

MARIO HENRIQUE DOMENEGHETTI

**Análise do desempenho de ferramenta cerâmica de geometria circular no
torneamento do aço SAE 4340 endurecido**

Mario Henrique Domeneghetti

**Análise do desempenho de ferramenta cerâmica de geometria circular no
torneamento do aço SAE 4340 endurecido**

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

D668a	Domeneghetti, Mario Henrique Análise do desempenho de ferramenta cerâmica de geometria circular no torneamento do aço 4340 endurecido / Mario Henrique Domeneghetti – Guaratinguetá, 2019. 93 f : il. Bibliografia: f. 92-93 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019. Orientador: Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves 1. Usinagem. 2. Ferramentas de corte. 3. Aspereza de superfície. 4. Tornearia I. Título. CDU 621.9
-------	---

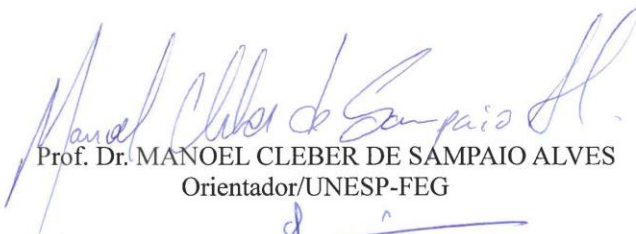
MARIO HENRIQUE DOMENEGHETTI

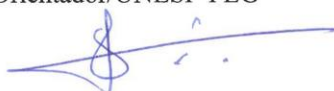
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO

Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MANOEL CLEBER DE SAMPAIO ALVES
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. SÉRGIO FRANCISCO DOS SANTOS
UNESP-FEG


Msc. MARCELO ANTUNES DE PAULA
UNESP-FEG

Dezembro/2018

DADOS CURRICULARES

MARIO HENRIQUE DOMENEGHETTI

NASCIMENTO	08.10.1994 – Lucas do Rio Verde / MT
FILIAÇÃO	Ernesto Henrique Domeneghetti Maria Cristina Rodrigues
2012/2018	Curso de Graduação Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

à memória de meu pai, Ernesto, e a minha mãe,
Maria Cristina

AGRADECIMENTOS

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

ao meu orientador, *Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves*, pela oportunidade, atenção, paciência, bem como contribuição técnico-acadêmica;

à memória de meu querido pai e a minha amada mãe, *Ernesto e Maria Cristina*, de cujo amor e carinho vem a essência do que sou;

ao *Prof. Msc. Marcel Yuzo Kondo* pela atenção no acompanhamento da realização do procedimento experimental;

aos funcionários do Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento;

a todos que, nestes anos de graduação, brindaram-me com a convivência, por meio da qual obtive os mais variados tipos de aprendizagem;

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.

“A mente que se abre a novas ideias jamais
voltará ao seu tamanho original.”

Oliver Wendel Holmes

RESUMO

A usinagem de aços endurecidos tem sido cada vez mais utilizada, uma vez que pode permitir acabamentos superficiais comparáveis ao processo de retificação, além de diminuir custos de produção. No entanto, como consequência, está a diminuição da vida das ferramentas, visto que elas são impostas a condições extremas de processo. A usinagem de aços endurecidos é normalmente realizada com ferramentas de nitreto cúbico de boro (CBN), que podem custar até oitenta vezes mais que ferramentas de metal duro e dez vezes mais que ferramentas cerâmicas. Portanto, o estudo deste trabalho é motivado pela busca de alternativas de ferramentas de corte que proporcionem características condizentes com as demandas atuais. Estas demandas refletem-se basicamente na diminuição de custos de usinagem, a qual se dá pelo uso de velocidades de corte mais altas, quando comparadas com os processos de usinagem convencionais, e pelo não uso de fluidos de corte. Assim, este trabalho consiste no estudo de desempenho de ferramenta cerâmica experimental, constituída de óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de cromo (Cr_2O_3), de geometria circular, no torneamento do aço SAE 4340 endurecido (56 HRC). A análise de desempenho da ferramenta de corte deste trabalho ocorreu mediante a utilização de um arranjo experimental seguindo a metodologia de Taguchi para a disposição dos parâmetros de corte como variáveis de entrada (velocidade de corte, avanço e profundidade) com a subsequente análise estatística de variância das variáveis de saída (potência elétrica, emissão acústica, vibração e rugosidade). Deste modo, foi possível observar que melhor acabamento superficial foi obtido para valor mais alto de velocidade de corte. Esta configuração de velocidade também resultou em menor nível de vibração e emissão acústica. No entanto, valores mais altos de avanço e profundidade de corte conduziram ao aumento da potência elétrica consumida no processo.

PALAVRAS-CHAVE: Usinagem. Ferramenta cerâmica. Velocidade de corte. Avanço. Profundidade. Potência. Emissão acústica. Vibração. Rugosidade.

ABSTRACT

It is acknowledged that the turning for hardened steel has been more and more required, since through that it is possible to reduce the relative costs as well as to reach a level of roughness compared to that one from the grinding process. However, those demands also affect the tool life by the severe conditions to which they are frequently under. The hardened steel turning process has been made with cubic boron nitrid and it might cost even eighty times more than cemented carbide tools and ten times more than ceramic tool. So that, this study aims to analyze the performance of ceramic round cutting tool at SAE 4340 alloy steel's turning, hardened steel. This research is motivated by looking for new alternative for cutting tools and their necessity of providing features required by the actual industry practice. In this background, it is known that the actual industry practice demands basically some reduction in the turning costs, mainly the ones relatives to low cutting speed as well as the use of cutting fluid. The analysis of that performance has been done through experimental arrangement according to Taguchi's method for the parameters of cutting speed, feed and depth, after a statistic analysis of variance has also been done for the output variables (power consumed, vibration, acoustic emission and roughness). This arrangement of data aims to submit the steel under vast turning conditions. It was observed that higher levels of cutting speed led to better roughness. This also conducted to lower levels of vibration and acoustic emission. On the other hand, there was an increasement of the power consumed since the values of cutting feed and depth were seen higher.

KEYWORDS: Turning. Ceramic cutting tool. Speed. Feed. Depth. Power consumed. Vibration. Roughness.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1	USINAGEM	13
3.1.1	Torneamento.....	13
3.1.2	Movimentos e Parâmetros na Usinagem	14
3.1.3	Formação, Tipos e Formas de Cavaco	17
3.1.4	Materiais para Ferramentas.....	20
3.1.4.1	Materiais cerâmicos	21
3.1.5	Rugosidade (acabamento superficial)	23
3.1.6	Avarias e Desgaste da Ferramenta	25
3.1.6.1	Vida da ferramenta.....	28
3.1.7	Potência de Usinagem.....	29
3.1.8	Emissão Acústica.....	31
3.1.9	Vibração.....	34
4	MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1	MATERIAL	36
4.1.1	Tratamento Térmico.....	37
4.1.2	Corpo de Prova	37
4.2	FERRAMENTA	38
4.3	MÁQUINA-FERRAMENTA	39
4.4	RUGOSÍMETRO	40
4.5	MICROSCÓPIO	41
4.6	SENSORES	42
4.6.1	Potência.....	42
4.6.2	Emissão Acústica.....	43
4.6.3	Vibração.....	43
4.7	METODOLOGIA	44
4.7.1	Tratamento dos resultados.....	47

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1	ANÁLISE DE RUGOSIDADE	48
5.1.1	Rugosidade Média	48
5.1.2	Rugosidade Total.....	55
5.2	ANÁLISE DE POTÊNCIA	60
5.3	ANÁLISE DE EMISSÃO ACÚSTICA	67
5.4	ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	73
5.5	ANÁLISE DE DESGASTE DA FERRAMENTA	79
5.6	ANÁLISE DO TIPO E FORMAS DO CAVACO	84
6	CONCLUSÕES.....	87
	REFERÊNCIAS	89

1 INTRODUÇÃO

Os processos de usinagem são parte integrante na cadeia de produção da maior parte dos produtos industrializados. Tais processos relacionam-se com atividades como a obtenção de furos, melhoria da qualidade superficial, obtenção de engrenagens para transmissão de potência, bem como, até mesmo, com a fabricação de pinos odontológicos. Ademais, o comércio de máquinas-ferramenta de usinagem representa uma grande fatia da riqueza mundial (STOETERAU, 2003).

No contexto da usinagem, o torneamento é o processo mais comumente empregado em trabalhos de corte de metal no meio industrial (TRENT, 2000).

O aço SAE 4340 endurecido apresenta-se com alta empregabilidade na indústria metalmeccânica, destacando-se especialmente nos setores aeroespacial e automobilístico. Tal destaque ocorre devido à observância, por parte do material, da combinação de algumas características necessárias à aplicações especiais, nas quais há esforços dinâmicos cíclicos causadores de fadiga (SOARES, 2017). Como exemplos destas aplicações estão os eixos, engrenagens planetárias, bielas, virabrequins e trens de pouso de aviões.

Algumas características apresentadas pelo aço SAE 4340 são elevada temperabilidade, alta tenacidade e alta resistência à fadiga, possuindo boa usinabilidade nas condições recozida ou normalizada e revenida.

A busca por alternativas de ferramentas para o torneamento de um aço com tamanha empregabilidade é motivada por interesses de viabilidade econômica, os quais, atualmente, têm-se mostrado atraídos pela usinagem de alta desempenho. Neste tipo de usinagem, visa-se à redução dos custos relativos ao tempo de usinagem, por meio do emprego de velocidades de corte mais altas, bem como aqueles relacionados com a utilização de fluidos de corte.

A tendência mundial visa à usinagem sem fluido de corte (seco), que objetiva reduzir de forma significativa os custos com a compra deste material e sua destinação final. O manuseio do fluido de corte é passível de implicar em problemas ocupacionais, como doenças de pele e variações de sintomas respiratórios. Também há preocupação ambiental acerca de sua destinação final, visto que o descarte inadequado vem a ocasionar problemas de poluição (ZEILMANN, 2018).

Outra tendência, ademais, é a busca por acabamentos superficiais cada vez melhores, a fim de se evitar a necessidade do processo de retificação posterior ao torneamento.

2 OBJETIVOS

Este trabalho objetiva a análise de desempenho de ferramenta cerâmica experimental, constituída de óxido de alumínio (Al_2O_3) dopada com óxido de cromo (Cr_2O_3), no torneamento do aço SAE 4340 endurecido. Tal estudo se dá mediante a análise do desgaste da ferramenta, potência consumida, emissão acústica, vibração e rugosidade, mediante a variação dos parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) utilizando metodologia de Taguchi.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 USINAGEM

Através da classificação dos processos de fabricação dada por Machado e Silva (2004), a usinagem mostra-se como aqueles nos quais há a retirada de material para a obtenção do produto acabado e a este se lhe confere forma, dimensão ou acabamento, bem como qualquer combinação de tais itens, mediante formação de cavaco, conforme contribuição de Ferraresi (1977). Sendo este cavaco a porção de material retirada.

Para que esta obtenção seja possível, há de haver a interação entre peça a ser usinada e máquina-ferramenta, na qual segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2001) os movimentos entre ambos permitem a ocorrência do processo de usinagem e são considerados durante o projeto e fabricação das máquinas operatrizes, outra denominação feita por Freire (1989) às máquinas-ferramenta.

Ainda de acordo com Freire (1989), autor este quem o processo de retirada de material o denominou por desagregação por arrancamento, são distinguidas duas fases nas operações de usinagem, desbaste e acabamento.

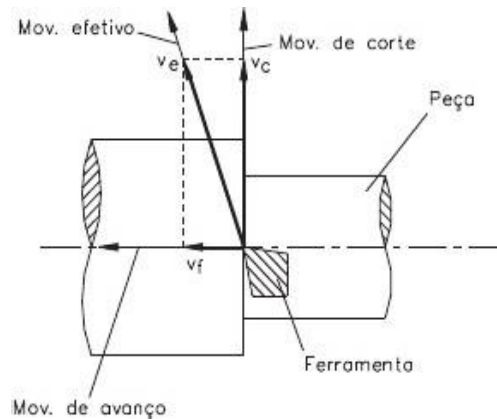
Para Ferraresi (1977), no desbaste, a superfície da peça resulta cheia de sulcos produzidos pela ferramenta no corte, pois nesta fase não há a preocupação por obter as formas e dimensões finais. Tal preocupação está na fase de acabamento, na qual se vale de ferramentas apropriadas para a formação de superfícies mais lisas com acabamento superficial especificado ou para a obtenção das dimensões finais, ou até mesmo para ambos.

3.1.1 Torneamento

Diniz, Marcondes e Coppini (2001) comentaram acerca dos movimentos entre ferramenta e peça durante a usinagem, os quais, para o autor, possibilitam a ocorrência do processo. Desta maneira, a interação entre esses movimentos é elemento caracterizador dos diferentes tipos dos processos de usinagem, convencionais, entre eles o torneamento, ou não-convencionais, classificação colocada por Machado e Silva (2004).

Seguindo a contribuição de Machado e Silva (2004), a Figura 1 ilustra a relação entre os movimentos de avanço, corte e efetivo para o torneamento, do qual se comenta que é o processo de usinagem mais comumente empregado em trabalhos de corte de metal no meio industrial (TRENT 2000).

Figura 1 - Direção dos movimentos de avanço, corte e efetivo para o torneamento



Fonte: Machado e Silva (2004).

De maneira didática, o torneamento proporciona a obtenção de superfícies de revolução mediante movimento rotativo da peça, fixada no mandril de um torno, com o auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes, cujos deslocamentos e trajetórias são simultâneos ao movimento rotativo e pertencem idealmente ao eixo de rotação da peça, respectivamente.

Segundo Ferraresi (1977), quanto à forma da trajetória, o torneamento pode ser retilíneo ou curvilíneo. No primeiro, a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea, podendo esta configuração ser denominada por torneamento cilíndrico quando a ferramenta se desloca segundo uma trajetória paralela ao eixo de rotação da máquina. Já sobre o torneamento curvilíneo, nele não está o interesse principal deste trabalho, porém se define por ser aquele no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória curvilínea.

3.1.2 Movimentos e parâmetros na usinagem

Conforme a Figura 1 e conceitualização dadas por Machado e Silva (2004) e Diniz, Marcondes e Coppini (2001), os movimentos de corte, avanço e efetivo são classificados como movimentos ativos ao provocarem remoção de material durante a sua ocorrência. Além disso, convencionou-se que a peça está parada diante do movimento relativo entre esta e a aresta cortante da ferramenta.

Sendo assim, com base em convenção e nas definições de Ferraresi (1977), define-se o movimento de corte por aquele entre a peça e a ferramenta que, quando ausente a simultaneidade do movimento de avanço, provoca a remoção de material durante uma única volta ou um único curso da ferramenta.

Quando presente a simultaneidade entre ambos movimentos, corte e avanço, o movimento de avanço é aquele que provoca uma remoção contínua e repetida de material da peça, podendo ser também resultante de movimentos componentes, como o de avanço principal e o de avanço lateral.

Segundo abordagem de Diniz, Marcondes e Coppini (2001), aos movimentos citados estão relacionados direções, sentidos, velocidades e percursos, e a todos estes se associam grandezas, ou também, parâmetros. Sendo assim, graças às associações de normas técnicas, é possível a uniformização dos conceitos destas grandezas, as quais, segundo Ferraresi (1977), técnicos e engenheiros que se dedicam a usinagem e à fabricação de ferramentas de corte e máquinas operatrizes devem seguir.

No contexto deste presente trabalho, as grandezas a serem descritas e sobre as quais se comentará estão padronizadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Por meio de conhecimento empírico na prática da usinagem, os parâmetros de velocidade de corte e de avanço são majoritariamente considerados pelo elemento humano presente na operação. Esta consideração está em função de fatores como o material da peça a ser usinada e da ferramenta, de cuja geometria também há dependência, bem como do tipo de operação.

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2001), para a operação de torneamento, onde os movimentos de corte e de avanço acontecem simultaneamente, a velocidade de corte é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça. Desta maneira, a velocidade de corte é calculada através da Equação 1.

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (1)$$

Onde:

V_c = velocidade de corte [m/min];

d = diâmetro da ferramenta [mm];

n = rotação da ferramenta [rpm].

Ainda sobre a velocidade de corte, Wrublack, Pilatti e Pedroso (2008) comentam que a contribuição deste parâmetro na vida da ferramenta é a maior.

Diniz, Marcondes e Coppini (2001) definem a velocidade de avanço no torneamento pelo produto do avanço pela rotação da ferramenta, conforme Equação 2.

$$V_f = f \cdot n \quad (2)$$

Onde:

V_f = velocidade de avanço [m/min];

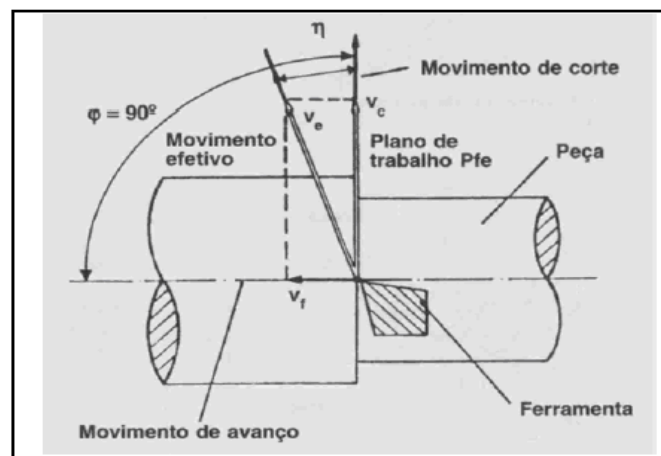
f = avanço [mm/volta];

n = rotação da ferramenta [rpm].

Segundo Wrublack, Pilatti e Pedroso (2008), na seleção deste parâmetro, devem ser considerados o acabamento superficial e a potência da máquina, ademais do que sugere o conhecimento empírico na prática da usinagem.

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2001), a profundidade, ou também largura de usinagem, a_p , é a profundidade da penetração da ferramenta em relação à peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho. Com relação a este, os mesmos autores o definem por um plano imaginário sobre o qual ocorrem os movimentos de corte, avanço e efetivo, e que contém as direções de corte e de avanço, passando pelo ponto de corte escolhido. Esta relação entre direções pode ser vista na Figura 2.

Figura 2 - Direção dos movimentos de avanço, corte, efetivo e plano de trabalho para o torneamento



Fonte: Adaptado de Diniz, Marcondes e Coppini (2001).

Através da análise de Wrublack, Pilatti e Pedroso (2008), é sabido que todos os parâmetros definidos anteriormente influenciam significativamente no resultado da superfície da peça usinada, bem como nos custos. Além disso, a escolha de qualquer um deles deve mostrar-se em acordo com os demais valores.

3.1.3 Formação, tipos e formas do cavaco

Segundo Amorim (2002), o cavaco é o principal ponto em comum entre os processos de usinagem, já que é o subproduto final presente em todos eles e dos quais pode ser indicativo de problemas relativos tanto à qualidade do material usinado quanto às condições de corte.

Para Diniz, Marcondes e Coppini (2001), aspectos econômicos e de qualidade no produto da usinagem, junto com a segurança do elemento humano e utilização adequada da máquina-ferramenta, estão envolvidos no processo de formação do cavaco.

Ferraresi (1977) reitera a necessidade do estudo do processo de formação do cavaco ao relacioná-lo com conceitos como o desgaste da ferramenta e suas causas.

A literatura de Ferraresi (1977) também proporciona uma explicação do processamento do cavaco, em condições normais de usinagem, bem como as etapas a serem descritas a posteriori. Convém ao contexto mencionar que estas condições normais de usinagem em muito se distanciam daquelas onde a velocidade de corte é altíssima, nas quais um fenômeno de escoamento de fluido é algo ao que se assemelha.

Portanto, de acordo com Ferraresi (1977), a formação do cavaco se inicia devido a penetração da ferramenta na peça, quando uma pequena porção de material é recalcada contra a superfície de saída da ferramenta. Deste modo, o material recalcado sofre uma deformação plástica, até que as tensões de cisalhamento se tornem suficientemente grandes a ponto de causar um deslizamento entre a porção de material recalcado e a peça. Ao haver a continuidade da penetração, cisalhar-se-á, parcialmente ou totalmente, a camada de material, a depender das condições de usinagem. Em consequência, segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2001), devido ao movimento relativo entre ferramenta e peça, inicia-se um escorregamento da porção do material deformado e rompido sobre a superfície de saída da ferramenta, dando origem à repetição do fenômeno.

Amorim (2002) diz que o cavaco é passível de grande variação em tipo, forma e extensão para cada processo de usinagem, assim como o é para um mesmo processo, de cujas variáveis envolvidas estará em função.

Com relação aos tipos de cavaco, Ferraresi (1977) os classifica de maneira didática em três tipos, contínuos, de cisalhamento e de ruptura. Com cuja classificação, Machado e Silva (2004) contribuem ao relacioná-la principalmente à ductilidade do material da peça e às condições de corte.

Seguindo classificação dada por Ferraresi (1977) e abordagem feita por Diniz, Marcondes e Coppini (2001), cavacos contínuos são aqueles que se apresentam constituídos de lamelas justapostas numa disposição contínua, caracterizando-se a usinagem de materiais dúcteis e homogêneos pela presença deste tipo de cavaco.

Cavacos de cisalhamento mostram-se constituídos de grupos lamelares bem distintos e justapostos e são formados, basicamente, durante a usinagem de materiais heterogêneos ou quando há vibrações externas que conduzem às variações da espessura do cavaco.

Por fim, a constituição do cavaco de ruptura dá-se por fragmentos arrancados da peça usinada, em decorrência da ruptura completa do material em grupos lamelares, os quais permanecem separados. Este tipo de cavaco é formado na usinagem de materiais frágeis ou de estrutura heterogênea.

De acordo com Ferraresi (1977), além da diferenciação dos cavacos por tipos, também há aquela quanto a sua forma, visto que certas formas de cavaco dificultam a operação de usinagem, prejudicam o acabamento superficial da peça e desgastam mais ou menos a ferramenta.

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2001), os cavacos do tipo de ruptura não podem ser submetidos à classificação quanto à forma, mas somente aqueles contínuos e de cisalhamento. Esta classificação é realizada em cavacos em fita, helicoidal, espiral e em lascas.

A norma ISO 3685 (1993) estende tal classificação de acordo conforme a Figura 3.

Figura 3 - Classificação das formas de cavaco de acordo com a norma ISO 3685 (1993).

1 – Cavaco em fita	2 – Cavaco tubular	3 – Cavaco espiral	4 – Cavaco hel. tipo arruela	5 – Cavaco hel. cônico	6 – Cavaco em arco	7 – Cavaco fragmentado	8 – Cavaco tipo agulha
1 – 1 – Longo	2 – 1 – Longo	3 – 1 – Plano	4 – 1 – Longo	5 – 1 – Longo	6 – 1 – Conect.		
1 – 2 – Curto	2 – 2 – Curto	3 – 2 – Cônico	4 – 2 – Curto	5 – 2 – Curto	6 – 2 – Solto		
1 – 3 – Emaranhado	2 – 3 – Emaranhado		4 – 3 – Emaranhado	5 – 3 – Emaranhado			

Fonte: Amorim (2002).

Seguindo a abordagem de Ferraresi (1977), na qual certas formas de cavaco são malquistas quanto a facilitação da operação de usinagem, o cavaco em fita pode provocar acidentes, ocupa muito espaço e é difícil de ser transportado. Machado e Silva (2004) também comentam que formas de cavaco longo são as que mais afetam a segurança e a produtividade. Diniz, Marcondes e Coppini (2001) acrescentam que as outras formas de cavaco não têm inconvenientes mais sérios, a depender do processo utilizado, sendo a helicoidal a forma mais preferida. Já o cavaco em lascas é preferido somente quando houver pouco espaço disponível ou quando ele deve ser removido por fluido refrigerante.

À mudança da forma do cavaco, Ferraresi (1977) sugere algumas alternativas, tal como a alteração das condições de usinagem, colocação de elementos adicionais na superfície de saída, assim como se dando uma forma especial à superfície de saída da ferramenta.

Por outro lado, Diniz, Marcondes e Coppini (2001) advertem que se deve evitar a mudança das condições de usinagem com ânimo de se obter uma forma adequada do cavaco, visto que estas condições são fixadas mediante exigências técnica e econômicas do processo.

3.1.4 Materiais para ferramentas

Para a obtenção da superfície usinada, é necessária a interação entre a superfície em usinagem e a ferramenta, quando o material cortante da ferramenta deve ser mais resistente e mais duro do que o material da superfície a usinar. A esta relação de dureza Machado e Silva (2004) se referem por princípio da dureza relativa.

Freire (1989) acrescenta que o material cortante deve ser também suficientemente forte e inquebrável para resistir aos choques com a peça usinada, bem como à ação abrasiva do material cortado, tendo de permitir a formação de uma aresta cortante viva. Por fim, a ferramenta há de reunir todas essas qualidades em temperaturas elevadas, características ao processo de corte, tanto como possuir relevante resistência ao desgaste, à compressão e ao cisalhamento, e estabilidade química, conforme observação de Deus (2015).

Machado e Silva (2004) comentam que o surgimento de novos materiais e ligas estruturais com altos índices de resistência mecânica e dureza tem contribuído para o aparecimento de novos materiais para a confecção de ferramentas mais resistentes para as operações de usinagem.

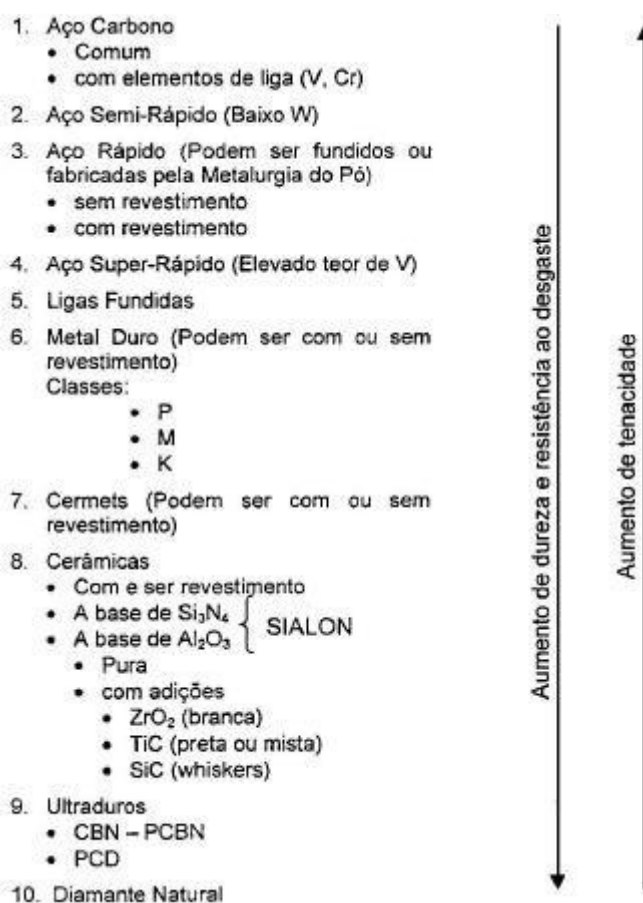
Por outro lado, há também as aplicações nas quais se requerem ferramentas compostas por material suficientemente tenaz para suportar os choques e impactos do processo.

Deste modo, o balanço entre dureza e tenacidade se tornou um desafio para os fabricantes de ferramentas de usinagem, desde que são propriedades distintas encontradas nos materiais.

Freire (1989) observa que os materiais cortantes utilizados atualmente apresentam estas propriedades de maneira variável, e que infelizmente não se encontrou um material que reunisse todas elas em conjunto. Consequentemente, na prática, escolhe-se o material da ferramenta de acordo com as exigências particulares de cada operação. Ferraresi (1977) também aponta que outro fator que não deve ser esquecido é a experiência prévia no uso do material cortante.

Diniz, Marcondes e Coppini (2001) afirmam que os materiais para ferramentas não são submetidos a uma classificação geral, sendo, portanto, agrupados em decorrência de suas características químicas em aços rápidos, aços rápidos com cobertura, metal duro, metal duro com cobertura, material cerâmico, nitreto de boro cúbico e diamante (Figura 4). Sobre isto, Ferraresi (1977) avalia que os grupos mais importantes são os aços rápidos e o metal duro.

Figura 4 - Materiais para ferramenta de corte.



Fonte: Machado e Silva (2004).

3.1.4.1 Materiais cerâmicos

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2001), as primeiras ferramentas de corte compostas de material cerâmico só lograram porcentagem significativa no mercado na década de 1980, quando sobre as propriedades das cerâmicas já se havia conseguido um também significativo nível de conhecimento.

Acerca de tais propriedades, Zanotto e Migliore (1991) afirmam que o comportamento mecânico das cerâmicas é superior a outros tipos de materiais, muito embora algumas características sejam negativas, tal como a baixa tenacidade, a qual, segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2001), retardou a participação do material cerâmico no mercado de ferramentas de corte.

Ademais, Ferraresi (1977) comenta que para não haver um subaproveitamento no emprego das cerâmicas neste mercado, é necessário que se disponha de máquinas-ferramentas adequadas, as quais devem oferecer suportes de ferramentas que permitam a mudança rápida das pastilhas de material cerâmico, de dispositivos automáticos que permitam uma rápida colocação e retirada das peças a serem usinadas, bem como máquinas operatrizes potentes e rígidas, sem vibrações e grandes balanços da ferramenta.

Estas condições de uso se fazem necessárias pois, segundo o mesmo autor, Ferraresi (1977), o material cerâmico, entre os materiais de ferramenta, é o que mais se aproxima do ideal, ou seja, daquele que permite remover a mesma quantidade de material a qualquer velocidade.

A justificativa para esta idealidade está na possibilidade de utilização do material cortante cerâmico quando submetido a velocidades de corte excepcionalmente elevadas, as quais proporcionam minimização dos custos de operação relativos ao tempo de usinagem. De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2001) e Ferraresi (1977), tais velocidades só são possíveis devido à dureza a quente, proveniente de elevada resistência ao amolecimento pelo calor à altas temperaturas e à formação de crateras.

Diniz, Marcondes e Coppini (2001) classificam as ferramentas cerâmicas entre aquelas à base de óxido de alumínio (Al_2O_3 ou alumina) e outras à base de nitreto de silício (Si_3N_4).

Sobre as primeiras, os mesmos autores comentam que são divididas em cerâmicas puras (cerâmicas brancas), cerâmicas mistas e alumina reforçada com whiskers. As cerâmicas puras são constituídas somente por óxidos, podendo apresentar teor de outros elementos para a potencialização de certas características, óxido de cromo, titânio e níquel para aumentar a resistência mecânica. As cerâmicas mistas contêm além de alumina carboneto de titânio (TiC) ou nitreto de titânio (TiN). Já a alumina reforçada com whiskers é constituída por inclusões de monocristais de SiC (whiskers) em uma matriz cerâmica de alumina.

Segundo Braga (2017), a cerâmica de óxido de alumínio é amplamente utilizada como material de ferramenta de corte. E através da adição de partículas na estrutura do óxido de alumínio, pode-se melhorar ainda mais as propriedades desta cerâmica, tornando-a mais resistente.

3.1.5 Rugosidade (acabamento superficial)

Para Machado e Silva (2004), o acabamento superficial de determinado item mecânico há de ser previsto em seu projeto, cuja dependência dar-se-á à aplicação do mesmo.

Pinheiro (2014) afirma que vários fatores influenciam no acabamento superficial de uma superfície usinada, tais quais as condições da máquina, geometria de corte e desenho construtivo da ferramenta, parâmetros de corte, perfil e método de fixação da peça. Machado e Silva (2004) contribuem com outros aspectos como vibração e geração de calor.

De acordo com Amorim (2002), o acabamento superficial é representado principalmente pela rugosidade e se define por um conjunto de irregularidades, com espaçamento regular ou irregular, as quais tendem a formar um padrão ou textura característicos em uma superfície.

Acerca da rugosidade, Deus (2015) comenta que é formada por marcas provocadas pela ferramenta utilizada sobre a superfície em usinagem, às quais Amorim (2002) se refere por herança do processo empregado na obtenção da superfície acabada, torneamento, fresamento ou furação.

Para Pinheiro (2014) estas marcas são irregularidades finais ou erros geométricos provenientes de marcas de avanço, aresta postiça de corte e desgaste da ferramenta, sendo a rugosidade utilizada como um parâmetro de saída para o controle de processos.

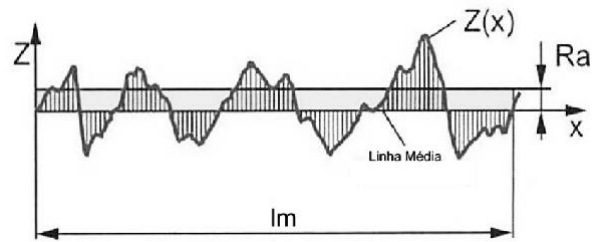
Machado e Silva (2004) detalha alguns fatores a serem considerados em projeto para a determinação do acabamento superficial, são eles o grau de acoplamento entre componentes; coeficiente de atrito, desgaste e lubrificação; resistência à fadiga e à corrosão; resistividade elétrica e térmica de contato; processamento posterior; aparência; custo.

Alguns parâmetros são dados por Machado e Silva (2004) para a avaliação da rugosidade em uma superfície usinada, os quais são classificados pelos autores em parâmetros de amplitude, de espaço e híbridos.

Os primeiros parâmetros, de maior utilidade presente, são determinados por alturas dos picos, profundidades dos vales ou pelos dois, sem considerar o espaçamento entre as irregularidades ao longo da superfície. Entre os parâmetros de amplitude estão o R_a e o R_t .

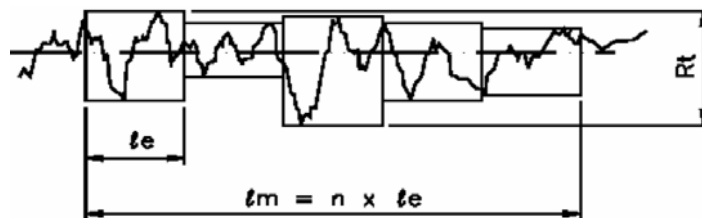
O R_a (Figura 5) cujo nome é desvio aritmético médio ou rugosidade média, se define pela média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem. Já o R_t , cujo nome é a altura total do perfil ou rugosidade total, se define pela soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação.

Figura 5 - Representação do parâmetro R_a .



Fonte: Adaptado de Zacarias (2012).

Figura 6 - Representação do parâmetro R_t .



Fonte: Adaptado de Zacarias (2012).

Para Machado e Silva (2004), o R_a é o mais utilizado entre os parâmetros de amplitude para controle de processo, visto que goza de estabilidade ao não receber influência de efeitos ocasionais, e que alterações no seu valor representam alterações no processo, especialmente desgaste da ferramenta; além de estar disponível nos instrumentos mais simples da indústria. Por outro lado, este parâmetro isoladamente não é suficiente na identificação de algumas características importantes da superfície.

Ainda de acordo com os mesmos autores, o parâmetro R_t (Figura 6) é utilizado quando se deseja ou se mostra necessário especificar a altura máxima da rugosidade, pois são diretamente influenciados por qualquer defeito ou irregularidade na superfície.

Machado e Silva (2004) dizem que os parâmetros R_a e R_t podem ser calculados de forma teórica. Este cálculo teórico fornece valores apenas indicativos, visto que os valores reais são acrescidos de fatores como vibração e desgaste das arestas de corte, por exemplo.

No processo de torneamento, se o avanço (f) é menor que o raio de ponta da ferramenta (r_E), os valores de R_a e R_t são calculados, de forma aproximada pelas Equações 3 e 4.

$$R_{a_{teórica}} = \frac{f^2}{31,2 \cdot r_E} \quad (3)$$

Onde:

f = avanço [mm/volta];

r_E = raio de ponta da ferramenta [mm].

$$R_{t_{teórica}} = \frac{f^2}{8 \cdot r_E} \quad (4)$$

Onde:

f = avanço [mm/volta];

r_E = raio de ponta da ferramenta [mm].

3.1.6 Avarias e desgaste da ferramenta

Primeiramente, Diniz, Marcondes e Coppini (2001) diferenciam as avarias dos desgastes, as quais ambas são passíveis de acontecer em uma ferramenta de usinagem. Segundo os autores, desgaste é a perda contínua e macroscópica de partículas da ferramenta em decorrência do seu uso em processo de corte, o qual também pode ocasionar outras ocorrências, sendo estas as avarias.

Machado e Silva (2004) definem as avarias como resultado do processo de destruição da ferramenta de corte, o qual ocorre de maneira repentina e inesperada e promove, na maioria dos casos, a perda de massa da ferramenta.

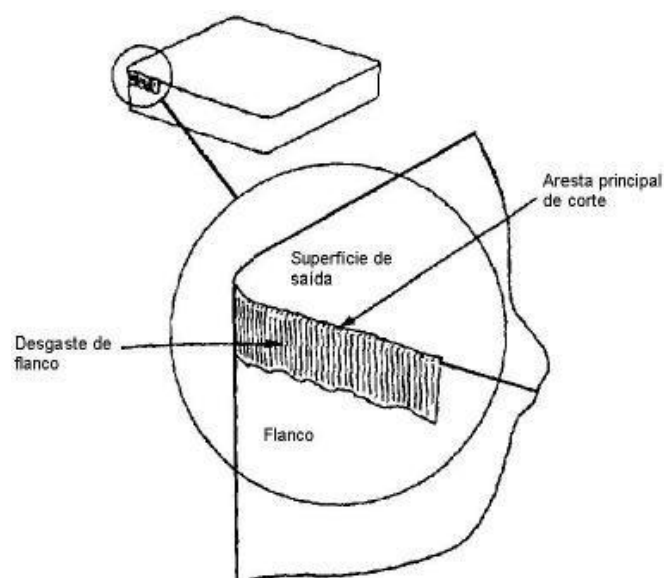
Amorim (2002) acrescenta que o desgaste excessivo e as falhas catastróficas, maneira pela qual o autor também se refere às avarias, são duas causas suficientemente determinantes na substituição da ferramenta de corte.

Diniz, Marcondes e Coppini (2001) citam e descrevem o desgaste de flanco, de entalhe e de cratera.

Para os autores, o desgaste de flanco (Figura 7), ou frontal, é o tipo mais comum, visto que todo processo de usinagem o causa. Tal desgaste ocorre na superfície de folga da ferramenta, causado pelo contato entre ferramenta e peça, e, algumas vezes, também ocorre nos dois extremos de contato entre a superfície de folga da ferramenta e a peça, sendo, neste contexto, denominado por desgaste de entalhe (Figura 8). Como consequência para a superfície a ser usinada, está a deterioração do acabamento superficial e, por modificar

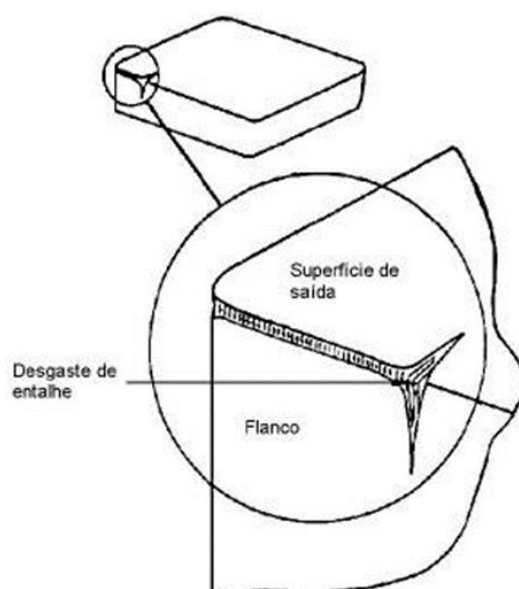
totalmente a forma da aresta de corte original, faz com que a peça mude de dimensão, podendo sair da faixa de tolerância (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2001).

Figura 7 – Representação esquemática do desgaste de flanco



Fonte: Amorim (2002)

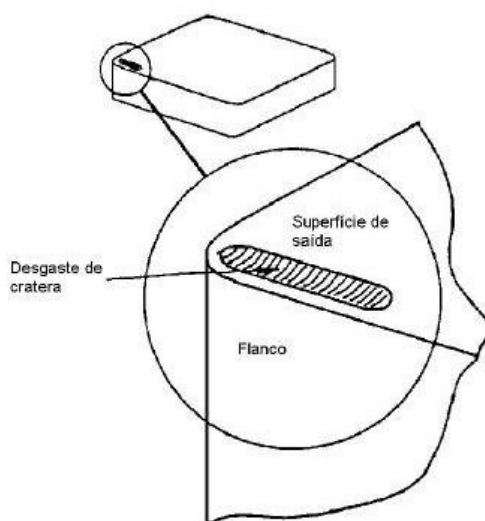
Figura 8 – Representação esquemática do desgaste de entalhe



Fonte: Amorim (2002)

Com relação ao desgaste de cratera, segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2001), esta é a modalidade de desgaste cuja ocorrência é observada na superfície de saída da ferramenta, conforme Figura 9, ocasionado pelo atrito entre ferramenta e cavaco. De maneira distinta ao desgaste de flanco, não são todos os processos de usinagem que ocasionam o desgaste de cratera, porém quando os dois exemplos de desgaste são concomitantes a uma mesma ferramenta e se encontram entre si, há a quebra da mesma.

Figura 9 – Representação esquemática do desgaste de cratera



Fonte: Amorim (2002)

Segundo Ferraresi (1977), são consideradas avarias da ferramenta de corte as quebras, trincas, sulcos distribuídos em forma de pente e as deformações plásticas.

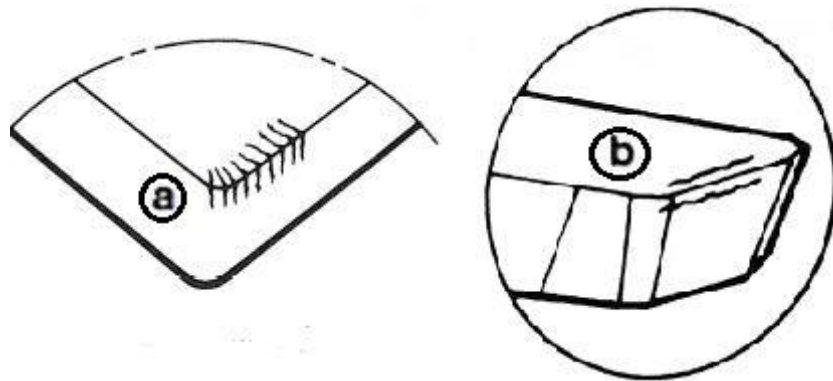
No contexto das avarias, Diniz, Marcondes e Coppini (2001) dizem que os desgastes quando crescidos podem gerar a quebra da ferramenta. Por outro lado, a ruptura da ponta ou da aresta cortante da ferramenta (FERRARESI, 1977), também podem ocorrer de maneira inesperada e repentina devido a alguns fatores como:

- Ângulo da ponta ou ângulo de cunha pequeno;
- Material de corte quebradiço;
- Corte Interrompido;
- Parada instantânea do movimento de corte sem a retirada prévia da ferramenta de sobre a peça (FERRARESI, 1977).

Já sobre as trincas, Diniz, Marcondes e Coppini (2001) relacionam-nas à consequência da variação de temperatura e/ou variação dos esforços mecânicos. Quando em decorrência destes, as trincas são observadas paralelamente à aresta de corte, conforme Figura 11 - b. De maneira

distinta, as trincas decorrentes da variação de temperatura se mostram perpendiculares à aresta de corte, conforme Figura 10 – a.

Figura 10 – Trincas devido a - (a) Variação térmica; (b) Esforços mecânicos



Fonte: Adaptado de Diniz, Marcondes e Coppini (2001)

Sobre as avarias definidas por deformação plástica, Diniz, Marcondes e Coppini (2001) as explicam como sendo um tipo de avaria de ferramenta de usinagem decorrente, muitas vezes, da pressão aplicada à ponta da ferramenta somada à alta temperatura envolvida.

3.1.6.1 Vida da ferramenta

Diniz, Marcondes e Coppini (2001) dizem que a vida da ferramenta, dentro de um critério previamente estabelecido, está relacionada ao tempo de trabalho efetivo da mesma, ao fim do qual se dá a perda da sua capacidade de corte. Ao trabalho efetivo são-lhe deduzidos os tempos passivos.

Segundo Espanhol (2008), vários são os fatores que determinantes na fixação de um determinado valor-limite de desgaste para o fim da vida da ferramenta de corte, a depender de algumas características, tais quais:

- qualidade ou quebra da aresta cortante;
- temperatura excessiva atingida pela ferramenta;
- tolerâncias dimensionais fora do padrão especificado;
- acabamento superficial não satisfatório;
- aumento excessivo da força de usinagem;
- critério para avaliar a usinabilidade do material.

Amorim (2002) acrescenta que a determinação do ponto quando a ferramenta deverá ser reafiada ou substituída se faz necessária a fim de evitar danos causados por falhas catastróficas e gastos excessivos decorrente da operação inadequada da máquina operatriz.

A forma mais usual de determinar este ponto é dada pela norma ISO 3685 (1993). Esta norma estabelece ensaios de usinabilidade para determinar o período de tempo durante o qual uma ferramenta de corte pode trabalhar (AMORIM, 2002). De acordo com o mesmo autor, para as ferramentas cerâmicas, os critérios mais comuns são os relativos ao desgaste de flanco médio com valor de 0,3mm e o desgaste de flanco máximo com valor de 0,6mm.

3.1.7 Potência de Usinagem

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2001), em uma máquina-ferramenta, dois movimentos fazem com que seja demandada potência para a rotação do seu eixo-árvore, o movimento de corte e o movimento de avanço. Deste modo, a cada um destes movimentos está associada a grandeza física potência, ao que contribui Ferraresi (1977) ao dizer que as potências necessárias para a usinagem, de corte e de avanço, são resultantes do produto das componentes da força de usinagem em questão pela respectiva componente da velocidade de corte.

A potência de corte é aquela disponível no gume da ferramenta e a partir do consumo da qual se dá a operação de remoção de cavacos.

Diniz, Marcondes e Coppini (2001) equacionam a potência de corte e a potência de avanço, respectivamente, pela Equação 5 e Equação 7.

$$P_c = \frac{F_c \cdot V_c}{60 \cdot 10^3} \quad (5)$$

Onde:

P_c = Potência de corte [kW];

F_c = Força de corte [N] (Equação 6);

V_c = Velocidade de corte [m/min].

$$F_c = K_s \cdot f \cdot a_p \quad (6)$$

$$P_f = \frac{F_f \cdot V_f}{60 \cdot 10^6} \quad (7)$$

Onde:

P_f = Potência de avanço [kW];

F_f = Força de avanço [N];

V_f = Velocidade de avanço [mm/min];

K_s = Pressão específica de corte [N/mm²].

Ferraresi (1977) acrescenta que a soma de ambas potências constitui a potência efetiva de corte. Por outro lado, Diniz, Marcondes e Coppini (2001) afirmam que para questões como o dimensionamento do motor da máquina, a potência de avanço é desprezível, por ser muito pequena quando comparada à potência de corte, sendo por vezes observada no grupo de fatores que causam a distinção entre esta potência e a de acionamento.

Entre tais fatores, além daquelas perdas no sistema de avanço, estão outras mais, como as que ocorrem por atrito nos mancais, engrenagem, sistemas de lubrificação e arrefecimento, as quais se relacionam à observância do rendimento de uma máquina operatriz, grandeza equacionada por Diniz, Marcondes e Coppini (2001) através da Equação 8.

$$\eta = \frac{P_c}{P_m} \quad (8)$$

Onde:

P_c = Potência de corte [kW];

P_m = Potência fornecida pelo motor ou Potência de acionamento [kW];

η = rendimento da máquina operatriz.

Para Diniz, Marcondes e Coppini (2001), os valores de rendimento estão entre 60 e 80% para máquina convencionais. Já para as máquinas com Comando Numérico Computadorizados os mesmos valores podem se mostrar maiores que 90%, nas quais o motor tem variação contínua de rotação e a transmissão de movimentos do motor é executada com

poucos ou nenhum elemento de transmissão, ou menor que 90% em outras com baixo rendimento em baixas rotações.

De acordo com Spinelli (2004), no torneamento, a potência de corte é a grande parcela consumida da potência elétrica fornecida pelo motor. Desta maneira a mensuração desta, como aproximação daquela, sendo vista como potência requerida durante o processo, torna-se um importante indicativo do processo de usinagem. Tal indicativo, segundo o mesmo autor, pode ser utilizado no auxílio do monitoramento do desgaste da ferramenta de corte.

A referida mensuração mostra-se mais praticamente aplicável por meio da utilização de sensores de corrente e tensão, cuja vantagem, de acordo com Spinelli (2004), está no ponto de instalação dos sensores, localizado no painel de acionamento da máquina, ou seja, isolado do ambiente agressivo e com baixíssimo grau de intrusividade.

3.1.8 Emissão Acústica

Silva (2010) define a emissão acústica por ondas elásticas transientes geradas pela rápida liberação de energia de uma fonte, ou fontes, localizada no interior de um material sujeito a um estado de tensão. Associa-se, portanto, tal energia liberada à redistribuição abrupta de tensões internas, cujo resultado é a propagação de uma onda de tensões através do material. Sobre esta definição, Silva (2010) comenta que dentre as fontes de emissão acústica relacionadas com o processo de usinagem, apenas deformação plástica, devido principalmente ao movimento de discordâncias, e fratura são significantes.

O mesmo autor também acrescenta que, no tocante ao material sujeito a um estado de tensões, essa configuração dará origem à propagação de um sinal de emissão acústica passível de ser medido de forma contínua, quando esse estado de tensões for variável ao longo do tempo. Isto é, a geração e propagação de um campo de ondas elásticas depende da mudança no estado de tensões causante.

Para Silva (2010), classifica-se o sinal de emissão acústica em dois tipos de sinais, do tipo contínuo e transiente. Sendo assim, o primeiro está associado às deformações plásticas em materiais dúcteis, enquanto o segundo é observado durante a formação e propagação de trincas no material.

No contexto dos processos de usinagem, para Pigari (1995), quando se mede o som proveniente de uma operação de usinagem, uma variedade de informações sobre o corte é possível de ser observada, da qual alguns componentes têm sido utilizados no monitoramento das condições da ferramenta. Tal autor acrescenta que a geração dos sinais de emissão

acústica é intrínseca ao processo de deformação dos materiais envolvidos, corte, trinca, quebra ou atrito, e as condições da ferramenta são passíveis de análise visando o estudo do seu desgaste e/ou quebra.

A emissão contínua é produzida pela deformação da peça ou cavaco e pelo atrito cavaco/ferramenta na superfície de saída da ferramenta e atrito peça/ferramenta na superfície de folga.

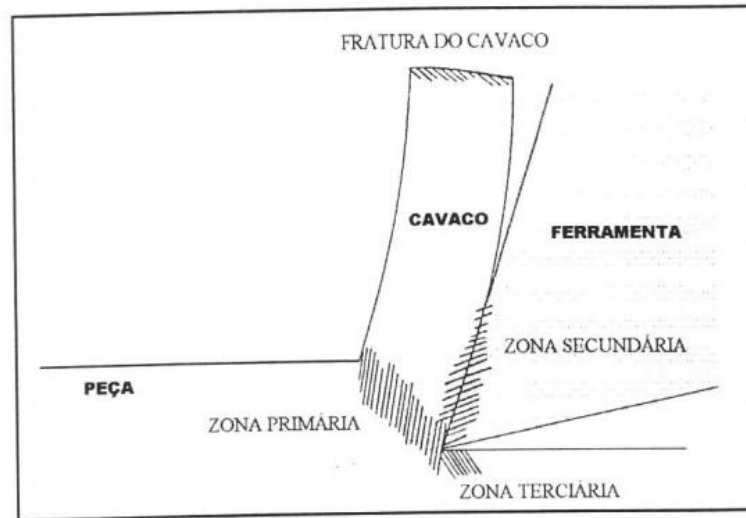
Ainda segundo Pigari (1995), o monitoramento indireto do processo de usinagem usando sensores de emissão acústica, vibração e de parâmetros elétricos da máquina pode configurar-se como a solução mais viável para o problema da determinação do momento de substituição da ferramenta, e que dentre estas opções de monitoramento, aquela por meio do sinal de emissão acústica tem-se mostrado uma das técnicas mais promissoras.

Pigari (1995), uma das principais vantagens da utilização do sinal de emissão acústica no monitoramento das condições da ferramenta é a facilidade de descontaminação dos ruídos por meio de um filtro passa-alta, em razão destes sinais se mostrarem em uma faixa de frequência muito alta, 50 kHz a 1000 kHz, ou seja, bem acima da faixa de frequência de vibrações mecânicas ou outros ruídos envolvidos na manufatura. Outra vantagem é que a emissão acústica pode ser captada e transformada em sinal elétrico por um sensor piezoelétrico pequeno e de baixo custo.

Pigari (1995) pormenoriza as várias fontes geradoras de emissão acústica em um processo de torneamento, as quais são mostradas na Figura 11 e descritas a seguir:

- zona primária de deformação: região da peça onde ocorre o cisalhamento do cavaco;
- zona secundária de deformação: região de atrito entre cavaco e superfície de saída da ferramenta;
- zona terciária de deformação: região de atrito entre peça e superfície de folga da ferramenta;
- quebra do cavaco e colisão deste com a peça ou ferramenta;
- lascamento ou quebra da ferramenta.

Figura 11 – Regiões geradoras de emissão acústica no torneamento.

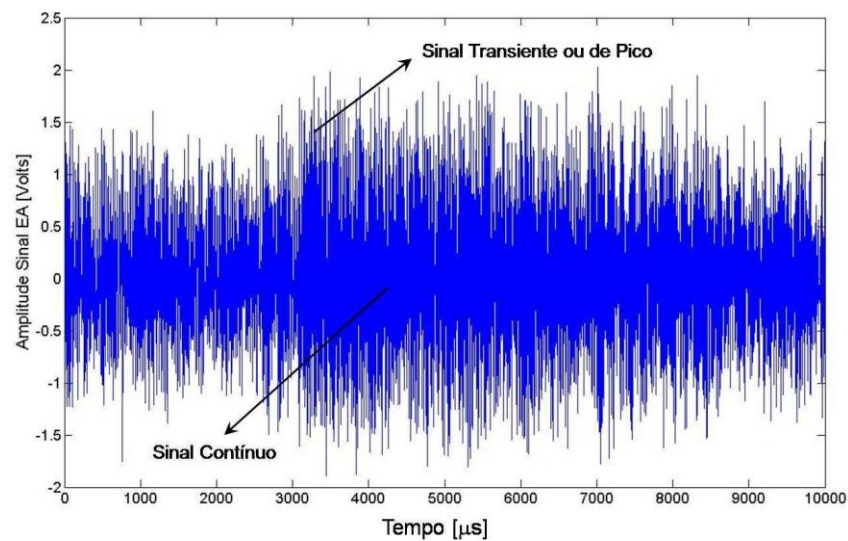


Fonte: Lan e Dornfel (1986) apud Pigari (1995)

As zonas primária, secundária e terciária de deformação geram sinais de emissão acústica do tipo contínuo, enquanto que os fenômenos de lascamento, quebra ou colisão do cavaco e ferramenta geram sinais de pico (PIGARI, 1995).

Um exemplo de sinal contínuo e de pico (transiente) de emissão acústica pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 – Exemplo de sinal contínuo e de pico (transiente) de emissão acústica.



Fonte: Silva (2010)

3.1.9 Vibração

Costa (1995) relaciona a vibração ao estudo dos movimentos oscilatórios dos corpos e às forças que lhe são associadas, no qual afirma que todos os corpos dotados de massa e elasticidade são capazes de vibrar. Sendo assim, a maior parte das máquinas e estruturas está sujeita a certo grau de vibração, exigindo, por consequência, que seu projeto contemple a análise do comportamento oscilatório.

Para Costa (1995), visto que não há nenhum sistema perfeitamente rígido, todo corpo submetido a esforços dinâmicos vibra.

No contexto dos processos de usinagem, Pigari (1995) comenta que, durante estes processos, ocorrem vibrações no sistema máquina-ferramenta, vibrações as quais, para Costa (1995), podem fornecer informações importantes para o conhecimento das condições atuais do processo.

Nos processos de usinagem, Costa (1995) coloca as vibrações em função do movimento cíclico relativo entre peça e ferramenta, estando elas presentes em todos os processos de torneamento, por mais simples que sejam.

Costa (1995) classifica as fontes geradoras de vibração em processos de usinagem em dois grupos, vibração forçada e auto excitada. Para Costa (1995), a vibração forçada ocorre devido à ação de forças cíclicas externas ao sistema, o qual é forçado a vibrar na frequência da excitação. Desta maneira, quando a frequência de vibração se aproxima da frequência natural do sistema ferramenta-peça-máquina-dispositivo de fixação, gera-se o fenômeno de ressonância, visto que o sistema tende a absorver ligeiramente mais energia por ciclo vibracional do que aquela devolvida ao meio através do amortecimento.

O mesmo autor coloca o desbalanceamento de eixos, a folga de mancais e rolamento e a utilização da máquina acima de sua capacidade entre os muitos fatores causadores da vibração forçada.

Já a vibração auto excitada ocorre quando, durante o ciclo simples, mais energia é absorvida do que desprendida. Sendo assim, para induzir uma vibração auto excitada em processos de usinagem, a ferramenta necessita apenas sofrer algum tipo de choque ou até mesmo encontrar uma incrustação mais dura no material da peça. No mais, a vibração auto excitada pode ter origem também em usinagem descontínua, na espessura variável do cavaco e no atrito entre peça e ferramenta (COSTA, 1995).

Deste modo, visto que as vibrações podem ser analisadas para fins específicos de monitoramento, tais como o acompanhamento da evolução do desgaste da ferramenta de corte

(PIGARI, 1995) e a formação do cavaco (BONIFACIO, 1993), o tipo de vibração de interesse é a auto excitada, ou seja, aquela na qual está contida toda a vibração proveniente do contato ferramenta-peça e cavaco-ferramenta (COSTA, 1995).

Bonifacio (1993) acrescenta que os sinais de vibração em faixas de frequência de poucos Hz a alguns kHz têm sido investigados por muitos pesquisadores em razão de desejarem a aplicação em sistemas de monitoramento em tempo real.

Para Bonifacio (1993), a dificuldade principal desta aplicação está na identificação e isolamento da frequência de vibração que de fato influencia, em razão do sistema global de usinagem possuir vários fatores que induzem vibração e que não são pertinentes à temática. Costa (1995) cita como fontes de vibração impertinentes o estágio de conservação da máquina e sua instalação, uma operação inadequada, especificações técnicas e ferramentas em diferentes estágios de vida.

Segundo Silva (2010) no monitoramento da usinagem via sinal de vibração também é importante conhecer o comportamento dinâmico da máquina-ferramenta.

Pigari (1995) aponta que um detector de ferramenta desgastada foi construído usando um sensor de vibração montado sobre o porta-ferramentas. Dele se verificou que a energia total da vibração na faixa de frequência de 4 a 8 kHz cresce durante o crescimento dos desgastes da aresta da ferramenta.

Para o mesmo autor, com a evolução tecnológica em sensores e instrumentação para medição e análise de vibração, esta técnica tornar-se-á mais prática e de custo baixo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, são pormenorizados os materiais, bem como a metodologia, a partir dos quais se tornou exequível o procedimento experimental e a subsequente análise do desempenho de ferramenta cerâmica de geometria circular constituída de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$, no torneamento longitudinal do aço 4340 endurecido.

4.1 MATERIAL

O material submetido a ensaio, aço SAE 4340, foi fornecido, através de peça bruta, pela empresa GGD Metals, representante Gerdau, localizada em São Paulo/SP, e o posterior tratamento térmico se realizou na empresa Proterm, localizada em São José dos Campos/SP.

Em sua forma bruta, corpo cilíndrico (Figura 13), o referido aço estava com as dimensões conforme Figura 14, e apresentava dureza entre 201 e 227 HB, menor que 20 HRC portanto. Após o tratamento térmico, a sua dureza passou a ser 56 HRC, ou 615 HV. A composição química é mostrada pela Tabela 1.

Figura 13 – Material antes dos ensaios



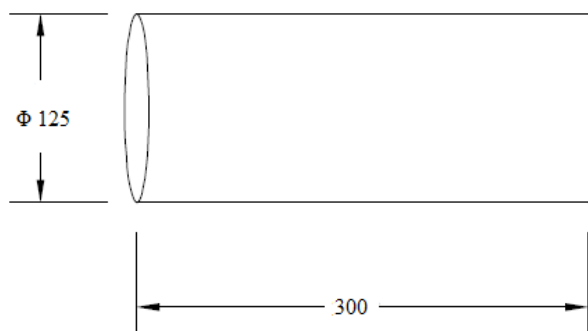
Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 1 – Composição química do aço AISI 4340 (% em massa)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	Cu	Al
0,40	0,22	0,63	0,73	1,66	0,22	0,015	0,014	0,15	0,037

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 14 – Material em sua forma bruta, dimensões em mm.



Fonte: Produção do próprio autor

4.1.1 Tratamento térmico

Antes de ser submetida ao processo de tratamento térmico, a superfície inicial do corpo de provas foi preparada.

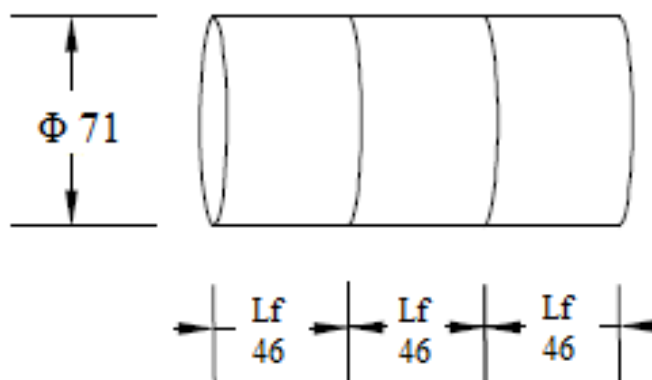
Após esta preparação, o processo de tratamento térmico foi conduzido de acordo com as orientações do catálogo do material, da GGD Metals e das necessidades impostas pelas dimensões físicas da peça. Ou seja, fez-se necessário o processo de têmpera a 850 °C por 5 h para austenitização. Já o revenimento ocorreu com o resfriamento do material até 70 °C, com permanência por 2 h à temperatura de 150 °C, a qual se explica também pelas dimensões físicas da peça, sendo necessária 1 h para 25 mm de espessura, no mínimo, a fim de que se alivie as tensões.

Deste modo, os parâmetros de tempo e temperatura foram escolhidos de tal forma que, ao final do tratamento térmico, ao material pudesse ser-lhe conferida uma dureza de aproximadamente 56 HRC.

4.1.2 Corpo de prova

O corpo de prova ensaiado após testes apresentava dimensões conforme Figura 15. Na mesma figura, os valores de L_f representam, esquematicamente, os percursos de avanço (L_f) utilizados em mm.

Figura 15 – Modelo Esquemático do corpo de provas em mm.



Fonte: Produção do próprio autor

4.2 FERRAMENTA

A ferramenta cerâmica à base de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ utilizada no procedimento experimental deste trabalho advém do projeto de desenvolvimento de novos materiais para ferramenta coordenado pelo Prof. Dr. José Vitor Cândido de Souza, do Departamento de Materiais e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus de Guaratinguetá, juntamente com o grupo de pesquisa em usinagem dos materiais deste mesmo Departamento.

A ferramenta cerâmica em questão (Figura 16) é neutra, com aresta chanfrada, de geometria circular (diâmetro de 12 mm), consistindo-se portanto em uma pastilha de cerâmica de óxido de alumínio, desenvolvida no Departamento de Materiais e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” e retificada e lapidada pela empresa Mapal do Brasil, havendo sido dopada com óxido de cromo, Cr_2O_3 . O seu código é RNMN120408 e sua composição química está representada na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição química de ferramenta cerâmica, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ (% em peso)

Al_2O_3	Cr_2O_3
99,75	0,25

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 16 – Ferramenta cerâmica



Fonte: Produção do próprio autor

Também se contou com a contribuição da empresa Almatris do Brasil, mediante fornecimento de pós de alumina α , ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), a fim de que fossem produzidos os inserts de cerâmica com tamanho de partículas de 0,40 a 0,60 μm .

A ferramenta ainda se mostra preparada com aresta do tipo chanfrada, com chanfro e 0,20 mm inclinado a 10 °C, além de arestas arredondadas (*Honning*) igual a 20 μm .

4.3 MÁQUINA-FERRAMENTA

O procedimento experimental foi executado integralmente no Laboratório de Estudo da Usinagem da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus de Guaratinguetá, Departamento de Materiais e Tecnologia, onde se utilizou o centro de torneamento com Comando Numérico Computadorizado da marca Romi, modelo GL 240M,

com motor principal de 15 kW de potência, conforme Figura 17.

O suporte para a ferramenta cerâmica foi do tipo Capto (Seco Tools) de código C5-CRRNN-22- 50-12 com ângulo de saída e de inclinação de -6° .

Figura 17 – Centro de torneamento CNC, marca Romi, modelo GL 240M



Fonte: Produção do próprio autor

4.4 RUGOSÍMETRO

Para a obtenção dos dados experimentais de rugosidade, total (R_t) e média (R_a), variáveis de saída referentes à integridade superficial da superfície usinada, foi utilizado um rugosímetro da marca Mahr, modelo MarSurf M 300, conforme Figura 18. O comprimento de amostragem adotado (cut-off) foi ajustado conforme as normas AISI NBR4287:2002 e AISI NBR ISSO 4288:2008 sendo utilizado 0,8 mm e 2,5 mm dependendo do avanço utilizado nesta pesquisa.

Figura 18 – Rugosímetro modelo MarSurf M 300.



Fonte: Produção do próprio autor

4.5 MICROSCÓPIO

Para a obtenção dos valores experimentais de desgaste da ferramenta, variável de saída referente à vida da ferramenta, foi utilizado um microscópio da marca Mahr, modelo MarVision MM 200 (Figura 19).

Figura 19 – Microscópio Mahr, modelo MarVision MM 200.



Fonte: Produção do próprio autor

4.6 SENSORES

Sensores foram utilizados para a aquisição dos dados experimentais relativos à potência, emissão acústica e vibração, algumas das variáveis de saída na análise de desempenho deste trabalho. Tais sensores realizam a mesma função no sistema de aquisição de dados de medição, através da captação de sinais e posterior envio a um computador, mediante condicionamento de sinal e software de aquisição.

4.6.1 Potência

Foram utilizados sensores de corrente da marca LEM, modelo AT 100 B10 (Figura 20), na aquisição dos dados de potência consumida pelo motor do centro de torneamento. Esta aquisição ocorreu através da captação do sinal de tensão por uma placa de aquisição de dados e do armazenamento durante a execução dos ensaios. Os programas de aquisição envolvidos no processo foram aqueles desenvolvidos no software Labview da empresa National Instruments.

Figura 20 – Sensor de potência da marca LEM, modelo AT 100 B10.



Fonte: Produção do próprio autor

Nesta configuração, o sensor capta sinais de tensão, em amplitudes entre 0 e 10V. Sendo assim, ao se substituir o valor do sinal e o dividir por 10, valendo-se da amplitude da corrente, 100 A, o valor da tensão de fase do motor, 220 V e o fator de escorregamento do motor, 0,76, bem como aplicando o fator de correção $3^{1/2}$, por ser um motor trifásico, pode-se transformar o sinal de tensão adquirido para valores de potência consumida em Watts, o que é feito pelo sistema. A seguinte equação, Equação 9, expressa o que foi comentado.

$$Potência = \frac{\text{valor}}{10} \cdot 100.220.0,76.\sqrt{3} \quad (9)$$

4.6.2 Emissão acústica

Para a captação dos dados de emissão acústica, foi utilizado um módulo da marca Physical Acoustics Corporation (Figura 21), com sensor piezoelétrico modelo R15A, e amplificador de sinal elétrico com saída retificada em RMS, valor quadrático médio, modelo 1272-1000.

Figura 21 – Módulo de emissão acústica utilizado, com sensor piezoelétrico e amplificador de sinal.



Fonte: (Soares, 2016).

4.6.3 Vibração

Através de um módulo de vibração (Figura 22) da marca Vibro Control composto por sensor piezoelétrico (acelerômetro), e um amplificador de sinal modelo TV100, com saída retificada em RMS, captaram-se os dados de vibração.

Figura 22 – Módulo de vibração modelo TV100



Fonte: Produção do próprio autor

4.7 METODOLOGIA

Através de ensaios preliminarmente realizados, verificou-se que baixos valores de avanço associados a baixos valores de profundidade de corte resultaram em vibrações críticas para ferramentas cerâmicas de geometria circular. Desta maneira, os parâmetros de corte utilizados foram aqueles acima da faixa que induzia tal vibração.

Para a análise do efeito da velocidade de corte (V_c) e do avanço (f) na qualidade superficial, através dos parâmetros de rugosidade R_a e R_t , utilizou-se um planejamento de experimento do tipo Taguchi L4 com 6 repetições, conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros de corte utilizados análise do efeito da velocidade de corte (V_c) e do avanço (f) na qualidade superficial.

V_c (m/min)	f (mm/rotação)	a_p (mm)
160	0,3	1,0
200	0,4	1,0

Fonte: Produção do próprio autor

Visando à análise do efeito da velocidade de corte (V_c) e do avanço (f) na potência consumida, bem como na vibração e emissão acústica, foi utilizado o software Matlab 15 para tratamento dos resultados e captação dos valores experimentais máximos obtidos durante o processo de torneamento. Para isso, foi utilizado um planejamento de experimento do tipo Taguchi L4 com 2 repetições (Tabela 4).

Tabela 4 – Parâmetros de corte utilizados para análise do efeito da velocidade de corte (V_c) e do avanço (f) na potência consumida, vibração e emissão acústica

$V_c(\text{m/min})$	$f(\text{mm/rotação})$	$a_p(\text{mm})$
160	0,3	1,0
200	0,4	1,0

Fonte: Produção do próprio autor

Objetivando a análise da influência da velocidade de corte (V_c) e da profundidade (a_p) no acabamento superficial, por meio dos parâmetros R_a e R_t , valeu-se de um planejamento de experimento do tipo Taguchi L4 com 6 repetições (Tabela 5).

Tabela 5 – Parâmetros de corte utilizados para análise da influência da velocidade de corte (V_c) e da profundidade (a_p) no acabamento superficial

$V_c(\text{m/s})$	$f(\text{mm/rotação})$	$a_p(\text{mm})$
160	0,3	1,0
200	0,3	1,5

Fonte: Produção do próprio autor

Para a análise do efeito da velocidade de corte (V_c) e da profundidade (a_p) na potência consumida, bem como na vibração e emissão acústica, foi utilizado o software Matlab 15 para tratamento dos resultados e captação dos valores experimentais máximos obtidos durante o processo de torneamento. Para isso, utilizou-se um planejamento de experimento do tipo Taguchi L4 com 2 repetições (Tabela 6).

Tabela 6 – Parâmetros de corte utilizados para análise do efeito da velocidade de corte (V_c) e da profundidade (a_p) na potência consumida, vibração e emissão acústica

$V_c(\text{m/min})$	$f(\text{mm/rotação})$	$a_p(\text{mm})$
160	0,3	1,0
200	0,3	1,5

Fonte: Produção do próprio autor

Visando à análise do efeito do avanço (f) e da profundidade (a_p) na qualidade superficial, através dos parâmetros de rugosidade R_a e R_t , foi utilizado um planejamento de experimento do tipo Taguchi L4 com 6 repetições (Tabela 7).

Tabela 7 – Parâmetros de corte utilizados para análise do efeito do avanço (f) e da profundidade (a_p) na qualidade superficial

V_c (m/min)	f (mm/rotação)	a_p (mm)
200	0,3	1,0
200	0,4	1,5

Fonte: Produção do próprio autor

Objetivando a análise da influência do avanço (f) e da profundidade (a_p) na potência consumida, bem como na vibração e emissão acústica, utilizou-se o software Matlab 15 para tratamento dos resultados e captação dos valores experimentais máximos obtidos durante o processo de usinagem. Para isso, utilizou-se um planejamento de experimento do tipo Taguchi L4 com 2 repetições (Tabela 8).

Tabela 8 – Parâmetros de corte utilizados para análise da influência do avanço (f) e da profundidade (a_p) na potência consumida, vibração e emissão acústica

V_c (m/min)	f (mm/rotação)	a_p (mm)
200	0,3	1,0
200	0,4	1,5

Fonte: Produção do próprio autor

Objetivando a análise da influência da velocidade de corte (V_c) na potência consumida, bem como na vibração e emissão acústica, utilizou-se o software Matlab 15 para tratamento dos resultados e captação dos valores experimentais máximos obtidos durante o processo de usinagem. Para isso, utilizou-se um planejamento de experimento do tipo Taguchi L5 com 1 repetição (Tabela 9).

Tabela 9 – Parâmetros de corte utilizados para análise da velocidade de corte (V_c) na potência consumida, vibração e emissão acústica

V_c (m/min)	f (mm/rotação)	a_p (mm)
160	0,3	1,0
200	0,3	1,0
250	0,3	1,0
300	0,3	1,0
400	0,3	1,0

Fonte: Produção do próprio autor

4.7.1 Tratamento dos resultados

Os valores experimentais provenientes dos sistemas de aquisição de dados, potência, emissão e vibração, bem como aqueles obtidos através da utilização do rugosímetros, rugosidade média e total, foram manipulados e tratados por meio dos softwares Microsoft Excel, Minitab e Matlab (versões trials 2017). A inserção dos dados nestes softwares seguiu o arranjo conforme Método de Taguchi e também possibilitou a análise estatística de variância, decorrente da plotagem de gráficos de efeitos principais e de interação, ademais da observação de valores significativos de P-Value menores ou iguais a 0,05 (5%) e F-Value maiores que 2, onde este último visa corroborar ou complementar a análise do primeiro.

5 Resultados

5.1 ANÁLISE DE RUGOSIDADE

5.1.1 Rugosidade média (R_a)

Por meio da utilização dos parâmetros de corte observados na Tabela 3, foram obtidas as curvas de efeitos principais (Figura 23), bem como as curvas de interação (Figura 24), as quais ambas para a rugosidade média R_a .

Os valores de P-Value e F-Value para o avanço (f), 0,244 e 1,48 respectivamente, mostram que não há significância deste parâmetro de corte, visto que $P\text{-Value} > 0,05$ e $F\text{-Value} < 2$, na sua relação com a rugosidade R_a , considerando profundidades de corte constantes.

Sendo assim, a relação teórica de dependência entre o avanço de corte e a rugosidade, dada pela Equação 3, não foi observada neste resultado. Sobre tal observação comenta-se que, segundo Machado e Silva (2004), ainda que os valores de avanço utilizados (0,3 e 0,4 mm) tenham sido menores que o raio de ponta da ferramenta (6 mm), os valores reais são acrescidos de outros fatores, entre eles a vibração. Esta vibração, conforme contribuição de Diniz, Marcondes e Coppini (2001), pode haver decorrido do valor significativo (6 mm) do raio de ponta da ferramenta e do maior atrito (entre ferramenta e peça) por ele proporcionado, visto que, para os autores, é fonte de aumento do atrito, para raios de ponta maiores, a maior área de contato entre ferramenta e peça.

Ainda sobre vibração, mediante resultados de ensaios anteriores realizados com ferramentas de corte de geometria circular, constatou-se que tal configuração de ferramenta opera com menor nível de vibrações para profundidades de corte mais altas, sendo que, como mostra a Tabela 3, para este ensaio foi utilizado 1,0 mm de profundidade de corte.

Decorrente da velocidade de corte (V_c), o valor de F-Value obtido (2,18) aponta que este parâmetro é significativo para a rugosidade R_a , (para valores constantes de profundidade de corte). Na Figura 24, observa-se a diminuição dos valores de rugosidade média decorrente do aumento da velocidade de corte. Ou seja, o melhor valor de rugosidade média foi verificado para a velocidade de corte de 200 m/min.

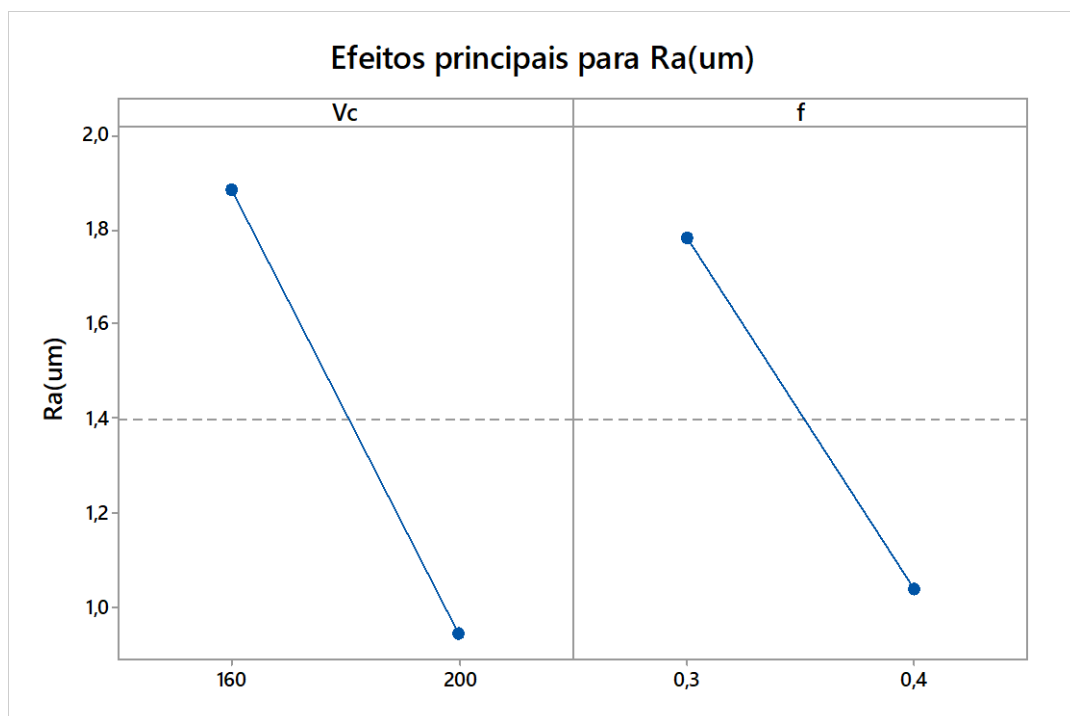
Sobre velocidade de corte e sua influência no acabamento superficial, Ferraresi (1977) diz que a rugosidade média pode beneficiada por meio de valores de velocidade de corte mais altos, a partir dos quais o R_a se torna praticamente estável.

Através de valores de P-Value e F-Value além da fronteira de determinação de significância ($P\text{-Value} < 0,05$ e $F\text{-Value} > 2$), sendo os quais 0,040 e 5,12, respectivamente, é possível dizer que a interação entre velocidade de corte (V_c) e avanço (f) fornece valores significantes em sua relação com a rugosidade R_a (Figura 24), para valores constantes de profundidade de corte.

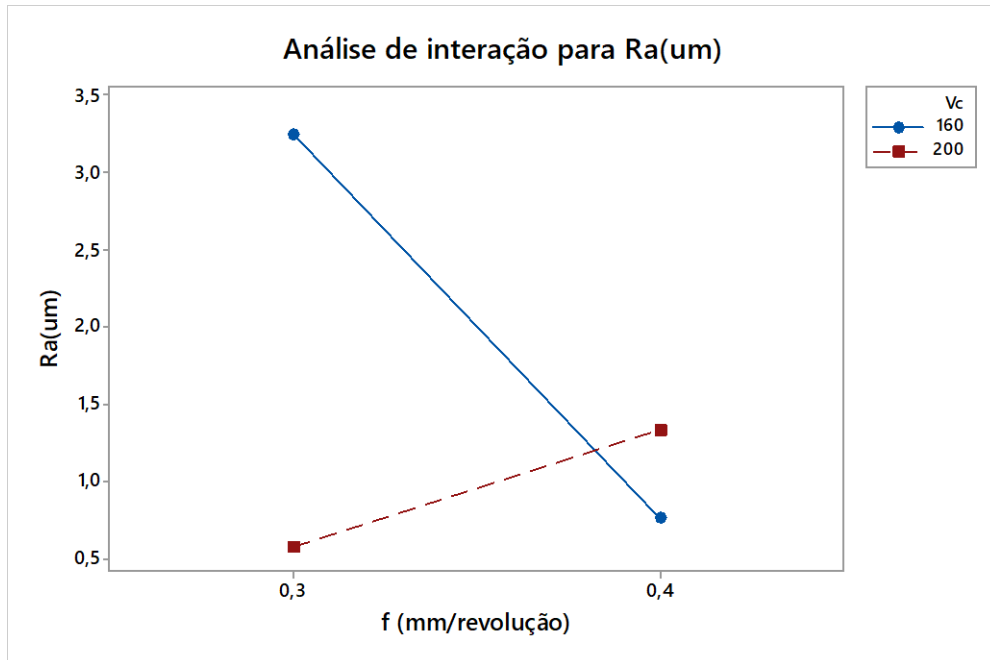
Conforme Figura 25, a melhor condição observada para a rugosidade média foi com maior valor de avanço (0,4 mm) e menor valor de velocidade de corte (160 mm/min). Esta condição não condiz com a relação dada pela Equação 3, tampouco com o que foi comentado sobre a influência da velocidade de corte.

A Figura 25 mostra os resultados obtidos para a rugosidade média na respectiva condição testada.

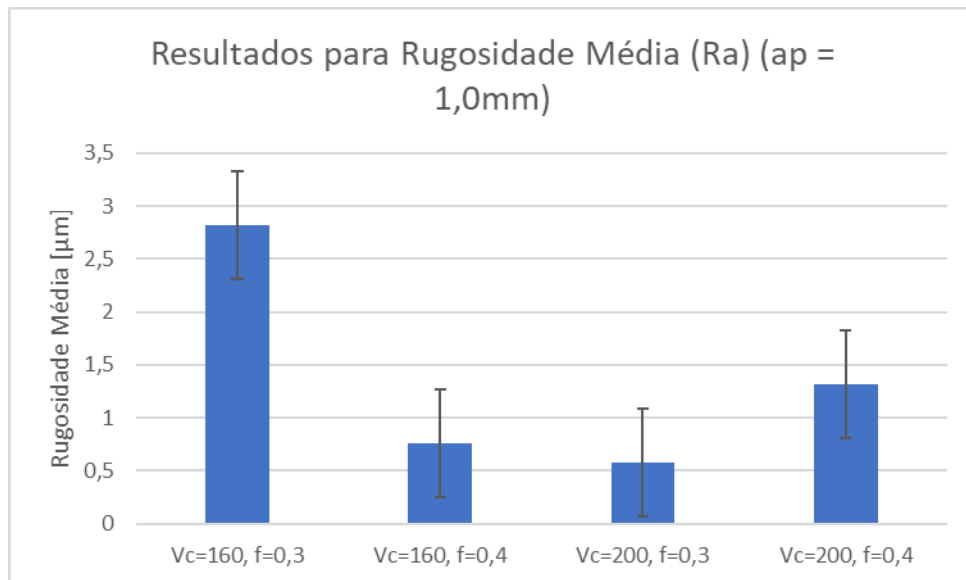
Figura 23 – Resultados de efeitos principais para a rugosidade R_a



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 24 – Curvas de interação da Rugosidade R_a 

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 25 – Gráficos da Rugosidade R_a 

Fonte: Produção do próprio autor

Por meio da utilização dos parâmetros de corte observados na Tabela 5, foram obtidas as curvas de efeitos principais (Figura 26), bem como as curvas de interação (Figura 28), as quais ambas para a rugosidade média R_a .

Os valores de P-Value e F-Value para a profundidade (a_p), 0,811 e 0,06, respectivamente, mostram que não há significância deste parâmetro de corte, visto que $P\text{-Value} > 0,05$ e $F\text{-Value} < 2$, na sua relação com a rugosidade R_a , para avanços constantes.

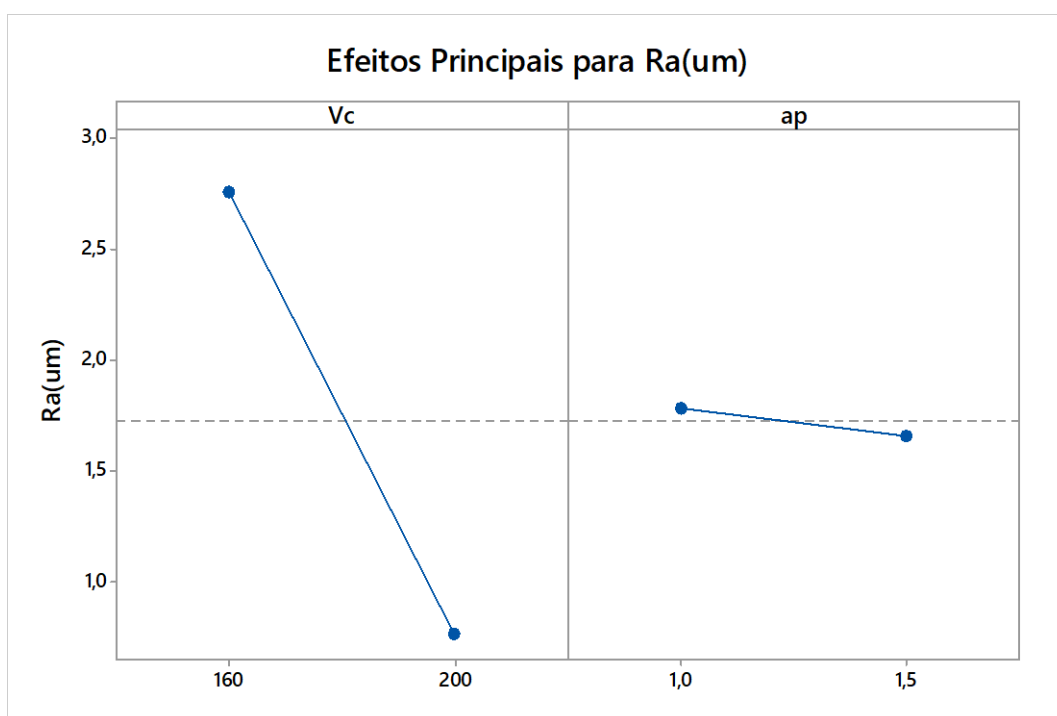
Este comportamento mostra-se de acordo com o que diz Diniz, Marcondes e Coppini (2001) sobre os parâmetros mais importantes para o acabamento superficial serem o avanço e o raio de ponta da ferramenta.

Decorrente da velocidade de corte (V_c), o valor de P-Value obtido (0,028) aponta que este parâmetro é significativo para a rugosidade R_a , para profundidades de corte constantes. Na Figura 26, observa-se diminuição dos valores de rugosidade média decorrente do aumento da velocidade de corte. Este comportamento está de acordo com o que foi mencionado anteriormente sobre a influência de velocidades de corte mais altas na condução a melhores acabamentos superficiais (FERRARESI, 1977).

Através de valores de P-Value e F-Value além da fronteira de determinação de significância, sendo os quais 0,482 e 0,52, respectivamente, é possível dizer que a interação entre velocidade de corte (V_c) e profundidade (a_p) não fornece valores significantes em sua relação com a rugosidade R_a , para avanços constantes.

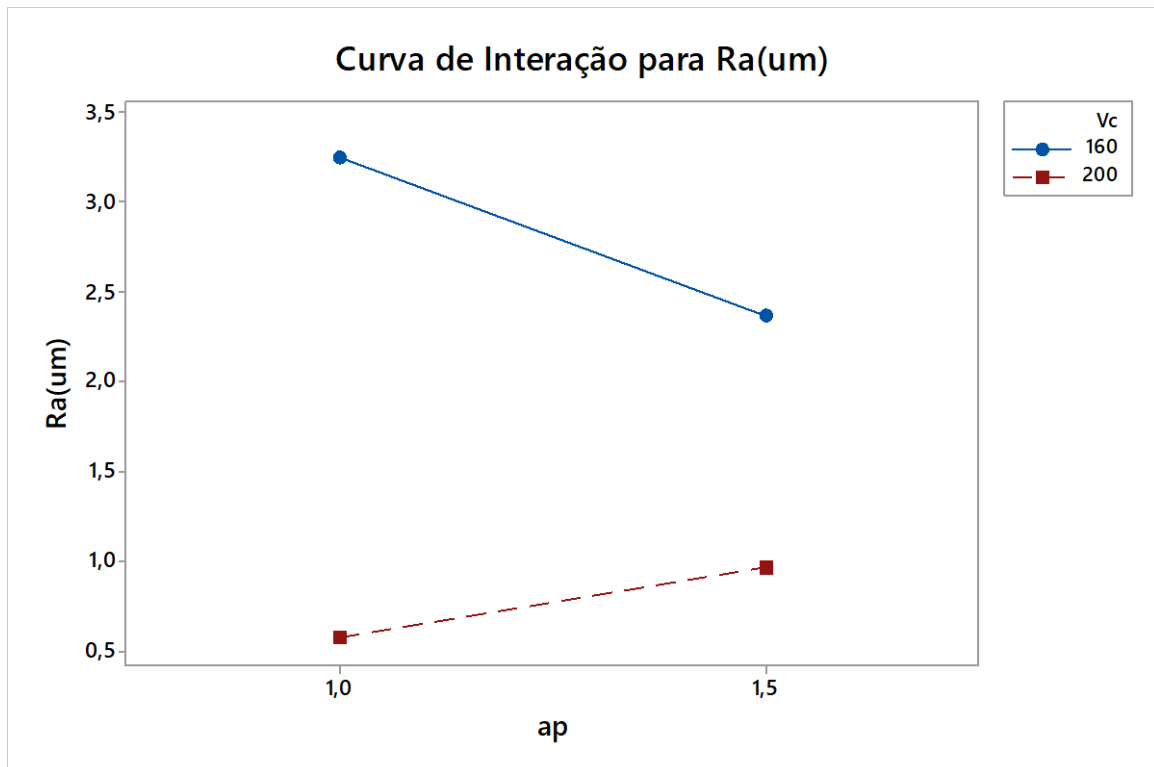
A Figura 28 mostra os resultados obtidos para a rugosidade média na respectiva condição testada.

Figura 26 – Curvas de interação da rugosidade R_a



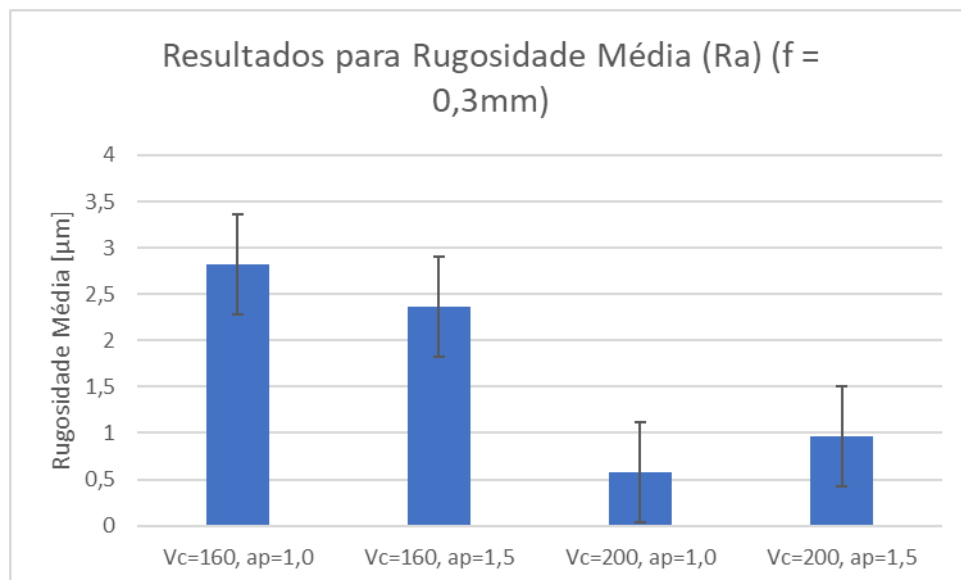
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 27 – Curvas de interação para a Rugosidade R_a



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 28 – Resultados de efeitos principais para a rugosidade R_a



Fonte: Produção do próprio autor

Por meio da utilização dos parâmetros de corte observados na Tabela 8, foram obtidas as curvas de efeitos principais (Figura 29), bem como as curvas de interação (Figura 30), as quais ambas para a rugosidade R_a .

O valor de P-Value para o avanço (f), 0,01, mostra que há significância deste parâmetro ($P\text{-Value} > 0,05$) na sua relação com a rugosidade R_a , bem como se pode observar através da Equação 3, com o aumento da rugosidade média decorrente do aumento do avanço, grandezas diretamente proporcionais mediante análise da Equação 3.

Decorrente da profundidade (ap), o valor de F-Value obtido (3,28) aponta que este fator é sim significativo para a rugosidade R_a .

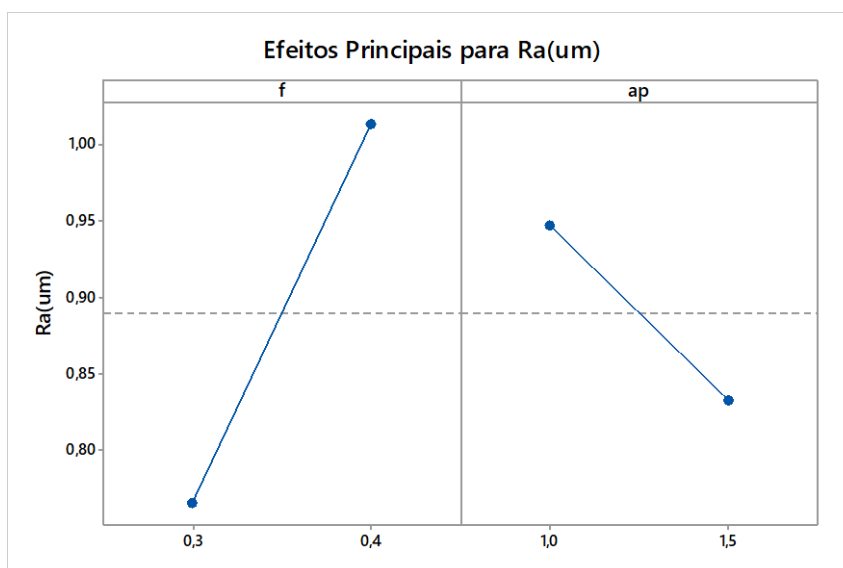
Bem como comentado anteriormente, valores melhores de acabamento superficial podem ser obtidos para valores maiores de profundidade de corte, desde que, com base em experimentos preliminarmente realizados, a ferramenta de geometria circular em questão sofre com menor nível de vibração sob a condição de maiores valores de profundidade de corte (característico aos processos de desbaste).

Através de valores de P-Value e F-Value muito além da fronteira ($P\text{-Value} < 0,05$ e $F\text{-Value} > 2$), sendo os quais 0 e 62,53, respectivamente, é possível dizer que a interação entre velocidade de corte (V_c) e avanço (f) fornece valores muito significantes em sua relação com a rugosidade R_a .

Assim, na Figura 30 pode-se observar que a melhor condição de rugosidade média ocorre para $f=0,4$ mm e $ap=1,5$ mm, ou seja, o segundo parâmetro teve maior influência na condução ao melhor cenário de rugosidade média.

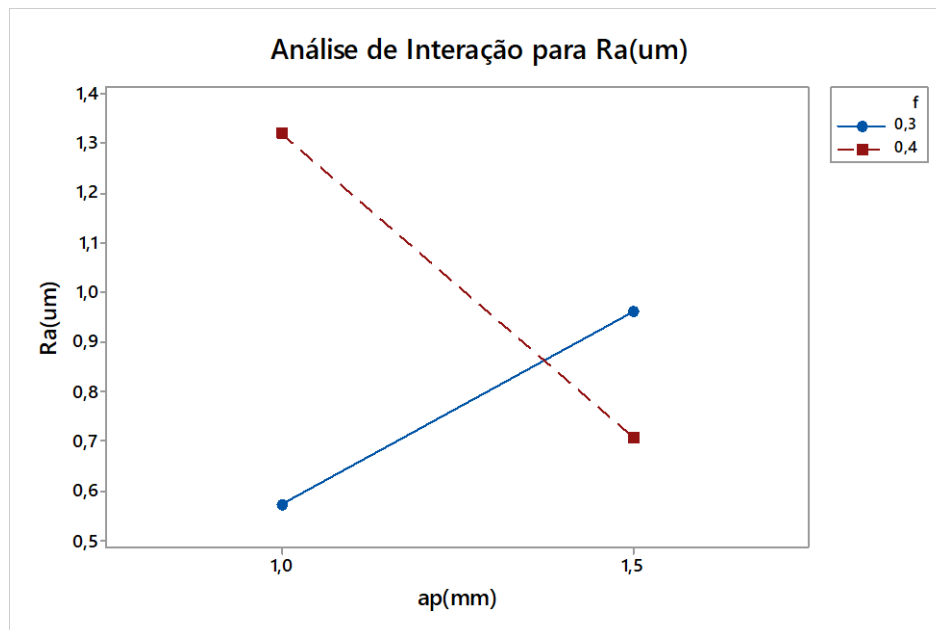
A Figura 31 mostra os resultados obtidos para a rugosidade média na respectiva condição testada.

Figura 29 – Curvas de efeitos principais para a rugosidade R_a



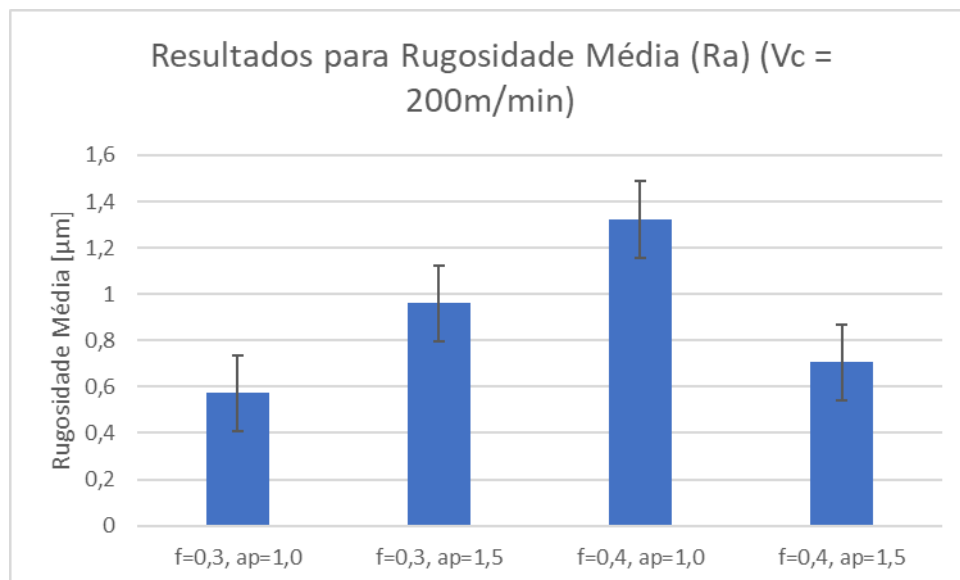
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 30 – Curvas de interação para a Rugosidade R_a



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 31 – Resultados para a Rugosidade R_a



Fonte: Produção do próprio autor

5.1.2 Rugosidade total (R_t)

Por meio da utilização dos parâmetros de corte observados na Tabela 3, foram obtidas as curvas de efeitos principais (Figura 32), bem como as curvas de interação (Figura 34), as quais ambas para a rugosidade total R_t .

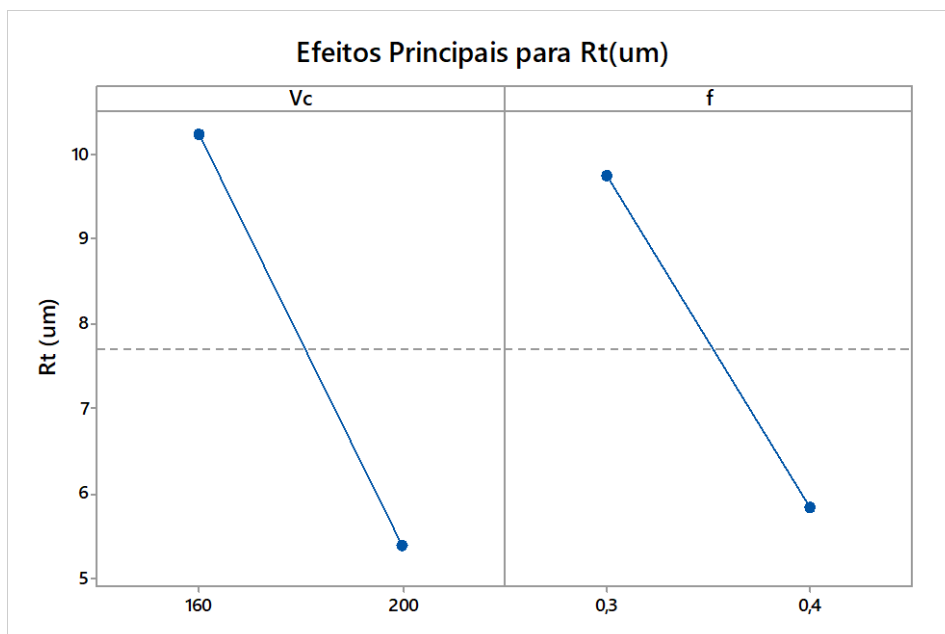
Os valores de avanço (f) se mostraram pouco significantes para a rugosidade R_t (P-Value = 0,212 e F-Value = 1,71). A partir de tal resultado para a rugosidade total, não se pode verificar a relação teórica dada pela Equação 4, pela mesma fundamentação realizada anteriormente para a mesma condição testada de rugosidade média.

Por outro lado, através de um F-Value de 2,45; pode-se dizer que há significância nos valores de velocidade de corte (V_c) para a rugosidade R_t (para valores constantes de profundidade de corte). O aumento da velocidade de corte conduziu a diminuição da rugosidade total observada.

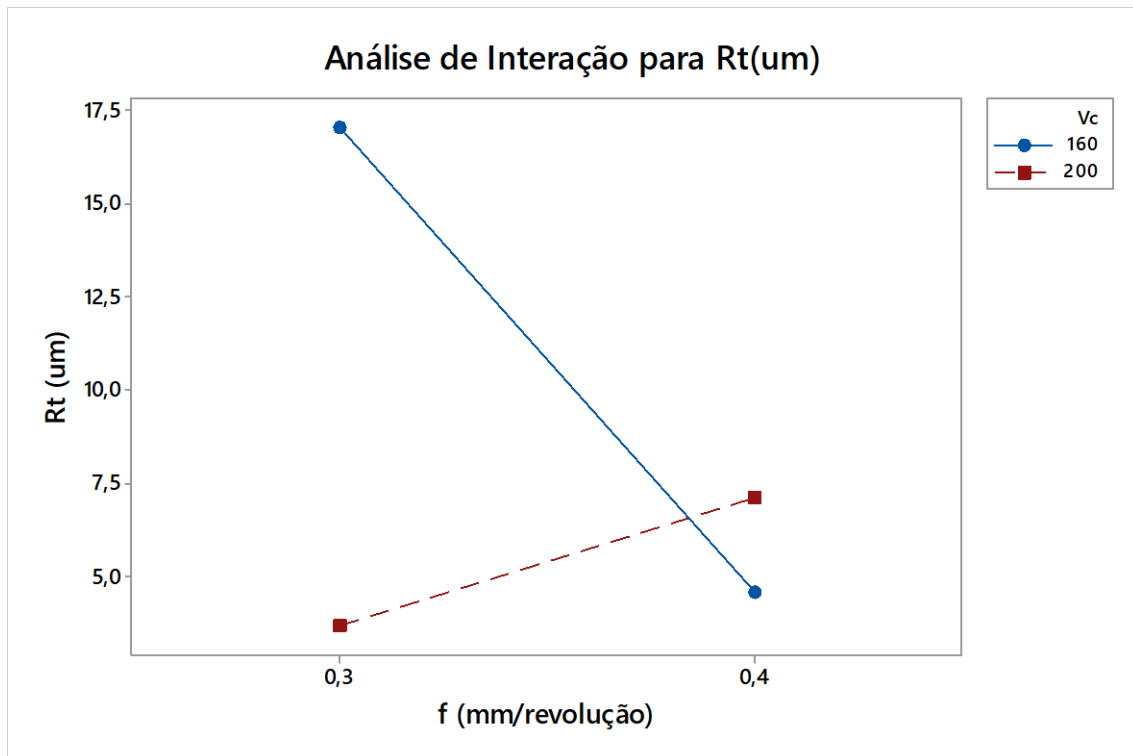
De maneira análoga às curvas verificadas para a rugosidade média R_a , através de valores de P-Value e F-Value de 0,038 e 5,26; respectivamente, a interação entre os parâmetros de velocidade de corte (V_c) e avanço (f) fornece valores significantes em sua relação com a rugosidade R_t (para valores constantes de profundidade de corte).

A Figura 35 mostra os resultados obtidos para a rugosidade total na respectiva condição testada.

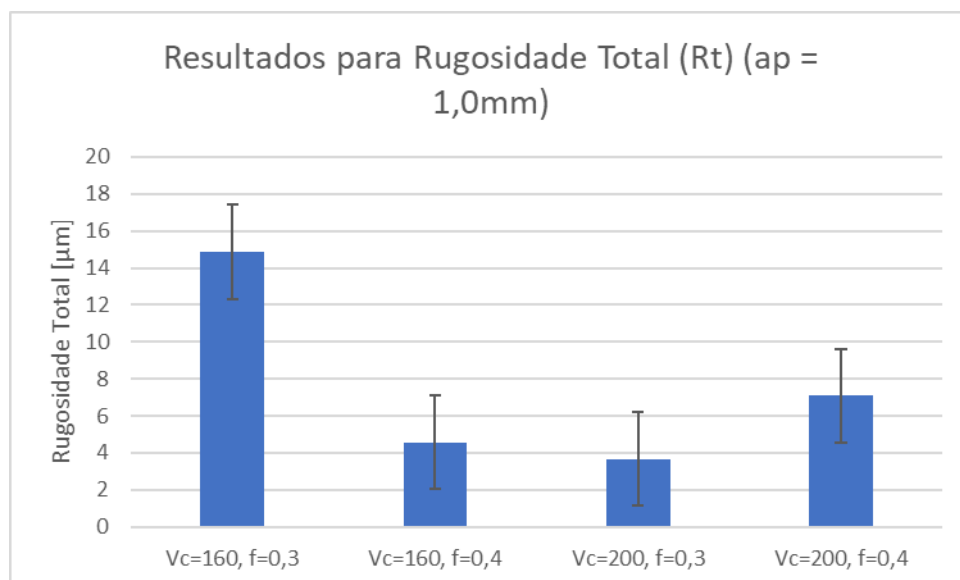
Figura 32 – Curvas de efeitos principais para a rugosidade R_t



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 33 – Curvas de interação para a Rugosidade R_t 

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 34 – Resultados para a Rugosidade R_t 

Fonte: Produção do próprio autor

Por meio da utilização dos parâmetros de corte observados na Tabela 5, foram obtidas as curvas de efeitos principais (Figura 35), bem como as curvas de interação (Figura 36), as quais ambas para a rugosidade total R_t .

Os valores de profundidade (a_p) se mostraram pouco significantes para a rugosidade R_t (P-Value = 0,964 e F-Value = 0), para valores constantes de avanço.

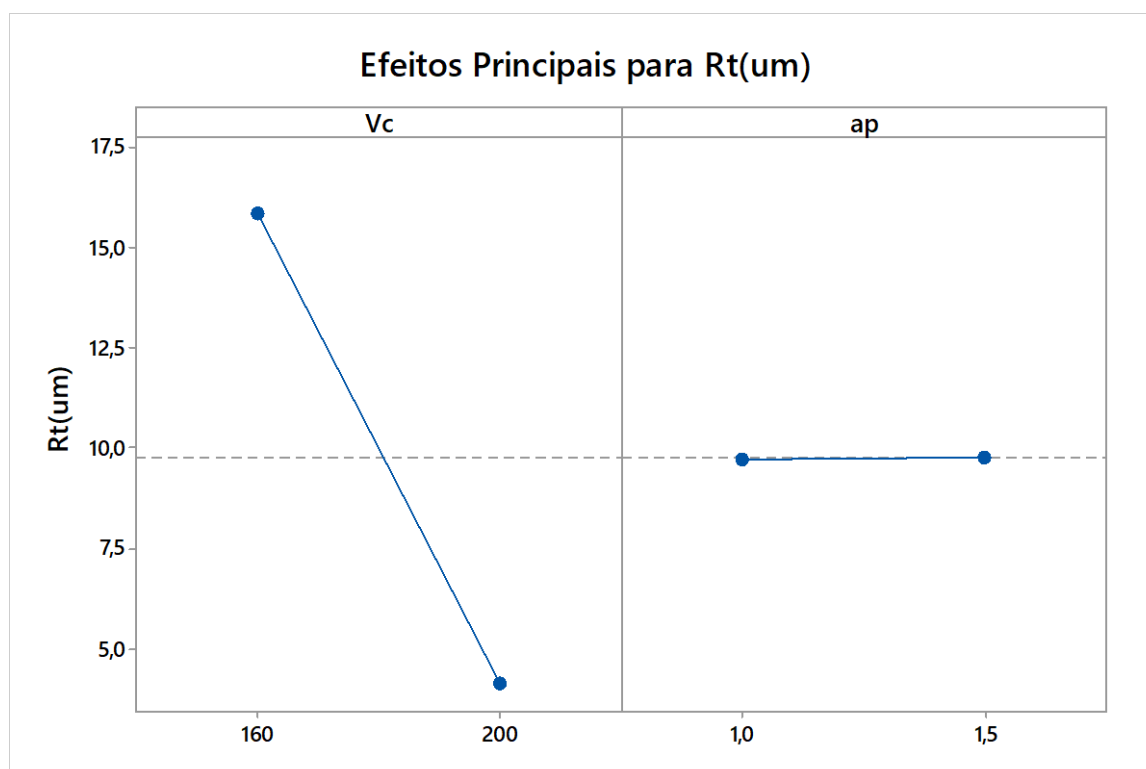
Por outro lado, através de um P-Value de 0,040 e F-Value de 5,15, pode-se dizer que há significância nos valores de velocidade de corte (V_c) para a rugosidade R_t para valores constantes de avanço.

De maneira análoga ao observado no item anterior de mesmas condições testadas com relação à rugosidade média R_a , através de valores de P-Value e F-Value de 0,818 e 0,06; respectivamente, a interação entre os parâmetros de velocidade de corte (V_c) e profundidade (a_p) não fornece valores significantes em sua relação com a rugosidade R_t , para valores constantes de avanço.

Para estes resultados de rugosidade total, estendem-se a fundamentação dada a mesma condição testada com relação à rugosidade média.

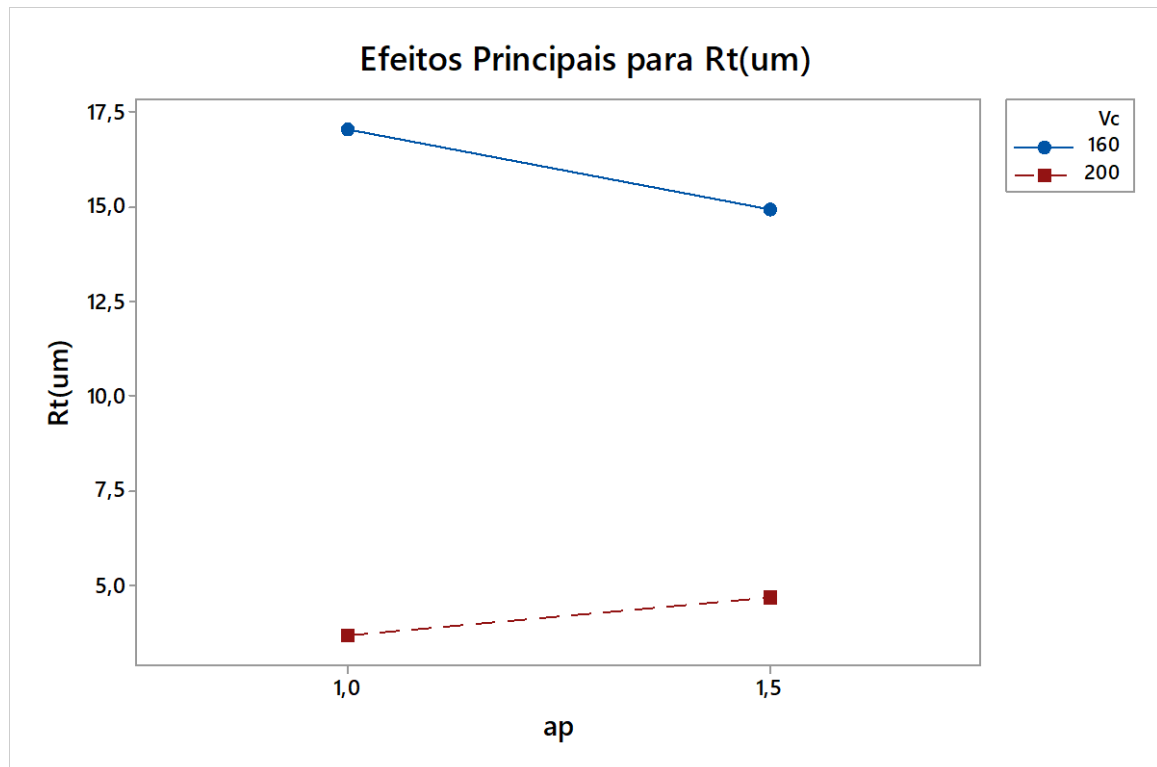
A Figura 37 mostra os resultados obtidos para a rugosidade total na respectiva condição testada.

Figura 35 – Curvas de efeitos principais para a rugosidade R_t



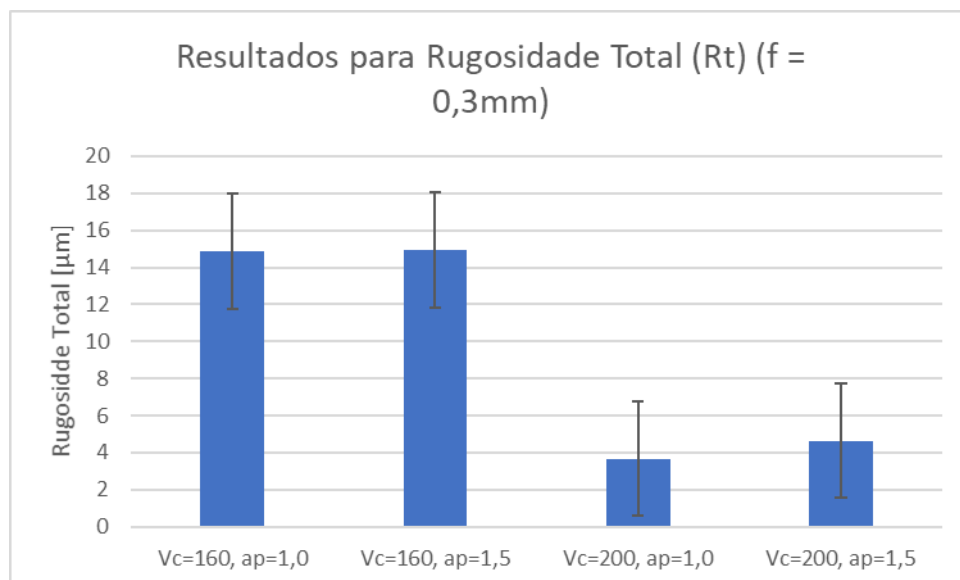
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 36 – Curvas de interação para a Rugosidade R_t



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 37 – Resultados para a Rugosidade R_t



Fonte: Produção do próprio autor

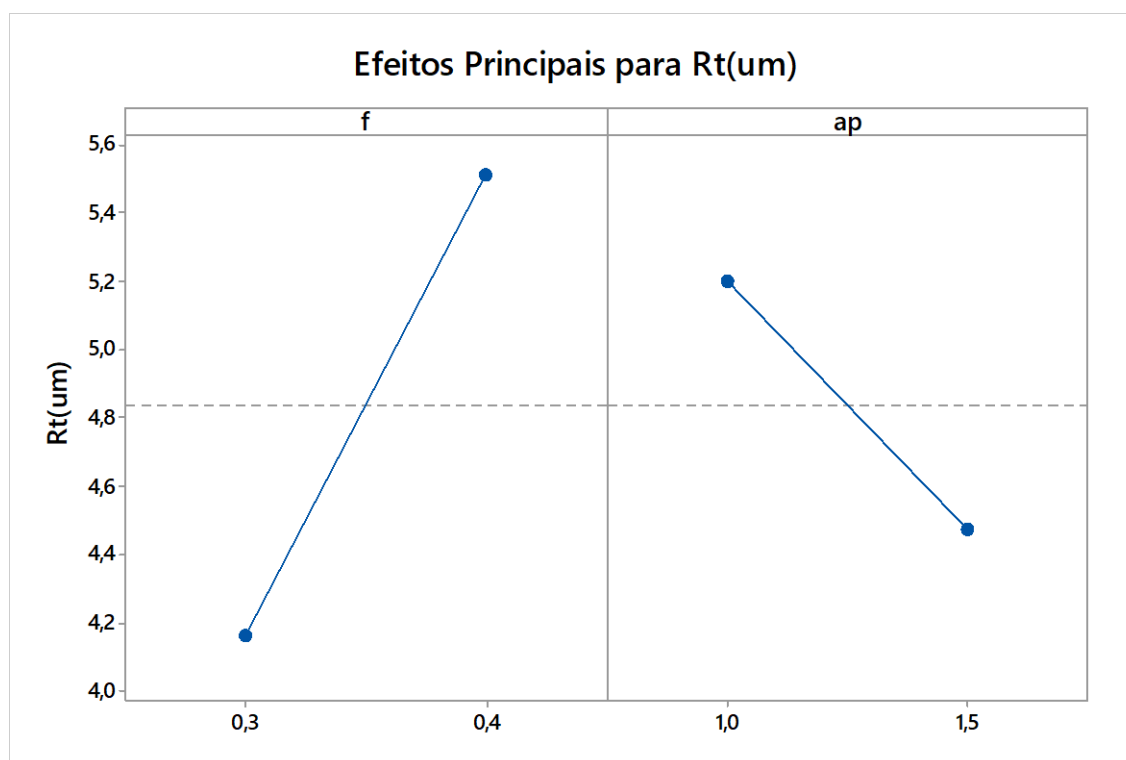
Por meio da utilização dos parâmetros de corte observados na Tabela 8, foram obtidas as curvas de efeitos principais (Figura 38), bem como as curvas de interação (Figura 40), as quais ambas para a rugosidade total R_t .

Os valores de P-Value para o avanço (f) e a profundidade (a_p), assim como para a interação entre ambos, apontaram a ocorrência de significância destes parâmetros para a rugosidade total R_t , para valores constantes de velocidade de corte. Tais valores foram de 0,0015 e 0; respectivamente.

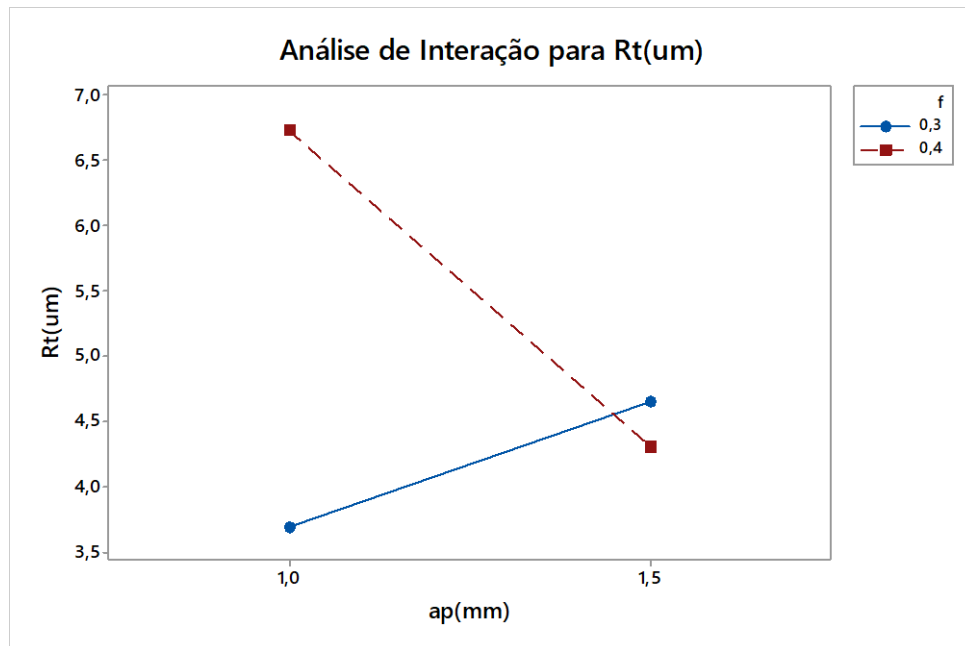
Rugosidade média e total compartilham hipóteses levantadas sobre o comportamento de suas respectivas curvas sob as mesmas condições testadas.

A Figura 40 mostra os resultados obtidos para a rugosidade total na respectiva condição testada.

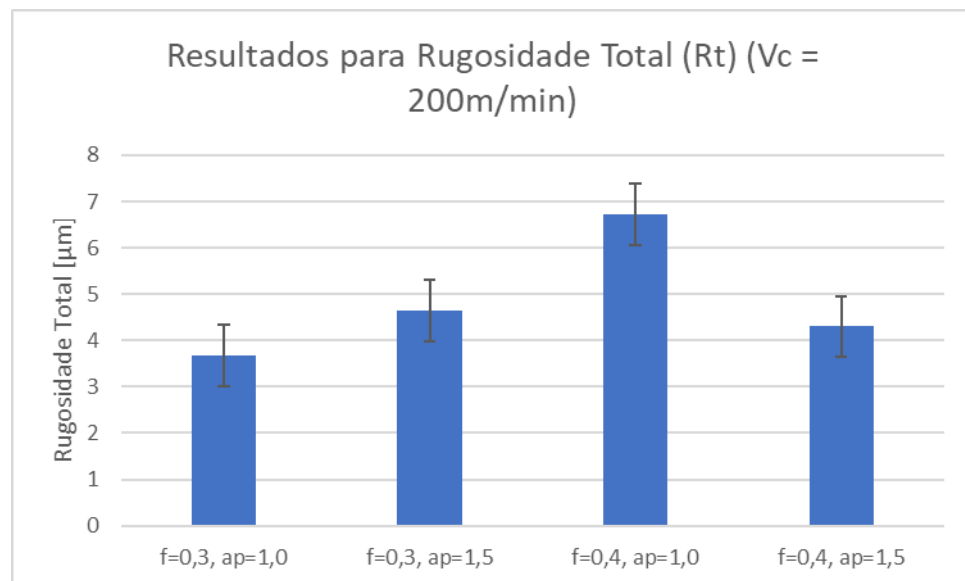
Figura 38 – Curvas de efeitos principais para a rugosidade R_t



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 39 – Curvas de interação para a Rugosidade R_t 

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 40 – Resultados de interação para a Rugosidade R_t 

Fonte: Produção do próprio autor

5.2 ANÁLISE DE POTÊNCIA

Valendo-se dos parâmetros de corte observados na Tabela 4, foram obtidas as curvas de efeitos principais da velocidade de corte (V_c) e do avanço (f) (Figura 41), bem como as

curvas de interação (Figura 42) entre ambos parâmetros, todas quais para a potência consumida e para valores constantes de profundidade de corte.

Os valores de P-Value e F-Value para a velocidade de corte (V_c), 0,337 e 1,30; respectivamente, mostram que os valores deste parâmetro de corte não são significantes para a sua relação com a potência consumida.

Este resultado não mostra a relação teórica entre potência de corte e velocidade de corte dada pela Equação 5.

Já o avanço (f) é apontado como parâmetro significativo para a potência consumida através do valor de P-Value igual a 0,001, fornecido pela análise estatística de variância.

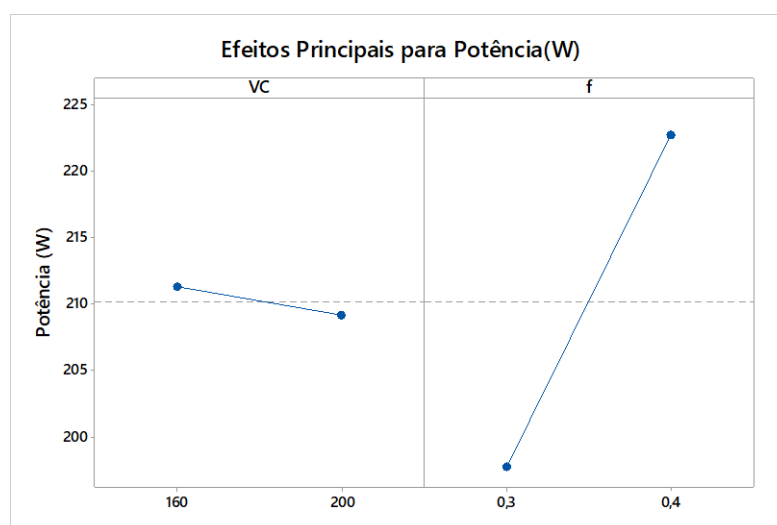
Na Figura vê-se que o aumento dos valores de avanço (f) conduziu ao aumento dos valores de potência elétrica consumida. Segundo Silva (2010), quanto maior o avanço maior a potência consumida pelo motor, o que também diz a Equação 6.

A interação entre ambos parâmetros, velocidade de corte (V_c) e avanço (f), apresenta-se significativa por meio de P-Value valendo 0,039.

Na Figura 41 observa-se que para valores de avanço (f) próximo a 0,3mm/volta, a maior velocidade ocasionou maiores valores de potência consumida, tal comportamento se inverteu com relação a velocidade para valores de avanço próximos a 0,4mm/volta. A melhor condição de potência consumida está para o menor avanço (0,3 mm) e menor velocidade de corte (160 m/min), o que era esperado.

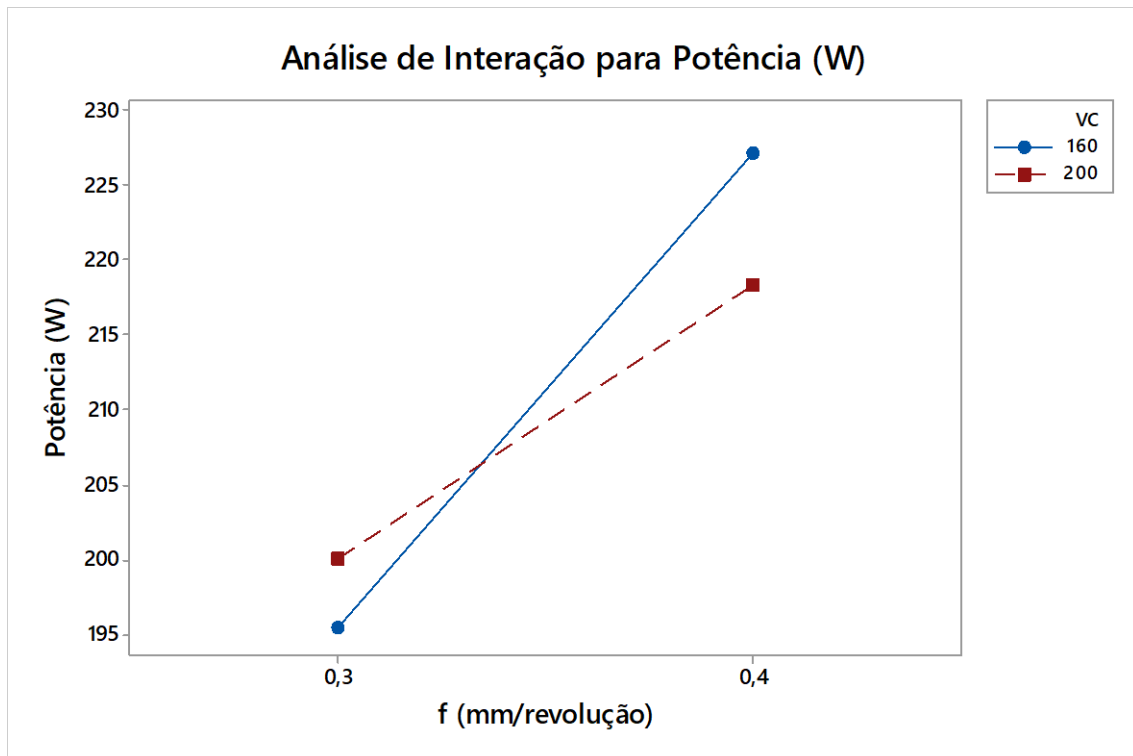
A Figura 43 mostra os resultados obtidos para a potência consumida na respectiva condição testada.

Figura 41 – Curvas de efeitos principais para a potência consumida.



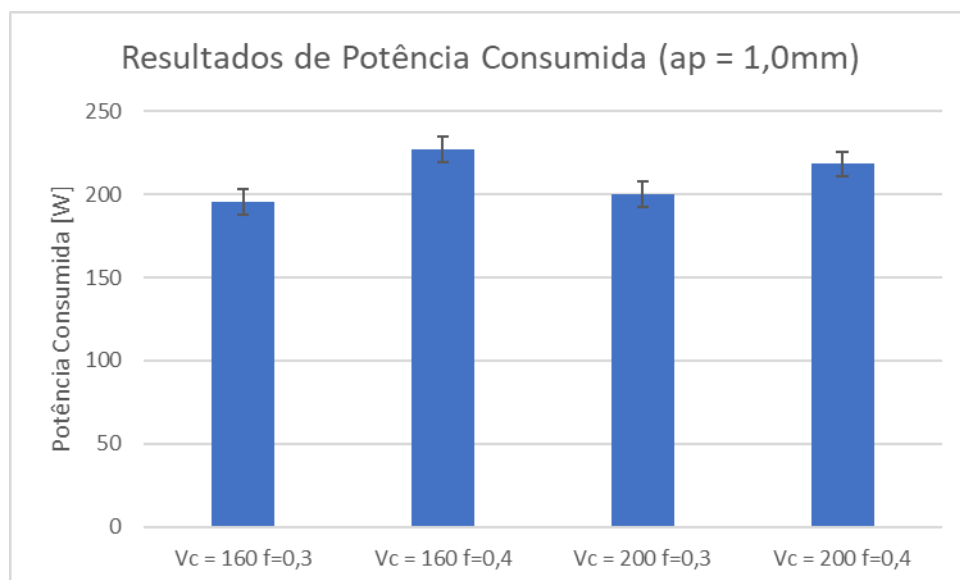
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 42 – Curvas de interação para a potência consumida.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 43 – Resultados para a potência consumida.



Fonte: Produção do próprio autor

Utilizaram-se os parâmetros de corte observados na Tabela 6 e, por meio deles, foram obtidas as curvas de efeitos principais (Figura 44), bem como as curvas de interação (Figura 45), as quais ambas para a potência consumida, para valores constantes de avanço.

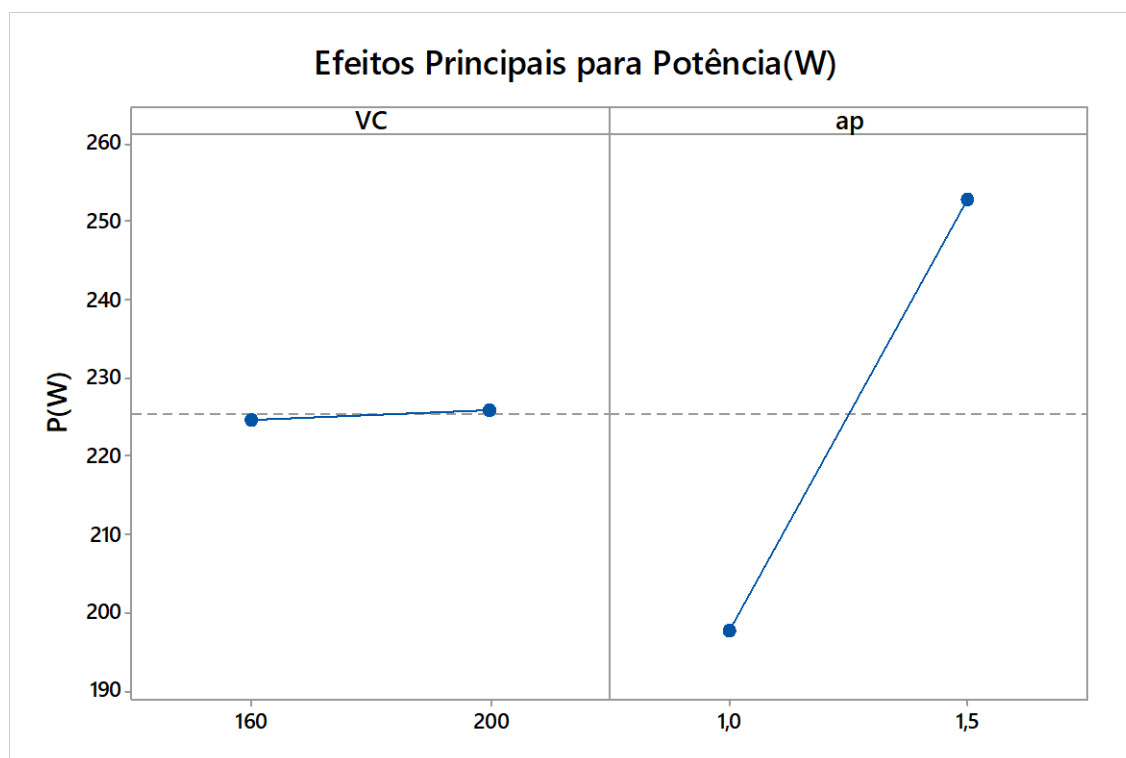
Os valores de P-Value e F-Value para a velocidade de corte (V_c), 0,295 e 1,60, respectivamente, mostraram que não há significância para a potência consumida, em detrimento do que sugere a Equação 5.

Já a profundidade de corte (a_p), assim como a interação entre esta e a velocidade de corte, são apontadas por seus valores de P-Value (0,00 e 0,050) como parâmetros significantes para a potência consumida. Um valor de F-Value igual a 10,10 corrobora a significância da interação citada.

O aumento dos valores de profundidade de corte conduziu a potência elétrica consumida a ter os seus valores aumentados, de acordo com relação dada pela Equação 6.

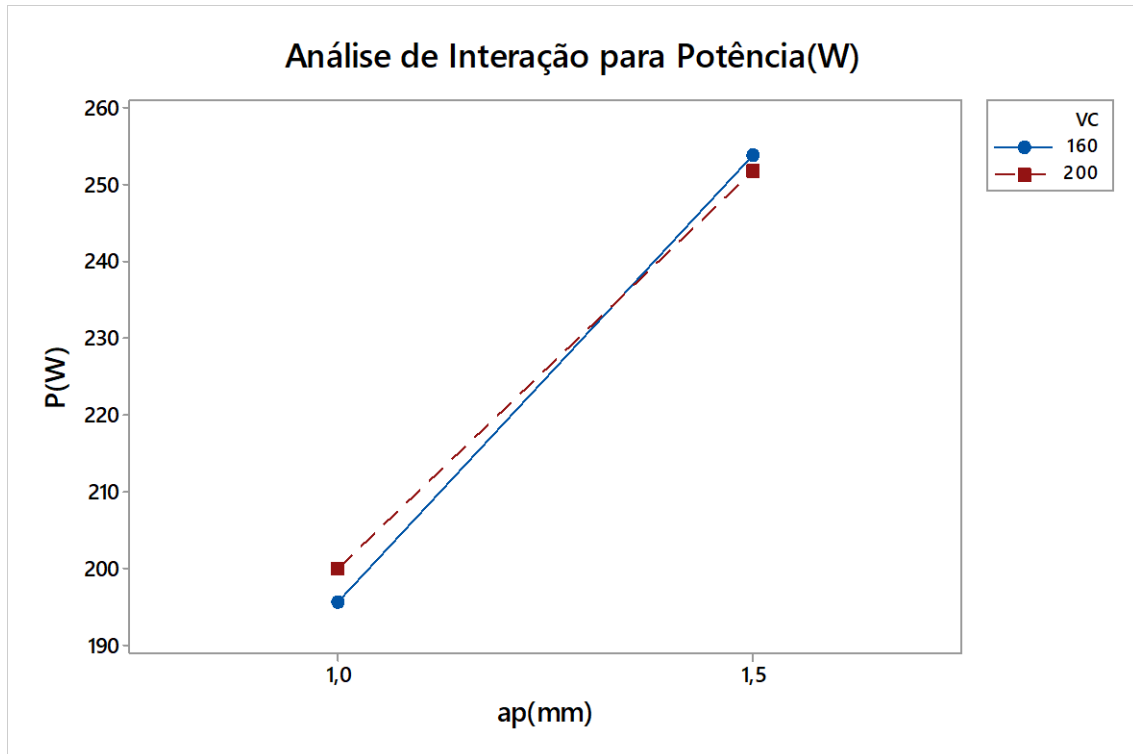
Na Figura 44 vê-se que cada curva para cada uma das duas velocidades de corte referenciadas possui comportamento e tendência muito próximos, com a menor potência consumida na menor velocidade. A Figura 46 mostra os resultados obtidos para a potência consumida na respectiva condição testada.

Figura 44 – Curvas de efeitos principais para a potência consumida,



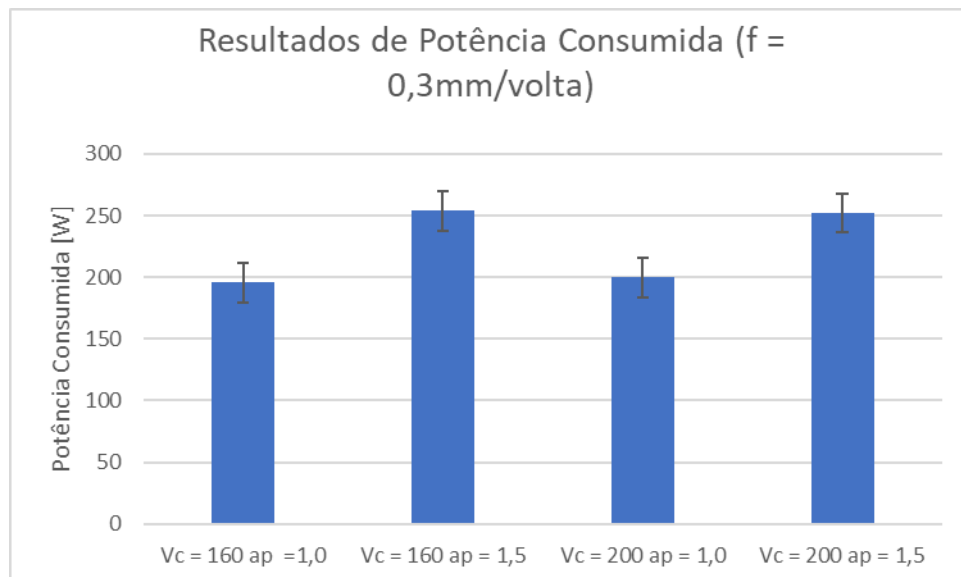
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 45 – Curvas de interação para a potência consumida.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 46 – Resultados para a potência consumida.



Fonte: Produção do próprio autor

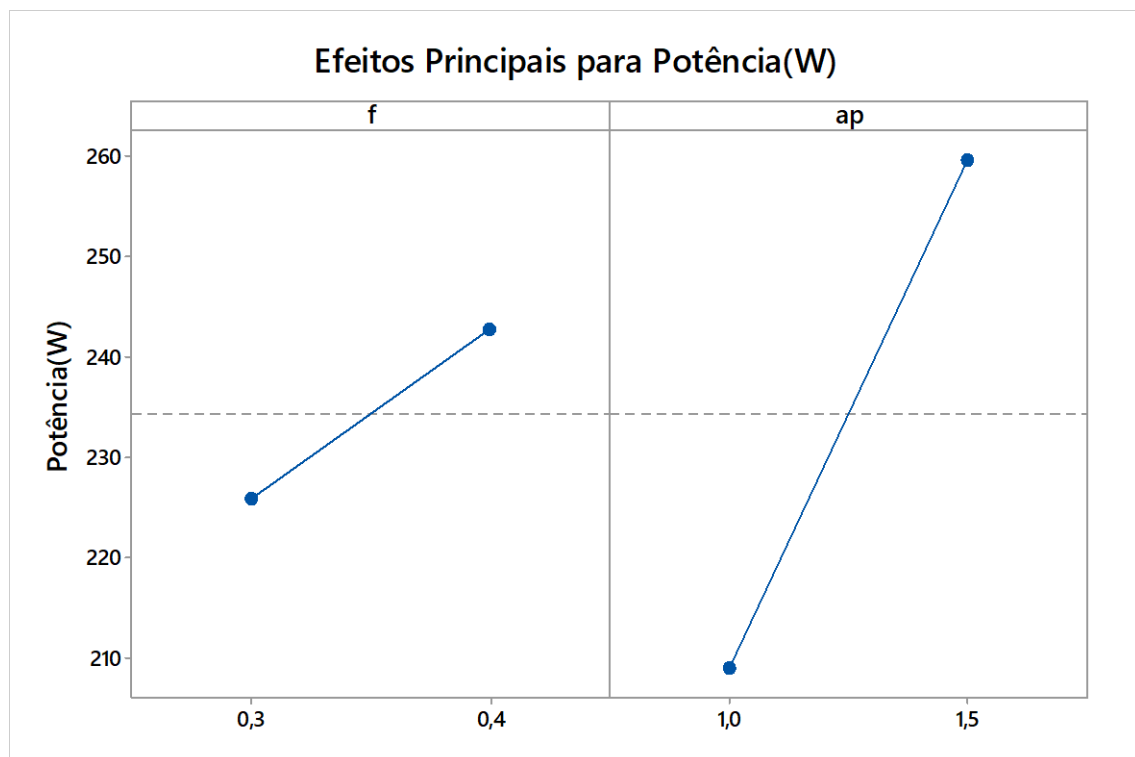
Através dos parâmetros de corte observados na Tabela 8, foram obtidas as curvas de efeitos principais (Figura 47), bem como as curvas de interação (Figura 48), as quais ambas para a potência consumida, para valores constantes de velocidade de corte.

Os valores de P-Value para o avanço (f) e a profundidade (a_p) foram de 0,004 e 0; respectivamente, mostrando-se, portanto, determinantes para a significância destes parâmetros de corte para a potência consumida. As curvas de potência elétrica consumida em função dos parâmetros de avanço e profundidade de corte mostrou-se crescente, ou seja, o aumento dos valores de ambos proporcionou o aumento da potência, conforme sugere Equação 6.

O mesmo não ocorreu com a interação entre ambos, avanço (f) e a profundidade (a_p), da qual adveio valores de P-Value e F-Value iguais a 0,510 e 0,56, respectivamente.

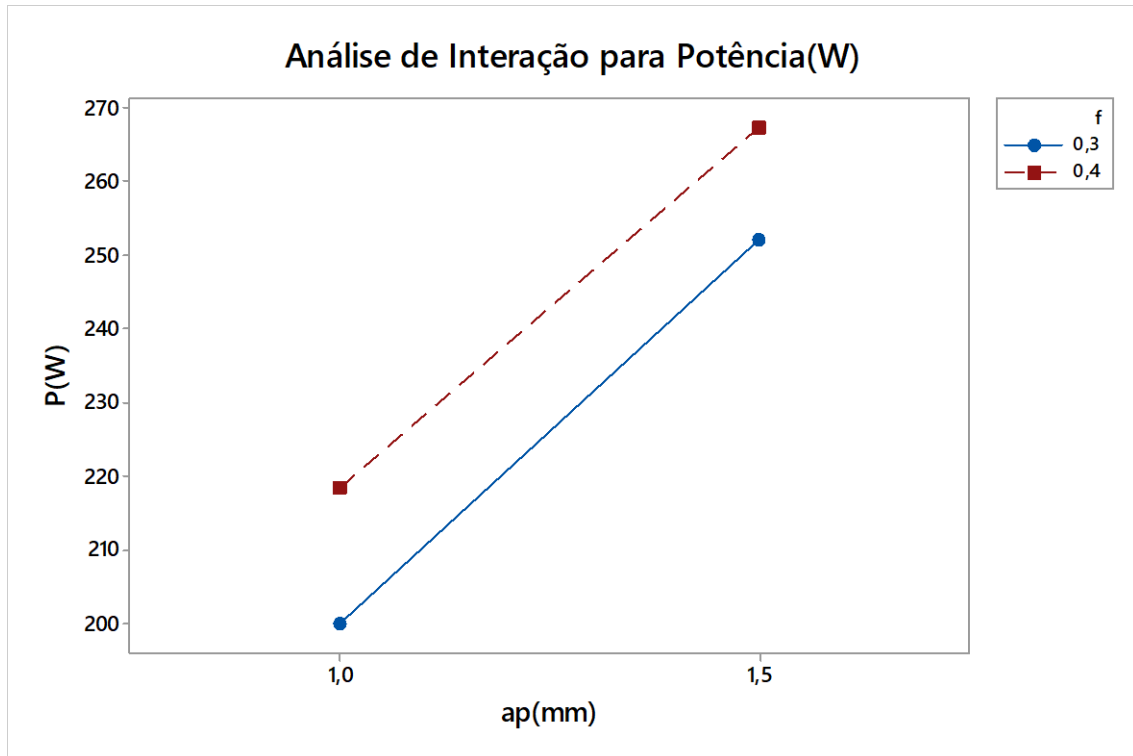
A Figura 49 mostra os resultados obtidos para a potência consumida na respectiva condição testada.

Figura 47 – Curvas de efeitos principais para a potência consumida,



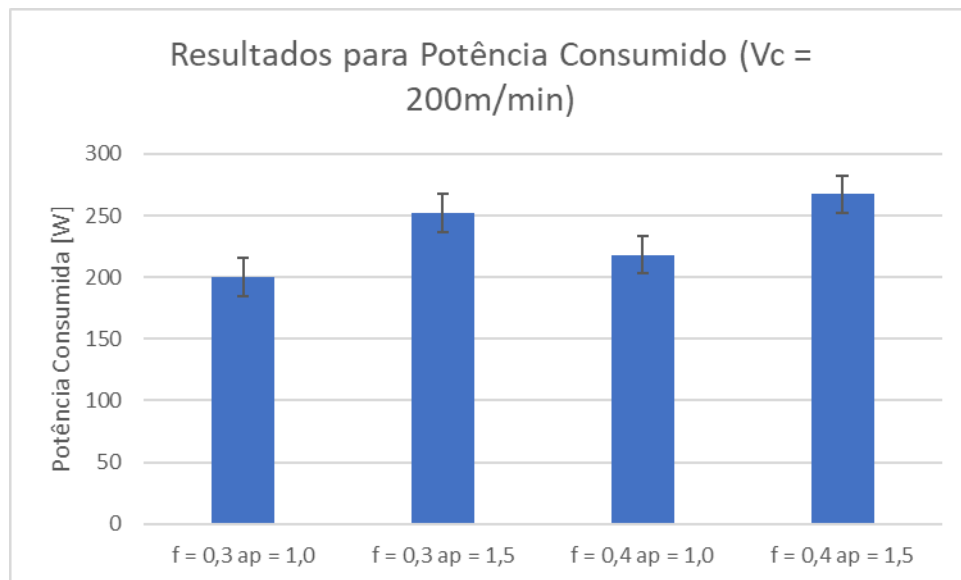
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 48 – Curvas de interação para a potência consumida.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 49 – Resultados para a potência consumida.



Fonte: Produção do próprio autor

5.3 ANÁLISE DE EMISSÃO ACÚSTICA

Valendo-se dos parâmetros de corte observados na Tabela 4, obtiveram-se as curvas dos efeitos principais da velocidade de corte (V_c) e do avanço (f) (Figura 50), bem como as curvas de interação entre ambos fatores (Figura 51), para a emissão acústica.

O valor de P-Value para a velocidade de corte (V_c) (0,025) mostra que há significância dos valores deste parâmetro de corte na análise de emissão acústica. Este resultado da análise de variância pode ser visto através do comportamento da curva na Figura 50, na qual há considerável inclinação.

Desta maneira, observa-se uma diminuição representativa dos valores de emissão acústica para um aumento na velocidade de corte. Segundo Pigari (1995), a velocidade de corte tem-se mostrado como o parâmetro que mais influencia a energia do sinal de emissão acústica, no entanto, a relação entre velocidade de corte e emissão acústica é praticamente uma função linear crescente. Tal comportamento não foi observado na Figura 51 e pode estar passível de decorrer de outros fatores.

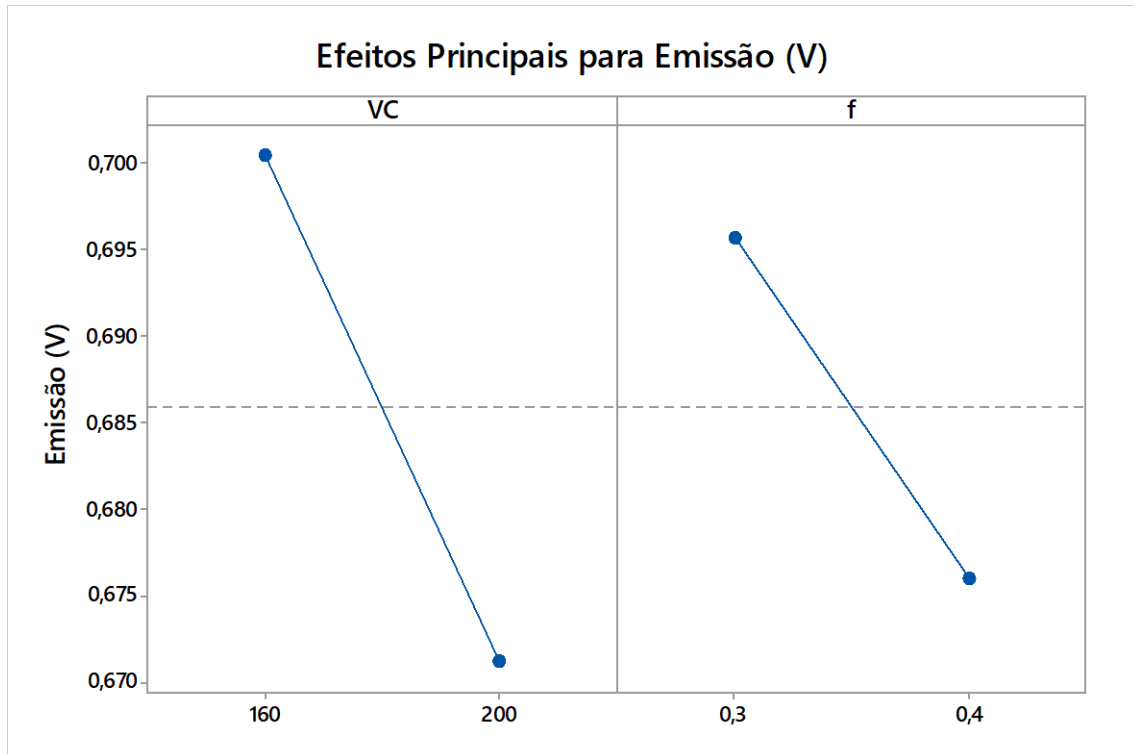
O avanço (f) também se mostrou significativo para a emissão acústica, por meio do F-Value maior que 2, igual a 8,06. A inclinação da respectiva curva, linear decrescente, confirma o resultado advindo da análise estatística.

Acerca da relação entre o avanço (f) e a emissão acústica, Pigari (1995) diz que o crescimento do primeiro nem sempre conduz o segundo a um idêntico comportamento.

Nota-se que a interação entre a velocidade de corte (V_c) e o avanço (f) não é apontada como significativa para a emissão acústica, através dos valores de P-Value e F-Value iguais a 0,256 e 1,96, respectivamente.

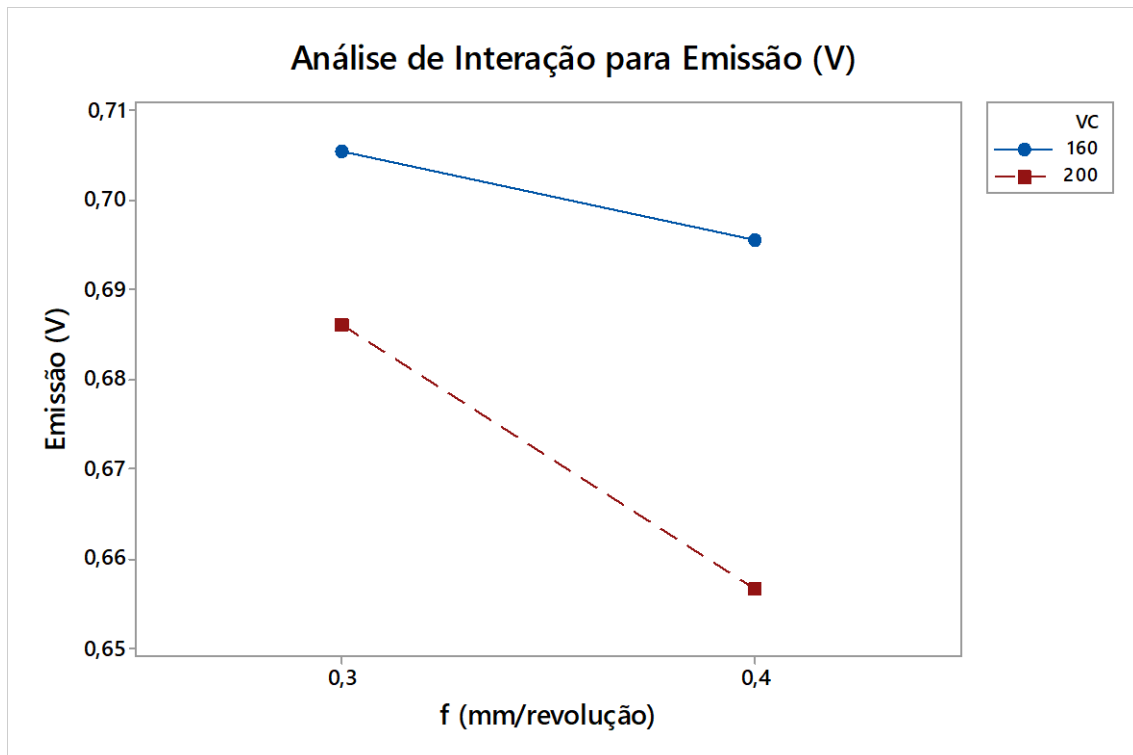
A Figura 52 mostra os resultados obtidos para a emissão acústica na respectiva condição testada.

Figura 50 – Curvas de efeitos principais para a emissão acústica



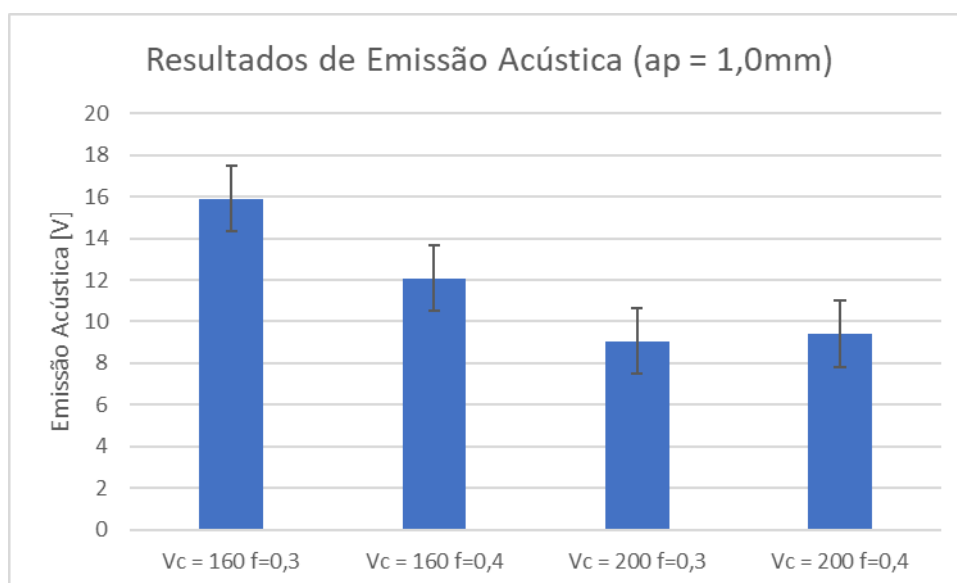
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 51 – Curvas de interação para a emissão acústica.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 52 – Resultados para a emissão acústica.



Fonte: Produção do próprio autor

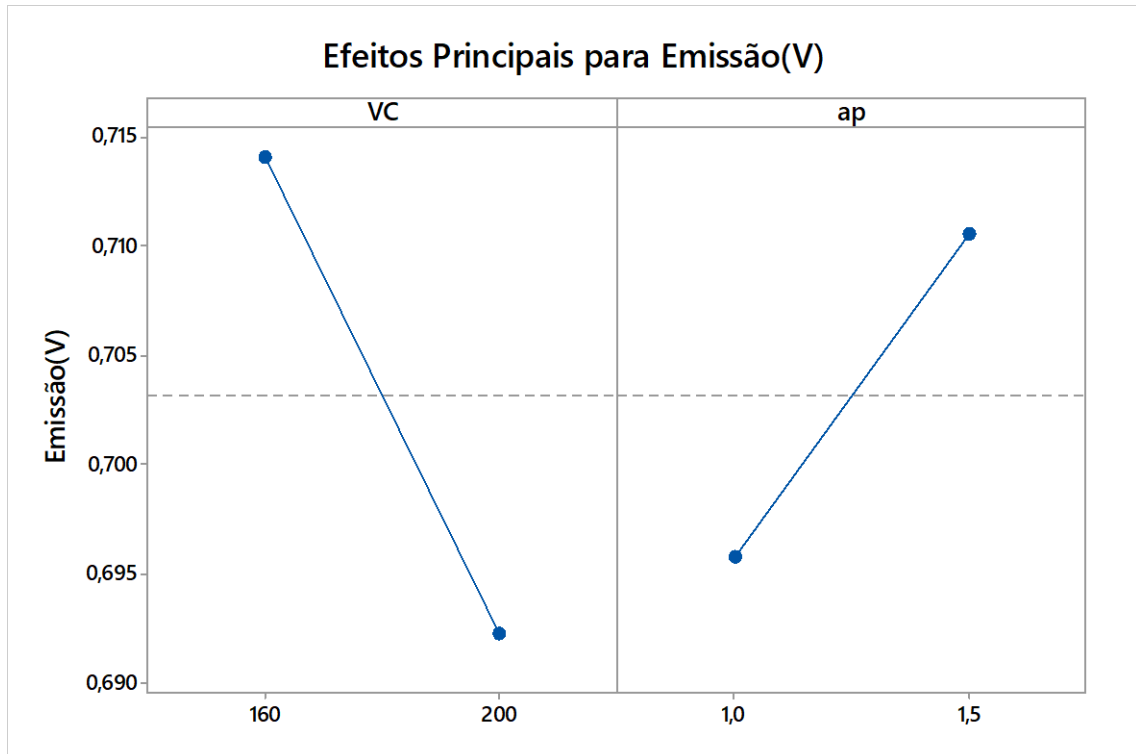
Utilizaram-se os parâmetros de corte observados na Tabela 6 e, por meio deles, foram obtidas as curvas dos efeitos principais da velocidade de corte (V_c) e profundidade (a_p) (Figura 53), bem como as curvas de interação entre ambos parâmetros (Figura 54), para a emissão acústica.

Os valores de P-Value e F-Value resultantes da análise de variância indicaram uma não significância da profundidade de corte (a_p) (0,378 e 1,07, respectivamente) e da interação entre esta e a velocidade de corte (V_c) (0,885 e 0,02) para a emissão acústica.

Com relação a velocidade de corte (V_c), tal parâmetro é apontado pela análise estatística como passível de significância através de um valor de F-Value igual a 2,32, com melhores resultados de emissão acústica para a maior velocidade.

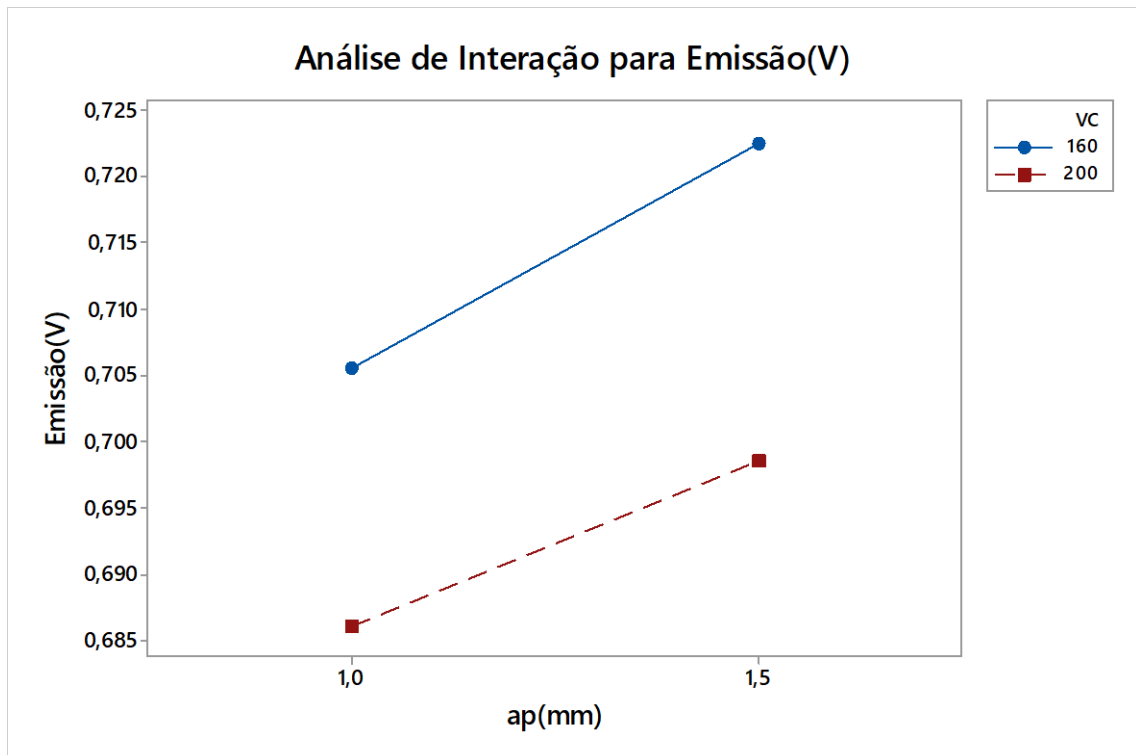
A Figura 55 mostra os resultados obtidos para a emissão acústica na respectiva condição testada.

Figura 53 – Curvas de efeitos principais para a emissão acústica



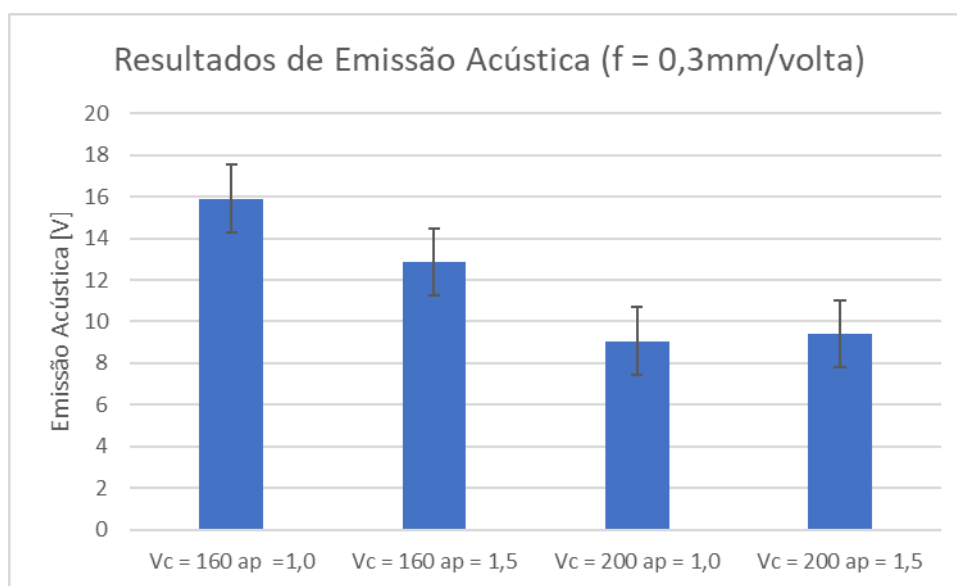
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 54 – Curvas de interação para a emissão acústica



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 55 – Resultados para a emissão acústica



Fonte: Produção do próprio autor

Através dos parâmetros de corte observados na Tabela 8, foram obtidas as curvas dos efeitos principais do avanço (f) e da profundidade (a_p) (Figura 56), bem como as curvas de interação entre ambos parâmetros (Figura 57), as quais para a emissão acústica.

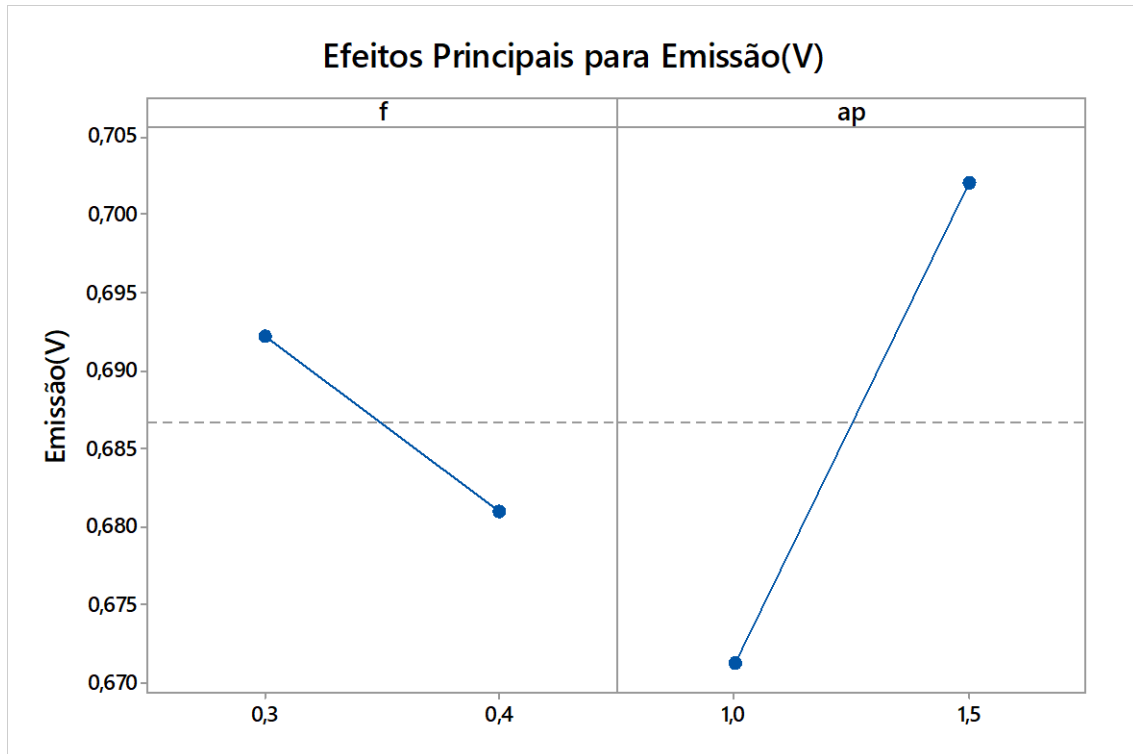
Os parâmetros de corte de avanço (f), profundidade (a_p) e a interação entre ambos se mostraram significantes para a emissão acústica por meio da indicação de valor de F-Value de 2,39 para o primeiro e de P-Value de 0,024 e 0,087, respectivamente, para os dois últimos.

Por meio da curva dos efeitos principais para a profundidade (a_p), observa-se que o comportamento do sinal de emissão acústica em função da profundidade (a_p) tende a se parecer com o comportamento esperado para o mesmo sinal em função da velocidade de corte (PIGARI, 1995).

Segundo literatura do mesmo autor, para valores de profundidade de corte próximo próximos a 1,5 mm, conforme Figura 57, os sinais de emissão acústica aumentam em função do aumento do avanço e profundidade de corte.

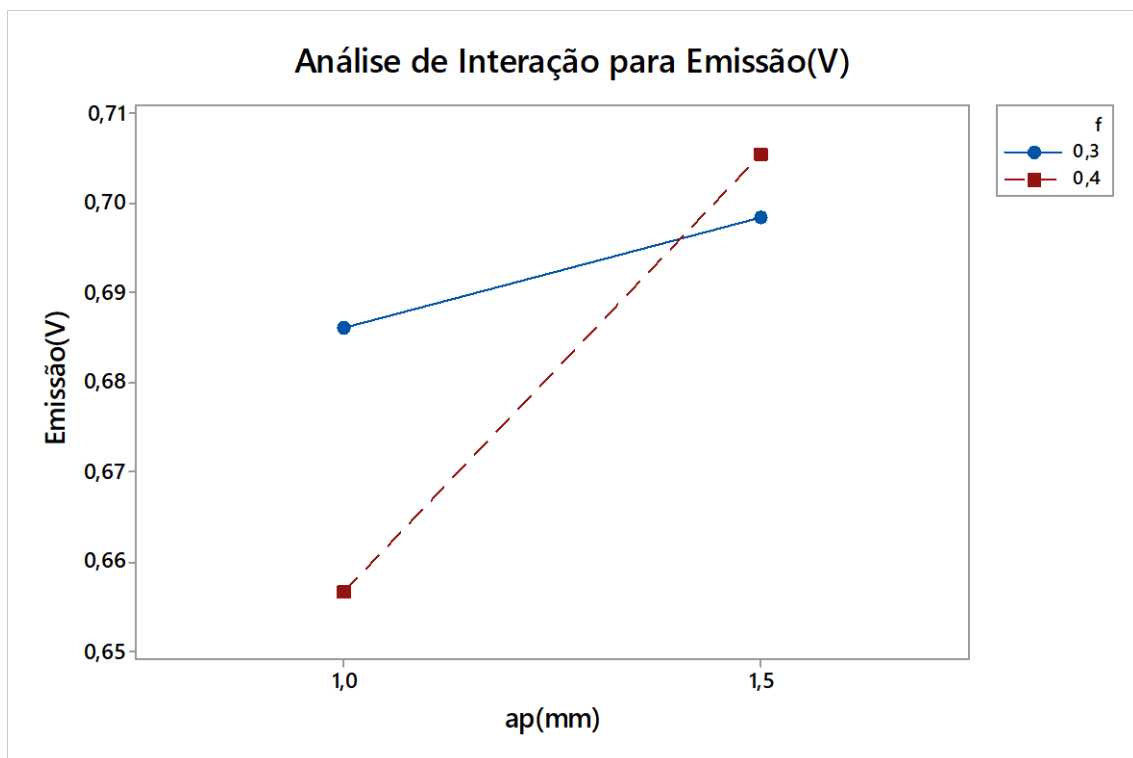
A Figura 58 mostra os resultados obtidos para a emissão acústica na respectiva condição testada.

Figura 56 – Curvas de efeitos principais para a emissão acústica



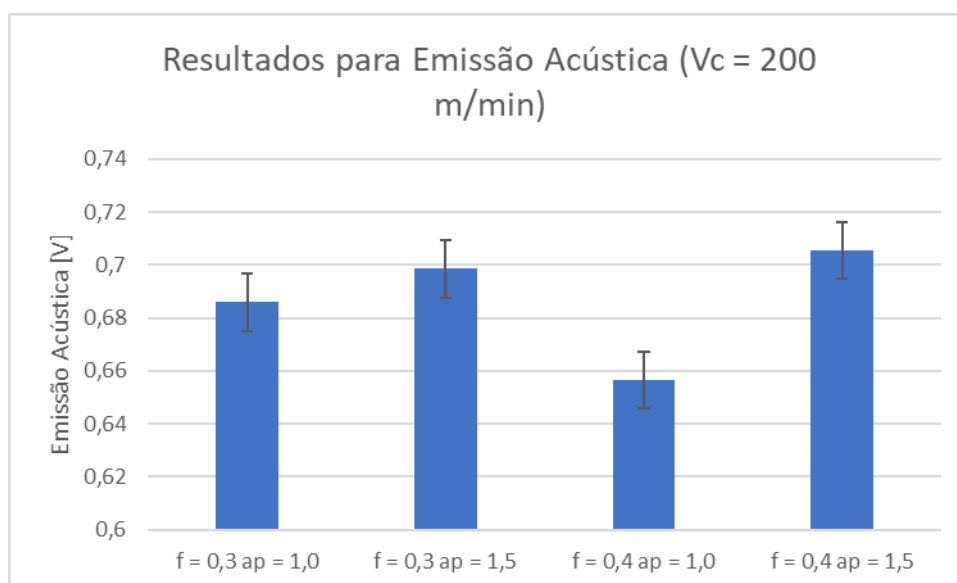
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 57 – Curvas de interação para a emissão acústica.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 58 – Resultados para a emissão acústica.



Fonte: Produção do próprio autor

5.4 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

Por meio da utilização dos parâmetros de corte observados na Tabela 4, foram obtidas as curvas dos efeitos principais da velocidade de corte e do avanço (Figura 59), bem como as curvas de interação (Figura 60) entre ambos parâmetros, para a vibração (para valores constantes de profundidade de corte).

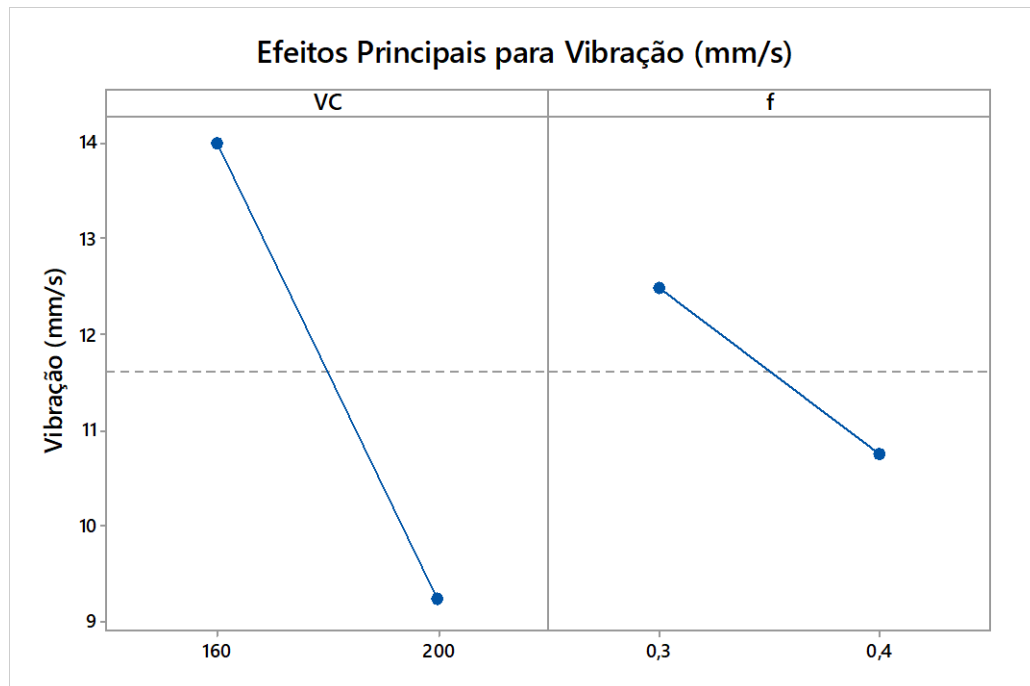
O valor de F-Value proveniente da análise estatística de variância para a velocidade de corte (V_c) (2,21) indicou que este parâmetro é significativo para a vibração.

Na Figura 43 pode ser observado o comportamento decrescente da curva, isto é, com o aumento da velocidade de corte, houve uma diminuição nos valores de vibração obtidos. Sobre tal comportamento, de acordo com Costa (1995), a partir de um determinado valor de velocidade de corte, por meio do qual não se consideram baixos os valores deste parâmetro, a depender da rigidez de todo o sistema e de outros fatores, as vibrações tendem a diminuir com o aumento da velocidade de corte (V_c).

Com relação ao avanço (f) e a interação entre ambos parâmetros citados anteriormente não foram indicados como significantes para a vibração, em razão de valores de P-Value e F-Value iguais a 0,622 e 0,30 para o avanço (f) e 0,561 e 0,43 para a interação entre este e a velocidade de corte, mediante análise de variância.

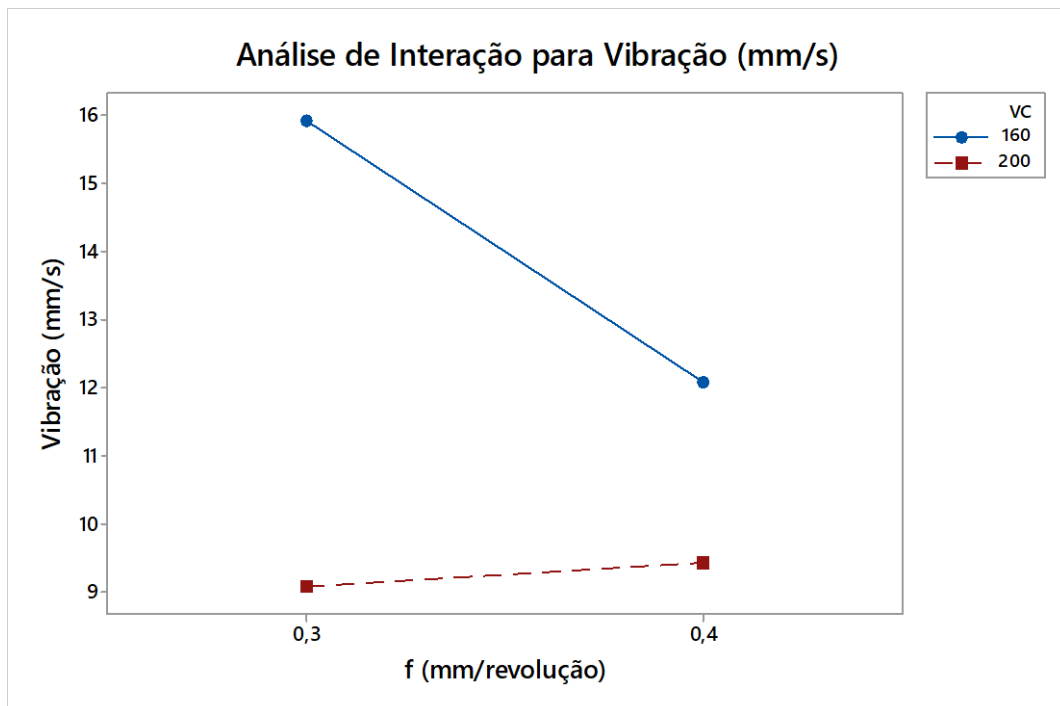
A Figura 61 mostra os resultados obtidos para a potência consumida na respectiva condição testada.

Figura 59 – Curvas de efeitos principais para a vibração.



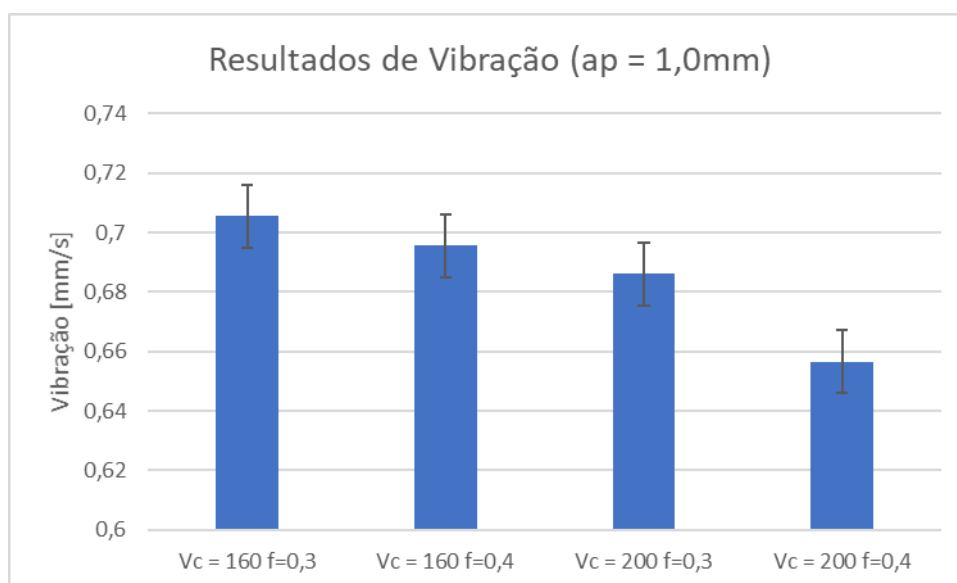
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 60 – Curvas de interação para vibração



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 61 – Resultados para vibração



Fonte: Produção do próprio autor

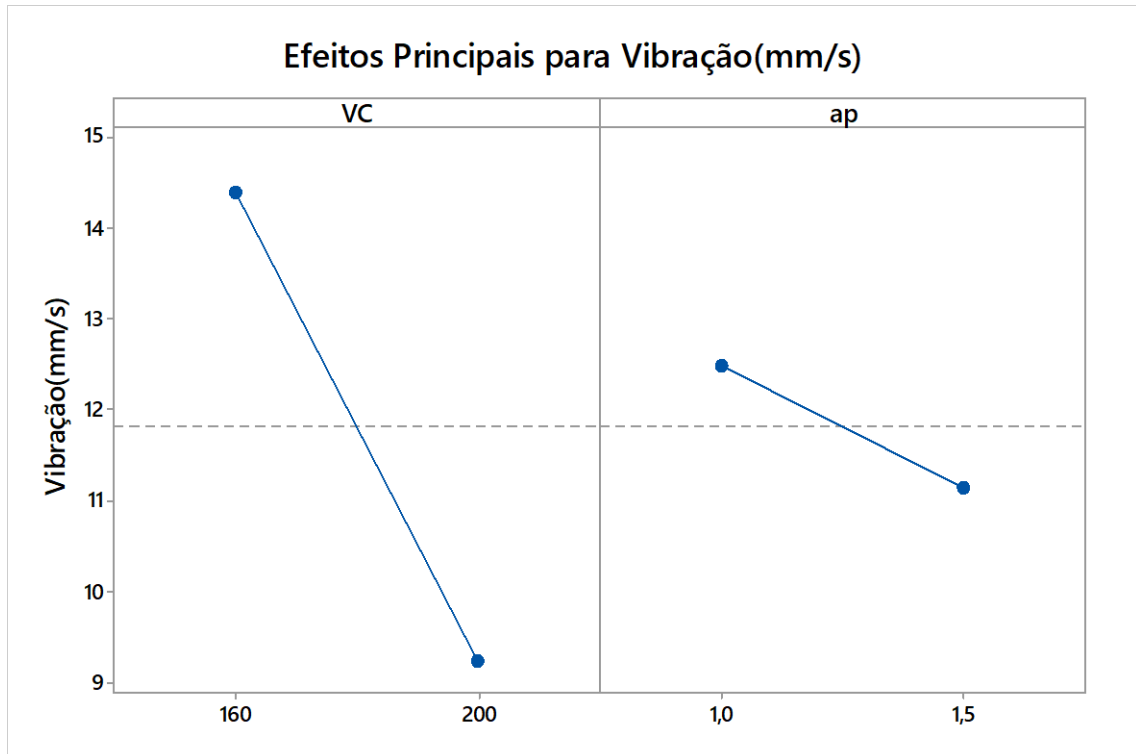
Valendo-se dos parâmetros de corte observados na Tabela 6, foram obtidas as curvas dos efeitos principais da velocidade de corte (V_c) e da profundidade (a_p) (Figura 62), bem como as curvas de interação (Figura 63) entre ambos parâmetros, para a vibração.

Os valores de P-Value e F-Value indicaram uma não significância para a profundidade de corte (a_p) (0,665 e 0,23, respectivamente) e para a interação entre esta e a velocidade de corte (V_c) (0,594 e 0,35).

Com relação a velocidade de corte (V_c), tal parâmetro é apontado como passível de significância através de um valor de F-Value igual a 3,33, cuja curva de efeito principal para a vibração se comporta de maneira análoga ao que foi anteriormente comentado.

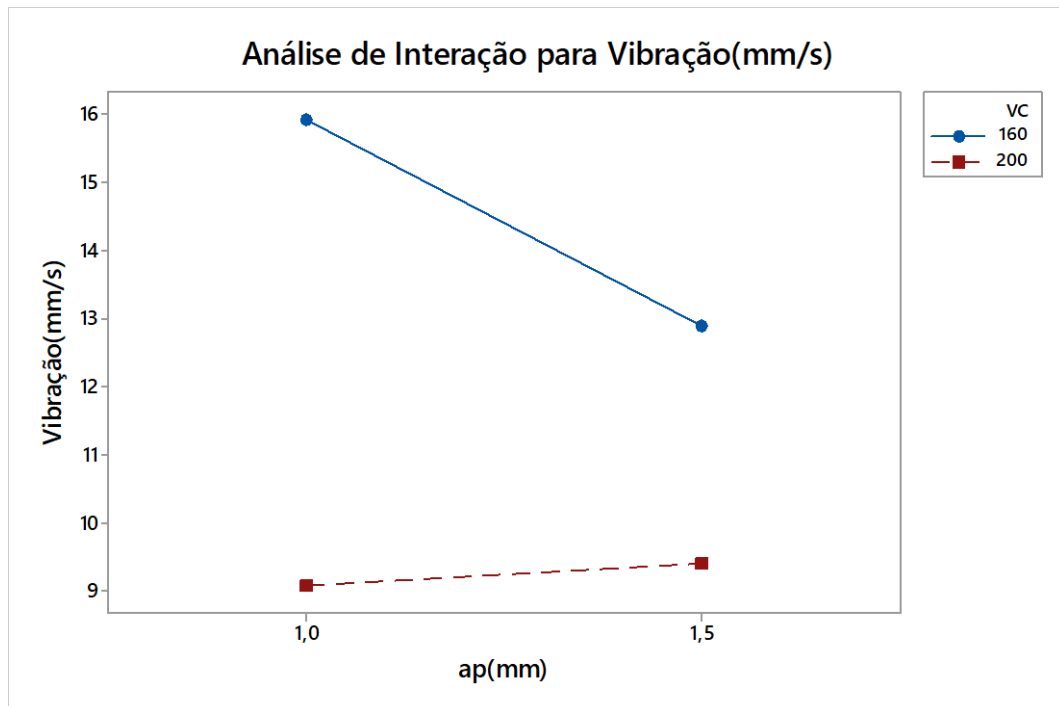
A Figura 64 mostra os resultados obtidos para a potência consumida na respectiva condição testada.

Figura 62 – Curvas de efeitos principais para a vibração



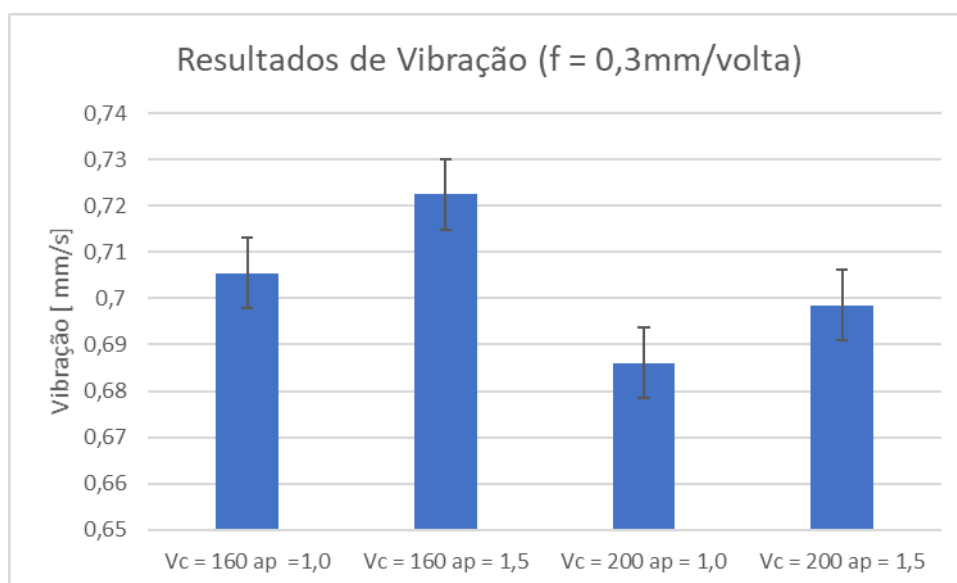
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 63 – Curvas de interação para a vibração.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 64 – Resultados para a vibração.



Fonte: Produção do próprio autor

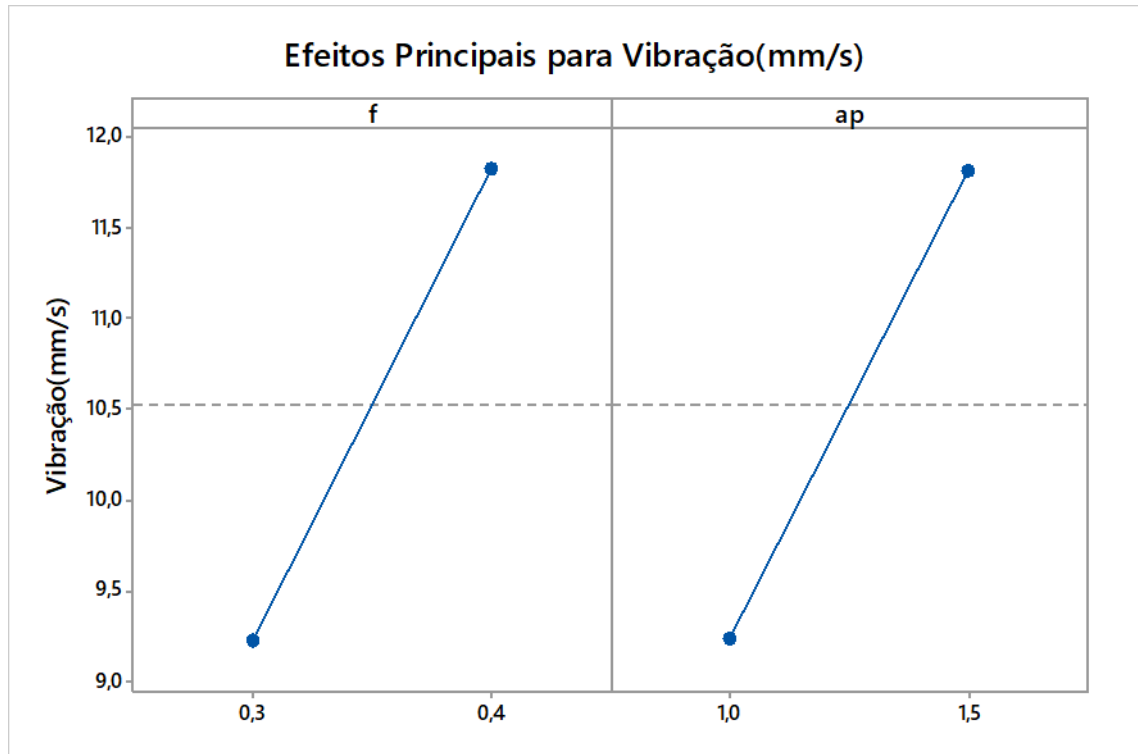
Através dos parâmetros de corte observados na Tabela 8, foram obtidas as curvas de efeitos principais do avanço (f) e da profundidade (a_p) (Figura 65), bem como as curvas de interação (Figura 66), para a vibração (para valores constantes

Os parâmetros de corte de avanço (f), profundidade de corte (a_p) e a interação entre ambos se mostraram significantes para a vibração por meio da indicação de valor de F-Value de 0,035 para os dois primeiros parâmetros e de 0,050 para a o terceiro, para este último corrobora o valor de F-Value igual a 10,14.

O que foi observado nas curvas da Figura 62, está de acordo com o que diz Costa (1995) a respeito do aumento da profundidade de corte conduzir a um aumento da vibração. No entanto, a análise estatística de variância contrapõe o que diz Bonifacio (1993) sobre a pouca influência do avanço (f) nos sinais de vibração, uma vez que o respectivo valor de P-Value apontou a ocorrência de significância.

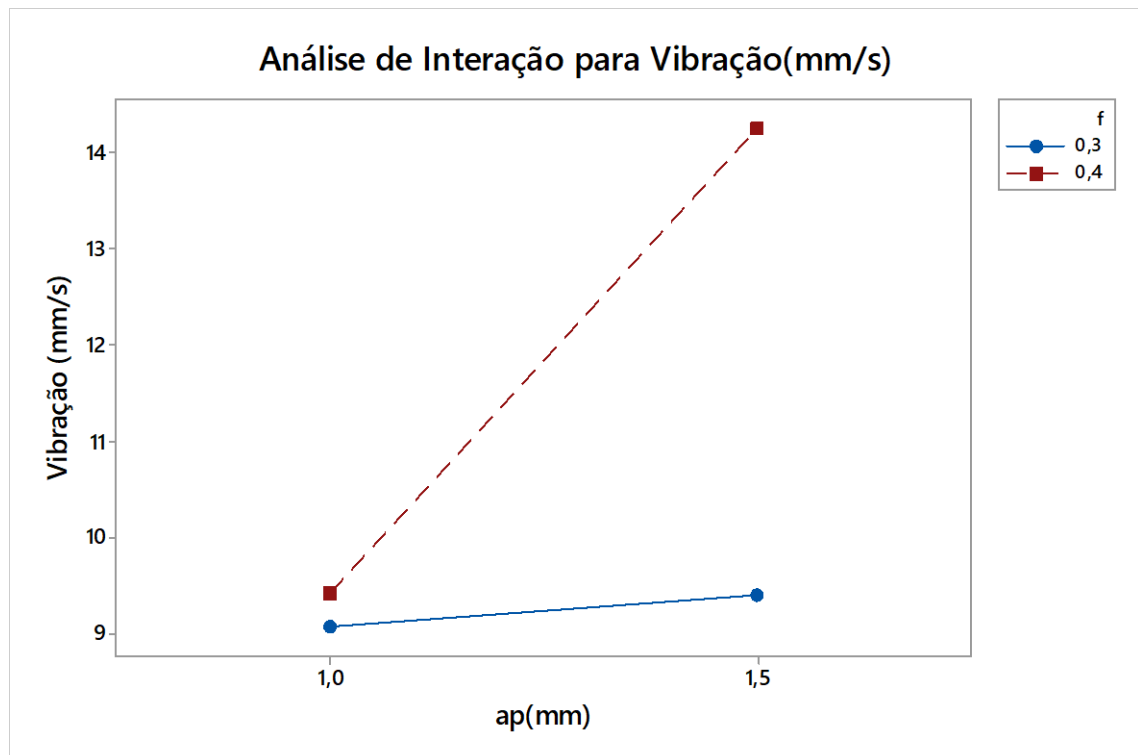
A Figura 67 mostra os resultados obtidos para a potência consumida na respectiva condição testada.

Figura 65 – Curvas de efeitos principais para a vibração



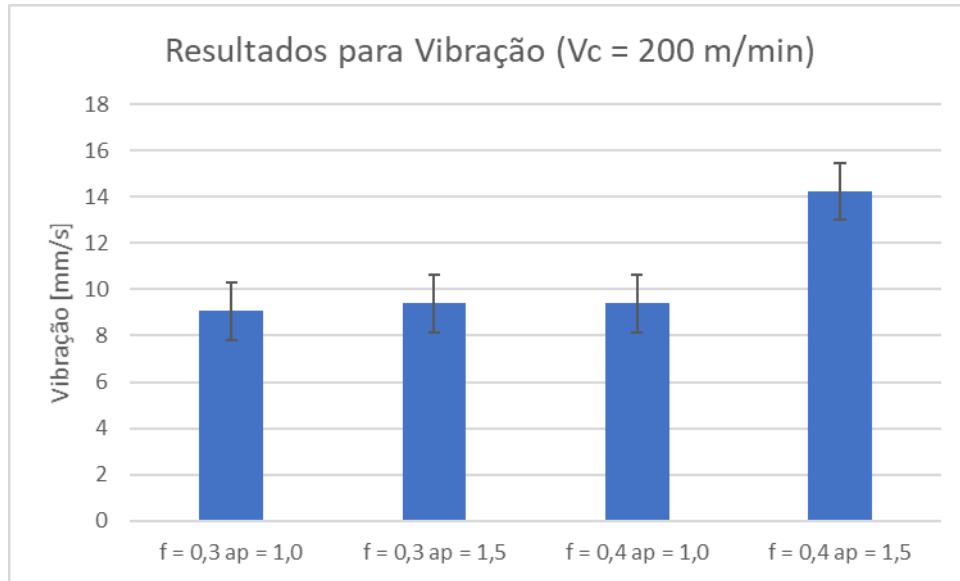
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 66 – Curvas de interação para a vibração.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 67 – Resultados para a vibração.

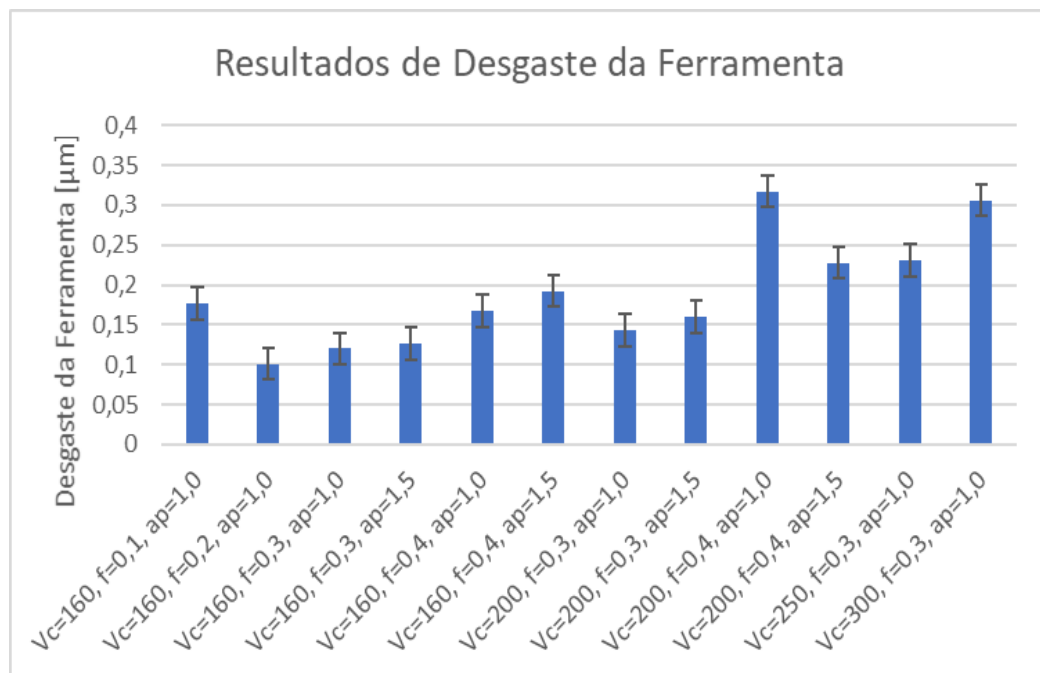


Fonte: Produção do próprio autor

5.5 ANÁLISE DE DESGASTE DA FERRAMENTA

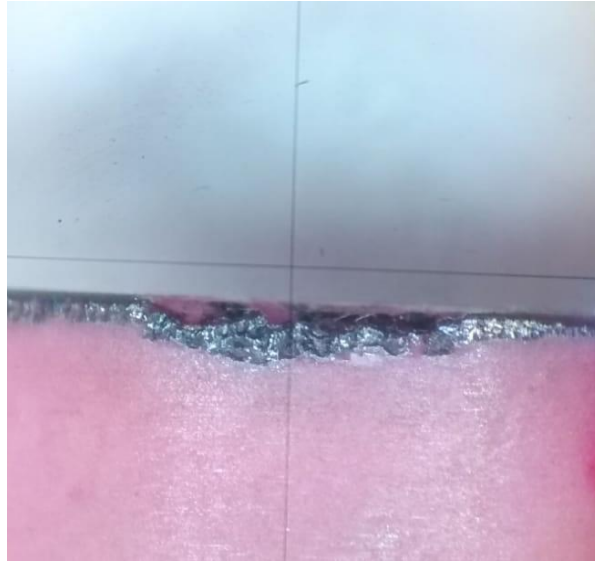
Na Figura 68 estão representados graficamente os valores obtidos para o desgaste da ferramenta. Nas Figura 69 a 75 são observadas imagens de alguns desgastes ou avarias da ferramenta.

Figura 68 – Resultados de desgaste da ferramenta



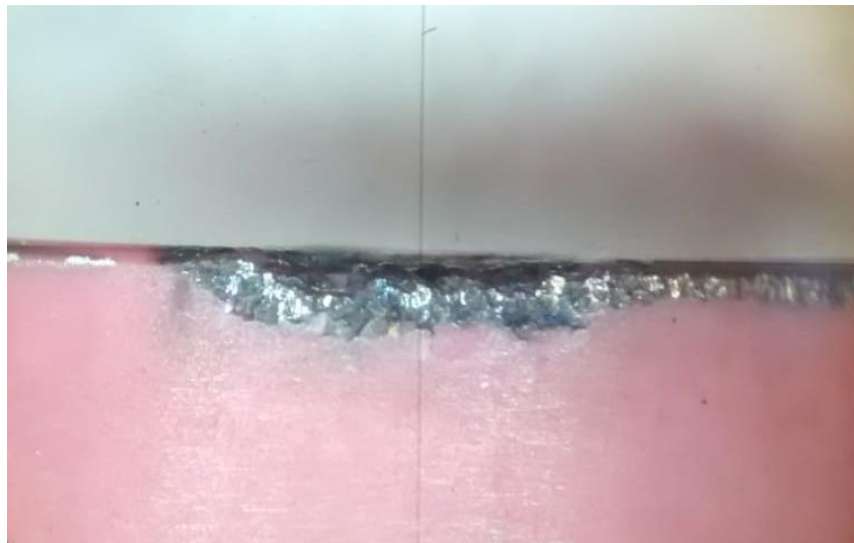
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 69 – Lascamento sob $V_c = 400\text{m/min}$, $f = 0,3\text{ mm}$ e $a_p = 1\text{ mm}$



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 70 – Lascamento sob $V_c = 400\text{ m/min}$, $f = 0,3\text{ mm}$ e $a_p = 1\text{ mm}$



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 71 – Lascamento sob $V_c = 300$ m/min, $f = 0,3$ mm e $a_p = 1$ mm



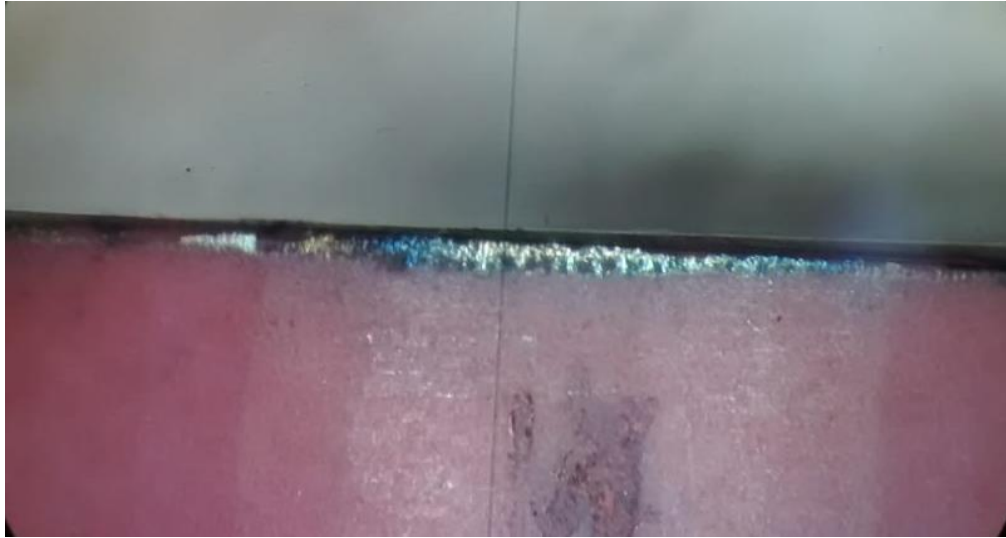
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 72 – Lascamento sob $V_c = 250$ m/min, $f = 0,3$ mm e $a_p = 1$ mm



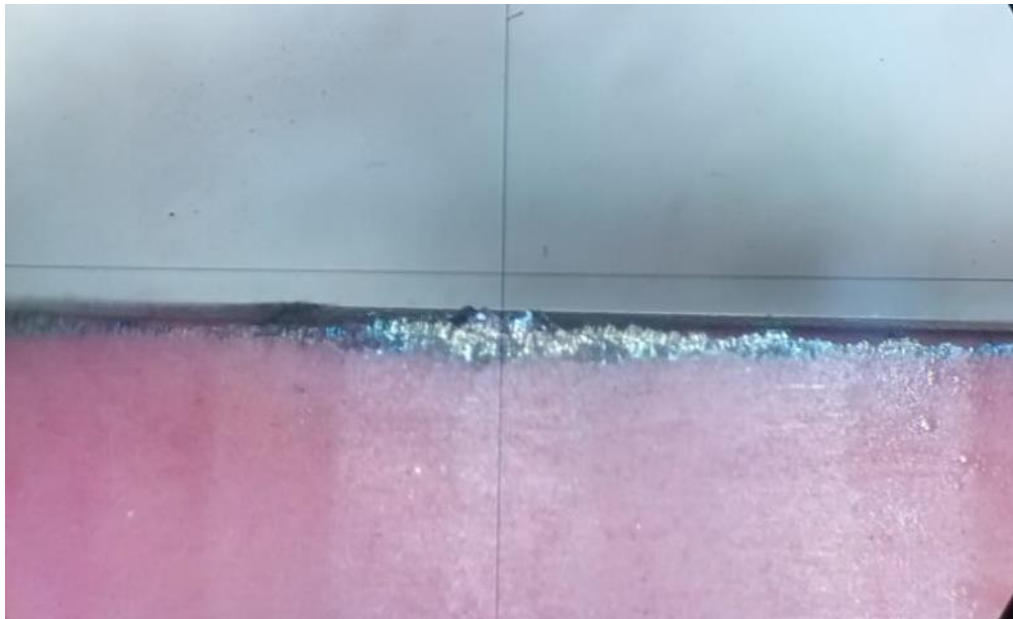
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 73 – Desgaste de Flanco sob $V_c = 160$ m/min, $f = 0,4$ mm e $a_p = 1$ mm



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 74 – Desgaste de Flanco sob $V_c = 160$ m/min, $f = 0,4$ mm e $a_p = 1,5$ mm



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 75 – Desgaste sob $V_c = 200$ m/min, $f = 0,4$ mm e $a_p = 1,0$ mm



Fonte: Produção do próprio autor

5.6 ANÁLISE DO TIPO E FORMAS DO CAVACO

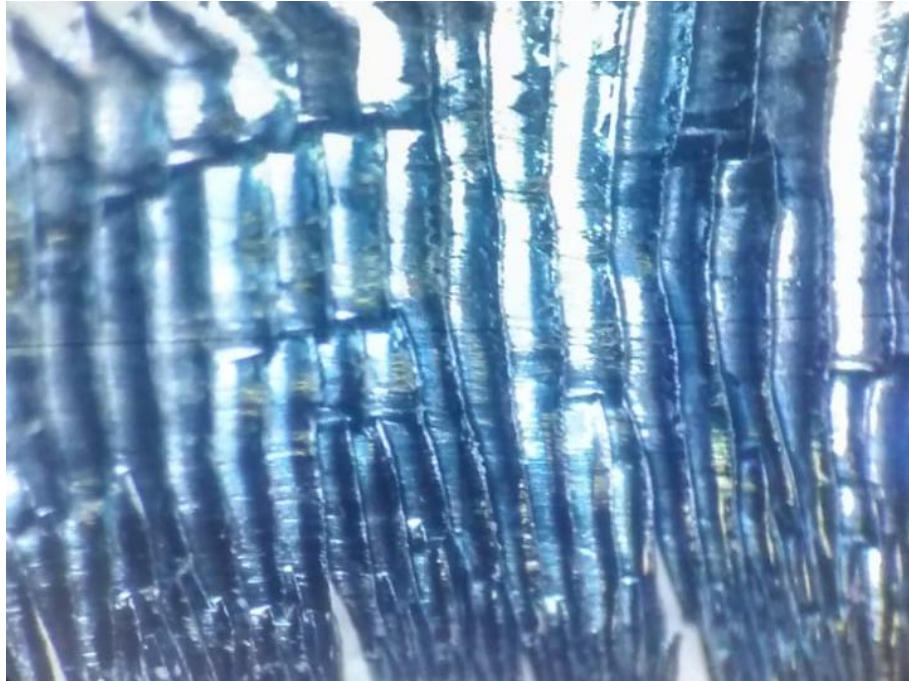
Os cavacos obtidos no procedimento experimental deste trabalho foram do tipo de cisalhamento, lamelar (Figura 76, Figura 77 e Figura 78), como é característico do torneamento de aços endurecidos, e da forma de fita, longo e emaranhado (Figura 79 e 80).

Figura 76 – Cavaco resultante do ensaio sob $V_c = 160$ m/min, $f = 0,3$ mm e $a_p = 1,5$ mm.



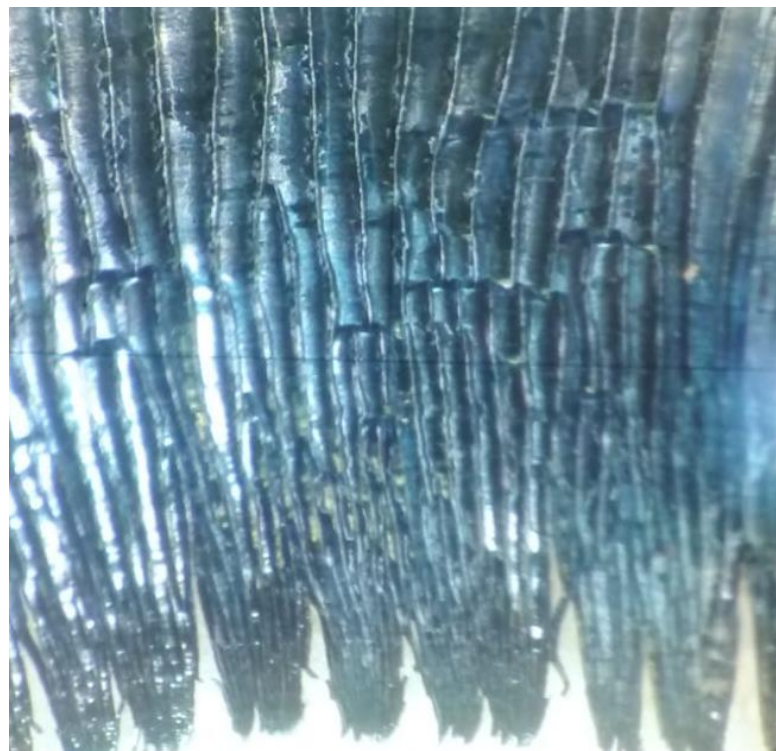
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 77 – Cavaco cisalhado resultante do ensaio sob $V_c = 160\text{m/min}$, $f=0,4\text{mm}$ e $a_p=1,5\text{mm}$.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 78 – Cavaco resultante do ensaio sob $V_c = 200\text{ m/min}$, $f = 0,3\text{ mm}$ e $a_p = 1,5\text{ mm}$.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 79 – Cavaco fita emaranhada do ensaio sob $V_c=300\text{m/min}$, $f=0,3\text{mm}$ e $a_p=1,0\text{mm}$.



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 80 – Cavaco fita emaranhada do ensaio sob $V_c=200\text{m/min}$, $f=0,4\text{mm}$ e $a_p=1,5\text{mm}$.



Fonte: Produção do próprio autor

6 CONCLUSÕES

Este trabalho consistiu no estudo de desempenho de ferramenta experimental, desenvolvida a fim de que às novas demandas decorrentes da usinagem de alto desempenho sejam-lhes oferecida alternativa de ferramenta robusta, a qual se mostre adequada a valores altos de velocidade de corte e proporcione valores baixos de rugosidade.

No entanto, por ser de caráter experimental, os ensaios realizados com a ferramenta cerâmica em questão resultaram em comportamentos ainda não catalogados pela literatura disponível, visto que em tal literatura não se mostram disponíveis abundantes dados relativos à geometria circular, particular ao presente trabalho.

As relações matemáticas de dependência entre o avanço de corte e a rugosidade, média e total, presentes nas equações do cálculo teórico de rugosidades, não foram verificadas para determinada condição.

Esta observação é passível de estar em função de uma influência mais significativa do raio de ponta de 6mm particular à ferramenta de corte ensaiada, e do maior atrito e vibração proporcionados por este parâmetro.

Ainda assim, obtiveram-se os melhores valores de rugosidade, média e total, para a velocidade de corte mais elevada. Esta observância de valores menores, portanto melhores, de rugosidade para maior velocidade de corte foi confirmada sob outros cenários.

Observa-se também que os valores experimentais de rugosidade total foram indicativos condizentes a aqueles de rugosidade média, não assinalando defeitos pontuais na superfície do aço usinado.

Por meio de análise estatística dos dados de potência consumida, foi possível observar que não houve relação entre estes e parâmetros de corte como a velocidade, ainda que tal relação seja prevista pelas equações do cálculo de potência em função da força de corte e velocidade de corte. Por outro lado, a relação pode ser verificada para o avanço e profundidade de corte, com o aumento do valor destes conduzindo ao aumento do consumo de potência elétrica.

Os resultados relativos à emissão acústica indicaram que, para valores mais altos de velocidade de corte, houve menores índices de emissão acústica e, portanto, adequabilidade da ferramenta ensaiada para tal configuração.

A velocidade de corte a nível mais elevado também induziu a menores índices de vibração, de acordo com o que foi dito sobre o raio de ponta da ferramenta ensaiada e sua relação com atrito e vibração.

Por fim, os tipos e formas do cavaco proveniente do processo de usinagem realizado se mostraram condizentes com as características do aço usinado, endurecido, cavaco de cisalhamento e lamelar. Porém, também se mostraram de fita, longos ou emaranhados, características as quais, indesejáveis para o processo.

REFERÊNCIAS

- AMORIM, H. J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
- BONIFÁCIO, M. E. R. **Monitoramento do processo de torneamento de acabamento via sinais de vibração**. 1993. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1993.
- BRAGA, M. D. A. **Avaliação do tipo de desgaste de ferramenta de um compósito cerâmico de alumina-zircônia para usinagem de ligas metálicas de uso aeroespacial**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.
- COSTA, C. E. **Monitoramento do processo de torneamento de desbaste via corrente elétrica do motor principal da máquina e via vibração da ferramenta** 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia de Fabricação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.
- DEUS, Priscila Roel. **Análise do processo de fresamento de MDF em centro de usinagem CNC**. 2015. 133 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 3. ed. São Paulo: Artiber Editora Ltda, 2001. 244 p.
- ESPANHOL, V. **Análise dos esforços de corte e acabamento superficial no torneamento de aço com ferramenta de superfície lisa e com quebra-cavaco** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- FERRARESI, D. **Fundamento da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 751p.
- FREIRE, J. M. **Introdução às máquinas-ferramentas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 1989. 280 p.
- MACHADO, A.; SILVA, M. B. **Usinagem dos metais**. 8. ed. Uberlândia: Editora UFU, 2004. 266p.
- PIGARI, A. C. **Monitoramento do desgaste da ferramenta no processo de torneamento usando emissão acústica**. 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia de Fabricação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

PINHEIRO, C. **Efeitos do teor de umidade da madeira no fresamento**. 2014. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

SILVA, R. H. L. **Monitoramento do desgaste de ferramentas no fresamento de topo através dos sinais de potência e emissão acústica e redes neurais** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

SPINELLI, A. J. **Análise do processo de torneamento a quente auxiliado por resistência elétrica de quartzo**. 2004. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2004.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte**. 2. ed. Florianópolis: Editora UFSC, 1989.

STOETERAU, R. **Fundamentos dos processos de usinagem**. São Paulo: USP, 2003. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/PMR2202-AULA%20RS1.pdf>. Acesso em: 08 nov. 2018.

TRENT, M. C.; WRIGHT, P. K. **Metal cutting principles**. 4. ed. USA: Butterworth Heinemann, 2000.

ZANOTTO, E. D.; MIGLIORE, A. R. Propriedades mecânicas de materiais cerâmicos: uma introdução. **Cerâmica**, v. 37, n. 247, p. 7-16, 1991.

WRUBBLACK, O.; PILATTI, L. A.; PEDROSO, B. Parâmetros e métodos de usinagem e sua relação com os custos do processo e o acabamento final do produto. *In: ENCONTRO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA DOS CAMPOS GERAIS*, 4., 2008, Campos Gerais. **Anais [...]**. Campos Gerais: UTFPR, 2008.

ZEILMANN, R. P. **Tendência aponta para a usinagem a seco**. Disponível em: <https://www.nei.com.br/artigo/tendencia-aponta-para-a-usinagem-a-seco>. Acesso em: 08 nov. 2018.