.* 2016).

Por consequência devem ser consideradas algumas etapas importantes para a correta seleção de ferramentas e parâmetros de usinagem durante o torneamento de acabamento de aços endurecidos. Neste caso o planejamento fatorial completo, aplicado à Metodologia de Resposta

é um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas que são úteis para modelar e analisar problemas no qual a resposta de interesse (rugosidade) é influenciada por diversas variáveis de entrada (parâmetros de usinagem) (SURESH; RAO; DESHMUKH, 2002).

1.2 Justificativa

Os processos de fabricação estão em constantes melhorias, garantindo competitividade e sustentabilidade. Neste sentido, a usinagem de acabamento de aços endurecidos com ferramentas de cerâmica tem sido utilizada como alternativa ao processo de retificação, reduzindo custos e aumentando a produtividade. O aço utilizado no presente estudo, foi selecionado por possuir alta temperabilidade, ou seja, apresenta pequenas variações de dureza ao longo de sua seção transversal após tratamento térmico, estando situada em torno de 55 HRc. Por apresentar carbonetos na microestrutura é um aço de difícil usinabilidade, podendo promover o desgaste, microlascamento decorrentes dos impactos dos carbonetos contra o gume da ferramenta.

Portanto, a seleção adequada dos parâmetros de usinagem, ferramentas de corte e máquina-ferramenta devem ser bem planejados com o intuito de alcançar as condições ótimas dos parâmetros de rugosidade R_a , R_z e R_{ku} . Como resultado o torneamento de materiais endurecidos pode produzir acabamento tão bom, ou melhor, quando comparado com o processo de retificação.

1.3 Objetivos

A seguir serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos, que buscam ser alcançados na proposta do trabalho.

1.3.1 Objetivo geral

O trabalho tem como objetivo, avaliar os efeitos dos parâmetros de corte sobre os parâmetros de rugosidade no torneamento de acabamento do aço endurecido ABNT 4340 com ferramenta de cerâmica mista tipo “S”, através da Metodologia de Resposta (RSM), aplicar a

otimização dos parâmetros de corte avaliando as condições ótimas de corte para minimizar a rugosidade dentro dos parâmetros estudados.

1.3.2 *Objetivos específicos*

- Avaliar os efeitos do raio de ponta da ferramenta, avanço, velocidade de corte e profundidade de corte, sobre diferentes parâmetros de rugosidade (R_a , R_z , R_{ku});
- Analisar as significâncias estatísticas das interações entre os parâmetros de corte;
- Utilizar a técnica de Metodologia de Superfície de Resposta aplicada (RSM), para otimizar os parâmetros de corte sobre a rugosidade no torneamento de acabamento do aço endurecido.

1.4 **Estrutura da dissertação**

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos e três apêndices para uma melhor ordenação das ideias, os quais estão descritos a seguir:

Capítulo 1. Introdução – contextualização do tema, abordando introdução, problema da pesquisa, justificativa e os objetivos proposto neste documento.

Capítulo 2. Revisão bibliográfica – Foi apresentada uma revisão bibliográfica, pertinente aos conhecimentos teóricos abordados para o desenvolvimento e entendimento deste trabalho.

Capítulo 3. Materiais e métodos – Estão caracterizados detalhadamente os procedimentos empregados na etapa experimental. Assim como todos os equipamentos, planejamento dos ensaios e recursos imprescindíveis para o desenvolvimento dos ensaios.

Capítulo 4. Resultados e discussões – Apresenta os resultados obtidos com a pesquisa. Este capítulo foi dividido em três seções, o primeiro apresenta os resultados das análises da rugosidade R_a , seguido da rugosidade R_z , e rugosidade R_{ku} respectivamente.

Capítulo 5. Conclusão – Apresentação das conclusões decorrentes dos resultados obtidos deste trabalho assim como sugestões para trabalhos futuros relativos ao tema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentado a revisão bibliográfica empregada para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, evidenciando os conceitos de rugosidade, insertos de cerâmica, torneamento externo de aços endurecidos e por consequência as características para investigar os efeitos dos parâmetros de corte sobre a rugosidade.

2.1 Rugosidade

A avaliação da rugosidade é importante para resolução de muitos problemas, como fricção, deformação de contato, condução de calor, corrente elétrica, estanqueidade das juntas de contato e precisão posicional (GADELMAWLA *et al.*, 2002). O estudo do acabamento da superfície aumenta à medida que cresce a precisão de ajuste entre as peças a serem acopladas. Neste caso, somente a precisão dimensional de forma e posição, não são suficientes para garantir a funcionalidade (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 2015).

Por este motivo, é de grande importância na usinabilidade dos materiais. O estudo da rugosidade da peça usinada. Para defini-la utilizam-se parâmetros e símbolos gráficos normalizados por diferentes países (FERRARESI, 2011). A geometria da superfície real é tão complicada que um número finito de parâmetros não pode fornecer uma descrição completa. Se o número de parâmetros utilizados for aumentado, uma descrição mais precisa poderá ser obtida. Esta é uma das razões para a introdução de novos parâmetros para avaliação superficiais (GADELMAWLA *et al.*, 2002). Os principais parâmetros empregados na quantificação da rugosidade de acordo com a Norma ABNT ISO 4287 (2002), são apresentados na Tabela 1.

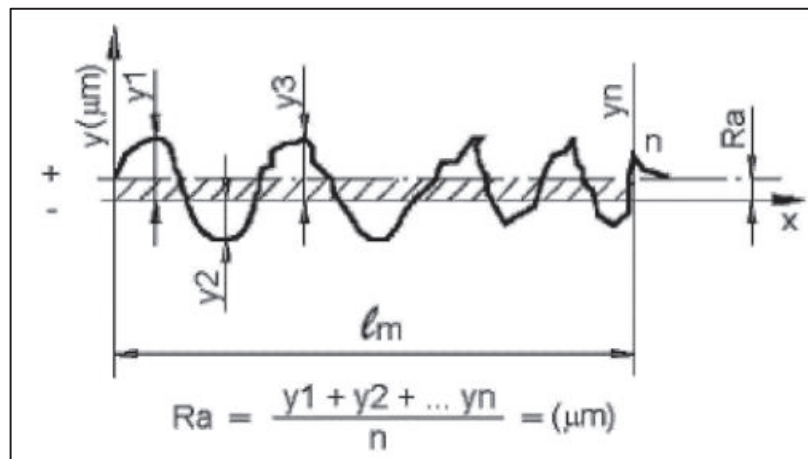
Tabela 1 – Alguns Parâmetros de rugosidade.

Símbolo	Nome
R_a	Desvio médio aritmético
R_q	Desvio médio quadrático
R_t ou $R_{máx}$	Altura total do perfil (atual R_z)
R_z	Altura máxima do perfil
R_{sk}	Fator de assimetria do perfil
R_{ku}	Fator de achatamento do perfil

Fonte: Adaptado de Machado *et al.* (2012, p. 302).

A rugosidade R_a – é definida como a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (l_m). Na Figura 1 é possível visualizar essa grandeza e corresponde à altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento o percurso de medição (CELESTINO, 2015).

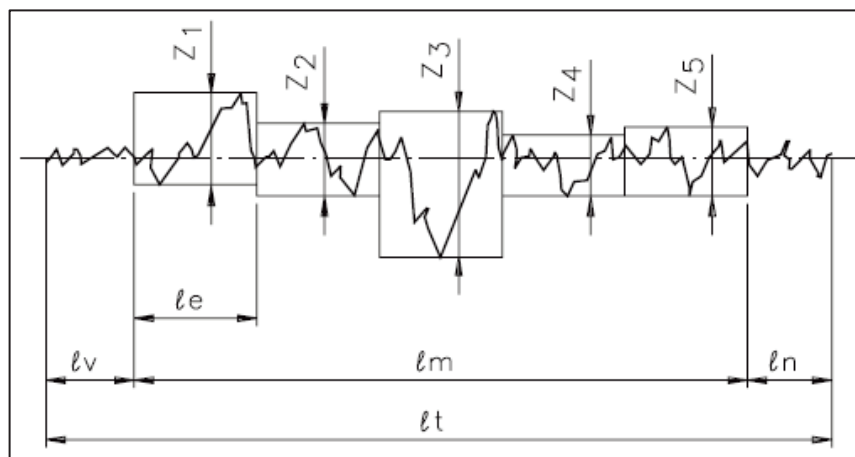
Figura 1 – Perfil de Rugosidade R_a .



Fonte: Adaptado de Celestino (2015).

Rugosidade R_z – é definido como à média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial. Rugosidade parcial (Z) é a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existentes no comprimento de amostragem *cut off*. Na representação gráfica da Figura 2, esse valor corresponde à altura entre os pontos máximo e mínimo do perfil, no comprimento de amostragem (l_e), (GADELMAWLA *et al.*, 2002).

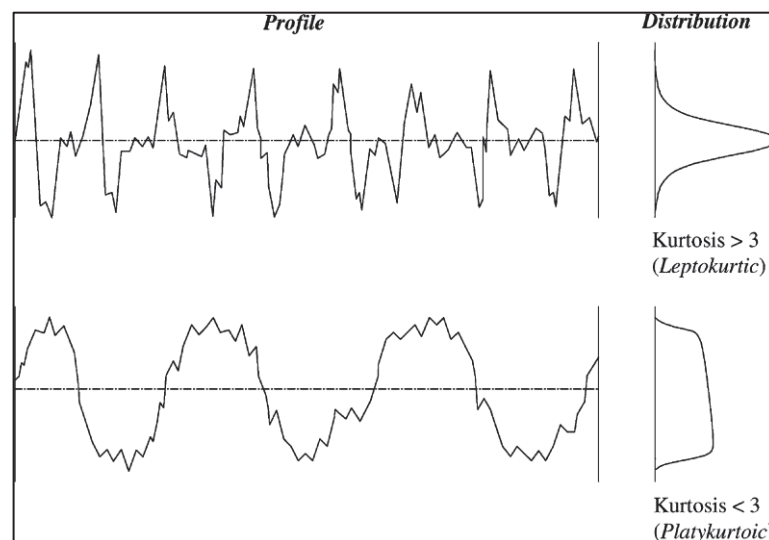
Figura 2 – Perfil de rugosidade R_z .



Fonte: Adaptado de Celestino (2015).

Rugosidade R_{ku} – Além dos parâmetros definidos anteriormente destaca-se ainda outro de natureza estatística, utilizados para avaliar a rugosidade. Pode-se calcular por exemplo o valor de kurtosis R_{ku} , de um perfil, sendo que este representa o achatamento ou a convexidade da curva. Se a distribuição da amplitude de um perfil tiver uma forma gaussiana balanceada o valor de R_{ku} será próximo de 3. Se $R_{ku} < 3$ a curva de distribuição é considerada platicúrtica e tem relativamente poucos picos altos e baixos vales. Se $R_{ku} > 3$ a curva de distribuição é considerada leptocurtoica e apresenta sua superfície com muitos picos altos e vales profundos a Figura 3 representa graficamente os dois perfis. Utilizando como exemplo uma superfície retificada com rebolo afiado terá R_{ku} igual a 3, isto é, a distribuição do perfil se mostra de forma gaussiana balanceada (GADELMAWLA *et al.*, 2002; NUNES, 2011; MACHADO, *et al.*, 2012; SANTOS, 2017).

Figura 3 – Definição do parâmetro Kurtosis.



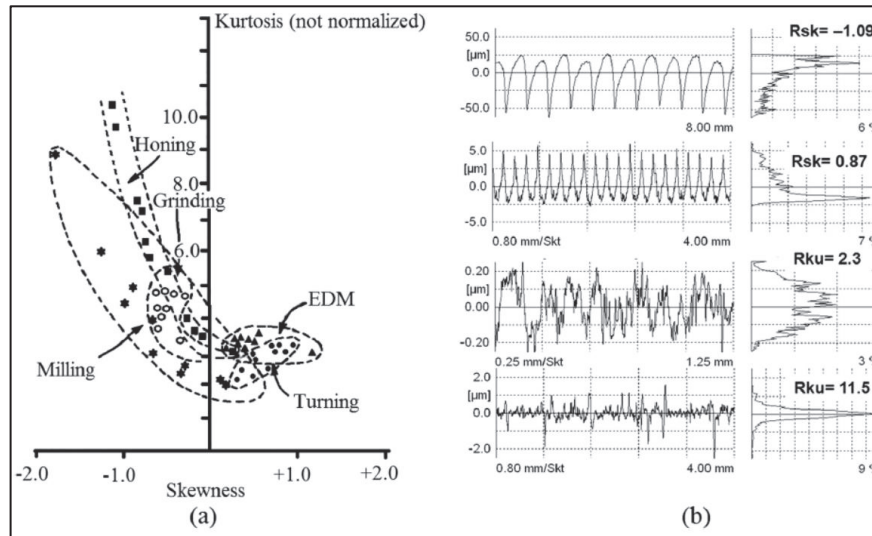
Fonte: Adaptado de GADELMAWLA (2002).

O comportamento em uma superfície pode ser descrito por parâmetros estatísticos de rugosidade, como R_{sk} e R_{ku} . No caso de diferentes tecnologias de corte, os parâmetros estatísticos da rugosidade são definidos em um Espaço Morfológico conforme Figura 4, no qual a rugosidade R_{sk} e a curtose R_{ku} da rugosidade da superfície são traçadas entre si (HORVÁTH; CZIFRA; DRÉGELYI-KISS, 2014).

A Figura 4 (a) representa diferentes superfícies manufaturadas por diferentes processos de fabricação entre eles torneamento, fresamento, retificação e brunimento, assim sendo formam diferentes grupos, portanto, as superfícies geradas possuem valores de R_{sk} e R_{ku} , distintos entre ambos. A Figura 4 (b) ilustra os significados desses parâmetros.

Figura 4 – Espaço Morfológico de R_{sk} e R_{ku} .

(a) Espaço Morfológico com diferentes tecnologias de corte. (b) Superfície de rugosidade com assimetria e curtose diferentes.



Fonte: Adaptado de Horváth, Czifra e Drégelyi-kiss (2014).

2.2 Fatores que afetam a rugosidade no torneamento de acabamento

O torneamento de aços endurecidos foi iniciado e primeiramente reconhecido pelas indústrias automotivas como um meio de melhorar a fabricação de componentes de transmissão (DAVIM, 2008). Ele consiste na usinagem de peças endurecidas que excedem 45 HRC reduzindo o tempo de preparação da máquina, podendo até eliminar a refrigeração (MEDDOUR, *et al.*, 2014). Por suas vantagens, este processo tornou-se um método viável, podendo substituir a retificação em diversos casos de operações de acabamento de peças rotativas. Portanto, para substituir operações de retificação, o torneamento de acabamento de aços endurecidos com ferramentas de cerâmicas está cada vez mais presente nas indústrias (AGRAWAL *et al.*, 2015).

Em muitas aplicações, o corte de materiais ferrosos na sua condição endurecida pode substituir a retificação, proporcionando economias significativas de custo e aumentando a produtividade. O processo de torneamento de metais endurecidos difere do torneamento convencional devido à dureza da peça, da ferramenta de corte e dos mecanismos envolvidos durante a formação do cavaco. Geralmente não há necessidade da utilização do fluido de corte (AOUICI, *et al.*, 2012; DAS; DHUPAL; KUMAR, 2015). Do ponto de vista metalúrgico, materiais com um pequeno desvio de dureza (menos de dois pontos de HRC) ao longo da profundidade de corte permitem uma melhor previsibilidade do processo (DAVIM, 2008).

De forma mais abrangente, a usinagem de materiais endurecidos é a usinagem de peças com dureza acima de 45 HRc, embora na maioria das vezes, o processo indique uma dureza entre 58 a 68 HRc (DAVIM, 2008). Este processo foi desenvolvido como uma alternativa ao processo de retificação, com o objetivo de aumentar a flexibilidade do processo obter rugosidades compatíveis com a retificação e aumentar a taxa de remoção do material desta forma gerando menos problemas ambientais (BENLAHMIDI *et al.*, 2016).

Usinagem de torneamento de acabamento envolve a ponta, ou seja, o raio de ponta do inserto da ferramenta de corte. A finalidade do torneamento de acabamento é gerar produtos com alta precisão dimensional e boa qualidade de acabamento da superfície. A rugosidade de uma superfície usinada é considerada como uma das principais características do produto, uma vez que influencia diretamente a vida em fadiga, o coeficiente de atrito, a resistência ao desgaste e pôr fim a confiabilidade do produto durante o serviço (RATNAM, 2017).

A geometria do gume de corte da ferramenta é essencial no torneamento de aços endurecidos, pois são necessárias ferramentas com maior resistência para suportar as grandes tensões produzidas pelo corte da ferramenta. Como resultado, são usadas arestas com afiações de gume chanfradas e arredondadas (THIELE; MELKOTE, 1999). O desempenho das ferramentas pode ser drasticamente afetado pela preparação do gume de corte, ou seja, a presença de um raio e/ou um chanfro e suas dimensões podem alterar as forças de corte e temperatura e, conseqüentemente, a vida útil da ferramenta e a qualidade do acabamento da superfície do componente usinado (VENTURA *et al.*, 2016).

Em uma operação de torneamento na qual a ferramenta é nova, existe relativamente pouco contato entre ferramenta e material usinado, não ocorrendo vibrações. Então a rugosidade será, teoricamente, formada pelas marcas de avanço deixadas na superfície usinada (MACHADO, *et al.*, 2012). Percebe-se ainda que a rugosidade aumenta com o aumento do avanço, porque gera sulcos helicoidais, resultado do movimento da ferramenta sobre a superfície da peça. Esses sulcos são mais amplos e profundos à medida que o avanço aumenta (AOUICI *et al.*, 2013).

A rugosidade sofre influência de vários parâmetros de usinagem, incluindo a geometria da ferramenta de corte, a geometria do material, a rigidez da máquina-ferramenta, o material da peça, as condições de corte e o material da ferramenta. As condições de corte têm grande efeito sobre a rugosidade, sendo o avanço o parâmetro mais influente, isto é, a altura dos picos e a

profundidade dos vales das marcas de avanço tendem a aumentar com o aumento do avanço (MACHADO, *et al.*, 2012).

Em operações de acabamento a ferramenta deve ser retirada muito antes do desgaste atingir valores que ponham em risco a aresta de corte, a fim de não comprometer a precisão da peça e acabamento da superfície. Nessas operações o valor de desgaste de ponta (VB_c) não deve exceder 0,2 mm para uma qualidade IT7. Nas ferramentas cerâmicas verifica-se geralmente a quebra de pequenos fragmentos do gume cortante (lascamento) antes que os desgastes V_B atinjam valores acentuados (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013).

O efeito da geometria de corte da ferramenta tem sido um problema na compreensão do processo de torneamento. A microgeometria da ferramenta tem influência significativa na formação de cavacos, geração de calor, desgaste da ferramenta, acabamento e integridade da superfície durante o torneamento (KUMAR *et al.*, 2014).

Torneamento de aço endurecido requer o uso de insertos que oferecem alta resistência ao desgaste, estabilidade a altas temperaturas. Esses recursos são encontrados nos Nitreto de Boro Cúbico (CBN), Nitreto de Boro Cúbico Policristalino (PCBN) e ferramentas cerâmicas. As ferramentas cerâmicas representam uma alternativa econômica devido ao seu custo comparado ao CBN (MEDDOUR, *et al.*, 2014). Portanto, a seleção adequada do material da ferramenta é uma das tarefas mais difíceis no torneamento de materiais endurecidos em termos de obtenção de um processo de usinagem eficiente e estável (DAVIM, 2008).

Cerâmicas são materiais muito duros e refratários, suportando mais de 1500 °C com boa estabilidade química. Estas características permitem que elas sejam usadas para a usinagem de metais em altas velocidades de corte e em condições de usinagem a seco (DAVIM, 2008).

Os avanços na tecnologia do processamento cerâmico resultaram em uma nova geração de ferramentas de corte, com alto desempenho, resultando na melhoria de suas propriedades, tais como, resistência à fratura, tenacidade, resistência ao choque térmico, dureza, resistência a formação de cratera, baixa condutividade térmica e elevada resistência ao desgaste (KUMAR; DURAI; SORNAKUMAR, 2003). Desta maneira as ferramentas cerâmicas possibilitam velocidades de corte elevadas, e resistência ao amolecimento pelo calor gerado a altas temperaturas (FERRARESI, 2011). Por outro lado, as ferramentas de corte cerâmicas sofrem desgaste devido à abrasão, aderência ou difusão (KUMAR; DURAI; SORNAKUMAR, 2003).

Cerâmicas são compostas de elementos metálicos e não metálicos, geralmente na forma de óxidos, carbonetos ou nitretos. Sendo assim, possuem algumas propriedades relevantes entre elas dureza a quente e a frio, resistência ao desgaste, e excelente estabilidade química, característica que evita o mecanismo de difusão. Por outro lado, algumas propriedades destes materiais fazem que a usinagem não seja tão fácil, dentre as quais, baixa condutividade térmica, que dificulta a transferência de calor em uma região de contato entre cavaco/ferramenta e peça/ferramenta, e baixa tenacidade, facilitando a quebra da ferramenta (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013). Estes desenvolvimentos proporcionam que as ferramentas cerâmicas sejam utilizadas na usinagem de vários tipos de aço, ferro fundido, materiais não ferrosos e ligas à base de níquel refratário em alta velocidade de corte (KUMAR; DURAI; SORNAKUMAR, 2003).

Pode-se classificar as ferramentas de cerâmicas como segue:

- a) **À base de Óxido de alumínio (Al_2O_3 -alumina)** – que se dividem em cerâmicas puras (muitas vezes chamadas de brancas), cerâmicas mistas e alumina reforçada com “*whiskers*.”
- b) **À base de nitreto de silício (Si_3N_4)** – são cristais de Si_3N_4 com uma fase Intergranular de Dióxido de Silício (SiO_2) que são sintetizados na presença de alumina (sialon) e/ou óxido de ítrio (Y_2O_3) e Óxido de Magnésio (MgO) (MACHADO, *et al.*, 2012).

Ao adicionar partículas não óxidas como Carboneto de Silício (TiC) e Nitreto de Titânio (TiN) na matriz de alumina, a condutividade térmica, a resistência ao choque térmico e a dureza aumentam. Estas ferramentas de cerâmicas compostas mantêm a sua dureza mesmo a temperaturas elevadas. A adição de partículas como TiC e TiN aumenta a resistência à ruptura transversal do compósito em comparação com outras ferramentas de cerâmica branca de alumina simples (KUMAR; DURAI; SORNAKUMAR, 2003).

Com esses insertos, têm-se conseguido excelentes resultados no desbaste e acabamento de aços laminados (velocidades de corte de três a seis vezes maiores que o metal duro). Geralmente são utilizados na usinagem de acabamento de materiais fundidos materiais endurecidos acima de 45 HRc, e superligas. Devido à fragilidade, durante a utilização do material cerâmico, recomenda-se realizar um chanfro na peça, a fim de que o primeiro contato entre ferramenta/peça aconteça em condições mais suaves, evitando a quebra ou lascamento da aresta de corte. (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013; MACHADO, *et al.*, 2012).

O acabamento de uma superfície usinada é a combinação de vários fatores que podem ser divididos em rugosidade, ondulações e falhas (MACHADO, *et al.*, 2012). Por sua vez, a rugosidade de uma superfície é composta de irregularidades finas ou de erros microgeométricos, resultantes da ação inerente ao processo de corte (marcas de avanço, aresta postiça de corte, desgaste da ferramenta). Em muitos casos, a rugosidade é utilizada como parâmetros de saída para controlar um processo de usinagem, sendo dependente de outros fatores como máquina-ferramenta, e operações de usinagem (MACHADO, *et al.*, 2012). O controle da rugosidade é utilizado principalmente em processos de acabamentos ou produto semiacabado, em que a precisão dimensional, forma e acabamento de superfícies deve ser controlada (DAVIM 2008).

Existem vários fatores que afetam a topografia da superfície usinada durante a usinagem de torneamento. Eles incluem principalmente os parâmetros de corte, parâmetros geométricos da ferramenta, desgaste da ferramenta, material da ferramenta e materiais de usinagem. A topografia da superfície do material usinado é mais complexa no torneamento com alta velocidade de corte devido à maior dureza da peça usinada, efeito dos componentes de força, calor, vibração, impacto, etc. na ferramenta de corte (LI *et al.*, 2017).

A rugosidade é um dos parâmetros que devem ser controlados dentro dos limites ideais em um processo de usinagem. Portanto, a previsão, ou monitoramento, da rugosidade das peças usinadas é de grande importância na área de pesquisa (RATNAM, 2017). A rugosidade de uma peça, produzida pelo processo de torneamento de acabamento é mais difícil de controlar do que as dimensões físicas do produto, porque é afetada por vários fatores que podem ser divididos em quatro categorias:

- a) **Fatores devido a parâmetros de usinagem** – como avanço, velocidade de corte e profundidade de corte.
- b) **Fatores devido aos parâmetros da ferramenta de corte** – como desgaste da ferramenta, geometria da ferramenta, material da ferramenta e revestimento da ferramenta.
- c) **Fatores devido às condições de usinagem e máquina-ferramenta** – como torneamento a seco ou molhado, tipo de fluido de corte, aplicação dos fluidos, rigidez e vibrações da máquina- ferramenta.
- d) **Fatores devido às propriedades do material da peça** – tais como dureza, microestrutura, tamanho de grão e inclusões (RATNAM, 2017).

Aouici *et al.* (2013), pesquisaram a influência dos parâmetros de corte sobre rugosidade e forças de corte no torneamento de acabamento do aço endurecido. Para a pesquisa foram utilizadas ferramentas de Nitreto de Boro Cúbico (CBN). Com relação a Análise Estatística de Variância (ANOVA) os autores realizaram interações sobre os efeitos de três parâmetros de corte: velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. Cada parâmetro de corte foi variado em três níveis diferentes ao analisar rugosidade R_a , R_t e R_z . Através dos resultados, é possível perceber que para R_a e R_t , o avanço e a velocidade de corte são os parâmetros que mais influenciam no acabamento. Ao analisar R_z , a velocidade de corte é o fator mais significativo seguido do avanço. Entre as interações, a única que apresentou significância foi $V_c \times f$. A profundidade de corte não apresentou significância em nenhum dos parâmetros, identificou-se influência apenas nas forças de corte. A menor rugosidade foi alcançada com baixos valores de avanço e maiores velocidades de corte.

Kumar *et al.* (2014), mencionam que diversos fatores influenciam a rugosidade no processo de torneamento de aços endurecidos, incluindo fluxo lateral do cavaco, vibração do sistema, fixação do material na máquina, avanço, raio da ponta da ferramenta e velocidade de corte. Isso mostra que a rugosidade da superfície depende principalmente do avanço e do raio da ponta da ferramenta. Rashid e Goel (2016), descrevem que o fluxo lateral do cavaco é fortemente influenciado pelo raio de ponta da ferramenta de corte, avanço e pela progressão do desgaste da ferramenta.

Entre os parâmetros mais comuns no processo de usinagem o que têm maior influência no acabamento da superfície, e na precisão dimensional do produto usinado é o avanço, seguido da velocidade de corte e da profundidade de corte. Esses são os mais facilmente controlados em comparação com outros parâmetros em um processo de torneamento. Existem diversos fatores na ferramenta de corte que influenciam o acabamento da superfície, entre eles a geometria, material, condições e revestimento das ferramentas (RATNAM, 2017).

Meddour *et al.* (2014) utilizaram ferramenta de cerâmica mista para realizar o torneamento a seco do aço endurecido com 59 HRc. Os experimentos foram realizados com objetivo de analisar os efeitos das variáveis independentes dos seguintes parâmetros: velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e raio de ponta da ferramenta em função das respostas de saída forças de corte e rugosidade. Os resultados demonstram que ao utilizar um baixo avanço com raio de ponta maior resulta na menor rugosidade R_a , ao utilizar esta configuração a distância entre o pico e os vales das marcas de avanço são pequenas. No entanto o uso de um

avanço maior com menor raio de ponta da ferramenta resulta em maiores valores de rugosidades. Pode-se observar ainda que altos valores de rugosidade são obtidos ao usar pequenas profundidades de corte, podendo atribuir ao fenômeno de fluxo lateral do material que consiste em comprimir o material usinado pela ferramenta causando sua deterioração. É possível observar uma pequena divergência entre os valores previstos e os testes de confirmação. Portanto, os modelos de superfície de resposta podem ser usados para analisar os valores de rugosidade, variando as condições de corte dentro da faixa dos experimentos.

Denkena, Grove e Maiss (2015), utilizaram ferramenta de metal duro para realizar o torneamento de acabamento interno do aço *American Iron and Steel Institute* (AISI) 52100, com dureza de 62 HRc, visando analisar os efeitos dos parâmetros, como velocidade de corte, avanço e geometria de gume sobre a rugosidade. Os resultados apontam que o avanço e o raio de gume são os principais fatores que influenciam a qualidade da superfície. Ao adotar maiores valores de avanço a rugosidade aumenta devido as marcas deixadas sobre a superfície usinada. Com valores mais baixos de avanço, a influência do raio de gume é maior sobre a rugosidade. Pode-se afirmar ainda que o parâmetro mais significativo que afetou a integridade da superfície no torneamento interno é a geometria de gume, sendo que raios menores levam a uma maior rugosidade. Para finalizar, os autores mencionam que baixos valores de rugosidade podem ser conseguidos com baixos valores de avanço e profundidade de corte e raio de gume maiores.

Machado *et al.* (2012) descrevem que o acabamento da superfície pode ser caracterizado pelo parâmetro R_a . Este parâmetro pode ser calculado teoricamente, embora esse valor seja apenas um indicativo, uma vez que o valor real está acrescido de diversas interferências como vibração, desgaste das arestas de corte, etc. No torneamento, se o avanço é menor que o raio de ponta da ferramenta, o valor de R_a é calculado aproximadamente conforme a Equação (1). Khellaf *et al.* (2016), evidenciam que o mecanismo de formação da rugosidade é muito complicado e depende principalmente do processo de usinagem. Por isso, é muito difícil determinar a rugosidade através de equações analíticas. Modelos geométricos têm sido propostos para estimar esses parâmetros, mas são baseados apenas no avanço e raio de ponta.

$$R_a = \frac{f^2}{31,2r_e} \quad (1)$$

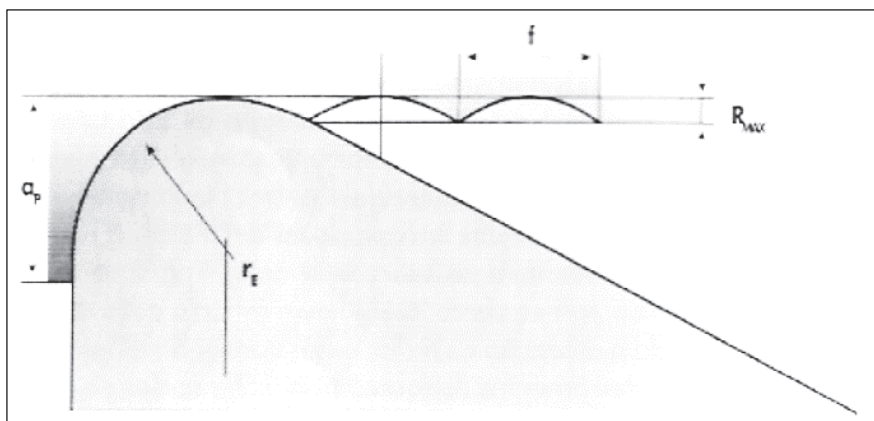
Onde:

f = velocidade de avanço (mm/rot);

r_e = raio de ponta da ferramenta (mm).

O aumento do raio de ponta torna a ponta da ferramenta mais resistente, mas também aumenta a vibração devido ao aumento do atrito causado pela maior área de contato entre a ferramenta e a peça. De acordo com a Figura 5, e Equação (1), o acabamento da superfície depende muito da relação entre avanço e raio de ponta da ferramenta (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013).

Figura 5 – Perfil teórico de rugosidade de uma peça torneada.



Fonte: Diniz (2013, p.125).

Este é o menor valor de rugosidade máxima possível em um processo de torneamento. Normalmente a rugosidade real é maior (e às vezes bem maior) do que a obtida usando a Equação (1). O aumento do raio de ponta diminui a rugosidade, mas não como seria o esperado, devido a fatores como vibração, deformação do cavaco e fluxo lateral do cavaco (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2013). O desempenho de ferramentas cerâmicas na usinagem de materiais endurecidos mostrou que a rugosidade além dos parâmetros corte depende também da geometria da ferramenta (KHELLAF, *et al.*, 2016).

Durante o torneamento a seco do aço AISI 4140 endurecido à 60 HRc Elbah *et al.* (2013), utilizaram insertos de cerâmica. O planejamento experimental foi baseado no arranjo ortogonal de Taguchi. Foi aplicado RSM para validar o modelo de regressão quadrática e determinar os parâmetros de corte que afetam a rugosidade. A análise estatística demonstra que o avanço é o fator mais significativo nos critérios de rugosidade, seguido da profundidade de corte. Já a velocidade de corte, apresenta um efeito de significância mais fraco comparado com os demais. Ao aumentar o avanço formam sulcos que são gerados entre movimento da ferramenta sobre a superfície da peça, sendo esses sulcos mais profundos e mais largos à medida que se aumenta a profundidade de corte. O desgaste de flanco é um fator importante a ser considerado. Sua evolução compromete o acabamento da superfície da peça. Mesmo assim, quando VB é de 0,3 mm, a rugosidade média R_a ficou em valores aceitáveis.

Samardžiová e Neslušán (2013), realizaram o torneamento de acabamento a seco do aço 100 Cr6, com dureza de 62 HRC, com ferramentas de cerâmica mista, utilizando geometria convencional e geometria Wiper. O objetivo foi avaliar os efeitos das ferramentas e comparar os parâmetros de rugosidade R_a , R_z , R_{sk} , R_{ku} , R_{dq} . Variando apenas os valores de avanço. A análise dos resultados demonstra que a rugosidade R_a e R_z da geometria Wiper apresenta um desempenho até duas vezes melhor que a geometria convencional e se encontra de acordo com a literatura. R_{sk} mostra que a ferramenta com geometria convencional apresenta um perfil de rugosidade mais simétrico, já a ferramenta Wiper apresenta mais vales devido à sua aresta de corte menor e mais larga que promove a remoção dos picos. No parâmetro R_{ku} a geometria convencional apresentou um resultado menor. O perfil R_{dq} apresenta valores mais baixos de rugosidade para a geometria Wiper pelo mesmo motivo observado em R_{sk} , em que a forma do perfil da geometria elimina os picos do perfil de rugosidade.

Ferreira *et al.* (2016), descreve que no torneamento de acabamento de aços endurecidos, a seleção da geometria adequada da ferramenta é útil para obter um bom acabamento, mas não é suficiente devendo sempre considerar outros fatores. Desta forma, as rugosidades R_a e R_z dependem dos parâmetros de usinagem, material da peça, material da ferramenta e geometria da ferramenta. E ao analisar os parâmetros estatísticos de rugosidade R_{sk} e R_{ku} , estes sim são definidos apenas pela geometria da ferramenta. Grzesik (2008), especifica que no torneamento de acabamento de aços endurecidos com ferramentas de cerâmica, o desgaste de ferramenta é o principal fator para aumento dos parâmetros de rugosidade R_{sk} e R_{ku} . Valores de R_{ku} acima de 3, observa-se uma, a notável deterioração das propriedades de superfícies usinadas.

Petropoulos, Pandazaras e Davim (2010), descrevem que R_{sk} e R_{ku} avaliam o grau de assimetria, nos casos de distribuição assimétrica, sendo caracterizada como positiva ou negativa. São parâmetros significativos para aplicações tribológicas, como funcionalidade de superfície de rolamento e controle de desgaste, sendo possível detectar a periodicidade do perfil. Parâmetros estatísticos ou híbridos não se correlacionam com as condições de corte, ao realizar o processo de torneamento, o corte é realizado com uma geometria definida e os parâmetros de rugosidade R_a e R_z estão associados ao avanço e velocidade de corte.

Suresh e Basavarajappa (2014), utilizaram ferramentas de cerâmica mista para realizar o torneamento de acabamento do aço AISI H13 temperado à 55 HRC. Neste estudo foi desenvolvido um modelo de resposta de superfície em função dos parâmetros velocidade de corte, avanço e profundidade de corte, obtendo como resposta a rugosidade R_a . Os autores

concluíram que a velocidade de corte tem o efeito mais dominante sobre o desgaste da ferramenta, seguido pelo avanço e profundidade de corte, enquanto avanço é o fator que mais influencia a rugosidade, seguida pela profundidade de corte e velocidade de corte. Uma melhor condição no acabamento da superfície ao adotar velocidades de corte mais altas, foi atribuído a diminuição da força de corte gerando menos vibrações no processo. De acordo com os autores, outro fator que contribui para uma menor rugosidade em velocidade de corte mais elevada, é a dissipação do calor para a superfície da peça à medida que o calor é removido pelos cavacos.

Aouici *et al.* (2014), estudaram o efeito da velocidade de corte, avanço e profundidade de corte sobre a rugosidade, no torneamento de acabamento externo do aço AISI D3, com dureza de 60 HRc. Durante os ensaios foram utilizadas ferramentas de cerâmica mistas. Os resultados apontam que ao aumentar as velocidades de corte, associado a baixas profundidades de corte, com limitações do avanço entre 0,12-0,13 mm/rot, garante forças de corte mínimas, resultando em menor rugosidade R_a . Em relação à significância estatística sobre os parâmetros, o ajuste ideal para menor acabamento é obtido com uma velocidade de corte mais alta e com baixos valores de avanço, especialmente no caso de usinagem de materiais endurecidos. Xiao *et al.* (2016), Bensouilah *et al.* (2016), Agrawal *et al.* (2015), apresentaram pesquisas semelhantes, e os resultados demonstram que o avanço é o parâmetro de maior interferência, com o aumento do avanço, se tem um aumento considerável dos valores da rugosidade R_a . Devido às marcas mais significativas deixadas sobre a superfície usinada. Um aumento do avanço produz um aumento da rugosidade, pois a altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço são proporcionais ao quadrado desse avanço. Para finalizar os autores mencionam que a velocidade de corte é o segundo fator mais significativo na rugosidade.

Suresh, Rao e Deshmukh (2002), desenvolveram um modelo de previsão de rugosidade para usinagem de aços endurecidos utilizando RSM, o torneamento foi realizado com ferramentas de metal duro. Os autores também realizaram otimização do modelo usando Algoritmos Genéticos (GA), para otimizar a rugosidade R_a . Os resultados demonstram que a rugosidade diminui com o aumento da velocidade de corte e aumenta à medida que o avanço aumenta. Também é possível verificar que um aumento na profundidade de corte e a redução do raio de ponta da ferramenta aumenta a rugosidade. A fim de reduzir o tempo de usinagem, em condições ótimas de rugosidade e taxa de remoção do material. Pode-se utilizar uma combinação de alta velocidade de corte com baixos valores de avanço, moderando na profundidade de corte e raio de ponta da ferramenta.

Das, Dhupal e Kumar (2015), utilizaram ferramentas de cerâmica mistas para realizar o torneamento de acabamento do aço AISI 4140, temperado com 52 HRc. Foram analisadas as superfícies usinadas o mecanismo de desgaste da ferramenta. Através da ANOVA, foi possível identificar o efeito dos parâmetros de usinagem sobre a rugosidade R_a , R_q e R_z , além do desgaste de flanco (VB). Percebe-se que o avanço é o principal parâmetro que influencia a rugosidade, seguido da velocidade de corte. Já a profundidade de corte apresenta um efeito muito pequeno, não influenciando a rugosidade. É possível verificar ainda que a ferramenta de cerâmica mista para o processo de torneamento, apresenta uma boa opção produtiva e econômica para substituir as operações de retificação cilíndrica. Efeitos análogos foram relatados nas pesquisas realizadas por Shihab *et al.* (2014) desta forma os autores descrevem que, para um valor constante de avanço, com um aumento na velocidade de corte por unidade de tempo, conseqüentemente reduz R_a e R_z . Similarmente, um aumento no avanço em um valor constante de velocidade de corte produz um efeito contrário, portanto, a rugosidade aumenta.

Li *et al.* (2017), utilizaram ferramentas de PCBN, no torneamento de acabamento do aço temperado, com dureza de 60 HRc. Estas ferramentas foram afiadas uma com ângulo de chanfro constante e outra com ângulo de chanfro variável, ambas com r_e 0,8 mm. Foram comparadas e analisadas a morfologia do cavaco, as forças de corte e a topografia da superfície, a fim de estudar a influência do gume de corte em diferentes avanços. Os autores relatam que a geometria de gume da ferramenta tem um impacto crucial nas propriedades físicas, resistência mecânica e na qualidade da superfície do material. Com o aumento do avanço, os picos de rugosidade da peça aumentam e os vales se aprofundam, o que torna a superfície com maior rugosidade. Com base na análise do desvio médio aritmético da altura do perfil de superfície, assimétrico Ssk, e curtose Sku, a qualidade do acabamento produzida pela ferramenta com de chanfro variável é melhor do que a produzida pela ferramenta com ângulo de chanfro constante. A superfície da peça usinada produzida pela ferramenta com ângulo de chanfro variável geralmente apresentava características normais de curtose com vales côncavos ou picos convexos. A superfície da peça usinada produzida pela ferramenta com ângulo de chanfro constante mostrou picos com mudança de contorno mais suave.

Hessainia *et al.* (2013), utilizaram ferramentas de cerâmica para realizar o torneamento do aço endurecido, explorando a RSM. Neste estudo foram variados os parâmetros de usinagem: avanço, profundidade de corte e velocidade de corte com o objetivo de analisar a rugosidade e realizar a otimização do processo de usinagem. Os resultados demonstram que

todos os fatores e suas interações têm significância estatística e física sobre a rugosidade R_a e R_z , especialmente o avanço. Os autores descrevem que valores mais baixos de rugosidade são obtidos com baixos valores de avanço e altas velocidades de corte, nestas condições, consegue-se gerar menos calor na superfície do material, resultando em melhores acabamentos superficiais.

Ventura *et al.* (2016), avaliaram a usinabilidade do aço AISI 4140, em dois níveis de dureza, 40 e 50 HRc. Foi realizado o torneamento de acabamento a seco com insertos de metal duro. Neste caso foram avaliadas as componentes da força de corte, temperatura e rugosidade. Os resultados revelaram que a microgeometria de gume afeta principalmente a força de avanço, enquanto a força de corte e temperatura de corte não são alteradas drasticamente. Não foi percebida nenhuma relação entre microgeometria e rugosidade R_a , embora marcas irregulares no perfil de rugosidade foram encontradas, sugerindo lascamento do gume. Marcas no vale do perfil foram observadas após o torneamento com gumes arredondados, sendo este fenômeno possivelmente relacionado ao fluxo lateral do cavaco não cortado. A temperatura do cavaco não foi afetada quando aumentado o avanço, pois os cavacos mais grossos conduziram o calor gerado para longe da zona de corte.

Liu *et al.* (2018), realizaram ensaios de torneamento para o aço AISI 4340 temperado, com dureza de 60 HRc. Foram utilizadas ferramentas de corte com geometria de gume chanfrada e arredondada. O objetivo da pesquisa foi avaliar a influência da velocidade de corte e o desgaste das ferramentas na topografia da superfície usinada. Mediante os resultados percebe que quando as ferramentas não apresentam desgaste a diferença da rugosidade entre ambas as ferramentas é relativamente pequena tanto em baixa velocidade ou a alta velocidade de corte. Com o desgaste adicional da ferramenta, o valor R_a aumenta de forma mais significativa. Quando analisado o efeito da velocidade de corte a ferramenta de chanfro constante aumenta a rugosidade R_a em até 50%. Razão deste aumento ocorre pela forma de contato entre ferramenta/peça, provocando ranhuras mais profundas na superfície do material.

Aouici *et al.* (2012) utilizaram ferramentas de CBN, para realizar o torneamento a seco do aço temperado. O objetivo foi estudar os efeitos dos parâmetros velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e dureza do material na rugosidade. O planejamento foi desenvolvido utilizando a metodologia de superfície de resposta. Analisando os fatores através da ANOVA percebe que o avanço é o fator mais significativo seguido da dureza do material. Ao comparar as interações entre os parâmetros, os fatores mais significativos são ($f \times a_p$; $V_c \times H$; $V_c \times H$).

Todos apresentam alguma interação na rugosidade, mas o efeito do avanço é o fator mais significativo para o modelo pois seu aumento gera sulcos helicoidais resultado do contato entre movimento da ferramenta e a peça. Estes sulcos são mais profundos e mais amplos à medida que se aumenta o avanço. Resultados semelhantes a esse foram relatados por Saini, Ahuja e Sharma (2012), que descrevem que a diminuição do avanço, com o aumento da velocidade de corte, resultou em um aumento significativo da qualidade da superfície do material no torneamento. No entanto, o aumento da velocidade de corte também produz um desgaste maior na ferramenta. O aumento da profundidade de corte não afetou significativamente a rugosidade. Aouici *et al.* (2016), consideraram que o avanço é o fator dominante na rugosidade, seguido da velocidade de corte, por último a profundidade de corte. Justificando adotar baixos avanços com baixas profundidades de corte a altas velocidades de corte.

Khellaf *et al.* (2016), realizaram a comparação da rugosidade entre duas ferramentas de corte, sendo uma de cerâmica mista revestidas, e outra de cerâmica mista não revestida, no torneamento do aço AISI H11 tratado termicamente à 50 HRc. Foram avaliados os efeitos da velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e raio de ponta, usando uma metodologia de superfície de resposta RSM. Os resultados mostram que o parâmetro de maior influência sobre a rugosidade é o avanço seguido do raio de ponta da ferramenta.

Zhao *et al.* (2017), realizaram ensaios de torneamento do aço endurecido AISI 52100, numa faixa de dureza de 53 a 58 HRc, a fim de compreender os efeitos da geometria de gume de corte na qualidade da superfície e no desgaste da ferramenta sob diferentes condições de usinagem. As ferramentas utilizadas nos ensaios foram de CBN com três raios de gume diferentes. Os resultados indicaram que há uma variação perceptível na rugosidade e as variações tendem a ser menores com o aumento do raio de gume. Considerando todos os fatores, a ferramenta de corte com raio de gume menor demonstra melhor desempenho de usinagem entre os três grupos de ferramentas apresentados e a estabilidade do processo de corte pode ser a principal razão. Assim, a geometria da ferramenta de corte, especialmente a microgeometria, como o raio de gume chanfrada (largura e ângulo), desempenha um papel importante da ferramenta durante os processos de torneamento de aços endurecidos.

Davoudinejad e Noordin (2014) ao realizarem estudos sobre torneamento a seco do aço ASSAB DF-3 com dureza entre 54 a 58 HRc, utilizaram ferramentas de corte de cerâmica mista. Foram utilizadas duas afiações diferentes uma com microgeometria de gume chanfrado e outra com gume arredondado ambas com raio de ponta de 1,2 mm. Foram analisados os efeitos da

microgeometria no desgaste da ferramenta, forças de corte e acabamento no torneamento. Os resultados demonstram que a microgeometria da aresta de corte da ferramenta afeta o acabamento e em todas as condições de corte as ferramentas com gume chanfrado apresentaram desempenho melhor que a ferramenta com gume arredondada. Os resultados confirmam que o efeito do avanço é o fator mais significativo sobre a vida da ferramenta, seguido da velocidade de corte. Em termos de comportamento de rugosidade, a aresta chanfrada produziu um menor valor de rugosidade R_a , principalmente com baixos valores de avanço.

Ozel, Hsu e Zeren (2004), estudaram os efeitos da geometria de gume de corte de insertos de CBN, com dois tipos de preparação, sendo um gume “chanfrado e outro arredondado” além de outros parâmetros como dureza do material, avanço e velocidade de corte. Através da ANOVA, foi possível medir as forças de corte e avaliar a rugosidade no torneamento de acabamento do aço endurecido AISI H13. Após análise dos resultados constata-se que os efeitos da dureza do material, da geometria de gume, avanço e velocidade de corte, sobre os efeitos da rugosidade R_a são significativos. Especialmente, a geometria de gume arredondado e a menor dureza do material resultaram em rugosidade mais baixa, quando comparada com a geometria de gume chanfrado. Constata-se ainda que o raio de ponta, dureza do material e a velocidade de corte afetam principalmente as forças de corte.

Kumar, Durai e Sornakumar (2003), utilizaram dois tipos de ferramentas de cerâmicas mista, para realizar o torneamento externo de acabamento a seco do aço EN 24, com dureza de 40 e 45 HRC. Nos ensaios foram utilizadas três velocidades de corte diferentes, mantendo avanço e profundidade de corte constantes. Os ensaios foram realizados com o intuito de verificar a influência do mecanismo do desgaste das ferramentas, das forças de corte sobre o acabamento. Através dos resultados é possível constatar que ambas as ferramentas produziram um bom acabamento de superfície com o aumento da velocidade de corte. Ao analisar a influência da dureza do material em função do acabamento percebe-se que a rugosidade R_a aumenta ligeiramente à medida que aumenta a dureza do material, devido ao aumento das forças de corte, outros fatores que contribuem para o aumento da rugosidade são o aumento da temperatura de corte, a deformação da região do raio de ponta da ferramenta e os cavacos serrilhados presos entre o par ferramenta/peça.

Maiss, Grove e Denkena (2017), relatam que o torneamento de acabamento do aço temperado, pode competir com operações de retificação em precisão e produtividade. Os autores descrevem que a microgeometria da ferramenta apresenta um fator importante e

influencia na qualidade da superfície. Ressaltam ainda que o efeito de arredondamento da microgeometria de gume altera as forças de corte, conseqüentemente provoca alteração na rugosidade, na formação do cavaco e na vida útil da ferramenta. Para os ensaios foram utilizados o aço AISI 52100 tratado termicamente com 62 HRc. Após a realização dos ensaios de torneamento os autores descrevem que, o avanço e o raio de gume são os dois principais fatores que influenciam a qualidade da superfície, valores maiores de avanço, aumentam os valores de rugosidade devido a maiores marcas de avanço deixadas sobre a superfície usinada. Com um avanço decrescente, a influência do raio de gume aumenta. Os resultados demonstram que existe uma forte interação entre o avanço e o raio de gume, já a velocidade de corte não afeta significativamente a rugosidade. Baixos valores de rugosidade podem ser produzidos por gumes vivos e baixos valores de avanço devido à forte interação existente entre os parâmetros.

Benlahmidi *et al.* (2016), estudaram os parâmetros, velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e dureza da peça, sobre a rugosidade no torneamento de acabamento do aço endurecido AISI H11, com ferramenta de CBN 7020. Foi aplicado RSM e ANOVA para determinar a influência dos parâmetros de saída. Os resultados indicaram que os parâmetros de rugosidade R_t são influenciados principalmente pelo avanço, e dureza da peça, enquanto a profundidade de corte não apresenta influência significativa na rugosidade. A geometria de gume tem grande efeito na rugosidade, principalmente, o raio de ponta, que deve ser suficientemente grande (pelo menos o dobro do avanço), para diminuir o efeito das marcas de avanço, com apreciável melhoria na rugosidade. Entretanto um raio de ponta excessivamente alto pode induzir a vibrações no processo durante o torneamento (MACHADO, *et al.*, 2012).

Suresh, Basavarajappa e Samuel (2012), estabeleceram uma correlação entre os parâmetros de corte, com potência, força de corte específica e desgaste da ferramenta sobre os efeitos da rugosidade no torneamento de acabamento do aço AISI 4340, tratado termicamente com dureza de 48 HRc. A análise revelou que o avanço tem maior influência sobre a rugosidade R_a seguida da velocidade de corte, e profundidade de corte. A análise revelou que melhores condições de acabamentos superficiais são obtidas com as seguintes condições. Ao adotar baixos valores de avanço as marcas de avanços deixadas sobre a superfície do material são mais rasas e menos profundas. Quando se aplica altas velocidades de corte provoca menos calor na superfície do material provocando menos força de corte conseqüência menor rugosidade, diferente do que acontece quando se aumenta o avanço pois a quantidade de calor gerada aumenta devido a quantidade do material removido em menor tempo. O parâmetro de

profundidade de corte tem um efeito muito menor em comparação com os demais, isso se deve ao aumento do contato entre a ferramenta e o material a ser usinado. Isso melhora as condições de fluxo de calor da zona de corte.

Thiele e Melkote (1999), realizaram torneamento de acabamento do aço endurecido AISI 52100, com ferramentas de CBN. Com a finalidade de estudar a influência da geometria de gume e dureza do material sobre a rugosidade R_a e as forças de corte. O estudo revelou que o efeito da geometria de gume na geração de superfícies em torneamento endurecido é significativo. Aumentando o raio de gume tende a aumentar a rugosidade R_a , já o efeito da dureza do material pela interação da geometria de gume na rugosidade também foi considerado muito significativo. Especificamente, a afiação de gume maior resulta em valores de rugosidade mais altos do que as afiações de gume menores devido ao aumento de contato. Para finalizar o autor relata que o efeito de afiação de gume da ferramenta na rugosidade diminui com o aumento da dureza do material a ser usinado.

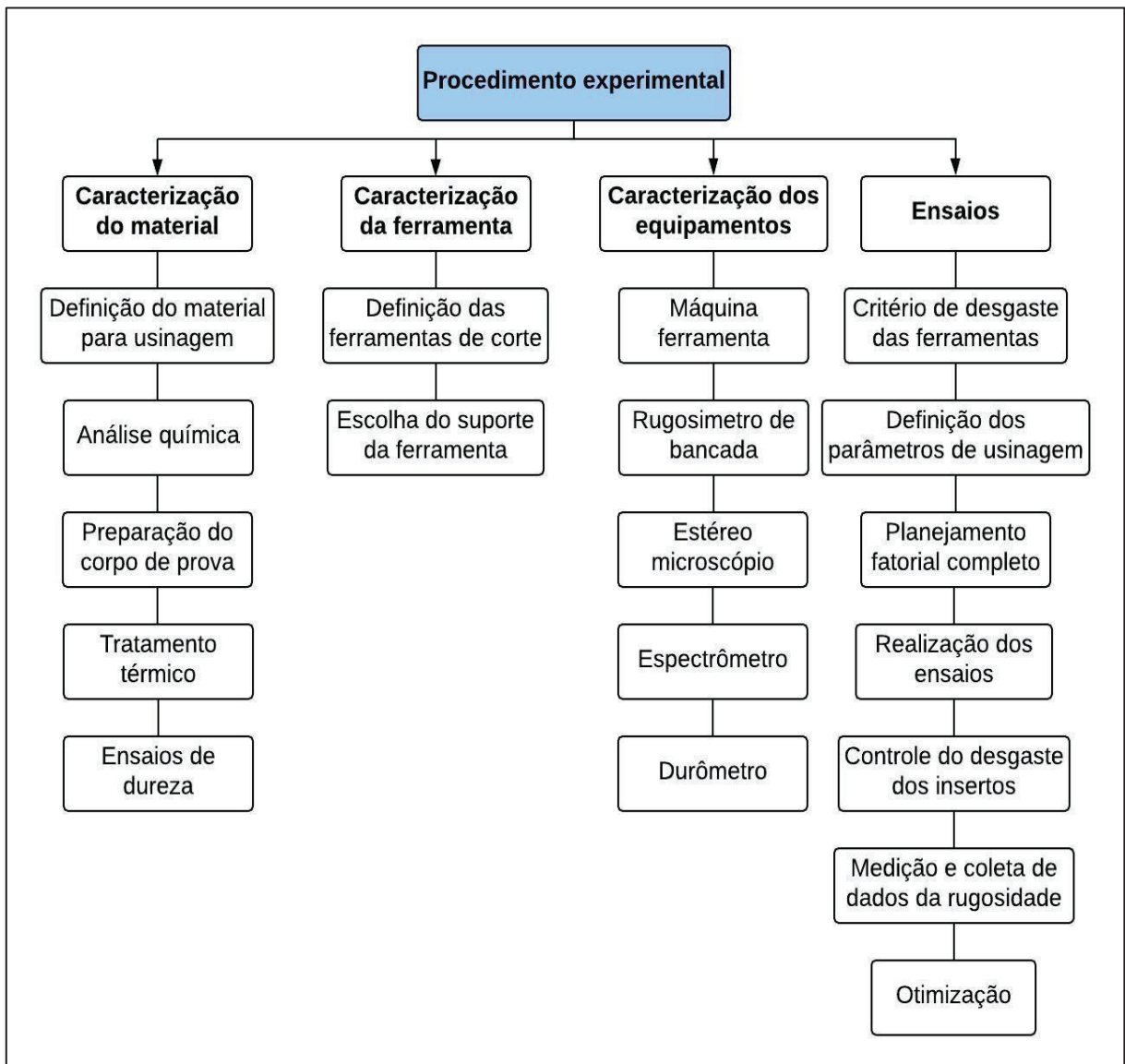
Özel *et al.* (2007), analisaram o acabamento e desgaste do flanco da ferramenta no torneamento de acabamento do aço AISI D2, com dureza de 60 HRc. Foi utilizado insertos de cerâmica mista. Foram variados dois parâmetros de corte, velocidade de corte e avanço sendo a profundidade de corte constante. Os resultados indicam que pode ser obtido valores de R_a na ordem de (0,18-0,20) μm proporcionando melhor vida útil da ferramenta. O desgaste do flanco atinge um valor de critério de vida útil da ferramenta de VB_C 0,15 mm por volta de 15 min de tempo de corte em altas velocidades de corte devido a temperaturas elevadas. Esses resultados mostram que os modelos de rede neural são adequados para prever padrões de desgaste de ferramentas e de rugosidade da superfície para uma série de condições de corte.

Qehaja *et al.* (2015), utilizaram ferramentas de metal duro para torneamento a seco. Os ensaios foram desenvolvidos com base na RSM para estudar os efeitos dos parâmetros avanço, geometria da ferramenta, raio de ponta e tempo de corte sobre a rugosidade R_a . Foram apresentados os seguintes resultados. Ao aumentar o raio da ponta com o menor avanço e o maior tempo de corte leva à diminuição da rugosidade R_a . Verifica-se que o avanço tem o efeito mais significativo na rugosidade, seguido pelo raio da ponta e pelo tempo de corte. Para obter melhores acabamentos superficiais, os autores recomendam níveis mais elevados de velocidade de corte, profundidade de corte e níveis mais baixos de avanço. Ao analisar os gráficos de rugosidade percebe-se que o raio de ponta da ferramenta é uma função decrescente quase linear e o avanço e tempo de corte apresentam uma função crescente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentado o procedimento experimental aplicado à pesquisa, nesta etapa foi realizado a caracterização do material, das ferramentas, equipamentos e realização dos ensaios. O fluxograma apresentado na Figura 6 mostra a sequência de ações e recursos deste projeto de pesquisa, sendo planejado para atender os objetivos propostos.

Figura 6 – Fluxograma do procedimento experimental.



Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

3.1 Materiais e equipamentos

A seguir serão apresentados os materiais e equipamentos utilizados na execução dos experimentos deste trabalho.

Em conformidade com os estudos, o material escolhido para os ensaios realizados neste projeto de pesquisa foi o aço ABNT 4340 endurecido a 55 ± 1 HRc. Este aço geralmente é utilizado em componentes para sistema mecânicos, pois possui alta temperabilidade, principalmente em aplicações estruturais no qual necessita homogeneidade de dureza ao longo da seção transversal. Suas principais aplicações são: eixos, engrenagens planetárias, colunas, mangas e cilindros. Para realização da análise da composição química deste material Tabela 2 utilizou-se o espectrômetro de energia dispersiva de raio-x (EDS), da marca OFFORD *instrumets*.

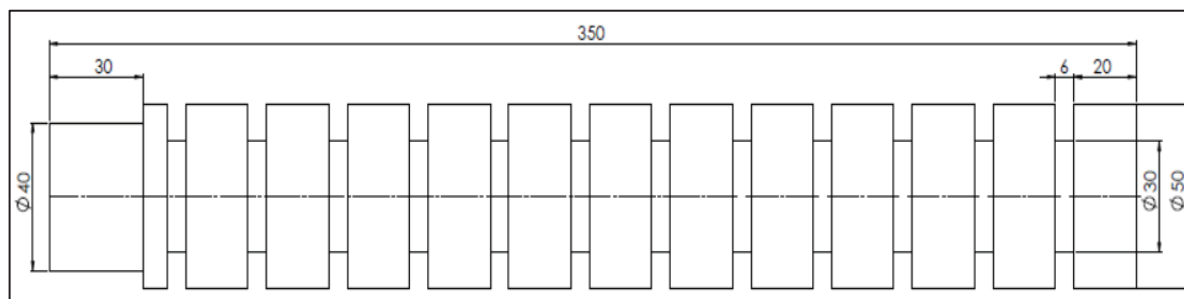
Tabela 2 – Composição química do aço ABNT 4340 deste experimento.

ABNT	%C	%SI	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%Cu	%Al
4340	0,569	0,317	0,696	0,019	0,007	0,821	0,222	1,81	0,171	0,03

Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

Considerando o corpo de prova, foi confeccionado uma única peça para realização dos ensaios. O corpo de prova contém 12 segmentos em sua superfície cilíndrica. Em cada um dos segmentos foram realizados chanfros de $0,5 \times 45^\circ$ assegurando que o primeiro e o último contato entre a ferramenta e o segmento do corpo de prova sejam suavizados, evitando a quebra ou lascamento da ponta da ferramenta. Na Figura 7 pode ser visualizado a forma e as dimensões do corpo de prova.

Figura 7 – Corpo de prova.



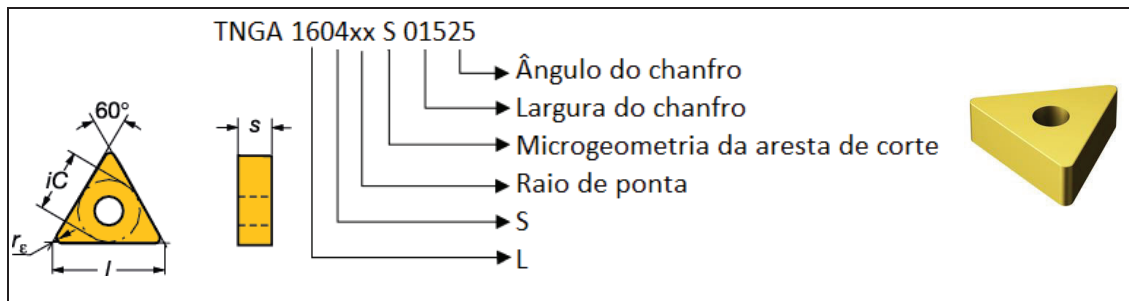
Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

Após confecção do corpo de prova, este material passou pelo processo de tratamento térmico, estipulando uma dureza de 55 HRc. Desta maneira foram realizados os primeiros ensaios de dureza.

Para a fixação do inserto de corte foi utilizado o suporte ISO MTJNR 3225 P16, com ângulo de folga (α) de 6° , ângulo de posição (χ_r) com 93° , ângulo de saída (γ) de -6° e ângulo de inclinação (λ) com -6° fabricante Sandvik.

Foram utilizados insertos intercambiáveis de cerâmica mista (70% de Al_2O_3 + 30% de TiC), ISO TNGA 1604XX S 01525 6050, recobertos com uma camada de nitreto de titânio (TiN), com microgeometria de gume “S” chanfrado e arredondado. Foram utilizados três raios de ponta (r_c) 0,4; 0,8 e 1,2 mm e ângulo de ponta (ϵ_r) de 60° , fabricados por Sandvik. As dimensões geométricas estão representadas na Figura 8.

Figura 8 – Geometria ISO TNGA 1604XX S 01525 6050.



Fonte: Adaptado catálogo Sandvik.

Para o torneamento do corpo de prova para realização dos ensaios foi utilizado um torno da marca Romi modelo ES 40A, com potência máxima de 15 CV (11 kW), e rotação máxima de 1700 rpm com placa universal de três castanhas.

Em relação a coleta de dados de rugosidade foi utilizado um rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-410, com resolução $0,01 \mu\text{m}$ (range $800 \mu\text{m}$), $0,001 \mu\text{m}$ (range $80 \mu\text{m}$) e $0,0001 \mu\text{m}$ (range $8 \mu\text{m}$), com raio de ponta do apalpador de diamante de $5 \mu\text{m}$.

Com relação ao registro e mensuração das imagens ópticas foi utilizado um estéreo microscópio binocular, da marca ZEISS, modelo STEMI 2000-C com aumento máximo de 50x.

Tendo como a finalidade de avaliar a uniformidade da dureza do corpo de prova, foram realizados ensaios na escala HRc em um durômetro Heckert. A força aplicada foi de 1470 N durante 15s por impressão. Foram realizados 13 ensaios de dureza na face do corpo de prova, partindo da periferia do material até o centro da circunferência e a distância definida entre cada impressão foi de 1 mm, com dureza média de 55 HRc. Durante a realização dos ensaios foram realizadas medições de dureza na circunferência do material em diversos segmentos com dureza média de 54 HRc.

3.2 Métodos

Esta seção apresenta a sequência da metodologia utilizada para execução dos experimentos.

Tratando-se de uma operação de torneamento de acabamento, as velocidades de corte são relativamente altas, aliado à baixas profundidades de corte, desta forma resulta em uma pequena área de contato entre o gume da ferramenta e a peça. Sendo assim, o controle do processo foi planejado para minimizar possíveis avarias nas ferramentas. De tal modo, foi adotado como critério de desgaste de ferramenta máximo para esses experimentos. um desgaste de ponta VBC com valor menor ou igual a 0,1 mm. O desgaste dos insertos foram monitorados e registrados durante a realização de todos os ensaios.

Os parâmetros de usinagem como avanço (f), velocidade de corte (V_c), raio de ponta (r_e), e a profundidade de corte (a_p), foram determinados baseando-se em valores utilizados em outros trabalhos de pesquisa para o aço ABNT 4340, permanecendo dentro dos limites recomendados pelo fabricante da ferramenta para operação de acabamento. Conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros de corte recomendados pela Sandvik.

r_e (mm)	V_c (m/min)	f (mm/rot)	a_p (mm)
Raio 0,4	120 – 170	0,05 – 0,2	0,1 – 0,5
Raio 0,8	105 – 170	0,05 – 0,25	0,1 – 1
Raio 1,2	90 – 170	0,05 – 0,3	0,1 – 1,5

Fonte: Adaptado catálogo Sandvik.

Com base nos parâmetros de corte recomendado pelo fabricante de ferramentas, e outras pesquisas, os parâmetros de corte escolhidos para os ensaios de torneamento de acabamento e seus níveis estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros de corte utilizados e seus níveis.

Parâmetros	Símbolo	Unidade	Níveis		
			- 1	0	+1
Velocidade de corte	V_c	m/min	100	130	160
Avanço	f	mm/rot	0,052	0,104	0,15
Profundidade de corte	a_p	mm	0,2	0,35	0,5
Raio de ponta	r_e	mm	0,4	0,8	1,2

Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

O planejamento experimental foi realizado através da Metodologia de Superfície de Resposta sendo um procedimento capaz de determinar uma relação entre os parâmetros independentes do processo de entrada e os dados de saída (resposta do processo), explorando o efeito dos parâmetros nas respostas. O planejamento foi elaborado nas seguintes etapas:

- a) Identificação dos fatores importantes que influenciam a rugosidade na usinagem do aço ABNT 4340;
- b) Determinação através dos limites superiores e inferiores dos fatores identificados;
- c) Desenvolvimento do planejamento do projeto experimental usando o desenho dos experimentos;
- d) Realização dos ensaios de acordo com o planejamento fatorial;
- e) Modelagem empírica para aproximar a relação, isto é, a superfície de resposta entre as respostas e fatores;
- f) Análise dos resultados utilizando ANOVA;
- g) Otimização, confirmação e verificação as características de desempenho previstas.

No presente trabalho, a resposta (Y) do processo é equivalente à rugosidade, sendo função dos parâmetros de corte: Velocidade de corte, avanço, profundidade de corte, e raio de ponta da ferramenta. Esta relação é descrita genericamente pela Equação (2).

$$Y = \varphi (re, f, vc, ap) \quad (2)$$

Sendo que φ é a função de resposta. A aproximação de (Y) é proposta usando um modelo matemático linear quadrático sendo adequado para estudar os efeitos das interações dos parâmetros do processo sobre as características de usinabilidade. A metodologia aplicada foi baseada nas pesquisas realizadas por Aouici *et al.* (2012; Aouici *et al.* (2014).

Os dados necessários para desenvolver os cálculos foram coletados por meio do planejamento baseado no experimento central composto, representado na Tabela 5, com 32 pontos no cubo, 14 ensaios de pontos centrais e 16 pontos axiais, gerando desta maneira um experimento fatorial aleatorizado com quatro fatores uma réplica e um bloco base, totalizando 62 ensaios.

Tabela 5 – Planejamento de otimização.

Fatores:	4	Réplicas:	1
Ensaio base:	31	Total de ensaios:	62
Blocos Base:	1	Total de blocos:	1

Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

Início dos experimentos – Com o corpo de prova fixado entre placa e ponto, um primeiro passe foi realizado com uma ferramenta própria para esta finalidade, sendo que essa não faz parte dos estudos, portanto não foi detalhada. Este primeiro passe tem por objetivo eliminar a camada de óxido e amenizar quaisquer erros advindos do processo de tratamento térmico e empenamento do corpo de prova.

Realização dos experimentos – Após o primeiro passe, inicia-se o corte a seco com a ferramenta de cerâmica com raio de ponta 0,4 mm na condição menos severa. Comprimento de avanço de 20 mm conforme Figura 7. Foi utilizada uma única aresta da ferramenta para cada segmento usinado do corpo de prova, ou seja, para cada combinação de condição de corte essa ferramenta é marcada e retirada do suporte seu desgaste monitorado e registrado. Repete-se o mesmo procedimento para as demais arestas de corte da ferramenta. Para cada raio de ponta foram utilizados dois insertos, totalizando 12 condições de corte/ r_e . Após realizados todos os ensaios do mesmo raio de ponta da ferramenta, retira-se a peça da máquina realiza-se as medições de rugosidade.

Foram adotados os parâmetros, R_a , R_z , R_{ku} , para medições da rugosidade do corpo de prova usinado. As medições da rugosidade sobre a peça ocorreram em três pontos distintos equidistantes de 120° ao longo da circunferência. O planejamento fatorial foi desenvolvido por meio do *software* estatístico Minitab®18.

Repete-se o mesmo procedimento para as demais ferramentas de corte com raio de ponta 0,8 e 1,2 mm. Os ensaios foram replicados mais uma vez com as mesmas ferramentas. O planejamento experimental completo consiste em 62 ensaios, conforme descrito na Tabela 6 sempre respeitando o desgaste VB_c máximo 0,1 mm.

Todos os experimentos foram realizados no Núcleo de Tecnologia Mecânica da Universidade de Passo Fundo – UPF, campus I, Passo Fundo, RS.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta três análises de rugosidade, divididos em subcapítulos. A primeira seção apresenta os resultados das análises da rugosidade R_a , seguido das análises de rugosidade R_z , e em seguida as análises da rugosidade R_{ku} . Desta maneira serão apresentados os resultados dos experimentos do torneamento externo do aço ABNT 4340, endurecido a 55 ± 1 HRC, com ferramenta cerâmica mista tipo “S”, com o objetivo de analisar os efeitos dos parâmetros: velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e raio de ponta da ferramenta, visando atender os objetivos propostos na Seção 1.3.

4.1 Resultados dos ensaios de rugosidade

Na Tabela 6 é possível visualizar o planejamento da Metodologia de Superfície de Resposta RSM, que consiste em 62 ensaios. A primeira coluna representa a ordem sequencial dos ensaios, a segunda coluna representa a ordem de execução gerada pelo *software* Minitab, já que os mesmos foram aleatorizados. Nas demais colunas estão representados os dados de entrada do processo e as três últimas colunas apresentam as respostas. Em cada uma das linhas está representado a ordem dos ensaios, os parâmetros de corte, e seus respectivos valores de rugosidades R_a , R_z e R_{ku} sendo apresentados apenas as médias das rugosidades. A rugosidade R_a foi obtida num intervalo de $0,184 - 2,272 \mu\text{m}$, a rugosidade R_z num intervalo entre $1,137 - 9,279 \mu\text{m}$ e a rugosidade R_{ku} ficou entre $1,986 - 3,313 \mu\text{m}$.

Tabela 6 – Resultados dos ensaios RSM de rugosidade.

Ordem Ens.	Ordem pad.	Tipo Pt	Blocos	Parâmetros de corte				Rugosidades médias		
				V_c (m/min)	f (mm/rot)	a_p (mm)	r_e (mm)	R_a (μm)	R_z (μm)	R_{ku} (μm)
1	32	1	1	100	0,05	0,2	0,4	0,343	1,989	2,479
2	59	0	1	130	0,1	0,35	0,8	0,393	2,004	2,195
3	22	-1	1	130	0,1	0,5	0,8	0,393	2,114	2,263
4	50	-1	1	130	0,05	0,35	0,8	0,248	1,789	2,991
5	20	-1	1	130	0,15	0,35	0,8	0,798	3,686	2,422
6	19	-1	1	130	0,05	0,35	0,8	0,954	4,344	2,207
7	23	-1	1	130	0,1	0,35	0,4	0,853	4,169	2,831
8	18	-1	1	160	0,1	0,35	0,8	0,350	1,905	2,166
9	21	-1	1	130	0,1	0,2	0,8	0,332	1,715	2,091
10	5	1	1	100	0,05	0,5	0,4	0,374	2,145	2,451
11	42	1	1	100	0,15	0,2	1,2	0,584	2,388	2,202
12	29	0	1	130	0,1	0,35	0,8	0,403	2,025	2,379
13	51	-1	1	130	0,15	0,35	0,8	0,821	3,698	2,351
14	58	0	1	130	0,1	0,35	0,8	0,371	1,950	2,413

15	41	1	1	160	0,05	0,2	1,2	0,184	1,189	2,625
16	34	1	1	100	0,15	0,2	0,4	2,272	9,279	2,200
17	31	0	1	130	0,1	0,35	0,8	0,369	1,943	2,428
18	6	1	1	160	0,05	0,5	0,4	0,362	2,262	2,524
19	39	1	1	160	0,15	0,5	0,4	2,028	8,780	2,271
20	3	1	1	100	0,15	0,2	0,4	2,272	9,279	2,200
21	16	1	1	160	0,15	0,5	1,2	0,785	3,394	1,986
22	62	0	1	130	0,1	0,35	0,8	0,369	1,960	2,423
23	35	1	1	160	0,15	0,2	0,4	1,877	7,925	2,414
24	38	1	1	100	0,15	0,5	0,4	2,179	9,207	2,538
25	48	-1	1	100	0,1	0,35	0,8	0,371	2,002	2,287
26	4	1	1	160	0,15	0,2	0,4	1,877	7,925	2,414
27	55	-1	1	130	0,1	0,35	1,2	0,193	1,163	2,507
28	43	1	1	160	0,15	0,2	1,2	0,716	3,084	2,063
29	13	1	1	100	0,05	0,5	1,2	1,277	5,342	2,128
30	61	0	1	130	0,1	0,35	0,8	0,419	1,995	2,198
31	36	1	1	100	0,05	0,5	0,4	0,374	2,145	2,451
32	47	1	1	160	0,15	0,5	1,2	0,785	3,394	1,986
33	11	1	1	100	0,15	0,2	1,2	0,584	2,388	2,202
34	49	-1	1	160	0,1	0,35	0,8	0,407	1,978	2,118
35	28	0	1	130	0,1	0,35	0,8	0,422	2,051	2,204
36	17	-1	1	100	0,1	0,35	0,8	0,306	2,049	3,313
37	45	1	1	160	0,05	0,5	1,2	0,186	1,137	2,654
38	24	-1	1	130	0,1	0,35	1,2	0,185	1,147	2,633
39	46	1	1	100	0,15	0,5	1,2	0,367	1,929	2,237
40	52	-1	1	130	0,1	0,2	0,8	0,277	1,841	3,232
41	57	0	1	130	0,1	0,35	0,8	0,288	1,861	2,850
42	56	0	1	130	0,1	0,35	0,8	0,277	1,773	2,850
43	8	1	1	160	0,15	0,5	0,4	2,028	8,780	2,271
44	1	1	1	100	0,05	0,2	0,4	0,343	1,989	2,479
45	14	1	1	160	0,05	0,5	1,2	0,186	1,137	2,654
46	7	1	1	100	0,15	0,5	0,4	2,179	9,207	2,538
47	2	1	1	160	0,05	0,2	0,4	0,324	1,939	2,816
48	33	1	1	160	0,05	0,2	0,4	0,324	1,939	2,816
49	30	0	1	130	0,1	0,35	0,8	0,285	1,848	2,867
50	12	1	1	160	0,15	0,2	1,2	0,716	3,084	2,063
51	27	0	1	130	0,1	0,35	0,8	0,257	1,787	3,098
52	60	0	1	130	0,1	0,35	0,8	0,263	1,903	3,150
53	54	-1	1	130	0,1	0,35	0,4	0,863	3,916	2,335
54	15	1	1	100	0,15	0,5	1,2	0,627	2,813	2,221
55	53	-1	1	130	0,1	0,5	0,8	0,359	1,973	2,508
56	9	1	1	100	0,05	0,2	1,2	0,584	2,388	2,202
57	25	0	1	130	0,1	0,35	0,8	0,338	1,885	2,550
58	40	1	1	100	0,05	0,2	1,2	0,186	1,356	3,153
59	44	1	1	100	0,05	0,5	1,2	1,277	5,342	2,128
60	10	1	1	160	0,05	0,2	1,2	0,184	1,189	2,625
61	37	1	1	160	0,05	0,5	0,4	0,362	2,262	2,524
62	26	0	1	130	0,1	0,35	0,8	0,323	1,910	2,826

Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

O tratamento estatístico dos dados foi realizado em três fases. A primeira fase tratou da ANOVA, dos efeitos dos fatores e das suas interações com o objetivo de determinar os parâmetros que mais influenciam a rugosidade. A segunda fase, a regressão quadrática, permite

obter as correlações entre parâmetros. Posteriormente foram aplicadas as otimizações do processo, sempre visando encontrar as condições ótimas de usinagem.

Para a análise, foram considerados todos os termos de entrada do processo. A Tabela 7 mostra os valores de p, isto é, os níveis de significância reconhecidos, aliados aos testes F para cada fonte de variação. Um grande valor de F significa que o efeito de um determinado fator é grande comparado a variação do erro. Então quanto maior o valor de F, mais importante é o fator que influencia a resposta do processo. As análises foram feitas para um nível de significância de 5%, ou seja, para um nível de confiança de 95% e a significância estatística para cada resposta é considerada quando se observa que o valor de p se suas fontes de entrada são menores que 0,05. Ainda é possível observar uma Coluna de Contribuição (Cont. %), de cada fator na variação total, desta forma evidencia o grau de impacto na rugosidade. Quanto maior a contribuição percentual, maior a influência do fator sobre a rugosidade. Além do Grau de Liberdade (GL), foram apresentadas as Somas dos Quadrados (SQ), (SQseq), (SQaj) (QMaj).

4.2 Efeito dos parâmetros de corte sobre a rugosidade média R_a

Nesta seção será tratado apenas a rugosidade R_a . A rugosidade influencia não apenas a precisão dimensional das peças usinadas, mas também suas propriedades, sendo um parâmetro importante para avaliar o desempenho das ferramentas de corte. A irregularidade de uma superfície, é o resultado do processo de usinagem, incluindo a seleção ideal das condições de corte. No processo de torneamento de acabamento de aços temperados, a rugosidade é bastante afetada por vários fatores, como avanço, raio da ponta, dureza do material, ângulos de corte e condições de corte. Através da ANOVA representada na Tabela 7 é possível visualizar os fatores e as interações que mais influenciam na rugosidade. Entre os parâmetros analisados três deles são estatisticamente significativos (V_c ; f ; r_e) pois seu valor de p é menor que 0,05. Este estudo está de acordo com as pesquisas realizadas por Suresh, Basavarajappa e Samuel (2012) e Aouici *et al.* (2014).

Tabela 7 – Regressão de Superfície de Resposta: R_a versus V_c ; f ; a_p ; r_e .
Análise de Variância.

Fonte	GL	SQ Seq	Cont. (%)	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	14	20,328	90,79%	20,328	1,452	33,109	0,00
Linear	4	10,713	47,85%	10,713	2,678	61,071	0,00
V_c	1	0,221	0,99%	0,221	0,221	5,032	0,03
f	1	6,607	29,51%	6,607	6,607	150,663	0,00
a_p	1	0,129	0,57%	0,129	0,129	2,932	0,093
r_e	1	3,756	16,78%	3,756	3,756	85,655	0,00
Quadrado	4	4,094	18,29%	4,094	1,024	23,338	0,00
$V_c \times V_c$	1	2,577	11,51%	0,001	0,001	0,028	0,867
$f \times f$	1	1,332	5,95%	0,682	0,682	15,543	0,00
$a_p \times a_p$	1	0,015	0,07%	0	0	0,001	0,98
$r_e \times r_e$	1	0,17	0,76%	0,17	0,17	3,873	0,055
Interação 2 Fatores	6	5,521	24,66%	5,521	0,92	20,982	0,00
$V_c \times f$	1	0,179	0,80%	0,179	0,179	4,078	0,049
$V_c \times a_p$	1	0,029	0,13%	0,029	0,029	0,667	0,418
$V_c \times r_e$	1	0,011	0,05%	0,011	0,011	0,246	0,623
$f \times a_p$	1	0,107	0,48%	0,107	0,107	2,429	0,126
$f \times r_e$	1	5,126	22,89%	5,126	5,126	116,874	0,00
$a_p \times r_e$	1	0,07	0,31%	0,07	0,07	1,597	0,213
Erro	47	2,061	9,21%	2,061	0,044		
Falta de ajuste	10	1,648	7,36%	1,648	0,165	14,775	0
Erro puro	37	0,413	1,84%	0,413	0,011	*	*
Total	61	22,39	100,00%				

Sumário do Modelo

S	R2	R ² (aj)	PRESQ	R ² (pred)
0,209	90,79%	88,05%	4,179	81,33%

Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

Outro coeficiente importante é o coeficiente de determinação, conhecido como R^2 que representa a porcentagem de variação de dados na resposta que é explicada pelo modelo. O valor R^2 ajustado é particularmente útil ao comparar modelos com diferentes números de termos. Quanto mais alto o valor de R^2 , melhor o modelo de resposta e se ajusta aos dados reais de forma eficaz, associado deve-se analisar o valor de “S” quanto mais baixo o valor, melhor é o modelo.

Ao analisar cada um dos parâmetros verifica-se que o avanço é o fator mais significativo com 29,51% de contribuição. Isso é previsto, assim como se sabe que, a rugosidade teórica

dependente do quadrado do avanço, para um certo raio de ponta da ferramenta. Este efeito ocorre porque seu aumento gera sulcos helicoidais, resultado do movimento da ferramenta sobre a superfície do material, tornando mais visíveis à medida que se aumenta o avanço. O segundo fator mais significativo é o raio de ponta da ferramenta, com uma contribuição de 16,78%. A velocidade de corte, apesar de apresentar pouca influência, ainda assim é significativa tendo uma contribuição de apenas 0,99%, sempre levando em consideração o valor de p menor que 0,05. A profundidade de corte não apresentou significância tendo uma contribuição estatística de 0,57% e valor de p 0,093 ficando acima dos 0,05. Resultados semelhantes a estes são relatados nas pesquisas realizadas por Das, Dhupal e Kumar (2015), Aouici *et al.* (2012), Khellaf *et al.* (2016), Elbah *et al.* (2013) ao analisarem cada um dos fatores de entrada sobre a rugosidade.

Ao analisar os termos quadráticos é possível perceber que apenas um termo apresenta significância ($f \times f$) com uma contribuição de 5,95% e valor de p abaixo de 0,05. Os demais termos quadráticos ($V_c \times V_c$; $a_p \times a_p$; $r_e \times r_e$) apresentaram valores de p maiores que 0,05, não apresentando influência significativa. Vale observar que o termo quadrático ($r_e \times r_e$) apresentou valor de p 0,055, ou seja, muito próximo do valor limite.

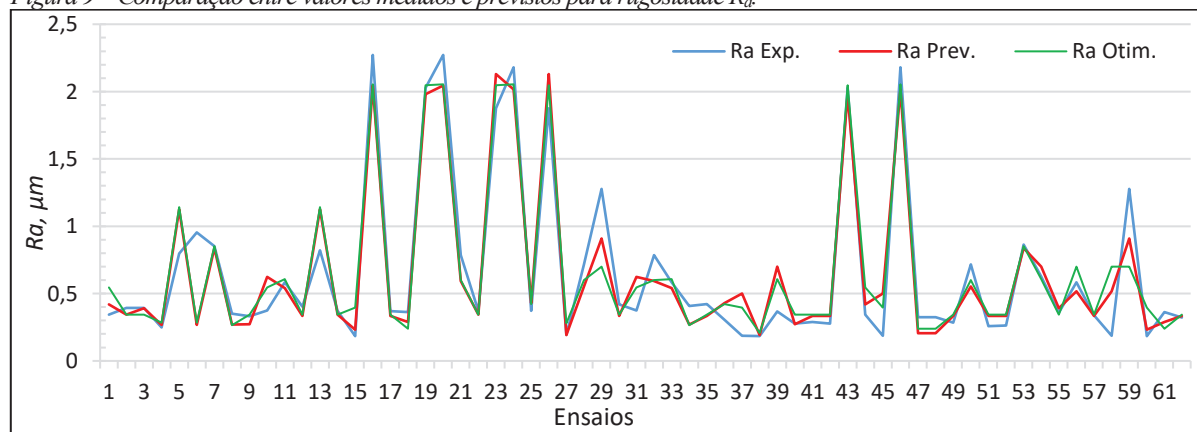
Dois efeitos de interação analisados também são significativos, ($f \times r_e$; $V_c \times f$) tendo contribuições de 22,89% e 0,80% respectivamente, com valores de p abaixo de 0,05, as demais interações ($V_c \times a_p$; $V_c \times r_e$; $f \times a_p$; $a_p \times r_e$) não apresentaram significância, pois o valor de p foi maior que 0,05. Desta maneira, a fim de obter menor rugosidade R_a , deve-se adotar baixos valores de avanço, aliados a altas velocidade de corte para condições ideais de usinagem. Resultados semelhantes foram relatados por Elbah *et al.* (2013) e Ratnam (2017).

A relação entre os fatores e as medidas de desempenho foram modelados por regressão quadrática. Levam-se em conta na equação todos os fatores analisados, estando a rugosidade R_a do modelo de acordo com a Equação (3) e seu coeficiente de determinação R^2 é de 90,79%. Sendo assim, esta equação pode ser usada para calcular a rugosidade a partir dos parâmetros de usinagem levando em conta a profundidade de corte, mesmo sabendo que a mesma não influencia estatisticamente. Resultados semelhantes foram relatados nas pesquisas realizadas por Elbah *et al.* (2013), Benlahmidi *et al.* (2016) que apresentaram valores de coeficiente de regressão próximos.

$$\begin{aligned}
 R_a = & 1,31 - 0,0085 \times V_c - 8,20 \times f + 1,49 \times a_p - 0,69 \times r_e + 0,000017 \times V_c^2 + 145,0 \times f^2 \\
 & - 0,10 \times a_p^2 + 1,131 \times r_e^2 + 0,0498 \times V_c \times f - 0,00672 \times V_c \times a_p \\
 & - 0,00153 \times V_c \times r_e - 7,69 \times f \times a_p - 20,01 \times f \times r_e + 0,78 \times a_p \times r_e
 \end{aligned} \quad (3)$$

A Figura 9 compara de forma gráfica o perfil da rugosidade R_a com os valores experimentais, os valores previstos e os valores de otimização, ilustrado no Apêndice (A), deste trabalho. Os valores experimentais representam a média de três medições realizadas durante os ensaios em cada um dos segmentos do corpo de prova. Os valores previstos foram gerados através da Equação (3), sendo considerados todos os termos de entrada do processo. Os valores otimizados foram gerados desconsiderando os termos não significativos, ou seja, os valores que não apresentaram significância estatística. Percebe-se que os perfis previstos estão de acordo com os valores experimentais, exceto para alguns pontos é possível notar uma pequena divergência entre valores. Esta diferença pode estar associada à pressão específica do corte, vibrações durante a realização dos ensaios ou até mesmo ao fluxo lateral do material não cortado que consiste em comprimir o material contra a ferramenta de corte. Estudos realizados por Meddour *et al.* (2014), demonstram divergências quando analisado perfil de rugosidade justificando que ocorre o fluxo do material. Rashid e Goel (2016), apresentam evidências da ocorrência do fluxo lateral para baixos valores de avanço. O material não cortado é deslocado em direção do avanço, levando ao aumento da rugosidade.

Figura 9 – Comparação entre valores medidos e previstos para rugosidade R_a .



Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

Com a finalidade de analisar a influência das interações geradas entre os parâmetros de corte, utilizou-se gráficos de superfície das interações geradas através da Tabela 7, tendo por objetivo verificar, de forma eficaz, o comportamento da rugosidade. Os gráficos de superfície de resposta, foram gerados sempre considerando dois parâmetros por vez.

A Figura 10 (a), demonstra a interação entre a velocidade de corte e avanço sobre a rugosidade. A rugosidade mais baixa foi obtida com a combinação entre baixo avanço e alta

velocidade de corte. Por consequência, o avanço de 0,05 mm/rot apresenta a melhor condição, efeito semelhante acontece para o avanço de 0,1 mm/rot. Já no avanço de 0,15 mm/rot percebe que R_a não alterou com aumento da velocidade de corte. Resultados semelhantes foram descritos nas pesquisas realizadas por Aouici *et al.* (2012), Das, Dhupal e Kumar (2015). Sendo possível afirmar que ao aumentar o avanço aumenta a rugosidade, gerando sulcos helicoidais, resultado do movimento da ferramenta sobre a superfície do material. Estes sulcos se tornam mais amplos na medida que se aumenta o avanço, justificando o uso de baixos avanços nas operações de torneamento de acabamento de materiais endurecidos. O avanço tem o maior efeito sobre a rugosidade sua variação é muito alta quando comparado com os demais parâmetros, sendo o fator mais significativo, efeitos análogos foram relatados nas pesquisas realizadas por Ratnam (2017). Em contrapartida, a rugosidade tem uma tendência a reduzir com o aumento da velocidade de corte, quando se utiliza baixos valores de avanço. Os resultados desta interação estão de acordo com as pesquisas realizadas por Hessainia *et al.* (2013).

Ao analisar os efeitos de interação entre a velocidade de corte e profundidade de corte sobre a rugosidade a Figura 10 (b) demonstra que os melhores acabamentos alcançados nestas condições são com altas velocidade de corte e baixas profundidades de corte. No entanto, os autores Das, Dhupal e Kumar (2015), Suresh e Basavarajappa (2014), descrevem que ao aumentar os valores de velocidade de corte em demasia pode gerar vibrações no processo de torneamento. Contudo, estas condições não são estatisticamente significativas sobre a rugosidade. Esses efeitos são semelhantes aos relatados nas pesquisas realizadas por Khellaf *et al.* (2016), Meddour *et al.* (2014), nas quais afirmam que pode ser realizada uma comparação qualitativa sobre estas interações. Suresh, Basavarajappa e Samuel (2012), reportaram que a profundidade de corte não influencia na rugosidade.

Ao analisar a rugosidade através do efeito da velocidade de corte e raio de ponta da ferramenta, percebe-se, através da Figura 10 (c) que ao utilizar baixa velocidade de corte com menor raio de ponta da ferramenta, resulta em alta rugosidade. Contudo ao adotar maiores velocidades de corte, aliada a maiores raios de ponta, consegue-se um melhor acabamento, porque o raio de ponta da ferramenta tem um efeito predominante sobre o acabamento da superfície pela ação de aparar os picos de rugosidade. Resultados semelhantes são relatados nas pesquisas realizadas por Kumar *et al.* (2014) e Kumar, Durai e Sornakumar (2003). Nas quais os autores consideram que o acabamento da superfície mostra uma melhoria contínua ao aumentar a velocidade de corte e o raio de ponta.

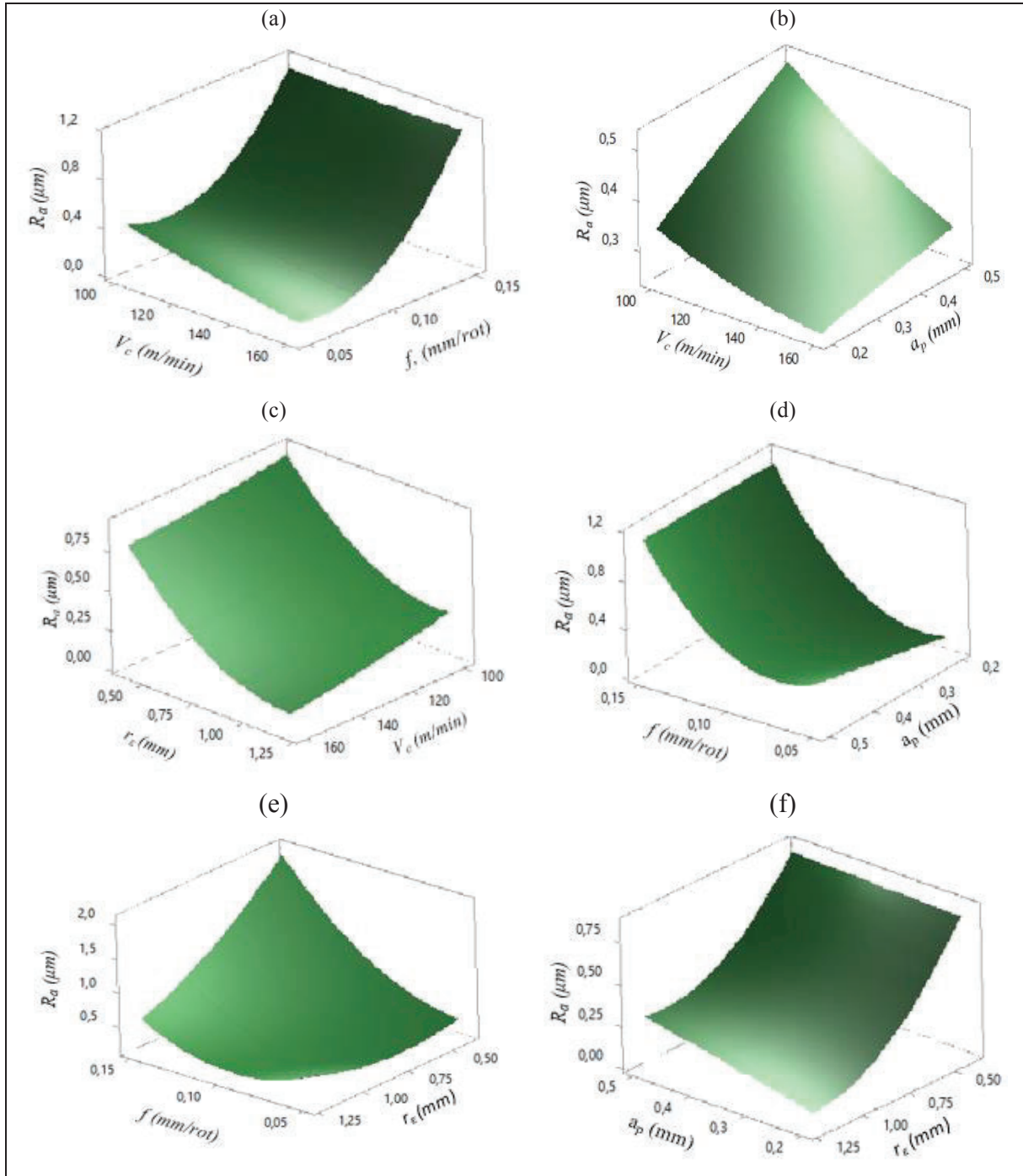
Percebe-se na Figura 10 (d), a interação entre o avanço e a profundidade de corte sobre a rugosidade. Ao ser utilizado um baixo avanço, com baixas profundidades de corte, consegue-se as melhores condições de rugosidade. Ao adotar estes parâmetros, as marcas de avanço deixadas sobre a superfície do material são mais rasas estando de acordo com estudos relatado por Meddour *et al.* (2014), Hessainia *et al.* (2013). Também é possível perceber que a pior condição da rugosidade acontece com profundidades de corte mais elevadas e maiores avanços. Ao aplicar estas condições existe uma tendência crescente no aumento da rugosidade, uma vez que o avanço é o fator mais significativo. O aumento gera sulcos helicoidais sobre a superfície do material, e visa a ser mais amplos e profundos a medida que se aumenta seus valores efeitos semelhantes foram relatados nos trabalhos realizados por Xiao *et al.* (2016), Aouici *et al.* (2014), Suresh, Basavarajappa e Samuel (2012).

Através da Figura 10 (e), é possível analisar a rugosidade em função do avanço e raio de ponta da ferramenta. Nota-se que a menor rugosidade está associada ao r_e 1,2 mm e avanço de 0,1 mm/rot, para valores de avanço de 0,05 e 0,15 mm/rot as rugosidades são semelhantes, podendo atribuir ao fenômeno de fluxo lateral do cavaco. Ao adotar raios de pontas maiores, com baixos valores de avanço, aumenta a temperatura e pressão específica na zona de corte do material. Dessa forma o material não cortado é deslocado contra a ferramenta, aumentando a rugosidade. Efeitos análogos foram relatados nas pesquisas realizadas por Meddour *et al.* (2014), Rashid e Goel (2016). Ao analisar os demais raios de ponta das ferramentas (r_e 0,4; r_e 0,8) aliados com baixos valores de avanço, tem-se as melhores condições de acabamentos superficiais. À medida que se aumenta o avanço conduz a maiores valores de rugosidade Pesquisas realizadas por Denkena, Grove e Maiss (2015), Elbah *et al.* (2013) apresentam interações semelhantes. Os autores afirmam que se deve empregar baixos avanços nas operações de torneamento de aços endurecidos.

O efeito da interação entre o raio de ponta e profundidade de corte na rugosidade é ilustrado na Figura 10 (f). Observa-se que a pior condição da rugosidade foi obtida com menores raio de ponta. A profundidade de corte nesta condição não apresentou significância, como já era esperado. O estudo deste resultado está de acordo com as pesquisas realizadas por Suresh, Basavarajappa e Samuel (2012), Suresh, Rao e Deshmukh (2002). Em contrapartida o raio da ferramenta, apresenta grande influência no acabamento, conforme relatado por Machado *et al.* (2012). Ao aumentar o raio de ponta com baixas profundidades de corte, consegue-se melhores condições de acabamento superficiais. Efeitos semelhantes foram relatados nas pesquisas realizadas por Meddour *et al.* (2014) Suresh, Basavarajappa e Samuel (2012).

Assim sendo, o arranjo ótimo entre os fatores avaliados para a condição ideal da rugosidade R_a compreende na utilização de altas velocidade de corte, baixos valores de avanço aliados com baixas profundidade de corte, conciliando com maiores raios de ponta. Os resultados deste estudo estão em consonância com as pesquisas realizadas por Ratnam (2017), Aouici *et al.* (2012), Suresh e Basavarajappa (2014) e Thiele e Melkote (1999).

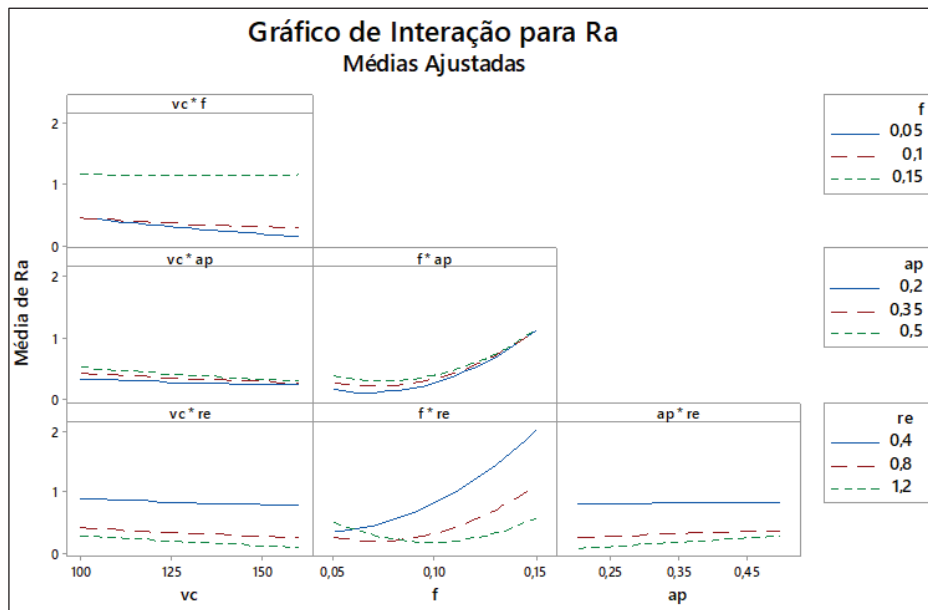
Figura 10 – Influência dos parâmetros de corte sobre a rugosidade R_a .



Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

Através da Figura 11 é possível visualizar o gráfico dos efeitos de interação bidirecional, separados entre dois parâmetros por vez que influenciam a rugosidade, comprovando de forma gráfica e complementando os resultados dos gráficos de superfície analisados. Quando as linhas se encontram paralelas no gráfico, indicam que não existe interação entre os fatores e quanto maior for a diferença na inclinação entre as linhas, maior o grau da interação. Ainda é possível visualizar qual fator dentro do próprio gráfico apresenta uma maior influência sobre a rugosidade.

Figura 11 – Gráfico de Interações para Média R_a .

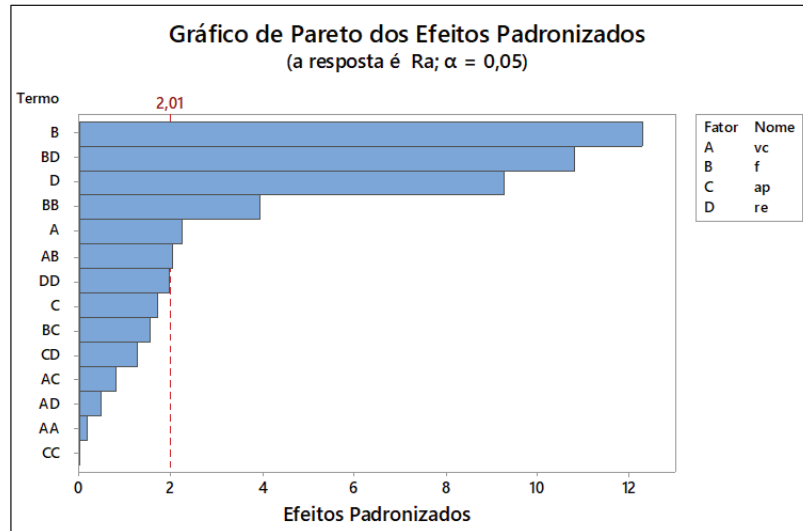


Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

Um dos métodos gráficos utilizados para analisar os fatores de otimização do processo, é o uso do gráfico de Pareto, é um método de ANOVA, simplificado que utiliza os princípios de Pareto. É um método rápido e fácil de considerar os resultados dos parâmetros em análise. Através da Figura 12 é possível visualizar os valores absolutos desde o maior até o menor efeito. O gráfico traça uma linha de referência indicando quais efeitos são estatisticamente significativos. Entre os parâmetros analisados, três fatores, duas interações e um termo quadrático, apresentam significância. O avanço (B), é o fator que apresenta maior influência sobre a rugosidade, seguido da interação avanço \times raio de ponta, (B \times D) posteriormente temos o fator raio de ponta da ferramenta (D). E um termo quadrático avanço \times avanço (B \times B) se mostra significativo. A velocidade de corte (A), apesar de influenciar muito pouco, ainda assim é significativa. E por último temos o fator velocidade de corte \times avanço (A \times B). Percebe-se ainda o termo quadrático raio de ponta \times raio de ponta (D \times D) que está muito próximo do

limite. Justificando os resultados já apresentados. Os demais fatores apesar de aparecerem no gráfico não são significativos.

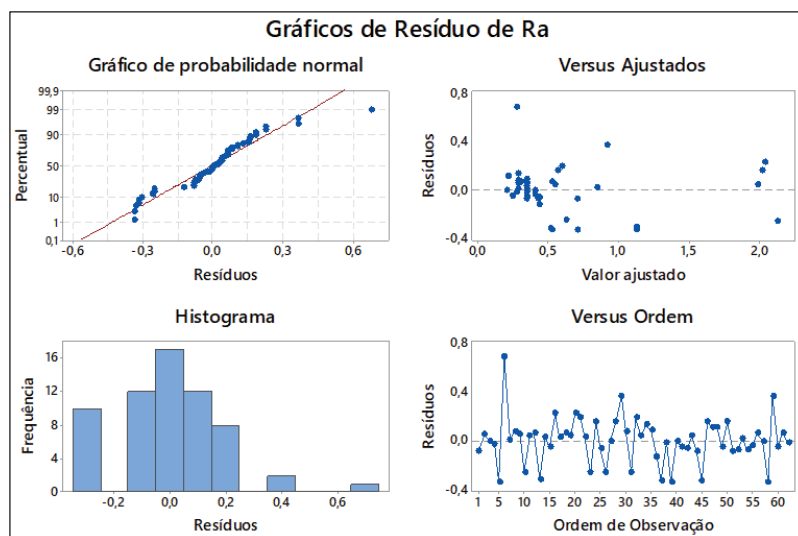
Figura 12 – Gráfico dos efeitos de Pareto.



Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

O gráfico de probabilidade normal indica se os resíduos seguem uma distribuição normal ou não. Se os resíduos seguem uma distribuição normal, o número máximo de pontos deve cair sobre uma linha reta. Desta maneira o gráfico dos resíduos está representado na Figura 13. Observa-se que os resíduos estão, na maior parte bem distribuídos sobre a linha e apresentam uma distribuição normal de forma independente e aleatória, de acordo com Montgomery (2012). No gráfico dos resíduos certifica-se que os resultados não mostram nenhum padrão óbvio e estão distribuídos em direções positivas e negativas, o que demonstra que o modelo está adequado.

Figura 13 – Gráfico de resíduos.



Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

O gráfico dos efeitos principais é utilizado para verificar a diferença entre os efeitos de entrada que influenciam diretamente a rugosidade (resposta de saída), podendo ser visualizado através da Figura 14. Quando a linha não está próxima ao eixo horizontal, existe um efeito que afeta a resposta, quanto maior a inclinação da linha maior é a magnitude do efeito. Contudo quando a linha se encontra próximo ao eixo horizontal menor é o efeito sobre a saída.

Ao analisar cada um deles em separado, percebe-se que os valores de rugosidade aumentam à medida que se aumenta o avanço, resultado dos sulcos helicoidais gerados durante o contato entre a ferramenta e o material usinado. Os resultados apresentados estão em concordância com Ratnam (2017), Denkena, Grove e Maiss (2015), nos quais os autores relatam em suas pesquisas que o valor de R_a aumenta à medida que o avanço aumenta. Percebe-se no $f 0,05$ mm/rot uma rugosidade mais alta quando comparado com $f 0,074$ mm/rot. Este fenômeno pode ser associado ao fluxo do material não cortado, pois ao utilizar um avanço muito baixo tem-se uma espessura de material não cortada e está acaba aderindo à superfície ainda não usinada até ser cortada novamente pela ferramenta, podendo ser responsável pelo aumento da rugosidade. Rashid e Goel (2016), descrevem nas pesquisas realizadas que o fluxo do material não cortado é mais significativo nos avanços entre (0,02 – 0,05 mm/rot), justificando desta maneira um valor de rugosidade maior para baixo valores de avanço.

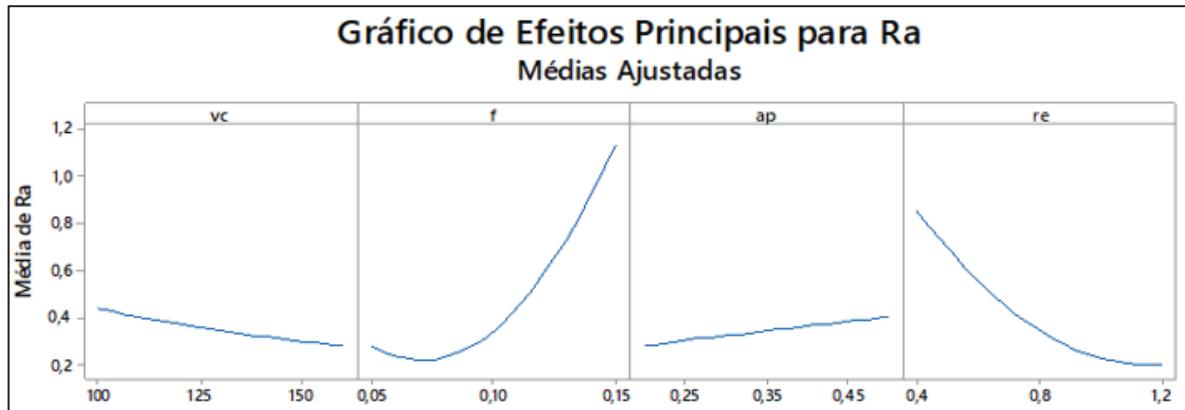
A rugosidade diminui com o aumento da velocidade de corte, resultados semelhantes foram relatados nas pesquisas realizadas por Thiele e Melkote (1999), Das, Dhupal e Kumar (2015). Os autores descrevem que ao aumentar a velocidade de corte, diminuem as forças de corte, influenciando desta maneira a rugosidade.

Quando analisada a profundidade de corte, percebe que este parâmetro tem um efeito muito fraco ou quase nulo sobre a rugosidade, sendo que ao aumentar a profundidade de corte aumenta levemente a rugosidade. Isso se deve ao aumento de contato entre a ponta da ferramenta e o material da peça. Nas pesquisas realizadas por Aouici *et al.* (2014), Saini, Ahuja e Sharma (2012), os autores descrevem que ao reduzir as profundidades de corte reduz a tendência de vibrações, em consequência se consegue melhores acabamentos superficiais.

Ao aumentar o raio de ponta da ferramenta de 0,4 mm para 1,2 mm diminui a rugosidade, já que a usinagem de torneamento de acabamento de aços endurecidos se concentra na ponta, ou seja, o raio de ponta da ferramenta de corte. Os resultados deste estudo estão em consonância com as pesquisas realizadas por Thiele e Melkote (1999), Ratnam (2017), nas quais os autores relatam que para reduzir a rugosidade, o raio da ponta deve ser aumentado. No

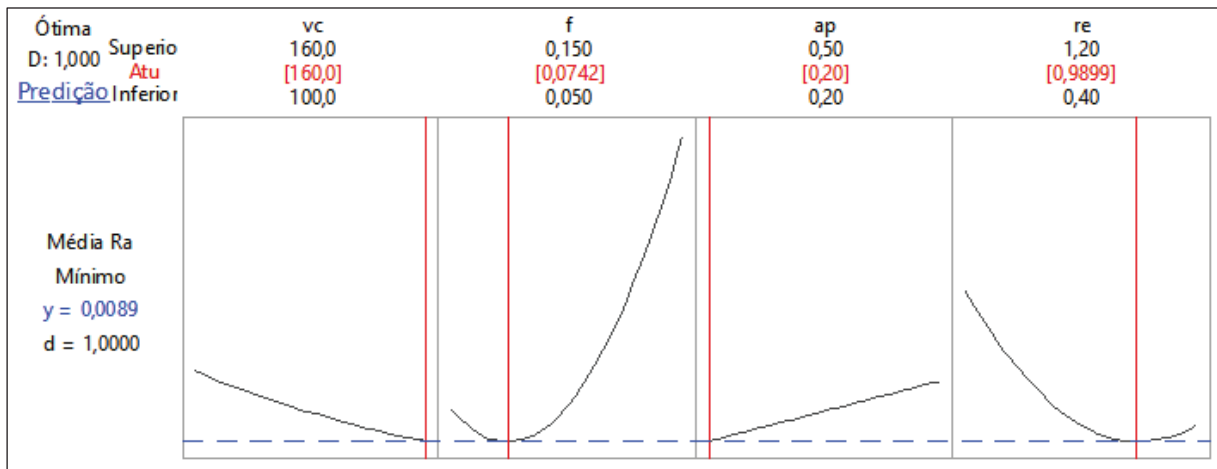
entanto, há um limite superior do raio da ponta, em virtude, das forças de corte aumentarem consideravelmente, aumentando assim o desgaste da ferramenta consequentemente o princípio de vibrações.

Figura 14 – Gráfico de Efeitos Principais para Média R_a .



Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

Um dos objetivos mais importantes relacionado a usinagem de aços endurecidos, é a obtenção de excelentes acabamentos superficiais. Levando em consideração as interações entre os parâmetros de entrada e verificação dos dados que foram gerados. Estes modelos podem ser usados tanto na otimização, simulação ou até mesmo na previsão do comportamento do processo de torneamento de acabamento, principalmente quando se trabalha dentro das faixas do experimento. A Figura 15 mostra de forma gráfica o comportamento da otimização dos parâmetros para a rugosidade. É possível perceber que o *software* buscou as condições ótimas de rugosidade chegando na melhor condição possível, ou solução ideal, com V_c 160 m/min; f 0,074 mm/rot; a_p 0,2 mm; e r_e 1 mm para rugosidade R_a 0,009 μm . Compreende-se que as condições ideais durante o processo de otimização sempre buscou valores mais altos de velocidade de corte, baixos valores de avanço e profundidade de corte. Para o raio de ponta da ferramenta buscou valores maiores, mostrando desta forma que é possível randomizar diversos valores dos parâmetros de entrada e ainda assim manter baixos valores de rugosidade. Este estudo está em conformidade com as pesquisas realizadas por Das, Dhupal e Kumar (2015), Hessainia *et al.* (2013), Suresh, Basavarajappa e Samuel (2012).

Figura 15 – Otimização da Mínima Rugosidade R_a .

Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

Além da condição ótima gerada, é viável gerar outras condições de corte que satisfaçam simultaneamente os fatores de entrada e a resposta. Na tentativa de estabelecer novos modelos apropriados, de acordo com a Tabela 8, foram geradas cinco novas condições, sempre mantendo todos os parâmetros para otimização. Na coluna R_a ajustado, é possível ver os valores da rugosidade e seus referidos níveis. Na última coluna é apresentado a conveniência combinada ou composta da resposta é 1, o que significa uma excelente solução.

Tabela 8 – Otimização da Rugosidade.

Solução	V_c	f	a_p	r_e	R_a Ajuste	Desirability Composta
1	160	0,074	0,20	1,0	0,009	1,000
2	160	0,050	0,45	0,7	0,186	0,999
3	160	0,053	0,21	1,2	0,186	0,999
4	138	0,115	0,20	1,1	0,187	0,998
5	160	0,050	0,20	0,4	0,194	0,995

Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

4.3 Efeitos dos parâmetros de corte sobre a rugosidade média R_z

Nesta seção será tratado os efeitos dos parâmetros de corte que influenciam a rugosidade R_z . Os resultados da ANOVA estão representados na Tabela 9, sendo possível visualizar os fatores e as interações que mais dominam a rugosidade. Também estão representados os parâmetros de menor relevância. Entre os parâmetros analisados percebe-se que o avanço é o fator mais dominante sobre a rugosidade, seguido do raio de ponta, profundidade de corte e

velocidade de corte. Todos os parâmetros de entrada apresentam valores de p menores que 0,05, portanto todos são estatisticamente significativos.

Tabela 9 – Regressão de Superfície de Resposta: R_z versus v_c ; f ; a_p ; r_e .
Análise de Variância.

Fonte	GL	SQ Seq	Cont. (%)	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	14	316,229	91,61%	316,229	22,5878	36,67	0,000
Linear	4	173,409	50,24%	173,409	43,3523	70,37	0,000
V_c	1	2,741	0,79%	2,741	2,7412	4,45	0,040
f	1	94,599	27,41%	94,599	94,5994	153,56	0,000
a_p	1	3,051	0,88%	3,051	3,0507	4,95	0,031
r_e	1	73,018	21,15%	73,018	73,0180	118,53	0,000
Quadrado	4	58,310	16,89%	58,310	14,5775	23,66	0,000
$V_c \times V_c$	1	36,019	10,43%	0,007	0,0072	0,01	0,914
$f \times f$	1	19,936	5,78%	10,663	10,6625	17,31	0,000
$a_p \times a_p$	1	0,144	0,04%	0,006	0,0065	0,01	0,919
$r_e \times r_e$	1	2,211	0,64%	2,211	2,2112	3,59	0,064
Interação 2 Fatores	6	84,509	24,48%	84,509	14,0849	22,86	0,000
$V_c \times f$	1	2,833	0,82%	2,833	2,8332	4,60	0,037
$V_c \times a_p$	1	0,552	0,16%	0,552	0,5515	0,90	0,349
$V_c \times r_e$	1	0,264	0,08%	0,264	0,2643	0,43	0,516
$f \times a_p$	1	0,993	0,29%	0,993	0,9935	1,61	0,210
$f \times r_e$	1	79,117	22,92%	79,117	79,1167	128,43	0,000
$a_p \times r_e$	1	0,750	0,22%	0,750	0,7502	1,22	0,275
Erro	47	28,953	8,39%	28,953	0,6160		
Falta de ajuste	10	24,620	7,13%	24,620	2,4620	21,02	0,000
Erro puro	37	4,334	1,26%	4,334	0,1171	*	*
Total	61	345,182	100,00%				

Sumário do Modelo

S	R^2	R^2 (aj)	PRESQ	R^2 (pred)
0,784	91,61%	89,11%	59,118	82,87%

Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

Analisando cada um dos fatores verifica-se que o avanço foi o fator de maior influência sobre a rugosidade, com uma contribuição de 27,41%. O segundo fator é o raio de ponta da ferramenta, com uma contribuição de 21,15%. Seguido da profundidade de corte e velocidade de corte respectivamente com influência significativa mais baixa, porém ambos com valores de p menores que 0,05. Elbah *et al.* (2013), Das, Dhupal e Kumar (2015) encontraram significância estatística apenas no avanço e na velocidade de corte, porém relatam que para reduzir a tendência de vibração deve-se manter baixas profundidades de corte no torneamento de acabamento.

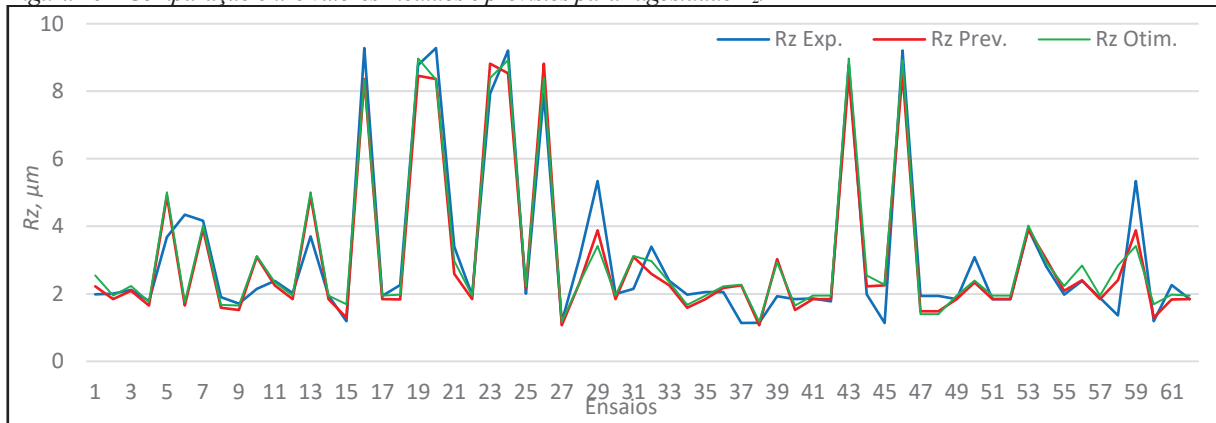
Ao analisar os termos quadráticos percebe-se que apenas um termo apresenta significância ($f \times f$), com uma contribuição de 5,78%. Os demais termos quadráticos ($V_c \times V_c$; $a_p \times a_p$; $r_\varepsilon \times r_\varepsilon$), não apresentaram significância estatística pois o valor de p encontra-se acima de 0,05. Desta maneira, a análise ficou em consonância com as pesquisas realizadas por Aouici *et al.* (2013).

Quando analisadas as interações, duas apresentam significância estatística, dos parâmetros analisados ($f \times r_\varepsilon$; $V_c \times f$), com significância de 22,92% e 0,82% respectivamente ambas com valores de p abaixo de 0,05. As demais interações ($V_c \times a_p$; $V_c \times r_\varepsilon$; $f \times a_p$; $a_p \times r_\varepsilon$), não apresentaram significância estatística na análise, ficando o valor de p acima dos 0,05. Denkena, Grove e Maiss (2015), Thiele e Melkote (1999), relataram nas pesquisas realizadas que existe uma maior relação entre os parâmetros ($f \times r_\varepsilon$; $V_c \times f$). Desta maneira para um determinado avanço o raio de ponta se torna mais influente, conseguindo valores mais baixos de rugosidade e melhores condições de acabamento nas operações de torneamento do aço endurecido. A relação entre os parâmetros de entrada e medições de desempenho (saída), foi modelada por regressão quadrática, considerando todos os fatores analisados, a rugosidade do modelo conforme Equação (4). E seu coeficiente de determinação R^2 é de 91,61%. Desta maneira, esta equação pode ser usada para calcular a rugosidade R_z , sempre levando em conta todos os parâmetros utilizados no processo de fabricação. Esta análise está em consonância com estudos realizados por Elbah *et al.* (2013), sendo assim os autores apresentam valores do coeficiente de correlação semelhantes.

$$R_z = 4,97 - 0,024 \times V_c - 36,9 \times f + 7,1 \times a_p - 2,13 \times r_\varepsilon + 0,000041 \times V_c^2 + 5738 \times f^2 - 1,6 \times a_p^2 + 4,08 \times r_\varepsilon^2 + 0,1984 \times V_c \times f - 0,0292 \times V_c \times a_p - 0,0076 \times V_c \times r_\varepsilon - 23,5 \times f \times a_p - 78,62 \times f \times r_\varepsilon + 2,55 \times a_p \times r_\varepsilon \quad (4)$$

A Figura 16 ilustra de forma gráfica o perfil da rugosidade R_z dos valores experimentais, dos valores previstos de acordo com a Equação (4), e os valores otimizados, ilustrado no Apêndice (B) deste trabalho desconsiderando os termos não significativos da análise. É possível perceber que na maior parte da comparação os resultados do perfil apresentam conformidade entre os valores experimentais e valores previstos durante os ensaios. Os pontos que não apresentam harmonia entre ambos podem ter sido afetados por erros advindos de vibrações ou interferências externas das análises. Estudos realizados por Elbah *et al.* (2013), apresentaram de forma gráfica os valores de rugosidade e relataram que a maioria dos valores medidos estão de acordo com os valores calculados.

Figura 16 – Comparação entre valores medidos e previstos para rugosidade R_z .



Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

Os gráficos de superfície das interações foram gerados através da ANOVA com a finalidade de analisar a rugosidade R_z , sempre considerando dois parâmetros por vez.

A Figura 17 (a), comprova que a pior condição está representada com avanço e velocidade de corte nos valores mais elevados. Percebe-se que ao utilizar um avanço alto a velocidade de corte não apresenta muita influência. Entretanto, ao utilizar baixos valores de avanço observa-se uma interação maior da V_c sobre a rugosidade. Assim sendo, deve-se empregar velocidades de corte maiores, associados com baixos valores de avanço para atingir valores de rugosidade mais baixos. Foram apresentadas pesquisas semelhantes por Shihab *et al.* (2014), Xiao *et al.* (2016), sendo que os autores descrevem que para baixos valores de avanço, o efeito da velocidade de corte é maior e ao aumentar o avanço se tem um aumento acentuado da rugosidade. Os autores mencionam ainda que ao utilizar maiores valores de avanços o cavaco tende a ser arrancado ao invés de cisalhar o material.

Ao utilizar baixos valores de velocidade de corte com altas profundidades de corte, se tem a pior condição possível de rugosidade, de acordo com a Figura 17 (b). Conseqüentemente a melhor condição se consegue com altas velocidade de corte e baixas profundidades de corte. Resultados semelhantes são relatados nas pesquisas realizadas por Aouici *et al.* (2013), Aouici *et al.* (2014). Os autores analisaram que ao utilizarem uma menor profundidade de corte, com velocidade de corte mais alta, foi possível atingir valores mínimos de rugosidade.

Ao analisar a Figura 17 (c), entre o efeito do raio de ponta da ferramenta com a velocidade de corte sobre a rugosidade comprova-se que a velocidade de corte apresenta pouca influência estatística ao serem utilizados baixos valores de raio de ponta da ferramenta. Contudo ao utilizar valores de raio de ponta maiores, percebe-se uma certa significância da velocidade de corte. Este efeito pode estar relacionado a forte significância estatística do raio de ponta da

ferramenta, apesar da menor significância da V_c . Nas pesquisas realizadas por Saini, Ahuja e Sharma (2012), os autores relatam que, ao aumentar o raio de ponta da ferramenta diminui a rugosidade. Das, Dhupal e Kumar (2015), descrevem que a rugosidade é dependente do raio de ponta da ferramenta e ao aumentar o raio teoricamente diminui a rugosidade.

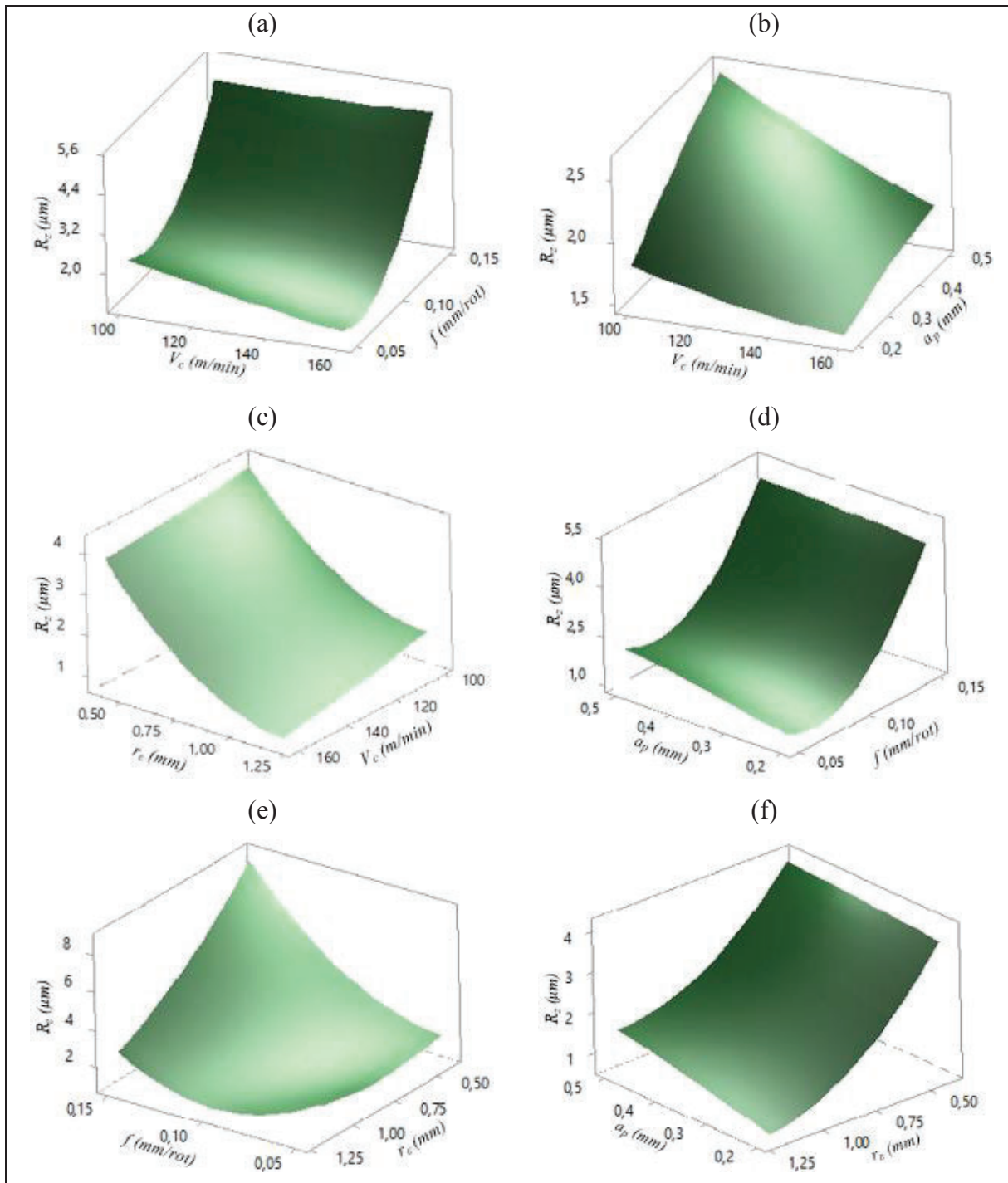
O efeito da interação entre profundidade de corte e avanço sobre a rugosidade é ilustrado na Figura 17 (d), ao utilizar baixos valores de avanço com baixas profundidades de corte são atingidas as melhores condições de rugosidade. Efeitos semelhantes foram relatados nas pesquisas realizadas por Elbah *et al.* (2013), Das, Dhupal e Kumar (2015), sendo que os autores encontraram resultados análogos analisando R_z . Portanto, a combinação ideal de fatores de controle para a menor rugosidade deve consistir de mínima profundidade de corte com baixos valores de avanço.

É possível perceber através da Figura 17 (e), que o avanço e o raio de ponta têm efeitos dominantes sobre a rugosidade. A pior condição está associada com altos valores de avanço e pequeno raio de ponta da ferramenta. Contudo, com um avanço decrescente, a influência do raio de ponta aumenta. Neste caso a melhor condição está associada ao adotar $f 0,1\text{mm/rot}$; $r_e 0,8\text{ mm}$. Um aumento do avanço com baixo valor de raio de ponta conduz a aumentar a rugosidade, em razão da altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço que são proporcionais ao quadrado desse avanço. Pesquisas realizadas pelos autores Denkena, Grove e Maiss (2015), Suresh, Rao e Deshmukh (2002), Maiss, Grove e Denkena (2017), descrevem que este comportamento já era esperado dado que existe uma relação dependente do avanço para um certo raio de ponta da ferramenta.

Através da Figura 17 (f), identifica-se que para pequeno raio de ponta a profundidade de corte não apresenta efeito. Em contra partida a melhor condição de rugosidade encontra-se com $r_e 1,2\text{ mm}$; $a_p 0,2\text{mm}$. Agrawal *et al.* (2015), Kumar, Durai e Sornakumar (2003), descrevem nas suas pesquisas que o raio de ponta apresenta significância estatística, porém a profundidade de corte não foi analisada.

Portanto, a combinação ideal entre os fatores analisados para a menor rugosidade R_z consiste de altos valores de velocidade de corte, baixos valores de avanço e de profundidade de corte, aliados a valores maiores do raio de ponta da ferramenta. Os resultados deste estudo estão em consonância com as pesquisas realizadas por Meddour *et al.* (2014), Elbah *et al.* (2013), Aouici *et al.* (2013) e Maiss, Grove e Denkena (2017).

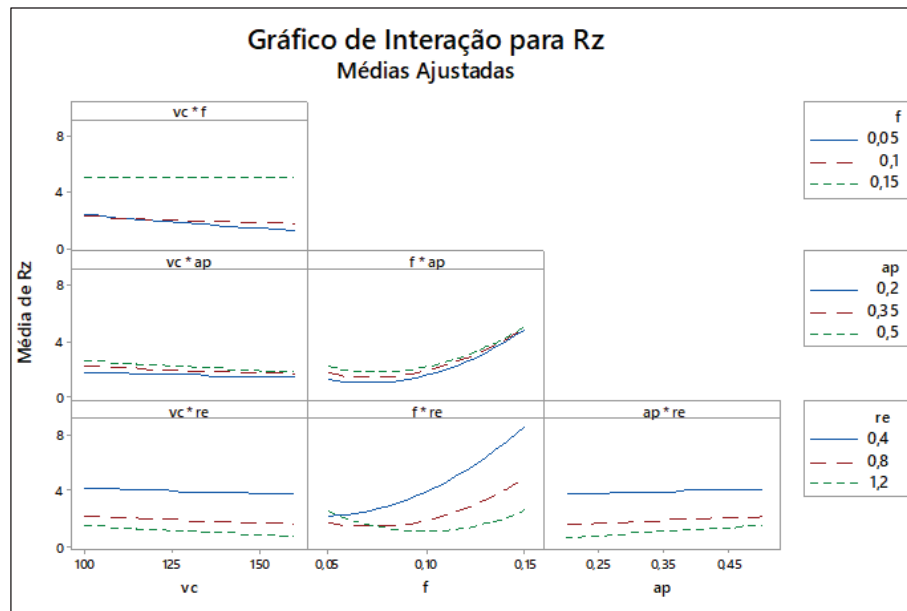
Figura 17 – Influência dos parâmetros de corte sobre a rugosidade R_z .



Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

Na Figura 18 está representado o gráfico de interação bidirecional, o qual demonstra de forma gráfica os efeitos entre dois fatores por vez e contribui para compreender os gráficos de superfície já analisados.

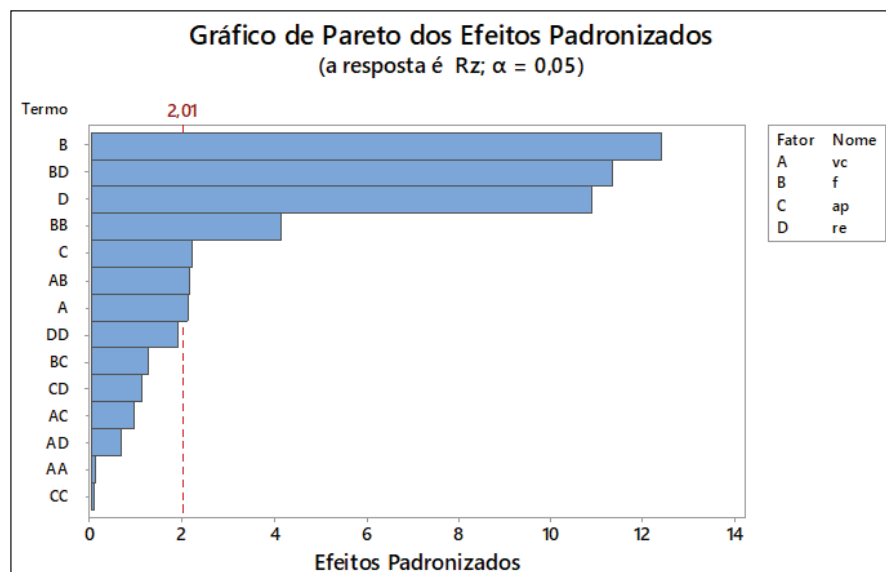
Figura 18 – Gráfico de interação dos fatores de entrada.



Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

De acordo com gráfico de Pareto representado na Figura 19 é possível identificar os fatores significativos e os fatores não significativos da análise de Rz. Seguindo uma ordem decrescente temos avanço (B), sendo o fator mais significativo, uma interação entre os fatores avanço \times raio de ponta (B \times D), a seguir temos o raio de ponta (D), e um termo quadrático avanço \times avanço (B \times B), em seguida profundidade de corte (C), e velocidade de corte \times avanço (A \times B), e por último a velocidade de corte (A), os demais fatores representados no gráfico não são significativos. O que confirma o estudo apresentado nas análises anteriores.

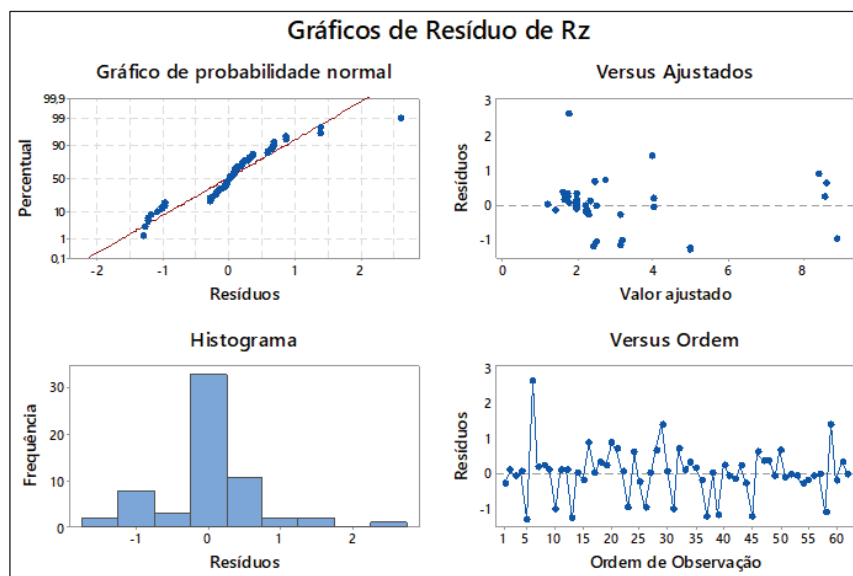
Figura 19 – Gráfico dos efeitos de Pareto.



Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

O gráfico de probabilidade normal foi traçado para os resíduos e mostrado na Figura 20. A linearidade desse gráfico confirma a distribuição normal dos dados, indicando que os resíduos estão na sua maioria muito próximos e, na maior parte, bem distribuídos sobre a linha de normalidade, estando de acordo com Montgomery (2012). No gráfico dos resíduos verifica-se que os resultados estão distribuídos de forma aleatórias, tanto na direção positiva quanto negativa. Isto representa que o modelo está adequado, sendo que os resultados estão em conformidade com pesquisas realizadas por Saini, Ahuja e Sharma (2012) e Maiss, Grove e Denkena (2017).

Figura 20 – Gráfico dos resíduos.



Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

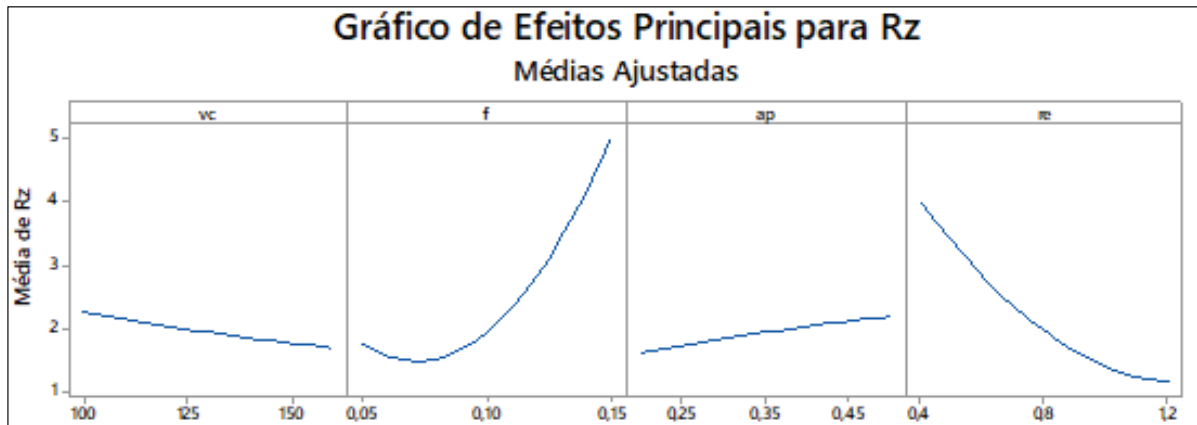
Ao analisar o gráfico dos efeitos principais através da Figura 21, observa-se que ao adotar V_c 100 m/min dispõe-se dos valores de rugosidade mais altos, e ao adotar V_c 160 m/min a rugosidade apresenta a melhor condição, fato que existe uma tendência em reduzir a rugosidade ao aumentar a V_c . Efeitos semelhantes foram relatados nas pesquisas realizadas por Suresh, Basavarajappa e Samuel (2012), nas quais é relatado que ao adotar maiores valores de V_c melhora a rugosidade, em virtude de gerar menos forças de corte no torneamento.

Ao analisar a rugosidade em virtude do avanço, percebe-se que os maiores valores de rugosidade foram gerados em condições de avanço em seu maior nível. Isso ocorre devido ao surgimento de marcas mais representativas da ferramenta sobre a superfície do material usinado em virtude do aumento do avanço, uma vez que um aumento de f tende a aumentar a rugosidade. Estes efeitos foram relatados nas pesquisas realizadas por Bensouilah *et al.* (2016), Suresh, Basavarajappa e Samuel (2012).

Ao adotar baixos valores de profundidade de corte, ocorrem melhores condições de rugosidade, visto que maiores profundidades de corte tendem a gerar vibrações. Os estudos estão de acordo com as pesquisas praticadas pelos autores Maiss, Grove e Denkena (2017). Já os autores Aouici *et al.* (2013), mencionam que a profundidade de corte não apresenta significância estatística sobre R_z .

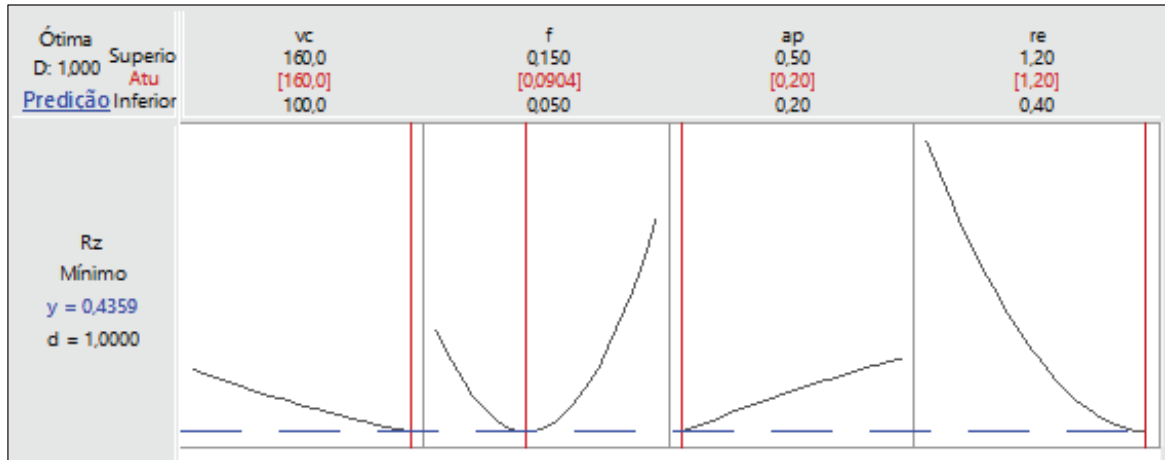
A utilização do raio de ponta no valor de 0,4 mm resulta em valores maiores de rugosidade. À medida que se aumenta o raio de ponta para um valor de 1,2 mm, percebe-se que os valores de rugosidade tendem a diminuir, visto que o raio está diretamente relacionado a rugosidade. Estes efeitos são semelhantes aos relatados por Machado *et al.* (2012) e Khellaf *et al.* (2016).

Figura 21 – Gráfico dos efeitos principais.



Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

Desta maneira buscou-se realizar a otimização de R_z que pode ser conferida através da Figura 22. Que demonstra de forma gráfica o comportamento da otimização dos parâmetros de entrada, sendo gerada a condição ótima para R_z com os seguintes parâmetros: maior nível apresentado nos estudos V_c 160 m/min, f 0,09 mm/rot apresentando-se em nível intermediário, a_p 0,2 mm a menor profundidade de corte analisada, e r_e 1,2 mm. Através dos valores iniciais de entrada esta é a condição ótima de R_z esta análise de rugosidade encontra-se semelhante aos resultados das pesquisas apresentadas por Thiele e Melkote (1999) e Denkena, Grove e Maiss (2015).

Figura 22 – Otimização da mínima Rugosidade R_z .

Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

Após otimização do processo de usinagem identifica-se na Tabela 10 as cinco melhores condições possíveis apresentadas em ordem decrescente. Foram representados todos os fatores de entrada. Na coluna R_z ajustado é possível visualizar os valores ótimos e seus referidos níveis. A última coluna apresenta a conveniência combinada ou composta da resposta que é 1, o que significa a condição ótima. Para R_z observa-se ainda outras combinações que foram geradas, podendo variar os parâmetros e mesmo assim conseguindo condições ideais de valores de rugosidade. Entende que desta maneira se consegue as melhores condições de acabamento da superfície. Estes parâmetros apresentados estão de acordo com as pesquisas realizadas por Elbah *et al.* (2013), Meddour *et al.* (2014), visto que os autores adotam faixas de melhores parâmetros durante a otimização da rugosidade.

Tabela 10 – Otimização da Rugosidade R_z .

Solução	V_c	f	a_p	r_e	R_z Ajuste	Desirability Composta
1	160	0,09	0,2	1,2	0,44	1
2	124	0,12	0,2	1,2	1,147	0,999
3	160	0,05	0,2	1,1	1,147	0,999
4	130	0,1	0,35	1,2	1,161	0,997
5	137	0,05	0,2	0,8	1,163	0,997

Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

4.4 Efeitos dos parâmetros de corte sobre a rugosidade média R_{ku}

Nesta seção serão tratados os efeitos dos parâmetros de corte que influenciam a rugosidade R_{ku} . Os resultados estão representados na Tabela 11 portanto, é possível visualizar os fatores e as interações que dominam a rugosidade. Também estão representados os parâmetros de menor relevância. Entre os parâmetros analisados percebe-se que o avanço é o único fator dominante sobre a rugosidade, pois apresenta valor de p próximo de 0,05, portanto mostra-se estatisticamente significativo.

Tabela 11 – Regressão de superfície de Resposta: R_{ku} versus V_c ; f ; a_p ; r_e .
Análise de Variância.

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	14	1,989	31,24%	1,989	0,142	1,53	0,139
Linear	4	1,043	16,39%	1,043	0,261	2,80	0,036
V_c	1	0,005	0,08%	0,005	0,005	0,05	0,819
f	1	0,789	12,39%	0,789	0,789	8,47	0,006
a_p	1	0,105	1,65%	0,105	0,105	1,12	0,294
r_e	1	0,145	2,27%	0,145	0,145	1,55	0,219
Quadrado	4	0,493	7,74%	0,493	0,123	1,32	0,275
$V_c \times V_c$	1	0,434	6,81%	0,046	0,046	0,49	0,485
$f \times f$	1	0,050	0,79%	0,027	0,027	0,29	0,593
$a_p \times a_p$	1	0,008	0,13%	0,009	0,009	0,10	0,758
$r_e \times r_e$	1	0,001	0,01%	0,001	0,001	0,01	0,933
Interação 2 Fatores	6	0,453	7,11%	0,453	0,075	0,81	0,567
$V_c \times f$	1	0,217	3,41%	0,217	0,217	2,33	0,133
$V_c \times a_p$	1	0,009	0,14%	0,009	0,009	0,10	0,757
$V_c \times r_e$	1	0,009	0,14%	0,009	0,009	0,10	0,759
$f \times a_p$	1	0,121	1,91%	0,121	0,121	1,30	0,259
$f \times r_e$	1	0,072	1,12%	0,072	0,072	0,77	0,385
$a_p \times r_e$	1	0,025	0,39%	0,025	0,025	0,27	0,609
Erro	47	4,378	68,76%	4,378	0,093		
Falta de ajuste	10	0,852	13,38%	0,852	0,085	0,89	0,548
Erro puro	37	3,526	55,38%	3,526	0,095	*	*
Total	61	6,367	100,00%		0,142		

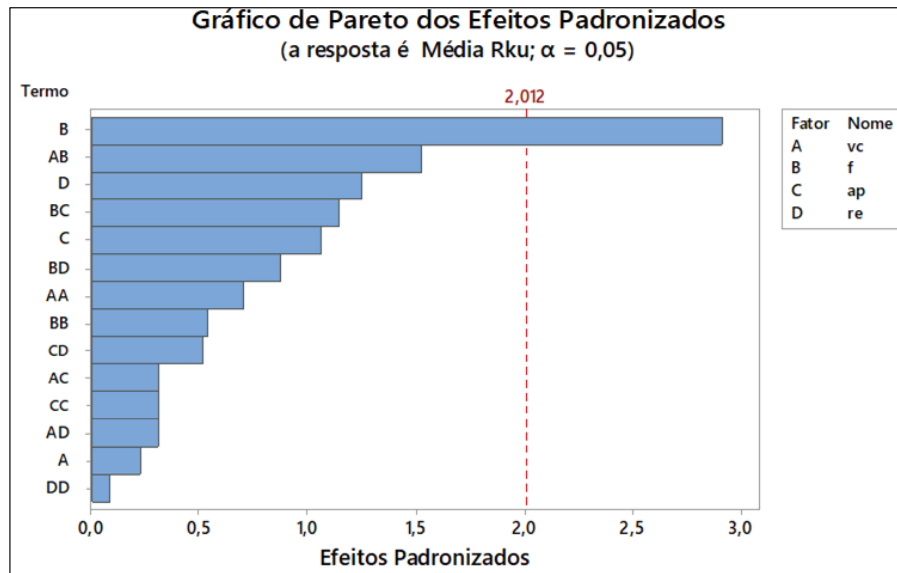
Sumário do Modelo

S	R ²	R ² (aj)	PRESQ	R ² (pred)
0,305203	31,24%	10,76%	7,086	0,00%

Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

De acordo com a ANOVA representada na Tabela 11, e gráfico de Pareto Figura 23, constata-se que os demais parâmetros de corte não afetam a rugosidade R_{ku} . Os fatores dos parâmetros de entrada, apresentam valores de p superior a 0,05, não apresentando variações que pudessem ser detectadas, portanto, não apresentam significância estatística.

Figura 23 – Gráfico dos efeitos de Pareto.



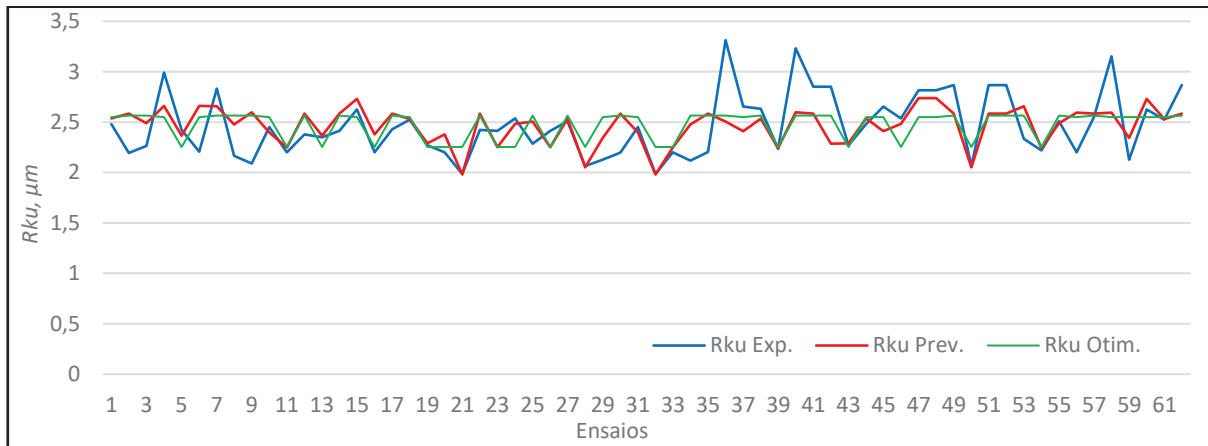
Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

Através da Figura 24, verifica-se o perfil de rugosidade gerado através da Equação (5). Observa-se que R_{ku} ficou entre (1,986 – 3,313) μm , ou seja, na maioria dos experimentos os valores de $R_{ku} < 3$.

$$\begin{aligned}
 R_{ku} = & -0,11 + 0,0347 \times V_c + 9 \times f + 0,97 \times a_p + 0,31 \times r_\epsilon - 0,000105 \times V_c^2 \\
 & - 28,9 \times f^2 - 1,85 \times a_p^2 + 0,071 \times r_\epsilon^2 - 0,0549 \times V_c \times f \\
 & - 0,0037 \times V_c \times a_p - 0,00139 \times V_c \times r_\epsilon + 8,21 \times f \times a_p \\
 & - 2,37 \times f \times r_\epsilon - 0,464 \times a_p \times r_\epsilon
 \end{aligned} \quad (5)$$

Esta distribuição pode ser considerada platicúrtica, tendo poucos picos altos e baixos vales, distribuídos de forma balanceada. Pode-se ainda afirmar que quanto menor os valores de R_{ku} menor será a distribuição dos picos agudos ao longo de sua superfície e conseqüentemente menor será a fricção e atrito entre duas superfícies em contato. Outro fator a ser considerado para baixos valores de R_{ku} obtidos é a utilização de insertos novos durante os experimentos. Grzesik (2008), destaca que o desgaste de ferramentas de cerâmica é um dos fatores para aumento dos valores de rugosidade R_{ku} . Este parâmetro pode ser utilizado com o intuito de controlar as condições de vida da ferramenta de corte, desta maneira o desgaste de ferramenta pode afetar valores de R_{ku} .

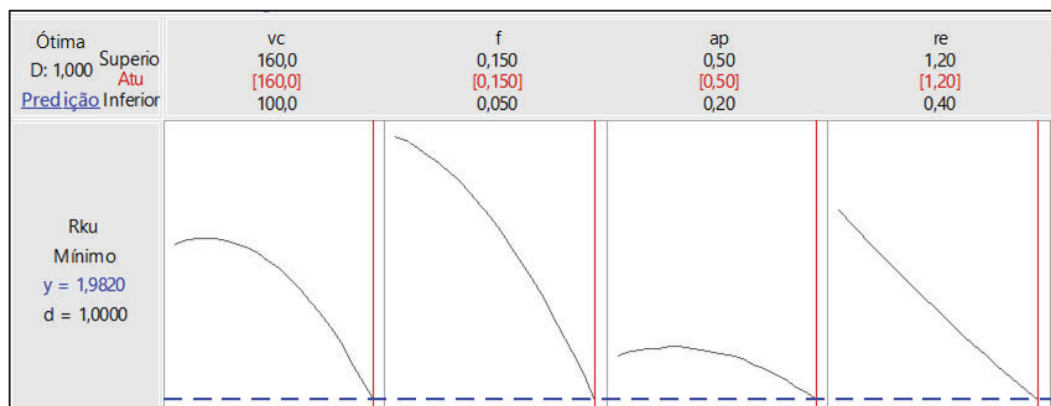
Figura 24 – Comparação entre valores medidos e previstos para rugosidade R_{ku} .



Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

A Figura 25 mostra de forma gráfica o comportamento da otimização dos parâmetros de corte para a rugosidade R_{ku} . A condição ótima ou rugosidade mais baixa do parâmetro R_{ku} está relacionado aos máximos valores de cada um dos parâmetros de usinagem utilizados durante a realização dos ensaios. Consta-se ainda que a condição ótima gerada através da otimização está no valor de $1,982 \mu\text{m}$, mesmo valor de rugosidade encontrado nos ensaios experimentais, conforme descrito no ensaio correspondente da linha 21 Tabela 6.

Figura 25 – Otimização da mínima Rugosidade R_{ku} .



Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

5 CONCLUSÕES

A análise da rugosidade utilizando a técnica da Metodologia de Superfície de Resposta, possibilitou investigar a influência dos fatores de entrada, obtendo a otimização dos valores de saída, viabilizando encontrar os fatores mais significativos. Desta forma, foi possível encontrar as melhores condições de corte em função do menor parâmetro de rugosidade R_a , R_z e R_{ku} para as faixas analisadas. As principais conclusões que podem ser extraídas são as seguintes:

A comparação entre os perfis de rugosidade R_a , R_z e R_{ku} , gerados através dos valores experimentais e valores previstos através do modelo matemático, mostram que são úteis para prever novos experimentos, indicando que existe uma boa relação entre as análises realizadas.

Em decorrência das análises da rugosidade realizadas, através da ANOVA e dos gráficos de otimização, foi possível certificar que o avanço é o fator mais significativo para R_a e R_z , com 29,51 % e 27,41% respectivamente de significância estatística. Ao adotar f 0,074mm/rot e 0,0904 mm/rot são atingidas as condições ótimas de rugosidade (R_a 0,0089 μm e R_z 0,4359 μm), ficando dentro dos valores previstos pelo fabricante. Para valores de avanço menores tem-se um pequeno aumento da rugosidade. O raio de ponta da ferramenta é o segundo fator mais significativo, com 16,78 % e 21,15 %. À medida que o raio de ponta é aumentado os valores de rugosidade são reduzidos.

É possível afirmar que o comportamento dos parâmetros R_a , R_z são similares. O parâmetro R_z apresenta-se de forma mais sensível as mudanças de acabamentos da superfície quando comparado com a rugosidade R_a . Neste caso as interações dos parâmetros de usinagem ocorrem de forma semelhante.

Entre as interações dos parâmetros de usinagem, destacam-se ($f \times r_e$). O raio de ponta da ferramenta de 1,2 mm proporciona os menores valores de rugosidade para valores mínimos de f 0,074 mm/rot e 0,09 mm/rot. Abaixo deste valor a rugosidade tende a piorar em virtude da pressão específica do corte ou até mesmo ao fluxo lateral do material não cortado. Ao analisar os demais raios de ponta, verifica-se que ambos reduzem os valores de rugosidade em avanços menores.

Os resultados das interações entre ($V_c \times f$) apontam que para baixos valores de avanço a velocidade de corte apresenta significância e ao adotar altos valores de avanço o efeito da

velocidade de corte se torna nulo. Justificando a pouca influência da velocidade de corte durante à análise da ANOVA.

É possível confirmar que entre os parâmetros de usinagem analisados, a rugosidade R_{ku} apresentou efeito significativo apenas no avanço, não apresentando relação com os demais parâmetros de usinagem. Este é um parâmetro estatístico, portanto, tem a função de analisar o tipo de perfil, desta forma no trabalho o perfil apresenta poucos picos altos e baixos vales. No entanto, a literatura entre a analogia dos parâmetros estatísticos e a relação com outros parâmetros de rugosidade ainda é escassa. Contudo, outra análise a ser considerada é que R_{ku} deve ser utilizado juntamente com outros parâmetros estatísticos, sendo complementares entre eles garantindo desta forma a correta utilização para caracterização de superfícies.

Em uma visão geral deste trabalho, os resultados podem ser classificados como satisfatórios, uma vez que se percebe que o avanço foi o fator mais significativo, seguido do raio de ponta para os dois parâmetros R_a e R_z . Ainda foi possível identificar os valores mínimos de avanço para cada raio de ponta utilizado.

5.1 Sugestão de trabalhos futuros

- Efetuar experimentos de retificação no aço ABNT 4340, com o intuito de comparar os parâmetros de rugosidade R_a , R_z e R_{ku} .
- Realizar experimentos do estudo da formação de cavacos nos aços endurecidos, com ferramentas de cerâmica, sendo que a formação de cavacos segmentados é um processo dinâmico não linear e pode afetar as forças de corte.
- Utilizar as mesmas condições de corte, ferramentas, parâmetros e máquina, com o intuito de analisar a influência da vibração na rugosidade, durante o torneamento de acabamento de aços endurecidos.
- Aplicar análise da relação de desgaste e temperatura no torneamento de acabamento a seco com ferramentas de cerâmica, investigando à análise dos efeitos na rugosidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINHO, Oswaldo Luiz; RODRIGUES, Antonio Carlos dos Santos; LIRANI, João. **Tolerâncias, Ajustes, Desvios E Análises De Dimensões**. 14. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2015. 295 p.

AGRAWAL, Anupam et al. Prediction of surface roughness during hard turning of AISI 4340 steel (69 HRc). **Applied Soft Computing**, [s.l.], v. 30, p.279-286, maio 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2015.01.059>.

AOUICI, H et al. Experimental investigation of cutting parameters influence on surface roughness and cutting forces in hard turning of X38CrMoV5-1 with CBN tool. **Sadhana**, [s.l.], v. 38, n.3, p.429-445, jun. 2013. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s12046-013-0147z>.

AOUICI, H. et al. Machinability investigation in hard turning of AISI D3 cold work steel with ceramic tool using response surface methodology. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 73, n. 9-12, p.1775-1788, 29 maio 2014. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-014-5950-0>.

AOUICI, H. et al. Surface roughness evaluation of various cutting materials in hard turning of AISI H11. **International Journal of Industrial Engineering Computations**, [s.l.], p.339-352, 2016. Growing Science. <http://dx.doi.org/10.5267/j.ijiec.2015.9.002>.

AOUICI, Hamdi et al. Analysis of surface roughness and cutting force components in hard turning with CBN tool: Prediction model and cutting conditions optimization. **Measurement**, [s.l.], v. 45, n. 3, p.344-353, abr. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2011.11.011>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. São Paulo, 2002.

BENLAHMIDI, S. et al. Design optimization of cutting parameters when turning hardened AISI H11 steel (50 HRc) with CBN7020 tools. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 89, n. 1-4, p.803-820, 12 Jul. 2016. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-9121-3>.

BENSOUILAH, Hamza et al. Performance of coated and uncoated mixed ceramic tools in hard turning process. **Measurement**, [s.l.], v. 82, p.1-18, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2015.11.042>.

BORBA, Vinícius Rodrigues. **Análise Da Força De Usinagem e Da Rugosidade No Torneamento De Aços Endurecidos Com Ferramentas De PCBN e De Metal-Duro**. 2016. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2016.

CELESTINO, Valter Roberto de Brito. **Análise Comparativa Do Uso De Ferramentas De Metal Duro Sem Revestimento E Revestidas Com Diboreto De Titânio Na Usinagem Da Madeira**. 2015. 194 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Processos de Fabricação, Universidade Estadual Paulista "julio Mesquita Filho", São Paulo, 2015.

DAS, Sudhansu Ranjan; DHUPAL, Debabrata; KUMAR, Amaresh. Experimental investigation into machinability of hardened AISI 4140 steel using TiN coated ceramic tool. **Measurement**, [s.l.], v. 62, p.108-126, fev. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2014.11.008>.

DAS, Sudhansu Ranjan; DHUPAL, Debabrata; KUMAR, Amaresh. Study of surface roughness and flank wear in hard turning of AISI 4140 steel with coated ceramic inserts. **Journal of Mechanical Science And Technology**, [s.l.], v. 29, n. 10, p.4329-4340, out. 2015. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s12206-015-0931-2>.

DAVIM, J. Paulo. **Machining - Fundamentals and Recent Advances**. Londres: Springer, 2008. 361 p. (ISBN 978-1-84800-212-8).

DAVOUDINEJAD, A.; NOORDIN, M. Y. Effect of cutting edge preparation on tool performance in hard-turning of DF-3 tool steel with ceramic tools. **Journal of Mechanical Science and Technology**, [s.l.], v. 28, n. 11, p.4727-4736, Nov. 2014. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s12206-014-1039-9>.

DENKENA, B.; GROVE, T.; MAISS, O. Influence of the cutting edge radius on surface integrity in hard turning of roller bearing inner rings. **Production Engineering**, [s.l.], v. 9, n. 3, p.299-305, 6 maio 2015. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11740-015-0615-x>.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 7. ed. São Paulo: Artliber, 2010. 270 p.

ELBAH, Mohamed et al. Comparative assessment of wiper and conventional ceramic tools on surface roughness in hard turning AISI 4140 steel. **Measurement**, [s.l.], v. 46, n. 9, p.3041-3056, Nov. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2013.06.018>.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 14. ed. São Paulo: Blücher Ltda, 2011. 751 p.

FERREIRA, R. et al. Analysis of the hard turning of AISI H13 steel with ceramic tools based on tool geometry: surface roughness, tool wear and their relation. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 38, n. 8, p. 2413-2420, 2016.

GADELMAWLA, E.s. et al. Roughness parameters. **Journal of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 123, n. 1, p.133-145, abr. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136\(02\)00060-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136(02)00060-2).

GRZESIK, W. Influence of tool wear on surface roughness in hard turning using differently shaped ceramic tools. **Wear**, [s.l.], v. 265, n. 3-4, p.327-335, Jul. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2007.11.001>.

HESSAINIA, Zahia et al. On the prediction of surface roughness in the hard turning based on cutting parameters and tool vibrations. **Measurement**, [s.l.], v. 46, n. 5, p.1671-1681, jun. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2012.12.016>.

HORVÁTH, Richárd; CZIFRA, Árpád; DRÉGELYI-KISS, Ágota. Effect of conventional and non-conventional tool geometries to skewness and kurtosis of surface roughness in case of fine turning of aluminium alloys with diamond tools. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 78, n. 1-4, p.297-304, 6 dez. 2014. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-014-6642-5>.

KHELLAF, A. et al. Comparative assessment of two ceramic cutting tools on surface roughness in hard turning of AISI H11 steel: including 2D and 3D surface topography. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 89, n. 1-4, p.333-354, 1 Jul. 2016. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-9077-3>.

KUMAR, A Senthil; DURAI, A Raja; SORNAKUMAR, T. Machinability of hardened steel using alumina based ceramic cutting tools. **International Journal of Refractory Metals And Hard Materials**, [s.l.], v. 21, n. 3-4, p.109-117, maio 2003. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0263-4368\(03\)00004-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0263-4368(03)00004-0).

KUMAR, Abhishek et al. Review of Effect of Tool Geometry Variation on Finish Turning and Improving Cutting Tool Life. **International Conference of Advance Research and Innovation**: Department of Mechanical Engineering, Delhi, India, p.566-571, 01 fev. 2014.

LI, Suyan et al. Experimental investigation of high-speed hard turning by PCBN tooling with strengthened edge. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 92, n. 9-12, p.3785-3793, 4 maio 2017. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-017-0397-8>.

LIU, Xian-li et al. Research on the Surface Characteristics of Hardened Steel with Variable Chamfer Edge PCBN Insert by High-Speed Hard Turning. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, [s.l.], v. 19, n. 2, p.157-165, fev. 2018. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s12541-018-0018-y>.

MACHADO, Álisson Rocha et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2012. 397 p.

MAISS, O.; GROVE, T.; DENKENA, B. Influence of asymmetric cutting edge roundings on surface topography. **Production Engineering**, [s.l.], v. 11, n. 4-5, p.383-388, 5 Jul. 2017. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11740-017-0742-7>.

MEDDOUR, I. et al. Investigation and modeling of cutting forces and surface roughness when hard turning of AISI 52100 steel with mixed ceramic tool: cutting conditions optimization. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 77, n. 5-8, p.1387-1399, 9 Nov. 2014. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-014-6559-z>.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 5ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

NUNES, Luciano Tadeu. **Análise estatística da influência dos parâmetros de corte na rugosidade no torneamento do aço microligado DIN 38MnSiVS5**. 2011. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Materiais e Processos de Fabricação, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

OLIVEIRA, João Fernando Gomes de; ALVES, Salette Martins. Adequação ambiental dos processos usinagem utilizando Produção mais limpa como estratégia de gestão ambiental. **Revista Produção**. São Paulo, p. 129-138. Jan. 2007.

OZEL, Tugrul; HSU, Tsu-kong; ZEREN, Erol. Effects of cutting edge geometry, workpiece hardness, feed rate and cutting speed on surface roughne. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 25, n. 3-4, p.262-269, 11 ago. 2004. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-003-1878-5>.

PETROPOULOS, Georgios P.; PANDAZARAS, Constantinos N.; DAVIM, J. Paulo. Surface Texture Characterization and Evaluation Related to Machining. **Surface Integrity in Machining**, [s.l.], p.37-66, 2010. Springer London. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-84882-874-2_2.

QEHAJA, Nexhat et al. Effect of Machining Parameters and Machining Time on Surface Roughness in Dry Turning Process. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 100, p.135-140, 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.351>.

RASHID, Waleed Bin; GOEL, Saurav. Advances in the surface defect machining (SDM) of hard steels. **Journal of Manufacturing Processes**, [s.l.], v. 23, p.37-46, ago. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.05.007>.

RATNAM, M.m.. 1.1 Factors Affecting Surface Roughness in Finish Turning. **Comprehensive Materials Finishing**, [s.l.], p.1-25, 2017. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.09147-5>.

SAINI, Sanjeev; AHUJA, Inderpreet Singh; SHARMA, Vishal S. Influence of cutting parameters on tool wear and surface roughness in hard turning of AISI H11 tool steel using ceramic tools. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, [s.l.], v. 13, n. 8, p.1295-1302, 7 Jul. 2012. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s12541-012-0172-6>.

SAMARDŽIOVÁ, Michaela; NESLUAN, Miroslav. Development of Surface Roughness in Hard Turning of 100Cr6 Using Mixed Ceramic Cutting Tool with Wiper Geometry and Conventional Geometry. **Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology**, [s.l.], v. 21, n. -, p.193-198, 1 Jan. 2013. Walter de Gruyter GmbH. <http://dx.doi.org/10.2478/rput-2013-0032>.

SANTOS, Francisco Vieira dos. **Caracterização Da Superfície Do Aço ABNT 4340 Endurecido Após Processo De Retificação Com Fluidos De Corte Sintético E Integral**. 2017. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia de Materiais - Demat, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

SHIHAB, Suha K et al. Optimization of surface integrity in dry hard turning using RSM. **Sadhana**, [s.l.], v. 39, n. 5, p.1035-1053, 19 ago. 2014. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s12046-014-0263-4>.

SURESH, P.v.s.; RAO, P. Venkateswara; DESHMUKH, S.g.. A genetic algorithmic approach for optimization of surface roughness prediction model. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, [s.l.], v. 42, n. 6, p.675-680, maio 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0890-6955\(02\)00005-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0890-6955(02)00005-6).

SURESH, R.; BASAVARAJAPPA, S. Effect of Process Parameters on Tool Wear and Surface Roughness during Turning of Hardened Steel with Coated Ceramic Tool. **Procedia Materials Science**, [s.l.], v. 5, p.1450-1459, 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.464>.

SURESH, R.; BASAVARAJAPPA, S.; SAMUEL, G.I. Some studies on hard turning of AISI 4340 steel using multilayer coated carbide tool. **Measurement**, [s.l.], v. 45, n. 7, p.1872-1884, ago. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2012.03.024>.

THIELE, Jeffrey D; MELKOTE, Shreyes N. Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation in the finish hard turning of AISI 52100 steel. **Journal of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 94, n. 2-3, p.216-226, set. 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136\(99\)00111-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136(99)00111-9).

VENTURA, Carlos E. H. et al. The influence of the cutting tool microgeometry on the machinability of hardened AISI 4140 steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 90, n. 9-12, p.2557-2565, 19 out. 2016. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-9582-4>.

XIAO, Zeqing et al. Effect of cutting parameters on surface roughness using orthogonal array in hard turning of AISI 1045 steel with YT5 tool. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 93, n. 1-4, p.273-282, 24 maio 2016. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-8933-5>.

ZHAO, T. et al. Correlation between edge radius of the CBN cutting tool and surface quality in hard turning. **Journal of Superhard Materials**, [s.l.], v. 39, n. 4, p.251-258, Jul. 2017. Allerton Press. <http://dx.doi.org/10.3103/s1063457617040050>.

ZHAO, T. et al. Effect of cutting edge radius on surface roughness and tool wear in hard turning of AISI 52100 steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 91, n. 9-12, p.3611-3618, 26 Jan. 2017. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-017-0065-z>.

ÖZEL, Tugrul et al. Modelling of surface finish and tool flank wear in turning of AISI D2 steel with ceramic wiper inserts. **Journal of Materials Processing Technology**, [s.l.], v. 189, n. 1-3, p.192-198, Jul. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.01.021>.

5.2 APÊNDICE A – Resultados da Rugosidade R_a

Tabela 12 – Regressão de Superfície de resposta dos valores de R_a otimizados. Análise de variância.

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	7	19,9819	89,25%	19,9819	2,85455	64,02	0,000
Linear	3	10,5847	47,27%	10,5847	3,52822	79,13	0,000
V_c	1	0,2207	0,99%	0,2207	0,22069	4,95	0,030
f	1	6,6075	29,51%	6,6075	6,60747	148,19	0,000
r_e	1	3,7565	16,78%	3,7565	3,75649	84,25	0,000
Quadrado	2	4,0928	18,28%	4,0928	2,04638	45,90	0,000
$f \times f$	1	3,8514	17,20%	0,9399	0,93987	21,08	0,000
$r_e \times r_e$	1	0,2414	1,08%	0,2414	0,24140	5,41	0,024
Interação 2 Fatores	2	5,3045	23,69%	5,3045	2,65223	59,48	0,000
$V_c \times f$	1	0,1789	0,80%	0,1789	0,17885	4,01	0,050
$f \times r_e$	1	5,1256	22,89%	5,1256	5,12560	114,96	0,000
Erro	54	2,4077	10,75%	2,4077	0,04459		
Falta de ajuste	17	1,9949	8,91%	1,9949	0,11735	10,52	0,000
Erro puro	37	0,4128	1,84%	0,4128	0,01116	*	*
Total	61	22,3896	100,00%				

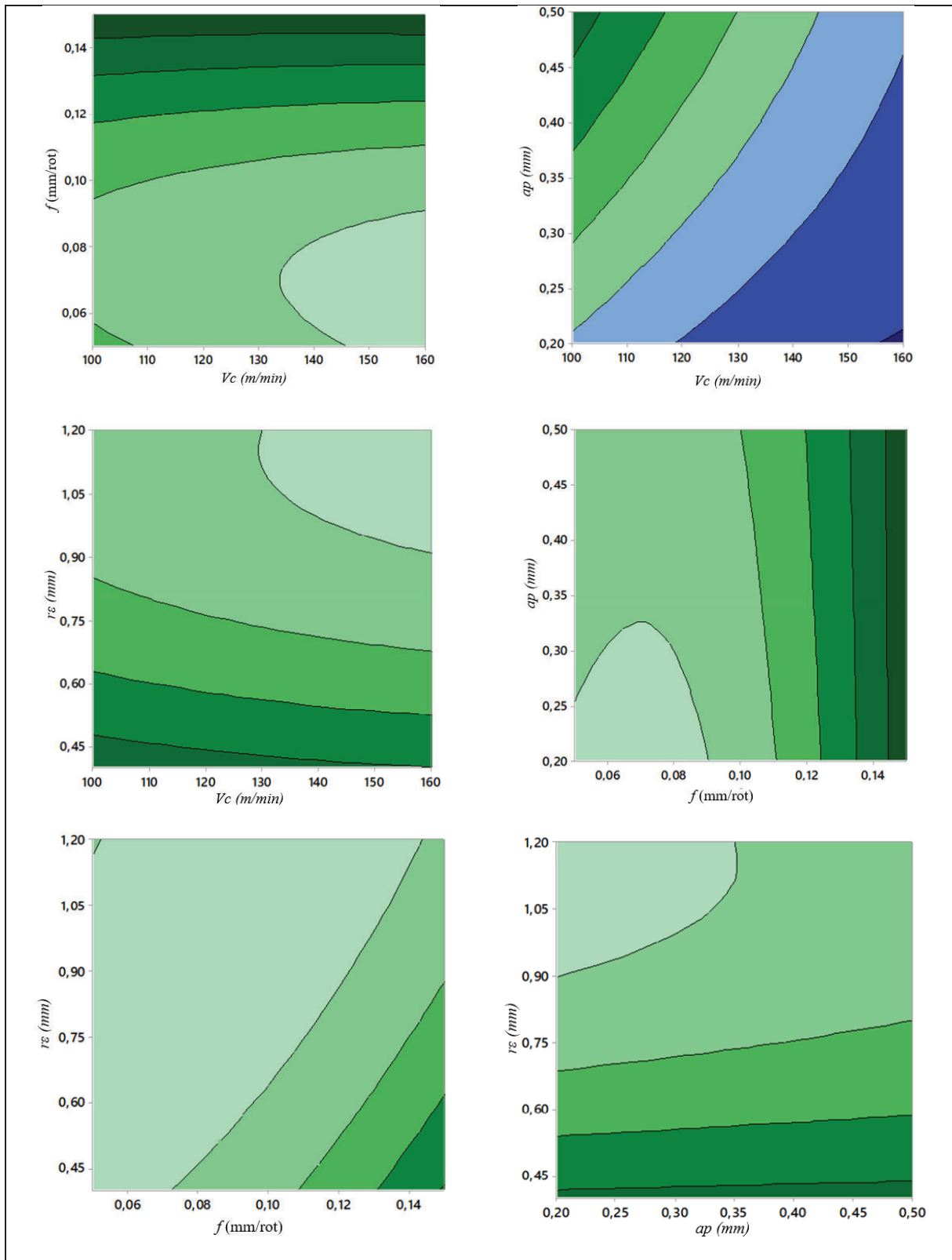
Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)
0,211156	89,25%	87,85%	3,49304	84,40%

Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

$$R_a = 1,737 - 0,00759 \times V_c - 11,34 \times f - 0,671 \times r_e + 147,2 \times f^2 + 1,166 \times r_e^2 + 0,0498 \times V_c \times f - 20,01 \times f \times r_e \quad (6)$$

Figura 26 – Gráfico de contorno da rugosidade R_a .



Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

5.3 APÊNDICE B – Resultados da rugosidade R_z

Tabela 13 – Regressão de Superfície de resposta dos valores de R_z otimizados. Análise de variância.

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	8	313,659	90,87%	313,659	39,2073	65,92	0,000
Linear	4	173,409	50,24%	173,409	43,3523	72,89	0,000
V_c	1	2,741	0,79%	2,741	2,7412	4,61	0,036
f	1	94,599	27,41%	94,599	94,5994	159,05	0,000
a_p	1	3,051	0,88%	3,051	3,0507	5,13	0,028
r_e	1	73,018	21,15%	73,018	73,0180	122,76	0,000
Quadrado	2	58,299	16,89%	58,299	29,1497	49,01	0,000
$f \times f$	1	55,335	16,03%	14,274	14,2740	24,00	0,000
$r_e \times r_e$	1	2,964	0,86%	2,964	2,9643	4,98	0,030
Interação 2 Fatores	2	81,950	23,74%	81,950	40,9749	68,89	0,000
$V_c \times f$	1	2,833	0,82%	2,833	2,8332	4,76	0,034
$f \times r_e$	1	79,117	22,92%	79,117	79,1167	133,02	0,000
Erro	53	31,523	9,13%	31,523	0,5948		
Falta de ajuste	16	27,190	7,88%	27,190	1,6993	14,51	0,000
Erro puro	37	4,334	1,26%	4,334	0,1171	*	*
Total	61	345,182	100,00%				

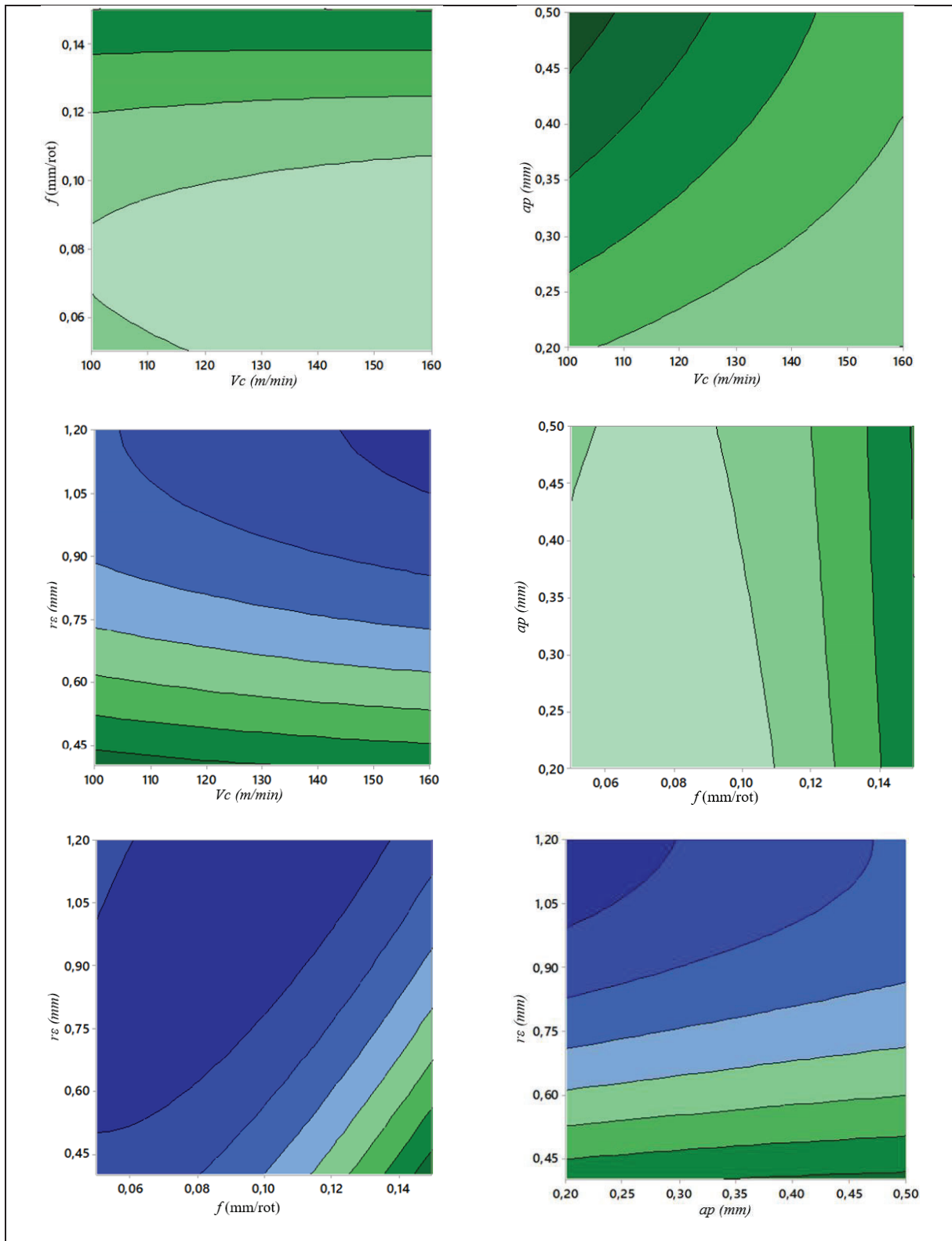
Sumario do Modelo

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)
0,771219	90,87%	89,49%	48,1804	86,04%

Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

$$R_z = 6,70 - 0,0290 \times V_c - 45,2 \times f + 1,941 \times a_p - 2,23 \times r_e + 574 \times f^2 + 4,08 \times r_e^2 + 0,1984 \times V_c \times f - 78,62 \times f \times r_e \quad (7)$$

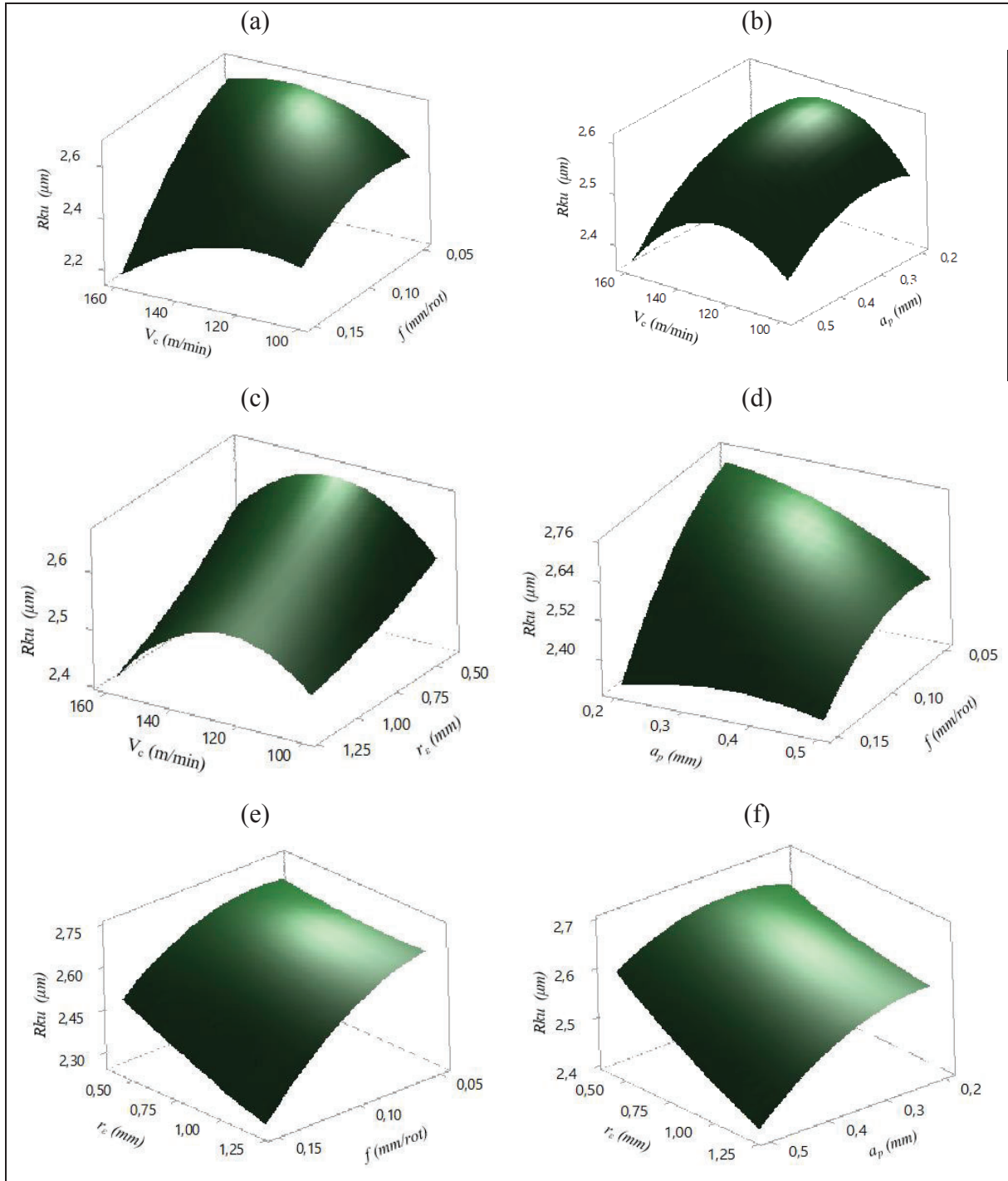
Figura 27 – Gráfico de contorno da rugosidade R_z .



Fonte: Desenvolvido pelo Autor.

5.4 APÊNDICE C – Resultados da Rugosidade R_{ku}

Figura 28 – Influência dos parâmetros de corte sobre a rugosidade R_{ku} .



Fonte: Desenvolvido pelo autor.