

JOÃO PAULO DE SIQUEIRA BUSO

**Análise comparativa entre planejamentos do tipo Fatorial Completo e Taguchi no
processo de torneamento do aço AISI 4340 temperado e revenido**

João Paulo de Siqueira Buso

Análise comparativa entre planejamentos do tipo Fatorial Completo e Taguchi no processo de torneamento do aço AISI 4340 temperado e revenido

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves

B979a	<p>Buso, João Paulo de Siqueira</p> <p>Análise comparativa entre planejamentos do tipo fatorial completo e taguchi no processo de torneamento do aço AISI 4340 temperado e revenido / João Paulo de Siqueira Buso – Guaratinguetá, 2022.</p> <p>78 f. : il.</p> <p>Bibliografia: f. 77-78</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2022.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves</p> <p>1. Usinagem. 2. Aço de alta resistência. 3. Aço para ferramentas. 4. Ferramentas de corte. I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 621.9</p>
-------	--

Luciana Máximo
Bibliotecária CRB-8/3595

JOÃO PAULO DE SIQUEIRA BUSO

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves
Orientador/UNESP-FEG



Eng. Mec. Gabriel Augusto Malvão
Membro Externo

Ariel Gomes Lima

Eng. Mec. Ariel Gomes Lima
Membro Externo

DADOS CURRICULARES

JOÃO PAULO DE SIQUEIRA BUSO

NASCIMENTO	18.09.1993 – Rio Claro / SP
FILIAÇÃO	Irineu Fernando Buso Renilde Dias Rodrigues de Siqueira Buso
2009/2011	Técnico em Mecânica Automobilística - Técnico SENAI – Rio Claro
2013/2021	Graduação em Engenharia Mecânica - Bacharelado Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

dedico este trabalho
de modo especial, à minha família e amigos

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos;

ao meu orientador, *Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível;

aos meus pais *Irineu Fernando Buso e e Renilde Dias Rodrigues de Siqueira Buso*, e minha irmã *Juliana Siqueira Buso*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos;

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar;

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

“Viver num mundo sem tomar consciência do significado do mundo é como vagar por uma imensa biblioteca sem tocar aos livros”

Manly P. Hall

RESUMO

Diferentes são as formas de obter e calcular os resultados em processos de usinagem, visando a redução de custos e recursos a serem utilizados, aumentando a eficiência e produtividade. Dentre os diversos métodos de usinagem, os que possuem maior importância hoje, são os que estão relacionados a usinagem a seco juntamente com a usinagem de aços endurecidos, que acarretou em um desenvolvimento nas ferramentas utilizadas, que apresentam cada vez mais recobrimentos adequados para o processo. Tais melhorias e aplicações tem como objetivo eliminar as etapas de retificação que encarecem e aumentam o tempo de finalização do processo. Além disso, a forma como são planejados os resultados são de extrema relevância para a análise final do processo de usinagem. Dessa forma, é importante a partir dos parâmetros de entrada e quantidade de repetições aplicados em um processo de usinagem, aplicar um planejamento adequado capaz de conferir melhor os dados apresentados. O planejamento adequado implicará em redução de tempo e custo, somando à melhor configuração de resultados e análises. Este projeto consiste no processo de torneamento à seco do aço endurecido utilizando uma ferramenta de corte de metal duro com recobrimento de TiAlN e TiN, aplicando os planejamentos Fatorial Completo e Taguchi (Arranjo Ortogonal L8), e em seguida comparar os resultados entre ambos os planejamentos demonstrando as divergências e convergências. Com base no exposto, o trabalho tem como objetivo viabilizar a usinagem do aço por meio da análise das variáveis de saída: rugosidade superficial, potência consumida de corte, vibração, emissão acústica e desgaste da ferramenta em diferentes condições de usinagem. Os ensaios foram realizados no Centro de Usinagem (CNC), analisando a influência dos parâmetros de entrada: velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. Os planejamentos adotados foram Fatorial Completo e Taguchi L8, ambas com duas repetições. Dos fatores estudados, a velocidade de corte e o avanço têm se mostrado mais influentes no processo, sendo o avanço mais crítico quando avaliado a qualidade superficial da peça. Utilizando o menor avanço, obteve-se melhor resultado na qualidade superficial.

PALAVRAS-CHAVE: Torneamento. Usinagem. Aço SAE 4340. Rugosidade. Potência de Corte. Vibração. Emissão acústica

ABSTRACT

Different are the ways to obtain and calculate the machining processes, aiming at the reduction of resources and machining efficiency, increasing efficiency and productivity. Among the various machining methods, which are of greater importance today, are those related to dry machining that are with a machining, which resulted in a development in the tools used, which presents more and more coatings suitable for the process. Such improvements and applications aim to eliminate the grinding steps that are expensive and increase the completion time of the process. In addition, the way the results are planned is extremely important for the final analysis of the machining process. Thus, it is important that the input parameters and the amount of plant are applied from a planning process capable of better checking the data presented. Proper planning will result in reduced time and cost results, adding to the best configuration and exams configuration. This project does not consist of a heavy steel turning process using a carbide cutting tool with TiAlN and TiN recovery, applying the Full Factorial and Taguchi (L8 Orthogonal Arrangement) designs, and then comparing the results between the two designs demonstrating as divergences and convergences. Based on the above, the work aims to enable the analysis of the output variables: surface roughness, cutting machining, machining simulation, acoustic modeling and adjustment of the machining tool to different machining conditions. The tests were carried out at the Machining Center (CNC), analyzing the influence of the input parameters: cutting speed, feed and cutting depth. The planning plans were adopted by Fatorial Completo and Taguchi L8, both with two changes. Of the factors, being considered, the cutting speed and feed have been shown to be more influential in the process, being the most critical when evaluated as superficial of the part. Using the lowest feed, the best result was obtained in surface quality.

KEYWORDS: Turning. Dry machining. SAE 4340 steel. Cutting power. Vibration. Acoustic Emission. Roughness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Demonstração do movimento no processo de torneamento.....	19
Figura 2 - Ilustração da determinação da linha média.....	23
Figura 3 - Exemplo de medição da rugosidade total	23
Figura 4 - Tipos de avarias e desgastes nas ferramentas de corte.	26
Figura 5 - Corpo de Prova aço SAE 4340	29
Figura 6 - Corpo de prova já conectado ao Centro de Torneamento (CNC).....	30
Figura 7 - Centro de Torneamento CNC Romi modelo GL 240M	31
Figura 8 - Ferramenta metal duro TiAlN + TiN (CNMG120408-M1)	32
Figura 9 - Dados do fornecedor da ferramenta de corte	32
Figura 10 - Sistema de aquisição de dados.....	33
Figura 11 - Sensor de corrente modelo AT 100 B10.....	34
Figura 12 - Sensor piezelétrico marca VibroControl, modelo TV100	35
Figura 13 - Da direita para esquerda: Módulo de emissão acústica, sensor e amplificador.....	36
Figura 14 - Rugosímetro marca Mahr modelo Marsurf M300.....	37
Figura 15 - Estereoscópio marca Mahr modelo MarVision MM200	38
Figura 16 - Criação do Fatorial Completo.....	39
Figura 17 - Valores de entrada das variáveis Fatorial	39
Figura 18 - Seleção do Arranjo Ortogonal de Taguchi	42
Figura 19 - Taguchi L8 diferentes níveis.....	42
Figura 20 - Valores de entrada das variáveis Taguchi.....	43
Figura 21 - Gráfico Efeitos Principais Potência de Corte Fatorial	46
Figura 22 - Gráfico Interações para Potência de Corte Fatorial	47
Figura 23 - Gráfico Efeitos Principais Potência de Corte Taguchi	49
Figura 24 - Gráfico Interações para Potência de Corte Taguchi	50
Figura 25 - Gráfico Efeitos Principais Vibração Fatorial.....	51
Figura 26 - Gráfico Interações para Vibração Fatorial.....	52
Figura 27 - Gráfico Efeitos Principais Vibração Taguchi	54
Figura 28 - Gráfico Interações para Vibração Taguchi	55
Figura 29 - Gráfico Efeitos Principais Emissão Fatorial.....	57
Figura 30 – Gráfico Interações para Emissão Fatorial	57
Figura 31 – Gráfico Efeitos Principais Emissão Taguchi.....	59
Figura 32 – Gráfico Interações para Emissão Taguchi.....	60

Figura 33 – Gráfico Efeitos Principais Rugosidade Média (Ra) Fatorial.....	62
Figura 34 – Gráfico Interações para Rugosidade Média (Ra) Fatorial.....	63
Figura 35 – Gráfico Efeitos Principais Rugosidade Média (Ra) Taguchi.....	64
Figura 36 – Gráfico Interações para Rugosidade Média (Ra) Taguchi.....	65
Figura 37 – Gráfico Efeitos Principais Rugosidade Total (Rt) Fatorial.....	67
Figura 38 – Gráfico Interações para Rugosidade Total (Rt) Fatorial.....	68
Figura 39 – Gráfico Efeitos Principais Rugosidade Total (Rt) Taguchi.....	69
Figura 40 – Gráfico Interações para Rugosidade Total (Rt) Taguchi.....	70
Figura 41 – Gráfico Efeitos Principais desgaste (Vb/lc) Fatorial.....	71
Figura 42 – Gráfico Efeitos Principais desgaste (Vb/lc) Taguchi.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição Química (% massa) do aço AISI/SAE 4340	17
Tabela 2 - Propriedades mecânicas típicas de um aço AISI/SAE 4340	17
Tabela 3 - Condições de entrada no processo de usinagem	31
Tabela 4 - Condição Fatorial Completo das variáveis.....	40
Tabela 5 - Arranjos Ortogonais de Taguchi	41
Tabela 6 - Condição Fatorial Completo das variáveis.....	43
Tabela 7 - Dados ANOVA Potência de Corte Fatorial	45
Tabela 8 - Dados ANOVA Potência de Corte Taguchi.....	48
Tabela 9 - Dados ANOVA Vibração Fatorial	51
Tabela 10 - Dados ANOVA Vibração Taguchi	53
Tabela 11 - Dados ANOVA Emissão Fatorial	56
Tabela 12 - Dados ANOVA Emissão Taguchi.....	58
Tabela 13 - Dados ANOVA Rugosidade Média (Ra) Fatorial.....	61
Tabela 14 - Dados ANOVA Rugosidade Média (Ra) Taguchi	63
Tabela 15 - Dados ANOVA Rugosidade Total (Rt) Fatorial	66
Tabela 16 - Dados ANOVA Rugosidade Total (Rt) Taguchi	68

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	OBJETIVOS GERAIS	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	AÇO SAE 4340	17
3.2	PROCESSO DE TORNEAMENTO	18
3.2.1	Grandezas físicas no processo de torneamento	19
3.2.2	Usinagem aços endurecidos	20
3.3	MATERIAIS PARA FERRAMENTA DE CORTE	20
3.3.1	Metal Duro	21
3.3.2	Cobertura TiAlN e TiN	21
3.4	VARIÁVIES DE SAÍDA DO PROCESSO DE TORNEAMENTO	22
3.4.1	Rugosidade	22
3.4.2	Potência de Corte	23
3.4.3	Emissão Acústica	24
3.4.4	Vibração	25
3.5	DESGASTE DA FERRAMENTA	25
3.6	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	26
3.6.1	Fatorial Completo	27
3.6.2	Taguchi Ortogonal L8	27
4	MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1	CORPO DE PROVA	29
4.2	PROCESSO DE TORNEMAENTO	30
4.2.1	Parâmetro de usinagem	31
4.3	FERRAMENTAS DE CORTE	31
4.4	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	33
4.4.1	Potência de Usinagem	34
4.4.2	Vibração	35
4.4.3	Emissão Acústica	36
4.5	RUGOSIDADE	36
4.6	DESGASTE DE FERRAMENTAS	37

4.7	PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS	38
4.7.1	Fatorial Completo	38
4.7.2	Taguchi	40
4.7.3	Análise de Variância (ANOVA)	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
5.1	POTÊNCIA DE CORTE	45
5.1.1	Fatorial Completo	45
5.1.2	Taguchi	47
5.2	VIBRAÇÃO.....	50
5.2.1	Fatorial Completo	50
5.2.2	Taguchi	53
5.3	EMISSÃO ACÚSTICA	55
5.3.1	Fatorial Completo	55
5.3.2	Taguchi	58
5.4	RUGOSIDADE MÉDIA (R_a).....	60
5.4.1	Fatorial Completo	60
5.4.2	Taguchi	63
5.5	RUGOSIDADE TOTAL (R_t)	65
5.5.1	Fatorial Completo	65
5.5.2	Taguchi	68
5.6	DESGASTE DA FERRAMENTA	70
6	CONCLUSÃO	73
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	76
	REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

Fabricar um produto nada mais é do que transformar matérias-primas, na maioria das vezes em seu estado primário, em produtos acabados, utilizando uma variedade de processos. Soldagem, fundição, usinagem metalurgia do pó e conformação estão entre os diversos processos de transformação de metais e ligas metálicas em peças e conjuntos mecânicos. Para definir um processo de fabricação, é necessário considerar alguns fatores tais como:

- Material a ser empregado e suas propriedades;
- Número de peças a serem produzidas/acabadas;
- Custo do processamento
- Tolerâncias e acabamento superficial requerido;
- Forma e dimensão da peça;
- Ferramenta de usinagem;

Divide-se os processos de fabricação de metais e ligas em: processos sem remoção de cavaco e processos com remoção de cavaco.

Os processos de usinagem são definidos como aqueles em que a remoção de material ocorre através da entrada de uma ferramenta em uma peça para conferir à peça uma determinada forma, dimensão e acabamento superficial. No processo de usinagem é necessário que a ferramenta utilizada deve ser de um material de resistência e dureza superior à peça que será submetida ao procedimento.

O processo fabricação por usinagem é amplamente utilizado na indústria, pois é um método capaz de produzir componentes mecânicos de alta qualidade superficial, geométrica e dimensional, permeando desde aplicações em cópias de chave até o processamento de peças e conjuntos robustos que atendem os mais diversos setores.

O torneamento é um dos processos de usinagem mais conhecidos e aplicados na indústria, favorecendo o incentivo ao conhecimento e aprofundamento nesse procedimento de usinagem. O trabalho propõe a aplicação do torneamento em um material bastante aplicado na indústria, o aço SAE/AISI 4340, muito visto em setores aeronáuticos, aeroespaciais e automobilísticos. O aço SAE 4340 possui características que favorecem conjuntos que sofrem esforços dinâmicos, tais como eixos veiculares, trens de pouso e virabrequins.

As pesquisas envolvendo usinagem são normalmente muito caras, pois dependem do material a ser usinado, ferramentas de corte, fluidos de corte, máquinas robustas e tempo de ensaios. Tudo isso onera muito as pesquisas. Sabendo disso, o planejamento da pesquisa de forma mais robusta pode baratear a pesquisa, no entanto é necessário verificar quais

informações e resultados tornam-se limitados quando usando estes métodos. Assim, será verificado através de dois métodos, Fatorial Completo e Método de Taguchi.

Sendo assim, diante do cenário atual, a proposta deste trabalho foi estabelecer condições específicas de usinagem que contribuam com as questões apresentadas. Isto é, viabilizar o torneamento do aço SAE 4340 temperado e revenido à seco (sem a utilização de lubrificantes), utilizando a ferramenta de corte Metal Duro com recobrimento TiAlN + TiN, validando e comparando os resultados das variáveis de saída do processo por meio dos planejamentos Fatorial Completo e Taguchi.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

- Analisar o desempenho de ferramentas de corte de metal duro recobrimento TiAlN + TiN no torneamento do aço SAE 4340 temperado e revenido. A partir do acabamento superficial (torneamento) e dos parâmetros de entrada definidos (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte), captar dados de potência, emissão acústica, vibração, rugosidade e desgaste da ferramenta de corte e comparar os resultados entre os planejamentos Fatorial Completo e Taguchi L8.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Viabilizar a usinagem de acabamento no processo de torneamento do aço AISI 4340 endurecido com a ferramenta de metal duro recoberta por TiAlN e TiN utilizando usinagem a seco, contribuindo para a diminuição dos processos de fabricação como a retificação;

- Analisar o comportamento das variáveis de saída: potência de corte, vibração, emissão acústica, rugosidade final e do desgaste da ferramenta a partir das condições de entrada;

- Comparar os resultados obtidos nos planejamentos Fatorial Completo e Taguchi L8, relacionando as convergências e divergências entre eles;

- Apresentar as vantagens e desvantagens entre os planejamentos Fatorial Completo e Taguchi L8;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 AÇO SAE 4340

O material utilizado no estudo do projeto é o aço SAE 4340, usado comercialmente desde 1955. O aço ABNT 4340 segundo Chiaverini (1986), foi desenvolvido com o intuito inicial de ser aplicado em componentes aeronáuticos e aeroespaciais. O aço SAE 4340 é classificado como um aço super-resistente, pois possui médio teor de carbono e elementos de liga com concentrações específicas, que aumentam sua temperabilidade. A composição química do aço 4340 é apresentada na Tabela 1.

O aço é aplicado em componentes de sistemas mecânicos, principalmente estruturais. Este combina profundo endurecimento (alta temperabilidade) com alta ductilidade, elevada resistência e razoável tenacidade, além de apresentar boa soldabilidade. Possui alta resistência à fadiga, e é frequentemente empregado em severas condições de serviço, sujeitas a cargas altas. Também é aplicado onde é requerida alta resistência em peças grandes e secções mais grossas. Devido a sua alta resistência é suas principais aplicações estão em eixos, engrenagens, engrenagens planetárias, colunas e cilindros. Na indústria aeronáutica por exemplo é bastante utilizado tanto nas peças que compõem a montagem das aeronaves, como também nas ferramentas que são usadas para construir e modelar as peças de montagem, pois é necessário um componente capaz de suportar elevadas solicitações mecânicas.

O aço SAE 4340 é tratável termicamente, resistente à fadiga em elevadas temperaturas além de possuir alta resistência e baixa liga, aplicado em estruturas críticas (BHATTACHARYA et al., 2011). Na Tabela 2 estão representadas as propriedades mecânicas típicas de um aço SAE 4340.

Tabela 1 - Composição Química (% massa) do aço AISI/SAE 4340

C	S	P	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
0,39	0,01	0,08	0,23	0,67	0,83	1,73	0,26

Fonte: Souza (2008).

Tabela 2 - Propriedades mecânicas típicas de um aço AISI/SAE 4340

Temperatura de revenimento	Resistência a tração (Mpa)	Tensão de escoamento (Mpa)	Alongamento em 50mm (%)	Redução de área (%)	Dureza HB	Dureza HRC
205	1980	1860	11	39	520	53
315	1760	1620	12	44	490	50
425	1500	1365	14	48	440	46
540	1240	1160	17	53	360	39
650	1020	860	20	60	290	31
705	860	740	23	63	250	24

Fonte: Souza (2008).

3.2 PROCESSO DE TORNEAMENTO

O processo de usinagem é definido como um procedimento ao mesmo tempo simples e complexo, na qual um material é trabalhado a fim de adquirir determinada forma, por meio da remoção de cavaco (FERRARESI, 1977), sendo um dos métodos de fabricação mais empregados atualmente.

Em processos de usinagem convencionais, a remoção do material acontece quando é empregado uma energia mecânica nas operações de corte, em especial por cisalhamento, no contato físico da ferramenta com a peça (SOUZA, 2011).

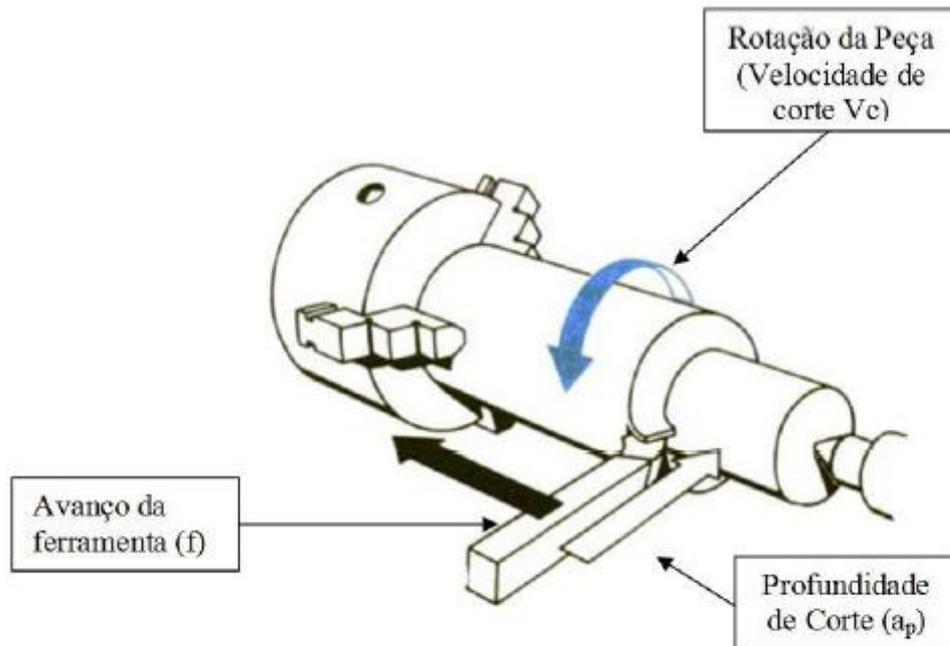
Operações de desbaste e de acabamento, são muito comuns em operações de usinagem, sendo a primeira com a finalidade de remover material enquanto a segunda, consiste na remoção de material com o objetivo de obter a qualidade final da peça (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2013).

É extremamente relevante considerar a produtividade nos processos de usinagem, cuja finalidade é obter o corte e acabamento da maior quantidade de material no menor período de tempo, por meio de ferramentas de corte com vida mais longa. Combinar esses parâmetros é um processo de usinagem que possibilita maximizar a produtividade.

O torneamento é um processo mecânico destinado a obtenção de superfícies de revolução com o auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. O torneamento é um processo de usinagem, no qual a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina, enquanto a

ferramenta de corte se desloca segundo uma trajetória coplanar com o eixo referido, conforme a Figura 1.

Figura 1 – Demonstração do movimento no processo de torneamento



Fonte: Souza (2011).

3.2.1 Grandezas físicas no processo de torneamento

A velocidade de corte (V_c), profundidade de corte (a_p) e o avanço (f) são os principais parâmetros de corte em um processo de torneamento.

Comparado com as baixas velocidades de corte, as altas velocidades em geral podem gerar impactos positivos no processo de usinagem, tais como a alta produtividade, o não aparecimento de aresta postiça de corte (APC), entre outros. Entretanto, as altas velocidades de corte geram um desgaste acelerado na ferramenta de corte, além do aumento no custo do processo (BONFÁ, 2013).

A profundidade de corte é determinada de acordo com o material a ser removido, formato da peça usinada entre outros aspectos como rigidez da ferramenta. Em geral, mudanças na profundidade de corte não alteram muita a vida da ferramenta.

De forma análoga à velocidade de corte, maiores avanços representam maior produtividade e menor tempo de corte quando comparados com pequenos avanços. Porém, os

baixos avanços implicam em melhor acabamento superficial devido às forças de corte serem menores.

Dessa forma, a união e conhecimento destas grandezas físicas podem auxiliar na produtividade, qualidade, tempo de fabricação e custo para as empresas.

3.2.2 Usinagem aços endurecidos

A usinagem de aços endurecidos, de forma geral, aumenta a vida útil relacionada à fadiga das peças produzidas e também, altera a microestrutura. Ambas estão relacionadas à dureza da peça (IGBAL et al., 2008).

Os aços considerados duros são aqueles que possuem em sua propriedade dureza acima de 45 HRC. A dureza Rockwell [HRC] está entre as mais utilizadas na medição da dureza superficial.

No processo de torneamento, em especial nas operações de acabamento, as forças de corte, elevadas temperaturas no contato entre ferramenta e peça e a alta dureza da peça usinada exigem requisitos para a rigidez e resistência ao desgaste da ferramenta.

O grande objetivo quando estudado a usinagem dos aços endurecidos está na redução ou eliminação da etapa de retificação que encarece o processo, aumenta o número de etapas e leva mais tempo para adquirir a peça com a qualidade superficial desejada.

3.3 MATERIAIS PARA FERRAMENTA DE CORTE

Os materiais usados na confecção das ferramentas são fruto das constantes pesquisas industriais e tecnológicas, buscando atingir o melhor desempenho e eficiência das ferramentas. Os materiais passam constantemente por pesquisas e desenvolvimentos afim de possibilitar e descobrir novos materiais, além de melhorar as características dos já existentes (KÖNIG, 1997). As características são físicas, mecânicas e geométricas, tais como: resistência ao desgaste, tenacidade e elevada dureza a frio e a quente.

Em geral, um material utilizado em uma determinada ferramenta de corte terá propriedades que se sobressaem em alguns aspectos e aplicações, ao mesmo tempo que pode não ser o melhor material para outras ocasiões. Devido a isso, buscar um equilíbrio entre as propriedades de uma ferramenta se faz necessário.

As características da ferramenta selecionada, impactará em todo o processo. A quantidade de trocas de ferramentas, custo do operador, tempo de fabricação e escolhas das máquinas estão

entre alguns dos principais fatores influenciados a partir da escolha da ferramenta. (STEMMER, 1995; KÖNIG, 1997).

O processo de usinagem é baseado no atrito entre a peça usinada e a ferramenta de corte. Dessa forma, para a material da ferramenta ser eficiente durante a usinagem, ele deve apresentar em sua propriedade elevada resistência ao desgaste por atrito. Além disso, apresentar elevada resistência ao choque térmico, pois durante o processo há um aumento da temperatura na região da aresta de corte. E também, possuir alta resistência à compressão e ao impacto, resistindo assim ao primeiro contato entre ferramenta de corte e peça usinagem (SOUZA, 2018).

Algumas dessas características podem ser encontradas juntas, dependendo das condições de usinagem. Entretanto, tais características não se encontram em um único material (MACHADO et al, 2009).

3.3.1 Metal Duro

Na indústria moderna, o metal duro é a material de mais relevância, pois concilia boa dureza quanto à quente quando em temperatura ambiente, apresente boa tenacidade, além de possuir alta resistência ao desgaste.

O metal duro é um material proveniente da metalurgia do pó, onde é sintetizado com um ou mais metais ferrosos – cobalto, níquel ou ferro – e resultado disso é um componente com alta resistência e elevada dureza. (DINIZ; COPPINI, 2013). Ainda assim, buscando melhorar a eficiência da ferramenta de corte, a mesma pode ser revestida por determinados materiais. O revestimento pode constituir uma ou mais camadas, a partir do que é desejado como resultado final (MACHADO et al., 2009).

3.3.2 Cobertura TiAlN e TiN

O metal duro revestido é atrativo no mercado, por apresentar uma boa relação de custo e benefício. Dentre os possíveis revestimentos, o de TiAlN – Nitreto de Alumínio Titânio recebe destaque, pois quando aplicado no metal duro, confere características relacionadas à resistência a temperatura e ao desgaste. O revestimento TiAlN possui boa resistência a oxidação, o que o torna mais usado em processo de usinagem à seco. (SOUZA, 2018).

Já o revestimento TiN – nitreto de titânio – fornece características relacionadas ao atrito. O nitreto de titânio apresenta elevada resistência a abrasão, e quando utilizado como revestimento, causa uma redução no contato entre peça usinada e a ferramenta de corte.

3.4 VARIÁVIES DE SAÍDA DO PROCESSO DE TORNEAMENTO

As variáveis de saída mencionadas na sequência serão analisadas na pesquisa buscando compreender os efeitos no torneamento. Interações entre a peça e a ferramenta de corte exercem uma influência direta nestas variáveis, tais como o consumo de energia e rugosidade (HECKER et al. 2007). Também serão avaliadas as correlações entre as variáveis de potência, vibração, emissão acústica e desgaste da ferramenta.

3.4.1 Rugosidade

Atualmente, um dos fatores que justificam a ampla utilização dos processos de usinagem na fabricação de peças, é a possibilidade de se obter uma superfície técnica capaz de apresentar fatores superficiais e sub-superficiais relativamente eficientes, garantindo boa segurança, confiabilidade e durabilidade ao componente usinado. Dessa forma, a exigência quanto a qualidade superficial de um produto aumenta conforme crescem as necessidades do produto final. Portanto acabamento superficial têm bastante relevância, uma vez que a boa qualidade superficial é exigida em peças onde houver atrito, desgaste, resistência à fadiga, corrosão entre outras características.

A grande maioria dos estudos de usinagem que objetivam a análise da qualidade das peças produzidas, analisam as imperfeições e a topografia deixada nestas peças. Esta topografia das peças produzidas é denominada de rugosidade e é caracterizada como erros micro geométricos, sendo um resultado do processo de usinagem. (AGOSTINHO, 1981).

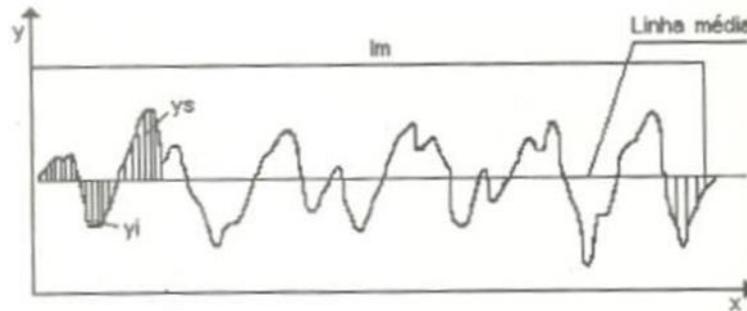
Quando analisadas as superfícies das peças de perto, estas apresentam irregularidades. Tais irregularidades causam imperfeições ou marcas deixadas pela ferramenta de corte que atuam sobre a superfície da peça. E é devido a isso que é importante considerar a qualidade do acabamento superficial, aumentando assim a funcionalidade das peças (PALMA, 2006).

As indústrias demonstram grande importância ao acabamento superficial e precisão dimensional das peças usinadas. Sendo assim, medir e caracterizar o acabamento das superfícies torna-se diferencial no processo de usinagem (REDDY e RAO, 2005).

- Rugosidade Média (R_a)

Rugosidade R_a é definida como o desvio médio aritmético dos valores absolutos de amplitude dos pontos de rugosidade em relação à linha média, dentro de um determinado percurso de medição (l_m) (DINIZ; MARCORDES; COPPINI, 2013). A linha média (Figura 2) mostra que a soma das áreas inferiores e superiores são iguais.

Figura 2 - Ilustração da determinação da linha média

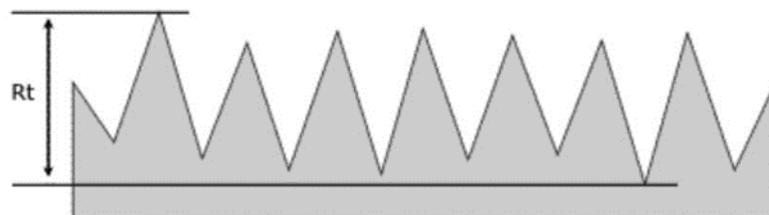


Fonte: Novaski (1994).

- Rugosidade Total (R_t)

Rugosidade total (R_t) é definida como o desvio total entre os valores absolutos de amplitude do maior ponto de perfil de rugosidade em relação ao ponto extremo oposto, dentro do percurso de medição (l_m) conforme apresentado na Figura 3. A parâmetro R_t confere maior rigidez nos resultados, já que considera o comprimento da amostra semelhante ao comprimento de avaliação.

Figura 3 - Exemplo de medição da rugosidade total



Fonte: Novaski (1994).

3.4.2 Potência de Corte

O nível de remoção de material de uma determinada peça pode ser diretamente associado ao consumo de potência do equipamento (GONÇALVEZ et al., 2010).

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2013), o material da peça, material e geometria da ferramenta, parâmetros de corte, meio lubrificante e o estado da ferramenta são fatores que influenciam a energia de corte, e como consequência, aumentando potência consumida.

Há diversas maneiras de mensurar a potência de corte de um equipamento. A instrumentação é comum na usinagem. Em seu trabalho, Gonçalves et al. (2006) instrumentou o equipamento de usinagem com aparelho de controle eletrônico microprocessador, indicado para medição e registro de grandezas da rede elétrica que alimenta a máquina.

A potência consumida pelo motor ou a variação de frequência do motor é medida por meio de um sensor de potência, que mede a corrente e a tensão do motor. Sensores de potência são utilizados em larga escala no monitoramento de equipamentos de usinagem, devido sua fácil instalação nos equipamentos (JEMIELNIAK, 1999).

A potência de usinagem é resultado do produto entre a força e a velocidade. A potência de corte (N_c), unidade em [cv], é demonstrada na Equação 1. (MACHADO et al., 2011):

$$N_c = \frac{F_c \cdot V_c}{60.75} \quad (1)$$

Em que a força de corte (F_c) é dada em [Kgf] e a velocidade de corte (V_c) em [m/min]. A Potência Efetiva de Corte (N_e) é representada pela Equação 2 (MACHADO et al., 2011):

$$N_e = N_c + N_f \quad (2)$$

A potência consumida na operação é medida diretamente no motor elétrico da máquina operatriz. Nas máquinas ferramentas que apresentam um único motor para acionar o movimento de corte e o movimento de avanço, a potência fornecida pelo motor pela Equação 3:

$$N_m = \frac{N_c}{\eta} \quad (3)$$

Em que o rendimento (η) da máquina-ferramenta, em geral fica entre 60% a 80%. Nos casos em que existe um motor para acionar cada movimento, isto é, um motor para acionar o movimento de corte e outro para acionar o movimento de avanço, o cálculo de N_m é separado, e o rendimento é geralmente o maior.

3.4.3 Emissão Acústica

Emissão acústica (EA) é a propagação de uma onda vibracional na rede dos materiais cristalinos, por consequência do rearranjo da estrutura interna do material que foi deformado

(WILLIANS, 1968). Os sinais são captados via um sensor piezoelétrico (acelerômetro) que transforma sinal mecânico em sinal elétrico.

As deformações de uma ferramenta durante um experimento causam impacto negativos na qualidade superficial da peça, afetando a rugosidade da mesma. Dessa forma, é válido desenvolver métodos, diretos ou indiretos, capazes de monitorar o desgaste, afim de ter maior controle do processo. A emissão acústica é o método indireto mais eficaz na detecção de desgaste, pois a faixa de frequência é superior as vibrações da máquina e dos ruídos ambientais, sendo que o processo não interfere na operação de corte (LI, 2002).

Segundo Webster et al. (1996), uma das melhores formas de monitoramento do sinal de emissão acústica é através do seu valor RMS (valor quadrático médio), sendo este um valor retificado do sinal de EA em intervalos de tempo determinado.

3.4.4 Vibração

Vibração é dada como sendo o movimento dinâmico do componente em análise em torno de sua posição estática (SOUTO, 2004).

A vibração é considerada uma das principais responsáveis pelo acabamento superficial, sendo então um dos obstáculos para atingir a melhor qualidade superficial requisitada (SONG et al., 2014; VIKRAM; RATNAM; NARAYANA, 2016).

Segundo Alves et al. (2009), é possível com a análise de vibrações identificar desgaste de ferramentas, condição de lubrificação e queima em peças. Além disso, pode-se detectar os elementos que apresentam defeitos em uma máquina.

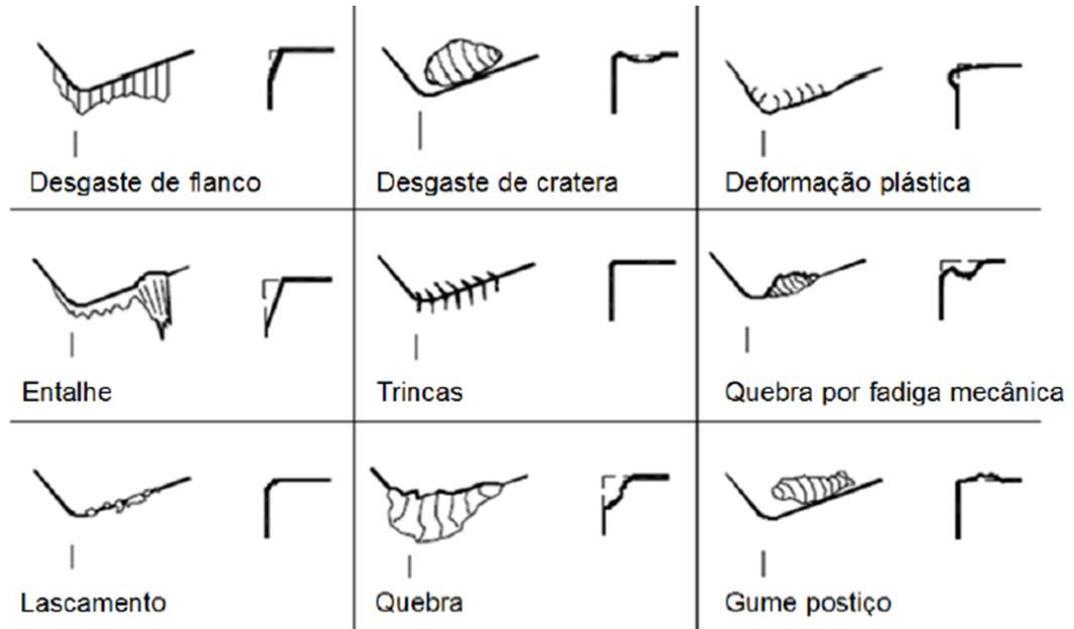
3.5 DESGASTE DA FERRAMENTA

Dependendo das variáveis de entrada em um processo de usinagem, a ferramenta de corte sofrerá impacto de carga mecânica e térmica. À estas solicitações que a ferramenta sofre, dá-se o nome desgastes ou avarias.

Avaria é quando o processo de destruição da ferramenta acontece de maneira repentina e inesperada. Avaria leva a uma perda de massa da ferramenta. Já o desgaste ocorre através da perda progressiva de material, devido ao movimento de contato relativo entre a superfície da peça e a ferramenta de corte (BLAU, 1995). Dessa forma, haverá gradualmente a redução no poder de corte, gerando um aumento de potência requisitada da máquina.

Em geral, como tanto o material da peça quanto o da ferramenta de corte não são homogêneos, diversas avarias e desgastes podem ser observadas na ferramenta de corte ao longo de sua utilização, como pode ser notado na Figura XX.

Figura 4 - Tipos de avarias e desgastes nas ferramentas de corte



Fonte: Adaptado de Zanella (2015).

3.6 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Em geral a estatística é lembrada quando existe uma grande quantidade de informação. Porém o que pouco se sabe, é que a atividade estatística mais importante não é a análise de dados, mas sim o planejamento de experimentos. Quando isso não é realizado de forma adequada, o resultado é um conjunto de números estéreis, da qual nenhum estatístico seria capaz de extrair quaisquer conclusões (BARROS NETO et al., 1995).

O experimento é muitas vezes definido como um teste ou uma série de testes, alterando de forma intencional as variáveis de entrada de um processo, afim de observar as mudanças ocorridas nas variáveis de saída, ou seja, nas variáveis respostas e assim, identificar as possíveis razões para tal mudança (MONTGOMERY, 2001).

Através de planejamentos experimentais baseados em princípios estatísticos, os desenvolvedores podem extrair do sistema em estudo o máximo de informação, usando de um número mínimo de experimentos. Existem diversas técnicas disponíveis aos pesquisadores e engenheiros que possibilitam melhorar os sistemas, produtos e processos (BOX et. all, 1978).

3.6.1 Fatorial Completo

Para executar um planejamento fatorial, primeiramente é preciso especificar os níveis em que cada fator será estudado, ou seja, os valores dos fatores que serão empregados nos experimentos. Cada um desses experimentos, em que o sistema é submetido a um conjunto de níveis definido, é um ensaio experimental. De forma geral, se houver n_1 níveis do fator 1, n_2 do fator 2, n_3 do fator 3, ..., e n_k do fator k, o planejamento será um fatorial $n_1 \times n_2 \times n_3 \times \dots \times n_k$. Este é um número mínimo para se obter um planejamento fatorial completo. Os ensaios podem ser repetidos quantas vezes o pesquisador achar necessário, afim de ter uma estimativa do erro experimental (DEMING, 1981).

O planejamento fatorial completo verifica todos os efeitos dos fatores na variável resposta, e ainda analisa todas as possíveis interações.

3.6.2 Taguchi Ortogonal L8

Segundo Montgomery (2001) a metodologia proposta por Genechi Taguchi, no início da década de 80, apresenta três objetivos principais:

1. Projetar processos ou produtos que sejam robustos em relação às condições ambientais;
2. Projetar produtos que sejam robustos à variabilidade de seus componentes;
3. Minimizar a variabilidade em torno de um valor nominal.

O termo robusto é aplicado para processos e produtos que apresentam desempenho compatível com a qualidade exigida e que sejam relativamente insensíveis aos fatores são de difícil controle.

Taguchi propôs uma metodologia que utiliza experimentos estatísticos, com o viés de melhorar a qualidade dos processos e produtos sem o aumento dos custos (MATTOS, 2004).

A filosofia de Taguchi fundamenta-se em dois princípios, ambos visando a diminuição na variabilidade. A primeira visa a redução da variação do produto ou processo, proporcionando uma qualidade melhorada enquanto a segunda baseia-se na estratégia adequada de desenvolvimento do processo ou produto (ROOS, 1991).

Taguchi desenvolveu um tipo de matriz que pode ser usado em diversas situações, tais matrizes são denominadas arranjos ortogonais (ROOS, 1991). A utilização do arranjo ortogonal

consiste na habilidade de avaliar os diferentes fatores com um número mínimo de testes (LOPES, 2008).

Os arranjos ortogonais com dois níveis são denominados L4, L8, L12, L16 e L32, e os arranjos com três níveis são L9, L18 e L27. O número na designação do arranjo ortogonal indica quantos ensaios serão necessários para a verificação, ou seja, L8 possui 8 ensaios (ROSS, 1991).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir será apresentado as etapas do desenvolvimento da pesquisa: material e equipamentos usados durante os ensaios, sistema de aquisição de dados, método do delineamento experimental e a como foram analisados os resultados.

4.1 CORPO DE PROVA

O material usado nos ensaios foi o aço SAE 4340 temperado e revenido (56 HRC), com as dimensões de $\text{Ø}80 \times 250 \text{mm}$. (Figura 5).

Figura 5 - Corpo de Prova aço SAE 4340



Fonte: Produção do próprio autor

A Figura 6 ilustra o corpo de prova já anexado ao centro de torneamento.

Figura 6 - Corpo de prova já conectado ao Centro de Torneamento (CNC)



Fonte: Produção do próprio autor

4.2 PROCESSO DE TORNEMAENTO

O projeto de pesquisa foi desenvolvido no Laboratório de Estudo da Usinagem na Unesp-Guaratinguetá, utilizando Centro de Torneamento CNC Romi modelo GL 240M (Figura 7) para o qual montado um sistema de aquisição de dados. O processo de torneamento foi a seco.

Figura 7 - Centro de Torneamento CNC Romi modelo GL 240M



Fonte: Produção do próprio autor

4.2.1 Parâmetro de usinagem

Parâmetros de corte utilizados foram: avanço de 0,05 e 0,1 mm/rot (f) e profundidades de corte de 0,25 e 0,50mm (ap), percurso de avanço de 100mm. Estes parâmetros foram escolhidos por ser valores comuns em operações de acabamento. As velocidades de corte (V_c) utilizadas foram de 75, 100, 125 e 150m/min, foram realizadas duas repetições. O Tabela 3 representa os parâmetros descritos.

Tabela 3 - Condições de entrada no processo de usinagem

Velocidade de corte (V_c)	Avanço (f)	Profundidade de Corte (ap)
<ul style="list-style-type: none"> • 75 m/min • 100 m/min • 125 m/min • 150 m/min 	<ul style="list-style-type: none"> • 0,05 mm/rot • 0,1 mm/rot 	<ul style="list-style-type: none"> • 0,25 mm • 0,50 mm

Fonte: Produção do próprio autor

4.3 FERRAMENTAS DE CORTE

As ferramentas utilizadas foram as pastilhas de metal duro (material base) revestidas com nitreto de alumínio titânio (TiAlN) e nitreto de titânio (TiN) doadas pela Fabricante Seco Tools. A ferramenta cujo código é CNMG120408 com quebra-cavaco do tipo M1. O código explica

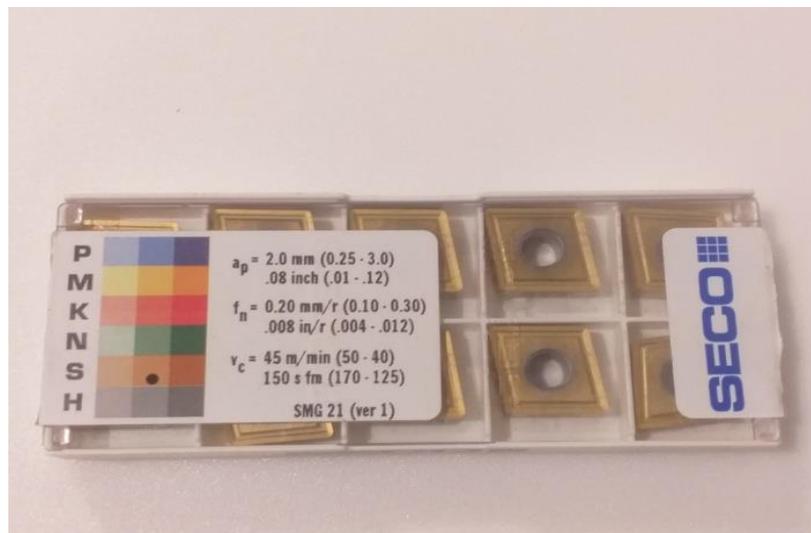
as propriedades da ferramenta de corte, sendo “C” formato geométrico com 80°, “N” o ângulo de folga com 0° (considerado neutro), “M” representa a classe de tolerância catalogada e “G” sistema de fixação e forma de quebra cavaco. Já os valores números representam respectivamente: 12 mm de aresta (tamanho da pastilha na aresta de corte), 4 mm de espessura e 8 mm de raio de ponta (também conhecido como ponta do inserto). M1 é a designação do fabricante do quebra-cavaco. A Figura 8 e a Figura 9 ilustram a ferramenta de corte.

Figura 8 - Ferramenta metal duro TiAlN + TiN (CNMG120408-M1)



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 9 - Dados do fornecedor da ferramenta de corte



Fonte: Produção do próprio autor

4.4 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Durante o processo de usinagem foram coletados dados de potência, vibração e emissão acústica com o auxílio de um sistema de aquisição de dados computadorizado (Figura 10), o qual coletou os dados do processo em tempo real. Esse sistema permite a obtenção de quaisquer variáveis físicas que, mediante sensores ou transdutores apropriados, são convertidos em sinais elétricos proporcionais.

Para isto foi utilizado um aplicativo desenvolvido que adquirisse os dados com uma taxa de 4000 pontos por segundo. Este programa foi desenvolvido através da plataforma do software Labview 7.1 2012, da National Instruments. O sistema ainda contou com uma placa de aquisição de dados da mesma empresa do software, modelo NI PCI 6220, que foi acoplada no computador. A placa teve a função de receber os sinais analógicos enviado dos sensores acoplados ao centro de usinagem e transformá-los em sinais digitais para serem interpretados pelo software.

Figura 10 - Sistema de aquisição de dados



Fonte: Produção do próprio autor

4.4.1 Potência de Usinagem

Para a aquisição da potência consumida do motor do centro de torneamento foi utilizado um sensor de corrente, da marca LEM modelo AT 100 B10 (Figura **Erro! Fonte de referência não encontrada.** 11).

Figura 11 - Sensor de corrente modelo AT 100 B10



Fonte: Produção do próprio autor

O sensor em função da corrente elétrica de uma das fases do motor gera uma saída proporcional de 0 a 10 Volts de Corrente Contínua (VCC), que é armazenada pelo computador. Como o sinal adquirido pelo sistema tem uma saída proporcional em volts é necessário converter o valor para ampéres. O fabricante do sensor fornece a Equação 4 para a transformação do dado adquirido em volts para ampéres.

$$I = U_{cc} * 10 \quad (4)$$

I = corrente de uma das fases em ampéres;

U_{cc} = tensão de corrente continua em volts.

Substituindo o valor da corrente, o valor da tensão de fase do motor do centro de usinagem (220 V) e o fator de potência (0,92) do motor, na Equação 5 que foi utilizada para transformar o sinal adquirido em volts para potência consumida em watts e, multiplicado toda a equação por $\sqrt{3}$, visto que motor utilizado é trifásico, obtêm-se a Equação 6.

$$P_c = I \times U_f \times F_p \times \sqrt{3} \quad (5)$$

P_c = potência consumida, em watts;

I = corrente alternada de uma das fases, em ampéres;

U_f = tensão de uma das fases, em volts;

F_p = fator de potência.

$$P_c = U_{cc} * 10 * 0,92 * 220 * \sqrt{3} \quad (6)$$

4.4.2 Vibração

Para a aquisição dos valores de vibração foi utilizado um sensor piezelétrico (acelerômetro) e um amplificador de sinal com saída retificada em RMS (valor quadrático médio), marca Vibro Control, modelo TV100 (Figura 12).

Figura 12 - Sensor piezelétrico marca VibroControl, modelo TV100



Fonte: Produção do próprio autor

Os valores obtidos em VCC foram convertidos depois para valores de velocidade em mm/s através da Equação 7, fornecida pelo fabricante.

$$V = \frac{25 \cdot VCC}{8} \quad (7)$$

4.4.3 Emissão Acústica

Para a aquisição da emissão acústica foi usado um módulo de emissão acústica composto por um sensor (piezoelétrico) e um amplificador de sinal elétrico com saída retificada em RMS (valor quadrático médio), marca PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION, modelo do sensor R15A, modelo do amplificador de sinal 1272-1000 (Figura 13).

Figura 13 - Da direita para esquerda: Módulo de emissão acústica, sensor e amplificador



Fonte: Produção do próprio autor

Esse sinal elétrico retificado corresponde à unidade VCC e é amplamente empregado nessa grandeza para expressar a emissão acústica, não havendo transformações para outras unidades.

4.5 RUGOSIDADE

Para a avaliação da qualidade superficial das peças através da rugosidade foi utilizado um rugosímetro da marca Mahr modelo Marsurf M300 (Figura 14), com ponta apalpadora em formato de cone esférico feita de diamante e com raio de ponta de 2 μm . Para esta análise foram utilizados os parâmetros Ra e Rt, com comprimento de amostragem adotado (cut-off) de 0,25mm.

Figura 14 - Rugosímetro marca Mahr modelo Marsurf M300



Fonte: Produção do próprio autor

Foram realizadas no total 3 medidas de rugosidade em cada sequência de usinagem, foram considerados os valores de Ra (Rugosidade média) e Rt (Rugosidade total).

4.6 DESGASTE DE FERRAMENTAS

Foi realizada a determinação do desgaste das ferramentas, identificando qual seria o tipo de avaria que ocorreu devido aos esforços na usinagem. Para isso, foi utilizado o estereoscópio da Marca Mahr, modelo MarVision MM20 (Figura 15).

Figura 15 - Estereoscópio marca Mahr modelo MarVision MM200



Fonte: Produção do próprio autor

4.7 PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS

Os dados obtidos de potência de corte, emissão e vibração foram tratados através do software Matlab, obtendo-se o valor médio a cada segundo de usinagem. Após isso, esses dados, juntamente com os dados de rugosidade e desgaste foram tratados estatisticamente com o software MINITAB®. O tratamento compreendeu as análises estatísticas de variância (ANOVA), testes de normalidade de Anderson-Darling e Teste de Tukey, de acordo com o planejamento experimental adotado. Foram utilizados o planejamento Fatorial Completo e o planejamento do tipo Taguchi L8, ambas com duas repetições.

4.7.1 Fatorial Completo

O experimento do tipo Fatorial Completo envolve todas as possíveis combinações entre os níveis dos fatores do experimento. Nesse caso foram realizados no total 32 ensaios, divididos em duas repetições. O desenvolvimento do planejamento foi feito no Minitab conforme. A Figura 16, representa a criação do planejamento, inserindo o número de fatores e seus respectivos níveis (Vc tendo 4 níveis e os demais 2 níveis). O fatorial completo permite

trabalhar com o maior número de informação a partir do que foi da quantidade de ensaios realizados.

Figura 16 - Criação do Fatorial Completo

Fator	Nome	Número de Níveis
A	Vc	4
B	f	2
C	ap	2

Número de réplicas: 2

Bloco nas réplicas

Ajuda OK Cancelar

Fonte: Produção do próprio autor adaptado do Minitab

A Figura 17 demonstra quais são os valores de entrada que serão computados para cada nível/fator.

Figura 17 - Valores de entrada das variáveis Fatorial

Fator	Nome	Tipo	Níveis	Valores de níveis			
A	Vc	Numéric	4	75	100	125	150
B	f	Numéric	2	0,05	0,1		
C	ap	Numéric	2	0,25	0,5		

Ajuda OK Cancelar

Fonte: Produção do próprio autor adaptado do Minitab

A Tabela 4 representa as condições realizadas no fatorial completo.

Tabela 4 - Condição Fatorial Completo das variáveis

Vc (m/min)	f(mm/rot)	ap(mm)
75	0,05	0,25
75	0,05	0,5
75	0,1	0,25
75	0,1	0,5
100	0,05	0,25
100	0,05	0,5
100	0,1	0,25
100	0,1	0,5
125	0,05	0,25
125	0,05	0,5
125	0,1	0,25
125	0,1	0,5
150	0,05	0,25
150	0,05	0,5
150	0,1	0,25
150	0,1	0,5

Fonte: Produção do próprio autor

4.7.2 Taguchi

Com os parâmetros de entrada já definidos, a Tabela 5 representa os possíveis arranjos segundo o método de Taguchi. Foram utilizados os mesmos ensaios aplicados no fatorial completo, respeitando a metodologia de Taguchi.

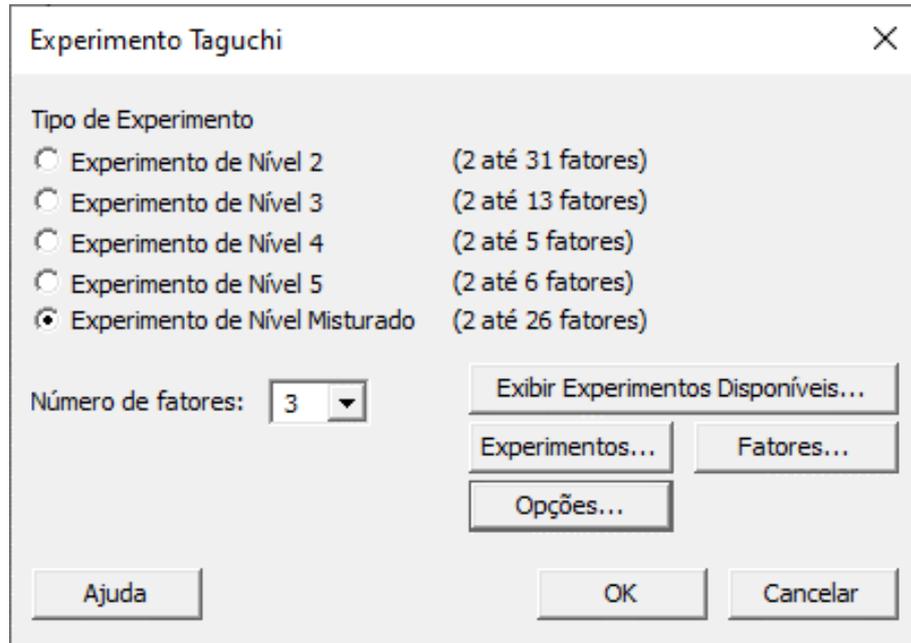
Tabela 5 - Arranjos Ortogonais de Taguchi

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

Fonte: Adaptado de Santos (2007)

Com a análise da Tabela 5, optou-se por utilizar o arranjo ortogonal L8. Com esse arranjo é possível analisar até 7 fatores com 2 níveis. Porém, como um dos fatores (Vc) possui 4 níveis, é possível aplicar uma particularidade no experimento de Taguchi conforme Figura 18.

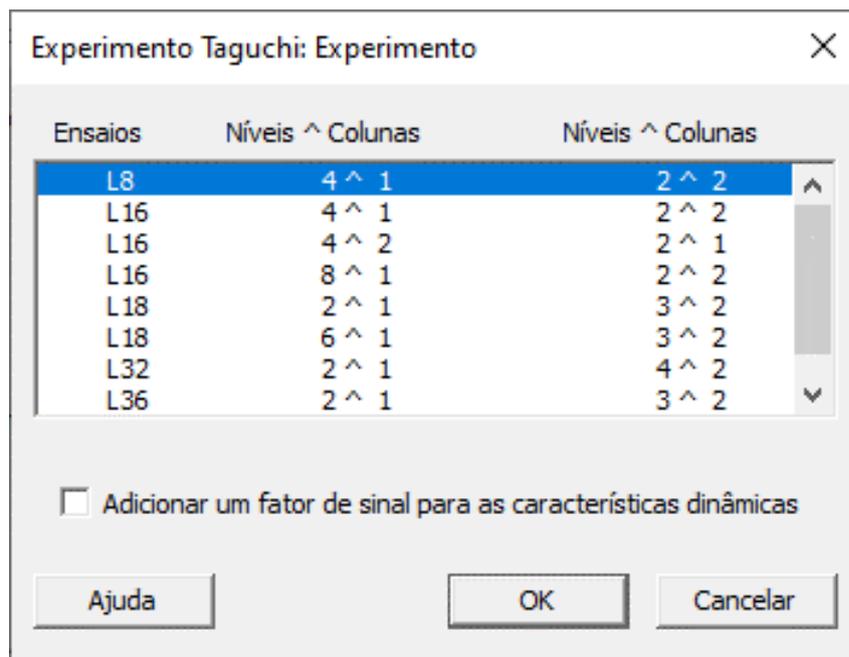
Figura 18 - Seleção do Arranjo Ortogonal de Taguchi



Fonte: Produção do próprio autor adaptado do Minitab

A figura 18 exemplifica a aplicação para os casos em que existem diferentes níveis para cada fator. Sabendo que um dos fatores (Vc) possui 4 níveis, enquanto os demais (f e ap) possuem 2 níveis, optou-se pela seleção seguindo a Figura 19.

Figura 19 - Taguchi L8 diferentes níveis



Fonte: Produção do próprio autor adaptado do Minitab

Assim como no fatorial, a Figura 20 apresenta os parâmetros de entrada selecionados para aplicação de Taguchi considerando o experimento com diferentes níveis.

Figura 20 - Valores de entrada das variáveis Taguchi

Fator	Nome	Valores de níveis	Coluna	Níveis
A	Vc	75 100 125 150	1	4
B	f	0,05 0,1	2	2
C	ap	0,25 0,5	3	2

Fonte: Produção do próprio autor adaptado do Minitab

Após a seleção do arranjo ortogonal L8 considerando experimento de níveis diferentes, a Tabela 6 representa as condições das variáveis de entrada no Taguchi.

Tabela 6 - Condição Fatorial Completo das variáveis

Vc (m/min)	f(mm/rot)	ap(mm)
75	0,05	0,25
75	0,1	0,5
100	0,05	0,25
100	0,1	0,5
125	0,05	0,5
125	0,1	0,25
150	0,05	0,5
150	0,1	0,25

Fonte: Produção do próprio autor

4.7.3 Análise de Variância (ANOVA)

Em ambos os planejamentos foram aplicados o ANOVA, já que o experimento realizado teve como intuito comparar três parâmetros de entrada (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte). Para o entendimento da análise é válido pontuar alguns conceitos estatísticos abaixo:

- ANOVA: técnica estatística que permite avaliar informações sobre as medidas populacionais. A análise foca em verificar a existência de uma diferença significativa entre as médias e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente.

- Valor-P ou p-value: depende diretamente de uma amostra, procura fornecer uma medida da força dos resultados de um determinado teste, em contraste a uma simples rejeição ou não rejeição. De forma geral, este é o menor nível de significância com que não se rejeitaria a hipótese nula.

- Graus de liberdade: no sentido estatístico, está associado a cada parcela de informação que é estimada dos dados. De modo geral, é o número de “observações” nos dados que são livres para variar quando é feita a estimativa dos parâmetros estatísticos.

- Hipótese nula: A hipótese nula normalmente afirma que não existe relação entre dois fenômenos estatísticos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em seguida será apresentado os resultados obtidos tanto do planejamento Fatorial Completo quanto do Taguchi L8, assim como as análises das variáveis potência de corte, vibração, emissão acústica e rugosidade.

5.1 POTÊNCIA DE CORTE

5.1.1 Fatorial Completo

A partir da análise de variância (ANOVA) conforme Tabela 7, é possível notar que em todas as interações segundo o p-value indicam que os experimentos são significativos, já que o p-value foi menor do que o nível de significância adotado de 0,05.

Tabela 7 - Dados ANOVA Potência de Corte Fatorial

Análise da Variância para Potência de Corte						
Fonte	GL	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Modelo	15	460828	30722	124,92	0,000	
Linear	5	413463	82693	336,25	0,000	
Vc (m/min)	3	95890	31963	129,97	0,000	
f (mm/rot)	1	166568	166568	677,31	0,000	
ap (mm)	1	151005	151005	614,03	0,000	
Interações de 2° Ordem	7	44645	6378	25,93	0,000	
Vc (m/min) * f (mm/rot)	3	14177	4726	19,22	0,000	
Vc (m/min) * ap (mm)	3	13815	4605	18,72	0,000	
f (mm/rot) * ap (mm)	1	16653	16653	67,71	0,000	
Interações de 3° Ordem	3	2720	907	3,69	0,034	
Vc (m/min) * f (mm/rot) * ap (mm)	3	2720	907	3,69	0,034	
Erro	16	3935	246			
Total	31	464763				

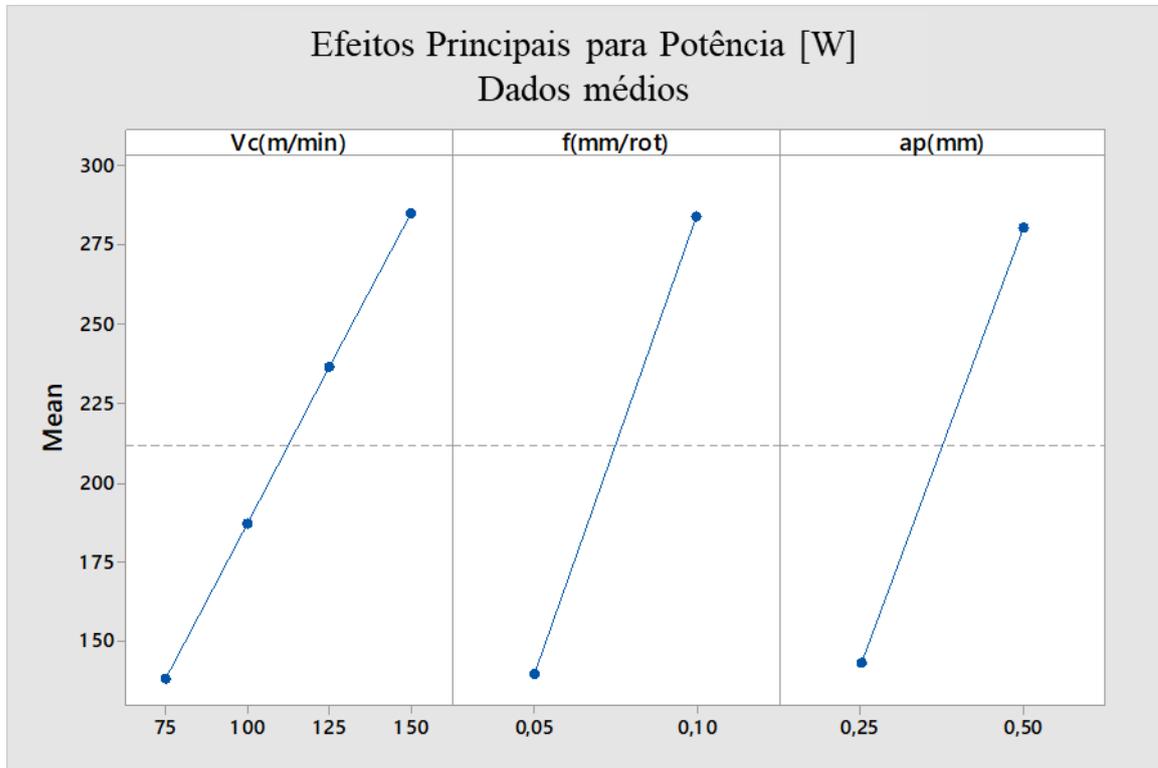
Fonte: Produção do próprio autor

Os 3 fatores principais, assim como todas as interações de 2a ordem e 3a ordem foram significativos. Portanto houve significância entre os fatores combinados na potência de corte.

A partir do gráfico de efeitos principais para Potência de Corte Figura 21 nota-se que os três fatores exerceram influência na variação dos valores de potência consumida, conforme aumentados elevaram a potência consumida no processo. Ou seja, maiores taxas de velocidade

de corte, aumentaram a potência consumida no processo. O mesmo é válido quando observados o avanço e a profundidade de corte.

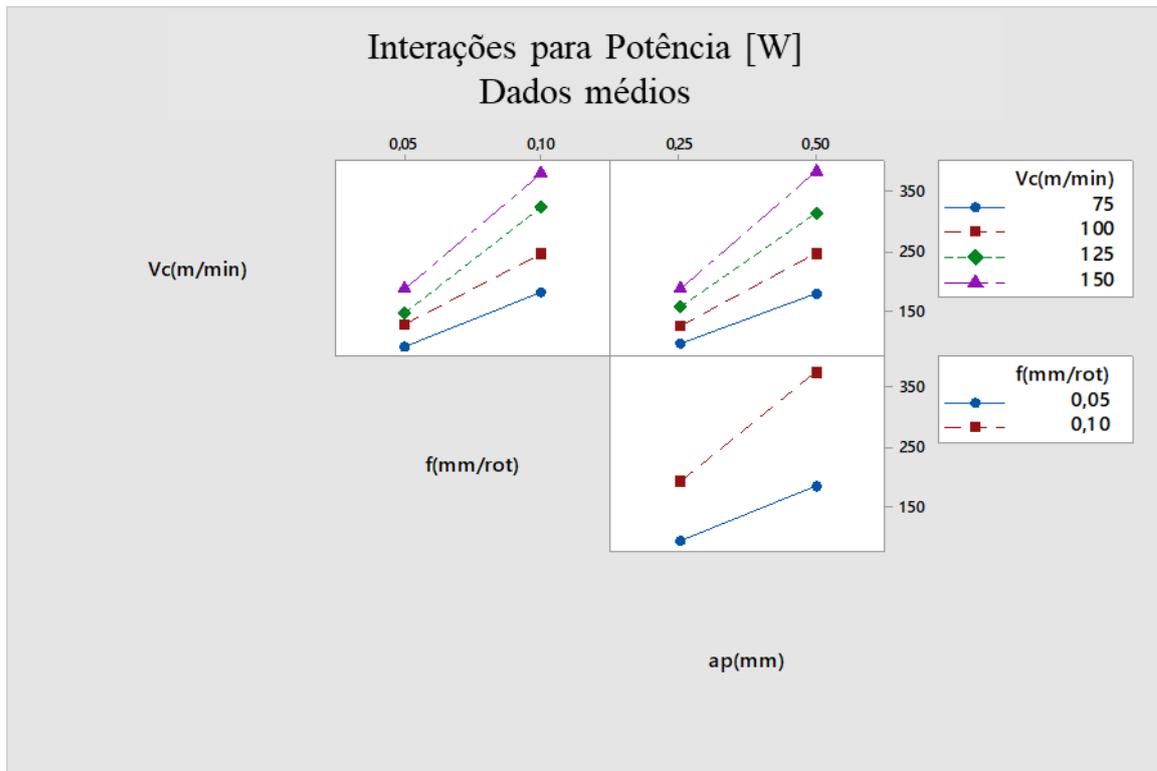
Figura 21 - Gráfico Efeitos Principais Potência de Corte Fatorial



Fonte: Produção do próprio autor

A Figura 22 é resultado da interação entre as variáveis de entrada para a obtenção da variável de saída potência P [W].

Figura 22 - Gráfico Interações para Potência de Corte Fatorial



Fonte: Produção do próprio autor

No gráfico de interações de potência, fica evidente como conforme aumentados as variáveis de entrada, aumenta-se a potência consumida. Nota-se nas interações entre velocidade de corte e avanço, assim como nas interações entre velocidade de corte e profundidade de corte, os menores valores de avanço e profundidade de corte geram para as 4 velocidades de corte, menores valores de potência.

Analogamente, avaliando a interação entre avanço e a profundidade de corte, para os menores valores de profundidade de corte, obtêm-se em ambos os avanços menores valores de potência consumida pelo processo.

O gráfico também mostra que existe significância entre os dados, pois estendendo as retas, em um dado momento, elas se cruzarão confirmando assim a relevância entre as variáveis.

5.1.2 Taguchi

Foi possível observar que muito embora para Taguchi foram considerados 16 ensaios, divididos em 2 repetições, a configuração L8 de Taguchi permite a matriz com 8 dados. Nesse caso, foi traçado os dados médios dos 16 ensaios, atendendo assim a configuração de Taguchi. A tabela de variância (Tabela 8) demonstra os resultados da configuração L8 (dados médios).

É possível observar que devido a configuração L8, os dados de 2 a e 3 a ordem de interação não foram gerados.

Tabela 8 - Dados ANOVA Potência de Corte Taguchi

Análise da Variância para Potência de Corte						
Fonte	GL	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Vc (m/min)	3	9974	3324,5	5,63	0,154	
f (mm/rot)	1	23022	23021,7	39,00	0,025	
ap (mm)	1	18692	18692,2	31,67	0,030	
Error	2	1180	590,2			
Total	7	52868				

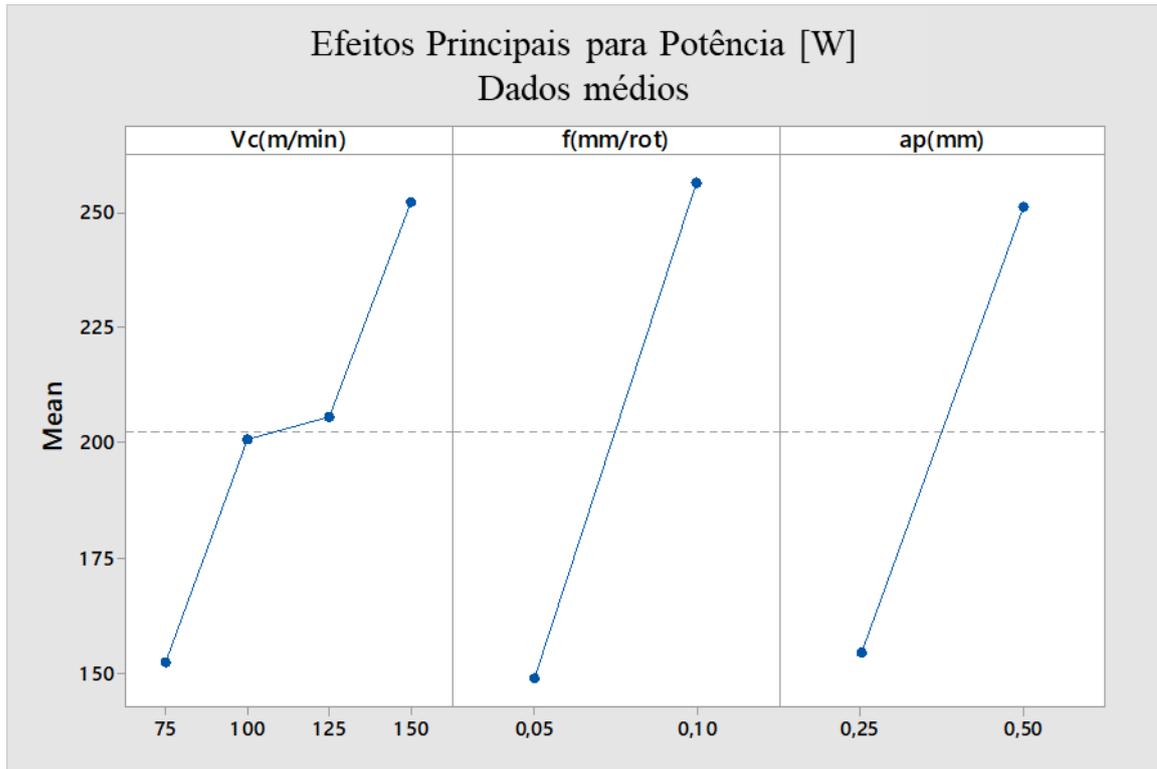
Fonte: Produção do próprio autor

Da tabela ANOVA, percebe-se que tanto o avanço quanto a profundidade de corte foram significativos estatisticamente.

Analogamente ao planejamento fatorial, a Figura 23 (gráfico Taguchi) pode-se notar que os 3 fatores (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) apresentam influência nos resultados da potência consumida. A menor variação da potência consumida foi entre os estágios intermediários de velocidade de corte (100 m/min e 125 m/min).

Tanto o avanço quanto a profundidade de corte seguiram semelhantes aos dados do planejamento fatorial completo.

Figura 23 - Gráfico Efeitos Principais Potência de Corte Taguchi

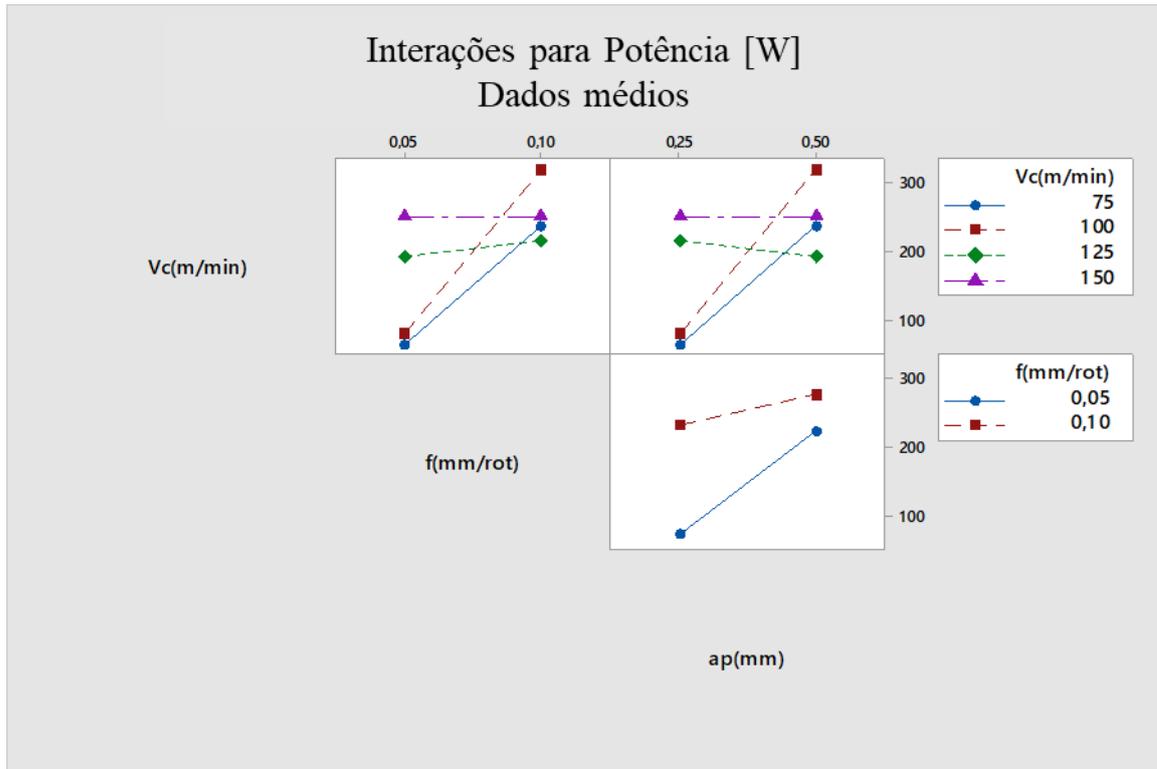


Fonte: Produção do próprio autor

Do gráfico de interações para potência de corte no planejamento Taguchi (Figura 24), é possível notar que há significância nos dados obtidos a partir das variáveis de entrada.

Quando observado as interações $V_c \times f$ e $V_c \times a_p$, os dois maiores estágios de velocidade de corte (125 m/min e 150 m/min) pouco variam com o aumento das variáveis de entrada avanço e profundidade de corte. Já os estágios iniciais de velocidade de corte, quando aumentados tanto o avanço quanto a profundidade de corte, aumenta-se a potência consumida no processo.

Figura 24 - Gráfico Interações para Potência de Corte Taguchi



Fonte: Produção do próprio autor

5.2 VIBRAÇÃO

5.2.1 Fatorial Completo

Os valores apresentam os respectivos dados relacionados à vibração, com o nível de significância de 95%.

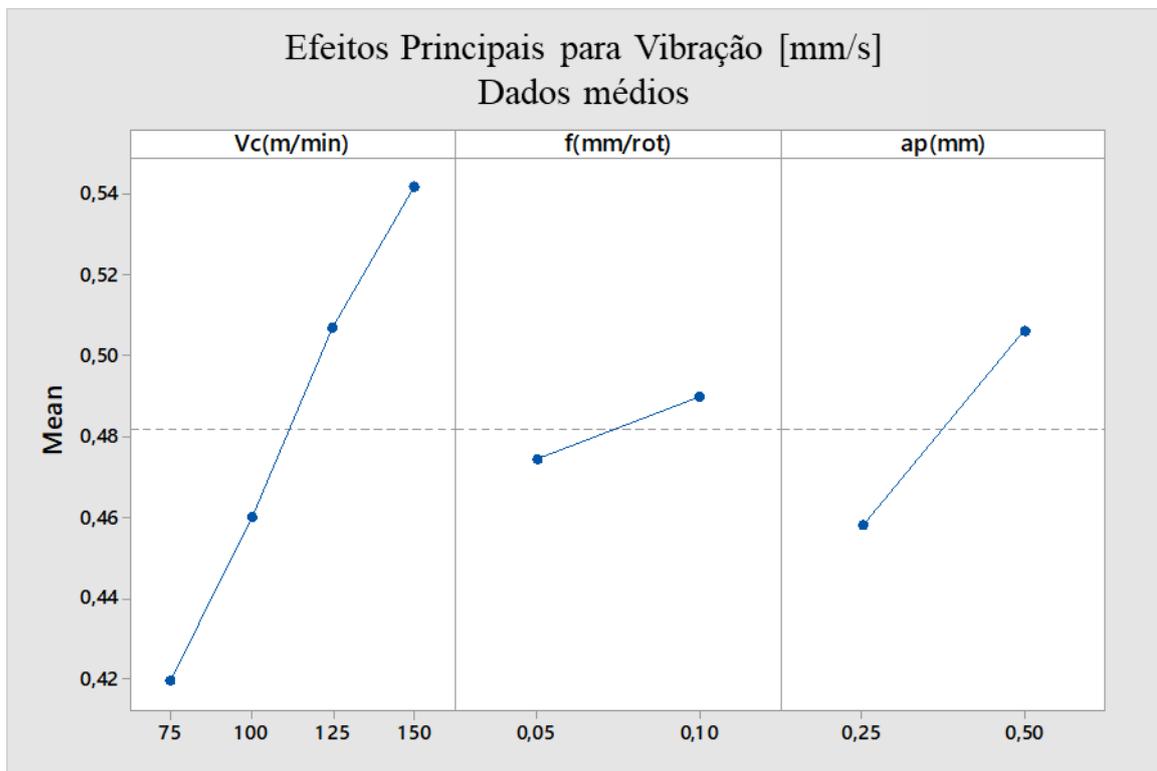
Na vibração observa-se na Tabela 9 que a velocidade de corte é a única significativa, porém quando nas interações de 2° e 3° ordem já não são consideradas significativas (p -value $> 0,05$).

Tabela 9 - Dados ANOVA Vibração Fatorial

Análise da Variância para Vibração					
Fonte	GL	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Modelo	15	0,141269	0,009418	2,08	0,078
Linear	5	0,088896	0,017779	3,93	0,016
Vc (m/min)	3	0,068760	0,022920	5,07	0,012
f (mm/rot)	1	0,001860	0,001860	0,41	0,530
ap (mm)	1	0,018275	0,018275	4,04	0,062
Interações de 2° Ordem	7	0,051290	0,007327	1,62	0,200
Vc (m/min) * f (mm/rot)	3	0,030552	0,010184	2,25	0,122
Vc (m/min) * ap (mm)	3	0,020177	0,006726	1,49	0,256
f (mm/rot) * ap (mm)	1	0,000560	0,000560	0,12	0,729
Interações de 3° Ordem	3	0,001084	0,000361	0,08	0,970
Vc (m/min) * f (mm/rot) * ap (mm)	3	0,001084	0,000361	0,08	0,970
Error	16	0,072355	0,004522		
Total	31	0,213624			

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 25 - Gráfico Efeitos Principais Vibração Fatorial



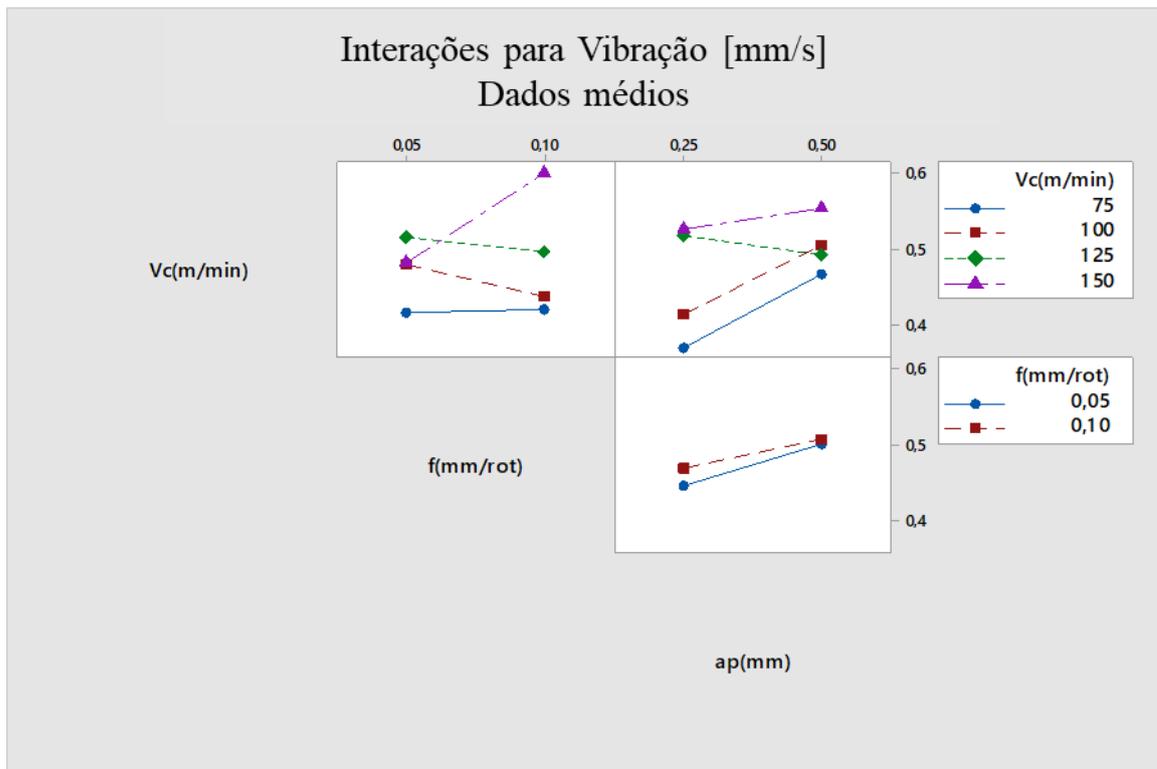
Fonte: Produção do próprio autor

A Figura 25 mostra que conforme aumentadas as variáveis de entrada, avanço e profundidade de corte, há um relativo aumento nos valores de vibração. O avanço exerce menos

influência na variável de saída se comparado com a profundidade de corte e a velocidade de corte.

O gráfico de efeitos principais comprova que a velocidade de corte exerce maior impacto nos valores de vibração saindo de 0,42mm/s no estágio inicial da velocidade de corte (75 m/min), alcançando aproximadamente 0,54mm/s na maior velocidade de corte (150 m/min).

Figura 26 - Gráfico Interações para Vibração Fatorial



Fonte: Produção do próprio autor

No gráfico de interações (Figura 26) nota-se que na interação entre a velocidade de corte e o avanço, a vibração no estágio inicial de velocidade de corte, varia muito pouco com o avanço, porém nos outros casos há um significativo impacto. Nos casos intermediários de velocidade de corte, a vibração diminui conforme aumentado o avanço. Já para o último estágio de velocidade de corte, com o aumento do avanço, eleva-se a vibração ao maior valor entre todas as interações possíveis.

Quando observado a interação entre a velocidade de corte e a profundidade de corte, a velocidade de corte de 125 m/min é a única que diminuiu a vibração com o aumento da profundidade de corte. Nota-se que a menor vibração é obtida à velocidade de corte de 75 m/min com uma profundidade de corte de 0,25 mm.

Observa-se também que para os menores valores de avanço e profundidade de corte, aumenta a variável de saída vibração.

5.2.2 Taguchi

Os valores apresentam os respectivos dados relacionados à vibração do planejamento Taguchi, com o nível de significância de 95%. Nota-se na Tabela 10 que nenhum dos fatores são significativos estatisticamente (p-value > 0,05).

Tabela 10 - Dados ANOVA Vibração Taguchi

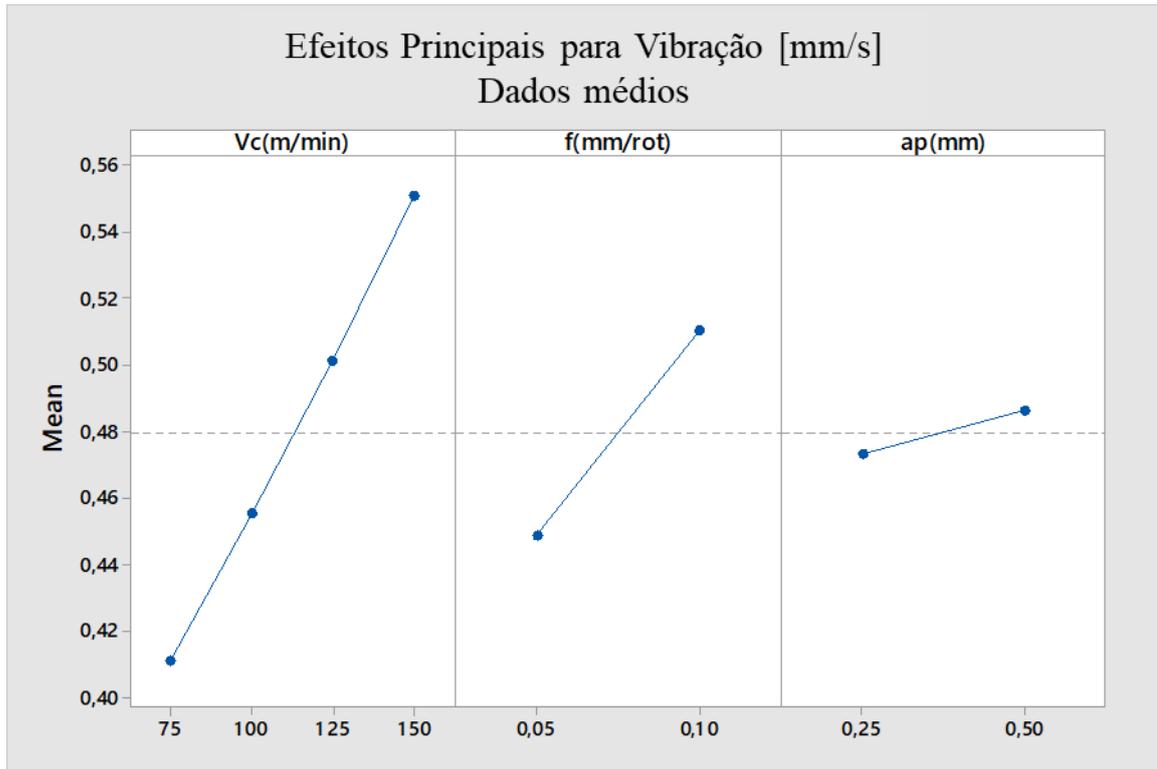
Análise da Variância para Vibração					
Fonte	GL	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Vc (m/min)	3	0,021738	0,007246	6,01	0,146
f (mm/rot)	1	0,007663	0,007663	6,36	0,128
ap (mm)	1	0,000330	0,000330	0,27	0,653
Error	2	0,002410	0,001205		
Total	7	0,032140			

Fonte: Produção do próprio autor

Da Figura 27 verifica-se que a velocidade de corte exerce maior impacto na variação dos resultados de vibração, semelhante ao notado no planejamento fatorial. No caso dos demais fatores, a profundidade de corte afeta menos a vibração diferentemente do que foi notado no fatorial completo que apresenta o avanço como menos significativo.

Em todo caso, observa-se que para todos os fatores, conforme aumentado os valores, aumenta-se a taxa de vibração gerada.

Figura 27 - Gráfico Efeitos Principais Vibração Taguchi



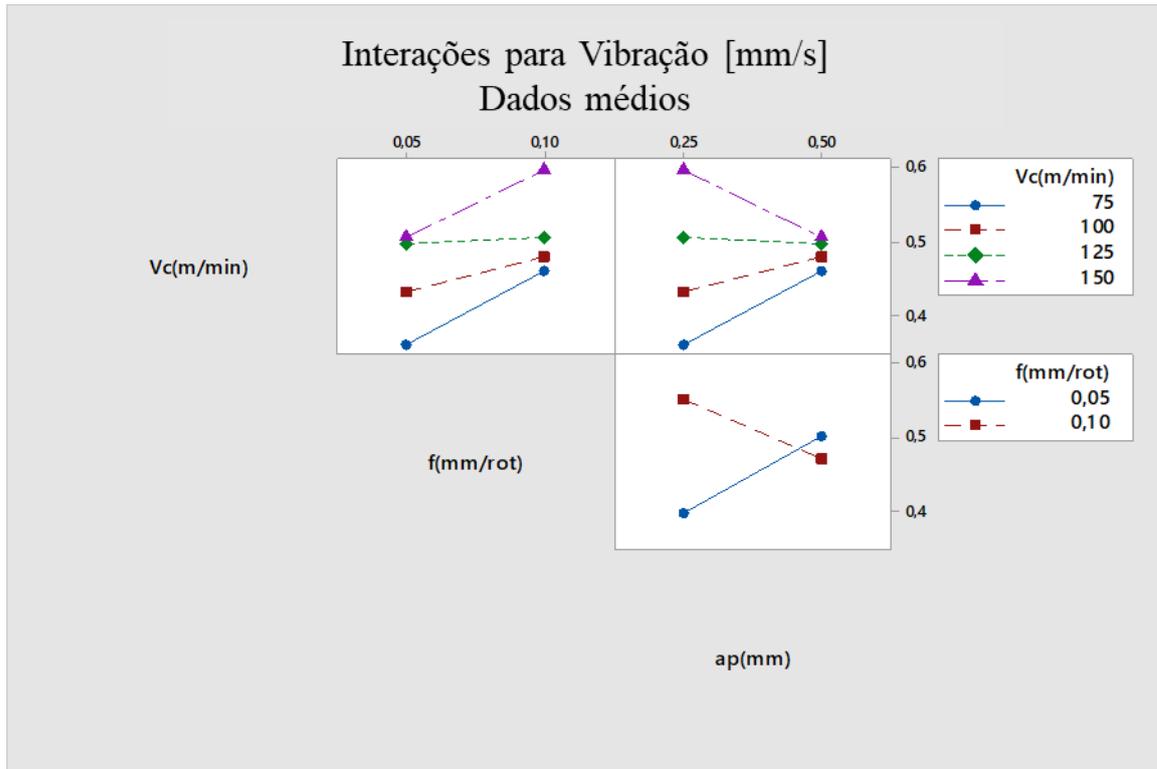
Fonte: Produção do próprio autor

Da Figura 28, gráfico de interações para vibração, a interação entre velocidade de corte e avanço, a velocidade de corte de 125 m/min foi a única que pouco variou com o aumento do variável avanço. As demais conforme aumentado o avanço, maior foi a resultado na vibração do processo.

Na interação entre velocidade e profundidade de corte, os estágios iniciais de Vc apresentaram semelhança, conforme o aumento de ap. Já a velocidade 125 m/min, semelhante à interação entre Vc x f, pouco variou com o aumento da ap. A maior relevância está para o último estágio que diminui de forma significativa a vibração com o aumento da ap.

Da interação entre avanço e profundidade de corte, para o menor avanço o resultado de vibração aumentou com o aumento da profundidade de corte o que foi o oposto para o maior avanço.

Figura 28 - Gráfico Interações para Vibração Taguchi



Fonte: Produção do próprio autor

5.3 EMISSÃO ACÚSTICA

5.3.1 Fatorial Completo

Na Tabela 11 da análise de variância para emissão acústica mostra que em nenhum dos casos há relevância significativa estatisticamente falando, ou seja, $p\text{-value} > 0,05$.

Tabela 11 - Dados ANOVA Emissão Fatorial

Análise da Variância para Emissão					
Fonte	GL	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Modelo	15	0,075518	0,005035	0,60	0,834
Linear	5	0,029098	0,005820	0,70	0,634
Vc (m/min)	3	0,012110	0,004037	0,48	0,699
f (mm/rot)	1	0,016966	0,016966	2,03	0,173
ap (mm)	1	0,000022	0,000022	0,00	0,960
Interações de 2° Ordem	7	0,030790	0,004399	0,53	0,802
Vc (m/min) * f (mm/rot)	3	0,015808	0,005269	0,63	0,606
Vc (m/min) * ap (mm)	3	0,014786	0,004929	0,59	0,631
f (mm/rot) * ap (mm)	1	0,000196	0,000196	0,02	0,880
Interações de 3° Ordem	3	0,015629	0,005210	0,62	0,610
Vc (m/min) * f (mm/rot) * ap (mm)	3	0,015629	0,005210	0,62	0,610
Error	16	0,133747	0,008359		
Total	31	0,209264			

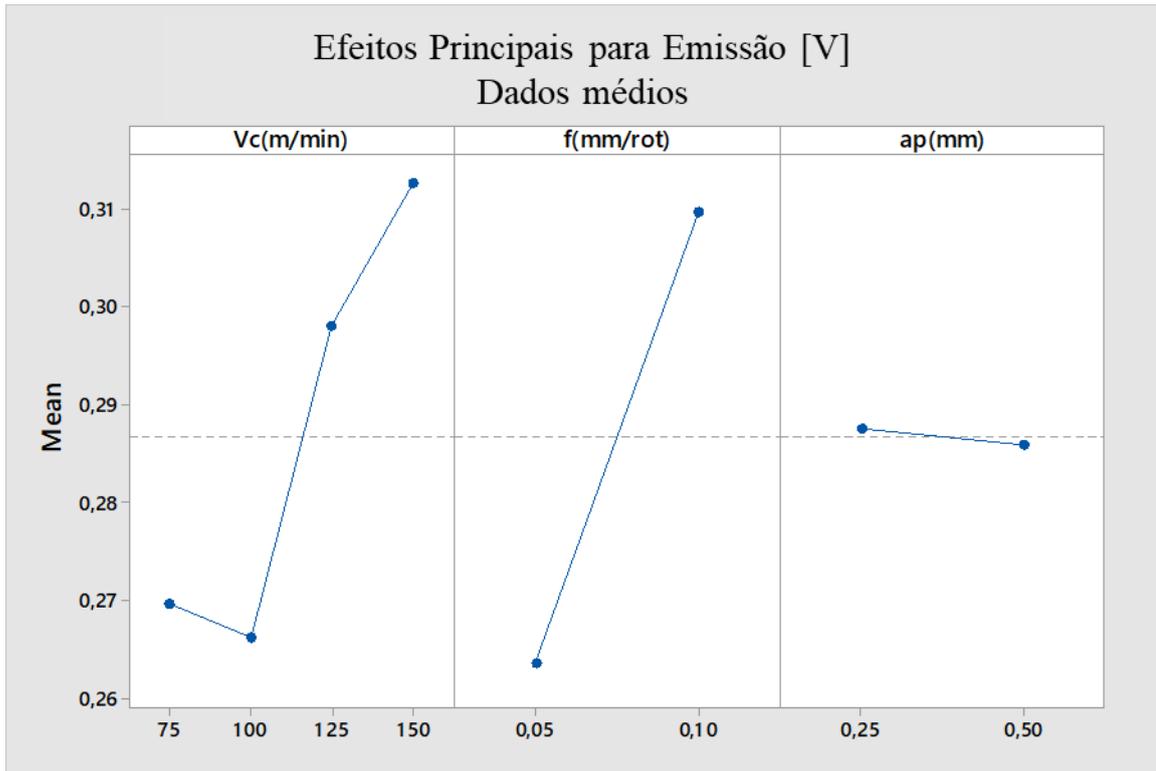
Fonte: Produção do próprio autor

Da Figura 29 a emissão acústica é mais influenciada pela velocidade de corte e também pelo avanço. Observando a variável da velocidade de corte, o maior valor de velocidade de corte gerou o pior resultado, enquanto que a melhor resultado de emissão se deu à velocidade de corte de 100 m/min. Porém o melhor resultado entre todos foi com o menor avanço.

Para a Figura 30 de interações, com exceção da velocidade de corte de 100m/min, as demais aumentam a emissão conforme aumentado a taxa de avanço. Em contrapartida, quando observado a interação entre velocidade e a profundidade de corte, a maior velocidade de corte é a única que aumenta significativamente a taxa de emissão com o aumento do valor da profundidade de corte.

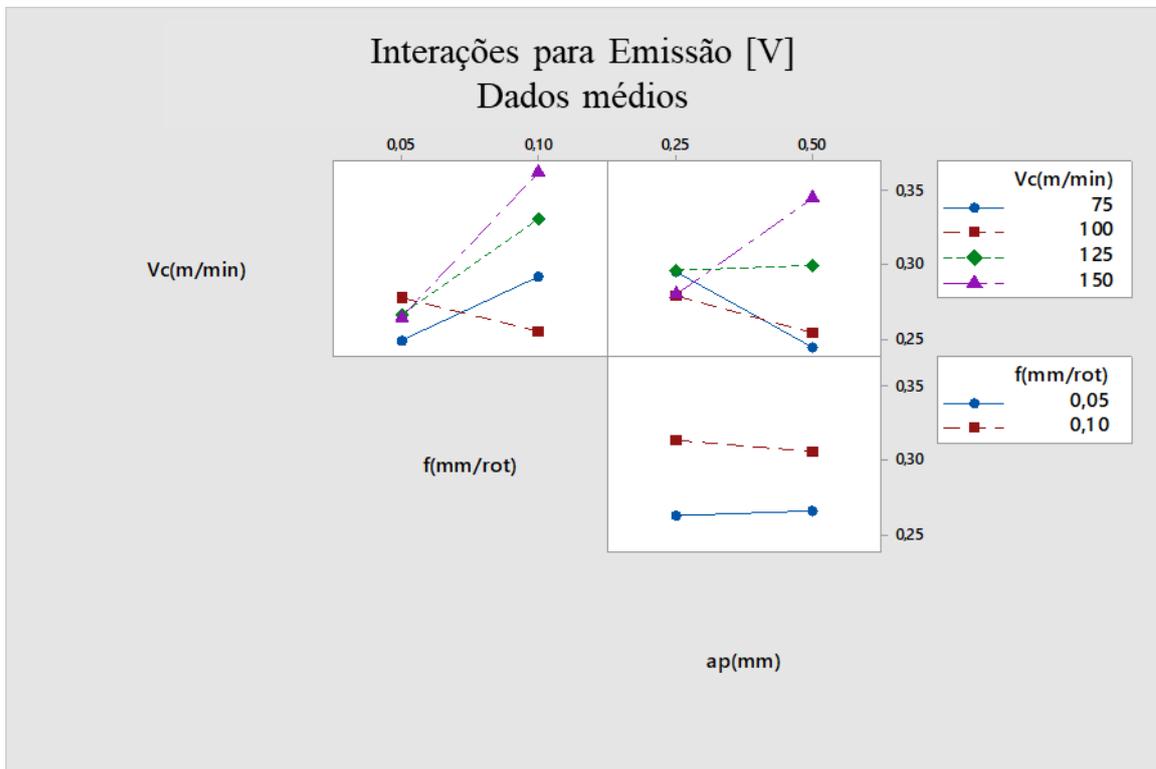
Já para a interação entre o avanço e a profundidade de corte, nota-se que a vibração varia muito pouco para ambos os casos.

Figura 29 - Gráfico Efeitos Principais Emissão Fatorial



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 30 – Gráfico Interações para Emissão Fatorial



Fonte: Produção do próprio autor

5.3.2 Taguchi

Na Tabela 12 da análise de variância para emissão acústica mostra que em nenhum dos casos há relevância significativa estatisticamente falando, ou seja, $p\text{-value} > 0,05$.

Tabela 12 - Dados ANOVA Emissão Taguchi

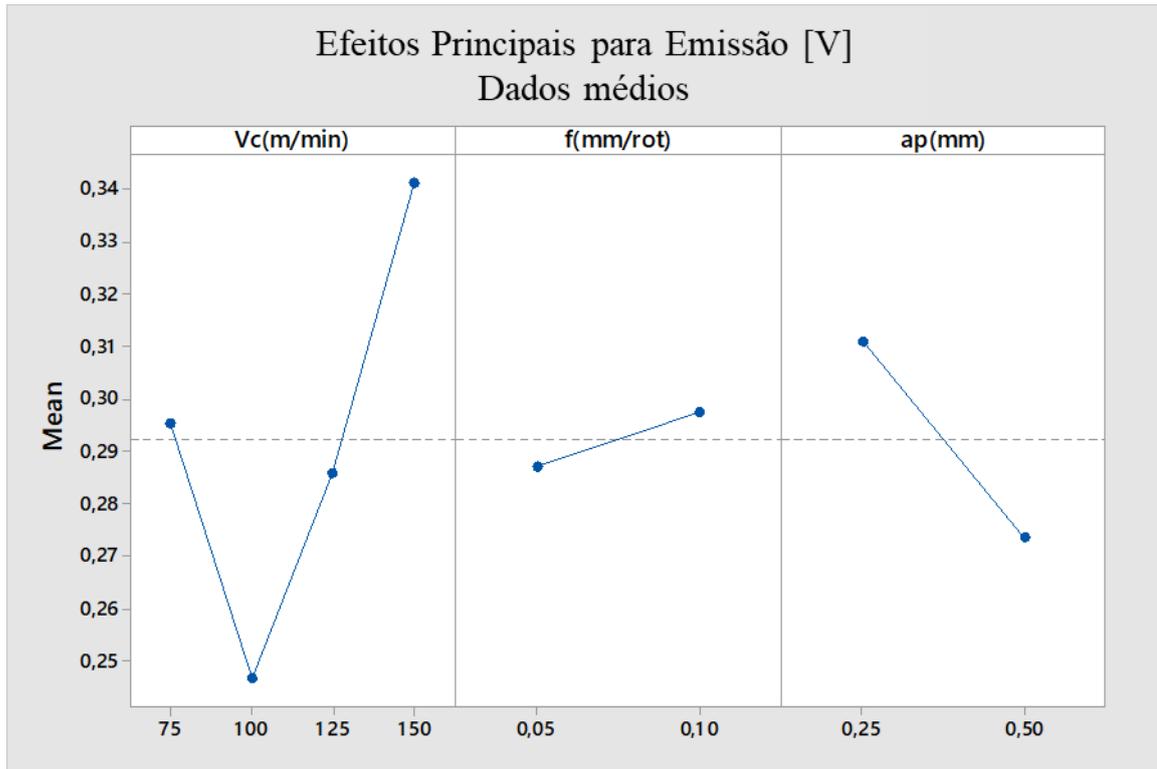
Análise da Variância para Emissão Acústica					
Fonte	GL	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Vc (m/min)	3	0,008990	0,002997	9,66	0,095
f (mm/rot)	1	0,000207	0,000207	0,67	0,500
ap (mm)	1	0,002785	0,002785	8,97	0,096
Error	2	0,000621	0,000310		
Total	7	0,012603			

Fonte: Produção do próprio autor

Da Figura 31 a emissão acústica é mais influenciada pela velocidade de corte. Observando a variável da velocidade de corte, o maior valor de velocidade de corte gerou o pior resultado, enquanto que a melhor resultado de emissão se deu à velocidade de corte de 100 m/min, dado similar ao planejamento fatorial. Porém ao contrário do fatorial, o avanço não apresenta relevância nos resultados de emissão, enquanto que a profundidade de corte demonstra significância na variação da emissão acústica.

Com o aumento da profundidade de corte, observa-se uma redução na emissão acústica. Entretanto a profundidade de corte não influencia tão intensamente quanto a velocidade de corte.

Figura 31 – Gráfico Efeitos Principais Emissão Taguchi



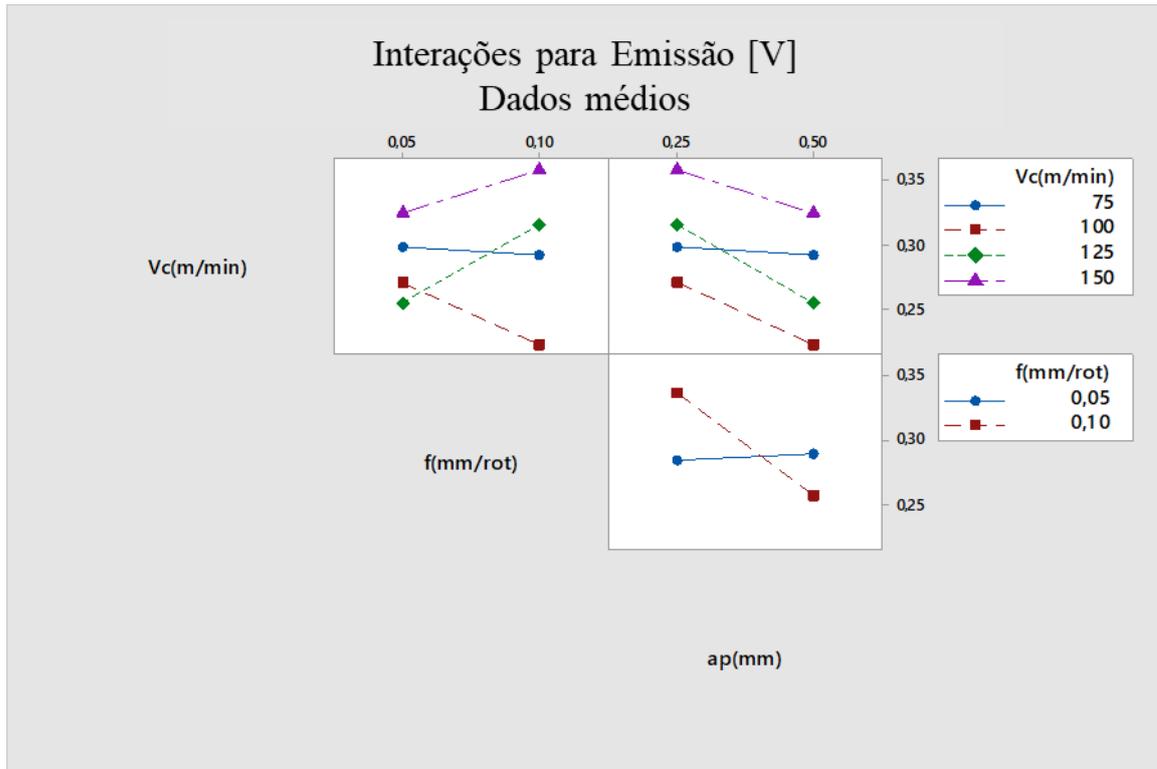
Fonte: Produção do próprio autor

De forma geral, o gráfico de interações para emissão (Figura 31) tanto na interação Vc x f quanto na Vc x ap, a velocidade de corte de 100 m/min apresenta os melhores resultados para emissão, e quanto aumentados os fatores, tanto avanço quanto a profundidade de corte, reduz-se à taxa mínima a emissão acústica.

Na interação entre Vc x ap observa-se um movimento similar entre as diferentes velocidades de corte. Conforme aumentado a profundidade de corte, menor é a taxa da emissão.

Na interação entre o f x ap observa-se que no avanço de 0,05 mm/rot, a emissão pouco varia com a profundidade de corte, enquanto que para o avanço de 0,10 mm/rot conforme aumentada a profundidade de corte, menor é a emissão.

Figura 32 – Gráfico Interações para Emissão Taguchi



Fonte: Produção do próprio autor

5.4 RUGOSIDADE MÉDIA (R_a)

5.4.1 Fatorial Completo

Na análise de variância para a Rugosidade Média (Tabela 13) observa-se que a velocidade de corte e o avanço foram significativos, ou seja, interferindo na rugosidade média, considerando a significância de 95%.

Nota-se também que a interação entre V_c x f foi a única que apresentou significância no experimento, muito devido ao fato de ambas apresentarem significância nos efeitos principais.

Tabela 13 - Dados ANOVA Rugosidade Média (Ra) Fatorial

Análise da Variância para Rugosidade média (Ra)						
Fonte	GL	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Modelo	15	0,512127	0,034142	12,55	0,000	
Linear	5	0,444370	0,088874	32,68	0,000	
Vc (m/min)	3	0,035675	0,011892	4,37	0,020	
f (mm/rot)	1	0,408229	0,408229	150,11	0,000	
ap (mm)	1	0,000465	0,000465	0,17	0,685	
Interações de 2° Ordem	7	0,059692	0,008527	3,14	0,028	
Vc (m/min) * f (mm/rot)	3	0,040300	0,013433	4,94	0,013	
Vc (m/min) * ap (mm)	3	0,013141	0,004380	1,61	0,226	
f (mm/rot) * ap (mm)	1	0,006251	0,006251	2,30	0,149	
Interações de 3° Ordem	3	0,008065	0,002688	0,99	0,423	
Vc (m/min) * f (mm/rot) * ap (mm)	3	0,008065	0,002688	0,99	0,423	
Error	16	0,043513	0,002720			
Total	31	0,555640				

Fonte: Produção do próprio autor

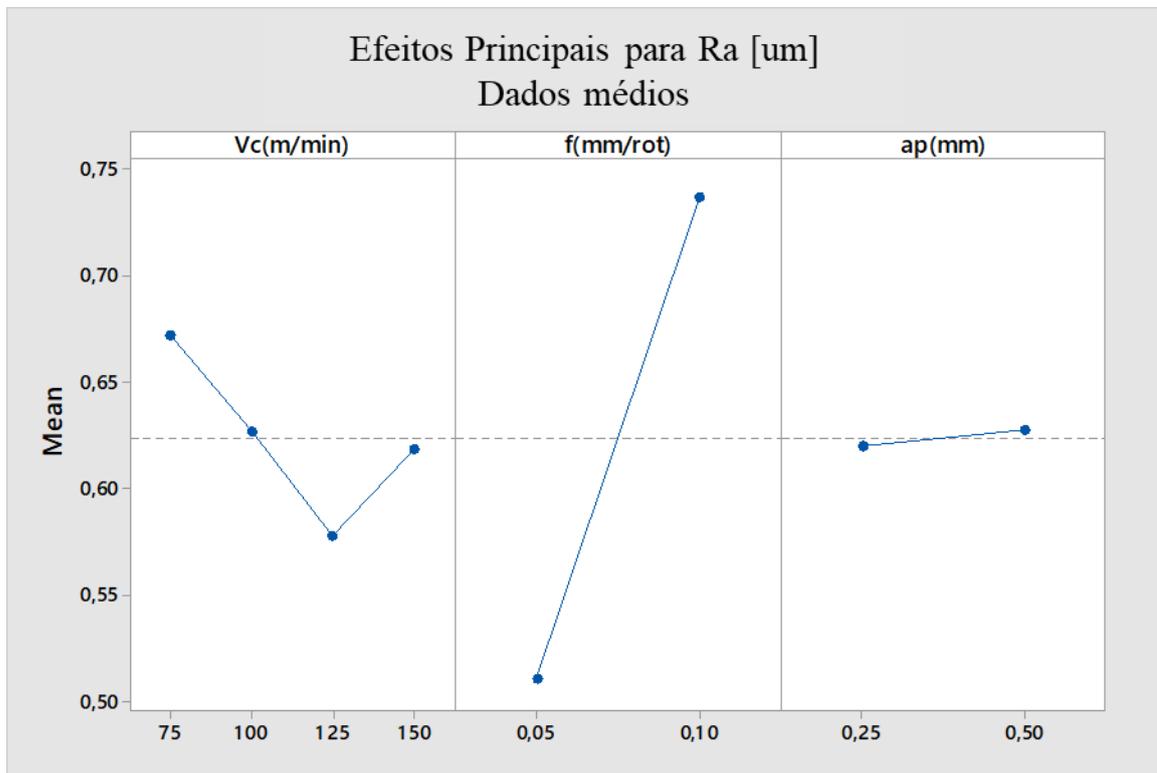
O gráfico de efeitos principais para a Rugosidade Média (Figura 32), o fator de profundidade de corte (ap) exerce pouca influência na rugosidade média, comprovando a fato de não representar significância na tabela de análise de variância.

Já para o fator avanço (f) percebe-se que com o menor valor de avanço menor é a rugosidade média da peça, ou seja, melhor a qualidade superficial da mesma. O gráfico mostra que o avanço exerce bastante influência na rugosidade, visto que tanto a menor rugosidade quanto a maior rugosidade são representadas quando alterado o fator de avanço.

A velocidade de corte, diferentemente do avanço, tende a aumentar a qualidade superficial da peça (menor valor de Ra) conforme aumentada a velocidade de corte, com exceção do último estágio (150 m/min) em que se aumenta a rugosidade média.

É válido destacar que a amplitude dos valores de rugosidade média na casa de 0,65 um para a utilização da ferramenta metal duro recoberta TiAlN + TiN. Valores a cima dessa taxa comprovam uma baixa qualidade superficial.

Figura 33 – Gráfico Efeitos Principais Rugosidade Média (Ra) Fatorial



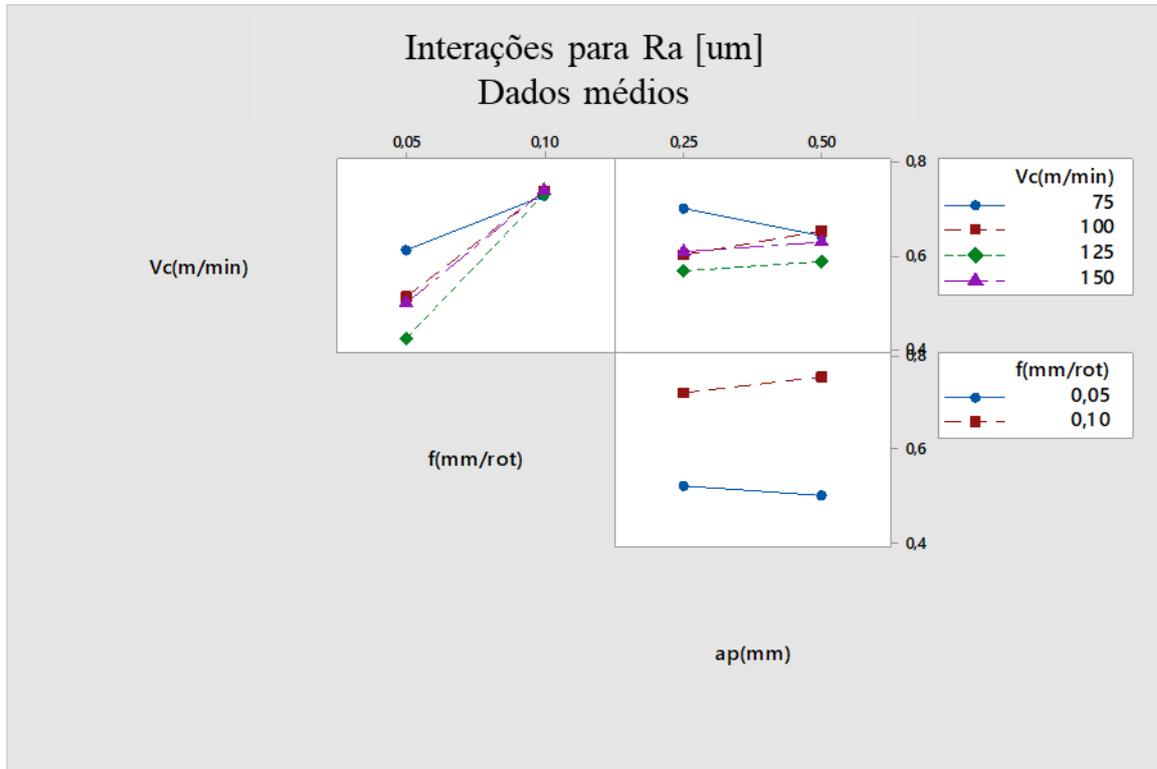
Fonte: Produção do próprio autor

O gráfico de interações (Figura 33), comprova que o fator que exerce maior relevância na rugosidade média é o avanço, pois na interação entre Vc x f as 4 velocidades de corte atingiram o maior e praticamente o mesmo valor de rugosidade média com o maior valor de avanço (0,10 mm/rot).

É possível notar também o baixo impacto que a profundidade de corte representa quando analisado tanto as interações entre velocidade de corte e profundidade de corte, quanto entre avanço e profundidade de corte.

Conclui-se que para a rugosidade média, a velocidade de corte e o avanço foram os fatores mais influentes, sendo o avanço um fator de extrema significância. Nota-se também que o aumento da velocidade de corte melhora o acabamento.

Figura 34 – Gráfico Interações para Rugosidade Média (Ra) Fatorial



Fonte: Produção do próprio autor

5.4.2 Taguchi

Na análise de variância para a Rugosidade Média (Tabela 14) observa-se que o avanço foi significativo, considerando a significância de 95%.

Tabela 14 - Dados ANOVA Rugosidade Média (Ra) Taguchi

Análise da Variância para Rugosidade Média (Ra)					
Fonte	GL	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Vc (m/min)	3	0,012948	0,004316	0,64	0,659
f (mm/rot)	1	0,091850	0,091850	13,52	0,067
ap (mm)	1	0,004192	0,004192	0,62	0,514
Error	2	0,013588	0,006794		
Total	7	0,122579			

Fonte: Produção do próprio autor

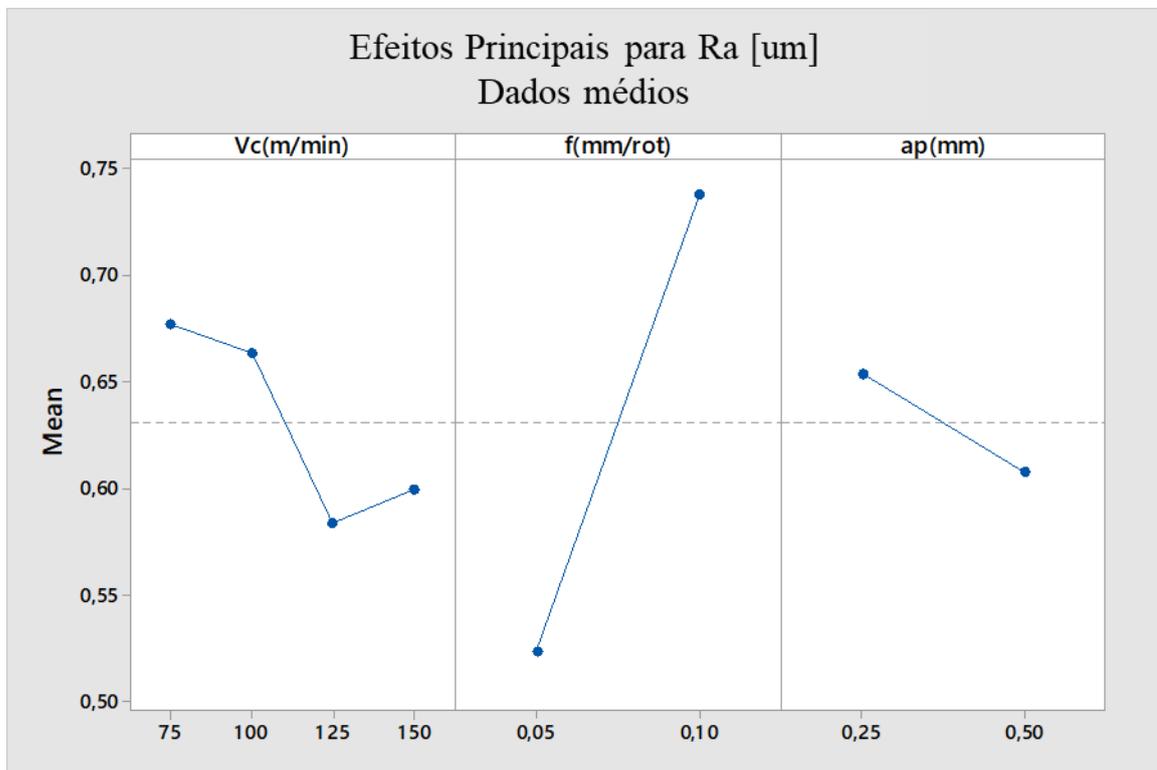
Do gráfico de efeitos principais (Figura 34) para Rugosidade Média (Ra), observa-se similaridades principalmente no avanço e na velocidade de corte quando comparado com o

Fatorial Completo. O avanço exerce a maior influência na qualidade superficial da peça, ou seja, aumentando o fator de avanço, maior é a Rugosidade média.

A velocidade de corte segue praticamente a mesma linha de resultados que o fatorial completo, em que com exceção do último estágio 150 m/min, a rugosidade média diminuiu com o aumento da Vc.

A profundidade de corte, assim como no fatorial exerce menos influência nos resultados da rugosidade média, porém a diferença é que no planejamento Taguchi, quando aumentado o fator de profundidade de corte, menor é a rugosidade média e, conseqüentemente, melhor a qualidade superficial da peça.

Figura 35 – Gráfico Efeitos Principais Rugosidade Média (Ra) Taguchi



Fonte: Produção do próprio autor

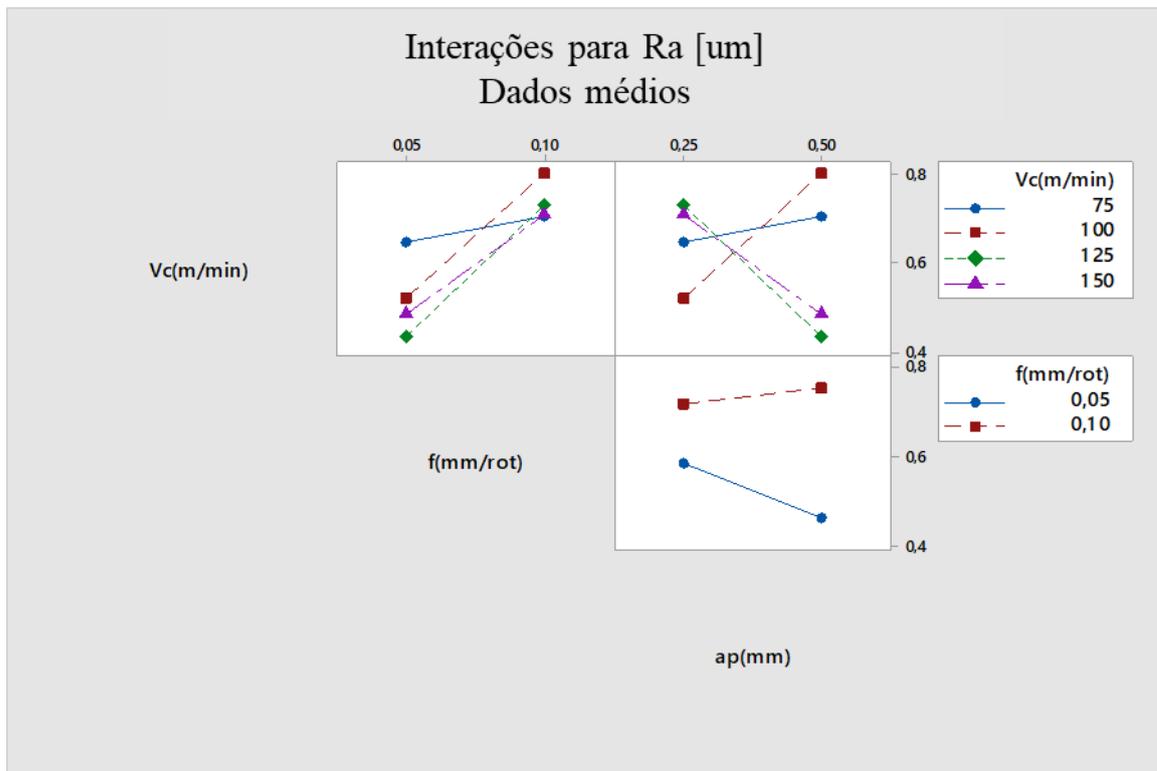
Do gráfico de interações de Taguchi (Figura 35), na interação entre velocidade de corte e o avanço, nota-se que com o aumento do avanço, maior é o valor de rugosidade média para as 4 condições de velocidade de corte.

Da interação entre velocidade e profundidade de corte no Taguchi, diferentemente do observado no Fatorial Completo, o aumento da ap altera de forma significativa os dados de rugosidade média.

É válido notar que no Taguchi, tanto avanço quanto a profundidade de corte exercem pouca variação na rugosidade média quando aplicada a velocidade de corte inicial de 75 m/min.

Já a interação entre o avanço e a profundidade de corte apresentou resultados bastante próximos do fatorial completo, confirmando o fator avanço como o mais significativo nos dados de rugosidade média.

Figura 36 – Gráfico Interações para Rugosidade Média (Ra) Taguchi



Fonte: Produção do próprio autor

5.5 RUGOSIDADE TOTAL (R_t)

5.5.1 Fatorial Completo

Na Tabela 15 a análise de variância mostra que os fatores avanço e profundidade de corte foram significativos para a rugosidade total, com o p-value menor que 0,05. As interações de 2° e 3° ordem não apresentaram dados significativos estatisticamente.

Tabela 15 - Dados ANOVA Rugosidade Total (Rt) Fatorial

Análise da Variância para Rugosidade total (Rt)					
Fonte	GL	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Modelo	15	25,3111	1,6874	191,16	0,000
Linear	5	25,1666	5,0333	570,20	0,000
Vc (m/min)	3	0,0075	0,0025	0,28	0,836
f (mm/rot)	1	25,0891	25,0891	2842,21	0,000
ap (mm)	1	0,0700	0,0700	7,93	0,012
Interações de 2° Ordem	7	0,0913	0,0130	1,48	0,244
Vc (m/min) * f (mm/rot)	3	0,0102	0,0034	0,39	0,765
Vc (m/min) * ap (mm)	3	0,0748	0,0249	2,83	0,072
f (mm/rot) * ap (mm)	1	0,0062	0,0062	0,70	0,414
Interações de 3° Ordem	3	0,0532	0,0177	2,01	0,153
Vc (m/min) * f (mm/rot) * ap (mm)	3	0,0532	0,0177	2,01	0,153
Error	16	0,1412	0,0088		
Total	31	25,4523			

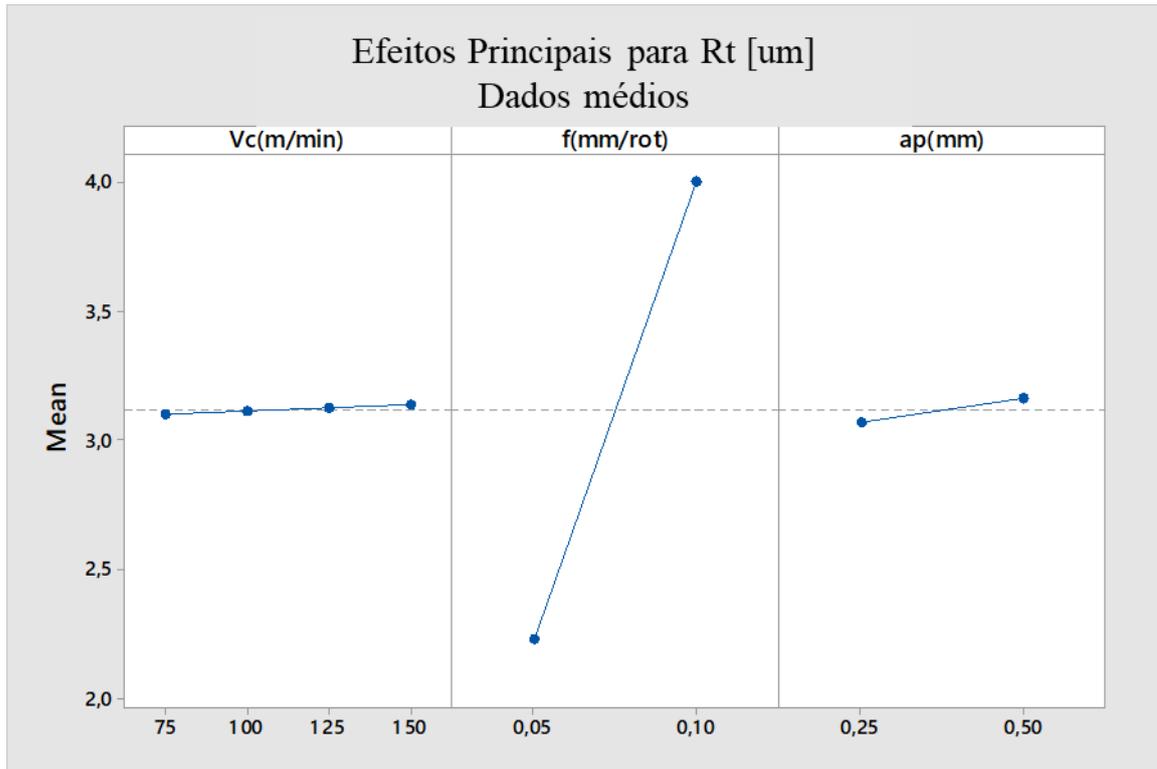
Fonte: Produção do próprio autor

Da Figura 36, diferente da Rugosidade Média (Ra), a Rugosidade total (Rt) teve baixa variação com o aumento da velocidade de corte, ou seja, a rugosidade total é menos perceptível quando avaliado o fator velocidade de corte.

Já o avanço, de forma semelhante à Rugosidade Média (Ra) exerce alta influência no valor da rugosidade total, obtendo-se os picos mínimo e máximo para os avanços 0,05 mm/rot e 0,10 mm/rot respectivamente.

Diferentemente do que foi apresentado no ANOVA, porém semelhante à Rugosidade Média, a profundidade de corte (ap) não apresenta muita variação na taxa da rugosidade total. Observa-se assim como para a rugosidade média, que conforme aumentado a profundidade de corte, maior é a rugosidade total.

Figura 37 – Gráfico Efeitos Principais Rugosidade Total (Rt) Fatorial

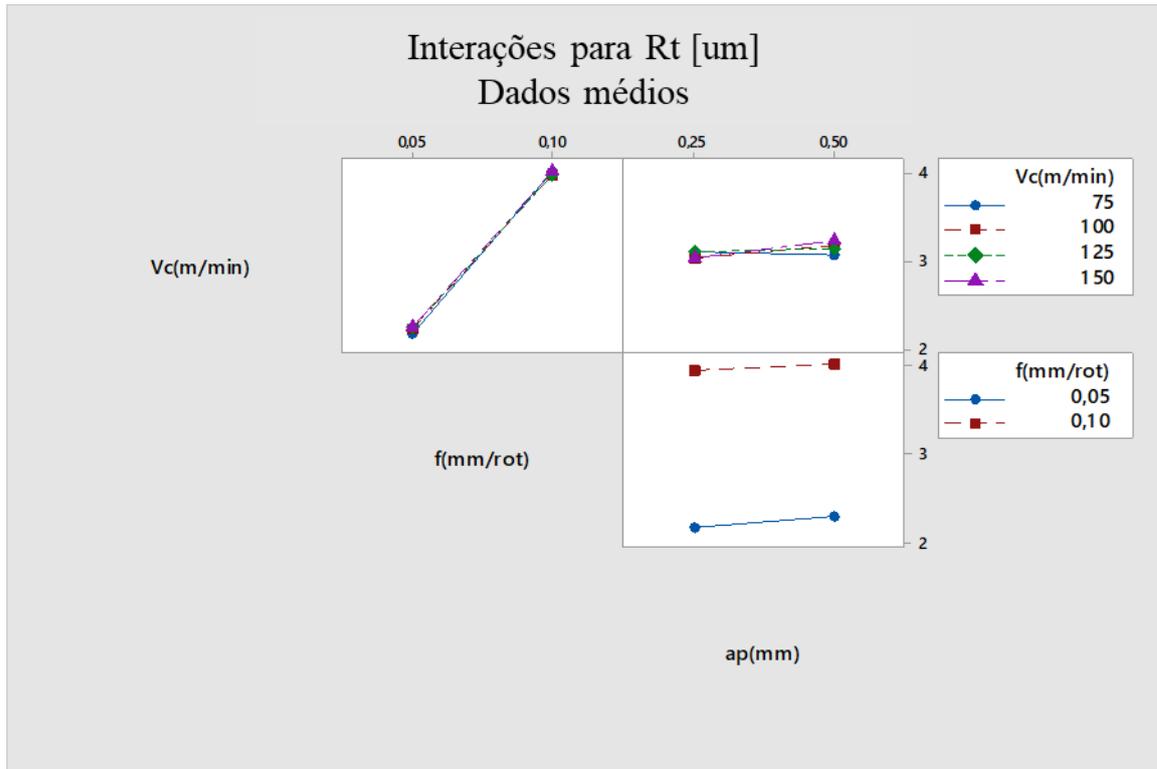


Fonte: Produção do próprio autor

Do gráfico de interações para a rugosidade total (Figura 37) é possível ter uma visão real de como o avanço gera mais impacto na variação da rugosidade total. Na interação entre a velocidade de corte e o avanço, os resultados de rugosidade total variam com a alteração apenas do fator de avanço, assim como é a interação entre o avanço e a profundidade de corte.

Por fim, observa-se também que a rugosidade total é pouca afetada com variação tanto da velocidade de corte quanto a profundidade de corte, mostrada na interação entre esses fatores.

Figura 38 – Gráfico Interações para Rugosidade Total (Rt) Fatorial



5.5.2 Taguchi

Na Tabela 16 a análise de variância mostra que o fator avanço foi significativo para a rugosidade total, com o p-value menor que 0,05.

Tabela 16 - Dados ANOVA Rugosidade Total (Rt) Taguchi

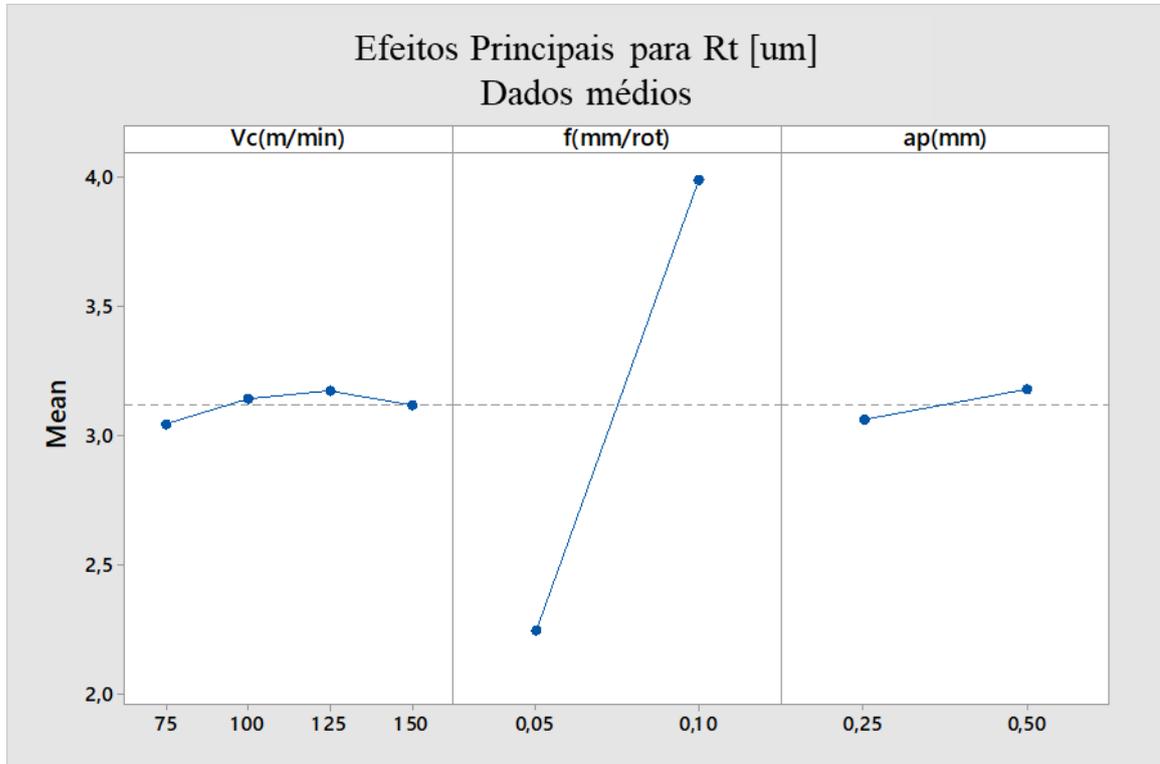
Análise da Variância para Rugosidade Total (Rt)					
Fonte	GL	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Vc (m/min)	3	0,01936	0,00645	1,53	0,418
f (mm/rot)	1	6,05503	6,05503	1439,78	0,001
ap (mm)	1	0,02625	0,02625	6,24	0,130
Error	2	0,00841	0,00421		
Total	7	6,10905			

Fonte: Produção do próprio autor

Da Figura 38 de efeitos especiais para a Rugosidade total no Taguchi, nota-se que a velocidade de corte não exerce influência na Rt, diferente do que ocorre para a Ra. O avanço é o fator mais perceptível nos resultados da Rugosidade total.

O gráfico de Taguchi para Rugosidade total é muito parecido com a gráfico apresentado no Fatorial Completo, em que a velocidade e profundidade de corte pouco interferem, enquanto o avanço é bastante influente nos resultados.

Figura 39 – Gráfico Efeitos Principais Rugosidade Total (Rt) Taguchi

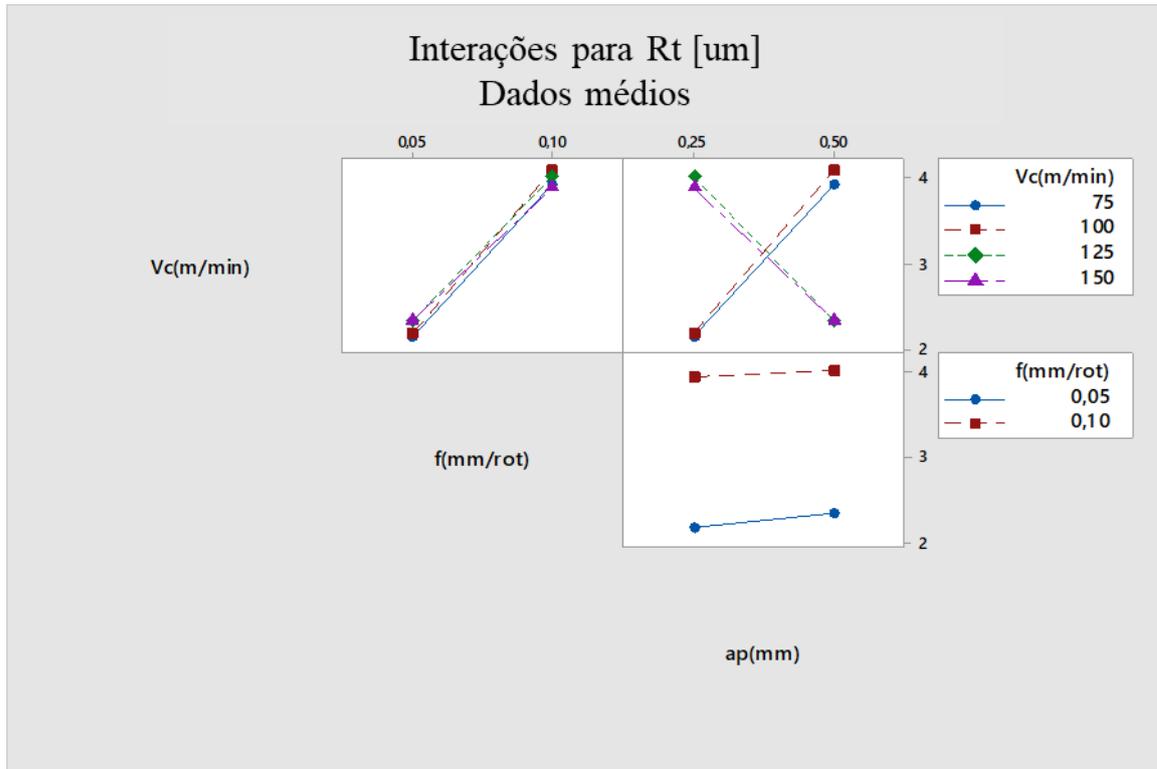


Fonte: Produção do próprio autor

Do gráfico de interações para Rugosidade total em Taguchi (Figura 39), observa-se tanto na interação Vc x f quanto na ap x f, que o avanço altera significativamente o resultado da Rt, independentemente dos fatores de velocidade e profundidade de corte.

Agora quando observado a interação entre a velocidade de corte e a profundidade de corte, percebe-se que o aumento do fator profundidade de corte (ap) altera consideravelmente os dados da Rt. Para os estágios iniciais de Vc (75 m/min e 100 m/min) a Rt aumenta conforme elevado a profundidade de corte. O contrário acontece nos estágios finais de Vc (125 m/min e 150 m/min) em quem a Rt diminui com o aumento da profundidade de corte.

Figura 40 – Gráfico Interações para Rugosidade Total (Rt) Taguchi



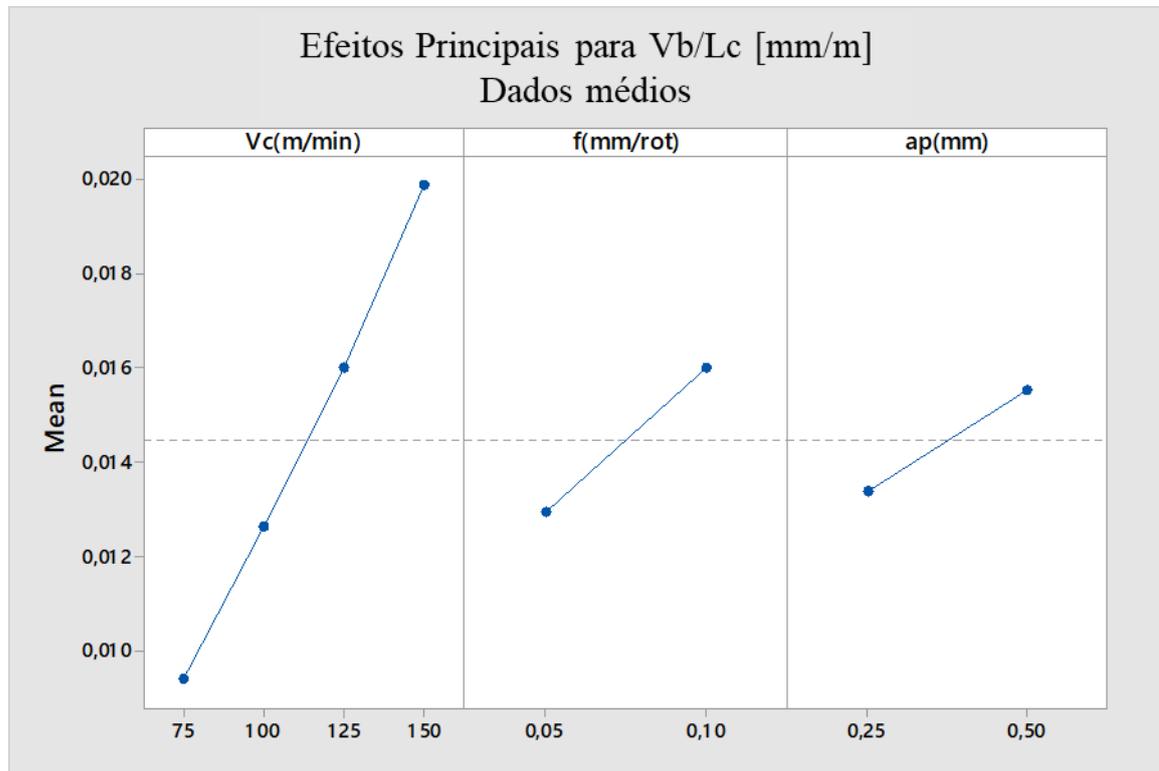
Fonte: Produção do próprio autor

5.6 DESGASTE DA FERRAMENTA

Primeiramente é importante pontuar que o projeto em questão não teve como foco a análise do tempo de vida da ferramenta de corte, ou seja, não foi realizado ensaios cujo o objetivo era chegar no limite de usabilidade da ferramenta de corte.

Os dados de desgaste foram linearizados, conforme apresentado na Figura 40, nota-se que os 3 fatores (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) quando aumentados, elevam o valor do desgaste da ferramenta. Como previsto, a velocidade de corte é o fator que exerce maior influência no desgaste, visto que com maiores velocidades de corte, aumenta a temperatura de usinagem, desgastando a ferramenta de corte.

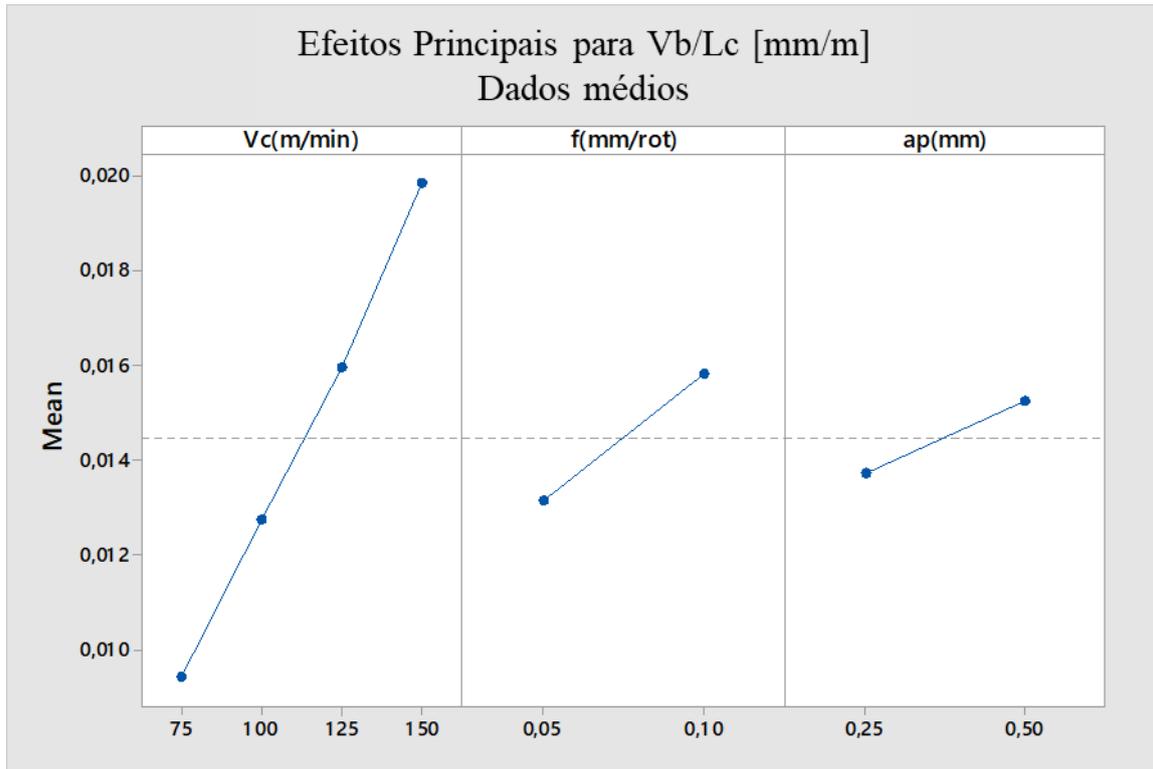
Figura 41 – Gráfico Efeitos Principais desgaste (Vb/Lc) Fatorial



Fonte: Produção do próprio autor

O gráfico Taguchi (Figura 41) a seguir, comprova que os fatores quando aumentados, aumentam o desgaste da ferramenta e que dentre eles, a velocidade de corte se destaca.

Figura 42 – Gráfico Efeitos Principais desgaste (Vb/lc) Taguchi



Fonte: Produção do próprio autor

Dessa forma, e com os dados de Rugosidade é possível notar que existem condições entre os fatores que podem proporcionar uma qualidade superficial semelhante à qualidade de superficial obtida através da retifica, porém com menor custo gerado.

As velocidades de corte de 125 m/min e 150 m/min, avanço de 0,05 mm/rot e ambas as profundidades de corte de 0,25mm e 0,50 mm, forneceram resultados de rugosidade média menor que 0,65 μm , valor esse obtido através da retificação do aço SAE 4340.

6 CONCLUSÃO

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Análise Geral Parâmetro x Resultados:

- Com as análises obtidas através do torneamento do aço SAE 4340 temperado e revenido, utilizando ferramentas de metal duro recobertas com TiAlN e TiN, foi possível concluir que:

- A potência consumida no processo aumenta com o respectivo aumento dos 3 fatores (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) o maior consumo conforme elevados os parâmetros de entrada do processo.

- O avanço é o fator mais significativo quando observado as Rugosidades (Ra e Rt), ou seja, conforme aumentado o avanço, pior a qualidade superficial da peça. Considerando a ferramenta de corte utilizado, o avanço de 0,05 mm/rot é mais indicado, independente da variação dos fatores de velocidade e profundidade de corte.

- A ferramenta de corte utilizada, sob algumas condições específicas fornece uma qualidade superficial semelhante à qualidade obtida nos processos de retificação, porém com menor custo de projeto.

- Em contrapartida, a Vibração e a Emissão Acústica são mais impactadas a variável de entrada velocidade de corte. Conforme aumentado a velocidade de corte, maiores as taxas de vibração e emissão, desfavorecendo o processo de torneamento.

Efeitos Principais Fatorial Completo e Taguchi:

- Quando observados os efeitos principais, ambos os planejamentos apresentaram similaridades nos resultados de potência de corte, vibração e rugosidade total. Para rugosidade média, ambos os planejamentos comprovam o maior impacto que o avanço exerce na qualidade superficial, e também são semelhantes nas variações quando alterado a velocidade de corte.

- A diferença foi que enquanto o fatorial apresenta aumento na Ra com o aumento da ap, o Taguchi apresentou dado inverso, ou seja, Ra diminui com o aumento da ap.

- Os resultados de emissão acústica que sofreram alguma distorção entre os planejamentos, principalmente observando os fatores avanço e profundidade de corte. No Fatorial nota-se que o avanço influencia muito a emissão, enquanto que a profundidade é pouco relevante no processo. Taguchi apresenta resultados inversos.

Interações Fatorial Completo e Taguchi:

- Para a potência de corte o fatorial completo nas interações confirma os resultados obtidos no efeito principal, pois é perceptível nas interações que conforme aumentado os níveis de cada fator, a potência consumida aumenta. O Taguchi demonstra semelhança na interação entre $f \times ap$, porém nas demais interações ($Vc \times f$ e $Vc \times ap$) as velocidades de corte de 125 m/min e 150 m/min pouco alteram a potência quando alteradas os outros fatores (avanço e profundidade de corte).

- Nos gráficos de interação para a Rugosidade Média e Rugosidade Total, observou-se similaridades entre os planejamentos quando verificadas as interações entre $Vc \times f$ e também entre $f \times ap$. A grande diferença entre os planejamentos está na interação $Vc \times ap$. Enquanto fatorial completo mostrou relativa neutralidade na interação, Taguchi apresentou dados cruzados, em que os níveis superiores de velocidade de corte foram contrários aos níveis inferiores, quando aumentado a profundidade de corte.

- Vibração e a emissão, os dados obtidos nas interações divergem entre os planejamentos. Fatorial Completo e Taguchi. A maior diferença está entre $f \times ap$. Nesse caso, enquanto o fatorial completo apresentou dados lineares conforme aumentado a ap , Taguchi demonstrou dados cruzados na interação $f \times ap$.

Vantagens:

- De modo geral, Taguchi apresentou dados similares ao Fatorial quando observados os efeitos principais de ambos os planejamentos. Apesar de algumas diferenças entre os planejamentos, para os dados das interações, Taguchi se mostrou próximo aos dados do Fatorial completo principalmente nos resultados de Ra , Rt e Potência de corte.

- Fatorial Completo se mostrou mais eficiente e com dados mais bem direcionados quando observados e comparados os resultados dos efeitos principais com os de interações. Salvo alguns detalhes, as relações dos efeitos principais eram visíveis nos gráficos de interação, como é o caso bem específico da Potência de corte.

Desvantagens:

- Fatorial completo utilizou de 32 ensaios no total para conduzir e apresentar os dados do planejamento.

- Os gráficos de interações no planejamento apresentaram baixa confiabilidade nos resultados, devido a configuração L8 que não permite a validação estatística da análise de variância.

Comparativo Final:

- De uma forma geral, a área industrial e corporativa trabalha com diversos fatores quando é implementado um produto ou processo, o que envolve custos, tempo, recursos e suprimentos. Dessa forma, a empresa está sempre em busca de formas práticas e efetivas. Nesse âmbito, o Taguchi se mostrou bastante eficiente, visto que apresenta dados coerentes quando observados os fatores de entrada individualmente.

- Agora para os casos mais acadêmicos e de pesquisas, é de extrema importância obter as melhores correlações de dados possíveis, afim de chegar a uma conclusão mais direcionada entre os parâmetros de entrada. Portanto, observando os dados apresentados conclui-se que nesse caso, o fatorial completo por possuir mais ensaios possui maior relevância nos dados finais e comparativos entre os gráficos.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O planejamento experimental de Taguchi L8 foi capaz de confirmar o impacto que os parâmetros de entrada (velocidade de corte, profundidade de corte e avanço) tem nas variáveis de saída quando observados os Efeitos Principais. Porém, quando correlacionados o ANOVA, efeitos principais e interações de 2º ordem o Taguchi L8 não obteve a mesma confiabilidade que o Fatorial Completo.

Dessa forma, e afim de dar continuidade na análise comparativa para compor os trabalhos futuros, sugere-se o seguinte tema:

- Configuração Taguchi L16 (mantendo mesmos fatores e número de níveis), cuja finalidade é comparar a equidade dos dados do Fatorial Completo com o Taguchi L16 em todos os gráficos e tabelas. Além disso, a fim avaliar a correlação entre os dados do ANOVA, Efeitos Principais e Interações de 2º Ordem.

REFERÊNCIAS

- AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. **Tolerância, ajuste, desvios e análise de dimensões**. São Paulo: Edgard Blucher, 1981. 295 p.
- ALVES, M. C. S.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R.; CATAI, R. E. Influência na qualidade final de metais retificados através da variação da velocidade de mergulho. **Revista Escola de Minas**. v. 62, p. 65-71, 2009.
- BHATTACHARYA, S. *et al.* Microstructural evolution of AISI 4340 steel during Direct Metal Deposition process. **Materials Science and Engineering A**, v. 528, n. 6, p. 2309–2318, 2011.
- BONFÁ, M. M.; **Torneamento do aço endurecido AISI D6 utilizando mínima quantidade de fluido de corte**. 2013. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia Faculdade de Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2013.
- CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica: materiais de construção mecânica**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. v. 3. 205 p.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8. ed. São Paulo: Artliber, 2013.
- EQUBAL, M. I.; KUMAR, R.; SHAMIM, M.; OHDAR, R. K. A Grey-based Taguchi method to optimize hot forging process. **Procedia Materials Science**, v. 6, n. Icmpe, p. 1495–1504, 2014. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211812814004945>. Acesso em:
- FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 9. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1977. 927 p.
- GONÇALVES, M.T.T.; CAGNON. J. A.; TIBÚRCIO, U. F O.; SOUZA, A. J. D. Consumo de potência no torneamento cilíndrico de madeiras de eucalipto. *In*: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRAS, 2006, São Pedro-SP. **Anais [...]**. São Pedro, 2006.
- HECKER, R.L.; LIANG, S.Y.; WU, X.J. Grinding force and power modeling based on chip thickness analysis. **International Journal of Advanced Manufacture Technology**, v. 33, p. 449–459, 2007.
- MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da usinagem**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011. 397p.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 5th ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- NOVASKI, O. **Introdução à engenharia de fabricação mecânica**. São Paulo: Blucher, 1994. 59 p.

PALMA, E. S. Tolerância de acabamento: rugosidade. **Apostila de Metrologia Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais**. Belo Horizonte: PUC MINAS, 2006. 20 p.

REDDY, N. S.; RAO, P. V. Selection of optimum tool geometry and cutting conditions using a surface roughness prediction model for end milling. **Int. J. Adv. Manuf. Technol**, v. 26, p. 1202-1210, 2005.

SOUZA, I. G. **Processo de torneamento do aço ABNT 4340 utilizando ferramenta de metal duro com revestimento de Ti(C,N) + Al₂O₃ + TiN**. 2018. Dissertação de Graduação (Graduado em Engenharia Materiais) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, FEG/UNESP, Guaratinguetá, 2018.

SOUZA, G. A. **Caracterização microestrutural de um aço médio carbono e baixa liga (com estrutura bainítica/martensítica) via microscopia óptica**. 2008. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, FEG/UNESP, Guaratinguetá, 2008.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte**. 14. ed. Santa Catarina: Editora da UFSC, 1995.

WEBSTER, J. A.; DONG, W. P.; LINDSAY, R. Raw acoustic emission signal analysis of grinding process. **CIRP: International Academy for Production Engineering**, v. 45, n. 1, p. 335-340, 1996.

ZANELLA, C. **Avaliação da influência da velocidade de corte, avanço por gume e revestimento de ferramenta no fresamento de eletrodos no grafite**. 2015. Dissertação (Graduado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2015.