

**Marcelo Antunes de Paula**

**Aspectos da usinagem a seco com ferramenta cerâmica experimental ( $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ ) no  
aço inoxidável martensítico AISI 410 endurecido**

**Marcelo Antunes de Paula**

**Aspectos da usinagem a seco com ferramenta cerâmica experimental ( $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ ) no  
aço inoxidável martensítico AISI 410 endurecido**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do  
*Campus* de Guaratinguetá, Universidade  
Estadual Paulista, para a obtenção do título de  
Doutor em Engenharia Mecânica na área de  
Materiais

Orientador (a): Prof. Dr. Marcos Valério  
Ribeiro

Guaratinguetá - SP  
2021

P324a Paula, Marcelo Antunes de  
Aspectos da usinagem a seco com ferramenta cerâmica experimental  
(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+MgO) no aço inoxidável martensítico AISI 410 endurecido /  
Marcelo Antunes de Paula – Guaratinguetá, 2021

127 f. : il.

Bibliografia: f. 121-127

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de  
Engenharia de Guaratinguetá, 2021.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

1. Sustentabilidade. 2. Usinagem. 3. Ferramentas de corte.

I. Título.

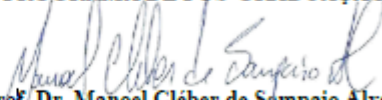
CDU 621.9(043)

**MARCELO ANTUNES DE PAULA**

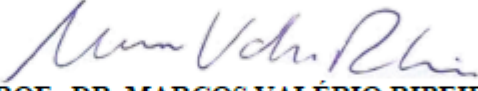
**ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO: DOUTORADO**

**APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**

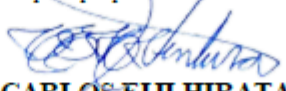
  
**Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves**  
Coordenador

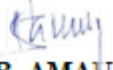
**BANCA EXAMINADORA:**

  
**PROF. DR. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO**  
Orientador / UNESP/FEG  
participou por videoconferência

  
**PROF. DR. JOSÉ VITOR CÂNDIDO DE SOUZA**  
UNESP/FEG  
participou por videoconferência

  
**PROF. DR. MANOEL CLÉBER DE SAMPAIO ALVES**  
UNESP/FEG  
participou por videoconferência

  
**PROF. DR. CARLOS ELJI HIRATA VENTURA**  
Universidade Federal de São Carlos  
participou por videoconferência

  
**PROF. DR. AMAURI HASSUI**  
Unicamp  
participou por videoconferência

*Agosto 2021*

## **DADOS CURRICULARES**

### **MARCELO ANTUNES DE PAULA**

<b>NASCIMENTO</b>	03.07.1974 – Guaratinguetá/SP
<b>FILIAÇÃO</b>	João Antunes de Paula Dolores de Oliveira Leite Paula
<b>2002/2014</b>	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica Faculdade de Engenharia do <i>Campus</i> de Guaratinguetá - UNESP
<b>2014/2016</b>	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Nível de Mestrado Faculdade de Engenharia do <i>Campus</i> de Guaratinguetá - UNESP
<b>2017/2021</b>	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Nível de Doutorado Faculdade de Engenharia do <i>Campus</i> de Guaratinguetá - UNESP

Dedico este trabalho especialmente aos meus pais *João Antunes de Paula e Dolores de Oliveira Leite Paula*, a toda minha família e amigos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que é a *Inteligência Suprema e Causa Primeira* de todas as coisas na realização dessa jornada de evolução pessoal, acadêmica e profissional.

Ao meu orientador *Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro* pela oportunidade concedida e ajuda ao longo desse trabalho.

Ao *Prof. Dr. José Vitor Cândido de Souza* com suas orientações e conhecimento sobre ferramentas cerâmicas.

Ao *Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves* pelo suporte durante a programação e execução dos experimentos, na aquisição de dados dos experimentos e pelo conhecimento adquirido em nossas conversas.

Ao *Prof. Dr. Rogério Hein* agradeço o auxílio na aquisição das imagens digitais e suporte no Laboratório de Microscopia.

Aos amigos da pós-graduação *Dr<sup>a</sup>. Taise de Azevedo Sousa, Dr. Marcel Yuzo Kondo, Dr. Reginaldo Toshihiro Konatu e MSc. Anderson Zenken Nakazato*, os quais foram de grande importância na realização desse trabalho, pois contribuíram de forma ímpar com conselhos, sugestões e a valiosa amizade.

Aos técnicos do Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia do *campus* de Guaratinguetá pelo suporte nos laboratórios e nos ensaios de usinagem.

Aos funcionários da Biblioteca da Faculdade de Engenharia do *campus* de Guaratinguetá pelo suporte com a Revisão Bibliográfica e a formatação da Tese.

À *Seco Tools* pela doação de suporte de ferramenta e ferramentas de corte para realização desse trabalho o qual foi imprescindível na execução dos ensaios.

À Mecminas pela retificação das ferramentas de corte cerâmica.

A USP/EEL/DEMAR e em especial aos alunos de pós-graduação *MSc. Pérsio Mozart Pinto, MSc. Viviane do Socorro da Costa e Bruno Abreu Bon* pelo auxílio e aquisição de imagens digitais no microscópio eletrônico de varredura (MEV) e espectroscopia de raios X por energia dispersiva (EDS).

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - código de financiamento 001.

“O metal em altas temperaturas *funde-se*. O rio caudaloso na planície *espalha-se*. A semente no solo adubado *transforma-se*. O cristão ativo na construção do testemunho *resigna-se*”.

(Joanna de Angelis)

## RESUMO

Os aços inoxidáveis são ligas especiais desenvolvidas para resistir à corrosão, possuem excelente resistência a oxidação e à deformação em elevadas temperaturas. O cromo é o elemento que confere resistência à corrosão. O aço inoxidável AISI 410 é utilizado em componentes de turbinas hidráulicas, tubulação para indústria química e petroquímica. Os avanços tecnológicos dos materiais interferem diretamente no desempenho das ferramentas de corte utilizadas no processo de usinagem. A usinagem a seco atende a normas e regulamentações ambientais por não utilizar fluidos de corte e pela segurança do operador. Essa ausência de fluidos de corte resulta em um maior desgaste, necessidade de desenvolvimento e melhoria das ferramentas de corte. As ferramentas cerâmicas são utilizadas na usinagem a seco porque possuem propriedades mecânicas e físicas que atendem a essa condição de usinagem. O objetivo é aplicação de ferramenta de corte cerâmica experimental de alumina dopada com óxido de magnésio no torneamento a seco do aço inoxidável martensítico AISI 410 endurecido. O Método de Taguchi foi utilizado com auxílio de uma matriz de experimentos  $L_{16}$ , com 16 combinações diferentes, com as velocidades de corte (200-225-250-275-300-325-350-375 m/min), avanços (0,05 e 0,10 mm/rev) e profundidades de corte (0,25 e 0,50 mm). Para condição MENOR é melhor, os melhores resultados foram:  $VB_{máx}/l_c$  na combinação (225-0,05-0,25) com 0,000307 mm/m,  $R_a$  na combinação (275-0,05-0,25) com 0,480  $\mu\text{m}$ ,  $R_t$  na combinação (325-0,10-0,25) com 4,195  $\mu\text{m}$ , potência de usinagem na combinação (250-0,05-0,25) com 658,2 W, vibração na combinação (225-0,05-0,25) com 2,90 mm/s, emissão acústica na combinação (200-0,05-0,25) com 0,715 V. Ocorreram desgastes de abrasão, cratera, entalhe, adesão e quebra; os cavacos foram na forma emaranhados, arcos e fita helicoidal. No ensaio de vida 1 para combinação (225-0,05-0,25) o comprimento de corte usinado foi de aproximadamente 5000 m e  $R_a = 1,721 \mu\text{m}$ ; no ensaio de vida 2 para combinação (200-0,10-0,50) foi de aproximadamente 2500 m e  $R_a = 2,708 \mu\text{m}$ .

**PALAVRAS-CHAVE:** Sustentabilidade. Desgaste. Projeto de Experimentos. Rugosidade. Alumina.

## ABSTRACT

Stainless steels are special alloys developed to resist corrosion, have excellent resistance to oxidation and deformation at high temperatures. Chromium is the element that provides resistance to corrosion. AISI 410 stainless steel is a component of hydraulic turbines, piping for the chemical and petrochemical industry. Technological advances in materials affect the performance of cutting tools used in the machining process. Dry machining complies with environmental standards and regulations for not using cutting fluids and for operator safety. This absence of cutting fluids results in increased wear need for development and improvement of cutting tools. Ceramic tools are used in dry machining because they have mechanical and physical properties that suit this type of machining. The objective is to apply an experimental ceramic alumina cutting tool doped with magnesium oxide in dry turning of hardened AISI 410 martensitic stainless steel. The Taguchi Method was used with the aid of an L16 experiment matrix, with 16 different combinations, with the cutting speed (200-225-250-275-300-325-350-375 m.min<sup>-1</sup>), feed rate (0, 05, and 0.10 mm.rev<sup>-1</sup>), and depth of cut (0.25 and 0.50 mm). The best results were:  $VB_{max}/l_c$  in condition (225-0.05-0.25) with 0.000307 mm/m,  $R_a$  in condition (275-0.05-0.25) with 0.480  $\mu\text{m}$ ,  $R_t$  in condition (325-0.10-0.25) with 4.195  $\mu\text{m}$ , machining power in condition (250-0.05-0.25) with 658.2 W, vibration in condition (225-0.05-0.25) with 2.90 mm/s and acoustic emission in condition (200-0.05-0.25) with 0.715 V. Occurred wear of abrasion, crater, notch, adhesion, and failure; the tangled chips, arcs, and helicoidal tape. In life test 1 in condition (225-0.05-0.25) cutting length was approximately 5000 m and  $R_a = 1.721 \mu\text{m}$ ; in test life 2 in condition (200-0.10-0.50) was 2500 m and  $R_t = 2.708 \mu\text{m}$ .

**KEYWORDS:** Sustainability. Wear. Design of Experiments. Roughness. Alumina.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Passividade dos aços-cromo expostos durante 10 anos na atmosfera industrial....	15
Figura 2 – Taxa de crescimento do consumo mundial de aço inoxidável .....	16
Figura 3 – Comparação da produção da fundição de aços inoxidáveis por regiões nos anos de 2005 e 2019.....	17
Figura 4 – Designações, composições, propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis .....	19
Figura 5 – Microestrutura do aço inoxidável martensítico AISI 410. ....	20
Figura 6 – Principais aços inoxidáveis martensíticos derivados do AISI 410.....	21
Figura 7 – Propriedades mecânicas médias devidas a deformação para aço AISI 410.....	22
Figura 8 – Processo de torneamento.....	23
Figura 9 – Direções dos movimentos no torneamento .....	25
Figura 10 – Cunha de corte da ferramenta .....	26
Figura 11 – Elementos da cunha de corte da ferramenta de tornear.....	26
Figura 12 – Mecanismo de formação de cavaco .....	28
Figura 13 – Modelo de Piispanen.....	28
Figura 14 – Área de contato cavaco-ferramenta.....	29
Figura 15 – Zona de fluxo do cavaco.....	29
Figura 16 – Classificação das formas dos cavacos.....	30
Figura 17 – Efeito do avanço e da profundidade de corte nas formas dos cavacos.....	30
Figura 18 – Comparação entre os diferentes sistemas de lubrificação/resfriamento .....	33
Figura 19 – Classificação das ferramentas de corte em função da dureza e tenacidade. ....	36
Figura 20 – Microestrutura com sinterização convencional e em duas etapas.....	38
Figura 21 – Evolução do desgaste da ferramenta de corte.....	40
Figura 22 – Mecanismos de desgaste (abrasão, difusão e adesão).....	41
Figura 23 – Abrasão na ferramenta de corte cerâmica (400-0,05-0,50) para $VB_{máx} = 0,163$ mm.....	42
Figura 24 – Cratera na ferramenta de corte cerâmica (600-0,20-0,50) para $VB_{máx} = 0,812$ mm.....	42
Figura 25 – Fratura da ferramenta de corte cerâmica (600-0,10-0,50) para $VB_{máx} = 0,948$ mm.....	42
Figura 26 – Efeito dos parâmetros de corte na vida da ferramenta de corte....	44
Figura 27 – Representação da rugosidade $R_a$ . ....	47
Figura 28 – Representação da rugosidade $R_t$ .....	47
Figura 29 – Esquematização de um processo.....	49

Figura 30 – Matriz arranjo ortogonal $L_{12}$ .....	51
Figura 31 – Força de usinagem e suas componentes.....	54
Figura 32 – Sequência da metodologia aplicada nos ensaios.....	56
Figura 33 – Composição do aço inoxidável martensítico AISI 410 (% em peso) .....	56
Figura 34 – Representação esquemática do corpo de prova.....	57
Figura 35 – Microestrutura martensítica do aço inoxidável AISI 410 endurecido.....	57
Figura 36 – Durômetro da marca Wolpert.....	58
Figura 37 – Ferramenta cerâmica experimental (detalhe do raio de ponta, chanfro e desenho) .....	59
Figura 38 – Suporte capto da marca Seco Tools, modelo B01T903244. ....	60
Figura 39 – Corpo de prova “dividido” para processo de usinagem por torneamento. ....	62
Figura 40 – (a) Centro de torneamento, (b) Material de trabalho (c) ferramenta de corte.....	62
Figura 41 – Tela do software <i>LABVIEW®</i> .....	63
Figura 42 – Sensor de potência conectado ao centro de torneamento.....	64
Figura 43 – Sensores de vibração e emissão acústica.....	64
Figura 44 – Rugosímetro Mahr modelo MarSurf M300/MahrSurf RD 18.....	65
Figura 45 – Microscópio da marca Mahr, modelo MahrVision MM200.....	66
Figura 46 – Microscópio Stereo da marca Zeiss, modelo Stemi 2000.....	66
Figura 47 – Microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo TM3000, da marca Hitachi.....	67
Figura 48 – Gráfico de Efeitos Principais para $VB_{m\acute{a}x}/l_c$ .....	69
Figura 49 – Gráfico de Intervalos das 16 combinações para $VB_{m\acute{a}x}/l_c$ . ....	70
Figura 50 – Gráfico de Intervalos das velocidades de corte para $VB_{m\acute{a}x}/l_c$ . ....	71
Figura 51 – Gráfico de Intervalos dos avanços para $VB_{m\acute{a}x}/l_c$ . ....	72
Figura 52 – Gráfico de Intervalos das profundidades de corte para $VB_{m\acute{a}x}/l_c$ .....	72
Figura 53 – Gráfico de Interação ( $v_c$ ) x ( $f$ ) para $VB_{m\acute{a}x}/l_c$ . ....	73
Figura 54 – Gráfico de Interação ( $v_c$ ) x ( $a_p$ ) para $VB_{m\acute{a}x}/l_c$ .....	74
Figura 55 – Gráfico de Interação ( $f$ ) x ( $a_p$ ) para $VB_{m\acute{a}x}/l_c$ .....	74
Figura 56 – Gráfico de Efeitos Principais para ( $R_a$ ) .....	75
Figura 57 – Gráfico de Intervalos das 16 combinações para ( $R_a$ ).....	76
Figura 58 – Gráfico de Intervalos das velocidades de corte para ( $R_a$ ).....	77
Figura 59 – Gráfico de Intervalos dos avanços para ( $R_a$ ).....	77
Figura 60 – Gráfico de Intervalos das profundidades de corte para ( $R_a$ ).....	78

Figura 61 – Gráfico de Interação ( $v_c$ ) x ( $f$ ) para ( $R_a$ ).....	79
Figura 62 – Gráfico de Interação ( $v_c$ ) x ( $a_p$ ) para ( $R_a$ ).....	80
Figura 63 – Gráfico de Interação ( $f$ ) x ( $a_p$ ) para ( $R_a$ ).....	80
Figura 64 – Gráfico de Efeitos Principais para ( $R_t$ ).....	81
Figura 65 – Gráfico de Intervalos das 16 combinações para ( $R_t$ ).....	82
Figura 66 – Gráfico de Intervalos das velocidades de corte para ( $R_t$ ).....	83
Figura 67 – Gráfico de Intervalos dos avanços para ( $R_t$ ). .....	83
Figura 68 – Gráfico de Intervalos das profundidades de corte para ( $R_t$ ).....	84
Figura 69 – Gráfico de Interação ( $v_c$ ) x ( $f$ ) para ( $R_t$ ).....	85
Figura 70 – Gráfico de Interação ( $v_c$ ) x ( $a_p$ ) para ( $R_t$ ). .....	86
Figura 71 – Gráfico de Interação ( $f$ ) x ( $a_p$ ) para ( $R_t$ ) .....	86
Figura 72 – Gráfico de Efeitos Principais para potência de usinagem .....	87
Figura 73 – Gráfico de Intervalos das 16 combinações para potência de usinagem .....	88
Figura 74 – Gráfico de Intervalos das velocidades de corte para potência de usinagem. ....	89
Figura 75 – Gráfico de Intervalos dos avanços para potência de usinagem.....	90
Figura 76 – Gráfico de Intervalos das profundidades de corte para potência de usinagem. ...	90
Figura 77 – Gráfico de Interação ( $v_c$ ) x ( $f$ ) para potência de usinagem.....	91
Figura 78 – Gráfico de Interação ( $v_c$ ) x ( $a_p$ ) para potência de usinagem.....	92
Figura 79 – Gráfico de Interação ( $f$ ) x ( $a_p$ ) para potência de usinagem.....	92
Figura 80 – Gráfico de Efeitos Principais para vibração.....	93
Figura 81 – Gráfico de Intervalos das 16 combinações para vibração .....	94
Figura 82 – Gráfico de Intervalos das velocidades de corte para vibração .....	95
Figura 83 – Gráfico de Intervalos dos avanços para vibração.....	95
Figura 84 – Gráfico de Intervalos das profundidades de corte para vibração.....	96
Figura 85 – Gráfico de Interação ( $v_c$ ) x ( $f$ ) para vibração.....	97
Figura 86 – Gráfico de Interação ( $v_c$ ) x ( $a_p$ ) para vibração.....	97
Figura 87 – Gráfico de Interação ( $f$ ) x ( $a_p$ ) para vibração. ....	98
Figura 88 – Gráfico de Efeitos Principais para (EA).....	99
Figura 89 – Gráfico de Intervalos das 16 combinações para (EA).....	100
Figura 90 – Gráfico de Intervalo das velocidades de corte para (EA).....	100
Figura 91 – Gráfico de Intervalos dos avanços para (EA).....	101
Figura 92 – Gráfico de Intervalos das profundidades de corte para (EA).....	102
Figura 93 – Gráfico de Interação ( $v_c$ ) x ( $f$ ) para (EA).....	103
Figura 94 – Gráfico de Interação ( $v_c$ ) x ( $a_p$ ) para (EA).....	103

Figura 95 – Gráfico de Interação ( $f$ ) x ( $a_p$ ) para (EA).....	104
Figura 96 – Desgaste por abrasão da ferramenta para combinação (200-0,05-0,25) .....	105
Figura 97 – Desgaste de cratera da ferramenta para combinação (200-0,05-0,25) .....	106
Figura 98 – Cavacos para combinação (200-0,05-0,25) .....	106
Figura 99 – Desgaste por abrasão da ferramenta para combinação (225-0,10-0,50) .....	107
Figura 100 – Desgaste de cratera da ferramenta para combinação (225-0,10-0,50) .....	107
Figura 101 – Cavacos para combinação (225-0,10-0,50) .....	108
Figura 102 – Desgaste por abrasão e entalhe da ferramenta para combinação (300-0,05-0,50) .....	108
Figura 103 – Desgaste de cratera e entalhe da ferramenta para combinação (300-0,05-0,50) .....	109
Figura 104 – Cavacos para combinação (300-0,05-0,50) .....	109
Figura 105 – Desgaste por abrasão da ferramenta para combinação (350-0,05-0,50) .....	110
Figura 106 – Desgaste de cratera da ferramenta para combinação (350-0,05-0,50) .....	110
Figura 107 – Cavacos para combinação (350-0,05-0,50) .....	111
Figura 108 – Quebra da ferramenta para combinação (275-0,10-0,50) .....	111
Figura 109 – Detalhes da quebra da ferramenta para combinação (275-0,10-0,50) .....	112
Figura 110 – Cavacos para combinação (275-0,10-0,50).....	112
Figura 111 – Gráfico ensaio de vida 1 (225-0,05-0,25) .....	114
Figura 112 – Gráfico ensaio de vida 2 (200-0,10-0,50) .....	114
Figura 113 – Gráfico ( $R_a$ ) para ensaio de vida 1 (225-0,05-0,25) .....	115
Figura 114 – Gráfico ( $R_a$ ) para ensaio de vida 2 (200-0,10-0,50) .....	115
Figura 115 – Desgaste por abrasão para o ensaio de vida 1 (225-0,05-0,25) .....	116
Figura 116 – Desgaste de cratera para ensaio de vida 1 (225-0,05-0,25) .....	116
Figura 117 – MEV da ferramenta do ensaio de vida 1 (225-0,05-0,25) .....	117
Figura 118 – EDS da ferramenta de corte do ensaio de vida 1 (225-0,05-0,25) .....	117
Figura 119 – Desgaste por abrasão e adesão para ensaio de vida 2 (200-0,10-0,50) .....	118
Figura 120 – Desgaste de cratera e adesão para ensaio de vida 2 (200-0,10-0,50) .....	118
Figura 121 – MEV da ferramenta de corte do ensaio de vida 2 (200-0,10-0,50) .....	119
Figura 122 – EDS da ferramenta de corte do ensaio de vida 2 (200-0,10-0,50) .....	119

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de dureza para o corpo de prova .....	58
Tabela 2 – Fatores e níveis do experimento.....	61
Tabela 3 – Matriz ortogonal $L_{16}$ do experimento.....	61
Tabela 4 – Resultados das 16 combinações para as variáveis de saída do experimento.....	68
Tabela 5 – Análise de Variância (ANOVA) para $VB_{m\acute{a}x}/l_c$ .....	70
Tabela 6 – Análise de Variância (ANOVA) para $(R_a)$ .....	76
Tabela 7 – Análise de Variância (ANOVA) para $(R_t)$ .....	82
Tabela 8 – Análise de Variância (ANOVA) para potência de usinagem.....	88
Tabela 9 – Análise de Variância (ANOVA) para vibração.....	93
Tabela 10 – Análise de Variância (ANOVA) para (EA).....	99
Tabela 11 – Resumo dos melhores resultados para as variáveis saída .....	104

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Vantagens e desvantagens da utilização dos fluidos de corte .....	31
Quadro 2 – Estimativa qualitativa do impacto ambiental da lubrificação/refrigeração.....	32
Quadro 3 – Classificação das alterações na integridade superficial .....	45
Quadro 4 – Alguns parâmetros de rugosidade.....	46
Quadro 5 – Amostragem de rugosidade para medições de parâmetros R de perfis periódicos.....	48

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
2.1	AÇOS INOXIDÁVEIS .....	15
<b>2.1.1</b>	<b>Classificação dos aços inoxidáveis</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Aços inoxidáveis martensíticos</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Aço inoxidável martensítico AISI 410</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1.4</b>	<b>Aplicações do aço inoxidável martensítico AISI 410</b> .....	<b>21</b>
<b>2.1.5</b>	<b>Propriedades mecânicas do aço inoxidável martensítico AISI 410</b> .....	<b>21</b>
2.2	PROCESSO DE USINAGEM .....	22
<b>2.2.1</b>	<b>Usinagem por torneamento</b> .....	<b>23</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Definição dos movimentos no processo de usinagem</b> .....	<b>23</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Geometria da ferramenta de corte</b> .....	<b>25</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Formação, tipos e formas dos cavacos</b> .....	<b>26</b>
<b>2.2.5</b>	<b>Usinagem sustentável</b> .....	<b>31</b>
<b>2.2.6</b>	<b>Processo de usinagem a seco</b> .....	<b>34</b>
<b>2.2.7</b>	<b>Usinabilidade</b> .....	<b>34</b>
2.3	FERRAMENTAS DE CORTE .....	35
<b>2.3.1</b>	<b>Ferramenta de corte cerâmica</b> .....	<b>36</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Características da ferramenta de corte cerâmica</b> .....	<b>37</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Ferramenta a base de alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) dopada com MgO</b> .....	<b>37</b>
2.4	MECANISMOS DE DESGASTE .....	38
2.5	VIDA DAS FERRAMENTAS DE CORTE .....	43
2.6	INTEGRIDADE SUPERFICIAL .....	45
<b>2.6.1</b>	<b>Parâmetros de rugosidades</b> .....	<b>45</b>
<b>2.6.2</b>	<b>Parâmetros de rugosidades utilizados</b> .....	<b>46</b>
<b>2.6.3</b>	<b>Valores de <i>cut-off</i> para medição</b> .....	<b>47</b>
2.7	PROJETO DE EXPERIMENTOS .....	48
<b>2.7.1</b>	<b>Metodologia de Taguchi</b> .....	<b>49</b>
<b>2.7.2</b>	<b>Arranjos ortogonais</b> .....	<b>50</b>
<b>2.7.3</b>	<b>Razão sinal/ruído</b> .....	<b>51</b>
2.8	MONITORAMENTO DO PROCESSOS DE USINAGEM .....	52

<b>2.8.1</b>	<b>Força de usinagem</b> .....	53
<b>2.8.2</b>	<b>Vibração</b> .....	54
<b>2.8.3</b>	<b>Emissão acústica (EA)</b> .....	55
<b>3</b>	<b>MÉTODOS E MATERIAIS</b> .....	56
3.1	MATERIAL DE TRABALHO .....	57
3.2	FERRAMENTA DE CORTE .....	59
3.3	MATRIZ DE EXPERIMENTOS .....	60
<b>3.3.1</b>	<b>Matriz de experimentos L<sub>16</sub></b> .....	60
3.4	PROCESSO DE TORNEAMENTO A SECO .....	61
3.5	MONITORAMENTO DO PROCESSO DE TORNEAMENTO .....	62
3.6	MEDIÇÃO DAS RUGOSIDADES .....	65
3.7	MEDIÇÃO DOS DESGASTES .....	65
3.8	ANÁLISES ESTATÍSTICAS .....	66
3.9	MICROSCOPIA DAS FERRAMENTAS DE CORTE .....	66
3.10	ENSAIOS DE VIDA .....	67
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	68
4.1	RESULTADOS PARA VARIÁVEL DESGASTE DE FLANCO (VB <sub>máx</sub> ) .....	69
4.2	RESULTADOS PARA VARIÁVEL (R <sub>a</sub> ) .....	75
4.3	RESULTADOS PARA VARIÁVEL (R <sub>t</sub> ) .....	81
4.4	RESULTADOS PARA VARIÁVEL POTÊNCIA DE USINAGEM .....	87
4.5	RESULTADOS PARA VARIÁVEL VIBRAÇÃO .....	93
4.6	RESULTADOS PARA VARIÁVEL EMISSÃO ACÚSTICA (EA) .....	98
4.7	RESUMO DOS MELHORES RESULTADOS .....	104
4.8	ANÁLISE DAS FERRAMENTAS DE CORTE E CAVACOS .....	105
4.9	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE VIDA .....	113
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	120
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	121

## 1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis são ligas especiais desenvolvidas para resistir à corrosão. Outras características desejáveis podem incluir excelente formabilidade, boa resistência à descamação e oxidação, resistência à deformação a elevadas temperaturas. O cromo é o elemento de liga que confere resistência à corrosão para os aços inoxidáveis, mas muitos outros elementos podem ser adicionados para estabilizar outras fases, proporcionar resistência à corrosão, ou produzir propriedades mecânicas melhoradas (KRAUSS, 2005). O aço inoxidável martensítico AISI 410 é o progenitor nos aços inoxidáveis martensíticos de baixo carbono, e é amplamente utilizado em muitas indústrias para partes essenciais de muitos produtos (TSAI et al., 2002). Esse material por possuir microestrutura martensítica apresenta uma dificuldade para a usinagem e interfere na usinabilidade.

O processo de usinagem é o processo de fabricação mais versátil em que a forma, o tamanho e o acabamento superficial desejados são obtidos por meio da remoção do excesso de material na forma de pequenos cavacos (SHARMA et al., 2016). Na usinagem os objetivos são precisão dimensional da peça, boa qualidade do acabamento superficial, alta taxa de produção, baixos custos e reduzido impacto ambiental. Na usinagem ocorrem elevadas temperaturas de corte que requerem o uso de fluidos de corte adequados, que são uma importante fonte de geração de resíduos e danos ambientais (GOINDI; SARKAR, 2017).

A usinagem a seco é ecologicamente desejável e as indústrias deverão considerar essa condição de usinagem para fazer cumprir as leis de proteção ambiental para segurança e saúde ocupacional. As vantagens são a não poluição da atmosfera, nenhum resíduo nos cavacos, não oferece perigo para a saúde e possibilita redução de custos na usinagem (SREEJITH; NGOI, 2000). A produção sustentável é uma ação que não representa uma ameaça para as gerações futuras e não deve representar um aumento de investimento (KROLCZYK et al., 2019). Na metodologia de usinagem a seco o produto pode ser fabricado sem o auxílio de fluidos de corte, resultando em melhor equilíbrio ecológico e menor custo de fabricação (SINGH et al., 2020).

As ferramentas de corte sofrem um desgaste mais elevado na condição de usinagem a seco devido ao aumento da temperatura de corte pela ausência de fluido refrigerante no processo. Outro fator que também interfere no desgaste da ferramenta de corte é a dureza do material da peça, ou seja, se o material foi endurecido por têmpera a usinagem apresenta maior dificuldade. O desempenho da ferramenta de corte é avaliado pela vida da ferramenta, que é determinada pela taxa de desgaste, e essa taxa é fortemente dependente dos mecanismos de desgastes. O conhecimento dos mecanismos de desgastes que atuam na ferramenta de corte é

fundamental para o desenvolvimento e melhoria, e depende de fatores como o material da peça, tipo de operação de corte, as propriedades do material da ferramenta e parâmetros de corte (DINIZ; MACHADO; CORRÊA, 2016). Muitos estudos foram conduzidos para investigar o desempenho da ferramenta de corte cerâmica na usinagem de diversos materiais duros, aqueles que estão entre (45–70 HRC) os quais são considerados de difícil usinagem (BENSOUILAH et al., 2016).

A alumina ( $Al_2O_3$ ) é a base de muitas ferramentas de corte cerâmicas, especialmente para usinagem de aços resistentes (GEVORKYAN et al., 2017). Sua estabilidade química e excelente resistência a elevadas temperaturas ( $T > 800\text{ }^\circ\text{C}$ ) torna a ferramenta superior em termos de dureza a quente, sua inércia química em combinação com sua baixa condutividade térmica leva a uma resistência a difusão e oxidação acima da média (BOBZIN, 2016). A alumina ( $Al_2O_3$ ) é um material cerâmico para muitas aplicações tecnológicas e possui várias propriedades especiais como alta dureza, inércia química e resistência ao desgaste. As cerâmicas à base de alumina podem manter até 90% de sua resistência, mesmo a  $1100\text{ }^\circ\text{C}$  (KUMAR; DURAI; SORNAKUMAR, 2004).

Esse trabalho teve como objetivo o estudo dos aspectos da usinagem por torneamento, na condição de usinagem a seco, com aplicação de ferramenta de corte cerâmica experimental à base de alumina ( $Al_2O_3$ ) dopada com óxido de magnésio (MgO). E verificar quais são as melhores condições de corte relacionadas com as variáveis de saída como desgaste de flanco ( $VB_{máx}$ ), rugosidades ( $R_a$  e  $R_t$ ), potência de usinagem, vibração, emissão acústica e vida da ferramenta.

## 1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Otimização dos parâmetros de corte no processo de usinagem por torneamento para obtenção de um processo mais robusto e de melhor desempenho;
- Análise e interpretação das variáveis de saída como desgaste de flanco ( $VB_{máx}$ ), rugosidades ( $R_a$  e  $R_t$ ), potência de usinagem, vibração e emissão acústica com auxílio do software de estatística Minitab17®;
- Analisar os desgastes das ferramentas de corte cerâmica experimental com auxílio de microscopia óptica;
- Testes de vida da ferramenta de corte para as melhores condições de corte baseadas no desgaste de flanco ( $VB_{máx}$ ).

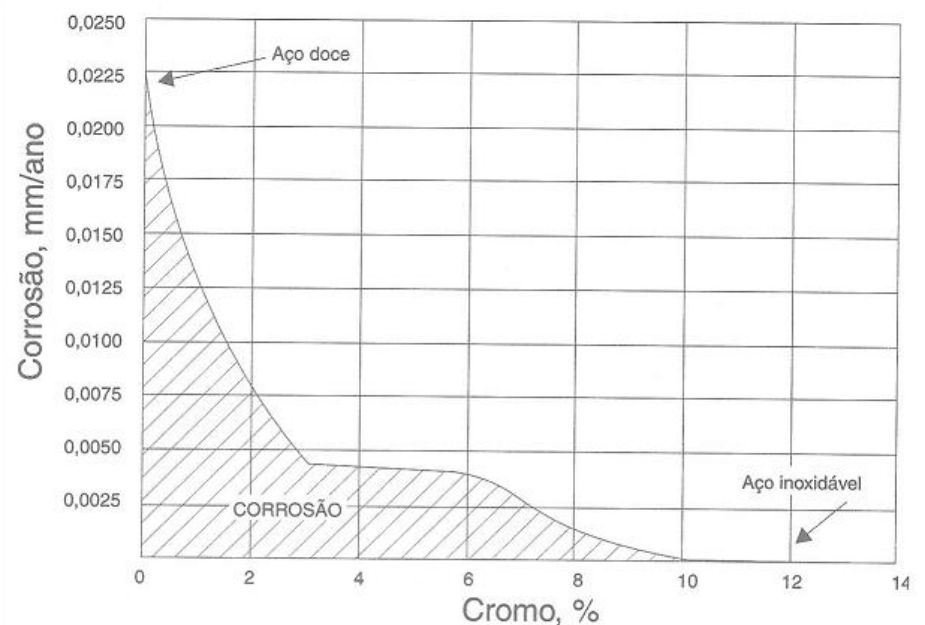
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse tópico, foi realizada uma contextualização dos fundamentos e conceitos para embasar os temas que deram suporte para pesquisa científica.

### 2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS

Três milênios se passaram entre a descoberta do ferro e o desenvolvimento de um meio de prevenção de sua corrosão, sendo os primeiros aços inoxidáveis introduzidos apenas no início do século XX (DURAND-CHARRE, 2003). As primeiras aplicações do aço inoxidável foram em cutelaria, canos de arma e tanques de ácido nítrico. Várias composições foram desenvolvidas tornando esse material com resistência mecânica e à corrosão, dessa forma, os fabricantes começaram a utilizar em maior número de aplicações (KALADHAR; SUBBAIAH; RAO, 2012). Aços com teores de cromo superiores a 12% têm grande resistência à oxidação e são comumente chamados de aços inoxidáveis, porém nenhum material é completamente inoxidável e deve ser adotada a correta utilização do material para aplicações em meios corrosivos (COSTA E SILVA; MEI, 2010). Na Figura 1, observa-se que os aços inoxidáveis apresentam uma boa resistência a corrosão, pois o percentual em cromo está diretamente relacionado com o desempenho desse material.

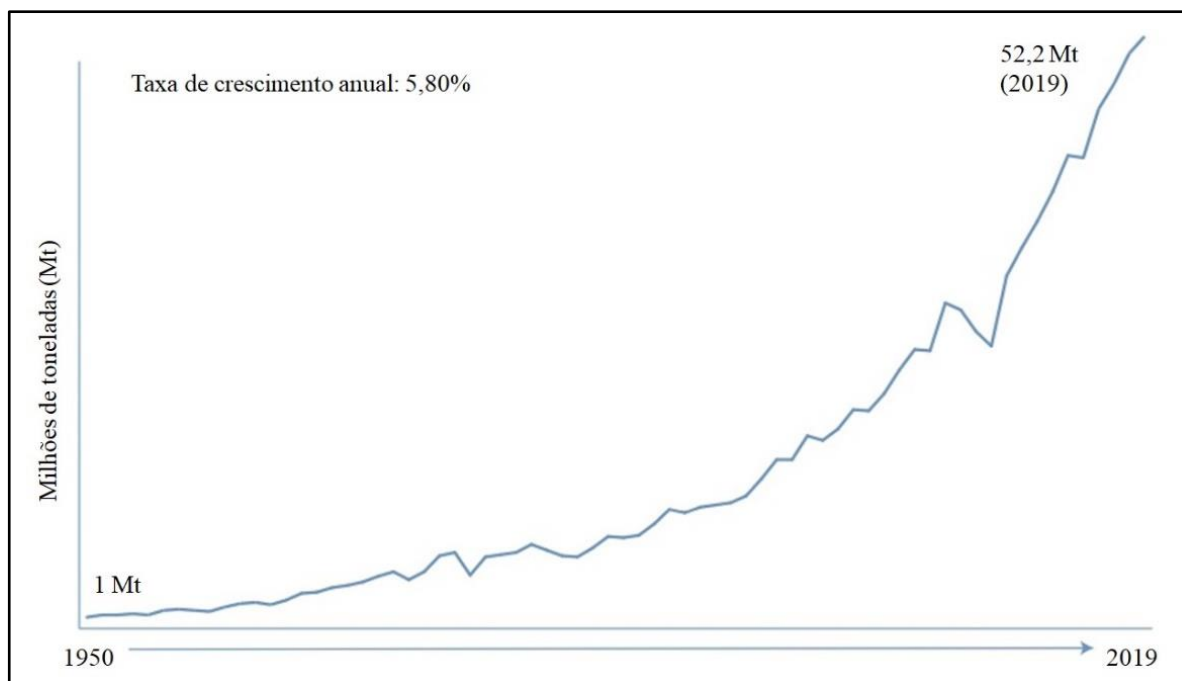
Figura 1 – Passividade dos aços-cromo expostos durante 10 anos na atmosfera industrial.



Fonte: Chiaverini (1988)

Na Figura 2, observou-se a taxa de crescimento do consumo mundial de aço inoxidável e verificou-se a importância ao longo dos anos. O consumo mundial passou de um milhão de toneladas em 1950 para 52,2 milhões de toneladas em 2019, ou seja, apresentou um aumento muito representativo na produção desse material

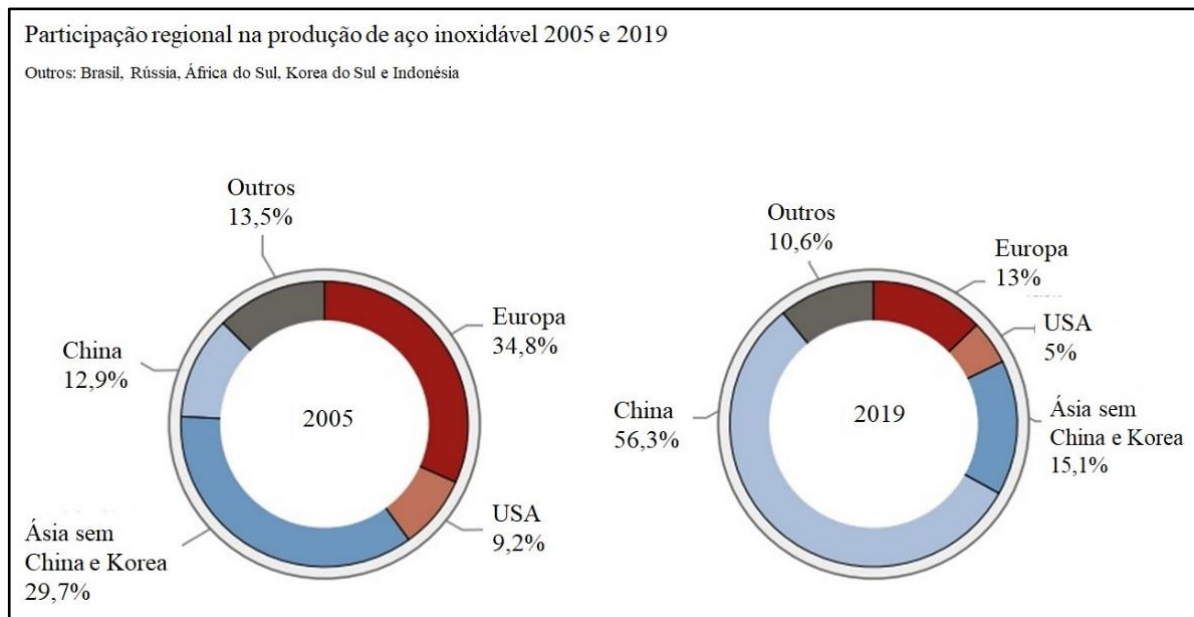
Figura 2 – Taxa de crescimento do consumo mundial de aço inoxidável.



Fonte: Adaptado de [www.worldstainless.org](http://www.worldstainless.org) (2020)

Na Figura 3, a comparação da produção da fundição de aços inoxidáveis por regiões nos anos de 2005 e 2019. Verificou-se que a China apresentou um significativo aumento na fundição de aços inoxidáveis em relação ao restante das regiões. A China passou de uma participação de 12,9% em 2005 para 56,3% em 2019, sendo assim, destaca-se sua forte presença nesse segmento.

Figura 3 – Comparação da produção da fundição de aços inoxidáveis por regiões nos anos de 2005 e 2019.



Fonte: [www.worldstainless.org](http://www.worldstainless.org) (2020)

### 2.1.1 Classificação dos aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis possuem três microestruturas principais: ferríticas, austeníticas e martensíticas (LO; SHEK; LAI, 2009). Os aços inoxidáveis são divididos em cinco grupos: aços inoxidáveis martensíticos, aços inoxidáveis ferríticos, aços inoxidáveis austeníticos, aços inoxidáveis Duplex (ferríticos-austeníticos) e aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação (COSTA E SILVA; MEI, 2010).

- a) **Ferríticos:** são ligas a base de ferro e cromo essencialmente ferríticas a todas as temperaturas, e que *não endurecem por tratamento térmico de têmpera*. Normalmente tem teores de cromo mais elevados do que os aços martensíticos e têm, naturalmente, menores teores de carbono. As principais classes são: AISI 405, 430, 430F, 446 e 502;
- b) **Austeníticos:** são ligas à base de ferro, cromo (16-30%), níquel (8-35%) predominantemente austeníticas e não são magnéticas. O teor de carbono é, em geral, inferior a 0,08%. São eles: AISI 301, 302, 304, 304L, 308, 310, 316, 317, 321, e 347. Outros aços inoxidáveis austeníticos incluem aqueles em que, por

questão de custo, parte do níquel é substituído por manganês ou nitrogênio (elementos estabilizadores de austenita). São eles: AISI 201, 202 e 204;

- c) Ferríticos-austeníticos (Duplex): microestruturas contendo austenita e ferrita em frações aproximadamente iguais que são obtidas com composições balanceadas de ferro, cromo (18-27%), níquel (4-7%), molibdênio (1-4%) e outros elementos, especialmente nitrogênio. São eles: AISI 329, UNS S32304 e S31803;
- d) Endurecidos por precipitação: ligas de ferro, cromo (12-17%), níquel (4-8%), molibdênio (0-2%) contendo adições que permitam o endurecimento da martensita de baixo carbono pela precipitação de compostos metálicos (alumínio, cobre, titânio e/ou nióbio);
- e) Martensíticos: podem ser tratados termicamente como os aços carbono ou de baixa liga, em que a resistência e dureza máximas dependem principalmente do teor de carbono (RAJASEKHAR, 2015). Por natureza, possuem microestrutura complexa, boa propriedade de resistência à corrosão e é ainda mais dura do que o aço inoxidável austenítico (VISHWAS et al., 2018). Os aços inoxidáveis martensíticos são utilizados para fabricação de componentes devido às suas propriedades mecânicas e moderada resistência à corrosão em condições de alta ou baixa temperatura (DALMAU et al., 2016).

### **2.1.2 Aços inoxidáveis martensíticos**

Como o nome indica, os aços inoxidáveis martensíticos são projetados para combinar a resistência da martensita com a resistência à corrosão conferida pelo cromo, enquanto limita a adição de elementos de liga mais caros (DURAND-CHARRE, 2003). Martensíticos são ligas de ferro e cromo (11-18%) com teor de carbono, em geral, acima de 0,10%. Recentemente estão sendo desenvolvidos e usados aços denominados “supermartensíticos”, os quais possuem carbono abaixo de 0,10% e extrabaixos teores de elementos residuais. Incluem-se nesta família os aços AISI: 403, 410, 414, 416, 420, 431, 440<sup>a</sup>, B e C, 501 (COSTA E SILVA; MEI, 2010).

A dispersão de carbeto na microestrutura aumenta a resistência ao desgaste por abrasão desses aços. Para aplicação à alta temperatura, a resistência ao amolecimento no revenimento é importante. Adições de molibdênio e vanádio são bastante eficientes nesse caso.

Adicionalmente, nióbio e nitrogênio têm efeito benéfico na redução do amolecimento no revenimento. A redução do teor de cromo causa a redução da resistência à oxidação. A adição de níquel aumenta a tenacidade dos aços martensíticos (COSTA E SILVA; MEI, 2010). Na Figura 4, pode ser observada a composição química dos aços inoxidáveis martensíticos.

Figura 4 – Designações, composições, propriedades mecânicas dos aços inoxidáveis.

Número AISI	Número UNS	Composição (%p) <sup>a</sup>	Condição	Propriedades Mecânicas		
				Limite de Resistência à Tração [MPa (ksi)]	Limite de Escoamento [MPa (ksi)]	Ductilidade [%AL em 50 mm (2 pol.)]
<i>Ferrítico</i>						
409	S40900	0,80 C, 11,0 Cr, 1,0 Mn, 0,50 Ni, 0,75 Ti	Recozido	380 (55)	205 (30)	20
446	S44600	0,20 C, 25 Cr, 1,5 Mn	Recozido	515 (75)	275 (40)	20
<i>Austenítico</i>						
304	S30400	0,08 C, 19 Cr, 9 Ni, 2,0 Mn	Recozido	515 (75)	205 (30)	40
316L	S31603	0,03 C, 17 Cr, 12 Ni, 2,5 Mo, 2,0 Mn	Recozido	485 (70)	170 (25)	40
<i>Martensítico</i>						
410	S41000	0,15 C, 12,5 Cr, 1,0 Mn	Recozido T & R	485 (70) 825 (120)	275 (40) 620 (90)	20 12
440A	S44002	0,70 C, 17 Cr, 0,75 Mo, 1,0 Mn	Recozido T & R	725 (105) 1790 (260)	415 (60) 1650 (240)	20 5
<i>Endurecível por Precipitação</i>						
17-7PH	S17700	0,09 C, 17 Cr, 7 Ni, 1,0 Al, 1,0 Mn	Endurecido por precipitação	1450 (210)	1310 (190)	1-6

<sup>a</sup> Restante da composição é constituída por ferro

T e R significa temperado e revenido

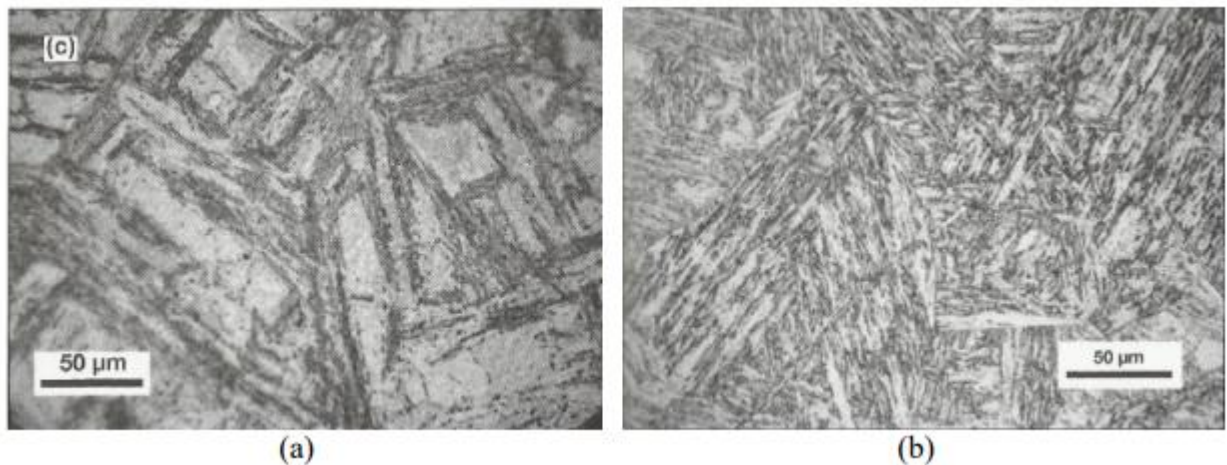
Fonte: Callister (2002)

### 2.1.3 Aço inoxidável martensítico AISI 410

Os aços inoxidáveis martensíticos AISI 410 são amplamente utilizados em aplicações de engenharia por terem boa propriedade mecânica devido ao teor de cromo (CHANDRASEKARAN et al., 2013). O aço inoxidável AISI 410 é o progenitor nos aços inoxidáveis martensíticos de baixo carbono comerciais e é amplamente utilizado em muitas indústrias para peças essenciais como peças para *Hard Disk Drive*, moldes de plástico, parafusos para extrusora, válvulas, eixos e rolamentos) devido a sua resistência à corrosão, alta resistência e tenacidade (TSAI et al., 2002).

Outras aplicações são para indústria automotiva e aeroespacial devido às suas propriedades mecânicas notáveis que auxiliam no bom funcionamento dos componentes (VISHWAS et al., 2018). As imagens de microestruturas do aço inoxidável martensítico AISI 410, nas condições temperado e revenido, conforme Figura 5. A estrutura martensítica é predominante (COLPAERT, 2008).

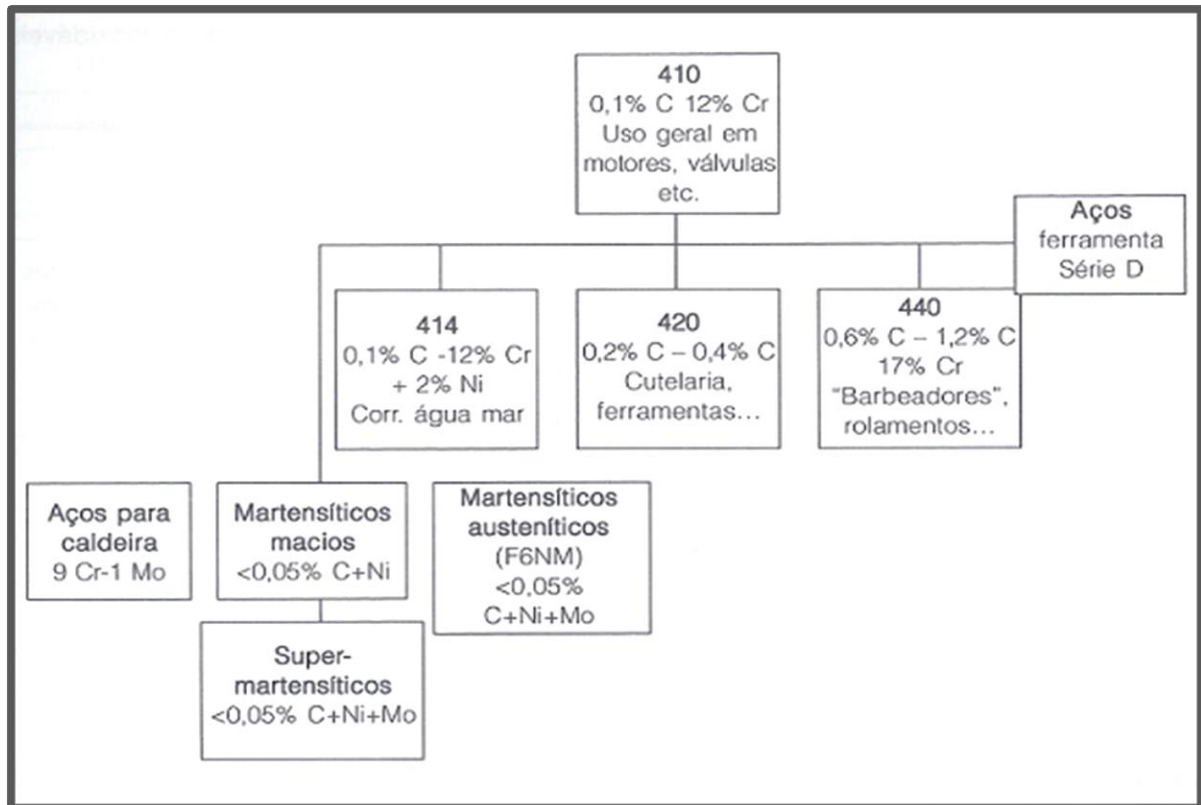
Figura 5 – Microestrutura do aço inoxidável martensítico AISI 410.



Fonte: Colpaert (2008) – (a) AISI 410 temperado; (b) AISI 410 revenido.

O aço inoxidável martensítico “básico” é o AISI 410. Elementos de liga podem ser adicionados a essa composição básica, como é mostrado na Figura 6. O aumento do teor de carbono conduz à maior dureza, com sacrifício da tenacidade e da soldabilidade (COSTA E SILVA; MEI, 2010).

Figura 6 - Principais aços inoxidáveis martensíticos derivados do AISI 410.



Fonte: Costa e Silva; Mei (2010)

#### 2.1.4 Aplicações do aço inoxidável martensítico AISI 410

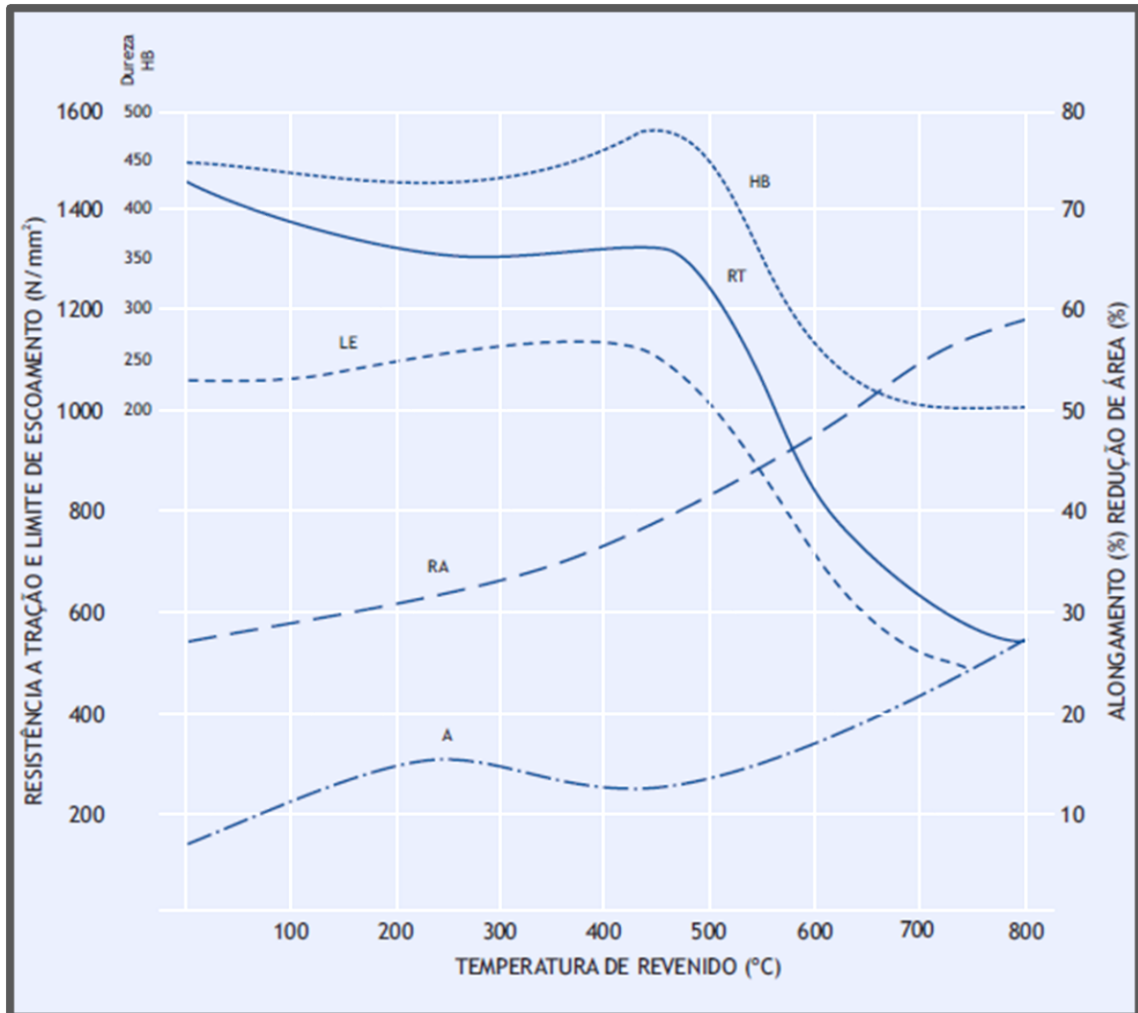
Os aços inoxidáveis martensíticos AISI 410 podem ser aplicados de muitas formas, tais como: peças que devem apresentar boa resistência à corrosão atmosférica, à água, à vapor d'água, a agentes medianamente corrosivos da indústria alimentícia, ao ácido bórico, aos ácidos graxos, ao vinagre, aos óleos minerais. As aplicações típicas para o aço AISI 410 são: palhetas para turbinas a vapor, eixo e rotores de bombas, pistões de motores marítimos; componentes para indústria petroquímica, alimentícia e farmacêutica (COSTA E SILVA; MEI, 2010).

#### 2.1.5 Propriedades mecânicas do aço inoxidável martensítico AISI 410

A variação das propriedades mecânicas em função do revenimento para a resistência à tração ( $N/mm^2$ ), limite de escoamento ( $N/mm^2$ ), dureza (HB), alongamento (%) e redução de área (%) são apresentadas na Figura 7. O aumento da temperatura de revenimento resulta em

um crescimento dos tamanhos dos grãos da microestrutura, dessa forma, as propriedades como dureza, resistência à tração e limite de escoamento a partir de uma certa temperatura tem suas respectivas curvas diminuindo os valores; e para as propriedades como alongamento e redução de área ocorre o inverso, ou seja, aumentado os valores

Figura 7 - Propriedades mecânicas médias devidas a deformação para o aço AISI 410.



Fonte: Costa e Silva; Mei (2010)

## 2.2 PROCESSO DE USINAGEM

A usinagem é amplamente utilizada para produzir componentes de máquinas para várias aplicações nas indústrias automotiva, aeroespacial e marítima. O número de operações de usinagem aumentou muito nas últimas décadas com a demanda por elementos de máquina e ino-

vações na manufatura (WICKRAMASINGHE et al., 2020). De todos os processos de fabricação para transformar metais, verifica-se que a usinagem apresenta as condições mais variadas. Usina-se materiais de vários tipos de durezas, fundidos ou forjados, dúcteis ou frágeis, com ponto de fusão alto ou baixo (TRENT; WRIGHT, 2000). A usinagem é um dos processos que fornece melhor qualidade dimensional e atende aos requisitos esperados como resultado dos recentes avanços na produção de ferramentas de corte de alta qualidade e máquinas-ferramenta e métodos de resfriamento inovadores (KAYNAK; LU; JAWAHIR, 2014).

### 2.2.1 Usinagem por torneamento

Torneamento é o processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar ao referido eixo (FERRARESI, 1970). Na Figura 8, tem-se uma operação de usinagem por torneamento.

Figura 8 – Processo de torneamento.



Fonte: Próprio autor

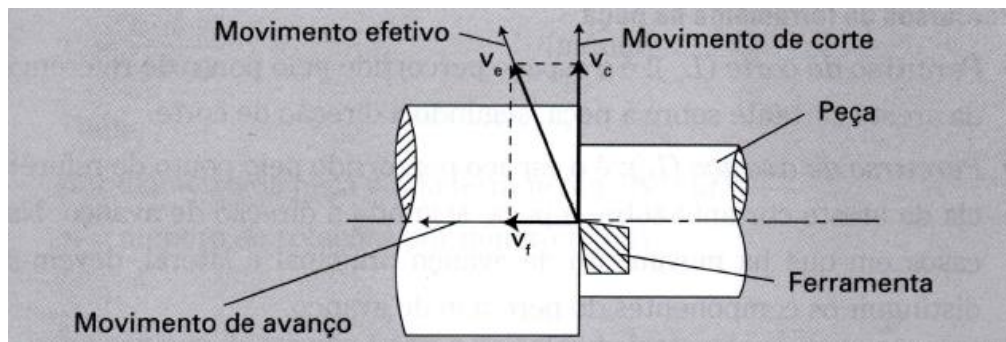
### 2.2.2 Definição dos movimentos no processo de usinagem

Os movimentos entre a ferramenta e a peça durante a usinagem são aqueles que permitem a ocorrência do processo de usinagem, tais movimentos são considerados durante o projeto e fabricação das máquinas ferramenta. Adota-se por convenção que os movimentos sempre estarão ocorrendo supondo-se a peça parada e todo o movimento sendo realizado pela ferramenta de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014). São eles:

- Movimento de corte: é o movimento entre a ferramenta e a peça que, sem a ocorrência concomitante do movimento de avanço, provoca remoção de cavaco durante uma única rotação ou um curso da ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014);
- Movimento de avanço: ocorre entre a ferramenta e a peça e que, com o movimento de corte, permite a remoção contínua ou repetida do cavaco;
- Movimento efetivo de corte: movimento entre a ferramenta e a peça a partir do qual resulta o processo de usinagem. Quando o movimento de avanço é contínuo, o efetivo é o resultante da composição dos movimentos de corte e de avanço;
- Direção de corte: direção instantânea do movimento de corte (MACHADO et al., 2015);
- Direção de avanço: direção instantânea do movimento de avanço;
- Direção efetiva: direção instantânea do movimento efetivo de corte;
- Velocidade de corte ( $v_c$ ): a velocidade de corte é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça no torneamento onde os movimentos de corte e avanço ocorrem concomitantemente. Sua unidade é (m/min) (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014);
- Avanço ( $f$ ): é o percurso de avanço em cada volta ou em cada curso da ferramenta e sua unidade é (mm/volta);
- Profundidade de usinagem ( $a_p$ ): é a profundidade de penetração da ferramenta em relação à peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho e sua unidade é (mm);
- Plano de trabalho ( $P_{fe}$ ): é um plano imaginário que contém as direções de corte e avanço, passando pelo ponto de corte escolhido;
- Ângulo da direção de avanço ( $\varphi$ ): é o ângulo entre a direção de avanço e a direção de corte no torneamento é constante ( $\varphi = 90^\circ$ );
- Ângulo da direção efetiva ( $\eta$ ): é o ângulo entre a direção efetiva e a direção de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Na Figura 9, tem-se a direções dos movimentos no torneamento.

Figura 9 – Direções dos movimentos no torneamento.



Fonte: Diniz, Marcondes, Coppini (2014)

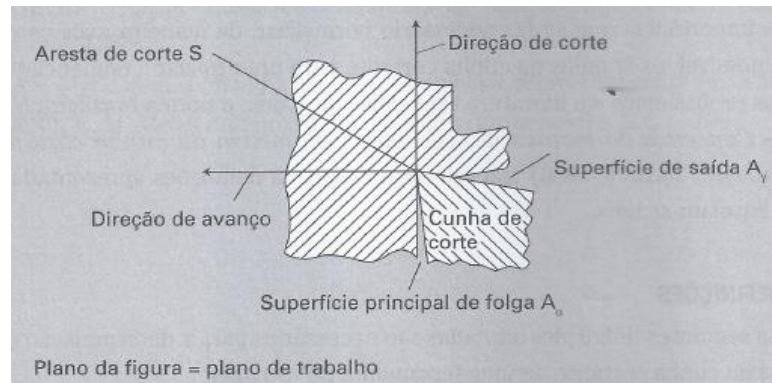
### 2.2.3 Geometria da ferramenta de corte

As definições adotadas para a determinação dos ângulos da cunha cortante de uma ferramenta de usinagem segundo (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014) são:

- Superfície de saída ( $A_\gamma$ ): é a superfície da cunha de corte sobre a qual o cavaco é formado e escoado durante a sua saída da região de corte;
- Superfície principal de folga ( $A_\alpha$ ): é a superfície da cunha de corte da ferramenta que contém sua aresta principal de corte e que defronta com a superfície em usinagem principal;
- Superfície secundária de folga ( $A'\alpha$ ): é a superfície da cunha de corte da ferramenta que contém sua aresta de corte secundária e que defronta com a superfície em usinagem secundária;
- Aresta principal de corte (S): é a aresta da cunha de corte formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga principal. Gera na peça a superfície em usinagem principal;
- Aresta secundária de corte (S'): é a aresta da cunha de corte formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga secundária. Gera na peça a superfície em usinagem secundária;
- Ponta de corte: é a parte da cunha onde se encontram as arestas principal e secundária de corte. A ponta de corte pode ser a intersecção das arestas, ou a concordância das duas arestas através de um arredondamento, ou o encontro destas através de um chanfro.

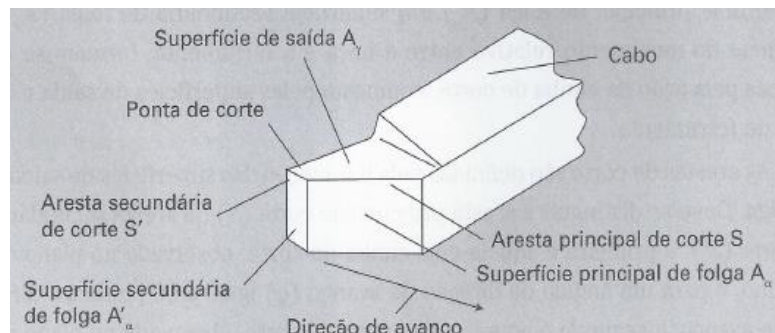
Nas Figuras 10 e 11, têm-se a cunha de corte e elementos da cunha de corte.

Figura 10 – Cunha de corte da ferramenta.



Fonte: Machado et al. (2015)

Figura 11 – Elementos da cunha de corte da ferramenta de tornear.



Fonte: Machado et al. (2015)

A taxa de remoção de material é obtida com auxílio da equação (1) a partir desses três parâmetros de corte.

$$Q = v_c * f * a_p \quad (1)$$

## 2.2.4 Formação, tipos e formas dos cavacos

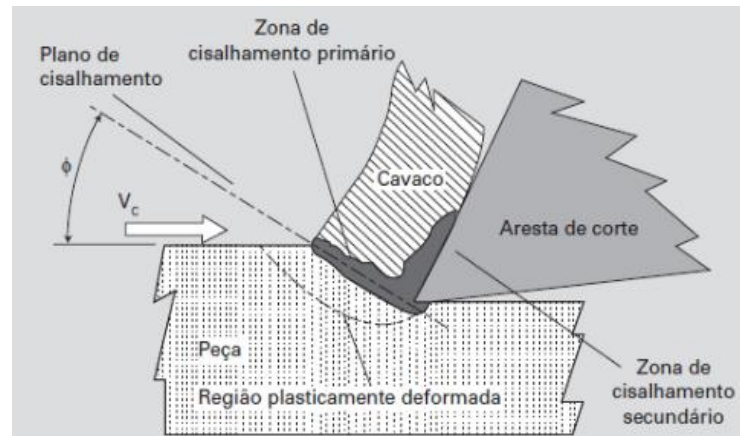
A base para um melhor entendimento dos processos de usinagem é o estudo científico da formação dos cavacos. Esse estudo possibilita avanços nos processos de usinagem e contribui para melhoria das arestas de corte, quebra-cavacos mais eficientes, além de novos e mais eficientes materiais para ferramentas e permite usinar vários tipos de materiais (MACHADO et al.,

2015). A formação do cavaco influencia fatores ligados à usinagem, como o desgaste da ferramenta, os esforços de corte, o calor gerado na usinagem, a penetração do fluido de corte. Dessa forma, estão presentes no processo de formação de cavaco aspectos econômicos e de qualidade da peça, segurança do operador, utilização adequada da máquina-ferramenta. Em geral, em condições normais de usinagem, a formação de cavacos ocorre da seguinte forma (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014):

- i) Recalque inicial: em decorrência da penetração da ferramenta de corte no material da peça, uma pequena porção desse material (ainda unido a peça) é pressionada contra superfície de saída da ferramenta;
- ii) Deformação e ruptura: o material da peça pressionado sofre, de início uma deformação elástica, em seguida, uma deformação plástica, que aumenta progressivamente até o estado de tensões provocar a ruptura. Essa ruptura ocorre muitas vezes por cisalhamento, embora exista um estado de tensões que combina tensões de compressão/tração e de cisalhamento e que leva o material à ruptura, devido à natureza frágil ou dúctil do material. Há uma formação de uma trinca que se propaga seguindo critérios de propagação de trincas próprio de cada material, caracterizando a ruptura. Sabe-se que há planos instantâneos de ruptura e de propagação de trincas que definem a região entre a peça e o cavaco chamada “zona primária de cisalhamento”. Na Figura 12, tem-se a zona de cisalhamento primário definida pelo ângulo de cisalhamento  $\theta$ , formado entre o plano de cisalhamento e a direção da velocidade de corte ( $v_c$ ).
- iii) Deslizamento das lamelas: a penetração contínua da ferramenta na peça, ocasionará uma ruptura parcial, ou completa, na região de cisalhamento, dependendo da extensão da propagação da trinca. As propriedades do material e os parâmetros de corte irão determinar quanto o segmento do material rompido permanecerá unido ao cavaco recém-formado, dando origens aos tipos de cavacos;
- iv) Saída do cavaco: devido ao movimento relativo entre ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção de material deformada e rompida (cavaco) sobre a superfície de saída da ferramenta. Enquanto tal evento ocorre, uma nova lamela de

material (imediatamente adjacente à porção anterior) está se formando e passando pelos mesmos processos.

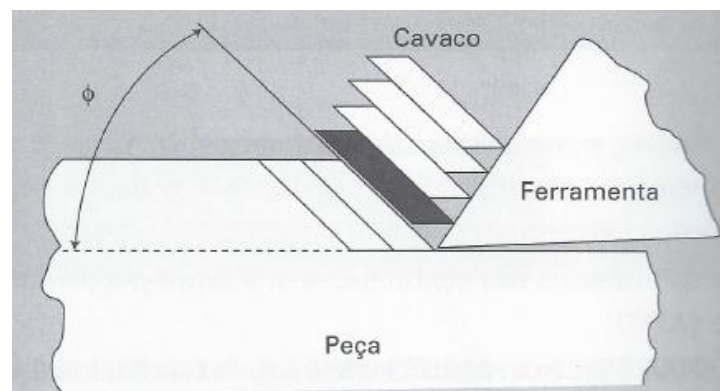
Figura 12 – Mecanismo de formação de cavacos.



Fonte: Machado et al. (2015)

Conclui-se que o fenômeno de formação de cavaco é periódico. Essa periodicidade foi comprovada experimentalmente por meio da medida da frequência e amplitude de variação da intensidade da força da usinagem. As primeiras observações do mecanismo de formação de cavacos permitiram a idealização de um modelo simplificado, comparando as lamelas a um “baralho de cartas”, inicialmente publicado por Piispanen, em 1937 (MACHADO et al., 2015). Na Figura 13, observa-se o modelo de Piispanen para a formação de cavacos.

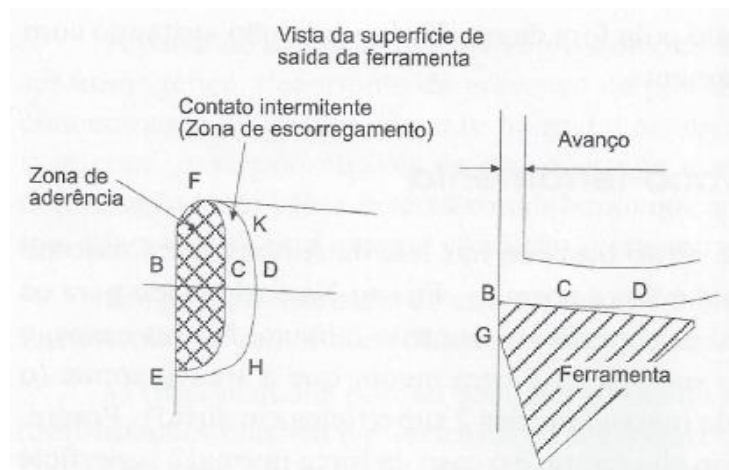
Figura 13 – Modelo de Piispanen.



Fonte: Machado et al. (2015)

Segundo Trent e Wright (2000) na interface cavaco superfície de saída da ferramenta, devido às altas tensões normais típicas do processo de usinagem, o cavaco adere sobre a ferramenta criando uma região na ferramenta chamada de zona de aderência e, vizinha a ela, uma zona de escorregamento entre o cavaco e a ferramenta, conforme a Figura 14.

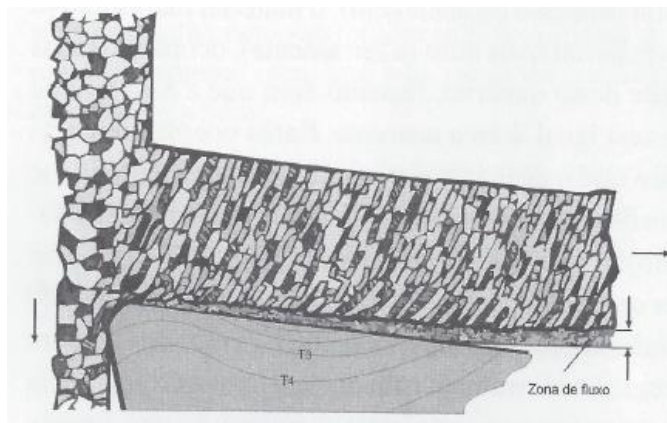
Figura 14 – Área de contato cavaco-ferramenta.



Fonte: Machado et al. (2015)

Nessas condições, o movimento do cavaco na zona de aderência logo acima da interface ocorre por cisalhamento intenso, criando a chamada zona de fluxo no cavaco. Assim na interface cavaco-ferramenta existe uma camada de material em que a velocidade de saída do cavaco aumenta gradualmente à medida que se percorre sua espessura. Terminada esta zona de fluxo, acaba o cisalhamento e a velocidade de saída do cavaco se torna constante (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014). Na Figura 15, observa-se a zona de fluxo do cavaco.







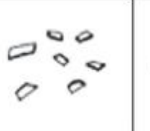





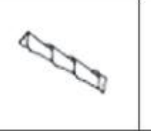
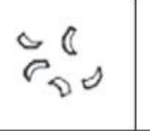




Figura 15 – Zona de fluxo do cavaco.



Fonte: Diniz, Marcondes e Coppini (2014).

Em relação à sua forma, os cavacos podem ter a seguinte classificação: em fita, helicoidais, em espiral, em lascas ou pedaços. Porém, a Norma ABNT NBR ISO 3685 (2017) classificou mais detalhadamente a forma dos cavacos. Na Figura 16, verifica-se as formas dos cavacos produzidos na usinagem.

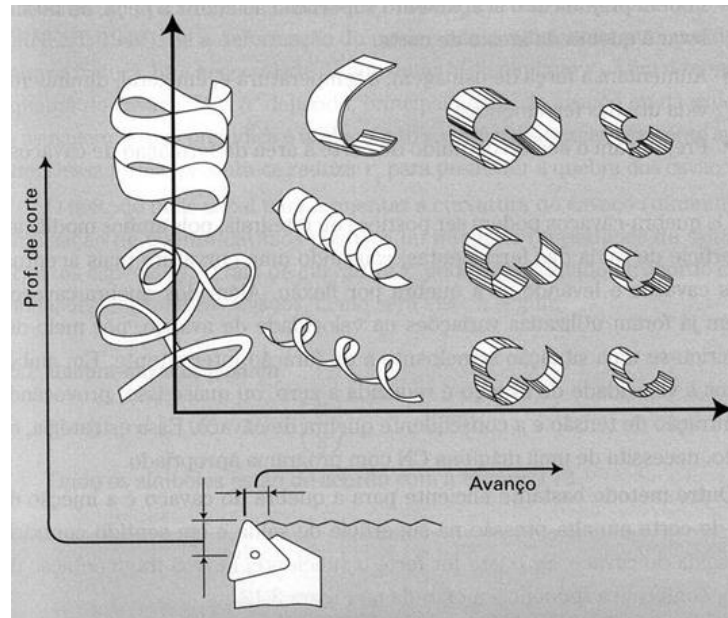
Figura 16 – Classificação das formas dos cavacos.

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- Salto		
							
1-3 - Emaranhado	2-3 - Emaranhado		4-3 - Emaranhado	5-3 - Emaranhado			

Fonte: Norma ABNT NBR ISO 3685 (2017).

O material da peça é o que mais influência a forma e o tipo dos cavacos, pois sua dureza e deformação plástica estão relacionadas. Maior dureza resulta em menor deformação plástica e menor dureza resulta em maior deformação plástica. O avanço é o parâmetro mais influente, seguido da profundidade de usinagem, a afetar a forma do cavaco. Maiores valores de avanço e profundidade de corte facilitam a quebra dos cavacos. Na Figura 17, tem-se a representação da influência dos parâmetros avanço e profundidade de corte na forma dos cavacos.

Figura 17 – Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos.



Fonte: Smith (1989)

Os parâmetros de corte, na maioria das vezes, são escolhidos para evitar ou reduzir a formação de cavacos contínuos, porém o método mais efetivo para solucionar esse problema é a utilização de quebra-cavacos (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

### 2.2.5 Usinagem sustentável

Nos processos de usinagem os fluidos de corte são amplamente utilizados, suas principais funções são lubrificar/resfriar, reduzir o atrito, remover partículas de metal, proteger de corrosão a peça, a ferramenta de corte e a máquina-ferramenta (BYERS, 2017). Os fluidos de corte apresentam vantagens no processo de fabricação, como também desvantagens que ocasionam um aumento do custo de usinagem (HUBBARD; CALLAHAN; STRONG, 2008). No Quadro 1, tem-se as vantagens e desvantagens da utilização dos fluidos de corte.

Quadro 1 – Vantagens e desvantagens da utilização dos fluidos de corte.

Vantagens	Desvantagens
Aumento da vida da ferramenta (nem sempre!)	Custos relacionados com a compra, armazenamento, manutenção e eliminação de fluidos residuais
Forças de corte e potências mais baixas	Com o passar do tempo, pode causar danos à peça e a máquina-ferramenta devido a má manutenção
Velocidades de corte e taxas de avanços mais altas	Impacto ambiental
Melhor qualidade da peça	Riscos à saúde do trabalhador

Fonte: Adaptado de Hubbard; Callahan; Strong (2008)

Usinagem ecologicamente sustentável e otimização do consumo de energia são requisitos essenciais para processos mais modernos e que agredem menos ao meio ambiente. Uma das principais preocupações é a implementação de fluidos de corte devido ao seu impacto significativo na qualidade da usinagem. O resfriamento por inundação revelou problemas ambientais críticos, portanto alternativas são necessárias para diminuir esse impacto. É necessário apresentar novas estratégias para melhorar o desempenho da usinagem e obter uma produção sustentável (HEGAB et al., 2019).

Nas últimas décadas, alternativas estão sendo desenvolvidas para diminuir as principais desvantagens da utilização dos fluidos de corte (BENEDICTO; CAROU; RUBIO, 2017). Muitas pesquisas são realizadas como o uso de lubrificantes e técnicas sustentáveis, aplicação de MQL, usinagem a seco e criogênica, ferramentas revestidas e otimização de parâmetros (LIU et al., 2017; BAGABER; YUSOFF, 2017). A usinagem a seco é considerada como um processo mais sustentável do que a usinagem com fluido de corte devido à ausência de lubrificantes e refrigerantes, o que resulta em um menor uso de recursos. As vantagens na usinagem a seco são eliminação de fluidos de corte prejudiciais ao meio ambiente e redução de custos com fluidos e corte e o descarte desse fluido (JADHAV; DALAVI; PATIL, 2020).

O método de usinagem com mínima quantidade de lubrificação (MQL) tem sido desenvolvido. Esse método utiliza uma mistura de ar comprimido e fluido de corte na forma de um aerossol (UYSAL; DEMIREN; ALTAN, 2015). A técnica MQL fornece à zona de corte uma pequena quantidade de lubrificante atomizado. A função de lubrificação é realizada pelo óleo lubrificante, que reduz o coeficiente de atrito entre o cavaco e a ferramenta de corte; o ar comprimido fornece a função de resfriamento e facilita a remoção dos cavacos (ABELLAN-NEBOT; ROGERO, 2019).

O processo de usinagem criogênica envolve a aplicação de um gás de resfriamento na zona de corte que reduz o calor gerado através do processo de corte na ferramenta, peça e cavaco. O método criogênico inclui nitrogênio líquido e dióxido de carbono. Esses variam consideravelmente tanto em termos de sua temperatura de fervura e em termos de entrega de refrigeração (TOPOGLOU et al., 2017). No Quadro 2, tem-se estimativa qualitativa do impacto ambiental de vários sistemas de lubrificação/refrigeração utilizados no processo de usinagem. Verificou-se que o impacto ambiental para a usinagem a seco, resfriamento criogênico e resfriamento gasoso são as opções que apresentaram os menores impactos ambientais.

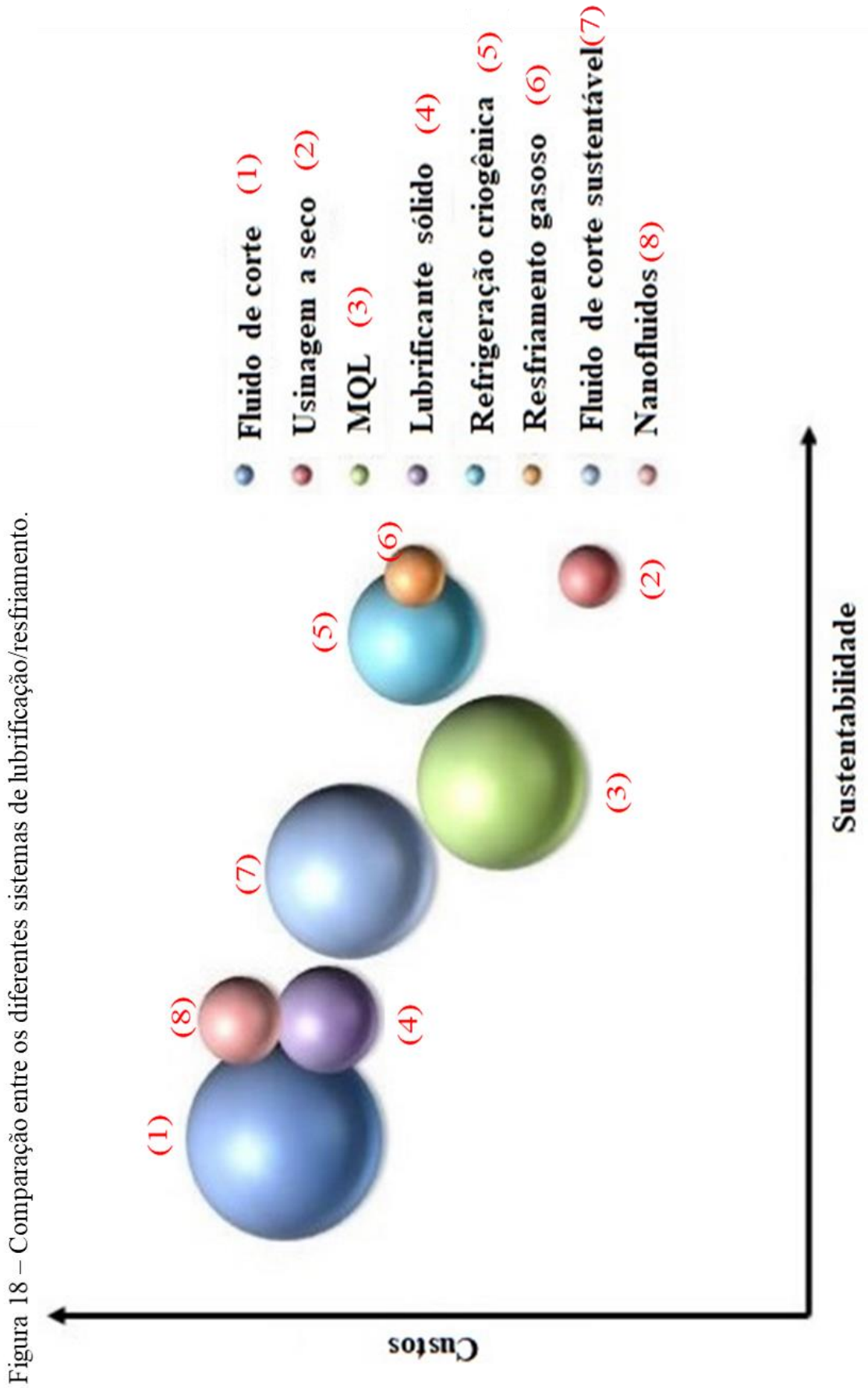
Quadro 2 - Estimativa qualitativa do impacto ambiental da lubrificação/refrigeração.

	<b>Resíduo</b>	<b>Fluido arrastado</b>	<b>Substâncias perigosas</b>	<b>Névoas e emissões</b>	<b>Risco a saúde</b>
<b>Fluido de corte</b>	*****	*****	****	*****	*****
<b>Usinagem a seco</b>	*	*	*	*	*
<b>MQL</b>	**	**	**	***	***
<b>Lubrificante sólido</b>	*****	*****	***	****	****
<b>Resfriamento criogênico</b>	*	*	*	** (1)	*
<b>Resfriamento gasoso</b>	*	*	*	*	*
<b>Fluidos de cortes sustentáveis</b>	****	*****	***	****	***
<b>Nanofluidos</b>	****	*****	Desconhecido	****	Desconhecido

*(\*) Muito baixo; (\*\*) baixo; (\*\*\*) médio; (\*\*\*\*) alto; (\*\*\*\*\*) muito alto; (1) muito baixo para nitrogênio líquido*

Fonte: Adaptado de Benedicto; Carou; Rubio (2017)

Na Figura 18, tem-se uma comparação entre oito diferentes sistemas de lubrificação/resfriamento com uma análise qualitativa de impacto ambiental e custos em processos de usinagem, onde o diâmetro considera o potencial aproveitamento industrial de acordo com a viabilidade técnica (BENEDICTO; CAROU; RUBIO, 2017).



Fonte: Adaptado de Benedicto; Carou; Rubio (2017)

### **2.2.6 Processo de usinagem a seco**

A operação de usinagem sem o uso de um fluido de corte é designada como "usinagem a seco". Isso significa que o custo e as questões ambientais associadas à aquisição, gerenciamento e descarte de fluidos de corte são eliminados (ZHAO; SHARMA, 2015). A usinagem a seco é a preferida pela indústria para economizar custos relacionados à aplicação de lubrificantes de resfriamento e eliminar influências negativas no meio ambiente (TOPOGLOU et al., 2017).

O corte a seco tem uma boa aplicação em muitos campos de processamento de materiais como metais não ferrosos e ligas. Temperaturas mais altas são produzidas durante o corte a seco e, portanto, têm requisitos mais elevados na resistência ao calor e resistência ao desgaste da ferramenta, portanto a seleção é crucial. O corte a seco requer que o material da ferramenta não apenas tenha alta dureza e tenacidade a quente, mas também boa resistência ao desgaste, resistência ao choque térmico e resistência à aderência a quente (JIAO; CHEN, 2020).

Novas ferramentas e métodos de revestimento de ferramentas (cerâmica, diamante, multicamadas) foram desenvolvidos para ter uma resistência maior geração de calor de corte e aumentar a vida da ferramenta de corte (JADHAV; DALAVI; PATIL, 2020). A geometria e a estrutura da ferramenta devem atender aos requisitos de corte para quebrar e remover os cavacos.

### **2.2.7 Usinabilidade**

A usinabilidade é uma grandeza que expressa um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro como referência padrão. Essas propriedades são aquelas que expressam seu efeito sobre grandezas mensuráveis inerentes ao processo, tais como: vida da ferramenta de corte, acabamento superficial da peça, esforços de corte, temperatura de corte, produtividade e características do cavaco. As propriedades dos materiais que interferem na usinabilidade são dureza, resistência mecânica, ductilidade, condutividade térmica, abrasividade e encruamento (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Para materiais, geralmente acima de 35 HRC, as dificuldades aumentam devido às altas forças de corte e calor gerado que ocasiona rápido desgaste e diminui a vida da ferramenta. Durezas acima de 45 HRC apresentam dificuldades ainda maiores devido aos cavacos que passam de contínuos para serrilhados formados por cisalhamento localizado, aumentando as forças e as temperaturas ainda mais (MACHADO; DINIZ, 2017). O torneamento de acabamento de material endurecido é um processo de usinagem emergente que permite aos fabricantes usinar

materiais com dureza superior a 45 HRC com ferramentas de corte apropriadas. A usinagem de aço endurecido é feita com materiais de ferramentas avançadas, como nitreto cúbico de boro policristalino (PCBN) ou cerâmica, sem qualquer auxílio de fluido de corte em um torno rígido ou centro de torneamento (BENLAHMIDI et al.; 2017).

### 2.3 FERRAMENTAS DE CORTE

As características das ferramentas de corte são extremamente importantes no processo de usinagem. O projeto, geometria, material da ferramenta de corte e tempo de vida são parâmetros importantes que afetam diretamente a taxa de produção, custo e a qualidade do produto (ZHAO et al., 2017). O desenvolvimento de materiais para ferramentas de corte quimicamente estáveis com propriedades mecânicas aprimoradas está se tornando fundamental. Há também um esforço no desenvolvimento de ferramentas de corte capazes de operar em altas velocidades de corte por mais tempo que as ferramentas industrializadas atualmente (GUTIÉRREZ-GONZÁLEZ et al., 2016).

Os materiais das ferramentas de corte devem ser capazes de resistir a condições extremas de corte, como alta temperatura e atrito entre a peça/ferramenta e cavaco/ferramenta. Portanto, eles devem apresentar uma variedade de propriedades para atender esses requisitos (GRZESIK, 2017). São elas:

a) Propriedades mecânicas

- Alta dureza em temperaturas elevadas;
- Alta resistência à deformação para evitar a deformação plástica da aresta de corte;
- Alta rigidez para manter a precisão;
- Alta resistência à fadiga para resistir à carga mecânica;
- Alta resistência à fratura.

b) Propriedades térmicas

- Condutividade térmica para transferir a temperatura da aresta de corte;
- Resistência ao choque térmico.

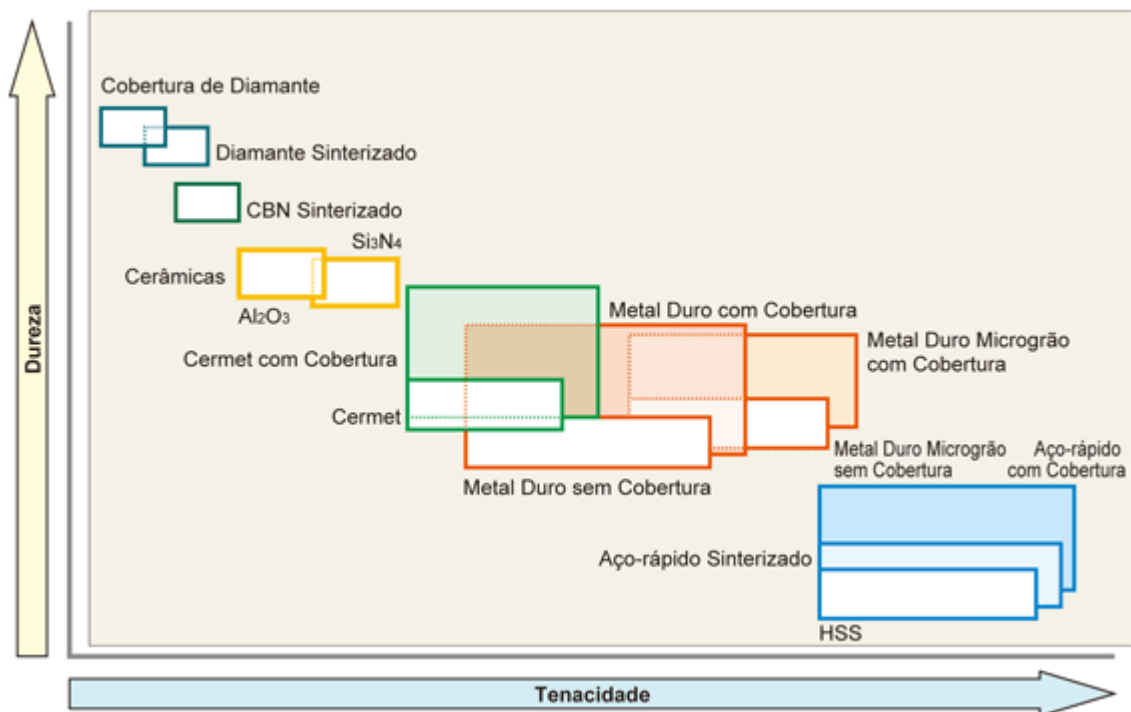
c) Composição química estável

d) Propriedades tribológicas

- Resistência ao desgaste;
- Lubricidade adequada para evitar acúmulo na aresta de corte.

Essas propriedades não se reúnem necessariamente em um só material, mas, dependendo da aplicação, priorizam-se algumas delas, que possam ser reunidas (MACHADO et al., 2015). Na Figura 19, tem-se uma classificação das ferramentas de corte em função de sua dureza e tenacidade. Nessa tabela, verificou-se que a ferramenta cerâmica apresenta uma dureza elevada, porém uma baixa tenacidade. Dessa forma, confirma as características de alta resistência ao desgaste e baixa resistência aos impactos por serem materiais frágeis.

Figura 19 – Classificação das ferramentas de corte em função da dureza e tenacidade.



Fonte: [www.mitsubishi](http://www.mitsubishi.com) (2021)

### 2.3.1 Ferramenta de corte cerâmica

Em 1905, os alemães começaram a estudar a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) como ferramenta de corte. A primeira patente britânica de ferramenta de corte cerâmica de alumina foi conferida em 1912. Neste tipo de material de ferramenta o teor de ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) é acima de 99%. Elas são preparadas pelo método de prensagem a quente com uma pequena quantidade de agentes de sinterização

como MgO, NiO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> (LIKE et al., 2007). O interesse em ferramentas de corte cerâmica é devido à sua significativa resistência ao calor e ao desgaste em comparação com aços rápidos e metal duro. Com o uso de tais materiais, a velocidade de corte pode ser aumentada de 1,5 a 8 vezes em comparação com ferramentas de metal duro (GRIGORIEV et al., 2019).

As propriedades das cerâmicas são controladas por aspectos da microestrutura, tais como densidade e tamanho de grão do material fabricado. No entanto, defeitos microestruturais ou heterogeneidades como poros grandes e grãos anormalmente grandes, no material fabricado, têm um impacto sobre as propriedades que são limitadas por falha mecânica. Os eventos de falha quase sempre são iniciados em regiões de heterogeneidade física ou química (LIN; DE JONGHE; RAHAMAN, 1997).

A ferramenta cerâmica foi desenvolvida paralelamente ao metal duro, ela possui alta dureza e também pode suportar muito bem altas temperaturas. Uma desvantagem é sua fragilidade. Os materiais cerâmicos usados para ferramentas de corte com mais frequência são Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (nitreto de silício). Foram encontradas maneiras de lidar efetivamente com o comportamento frágil da cerâmica. O reforço de fibra que foi introduzido conduziu a uma melhoria acentuada nas suas características a este respeito (STAHL, 2012).

### **2.3.2 Características da ferramenta de corte cerâmica**

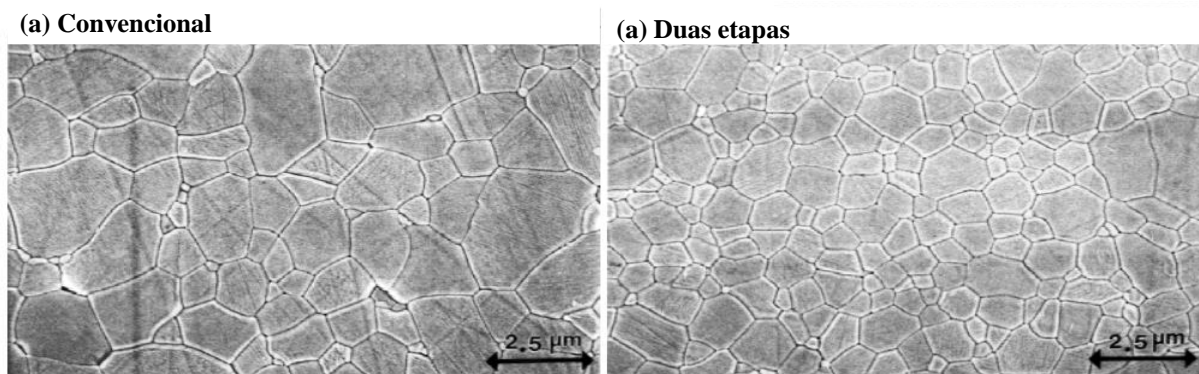
Distingue-se entre dois grupos diferentes de cerâmicas usadas para fins de corte de metal: *cerâmicas de óxido* e *cerâmicas de nitreto*. Cerâmicas de óxido, que consistem principalmente de óxido de alumínio, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, são basicamente muito frágeis. Na sinterização do material faz-se uso de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de grão fino que também contém uma pequena quantidade (<0,5%) de MgO. Este último reduz o crescimento do grão e, portanto, confere-lhe uma estrutura mais resistente (STAHL, 2012).

### **2.3.3 Ferramenta a base de alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) dopada com MgO**

O óxido de magnésio (MgO) é um dos principais dopantes utilizados na sinterização por facilitar o mecanismo de prevenção do crescimento anormal dos grãos gerando uma uniformidade na microestrutura, esta capacidade o torna um dopante com características boas para a sinterização da alumina, agindo diretamente no processo de aceleração do mecanismo difusivo no contorno de grão, proporcionando maior densificação, e redução da porosidade do corpo sólido após sinterizados (LIN; DE JONGHE; RAHAMAN, 1997).

Ainda em seus estudos (LIN; DE JONGHE; RAHAMAN, 1997) utilizaram duas técnicas de sinterização nos experimentos: sinterização convencional e sinterização em duas etapas. Exceto pelo aquecimento isotérmico prolongado que foi usado no estágio de pré-espessamento da técnica de duas etapas, a sinterização convencional foi realizada nas mesmas condições que foram usadas na técnica de duas etapas. Na Figura 20, tem-se a diferença das microestruturas que ocorreram por sinterização convencional e em duas etapas. A técnica com sinterização em duas etapas produziu uma microestrutura com grãos menores e mais controlada em relação a técnica convencional e, também uma inibição do crescimento anormal dos grãos que evita porosidade.

Figura 20 – Microestrutura com sinterização convencional e em duas etapas.



Fonte: Adaptado de Lin; De Jonghe; Rahaman (1997)

## 2.4 MECANISMOS DE DESGASTE

As ferramentas de corte podem ser utilizadas no processo de usinagem até seu fim de vida, e isso ocorre por dois motivos (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014):

- 1) Desgastes: caracterizado como a perda contínua de forma microscópica das partículas da ferramenta de corte em função da ação contínua do corte.
- 2) Avárias: é uma ocorrência de forma abrupta e inesperada na ferramenta de usinagem, pode ser lascamento, trincas ou quebra da aresta de corte.

As ferramentas de corte estão sujeitas a altas tensões localizadas, altas temperaturas, deslizamento do cavaco ao longo da superfície de saída e de flanco da ferramenta. Essas condições

induzem aos desgastes, que por sua vez afetam negativamente a vida da ferramenta, a qualidade da superfície usinada e sua precisão dimensional (KUMAR; DURAI; SORNAKUMAR, 2006).

Os principais mecanismos de desgaste são:

Aresta postiça de corte: na usinagem, muitas vezes, pode-se formar na superfície de contato entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta, uma camada de cavaco que permanecendo aderida à aresta de corte modifica o comportamento com relação a força de corte, acabamento superficial da peça e desgaste da ferramenta. A aresta postiça de corte tende a crescer gradualmente até um momento em que se rompe bruscamente, causando uma perturbação dinâmica. Parte da aresta postiça que se rompe é carregada com o cavaco e parte adere à peça, prejudicando seu acabamento superficial (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

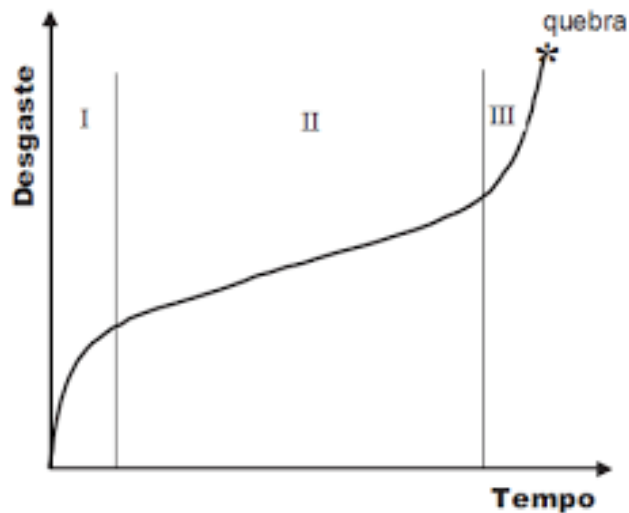
Abrasão: é uma das principais causas de desgastes das ferramentas, tanto desgaste frontal como de cratera, porém é mais proeminente no desgaste frontal, já que a superfície de folga atrita com um elemento rígido, que é a peça, enquanto a superfície de saída atrita com um elemento flexível, que é o cavaco. O desgaste pela abrasão é devido a presença de partículas duras no material da peça e pela temperatura de corte, que reduz a dureza da ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Adesão (attrition): se desenvolve em um processo em que uma aresta postiça ou fluxo de material irregular aparece e partículas microscópicas são retiradas da superfície da ferramenta e carregadas com o fluxo do material da peça, deixando pequenas cavidades na superfície da ferramenta (MACHADO et al., 2015).

Difusão: Esse mecanismo envolve a transferência de material, no nível atômico, e é fortemente dependente da temperatura, do tempo e da solubilidade dos elementos envolvidos na zona de fluxo (MACHADO et al., 2015).

Oxidação: As altas temperaturas e presença de ar e água (contida nos fluidos de corte) geram oxidação para a maioria dos metais. A maioria dos fluidos de corte contém elementos antioxidantes e, por isso, o fluido propriamente não causa oxidação, porém não se tomando os devidos cuidados para a conservação do fluido na máquina, ele pode se tornar ácido e provocar corrosão/oxidação na ferramenta de corte (MACHADO et al., 2015). Na Figura 21, tem-se a evolução do desgaste da ferramenta de corte com o padrão de comportamento até atingir o final da vida da ferramenta. É dividido em três estágios:

Figura 21 – Evolução do desgaste da ferramenta de corte.



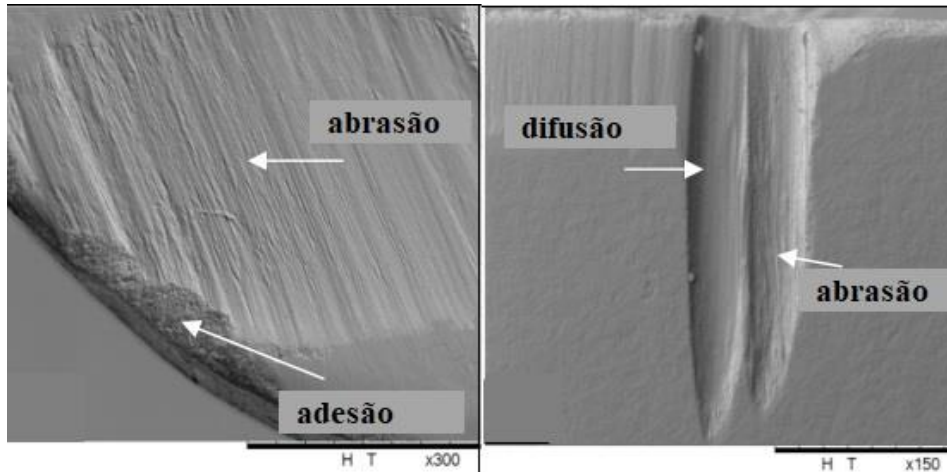
Fonte: Machado et al (2015)

- a) Estágio I: a ferramenta apresenta um rápido crescimento do desgaste, que é o resultado de uma acomodação do par tribológico do sistema. No final deste estágio há uma diminuição da taxa de desgaste (ocorre uma inflexão na curva). Essa diminuição do desgaste do primeiro trecho irá se refletir no segundo trecho;
- b) Estágio II: há uma acomodação da evolução do desgaste, que cresce lentamente e de forma praticamente constante;
- c) Estágio III: começará quando no estágio II ocorre uma nova inflexão na curva, mostrando que o desgaste está aumentando de forma mais acelerada. Neste estágio, a ferramenta atinge rapidamente o seu final de vida. Se caso neste estágio a ferramenta não for reafiada ou substituída, poderá vir a falhar rapidamente, pois sua geometria de corte está comprometida devido ao desgaste, o que acarreta grandes níveis de atrito, geração de calor e elevadas tensões.

Em seus estudos de usinagem (CORRÊA; SCHROETER; MACHADO, 2017) com aço inoxidável martensítico (S41000) utilizando ferramenta de metal duro com técnica de revestimento CVD (*Chemical vapor deposition*) com tripla camada de TiC/TiCN/TiN, designação ISO SNMG 12 04 08 - MF - GC235 (M25 – M40) na condição de Teste 1 ( $v_c = 100$  m/min;  $f = 0,35$  mm/rev e  $a_p = 1,00$  mm) nas superfícies de folga e saída observaram abrasão, difusão e adesão. Na condição do Teste 2 ( $v_c = 200$  m/min;  $f = 0,35$  mm/rev e  $a_p = 2,00$  mm) nas superfícies de folga e de saída observaram difusão. Na condição do Teste 3 ( $v_c = 100$  m/min;  $f = 0,20$  mm/rev e  $a_p = 2,00$  mm) na superfície de folga observaram abrasão, difusão e adesão e

na superfície de saída apenas abrasão. Na condição do Teste 4 ( $v_c = 130$  m/min;  $f = 0,20$  mm/rev,  $a_p = 1,00$  mm) tanto nas superfícies de folga como de saída observaram abrasão, difusão e adesão. Na Figura 22, tem-se alguns mecanismos de desgaste presentes nesse estudo.

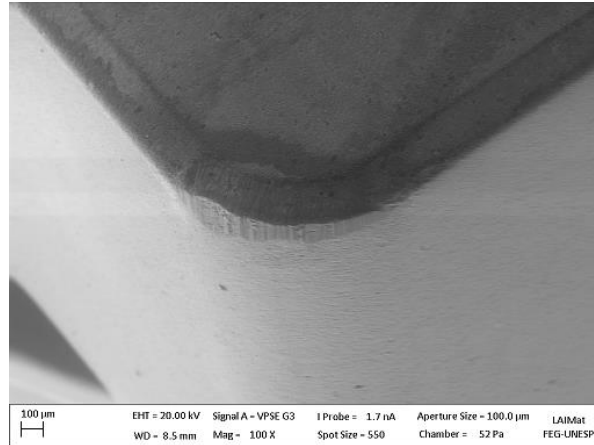
Figura 22 – Mecanismos de desgaste (abrasão, difusão e adesão).



Fonte: Adaptado de Corrêa; Schroeter; Machado (2016)

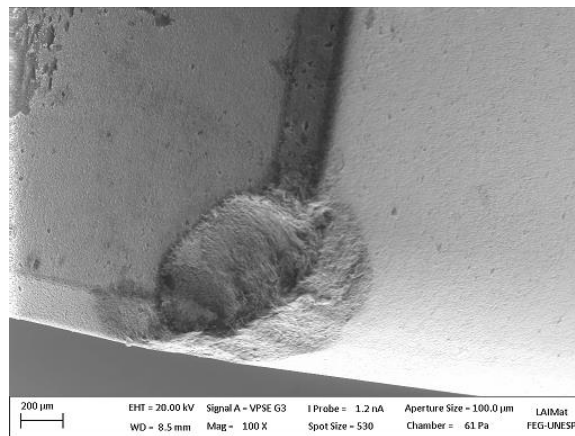
No seu estudo (DE PAULA et al., 2019) avaliou o desempenho da ferramenta de corte de cerâmica experimental de alumina dopada com óxido de magnésio ( $Al_2O_3 + MgO$ ). A ferramenta com geometria SNGN 120408 (12,76 x 12,76 x 4,76 mm, raio de ponta de 0,8 mm, chanfro de 0,2 mm e ângulo de  $20^\circ$ ). No torneamento do aço inoxidável martensítico AISI 410 endurecido na condição de usinagem a seco com auxílio de um fatorial completo utilizou várias condições de corte com os seguintes parâmetros de corte ( $v_c = 400-500-600$  m/min;  $f = 0,05-0,1-0,2-0,3$  mm/rev;  $a_p = 0,5$  mm) . Nas ferramentas de corte observou-se o mecanismo de desgaste por abrasão, desgaste de cratera e fratura. Na Figura 23, tem-se desgaste por abrasão, na Figura 24, tem-se o desgaste de cratera e a fratura da ferramenta, na Figura 25.

Figura 23 – Abrasão na ferramenta de corte cerâmica (400-0,05-0,50) para  $VB_{m\acute{a}x} = 0,163$  mm.



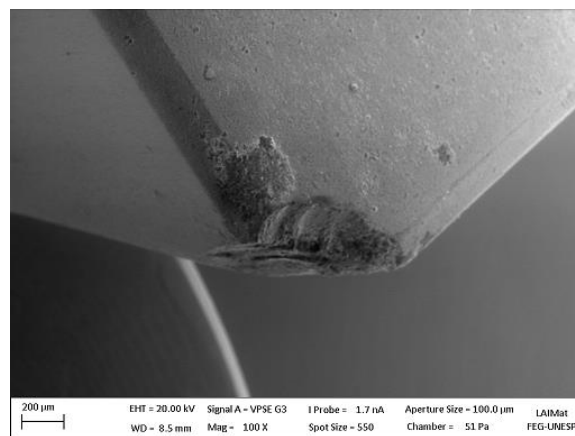
Fonte: De Paula et al. (2019)

Figura 24 – Cratera na ferramenta de corte cerâmica (600-0,20-0,50) para  $VB_{\text{máx}} = 0,812$  mm.



Fonte: De Paula et al. (2019)

Figura 25 – Fratura da ferramenta de corte cerâmica (600-0,10-0,50) para  $VB_{\text{máx}} = 0,948$  mm.



Fonte: De Paula et al. (2019)

## 2.5 VIDA DAS FERRAMENTAS DE CORTE

Vida de uma ferramenta é o tempo que a mesma trabalha efetivamente até perder a sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido (FERRARESI, 1970). Um critério de vida da ferramenta representa o ponto em que uma ferramenta de corte deixa de funcionar como deveria em uma determinada aplicação, enquanto um critério de desgaste representa o ponto a que se decide substituir uma ferramenta de corte em vista do risco de sua falha de funcionamento. Assim, o critério de desgaste contém uma certa margem de quanto tempo será possível utilizá-lo (STAHL, 2012).

No cálculo da vida da ferramenta é necessário o auxílio dos conceitos de comprimento de corte ( $l_c$ ), velocidade de corte ( $v_c$ ), avanço ( $f$ ), percurso de avanço ( $l_f$ ) e vida da ferramenta ( $T$ ) em [min]; e as seguintes equações (2), (3), (4) e (5).

$$l_c = \frac{v_c.T}{1000} [Km] \quad \text{equação (2)}$$

$$l_f = f.n.T [mm] \quad \text{equação (3)}$$

$$v_c = \frac{\pi.D.n}{1000} [m/min] \quad \text{equação (4)}$$

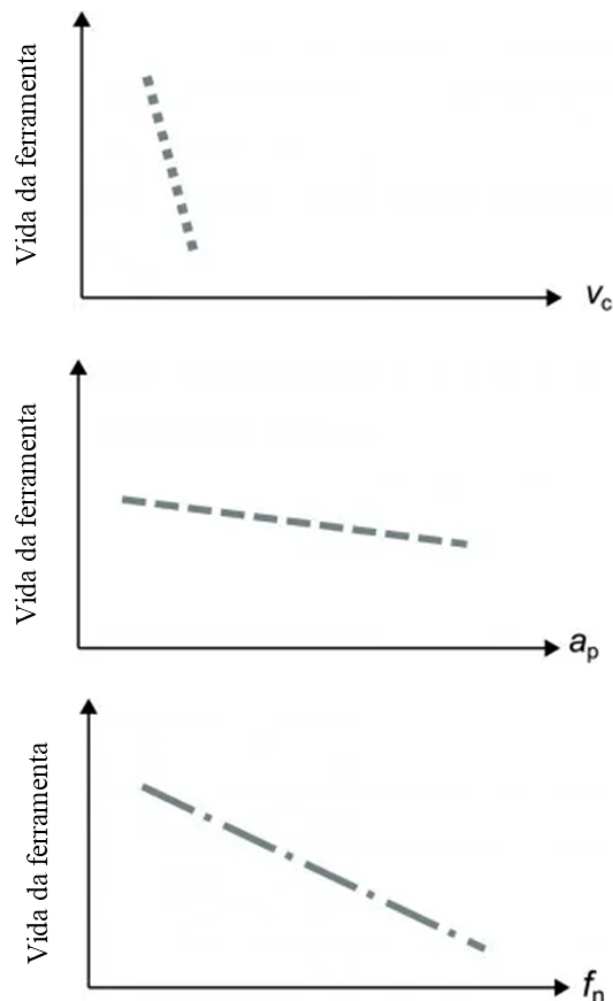
Das equações (2), (3), (4), tem-se:

$$l_c = \frac{\pi.D.l_f}{1000.f} [m] \quad \text{equação (5)}$$

Na Figura 26, tem-se o efeito dos parâmetros de corte na vida da ferramenta de corte, nota-se que o parâmetro velocidade de corte é o mais crítico, seguido da profundidade de corte.

A velocidade de corte é o parâmetro que mais influencia no desgaste, pois quanto maior, maior é a energia (calor) que é imputada ao processo, sem aumentar a área da ferramenta que recebe este calor. Quanto maior o avanço, maior a quantidade de calor imputada ao processo, porém simultaneamente aumenta a área da ferramenta que recebe esse calor. A influência da profundidade de corte é menor, já que ao ser aumentada, não altera a energia destinada ao corte por unidade de área, nem a velocidade de retirada do cavaco, mas somente faz com que um maior volume seja retirado por meio do uso de uma maior porção da aresta de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

Figura 26 – Efeito dos parâmetros de corte na vida da ferramenta de corte.



Fonte: Adaptado de [www.sandvik.coromant.com](http://www.sandvik.coromant.com) (2021)

## 2.6 INTEGRIDADE SUPERFICIAL

A condição final de uma superfície usinada é devido a um processo que envolve deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e reações químicas. O conceito de integridade superficial engloba também outras características das superfícies em serviço e de camadas abaixo dela (MACHADO et al., 2015).

No Quadro 3, tem-se as alterações que podem ocorrer em superfícies usinadas e uma classificação das mesmas.

Quadro 3 - Classificação das alterações na integridade superficial.

Integridade superficial	Acabamento	Ondulações
		Falhas
		Rugosidade
	Alterações subsuperficiais	Fatores mecânicos
Rebarbas		
Fatores metalúrgicos		Alteração de microdureza
		Micro e macrotrincas
		Tensões residuais
		Recristalização
		Transformações metalúrgicas

Fonte: Adaptado de Machado et al. (2015)

### 2.6.1 Parâmetros de rugosidade

Rugosidade de uma superfície é composta de irregularidades finas ou de erros microgeométricos resultantes da ação inerente ao processo de corte (marcas de avanço, aresta postiça de corte, desgaste da ferramenta etc.). A rugosidade pode ser medida por vários parâmetros (MACHADO et al., 2015). A rugosidade é afetada por um elevado número de variáveis e pode ser avaliada por diversos parâmetros, que podem ser classificados em:

- *Parâmetros de amplitude*: determinados por alturas dos picos, profundidades dos vales ou pelos dois, sem considerar o espaçamento entre as irregularidades ao longo da superfície.
- *Parâmetros de espaço*: determinados pelo espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície.

- *Parâmetros híbridos*: determinados pela combinação dos parâmetros de amplitude e de espaço (MACHADO et al., 2015).

No Quadro 4, tem-se alguns parâmetros empregados na quantificação da rugosidade (Norma ABNT NBR ISO 4287, 2008).

Quadro 4 – Alguns parâmetros de rugosidade.

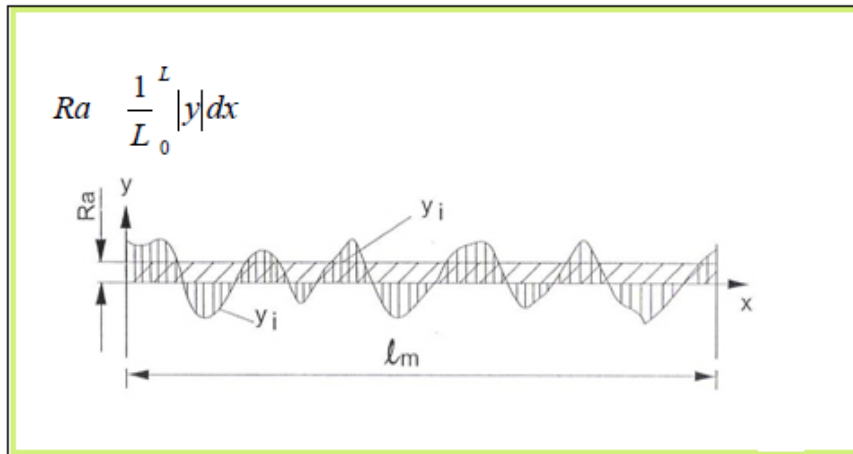
Símbolo	Nome	Definição
$R_p$	Altura máxima do pico do perfil	Maior altura dos picos do perfil no comprimento de amostragem.
$R_z$	Altura máxima do perfil	Soma da altura máxima dos picos do perfil e a maior das profundidades dos vales do perfil, no comprimento de amostragem.
$R_t$	Altura total do perfil	Soma das maiores alturas de pico do perfil e das maiores profundidades dos vales do perfil no comprimento de avaliação.
$R_a$	Desvio aritmético médio do perfil avaliado	Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem.

Fonte: Adaptado da Norma ABNT NBR ISO 4287 (2008).

## 2.6.2 Parâmetros de rugosidades utilizados

Desvio aritmético médio do perfil avaliado ( $R_a$ ): Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento ( $y_i$ ), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição ( $ln$ ). Esta grandeza pode ser representada como sendo a altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas entre o perfil de rugosidade e a linha média, tendo por comprimento, o percurso de medição ( $ln$ ). Na Figura 27, tem-se a representação da rugosidade  $R_a$  (Norma ABNT NBR ISO 4287, 2008).

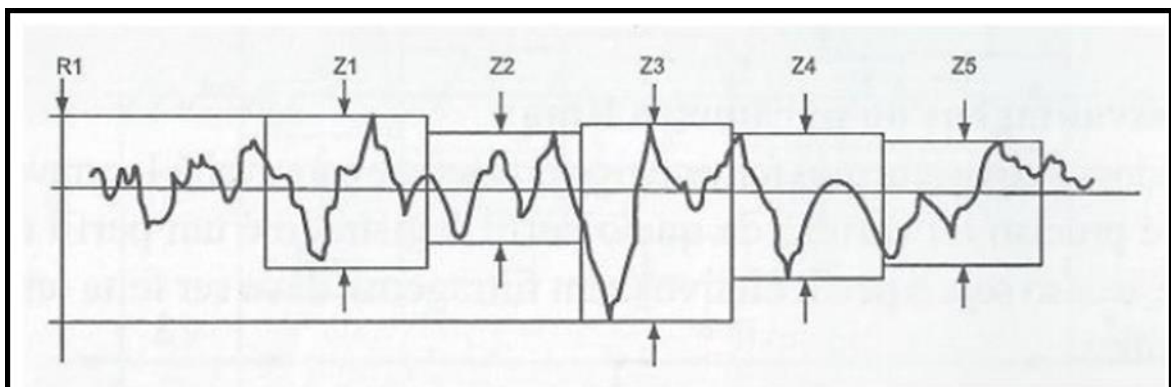
Figura 27 – Representação da rugosidade  $R_a$ .



Fonte: Norma ABNT NBR ISO 4287 (2008)

Altura total do perfil ( $R_t$ ): está definida como a distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo dentro do comprimento de avaliação. Sua vantagem é que informa sobre a máxima deterioração da superfície vertical da peça e fornece informações complementares ao parâmetro  $R_a$ . Suas desvantagens são que algumas vezes sua rigidez de avaliação leva a resultados enganosos, outras vezes pode dar uma imagem errônea da superfície, pois avalia erros que muitas vezes não representam a superfície como um todo. Na Figura 28, tem-se a representação da rugosidade  $R_t$  (ABNT NBR ISO 4287:2008).

Figura 28 – Representação da rugosidade  $R_t$ .



Fonte: Norma ABNT NBR ISO 4287 (2008)

### 2.6.3 Valores de *cut-off* para medição

Existem duas situações na seleção do valor do *cut-off* para efetuar a medição de rugosidade:

- a) Perfil da peça é periódico;
- b) Perfil da peça é aperiódico.

No Quadro 5, pode-se observar como as medições, de alguns parâmetros são realizadas, dentro de um comprimento de amostragem ( $l_r$ ) e comprimento de avaliação ( $l_n$ ), ambos em milímetros.

Quadro 5 – Amostragem de rugosidade para medições de parâmetros R de perfis periódicos.

RSm (mm)	Comprimento de amostragem de rugosidade $l_r$ (mm)	Comprimento de avaliação de rugosidade $l_n$ (mm)
$0,013 < RSm \leq 0,04$	0,08	0,4
$0,04 < RSm \leq 0,13$	0,25	1,25
$0,13 < RSm \leq 0,4$	0,8	4
$0,4 < RSm \leq 1,3$	2,5	12,5
$1,3 < RSm \leq 4$	8	40

Fonte: Adaptado da Norma ABNT NBR ISO 4287 (2008).

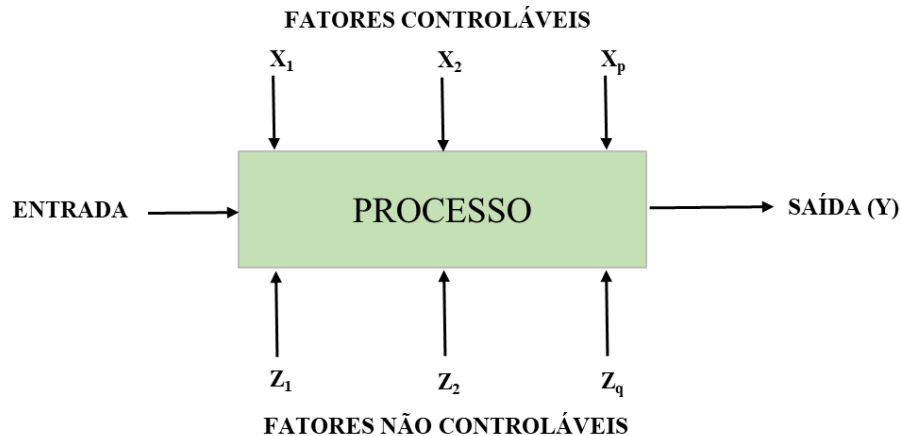
## 2.7 PROJETO DE EXPERIMENTOS

O projeto de experimentos foi desenvolvido na Inglaterra na década de 1920 para a racionalização de experimentos agrícolas. O método foi aplicado em estudos médicos e biológicos (TAGUCHI; CHOWDHURY; WU, 2005). O Projeto de Experimentos é uma técnica utilizada para definir quais dados, em que quantidade e condições devem ser coletados durante um determinado experimento, buscando satisfazer dois grandes objetivos: a precisão estatística da resposta e o menor custo (ARANDA; JUNG; TEN CATEN, 2008).

Um experimento planejado é uma série de testes no qual são feitas mudanças propositalmente nas variáveis de entrada de um processo, para observar e identificar mudanças correspondentes nas respostas de saída. O processo pode ser visualizado como uma combinação de máquinas, métodos e pessoas, que transformam um material de entrada em um produto de saída. Este produto pode ter uma ou mais características da qualidade observáveis ou respostas. Algumas das variáveis do processo  $x_1, x_2, \dots, x_p$  são *controláveis*, enquanto outras  $z_1, z_2, \dots, z_q$  são *não controláveis* (embora possam ser controláveis para efeito de teste), esses fatores não

controláveis são chamados de fatores de *ruído* (MONTGOMERY, 2019), na Figura 29, tem-se um esquema de processo.

Figura 29 – Esquematização de um processo.



Fonte: Próprio autor

Os objetivos do experimento segundo (MONTGOMERY, 2019) podem incluir:

1. Determinação de quais variáveis são mais influentes na resposta ( $y$ );
2. Determinação dos valores a serem atribuídos aos  $x$ 's influentes de modo que ( $y$ ) esteja perto da exigência nominal;
3. Determinação dos valores a serem atribuídos aos  $x$ 's influentes de modo que a variabilidade em ( $y$ ) seja pequena;
4. Determinação dos valores a serem atribuídos aos  $x$ 's influentes de modo que os efeitos das variáveis não controláveis sejam minimizados.

Ainda segundo (MONTGOMERY, 2019) métodos de planejamento experimental podem ser usados tanto no desenvolvimento do produto quanto na solução de problemas do processo, para melhorar seu desempenho ou obter um processo que seja *robusto* ou *não sensível* a fontes externas de variabilidade.

### 2.7.1 Metodologia de Taguchi

A metodologia de Taguchi tem como objetivo a qualidade, ou a falta dela, que está associada às perdas (funcionais, monetárias etc.) as quais são causadas pela variabilidade excessiva dos parâmetros de qualidade de um produto. Taguchi justifica que a perda é minimizada quando o parâmetro da qualidade se encontra no seu valor nominal, e que qualquer desvio desse valor causa uma perda da qualidade (TAGUCHI; ELSAYED; HSIANG, 1990).

Taguchi propõe a utilização de planejamento e análise de experimentos para:

- Projetar produtos robustos, insensíveis ou menos sensíveis, às variações das condições de uso (ruído externo);
- Projetar produtos robustos às variações dos componentes quando em uso (ruidos internos);
- Minimizar variabilidade da resposta de interesse em torno do valor da meta (nominal, menor é melhor ou maior é melhor), dependente da variabilidade de outros parâmetros de projeto (TAGUCHI; ELSAYED; HSIANG, 1990).

Essa metodologia permite uma melhor combinação de fatores e interações que interferem no comportamento da variável saída de determinado processo. A utilização desse método permite menor quantidade de amostragem, diminuição do custo com ensaios sem prejuízo a variável resposta (ROSA et al., 2009). Após a conclusão do experimento, os dados de todos os experimentos no conjunto são analisados para determinar o efeito dos vários parâmetros de projeto. A condução de experimentos de Taguchi em termos de matrizes ortogonais permite que os efeitos de vários parâmetros sejam determinados de forma eficiente e é uma técnica importante em projetos robustos (DAVIM, 2003).

### **2.7.2 Arranjos ortogonais**

O método de Taguchi possibilita a utilização de arranjos ortogonais para analisar os parâmetros do processo com pequenos números de experimentos (SAHU; CHOUDHURY, 2015). Na Figura 30, tem-se um exemplo de uma matriz de experimentos de arranjo ortogonal  $L_{12}$ , ou seja, 12 experimentos com combinação de diferentes parâmetros que são repetidos aleatoriamente, podendo ser aplicados até uma quantidade de 11 fatores.

Figura 30 – Matriz Arranjo ortogonal  $L_{12}$ .

Arranjo Ortogonal L <sub>12</sub>														
	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>5</sub>	F <sub>6</sub>	F <sub>7</sub>	F <sub>8</sub>	F <sub>9</sub>	F <sub>10</sub>	F <sub>11</sub>	$\bar{Y}_i$	S/N	
<b>1</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	$\bar{Y}_1$	S/N <sub>1</sub>	
<b>2</b>	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	$\bar{Y}_2$	S/N <sub>2</sub>	
<b>3</b>	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	$\bar{Y}_3$	S/N <sub>3</sub>	
<b>4</b>	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2	$\bar{Y}_4$	S/N <sub>4</sub>	
<b>5</b>	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1	$\bar{Y}_5$	S/N <sub>5</sub>	
<b>6</b>	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1	$\bar{Y}_6$	S/N <sub>6</sub>	
<b>7</b>	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1	$\bar{Y}_7$	S/N <sub>7</sub>	
<b>8</b>	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2	$\bar{Y}_8$	S/N <sub>8</sub>	
<b>9</b>	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1	$\bar{Y}_9$	S/N <sub>9</sub>	
<b>10</b>	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2	$\bar{Y}_{10}$	S/N <sub>10</sub>	
<b>11</b>	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2	$\bar{Y}_{11}$	S/N <sub>11</sub>	
<b>12</b>	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1	$\bar{Y}_{12}$	S/N <sub>12</sub>	

Fonte: Taguchi; Chowdhury; Wu (2005)

### 2.7.3 Razão sinal/ruído

Taguchi sugere que a razão “sinal/ruído” seja calculada para cada condição de teste para se identificar quais os níveis dos fatores e para os quais a variabilidade decorrente da variação dos níveis dos fatores de ruído seja mínima. Assim, maximizar a razão sinal/ruído é considerado ser equivalente a minimizar a perda da qualidade. Taguchi define três casos considerados práticos (TAGUCHI; ELSAYED; HSIANG, 1990):

- 1) Razão sinal/ruído para a condição “menor é melhor”:

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \frac{\sum y_i^2}{n} \quad \text{equação (6)}$$

Nesse caso, minimizar a perda média de qualidade é equivalente a minimizar a resposta média quadrática. E minimizar a resposta média quadrática ( $\sum y_i^2/n$ ) é equivalente a maximizar a razão sinal/ruído.

Onde:

(n) é o número de respostas observadas para cada condição experimental, e (y<sub>i</sub>) sendo o valor da resposta na dada condição experimental, com (i) inteiro positivo.

2) Razão sinal/ruído para a condição “maior é melhor”:

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left[ \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{n} \right) \left( \frac{1}{y_i^2} \right) \right] \quad \text{equação (7)}$$

Nesse caso, minimizar a perda média é equivalente a minimizar  $\sum(1/y^2)/n$ . Equivale a maximizar a razão sinal/ruído.

3) Razão sinal/ruído para a condição “nominal é melhor”:

$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left( \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n} \right) \quad \text{equação (8)}$$

$$\text{onde } \bar{Y} = \frac{Y_i}{n} \text{ e } S = \frac{1}{n-1} \cdot \sum (Y_i - \bar{Y})^2$$

## 2.8 MONITORAMENTO DO PROCESSO DE USINAGEM

O monitoramento de um processo de usinagem tem como objetivo monitorar a condição da ferramenta de corte como desgaste e quebra, parada de máquina, perda de qualidade e o custo de produção (DESCHAMPS, 2004). Na indústria moderna monitorar o processo de usinagem e a condição da ferramenta de corte está se tornando cada vez mais importante para obter melhor qualidade do produto, maior produtividade, maior automação do processo e menores custos de mão de obra. As medidas mais usadas para monitoramento do processo de usinagem são potência e corrente do motor, força, torque, emissão acústica, vibração, imagem, temperatura, deslocamento, deformação etc. (LI; CHEN, 2013).

### 2.8.1 Forças de usinagem

O conhecimento da força de usinagem aplicada na cunha de corte e o estudo de suas componentes vetoriais são importantes porque possibilitam estimar a potência necessária para executar o corte, como também as forças que atuam nos elementos de máquina-ferramenta, e a relação com o desgaste das ferramentas de corte (MACHADO et al., 2015). Os três componentes básicos da força de usinagem são:

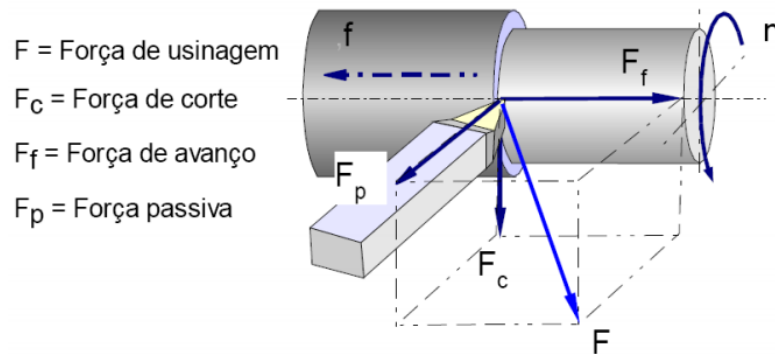
- a) Força de corte ou força principal de corte ( $F_c$ ): é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de corte, dada pela velocidade de corte;
- b) Força de avanço ( $F_f$ ): é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de avanço, dada pela velocidade de avanço;
- c) Força passiva ou força de profundidade ( $F_p$ ): é a projeção da força de usinagem perpendicular ao plano de trabalho.

A força de usinagem é decomposta em suas três principais componentes, dada pela equação (6):

$$F_U = ((F_{ap}^2) + (F_f^2) + (F_c^2))^{1/2} \text{ [N]} \quad \text{equação (9)}$$

Na Figura 31, tem-se a força de usinagem e suas componentes para os processos de torneamento.

Figura 31 – Força de usinagem e suas componentes.



Fonte: Machado et al. (2015)

A potência é dada pela equação (7):

$$P_c = F_c \times v_c \text{ [W]} \quad \text{equação (10)}$$

Os esforços de corte nos processos de usinagem podem ser medidos direta ou indiretamente, para medição direta das componentes de força utiliza-se dinamômetros piezelétricos e para medição indireta utiliza-se o deslocamento e extensão de partes da máquina, o consumo de corrente do motor principal, acionamento do eixo de avanço e consumo de potência do eixo (HASSUI, 2002).

## 2.8.2 Vibração

No processo de torneamento, ocorrem vibrações devido ao atrito entre peça/ferramenta e cavaco/ferramenta, essas vibrações registram uma marca na ferramenta de corte. O desempenho de uma máquina-ferramenta depende muito dos processos de corte sem vibração, a taxa de deterioração que se desenvolve com o tempo em uma máquina-ferramenta pode ser facilmente determinada pelo monitoramento (SIDDHPURA; SIDDHPURA; BHAVE, 2008). Geralmente, um acelerômetro é usado como dispositivo de detecção para registrar os sinais dessa variável. A vibração ocorre devido à dinâmica do processo de usinagem estar em ressonância com o sistema ao seu redor, com a peça de trabalho e o sistema máquina-ferramenta. Valores elevados podem causar danos na superfície da peça usinada e aumento do desgaste da ferramenta. Ao contrário das condições estáveis de usinagem (STAHL, 2012).

### 2.8.3 Emissão acústica (EA)

A emissão acústica (EA) é comumente definida como uma onda elástica transitória gerada pela rápida liberação de energia de fontes localizadas em um material ou em sua superfície. As principais fontes de (EA) na usinagem são o atrito na face de ataque e no flanco, deformação plástica na zona de cisalhamento, formação e propagação de trincas, impacto do cavaco na peça de trabalho e quebra de cavacos (LI; CHEN, 2013).

O sensor piezoelétrico é um dos sensores particularmente adequados para medir o sinal em monitoramento do processo de usinagem. Ele pode ser facilmente instalado em máquinas novas e existentes. Com largura de banda do sensor muito ampla, até 1 MHz, pode detectar a maioria dos fenômenos na usinagem. No entanto, as abordagens adequadas para aquisição de dados e processamento de sinal precisam ser cuidadosamente selecionadas. Filtros passa-banda são usados para escolher as faixas de frequência apropriadas; assim, existe grande flexibilidade para detecção da emissão acústica (CHEN; ZENG; LI, 2008).

O parâmetro utilizado para emissão acústica é o valor quadrático médio RMS (*root mean square*) que é calculado pela média aritmética do quadrado dos valores puros de emissão acústica, conforme Equação (11):

$$EA_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} EA^2(t) dt} \quad \text{equação (11)}$$

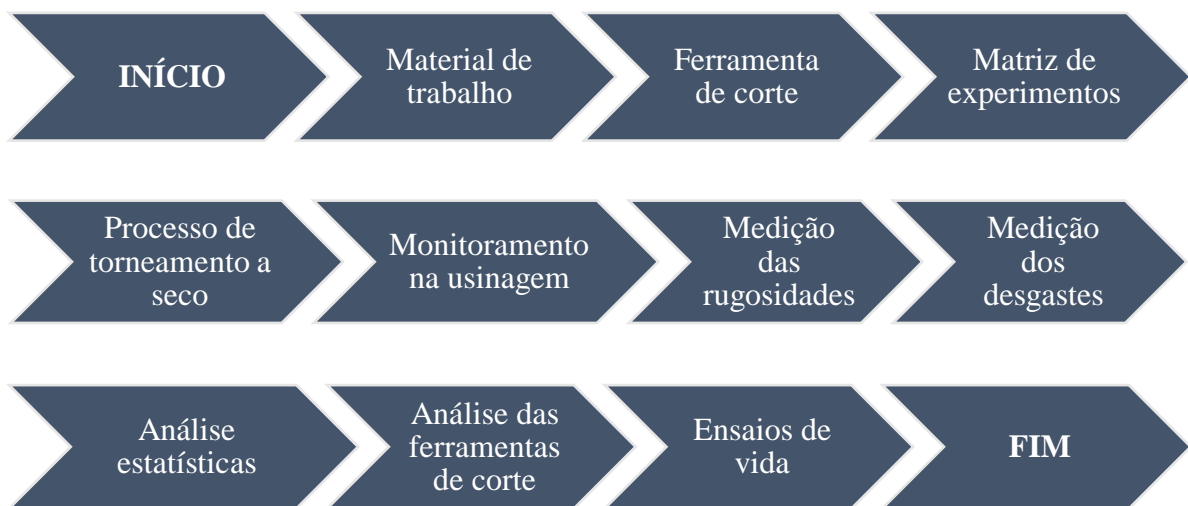
Onde:

- $(EA_{\text{RMS}})$  é o valor médio quadrático de emissão acústica;
- $(\Delta t)$  é o tempo de integração;
- $(EA)$  é o sinal puro de emissão acústica.

### 3 MÉTODOS E MATERIAIS

Este tópico foi dividido em várias seções para uma apresentação de forma sequencial e lógica desse trabalho. Os equipamentos utilizados para a realização desse trabalho encontram-se no Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT) da Faculdade de Engenharia do *campus* de Guaratinguetá – UNESP; e no Laboratório de Estudo de Usinagem (LEU). Na Figura 32, tem-se a seqüência da metodologia aplicada nos ensaios.

Figura 32 – Sequência da metodologia aplicada nos ensaios.



Fonte: Próprio autor

#### 3.1 MATERIAL DE TRABALHO

Na realização dos experimentos foram utilizados dois corpos de prova de aço inoxidável martensítico AISI 410 endurecido. Na Figura 33, tem-se a composição química em percentual de peso do material do corpo de prova.

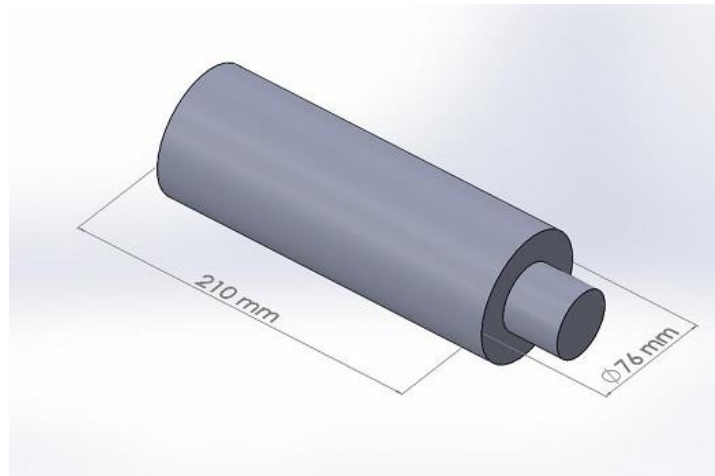
Figura 33 - Composição do aço inoxidável martensítico AISI 410 (% em peso).

<b>C</b>	<b>Cr</b>	<b>S</b>	<b>Mo</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Ni</b>	<b>P</b>	<b>Outros</b>
0,08%	11,78%	0,03%	0,03%	0,35%	0,57%	0,19%	0,03%	86,94%

Fonte: Próprio autor

Os corpos de prova possuem o comprimento de 210 mm e  $\varnothing$  76 mm, na Figura 34, tem-se a representação esquemática dos corpos de prova.

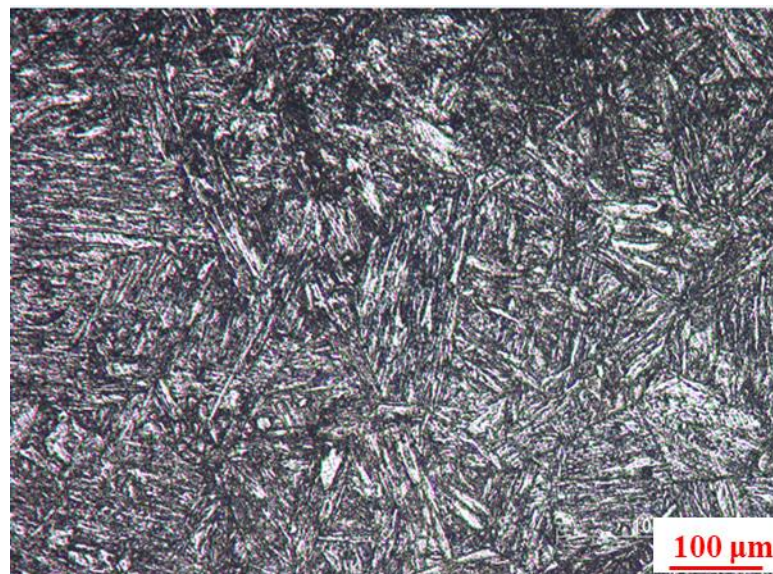
Figura 34 – Representação esquemática do corpo de prova.



Fonte: Próprio autor

Na Figura 35, tem-se a microestrutura martensítica do material dos corpos de prova, após processo de endurecimento por têmpera.

Figura 35 – Microestrutura martensítica do aço inoxidável AISI 410 endurecido.



Fonte: Próprio autor

Na Tabela 1, tem-se as durezas para o corpo de prova 1 e esses valores de dureza foram obtidos com auxílio do durômetro da marca Wolpert, conforme Figura 36.

Tabela 1 – Valores de dureza para o corpo de prova.

Dureza HRC			
Corpo de prova			
45	47	43	46
45	43	42	46
44	45	40	43
44	47	42	45
42	48	42	48
44	46	45	45
44	42	42	46
45	44	43	47
45	43	42	45
Média			44
Desvio Padrão			1,92

Fonte: Próprio autor

Figura 36 - Durômetro da marca Wolpert.



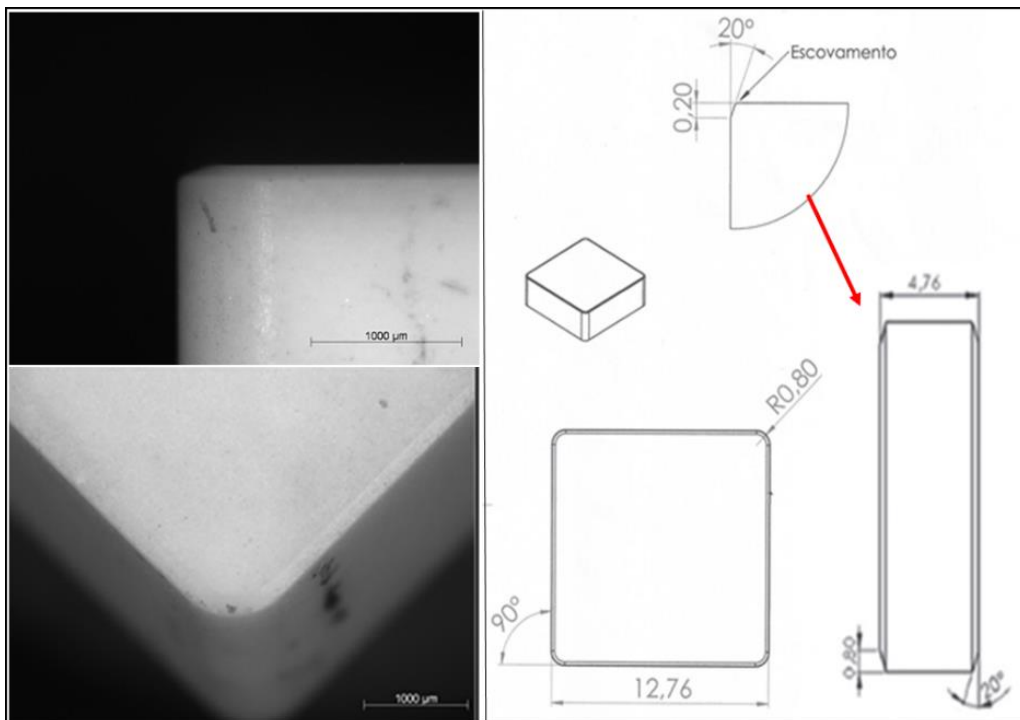
Fonte: Próprio autor

### 3.2 FERRAMENTA DE CORTE

As ferramentas de corte de cerâmica experimental de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dopada com óxido de magnésio (MgO) foram desenvolvidas no laboratório do Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT) da Faculdade de Engenharia do *campus* de Guaratinguetá – UNESP em parceria com o Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA) em São José dos Campos.

A composição da ferramenta de corte cerâmica é de 99,75% em peso de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 0,25% em peso de MgO, com tamanho de partículas compreendido entre (0,40-0,60  $\mu\text{m}$ ). As ferramentas cerâmicas apresentaram valores médios de densidade relativa de  $(98,25 \pm 0,15)$  e dureza de  $(1483 \pm 126 \text{ HV})$  e tenacidade à fratura  $K_{IC}$   $(2,13 \pm 0,25 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$ . As ferramentas foram retificadas e lapidadas pela empresa MecMinas do Brasil, e possui geometria SNGN 120408-T02020 (12,76 x 12,76 x 4,76 mm de espessura, raio de ponta de 0,8 mm, chanfro de 0,2 mm e ângulo de  $20^\circ$ ) para sua devida aplicação no processo de usinagem por torneamento. Na Figura 37, tem-se um desenho e imagens digitalizadas da ferramenta de corte cerâmica que detalham o raio de ponta e o chanfro, este último que tem como objetivo suavizar a aresta de corte e diminuir a concentração de tensões na ferramenta de corte.

Figura 37 - Ferramenta cerâmica experimental (detalhe do raio de ponta, chanfro e desenho).



Fonte: Próprio autor

A ferramenta foi posicionada no suporte capto da marca Seco Tools, modelo B01T9032445 cedido pela empresa Seco Tools, conforme Figura 38. Esse suporte atende a aplicação de inserto quadrado (tipo S). O ângulo de posição das ferramentas de corte ( $\chi_r$ ) no suporte é de  $75^\circ$ , possui um ângulo de inclinação ( $\lambda_s$ ) de  $-6^\circ$  e um ângulo de saída ( $\gamma_0$ ) de  $-6^\circ$  para as ferramentas do tipo *flat* (sem quebra-cavacos).

Figura 38 – Suporte capto da marca Seco Tools, modelo B01T9032445.



Fonte: Próprio autor

### 3.3 MATRIZ DE EXPERIMENTOS

Nesse tópico, foram definidas as condições de usinagem, a quantidade de fatores e seus respectivos níveis e a matriz de experimentos. Os experimentos com as ferramentas de corte cerâmicas foram realizados na condição de usinagem por torneamento a seco. A ferramenta de corte cerâmica é experimental e de escala laboratorial, dessa forma, não têm parâmetros de usinagem pré-definidos pelo fabricante como acontece com as ferramentas de corte comerciais. Sendo assim, foi realizado um experimento com 8 níveis de velocidade de corte, 2 níveis de avanço e 2 níveis de profundidade de corte para um estudo mais abrangente dos parâmetros de corte mais adequados para um bom desempenho da ferramenta de corte cerâmica.

#### 3.3.1 Matriz de experimentos $L_{16}$

Na matriz do experimento, utilizou-se um arranjo ortogonal  $L_{16}$  fracionado com auxílio do método de Taguchi com os seguintes fatores: velocidade de corte ( $v_c$ ), avanço ( $f$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ). Na realização de cada combinação da matriz de experimentos foram utilizadas 3 réplicas para uma melhor média dos dados a serem obtidos. Os fatores com seus respectivos níveis estão na Tabela 2 e a matriz com arranjo ortogonal  $L_{16}$  fracionado para o experimento, na Tabela 3.

Tabela 2 – Fatores e níveis do experimento.

Parâmetros			
Níveis	$v_c$ (m/min)	$f$ (mm/rev)	$a_p$ (mm)
1	200	0,05	0,25
2	225	0,10	0,50
3	250	-	-
4	275	-	-
5	300	-	-
6	325	-	-
7	350	-	-
8	375	-	-

Fonte: Próprio autor

Tabela 3 – Matriz ortogonal  $L_{16}$  do experimento.

Parâmetros			
Experimentos	$v_c$ (m/min)	$f$ (mm/rev)	$a_p$ (mm)
1	200	0,05	0,25
2	200	0,10	0,50
3	225	0,05	0,25
4	225	0,10	0,50
5	250	0,05	0,25
6	250	0,10	0,50
7	275	0,05	0,25
8	275	0,10	0,50
9	300	0,05	0,50
10	300	0,10	0,25
11	325	0,05	0,50
12	325	0,10	0,25
13	350	0,05	0,50
14	350	0,10	0,25
15	375	0,05	0,50
16	375	0,10	0,25

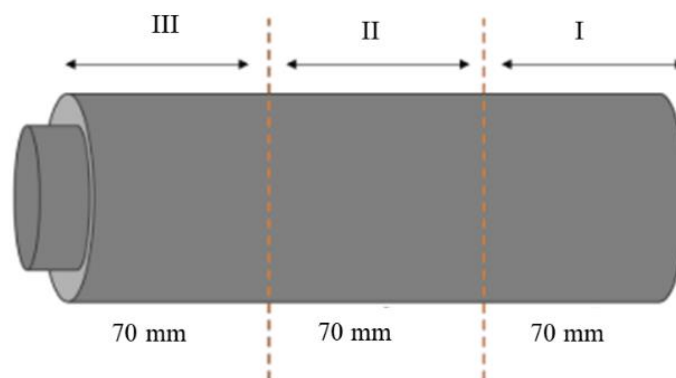
Fonte: Próprio autor

### 3.4 PROCESSO DE TORNEAMENTO A SECO

Nesse tópico, foi descrito como a matriz de experimentos foi executada ao longo do processo de usinagem por torneamento. O corpo de prova foi “dividido” em três trechos de 70

mm, e cada combinação de parâmetros de corte da matriz foi executada primeiramente para o trecho I, em seguida para o trecho II e finalmente para o trecho III, conforme Figura 39. Dessa forma, totalizando três réplicas para cada combinação. Consequentemente, após a execução das 3 réplicas da primeira combinação de parâmetros de corte, em seguida, a segunda combinação era executada e assim ocorreu sucessivamente até a execução de todas as 16 combinações da matriz de experimentos.

Figura 39 – Corpo de prova “dividido” para processo de usinagem por torneamento.



Fonte: Próprio autor

Na realização do experimento foi utilizado um centro de torneamento CNC da Marca Romi, modelo GL 240M com potência máxima de 18 kW, conforme Figura 40.

Figura 40 – (a) Centro de torneamento, (b) Material de trabalho (c) ferramenta de corte.



Fonte: Próprio autor

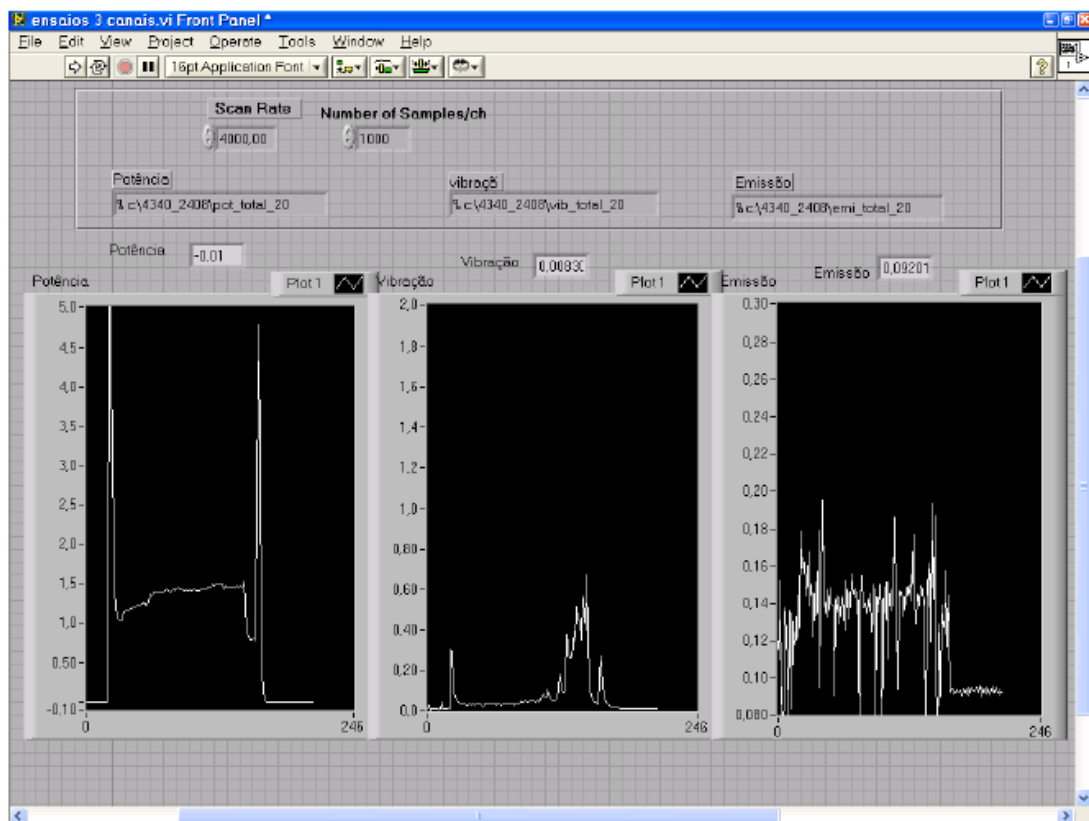
### 3.5 MONITORAMENTO DO PROCESSO DE TORNEAMENTO

Nesse tópico, foram abordados os procedimentos relacionados com o monitoramento e aquisição de dados da potência de usinagem, vibração e emissão acústica que ocorreram durante

o processo de usinagem por torneamento. O objetivo foi monitorar e registrar os dados do processo de torneamento em um centro de processamento de dados (CPU) para posteriormente trabalhar os dados coletados e efetuar análises desses dados.

No processo de torneamento, um sistema de aquisição de dados em tempo real registrou informações dos sinais de potência de usinagem, vibração e emissão acústica. O sistema possui um módulo de canais da marca *National Instruments*, modelo BNC2120 conectado a uma placa de aquisição de dados da mesma marca conectados a um computador para registro das informações. Um software da marca *LABVIEW®* foi utilizado para criação de um programa de computador, que permite a verificação dos dados captados em tempo real durante o processo. A leitura de entrada dos dados dos sensores foi feita em unidades de tensão. Na Figura 41, tem-se a tela em que as variáveis de saída potência de usinagem, vibração e emissão acústica foram monitoradas.

Figura 41 – Tela do software *LABVIEW®*.

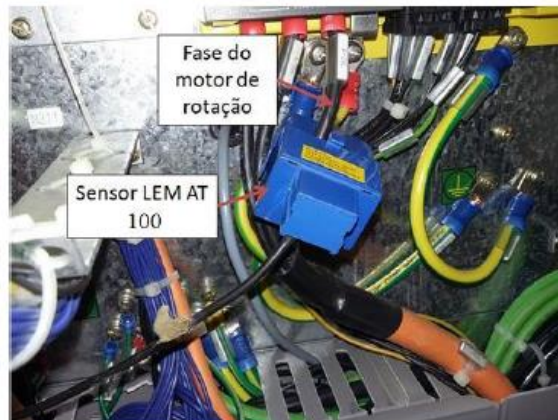


Fonte: Adaptado de Kondo (2019)

Na aquisição dos dados de potência de usinagem utilizou-se um transformador de potência da marca LEM, modelo AT100 BIO, o qual foi conectado em uma fase de entrada do motor do centro de usinagem CNC, motor esse que faz o movimento de rotação da máquina, conforme

Figura 42. O sensor envia um sinal de tensão relativo à corrente elétrica de entrada do motor para o módulo de canais, essa é uma medida indireta da potência de corte utilizada no processo. A taxa utilizada para captação dos sinais foi de 4000 Hz, dessa forma, sendo 4000 pontos por segundo para cada ensaio.

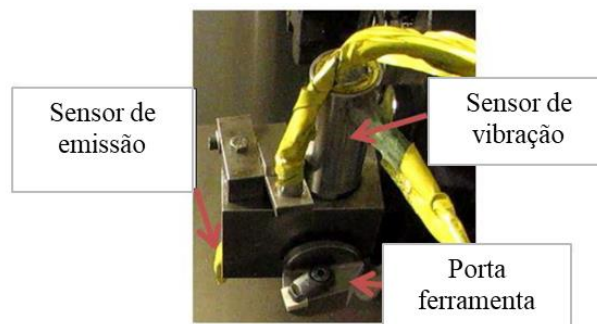
Figura 42 – Sensor de potência conectado ao centro de torneamento.



Fonte: Adaptado de Kondo (2019)

Na captação dos sinais de vibração utilizou-se um sensor piezelétrico da marca *Vibro Control*, modelo TV-100, que tem um alcance de 25 mm/s em sinal RMS. Na captação do sinal de emissão acústica utilizou-se um sensor da marca *Physical Acoustic Corporation*, modelo R15 $\alpha$  e um pré-amplificador, modelo 1272, com saída em RMS. Na Figura 43, observa-se sensor de vibração e emissão acústica.

Figura 43 – Sensores de vibração e emissão acústica.



Fonte: Adaptado de Kondo (2019)

### 3.6 MEDIÇÃO DAS RUGOSIDADES

No processo de torneamento, após a execução das três réplicas, o centro de usinagem era desligado e, em seguida, as medições dos valores das rugosidades  $R_a$  e  $R_t$  eram efetuadas com auxílio de um rugosímetro móvel da marca Mahr equipado com dois dispositivos. Um é o modelo MarSurf M300 e o outro um modelo MarSurf RD18, conforme Figura 44.

Figura 44 – Rugosímetro Mahr modelo MarSurf M300/MahrSurf RD 18.



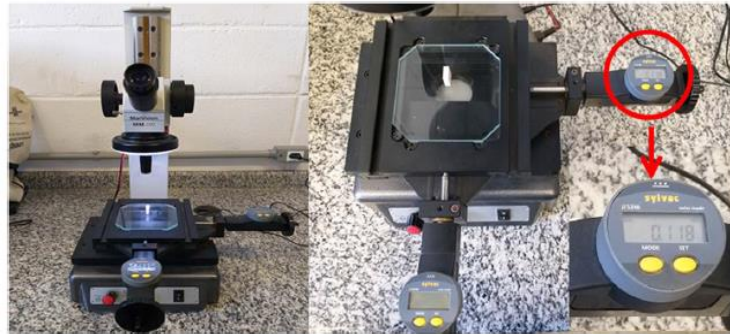
Fonte: Próprio autor

No procedimento de medição dos valores de rugosidades foi necessário adotar valores de *cut-off* de acordo com o avanço utilizado e perfil periódico da usinagem. Foi utilizado um *cut-off* de 0,25 mm. Em cada trecho, após a usinagem eram realizadas as medições, eram três medições em um ângulo de 120° do corpo de prova e o comprimento de medição era de cinco vezes o valor do *cut-off* (comprimento de medição = 1,25 mm).

### 3.7 MEDIÇÃO DOS DESGASTES

Na etapa de medição dos desgastes, após usinagem das 16 combinações da matriz de experimentos e suas respectivas réplicas, as ferramentas cerâmicas foram posicionadas sucessivamente em um microscópio da marca Mahr, modelo MahrVision MM200. Com auxílio desse equipamento foram realizadas as medições de desgaste de flanco ( $VB_{máx}$ ) para cada aresta de corte utilizada. As medições dos desgastes foram obtidas com esse equipamento que possui uma mesa móvel de medição no plano XY, com micrômetros de precisão. Esse microscópio tem uma linha de referência que pode ser posicionada sobre a aresta de corte, e o deslocamento desta linha até o final do desgaste fornece a leitura do valor do desgaste, conforme Figura 45.

Figura 45 – Microscópio da marca Mahr, modelo MahrVision MM200.



Fonte: Próprio autor

### 3.8 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Nessa etapa, foi utilizado o software Minitab17<sup>®</sup> para análise da relação entre os parâmetros de corte e as variáveis de saída, e assim foi possível confeccionar os gráficos e efetuar a análise dos resultados e discussão. Os métodos de análise estatística utilizados foram Análise de Variância (ANOVA), Gráfico de Efeitos Principais e os Gráficos de Intervalos. As análises foram realizadas com um intervalo de confiança de (95 % IC).

### 3.9 MICROSCOPIA DAS FERRAMENTAS DE CORTE

Nessa etapa, foram utilizados equipamentos para realizar a microscopia das ferramentas de corte e verificar seus desgastes. A aquisição digital das imagens das ferramentas de corte foi realizada com auxílio de um microscópio Stereo da marca Zeiss, modelo Stemi 2000, conforme Figura 46. No tratamento das imagens foram utilizados os softwares Paint e Image J.

Figura 46 – Microscópio Stereo da marca Zeiss, modelo Stemi 2000.



Fonte: Próprio autor

A análise dos mecanismos de desgastes das ferramentas de corte foi realizada no microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo TM3000, da marca Hitachi, e anteriormente as ferramentas de corte foram metalizadas. Essa etapa foi realizada no Departamento de Materiais da Escola de Engenharia de Lorena (USP/DEMAR/EEL), conforme Figura 47.

Figura 47 – Microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo TM3000, da marca Hitachi.



Fonte: Próprio autor

### 3.10 ENSAIOS DE VIDA

Nessa etapa, entre todas as combinações de corte executadas no experimento, foram escolhidas as melhores condições de corte em relação aos menores valores de desgastes de flanco ( $VB_{m\acute{a}x}$ ) para cada condição de avanço. Dessa forma, foi executado um torneamento nessas condições até que a ferramenta de corte atingisse o valor de  $VB_{m\acute{a}x} = 0,3$  mm e verificado qual o valor do comprimento de corte usinado ( $l_c$ ). O ensaio de vida da ferramenta de corte ocorreu com a usinagem de um trecho do material da peça, retirada da ferramenta de corte do centro de usinagem e posicioná-la no microscópio e executar a medição do desgaste de flanco ( $VB_{m\acute{a}x}$ ), esse procedimento foi realizado sucessivamente até que o valor de ( $VB_{m\acute{a}x}$ ) atingisse o valor de 0,3 mm, dessa forma, o ensaio de vida era interrompido para a respectiva condição de corte.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção, serão apresentados os resultados e discussão de acordo com as influências dos parâmetros de corte em relação às variáveis de saída como desgaste de flanco ( $VB_{máx}$ ), rugosidades ( $R_a$  e  $R_t$ ), potência de usinagem, vibração, emissão acústica (EA), análise das ferramentas de corte e ensaios de vida. Na análise da variável ( $VB_{máx}$ ) foi adotado o procedimento de dividir o ( $VB_{máx}$ ) pelo comprimento de corte usinado ( $l_c$ ), dessa forma, o ( $VB_{máx}$ ) ficou padronizado de acordo com o ( $l_c$ ) de cada condição de corte.

Na Tabela 4, tem-se os valores das médias obtidos para as variáveis de saída de acordo com as 16 combinações da matriz de experimentos.

Tabela 4 – Resultados das 16 combinações para as variáveis de saída do experimento.

Nº	$v_c$ (m/min)	$f$ (mm/rev)	$a_p$ (mm)	$VB_{máx}/l_c$ (mm/m)	$R_a$ ( $\mu$ m)	$R_t$ ( $\mu$ m)	Potência de usinagem (W)	Vibração (mm/s)	EA (V)
1	200	0,05	0,25	0,000426	0,558	5,737	923,0	2,93	0,715
2	225	0,05	0,25	0,000307	0,598	5,264	743,4	2,90	1,722
3	250	0,05	0,25	0,000321	0,516	4,833	658,2	2,91	1,267
4	275	0,05	0,25	0,000371	0,480	5,212	724,1	2,92	0,777
5	300	0,10	0,25	0,000426	0,586	4,306	780,8	2,94	0,833
6	325	0,10	0,25	0,000276	0,555	4,195	825,4	2,96	0,865
7	350	0,10	0,25	0,000320	0,751	4,959	811,4	3,03	0,726
8	375	0,10	0,25	0,000566	1,006	6,705	799,4	3,01	0,758
9	200	0,10	0,5	0,000678	0,702	6,157	1673,9	3,85	0,751
10	225	0,10	0,5	0,000660	0,580	4,513	1410,2	3,40	0,760
11	250	0,10	0,5	0,000908	0,609	5,372	1360,9	3,16	0,753
12	275	0,10	0,5	0,002364	0,746	4,954	1464,8	3,07	0,765
13	300	0,05	0,5	0,001094	0,511	5,645	1116,1	3,01	0,796
14	325	0,05	0,5	0,001426	0,906	9,377	967,4	3,00	0,726
15	350	0,05	0,5	0,000771	1,221	13,499	952,9	3,03	0,754
16	375	0,05	0,5	0,000836	0,671	7,615	896,1	3,10	0,788

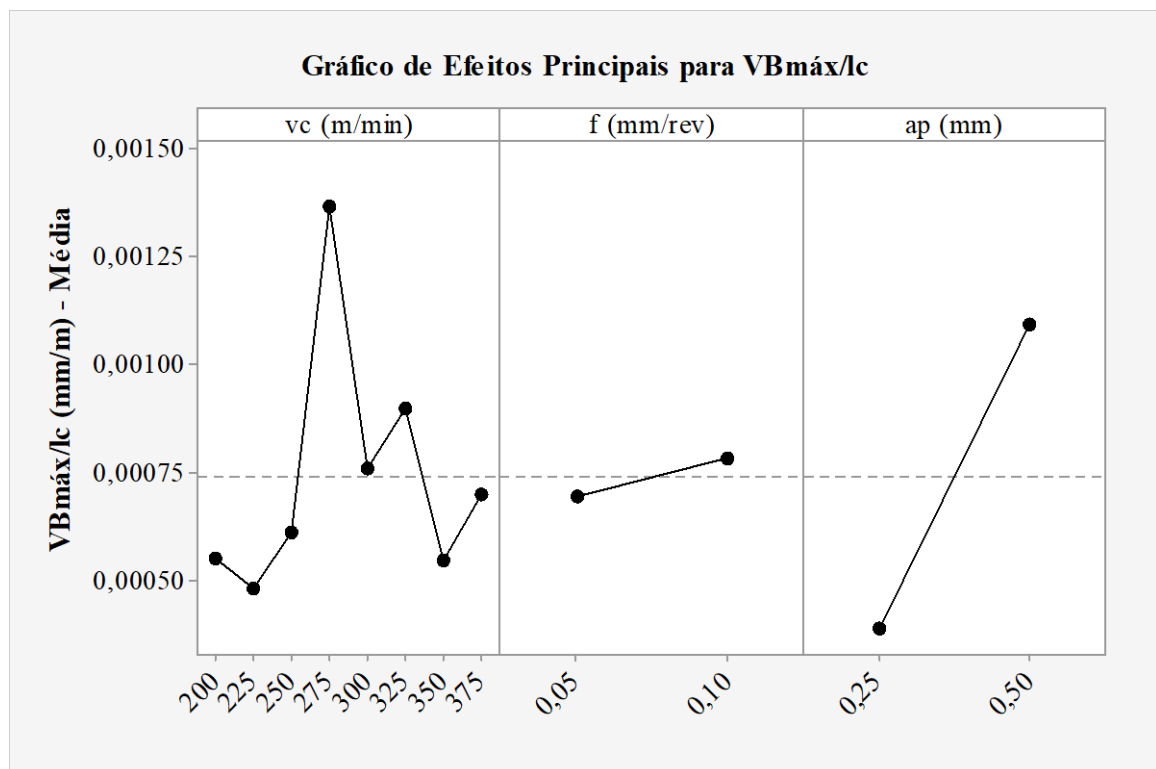
Fonte: Próprio autor

A condição MENOR é MELHOR foi adotada para os resultados das variáveis de saída, dessa forma, tem-se o melhor desempenho e combinação de parâmetros.

#### 4.1 RESULTADOS PARA VARIÁVEL DESGASTE DE FLANCO ( $VB_{\text{máx}}$ )

Na Figura 48, o gráfico permitiu verificar a relação ( $VB_{\text{máx}}/l_c$ ) com os parâmetros velocidade de corte ( $v_c$ ), avanço ( $f$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ). Os menores valores das médias ocorreram para ( $v_c$ ) no nível de 225 m/min com valor de 0,000483 mm/m, para ( $f$ ) no nível de 0,05 mm/rev com valor de 0,000695 mm/m e para ( $a_p$ ) no nível de 0,25 mm com valor de 0,000388 mm/m.

Figura 48 – Gráfico de Efeitos Principais para  $VB_{\text{máx}}/l_c$ .



Fonte: Próprio autor

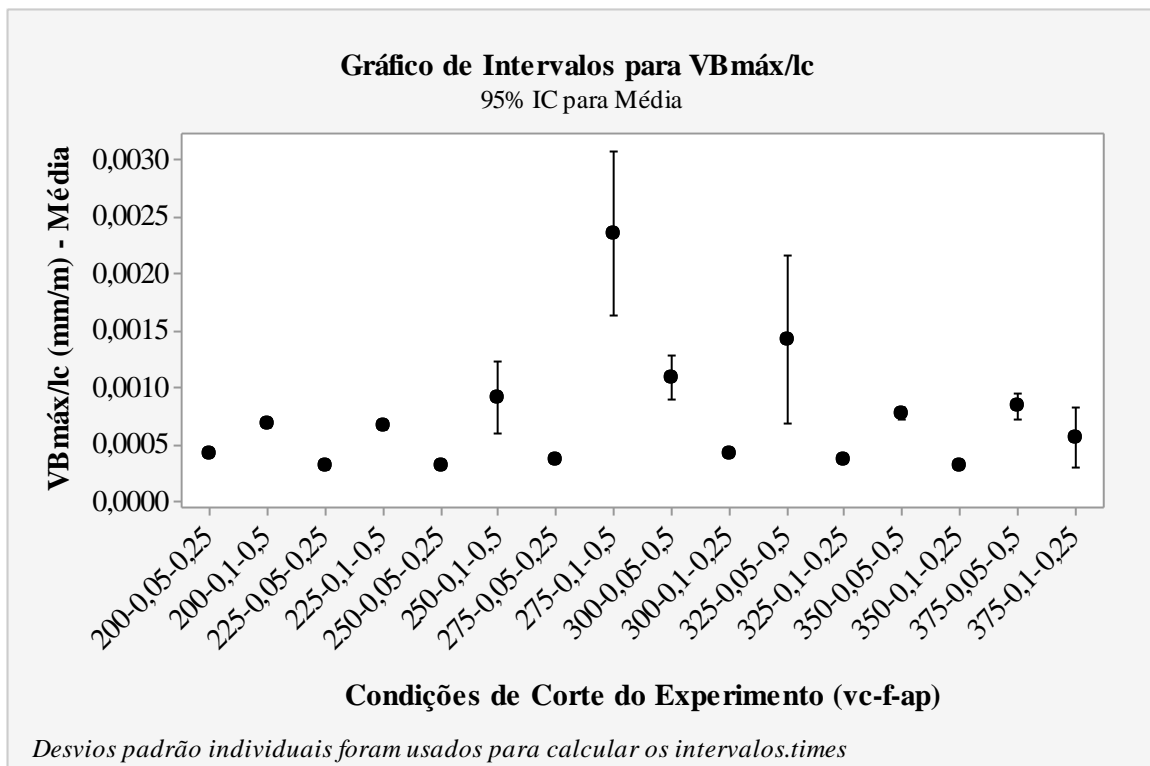
No teste de normalidade de Anderson-Darling foi observado que a distribuição de dados para ( $VB_{\text{máx}}/l_c$ ) não é normal, ou seja, os dados não seguem uma distribuição normal. Na Tabela 5, a Análise de Variância (ANOVA) permite verificar se os efeitos dos fatores ( $v_c$ - $f$ - $a_p$ ) são significativos para ( $VB_{\text{máx}}/l_c$ ), ou seja, valor de  $F \geq 4$  a associação é estatisticamente significativa. Na análise, verificou-se que para os fatores ( $v_c$ - $f$ - $a_p$ ) os valores de ( $F$ ) são menores do que 4, sendo assim, a associação não é estatisticamente significativa.

Tabela 5 – Análise de Variância (ANOVA) para  $VB_{m\acute{a}x}/l_c$ .

Fonte	Graus de Liberdade	SQ seq	SQ (Aj.)	QM (Adj.)	F	Valor-P
$v_c$ (m/min)	7	0,000001	0,000001	0,000000	0,65	0,710
$f$ (mm/rev)	1	0,000000	0,000000	0,000000	0,05	0,834
$a_p$ (mm)	1	0,000001	0,000001	0,000001	3,20	0,124
Erro de residuos	6	0,000001	0,000001	0,000000		
Total	15	0,000003				

Fonte: Próprio autor

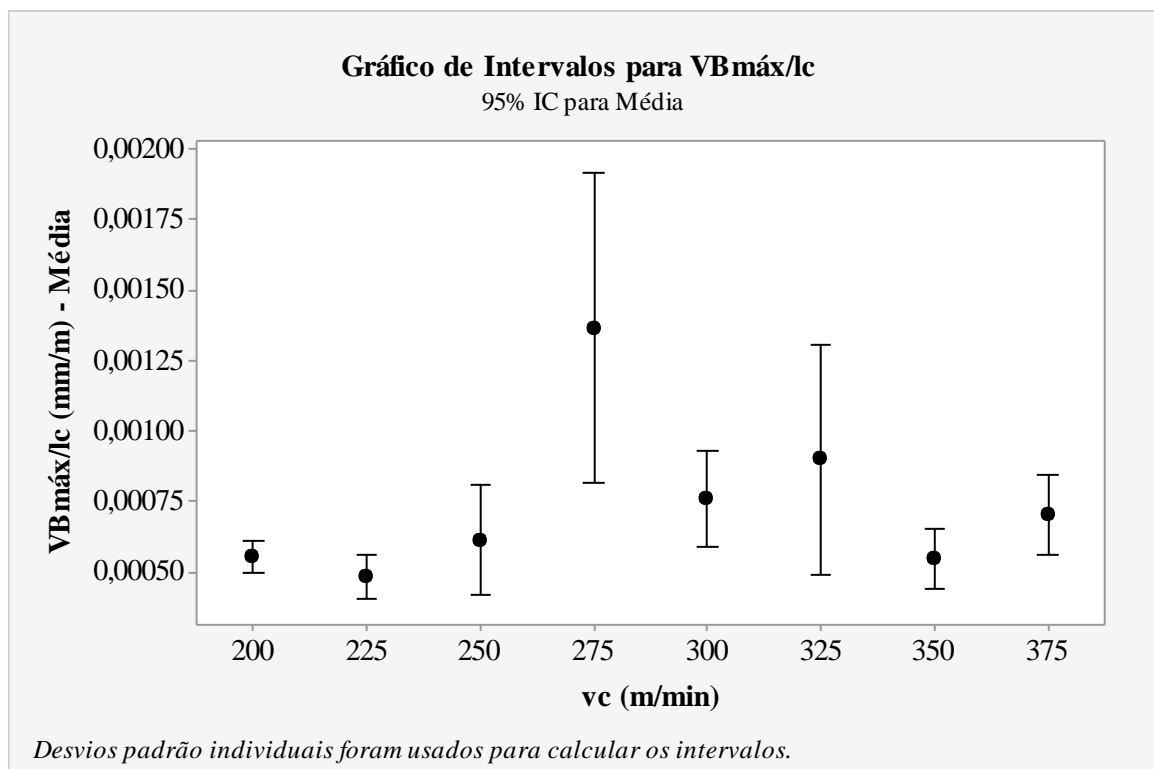
Na Figura 49, a combinação (225-0,05-0,25) resultou no menor valor das médias 0,000308 mm/m, os fatores em níveis mais baixos possibilitaram um melhor resultado. Nas combinações com o mesmo nível de ( $v_c$ ) os resultados foram maiores para as combinações com  $a_p = 0,50$  mm; sabe-se que uma maior taxa de remoção de material implica um maior volume de cavacos sobre a ferramenta de corte. Consequentemente, ocorre uma maior solicitação da ferramenta de corte e um maior desgaste da ferramenta.

Figura 49 – Gráfico de Intervalos das 16 combinações para  $VB_{m\acute{a}x}/l_c$ .

Fonte: Próprio autor

Na Figura 50, o menor valor das médias ocorreu para ( $v_c$ ) no nível de 225 m/min com valor de 0,000483 mm/m. No nível de 350 m/min o valor das médias foi de 0,000546 mm/m e esse valor ficou pouco acima do obtido para o nível de 225 m/min, mesmo com um aumento de 55,5% na velocidade de corte. Possivelmente as propriedades da ferramenta cerâmica como elevada resistência mecânica e dureza a temperaturas elevadas foram os fatores que contribuíram para essa resistência da ferramenta ao desgaste. O fator ( $v_c$ ) não foi considerado significativo pela ANOVA, porém o nível de 275 m/min resultou na pior condição de corte com valor de 0,001365 mm/m e não foi possível identificar o motivo dessa disparidade de resultado.

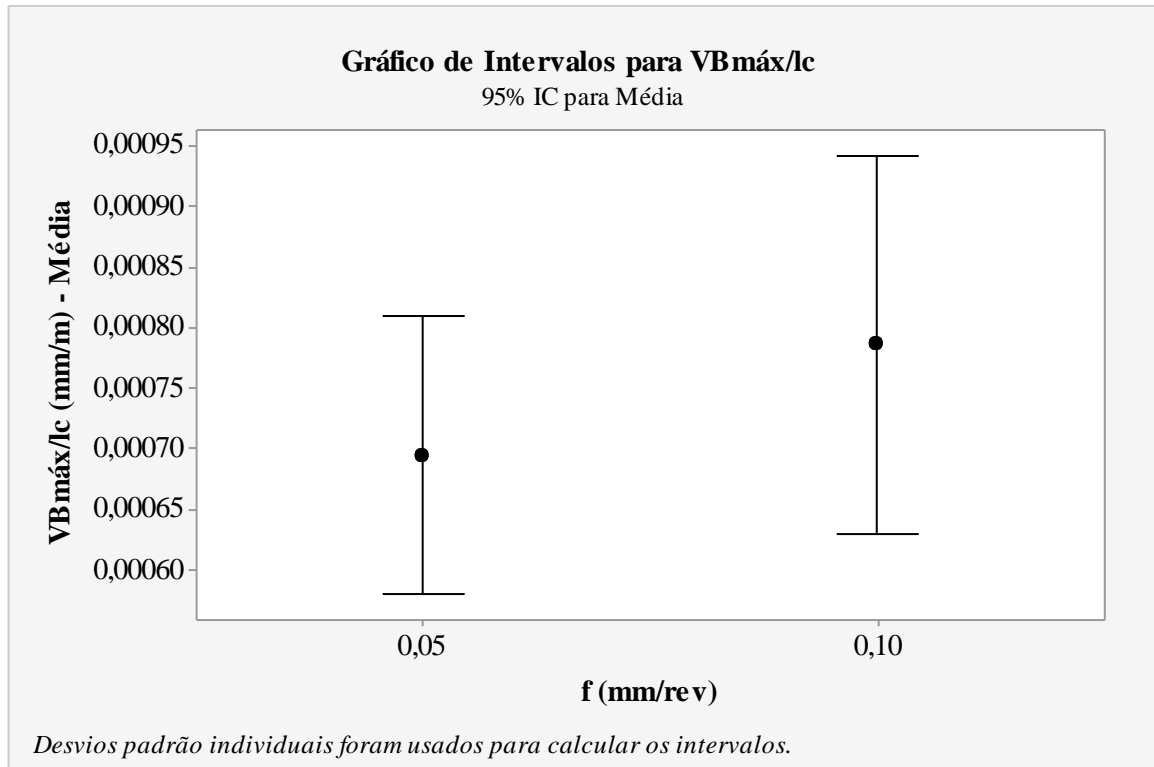
Figura 50 – Gráfico de Intervalos das velocidades de corte para  $VB_{m\acute{a}x}/l_c$ .



Fonte: Próprio autor

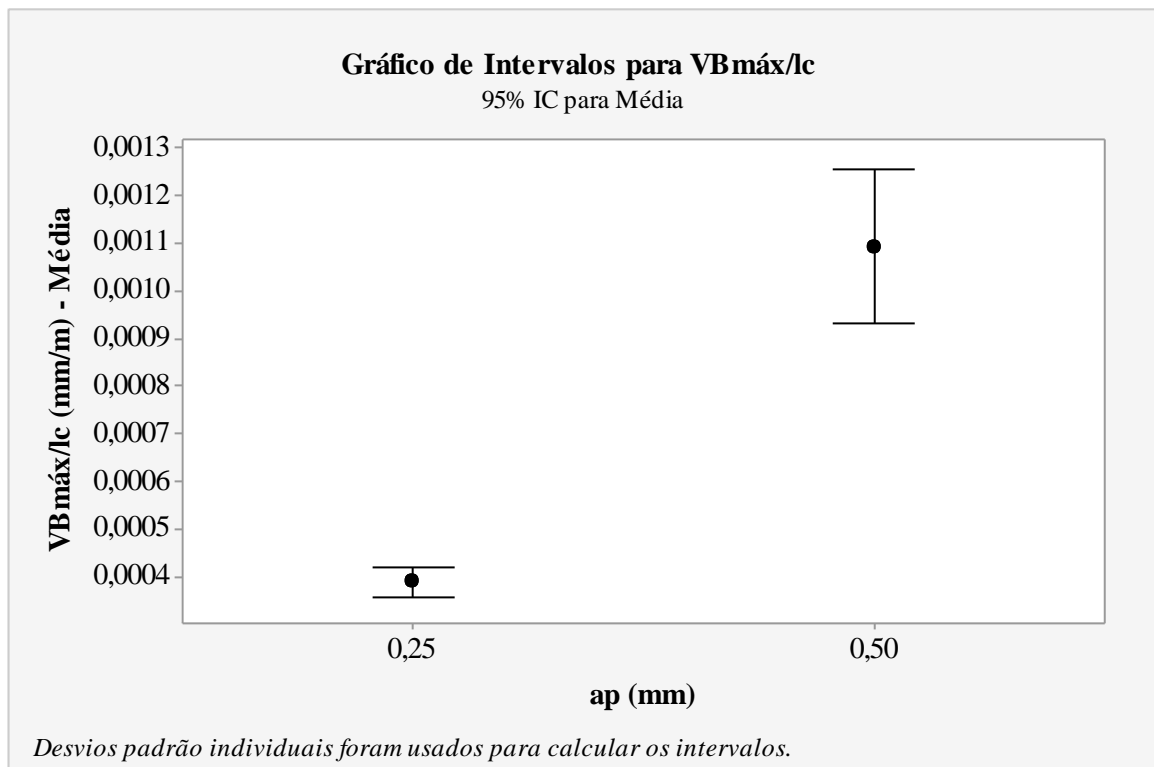
Na Figura 51, o menor valor das médias ocorreu para o ( $f$ ) no nível de 0,05 mm/rev com valor de 0,000695 mm/m. No nível de 0,10 mm/rev ocorreu um aumento da seção de corte, e pode ter interferido para o maior desgaste. Na Figura 52, o menor valor das médias ocorreu para ( $a_p$ ) no nível de 0,25 mm com valor de 0,000388 mm/m. O maior desgaste da ferramenta de corte 0,001092 mm/m está relacionado com a taxa de remoção de material que é maior para ( $a_p$ ) no nível de 0,50 mm. Dessa forma, a maior taxa de material removido impactou no aumento do valor de ( $VB_{m\acute{a}x}/l_c$ ), pois ocorreu um maior volume de material de cavaco em contato com a ferramenta de corte.

Figura 51 – Gráfico de Intervalos dos avanços para  $VB_{\text{máx}}/lc$ .



Fonte: Próprio autor

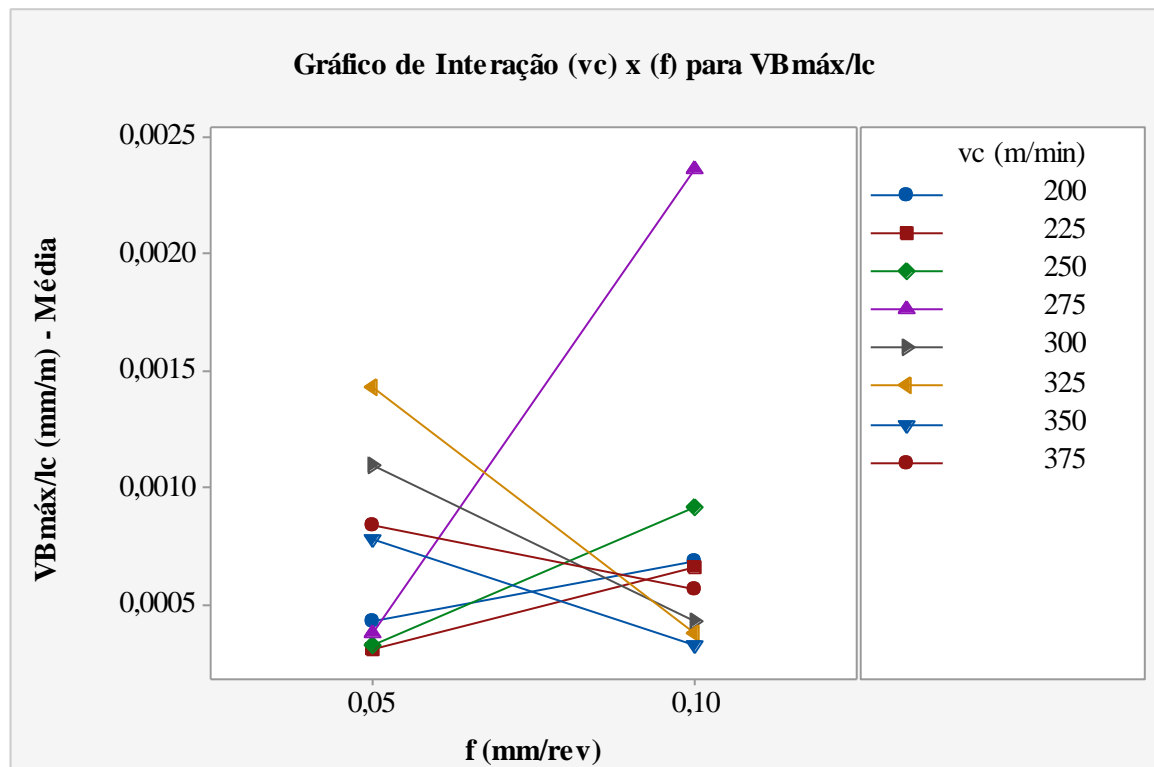
Figura 52 – Gráfico de Intervalos das profundidades de corte para  $VB_{\text{máx}}/lc$ .



Fonte: Próprio autor

Na Figura 53, existe dois grupos diferentes, o primeiro grupo ao aumentar o nível de ( $f$ ) ocorreu uma queda no valor de ( $VB_{m\acute{a}x}/l_c$ ) e o segundo grupo ao aumentar o nível de ( $f$ ) ocorreu um aumento do valor. No primeiro grupo estão as velocidades de corte nos níveis de 300, 325, 350 e 375 m/min e no segundo grupo estão as velocidades de corte nos níveis de 200, 225, 250 e 275 m/min. O menor valor das médias foi obtido na combinação (225 m/min e 0,05 mm/rev) com valor de 0,000308 mm/m. No nível de 0,10 mm/rev, as ( $v_c$ ) nos níveis maiores (300 a 375 m/min) tiveram resultados melhores do que as ( $v_c$ ) nos níveis menores (200 a 275 m/min). O fator ( $f$ ) no nível maior, com a seção de cavaco maior, amenizou o desgaste da ferramenta de corte nas ( $v_c$ ) maiores porque ocorreu menor tempo de contato entre a ferramenta de corte e o material da peça.

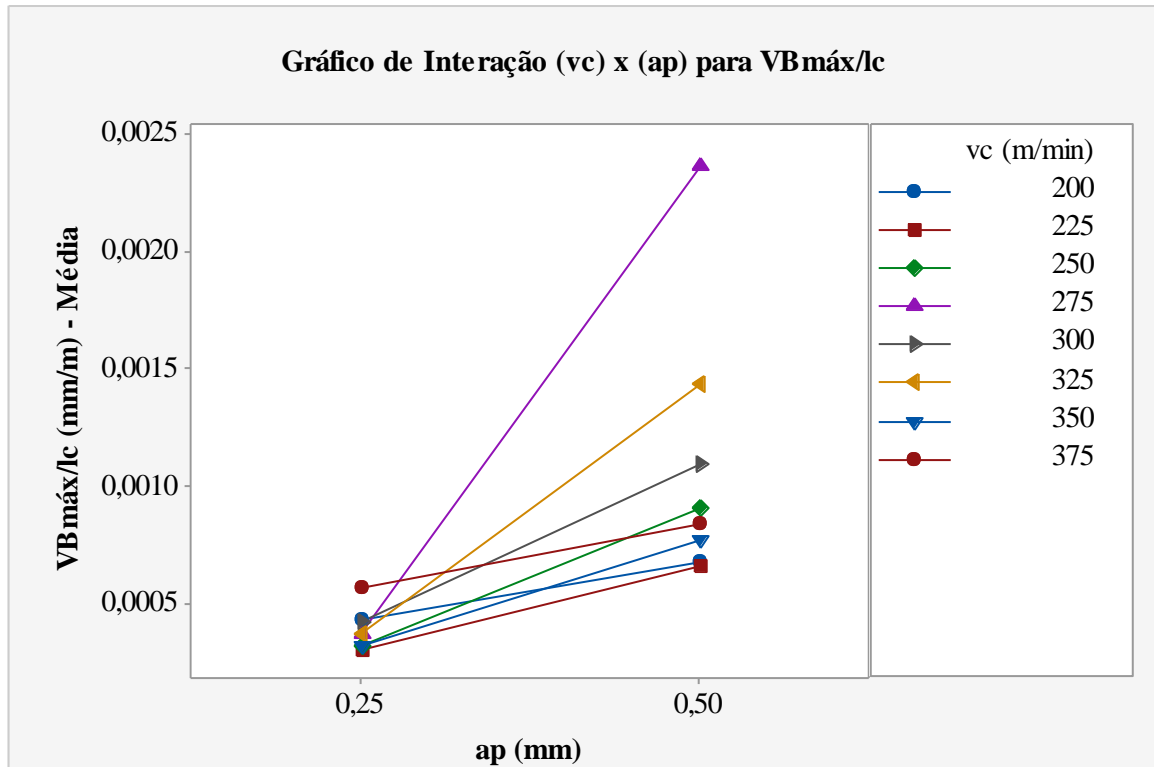
Figura 53 – Gráfico de Interação ( $v_c$ ) x ( $f$ ) para  $VB_{m\acute{a}x}/l_c$ .



Fonte: Próprio autor

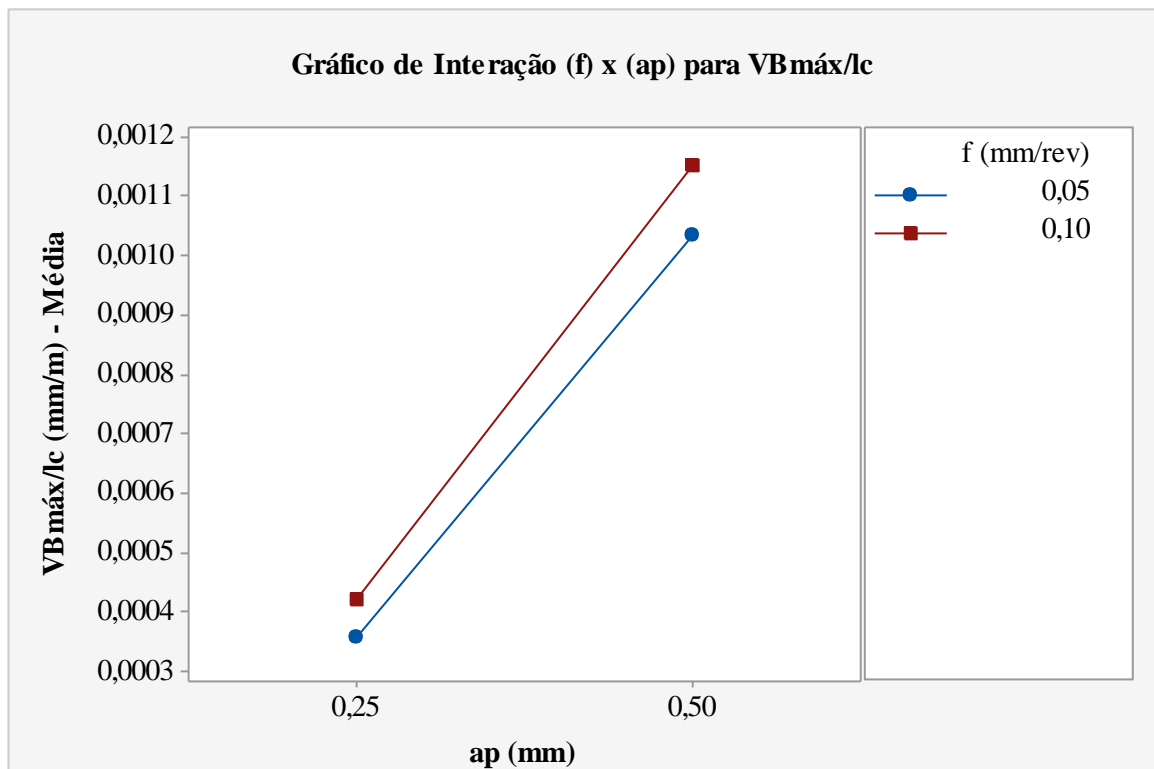
Na Figura 54, ao aumentar o nível do fator ( $a_p$ ) ocorreu aumento nos valores de ( $VB_{m\acute{a}x}/l_c$ ) para todos os níveis de ( $v_c$ ). O menor valor das médias para ( $VB_{m\acute{a}x}/l_c$ ) ocorreu na combinação (225 m/min e 0,25 mm) com valor de 0,000308 mm/m. Na Figura 55, o menor valor das médias foi obtido na combinação (0,05 mm/rev e 0,25 mm) com valor de 0,000356 mm/m. O aumento do nível de ( $a_p$ ) resultou uma maior taxa de material removido, dessa forma, ocorreu um maior fluxo de cavaco na ferramenta de corte ocasionando maior desgaste.

Figura 54 – Gráfico de Interação ( $v_c$ ) x ( $a_p$ ) para  $VB_{m\acute{a}x}/l_c$ .



Fonte: Próprio autor

Figura 55 – Gráfico de Interação ( $f$ ) x ( $a_p$ ) para  $VB_{m\acute{a}x}/l_c$ .



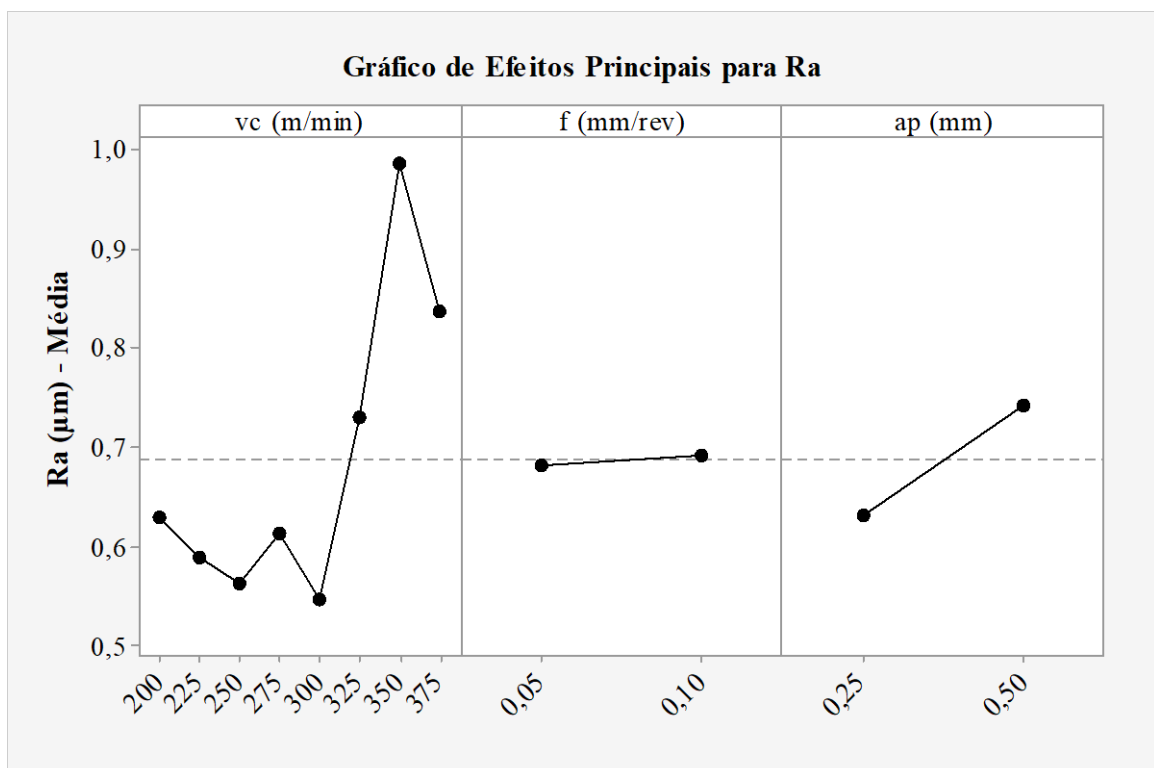
Fonte: Próprio autor

## 4.2 RESULTADOS PARA VARIÁVEL ( $R_a$ )

Na Figura 56, os menores valores das médias para ( $R_a$ ) ocorreram para a ( $v_c$ ) no nível de 300 m/min com valor de 0,548  $\mu\text{m}$ , ( $f$ ) no nível de 0,05 mm/rev com valor de 0,682  $\mu\text{m}$  e ( $a_p$ ) no nível de 0,25 mm com valor de 0,631  $\mu\text{m}$ . A média das médias, linha tracejada, foi de 0,687  $\mu\text{m}$ .

O teste de normalidade de Anderson-Darling mostrou que a distribuição de dados para a rugosidade ( $R_a$ ) não é normal, ou seja, os dados não seguem uma distribuição normal. Na Tabela 6, como nenhum dos fatores apresentaram ( $F > 4$ ) a análise de influência dos fatores não foi significativa para rugosidade ( $R_a$ ), isto é, a alteração de nível dos fatores não implica respostas estatisticamente diferentes dentro de um nível de significância de 5%.

Figura 56 – Gráfico de Efeitos Principais para ( $R_a$ ).



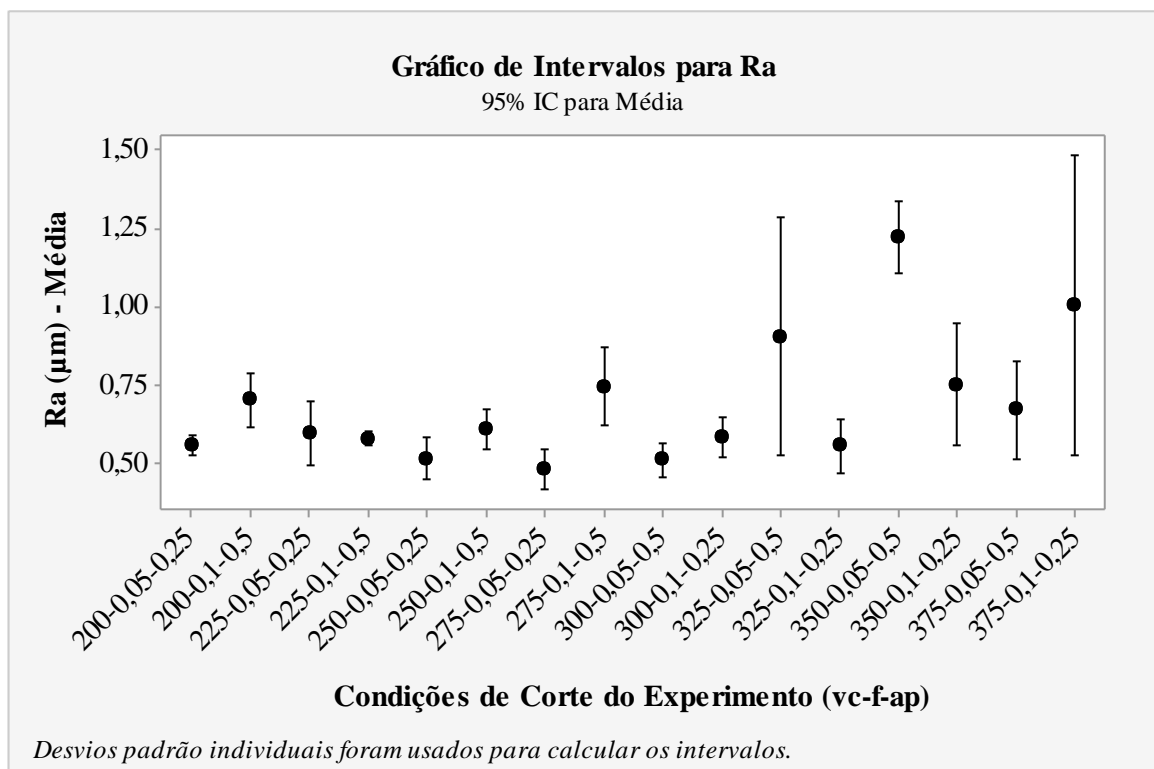
Fonte: Próprio autor

Na Figura 57, o menor valor das médias ocorreu na combinação (275-0,05-0,25) com valor de 0,480  $\mu\text{m}$ . Na Figura 56, o fator ( $v_c$ ) no nível de 350 m/min resultou no maior valor das médias com valor de 0,908  $\mu\text{m}$ , dessa forma, potencializou o aumento no valor da média para combinação citada anteriormente.

Tabela 6 – Análise de Variância (ANOVA) para ( $R_a$ ).

Fonte	Graus de Liberdade	SQ seq	SQ (Aj.)	QM (Adj.)	F	Valor-P
$v_c$ (m/min)	7	0,334352	0,334352	0,047765	1,24	0,404
$f$ (mm/rev)	1	0,000362	0,000362	0,000362	0,01	0,926
$a_p$ (mm)	1	0,050039	0,050039	0,050039	1,30	0,298
Erro de residuos	6	0,231039	0,231039	0,038506		
Total	15	0,615792				

Fonte: Próprio autor

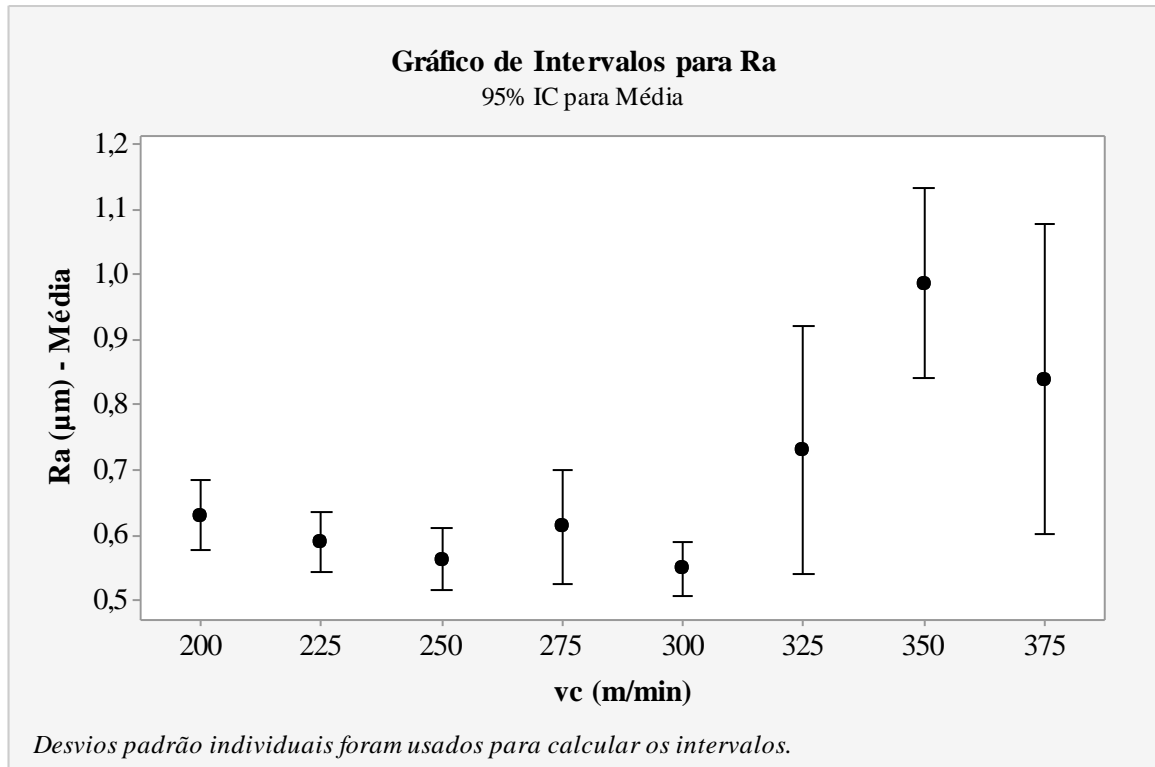
Figura 57 – Gráfico de Intervalos das 16 combinações para ( $R_a$ ).

Fonte: Próprio autor

Na Figura 58, o menor valor das médias ocorreu para a ( $v_c$ ) no nível de 300 m/min com o valor de 0,548  $\mu\text{m}$ . Para o intervalo de 200 a 300 m/min foi obtido um patamar de rugosidade mais baixo e para o intervalo de 325 a 375 m/min um patamar mais elevado. Esse último intervalo de ( $v_c$ ) resultou em maiores valores e maiores desvio padrão.

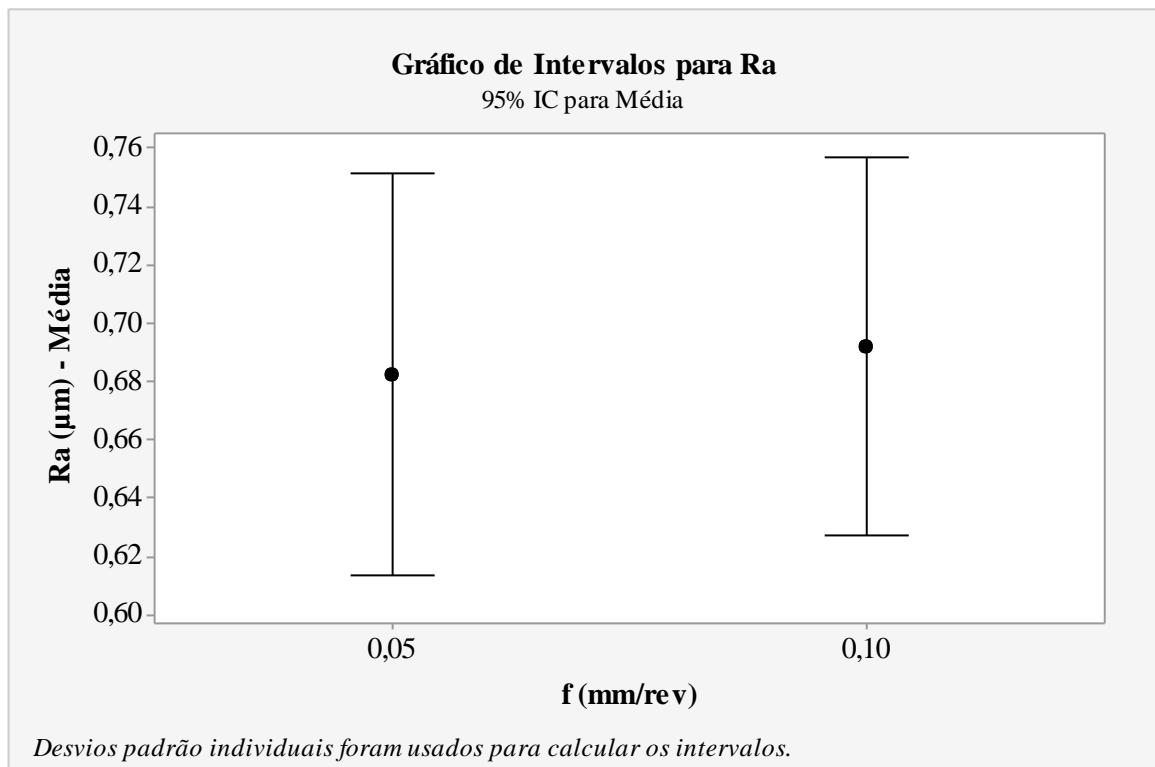
Na Figura 59, o menor valor das médias ocorreu para o nível de 0,05 mm/rev com 0,682  $\mu\text{m}$ . O valor da variável ( $R_a$ ) está diretamente relacionado com a variável ( $f$ ) e níveis maiores resultam em maiores valores de ( $f$ ).

Figura 58 – Gráfico de Intervalos das velocidades de corte para ( $R_a$ ).



Fonte: Próprio autor

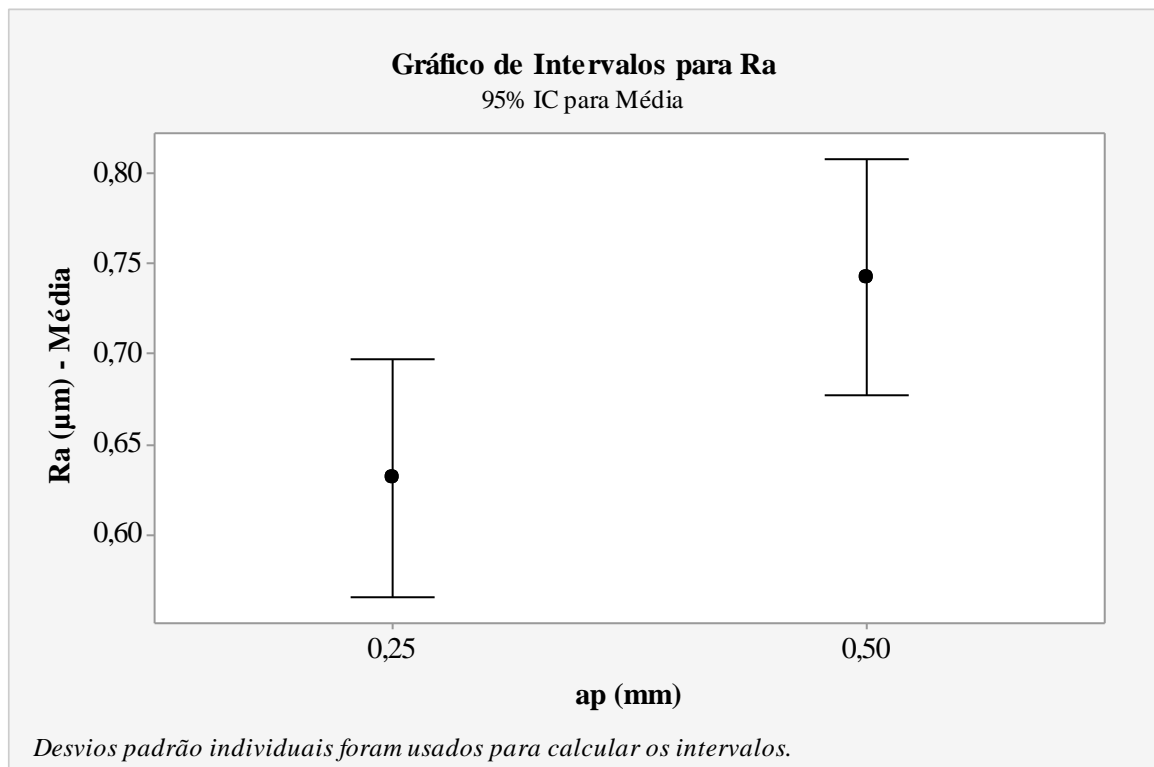
Figura 59 – Gráfico de Intervalos dos avanços para ( $R_a$ ).



Fonte: Próprio autor

Na Figura 60, o menor valor das médias ocorreu para o nível de 0,25 mm com 0,631  $\mu\text{m}$ . A variável ( $a_p$ ) no nível de 0,50 mm resultou em valor das médias maior, conseqüentemente devido ao maior desgaste da ferramenta de corte citado anteriormente na Figura 52. Esse maior desgaste e solicitação da ferramenta de corte possivelmente interferiu nos valores de rugosidades apresentados.

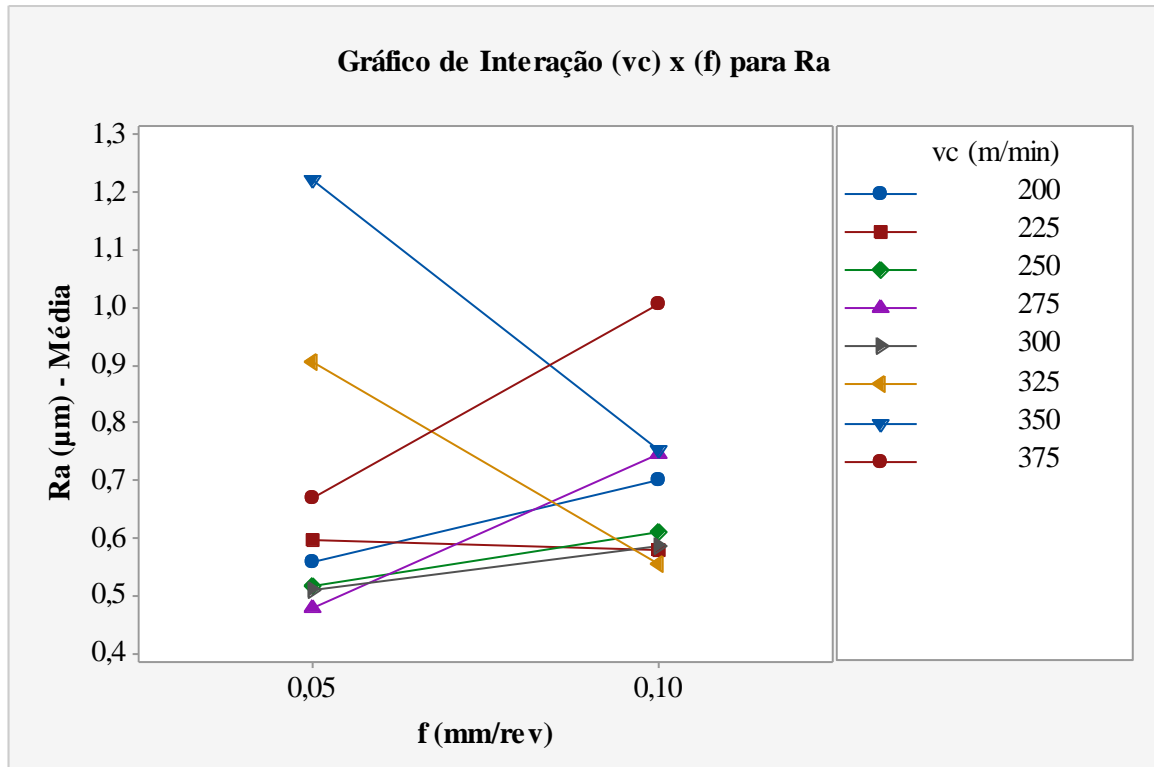
Figura 60 – Gráfico de Intervalos das profundidades de corte para ( $R_a$ ).



Fonte: Próprio autor

Na Figura 61, ocorreram dois grupos diferentes, o primeiro grupo ao aumentar o nível do fator ( $f$ ) ocorreu uma queda do valor de ( $R_a$ ) e o segundo grupo ao aumentar ( $f$ ) ocorreu um aumento nos valores. No primeiro grupo estão as ( $v_c$ ) nos níveis de 225, 325 e 350 m/min e no segundo grupo estão as ( $v_c$ ) nos níveis de 200, 250, 275, 300 e 375 m/min. Teoricamente o aumento no nível de ( $f$ ) resultaria em maiores valores para rugosidade, porém para os três níveis de ( $v_c$ ) ocorreram o contrário do esperado. O menor valor das médias ocorreu na combinação (275 m/min e 0,05 mm/rev) com valor de 0,480  $\mu\text{m}$ .

Figura 61 – Gráfico de Interação ( $v_c$ ) x ( $f$ ) para ( $R_a$ ).

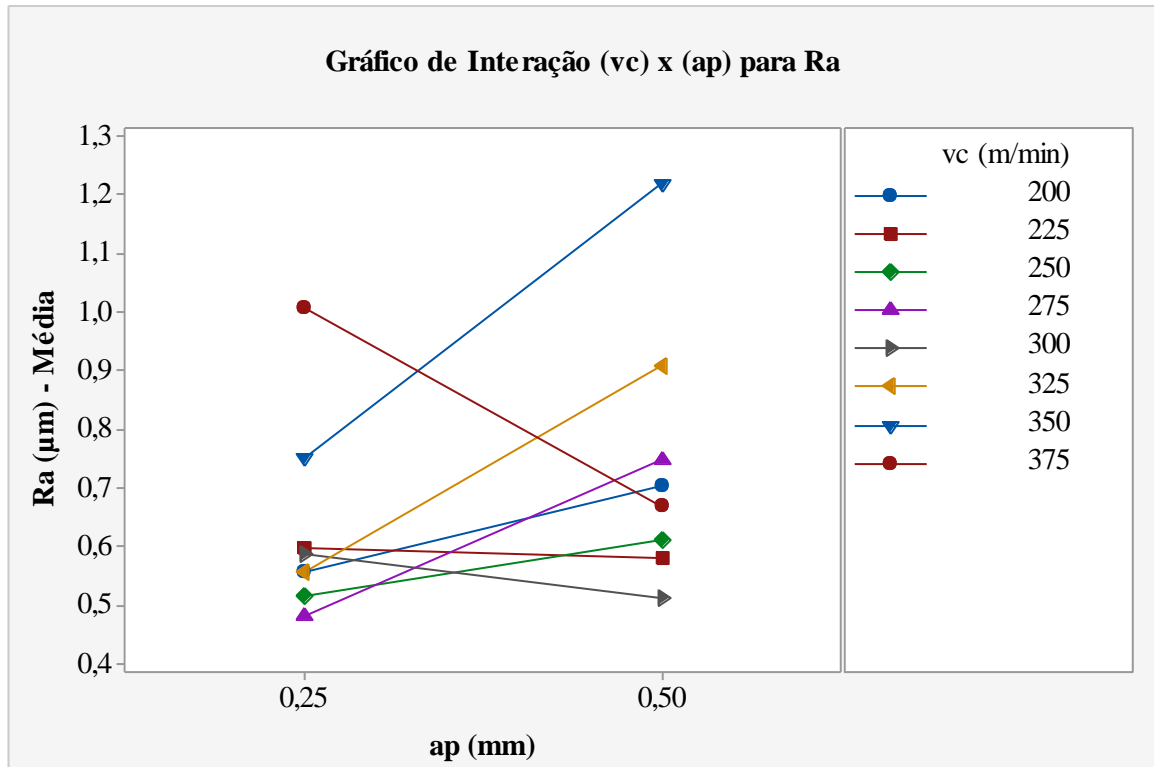


Fonte: Próprio autor

Na Figura 62, ocorreram dois grupos diferentes, o primeiro grupo é aquele que ao aumentar o nível da ( $a_p$ ) ocorreu uma queda nos valores de ( $R_a$ ) e o segundo grupo ao aumentar o nível da ( $a_p$ ) ocorreu um aumento nos valores. No primeiro grupo estão as ( $v_c$ ) nos níveis de 225, 300 e 375 m/min e no segundo grupo estão as ( $v_c$ ) nos níveis de 200, 250, 275, 325 e 350 m/min. O menor valor das médias para ( $R_a$ ) ocorreu na combinação (275 m/min e 0,25 mm) com valor de 0,480 µm.

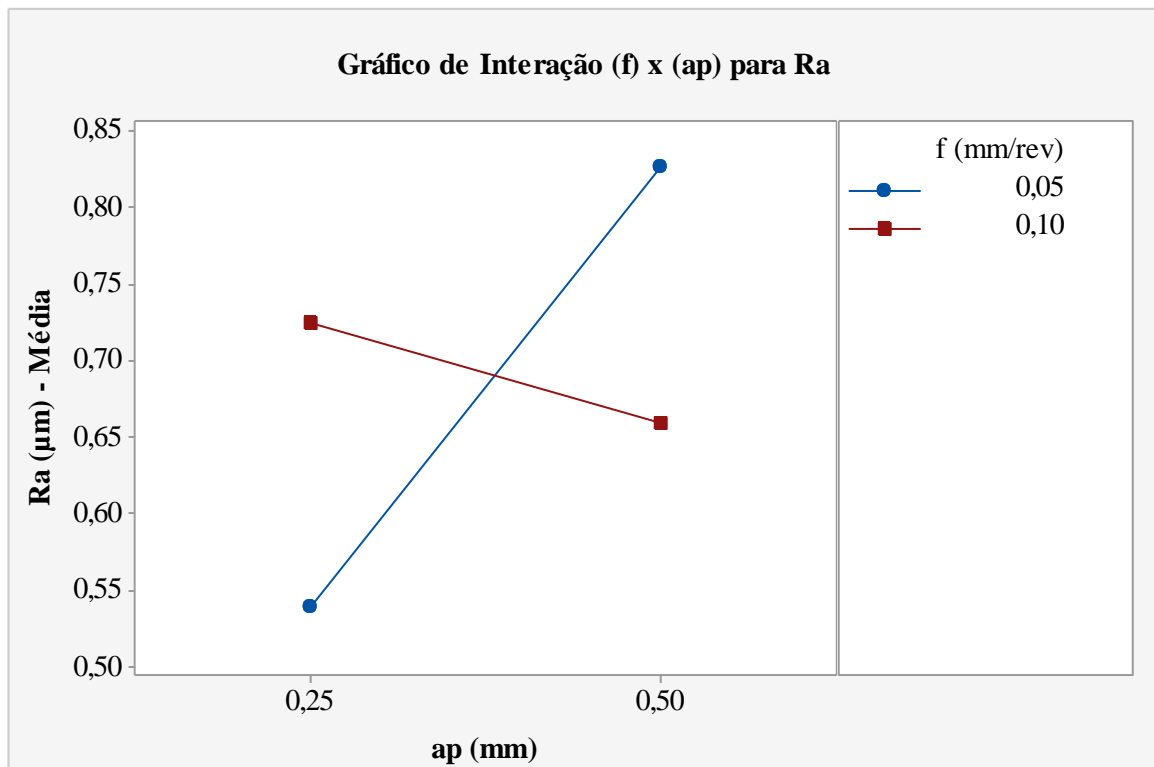
Na Figura 63, o menor valor das médias para ( $R_a$ ) ocorreu na combinação (0,05 mm/rev e 0,25 mm) com valor de 0,538 µm.

Figura 62 – Gráfico de Interação ( $v_c$ ) x ( $a_p$ ) para ( $R_a$ ).



Fonte: Próprio autor

Figura 63 – Gráfico de Interação ( $f$ ) x ( $a_p$ ) para ( $R_a$ ).

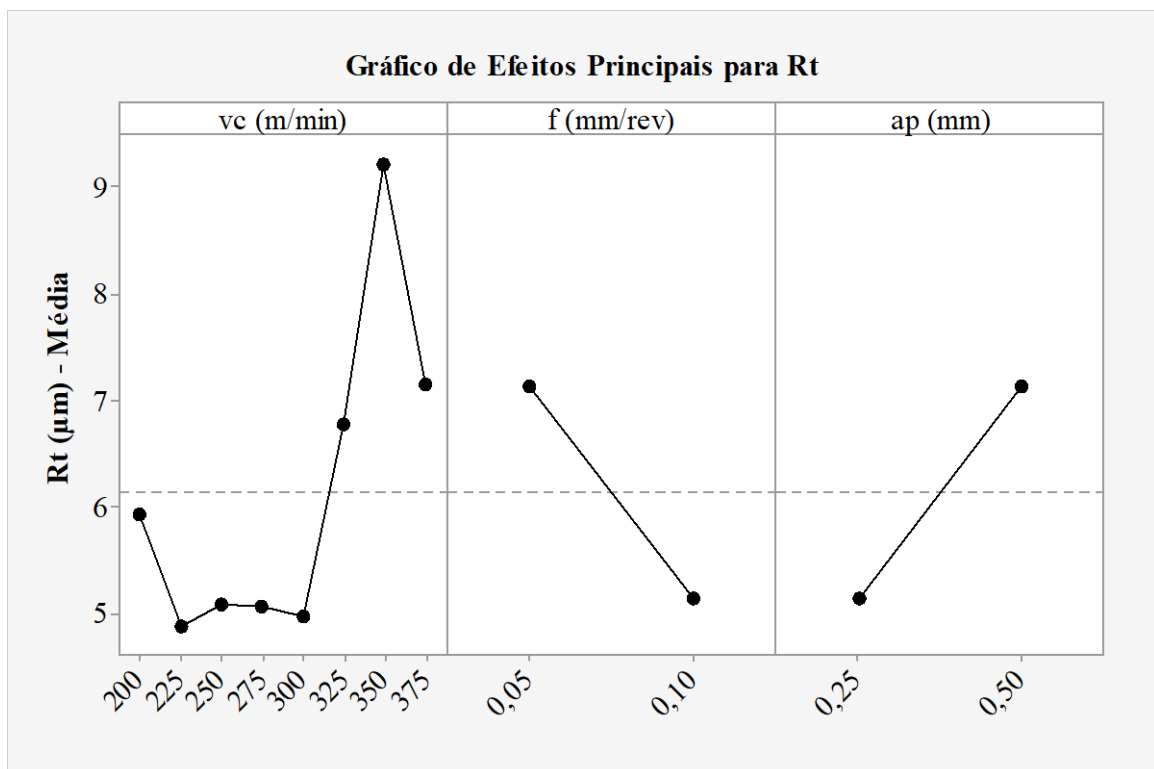


Fonte: Próprio autor

### 4.3 RESULTADOS PARA VARIÁVEL RUGOSIDADE ( $R_t$ )

Na Figura 64, o gráfico permitiu verificar a relação entre a variável de saída rugosidade ( $R_t$ ) e os parâmetros de corte. Os menores valores das médias para ( $R_t$ ) ocorreram para ( $v_c$ ) no nível de 225 m/min com valor de 4,888  $\mu\text{m}$ , para ( $f$ ) no nível de 0,10 mm/rev com valor de 5,145  $\mu\text{m}$  e para ( $a_p$ ) no nível de 0,25 mm com valor de 5,151  $\mu\text{m}$ . O valor das médias, linha tracejada, é de 6,146  $\mu\text{m}$ .

Figura 64 – Gráfico de Efeitos Principais para ( $R_t$ ).



Fonte: Próprio autor

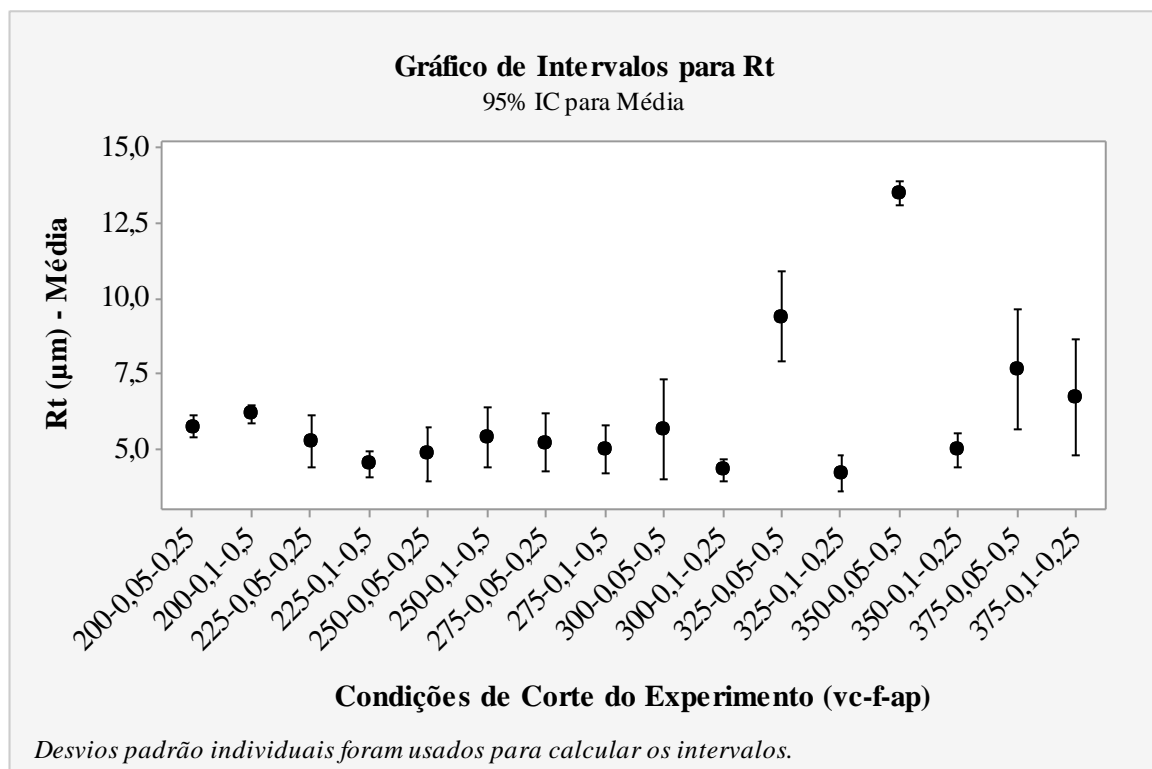
O teste de normalidade de Anderson-Darling mostrou que a distribuição de dados para ( $R_t$ ) não é normal, ou seja, os dados não seguem uma distribuição normal. Na Tabela 7, os valores de (F) para os fatores ( $f$ - $a_p$ ) são maiores do que 4, sendo assim, a associação é estatisticamente significativa. A alteração de nível dos fatores implica respostas estatisticamente diferentes dentro de um nível de significância de 5%.

Na Figura 65, na combinação (325-0,10-0,25) ocorreu o menor valor das médias igual a 4,195  $\mu\text{m}$ . Os três maiores valores das médias obtidos para ( $R_t$ ) ocorreram nas combinações (325-0,05-0,50), (350-0,05-0,50) e (375-0,05-0,50). O fator ( $a_p$ ) no nível de 0,50 mm combinado com esse patamar mais elevado de ( $v_c$ ) potencializaram maiores valores para ( $R_t$ ).

Tabela 7 – Análise de Variância (ANOVA) para ( $R_t$ ).

Fonte	Graus de Liberdade	SQ seq	SQ (Aj.)	QM (Adj.)	F	Valor-P
$v_c$ (m/min)	7	32,31	32,31	4,615	1,39	0,351
$f$ (mm/rev)	1	16,04	16,04	16,042	4,84	0,070
$a_p$ (mm)	1	15,84	15,84	15,841	4,78	0,071
Erro de residuos	6	19,87	19,87	3,312		
Total	15	84,06				

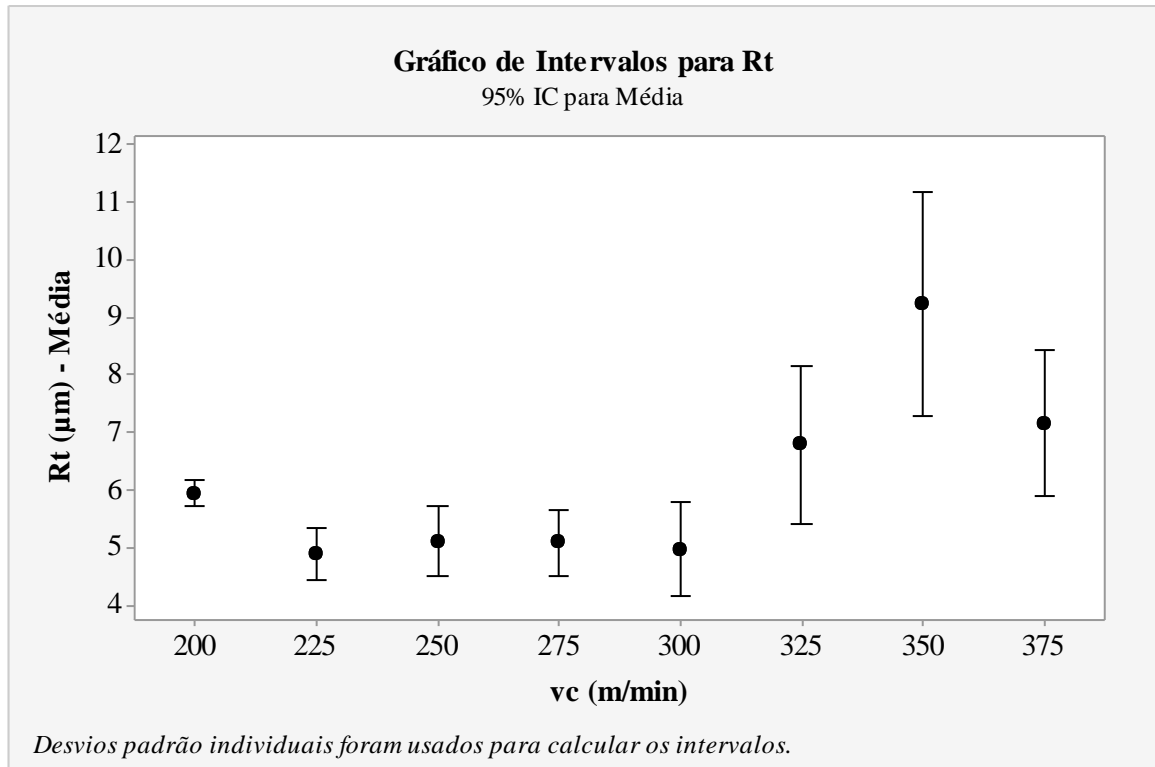
Fonte: Próprio autor

Figura 65 – Gráfico de Intervalos das 16 combinações para ( $R_t$ ).

Fonte: Próprio autor

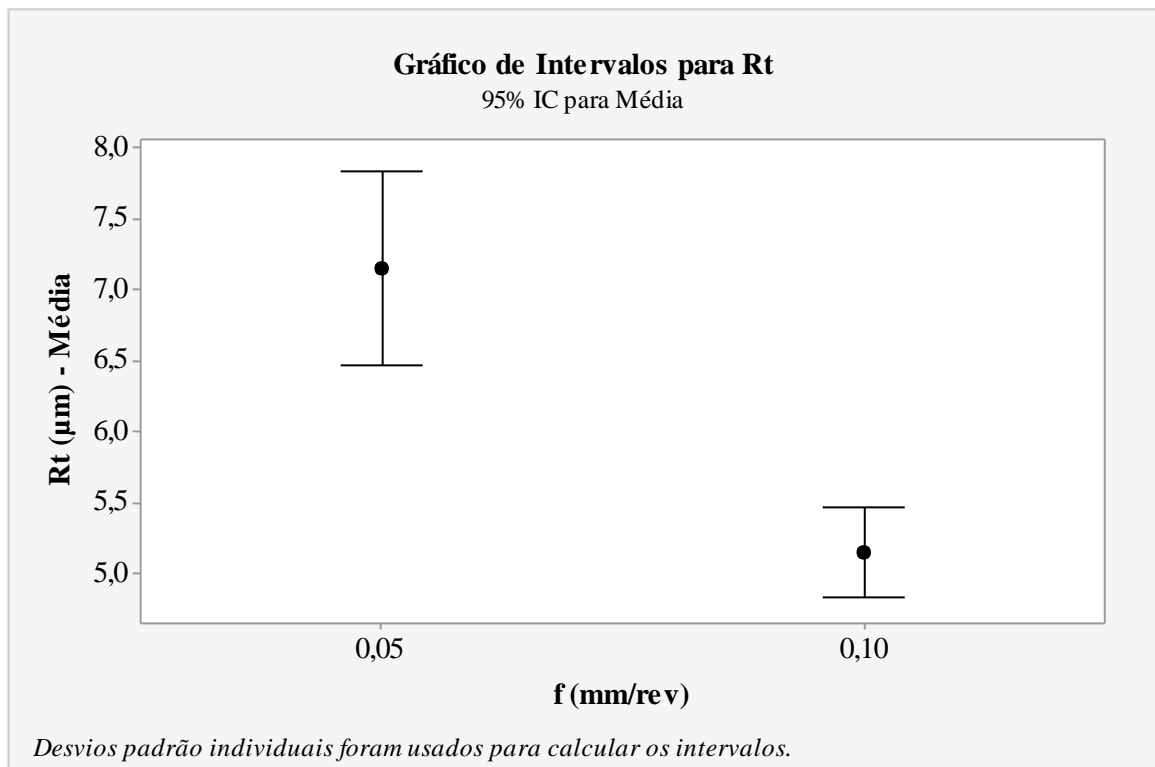
Na Figura 66, o menor valor das médias para rugosidade ( $R_t$ ) ocorreu para ( $v_c$ ) no nível de 225 m/min com o valor de 4,888  $\mu\text{m}$  e o maior valor no nível de 350 m/min com valor de 9,229  $\mu\text{m}$ . Nota-se que para o intervalo de 225 a 300 m/min foi obtido um patamar de rugosidade mais baixo e para o intervalo de 325 a 375 m/min um patamar mais elevado. Na Figura 67, o menor valor das médias para rugosidade ( $R_t$ ) ocorreu para o avanço no nível de 0,10 mm/rev com valor de 5,145  $\mu\text{m}$  e o maior valor no nível de 0,05 mm/rev com 7,147  $\mu\text{m}$ . Nesse caso, ocorreu o contrário do esperado para a rugosidade, pois maiores níveis de avanço resultam maiores valores de rugosidades e para o nível maior ocorreu menor rugosidade.

Figura 66 – Gráfico de Intervalos das velocidades de corte para ( $R_t$ ).



Fonte: Próprio autor

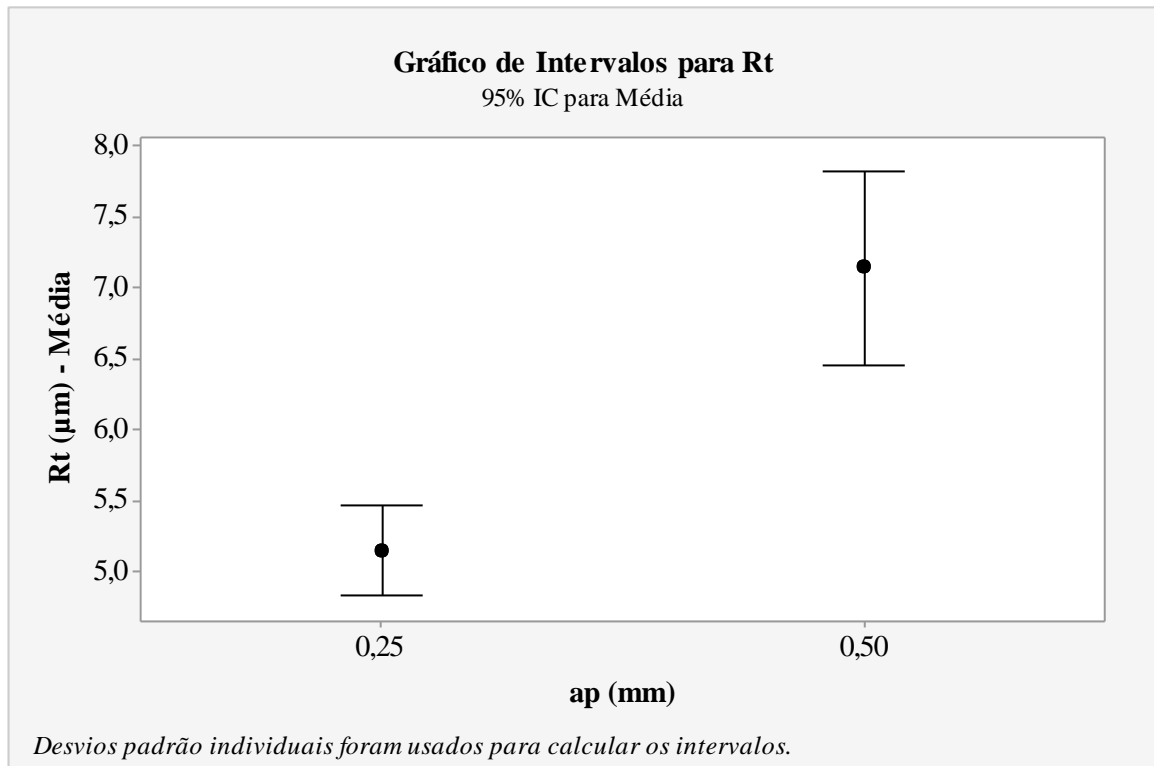
Figura 67 – Gráfico de Intervalos dos avanços para ( $R_t$ ).



Fonte: Próprio autor

Na Figura 68, o menor valor das médias para ( $R_t$ ) ocorreu para ( $a_p$ ) no nível de 0,25 mm com valor igual a 5,151  $\mu\text{m}$ . A maior taxa de remoção de material no nível de 0,50 mm resultou em maior valor de rugosidade. O maior fluxo de cavaco interfere diretamente no desempenho da ferramenta de corte e conseqüentemente na rugosidade da peça.

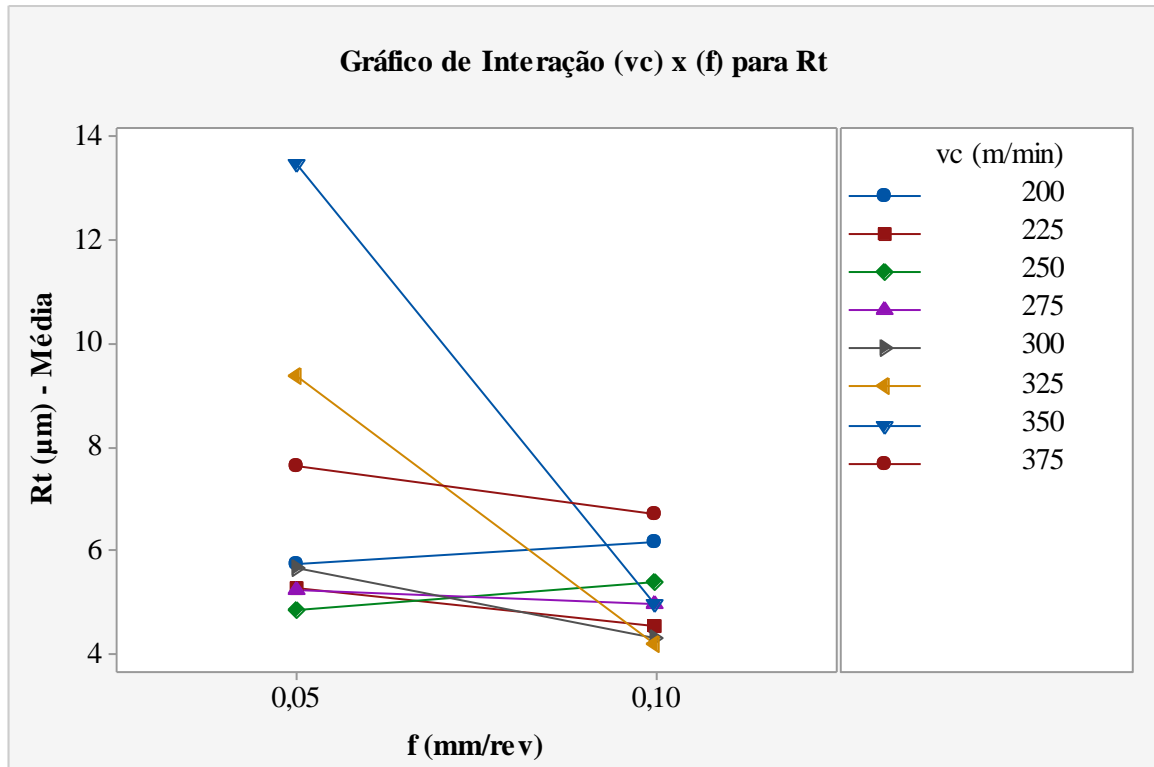
Figura 68 – Gráfico de Intervalos das profundidades de corte para ( $R_t$ ).



Fonte: Próprio autor

Na Figura 69, ocorreram dois grupos diferentes, no primeiro grupo ao aumentar o nível de ( $f$ ) ocorreu uma queda no valor de ( $R_t$ ) e no segundo grupo ocorreu o contrário. No primeiro grupo estão as ( $v_c$ ) nos níveis de 225, 275, 300, 325, 350 e 375 m/min e no segundo grupo os níveis de 200 e 250 m/min. O menor valor das médias foi obtido na combinação (325 m/min e 0,10 mm/rev) com valor de 4,306  $\mu\text{m}$ . Anteriormente, na Figura 66, verificou-se que ocorreu o maior valor de rugosidade para ( $v_c$ ) no nível de 350 m/min, sendo assim, afetou mais o valor da rugosidade do que o aumento no nível do ( $f$ ) para as duas combinações analisadas.

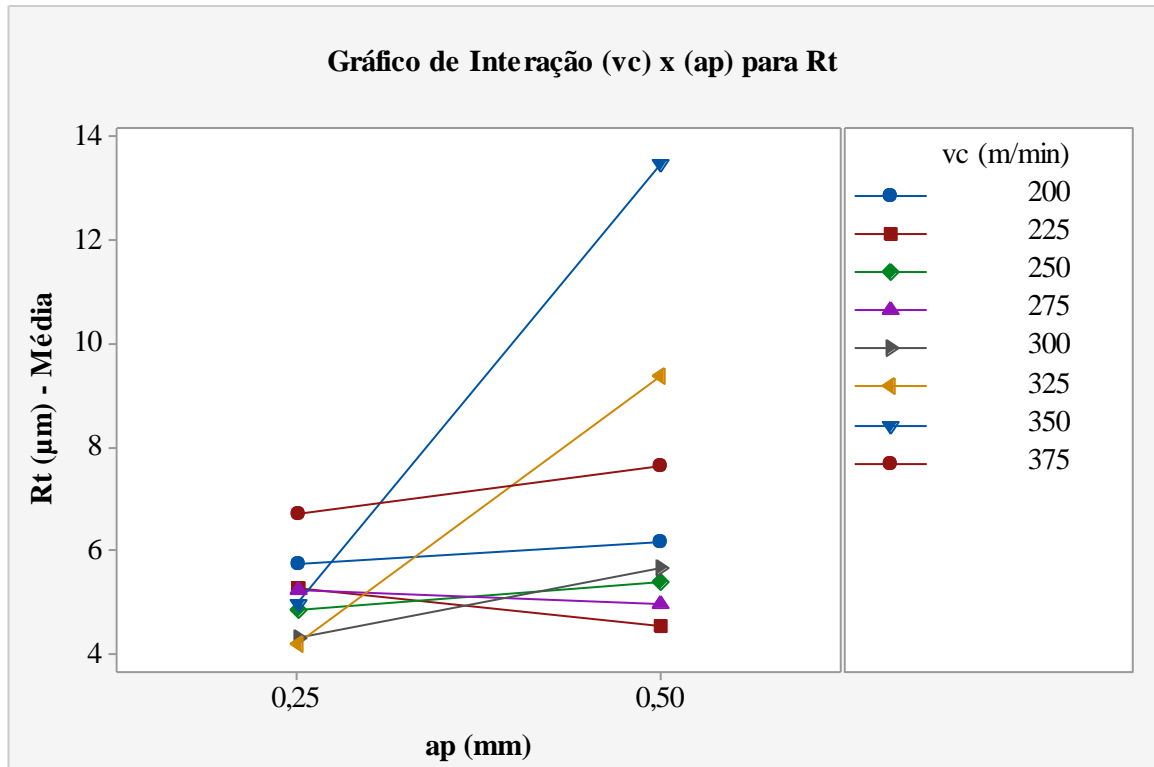
Figura 69 – Gráfico de Interação ( $v_c$ ) x ( $f$ ) para ( $R_t$ ).



Fonte: Próprio autor

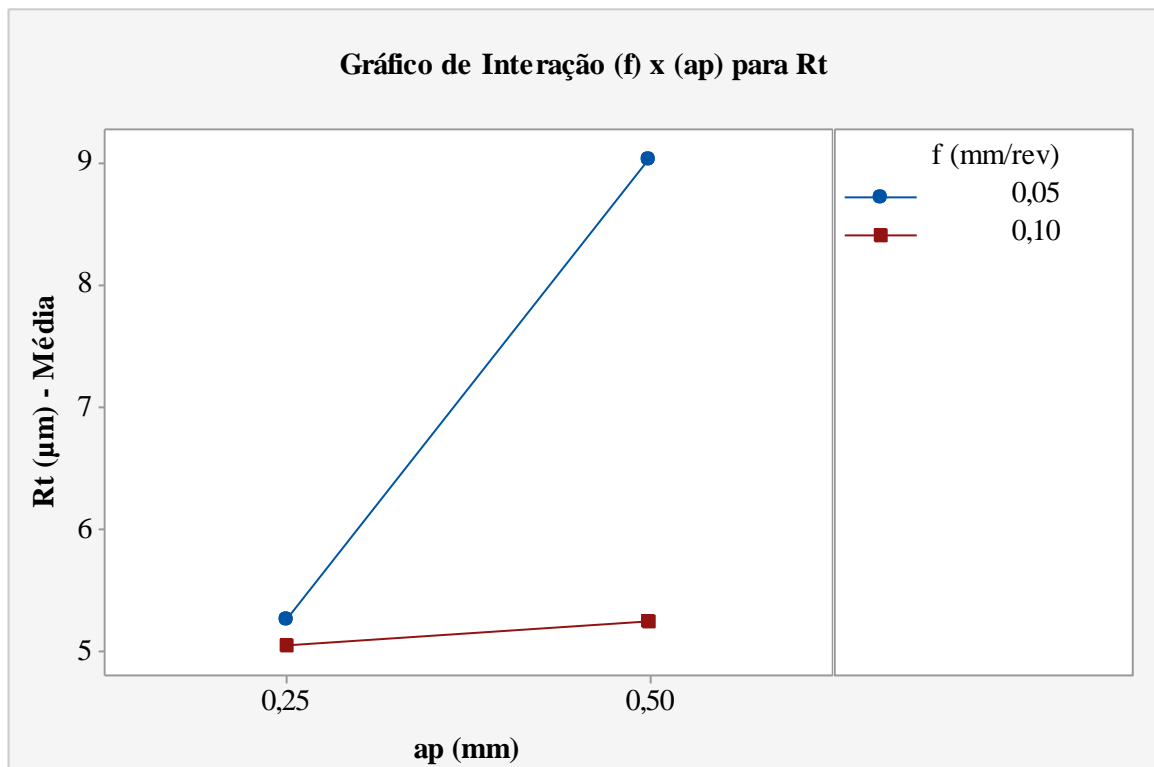
Na Figura 70, ocorreram dois grupos diferentes, o primeiro grupo ao aumentar o nível da ( $a_p$ ) ocorreu uma queda em ( $R_t$ ) e o segundo grupo ao aumentar o nível da ( $a_p$ ) ocorreu o contrário. No primeiro grupo estão as ( $v_c$ ) nos níveis de 225 e 275 m/min e no segundo grupo estão os níveis de 200, 250, 300, 325, 350 e 375 m/min. O menor valor das médias ocorreu na combinação (325 m/min e 0,25 mm) com valor de 4,306  $\mu\text{m}$ . A análise da influência dos fatores ( $v_c$ ) no nível de 350 m/min e ( $a_p$ ) no nível de 0,50 mm, isoladamente, resultou no maior valor das médias para ( $R_t$ ), conseqüentemente a combinação desses fatores potencializou negativamente a rugosidade. Na Figura 71, o menor valor das médias ocorreu na combinação (0,10 mm/rev e 0,25 mm) com valor de 5,041  $\mu\text{m}$ . A variável rugosidade depende diretamente do fator ( $f$ ), ou seja, o aumento no nível do ( $f$ ) resultaria e um aumento na rugosidade, porém para as duas combinações não ocorreu o esperado.

Figura 70 – Gráfico de Interação ( $v_c$ ) x ( $a_p$ ) para ( $R_t$ ).



Fonte: Próprio autor

Figura 71 – Gráfico de Interação ( $f$ ) x ( $a_p$ ) para ( $R_t$ ).



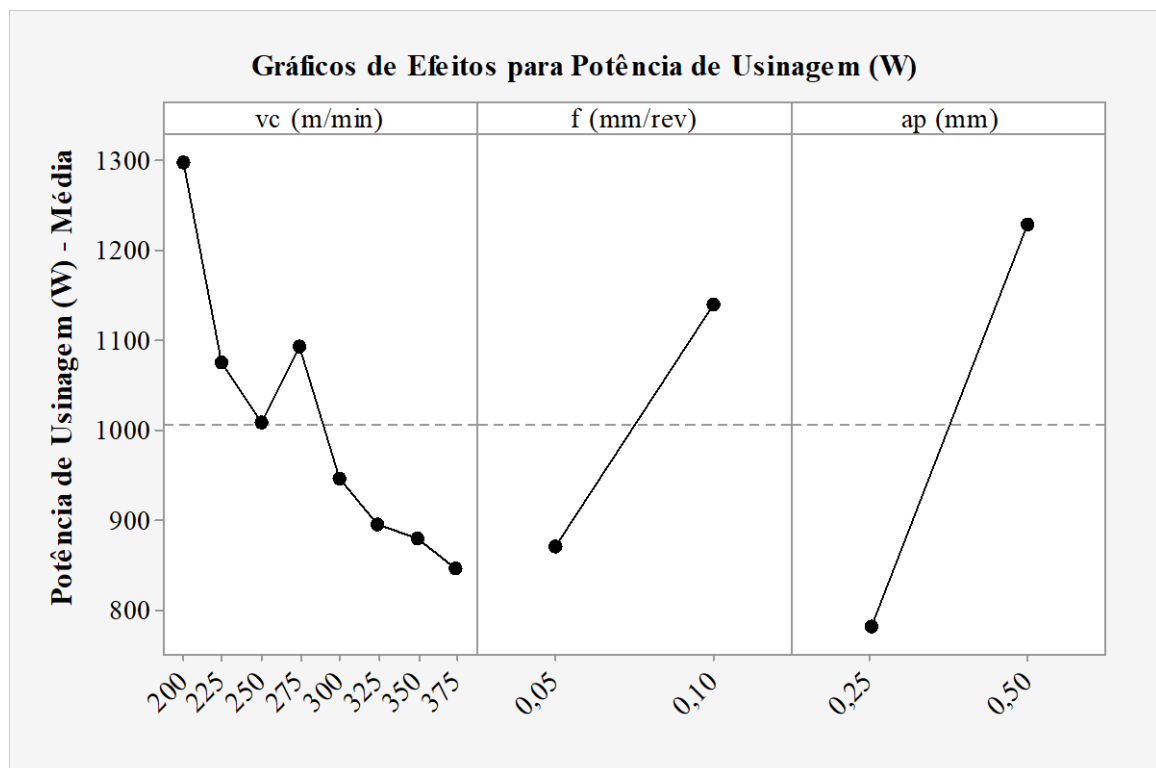
Fonte: Próprio autor

#### 4.4 RESULTADOS PARA VARIÁVEL POTÊNCIA DE USINAGEM

Na Figura 72, os menores valores das médias para potência de usinagem ocorreram para  $v_c$  no nível de 375 m/min com valor de 847,71 W, para o  $f$  no nível de 0,05 mm/rev com valor de 872,63 W e para a  $a_p$  no nível de 0,25 mm com valor de 783,19 W.

O teste de normalidade de Anderson-Darling mostrou que a distribuição de dados para a potência de usinagem não é normal, ou seja, os dados não seguem uma distribuição normal. Na Tabela 8, verificou-se que para os fatores ( $v_c$ - $f$ - $a_p$ ) os valores de (F) são maiores do que 4, sendo assim, a associação é estatisticamente significativa. Dessa forma, todos os fatores interferem significativamente nos resultados da potência de usinagem. O fator ( $v_c$ ) apresentou uma tendência de queda a medida que os valores dos níveis foi aumentando; o fatores ( $f$ ) e ( $a_p$ ) apresentaram uma tendência de aumento a medida que os valores dos níveis foram aumentando.

Figura 72 – Gráfico de Efeitos Principais para potência de usinagem.



Fonte: Próprio autor

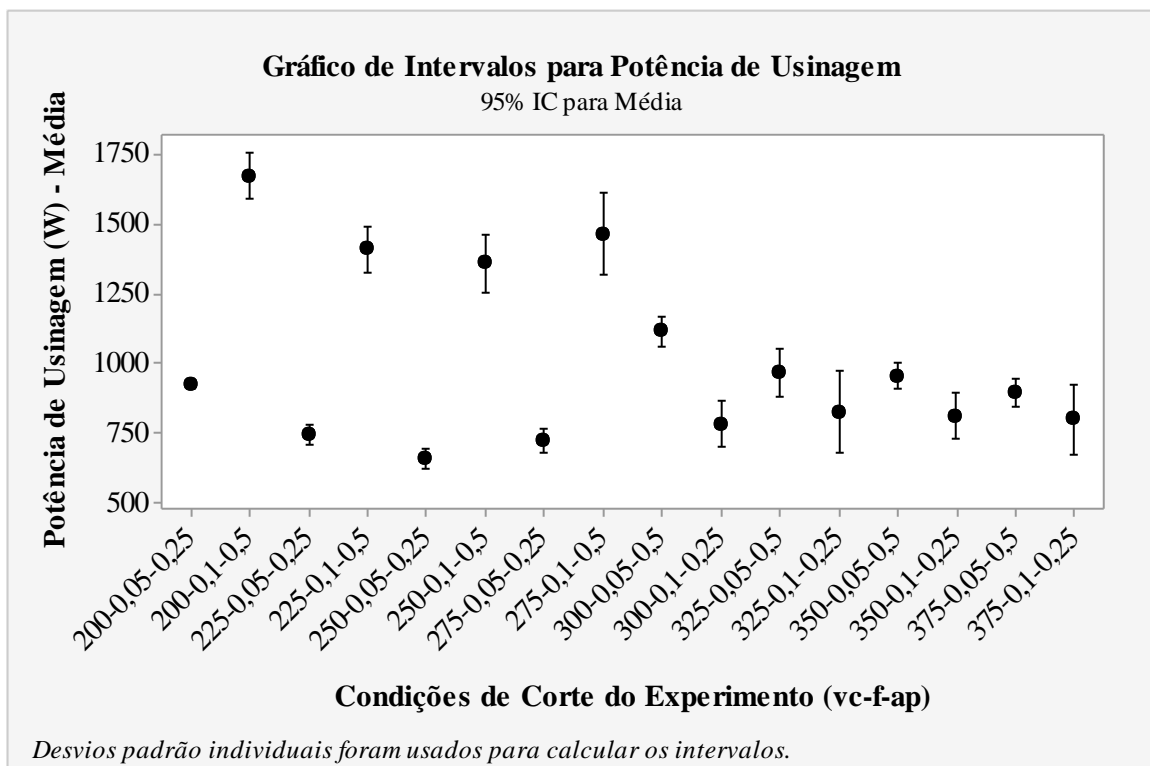
Tabela 8 – Análise de Variância (ANOVA) para potência de usinagem.

Fonte	Graus de Liberdade	SQ seq	SQ (Aj.)	QM (Adj.)	F	Valor-P
<i>vc</i> (m/min)	7	308145	308145	44021	13,76	0,003
<i>f</i> (mm/rev)	1	287749	287749	287749	89,94	0,000
<i>ap</i> (mm)	1	799601	799601	799601	249,92	0,000
Erro de resíduos	6	19197	19197	3199		
Total	15	1414692				

Fonte: Próprio autor

Na Figura 73, a combinação (250-0,05-0,25) resultou o menor valor das médias para potência de usinagem com valor de 658,15 W e a combinação (200-0,10-0,50) resultou o maior valor igual a 1673,89 W, ou seja, mais que o dobro de consumo em relação à combinação anterior. Na Tabela 8, anteriormente, verificou-se que os fatores (*f*) e (*a<sub>p</sub>*) foram os mais significativos para potência de usinagem ( $F = 89,94$  e  $249,92$ ) respectivamente. Consequentemente, resultou no impacto da potência de usinagem mais elevada. Para todas as combinações com (*a<sub>p</sub>*) no nível de 0,50 mm ocorreram os maiores consumos de potência de usinagem.

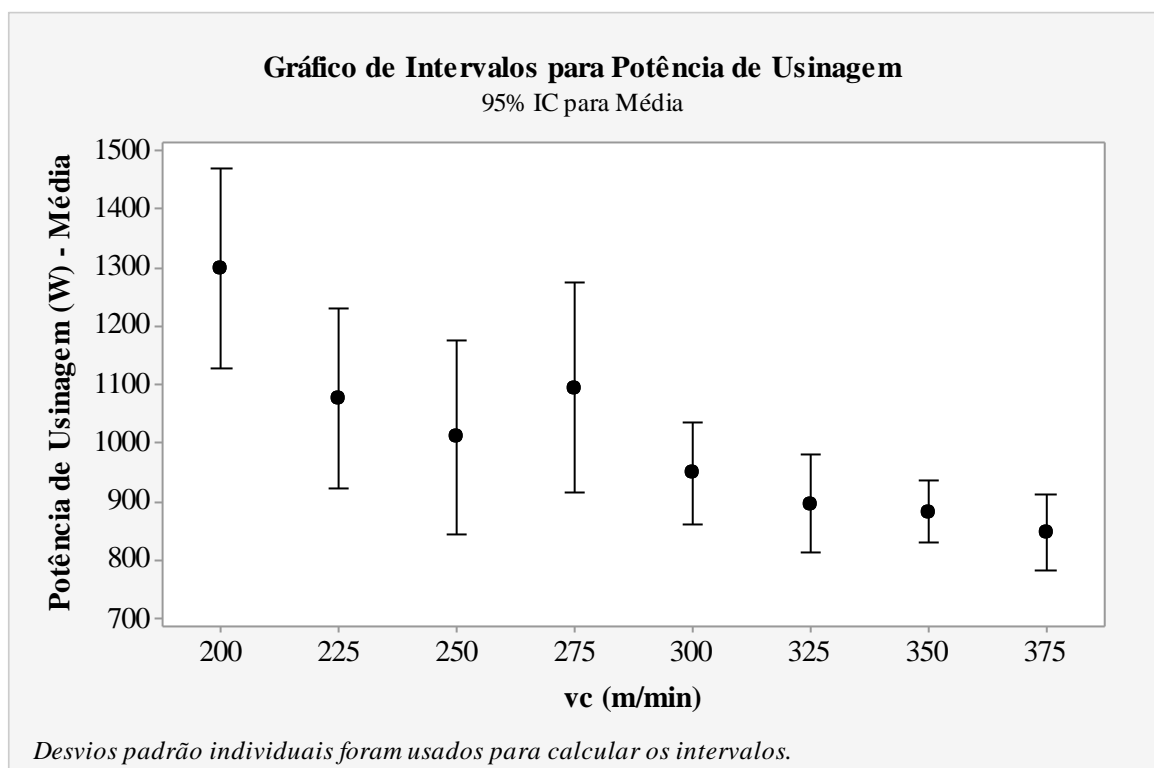
Figura 73 – Gráfico de Intervalos das 16 combinações para potência de usinagem.



Fonte: Próprio autor

Na Figura 74, o menor valor das médias para potência de usinagem ocorreu no nível de 375 m/min com o valor de 847,71 W e o maior valor das médias ocorreu no nível de 200 m/min com valor de 1298,42 W. Nota-se que para as ( $v_c$ ) nos níveis de 200, 225, 250 e 275 m/min ocorreram os maiores valores de potência de usinagem e para as ( $v_c$ ) nos níveis de 300, 325, 350 e 375 m/min o contrário. As ( $v_c$ ) em níveis maiores resultariam em patamares maiores de potência de usinagem, porém ocorreu o contrário. Na análise para ( $v_c$ ) o aumento do nível desse parâmetro resultou em uma queda considerável na potência de usinagem. Um fator que pode estar ligado a essa queda é um possível aumento da temperatura de corte devido ao aumento da ( $v_c$ ). Como a ferramenta de corte é de material cerâmico e possui elevada dureza a altas temperaturas e baixa condutividade térmica, a carga térmica foi direcionada para o material da peça e cavacos. Sendo assim, facilitou a retirada de material com o aumento dos níveis de ( $v_c$ ).

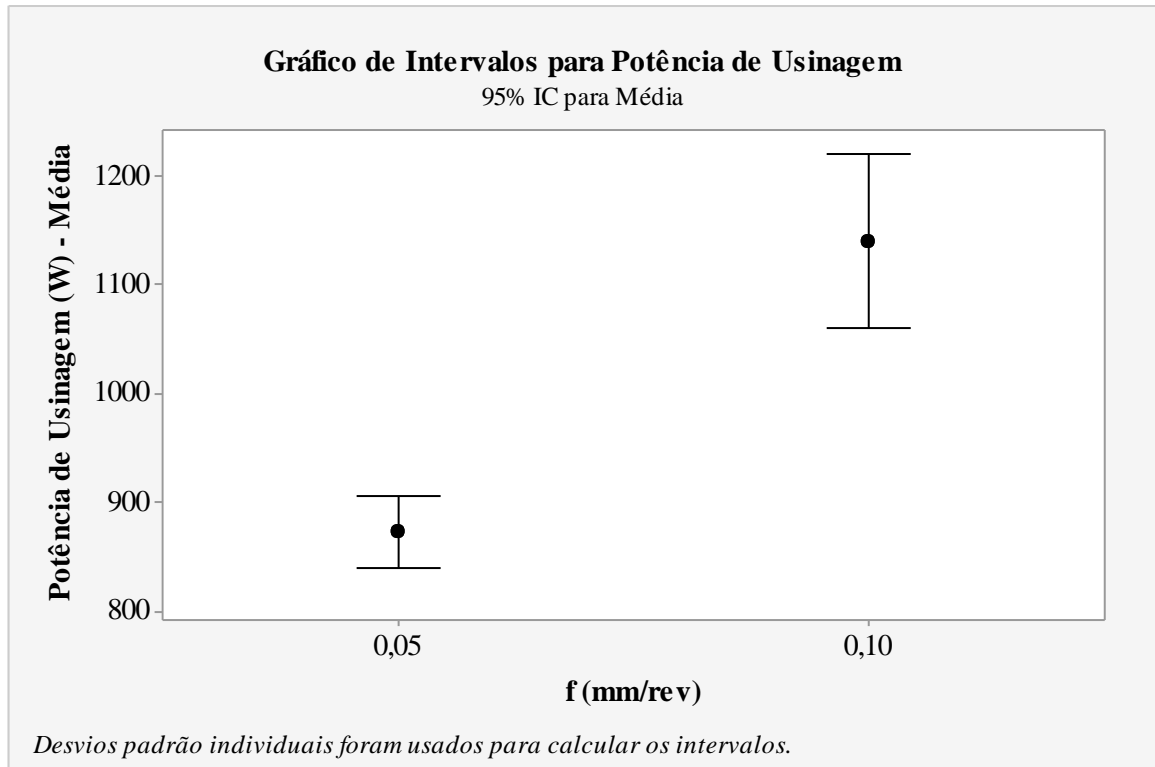
Figura 74 – Gráfico de Intervalos das velocidades de corte para potência de usinagem.



Fonte: Próprio autor

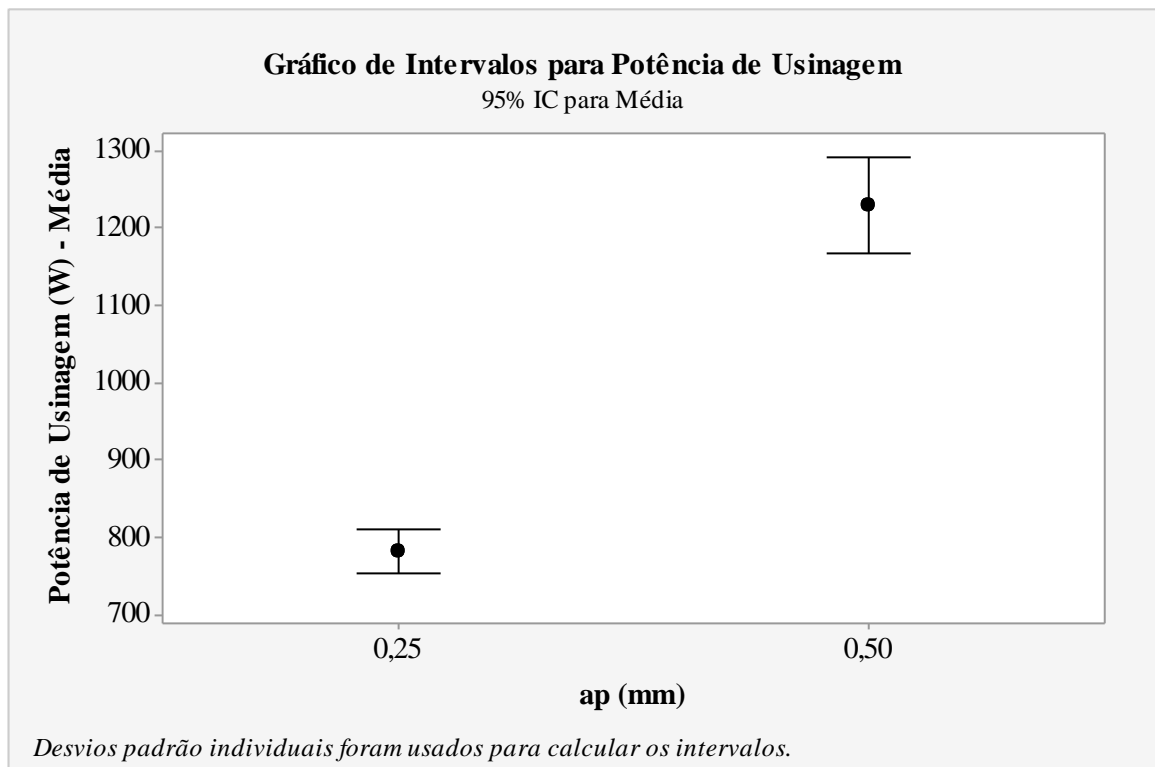
Na Figura 75, o menor valor das médias para potência de usinagem em relação ao ( $f$ ) ocorreu no nível de 0,05 mm/rev com 872,63 W. O aumento do ( $f$ ) resultou em uma maior seção de corte e uma maior potência de usinagem. Na Figura 76, o menor valor das médias para potência de usinagem em relação a ( $a_p$ ) ocorreu no nível de 0,25 mm com 783,19 W. A potência de usinagem é diretamente proporcional a ( $a_p$ ) e o aumento desse fator resulta maior potência.

Figura 75 – Gráfico de Intervalos dos avanços para potência de usinagem.



Fonte: Próprio autor

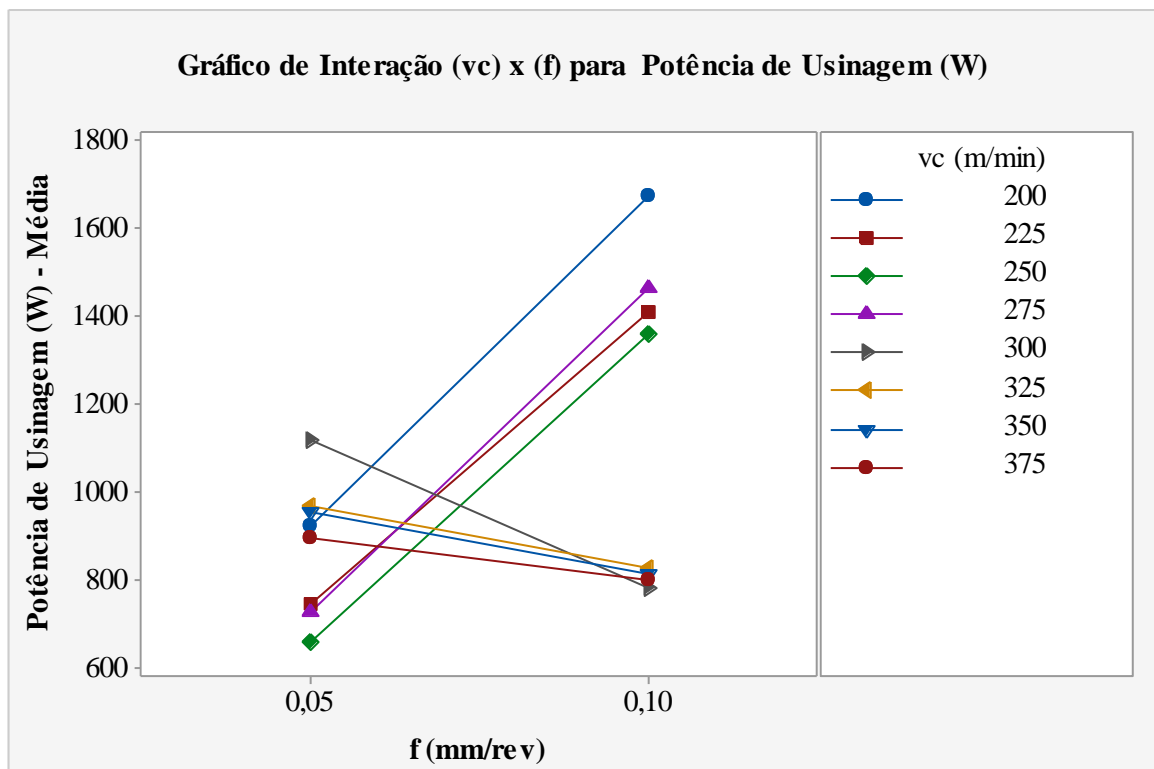
Figura 76 – Gráfico de Intervalos das profundidades de corte para potência de usinagem.



Fonte: Próprio autor

Na Figura 77, ocorreram dois grupos diferentes, o primeiro grupo ao aumentar o nível de  $f$  ocorreu uma queda na potência de usinagem e o segundo grupo ocorreu um aumento. No primeiro grupo estão as  $(v_c)$  nos níveis de 300, 325, 350 e 375 m/min e no segundo grupo nos níveis de 200, 225, 250 e 275 m/min. O menor valor das médias ocorreu na combinação (250 m/min e 0,05 mm/rev) com valor de 658,15 W e o maior valor das médias ocorreu na combinação (200 m/min e 0,10 mm/rev) com valor de 1673,89 W. As  $(v_c)$  nos níveis (200, 225, 250 e 275 m/min) combinadas com o  $f$  no nível (0,10 mm/rev) resultaram nos maiores valores. Os fatores  $(v_c)$  e  $f$ , analisados separadamente, resultaram em patamares elevados, consequentemente quando combinados os fatores o desempenho ficou prejudicado.

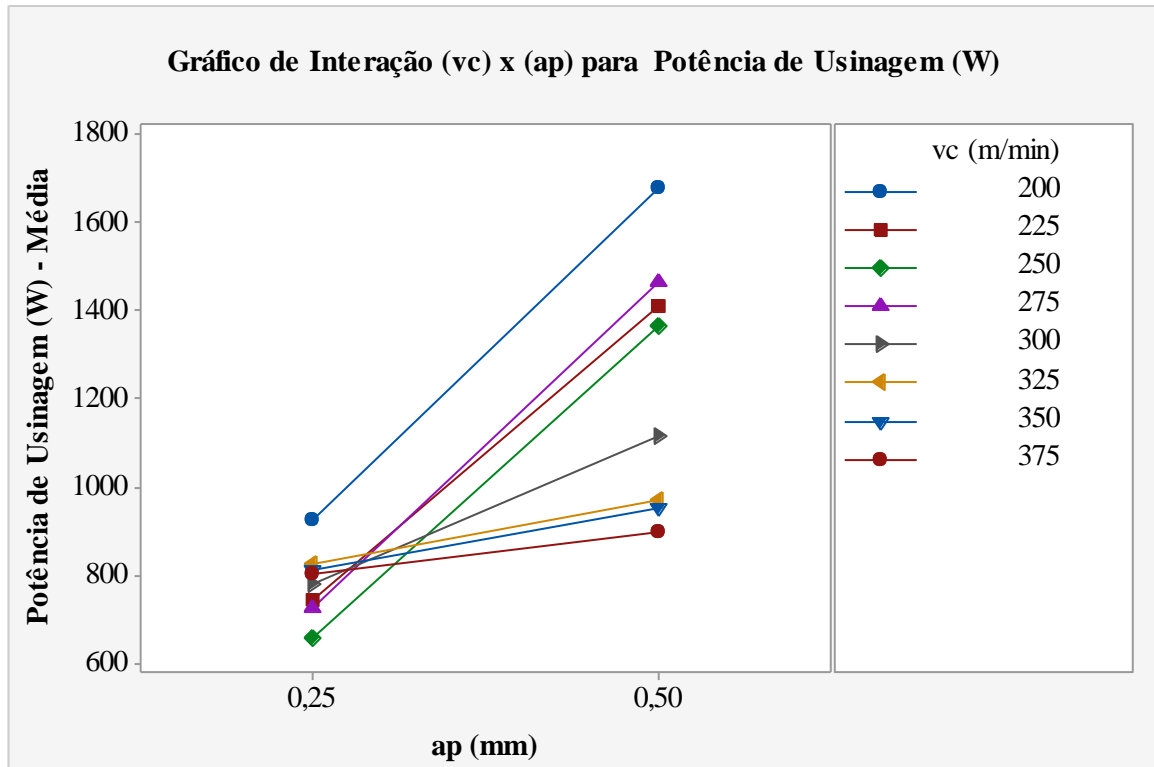
Figura 77 – Gráfico de Interação  $(v_c)$  x  $f$  para potência de usinagem.



Fonte: Próprio autor

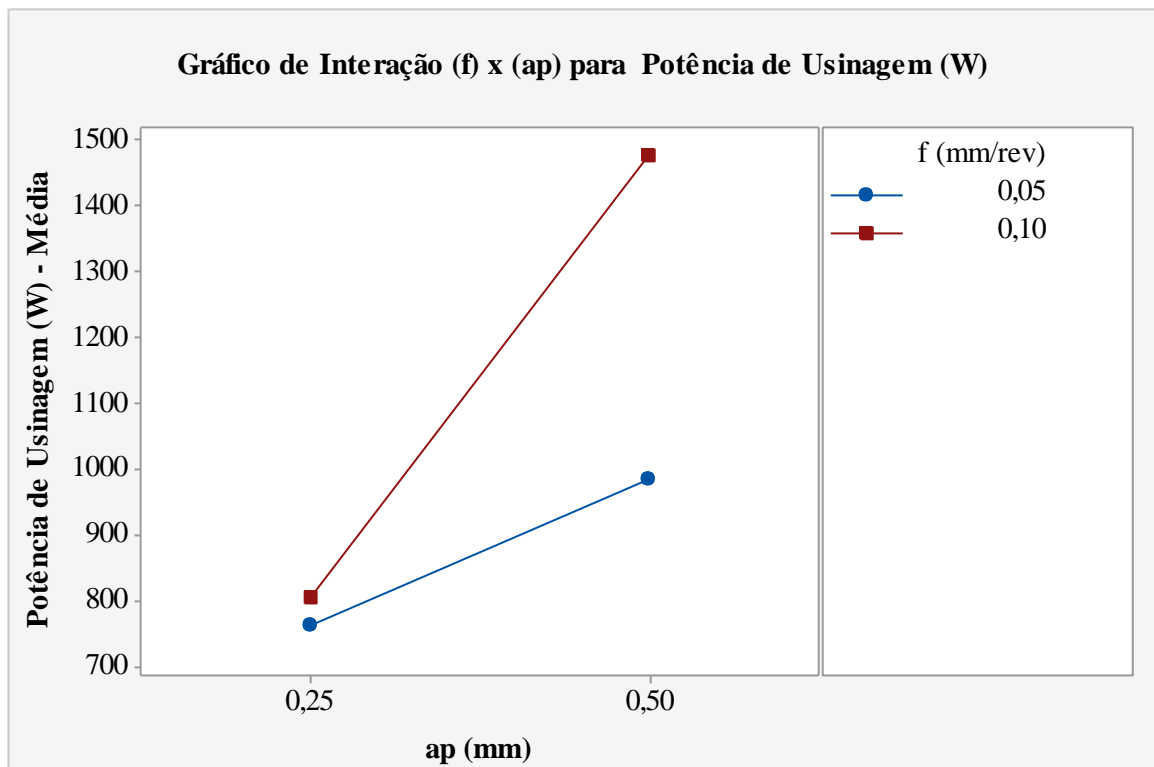
Na Figura 78, ao aumentar o nível de  $(a_p)$  ocorreu aumento da potência de usinagem para todos os níveis de  $(v_c)$ . O menor valor das médias ocorreu na combinação (250 m/min e 0,25 mm) com valor de 658,15 W e o maior valor das médias na combinação (200 m/min e 0,50 mm) com valor de 1673,89 W. Na Figura 79, o menor valor das médias para potência de usinagem ocorreu na combinação (0,05 mm/rev e 0,25 mm) com 762,14 W e o maior valor da média na combinação (0,10 mm/rev e 0,50 mm) com 1477,46 W. Os fatores são significativos e o aumento nos níveis resultam maiores consumos de potência.

Figura 78 – Gráfico de Interação ( $v_c$ ) x ( $a_p$ ) para potência de usinagem.



Fonte: Próprio autor

Figura 79 – Gráfico de Interação ( $f$ ) x ( $a_p$ ) para potência de usinagem.



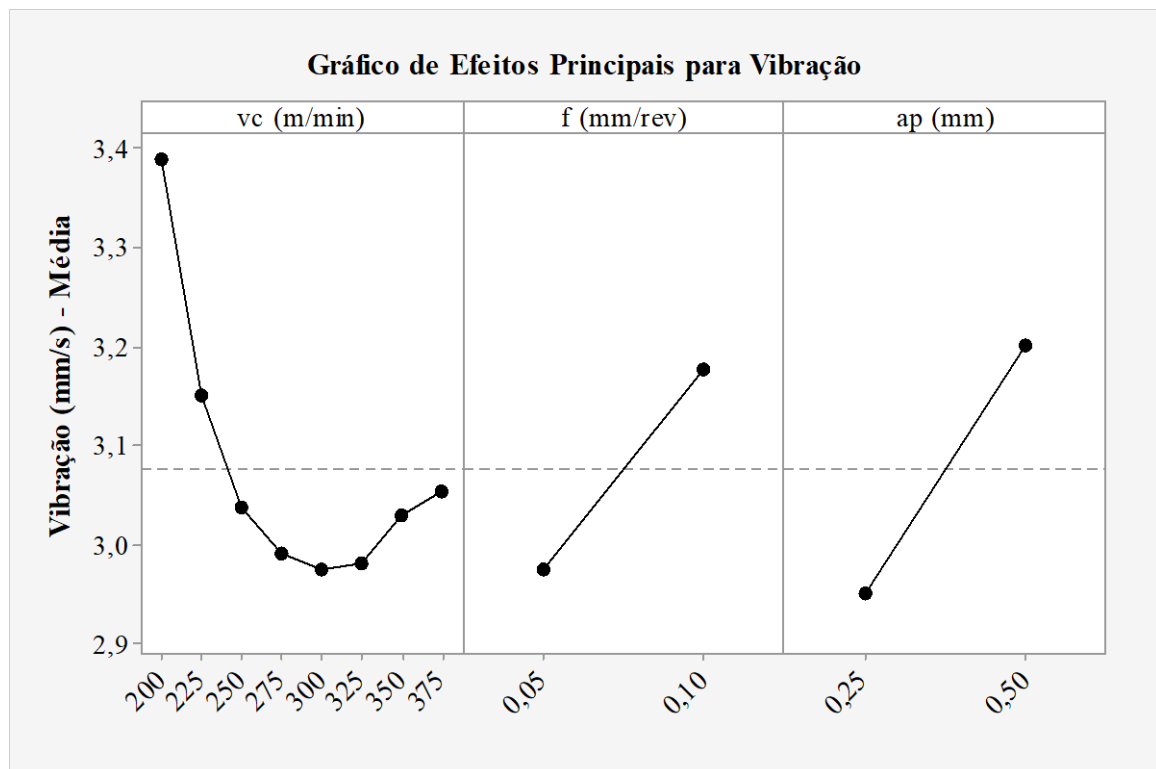
Fonte: Próprio autor

#### 4.5 RESULTADOS PARA VARIÁVEL VIBRAÇÃO

Na Figura 80, os menores valores das médias para vibração ocorreram para ( $v_c$ ) no nível de 300 m/min com valor de 2,97 mm/s, para ( $f$ ) no nível de 0,05 mm/rev com valor de 2,97 mm/s e para ( $a_p$ ) no nível de 0,25 mm com valor de 2,95 mm/s.

Os dados para a vibração não é normal, ou seja, os dados não seguem uma distribuição normal. Na Tabela 9, verificou-se que para os fatores ( $f$ - $a_p$ ) os valores de (F) são maiores do que 4, sendo assim, a associação é estatisticamente significativa.

Figura 80 – Gráfico de Efeitos Principais para vibração.



Fonte: Próprio autor

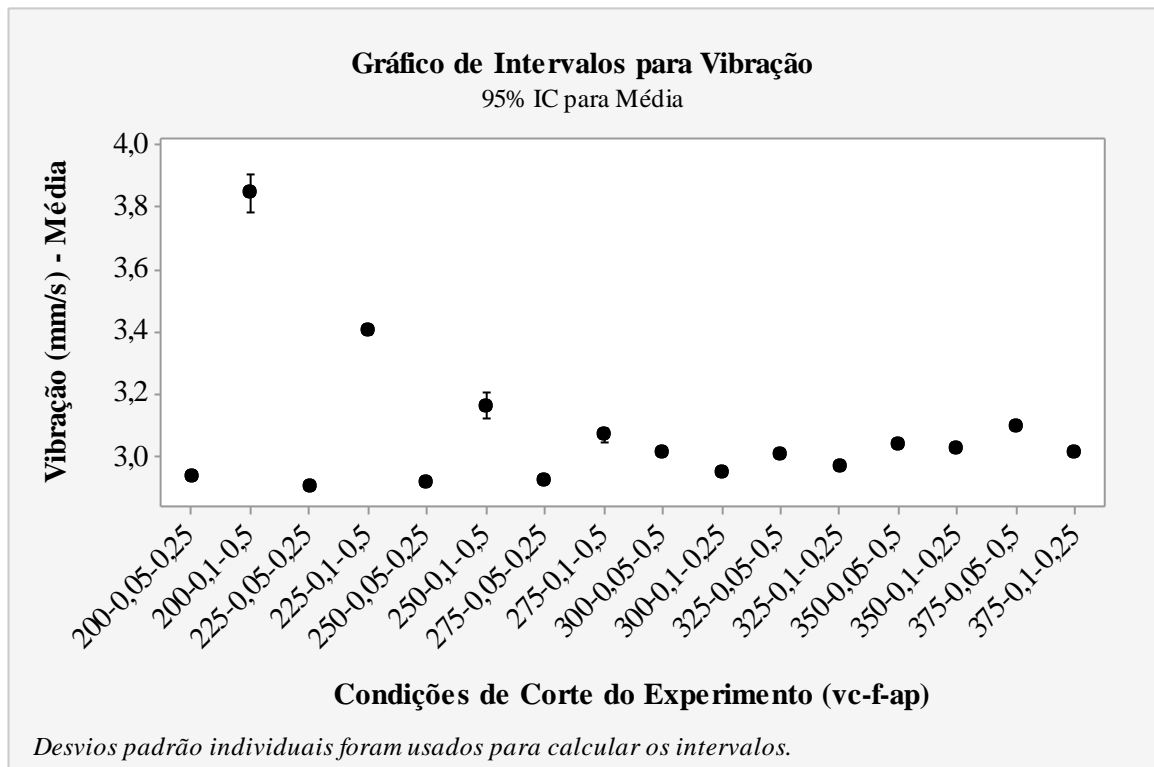
Tabela 9 – Análise de Variância (ANOVA) para vibração.

Fonte	Graus de Liberdade	SQ seq	SQ (Aj.)	QM (Adj.)	F	Valor-P
$v_c$ (m/min)	7	0,2671	0,2671	0,03816	1,30	0,382
$f$ (mm/rev)	1	0,1624	0,1624	0,16237	5,53	0,057
$a_p$ (mm)	1	0,2509	0,2509	0,25093	8,55	0,026
Erro de resíduos	6	0,1761	0,1761	0,02935		
Total	15	0,8565				

Fonte: Próprio autor

Na Figura 81, a combinação (225-0,05-0,25) resultou no menor valor das médias igual a 2,90 mm/s. No mesmo nível de ( $v_c$ ) quando combinado com ( $a_p$ ) no nível de 0,50 mm, para todas as combinações, ocorreram maiores vibrações. Dessa forma, o fator ( $a_p$ ) afetou significativamente os resultados, pois níveis maiores de ( $a_p$ ) resultam maiores taxas de remoção de material e, conseqüentemente ocorrem maiores vibrações devido ao maior volume de cavacos e sollicitação da ferramenta de corte.

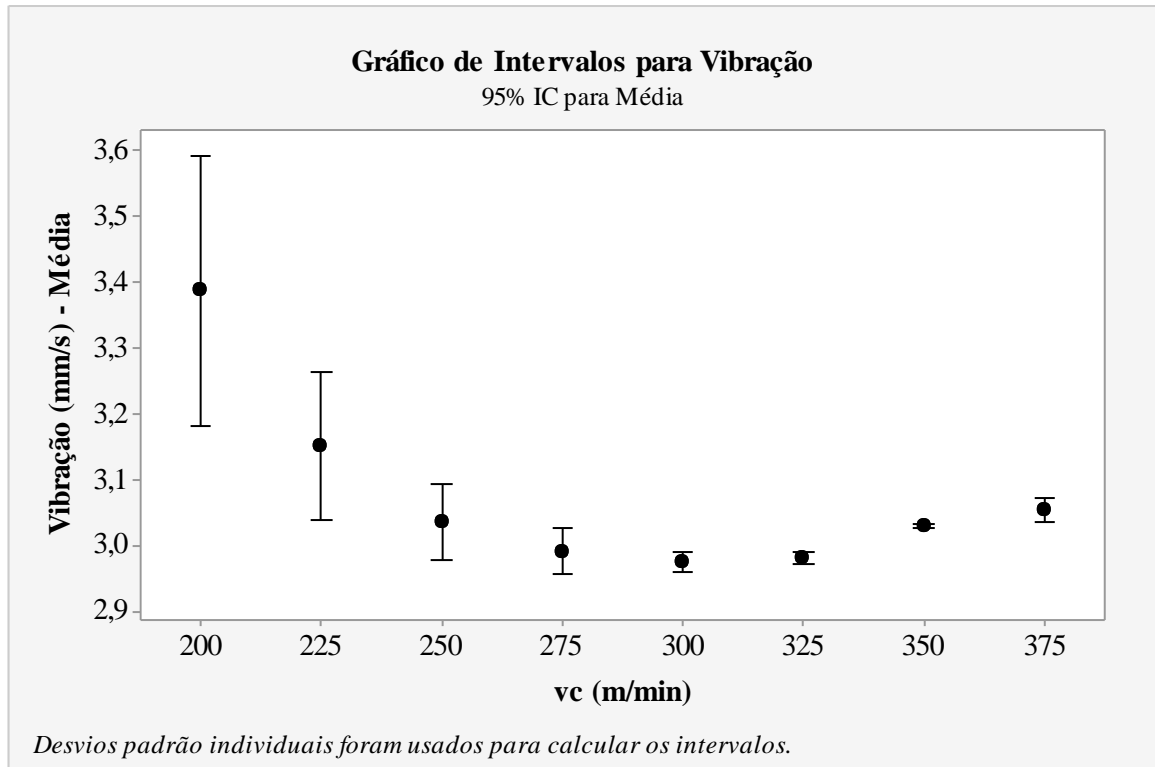
Figura 81 – Gráfico de Intervalos das 16 combinações para vibração.



Fonte: Próprio autor

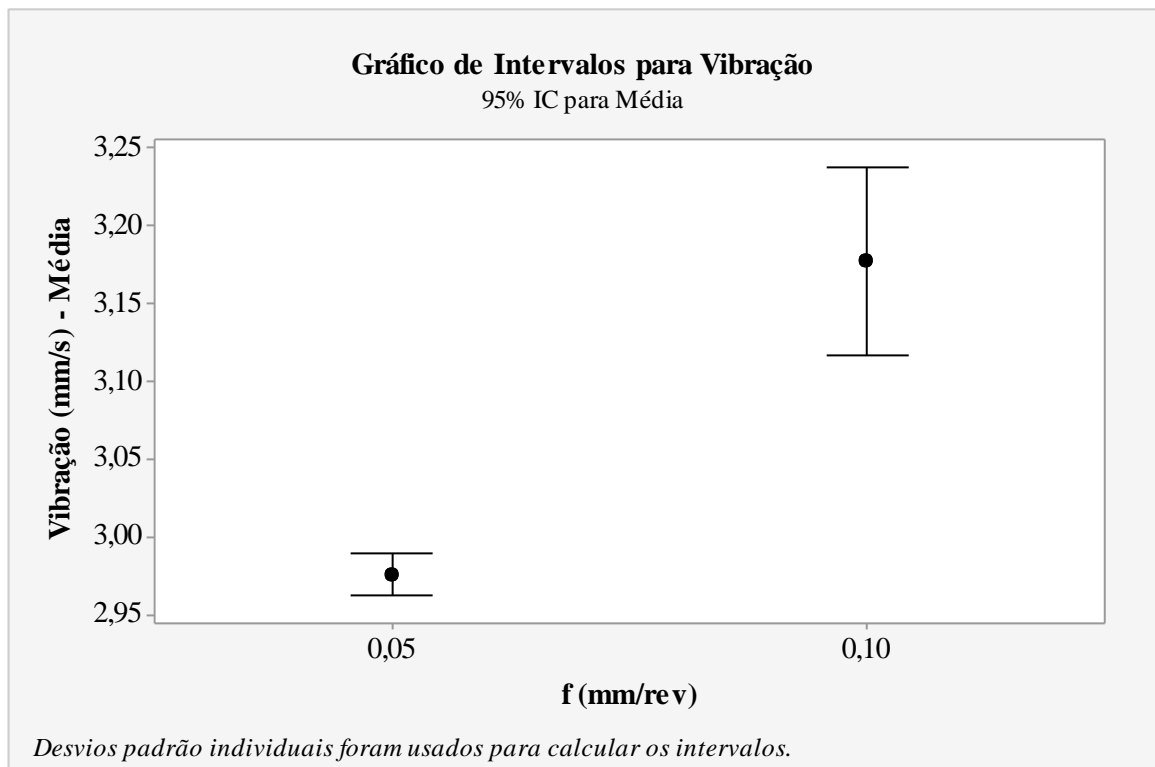
Na Figura 82, o menor valor das médias para vibração em relação a ( $v_c$ ) ocorreu para o nível de 300 m/min com o valor de 2,97 mm/s. O aumento dos níveis de ( $v_c$ ) resultaram em uma queda dos patamares dos valores para vibração e também um menor desvio padrão, possivelmente porque ocorreu uma melhor estabilização dos componentes de máquina. Esses componentes como eixos, engrenagens, sistemas mecânicos e hidráulicos, etc. Na Figura 83, o menor valor das médias para vibração em relação aos avanços ( $f$ ) ocorreu para o avanço no nível de 0,05 mm/rev com valor igual a 2,97 mm/s. O fator ( $f$ ) na ANOVA foi considerado significativo, sendo assim, o aumento do nível resultou em maiores vibrações, pois ocorre um aumento na seção de corte.

Figura 82 – Gráfico de Intervalos das velocidades de corte para vibração.



Fonte: Próprio autor

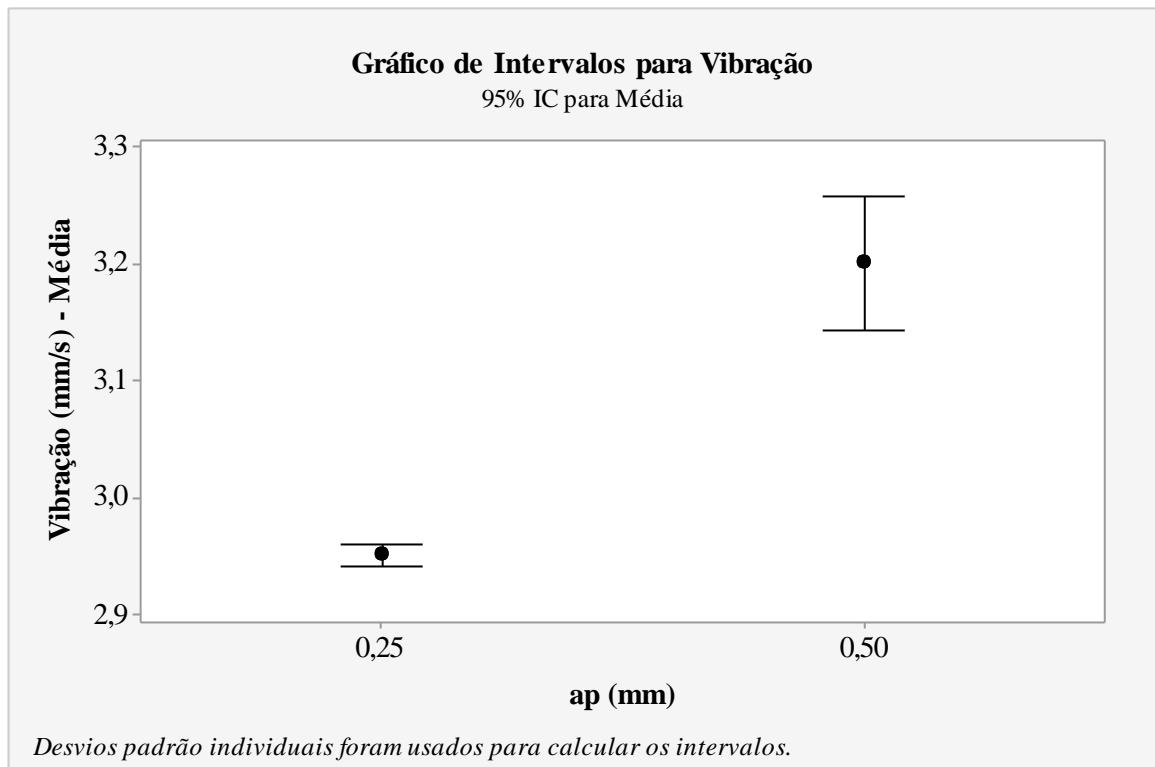
Figura 83 – Gráfico de Intervalos dos avanços para vibração.



Fonte: Próprio autor

Na Figura 84, o menor valor das médias para vibração em relação a ( $a_p$ ) ocorreu para o nível de 0,25 mm com valor igual a 2,95 mm/s. O fator ( $a_p$ ) na ANOVA foi considerado significativo e o aumento do nível resultou em maiores valores de vibração porque como já foi dito anteriormente ocorreu uma maior taxa de remoção de material. Nesse caso, necessita de maiores solicitações de esforços para cortar o material e, conseqüentemente ocorre maiores vibrações.

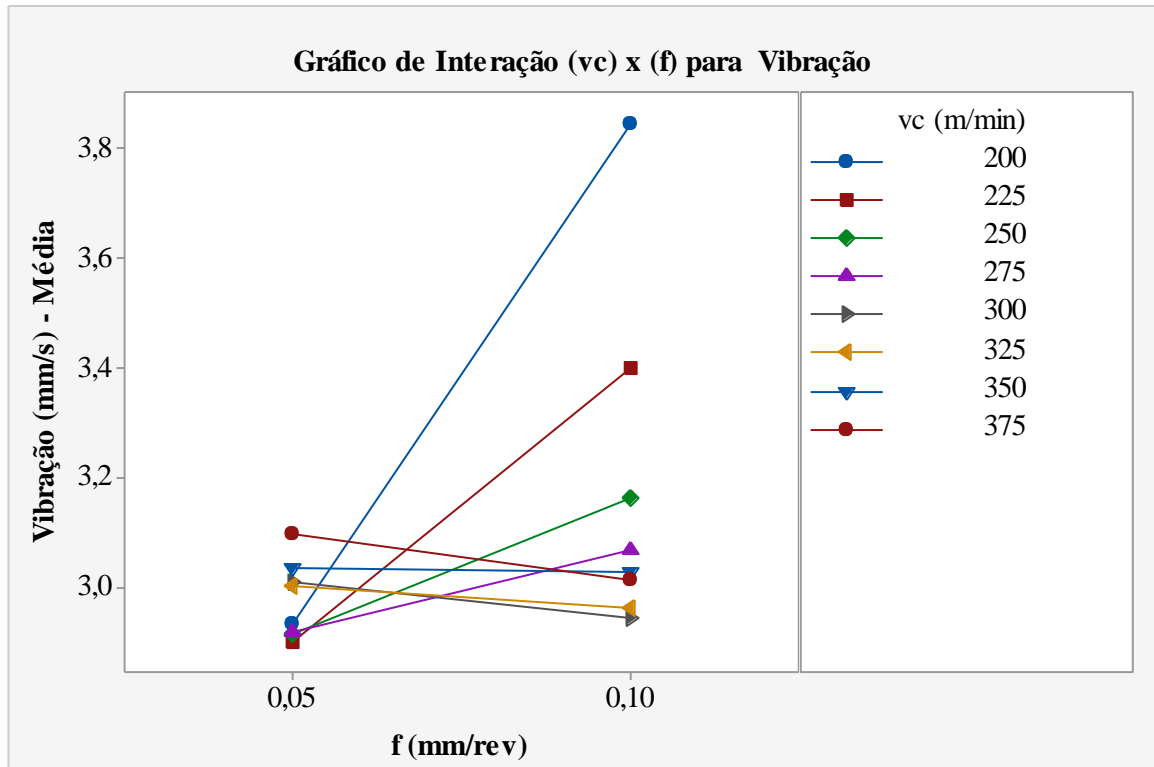
Figura 84 – Gráfico de Intervalos das profundidades de corte para vibração.



Fonte: Próprio autor

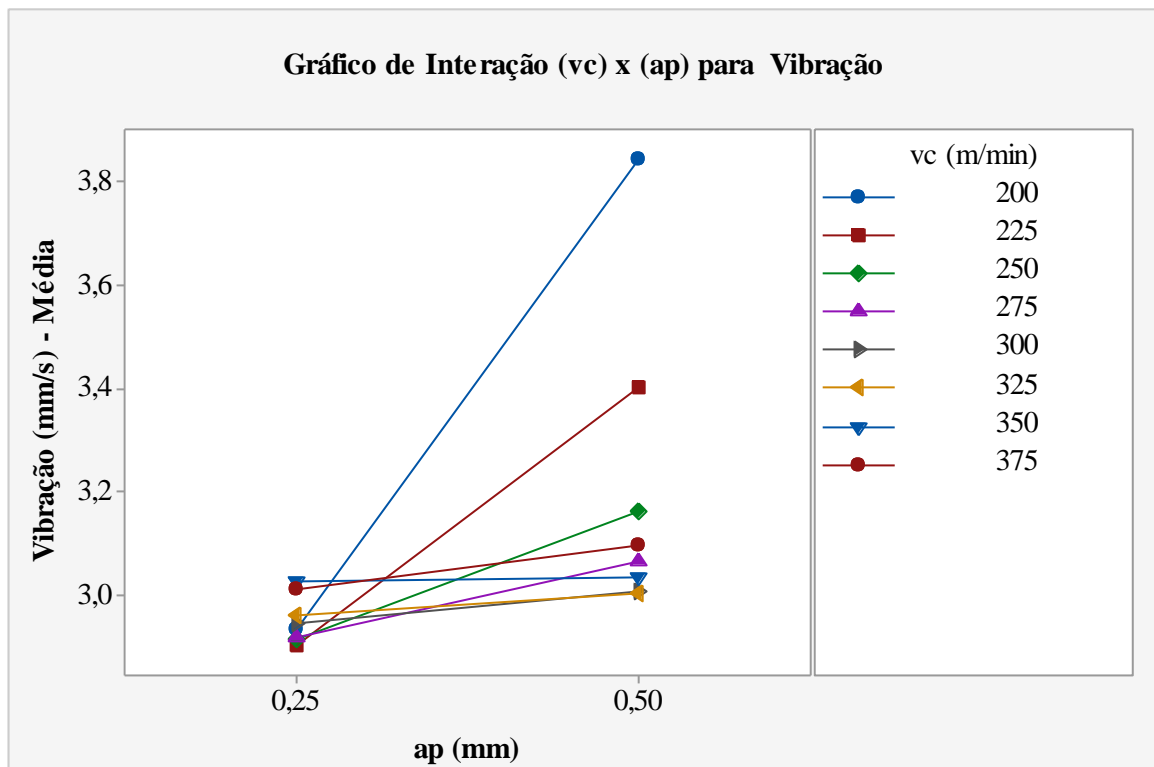
Na Figura 85, existe dois grupos, o primeiro ao aumentar o nível de ( $f$ ) ocorreu uma queda na vibração e o segundo ao aumentar o nível de ( $f$ ) ocorreu um aumento. No primeiro grupo estão os níveis de 300, 325, 350 e 375 m/min e no segundo os níveis de 200, 225, 250 e 275 m/min. O menor valor das médias para vibração ocorreu na combinação (225 m/min e 0,05 mm/rev) com valor de 2,90 mm/s. Na Figura 86, a análise foi feita em relação a cada nível de ( $v_c$ ) e o que aconteceu quando da mudança de um nível mais baixo para um nível mais alto de ( $a_p$ ). Verificou-se que ao aumentar o nível de ( $a_p$ ) ocorreu aumento na vibração para todos os níveis de ( $v_c$ ). O menor valor das médias para vibração foi obtido para a combinação (225 m/min e 0,25 mm) com valor de 2,90 mm/s.

Figura 85 – Gráfico de Interação ( $v_c$ ) x ( $f$ ) para vibração.



Fonte: Próprio autor

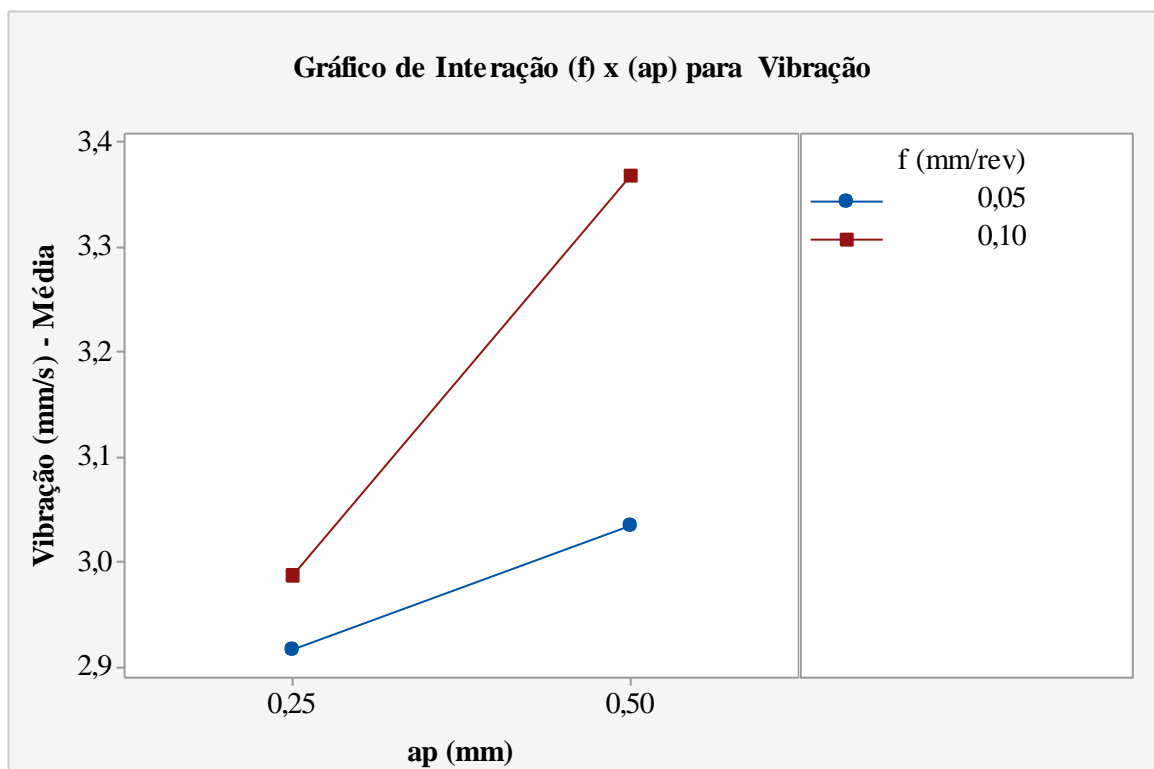
Figura 86 – Gráfico de Interação ( $v_c$ ) x ( $a_p$ ) para vibração.



Fonte: Próprio autor

Na Figura 87, analisou-se a relação em cada nível de ( $a_p$ ) e o que aconteceu quando da mudança de um nível mais baixo para um nível mais alto. O menor valor da média para vibração ocorreu na combinação (0,05 mm/rev e 0,25 mm) com valor de 2,91 mm/s. O fator ( $a_p$ ) em níveis maiores afeta a variável vibração devido a maior taxa de remoção de material no nível de 0,50 mm. Na análise fica evidente, pois para os dois níveis de avanço (0,05 e 0,10 mm/rev) combinados com a ( $a_p$ ) no nível de 0,50 mm resultou em valores das médias maiores para vibração.

Figura 87 – Gráfico de Interação ( $f$ ) x ( $a_p$ ) para vibração.



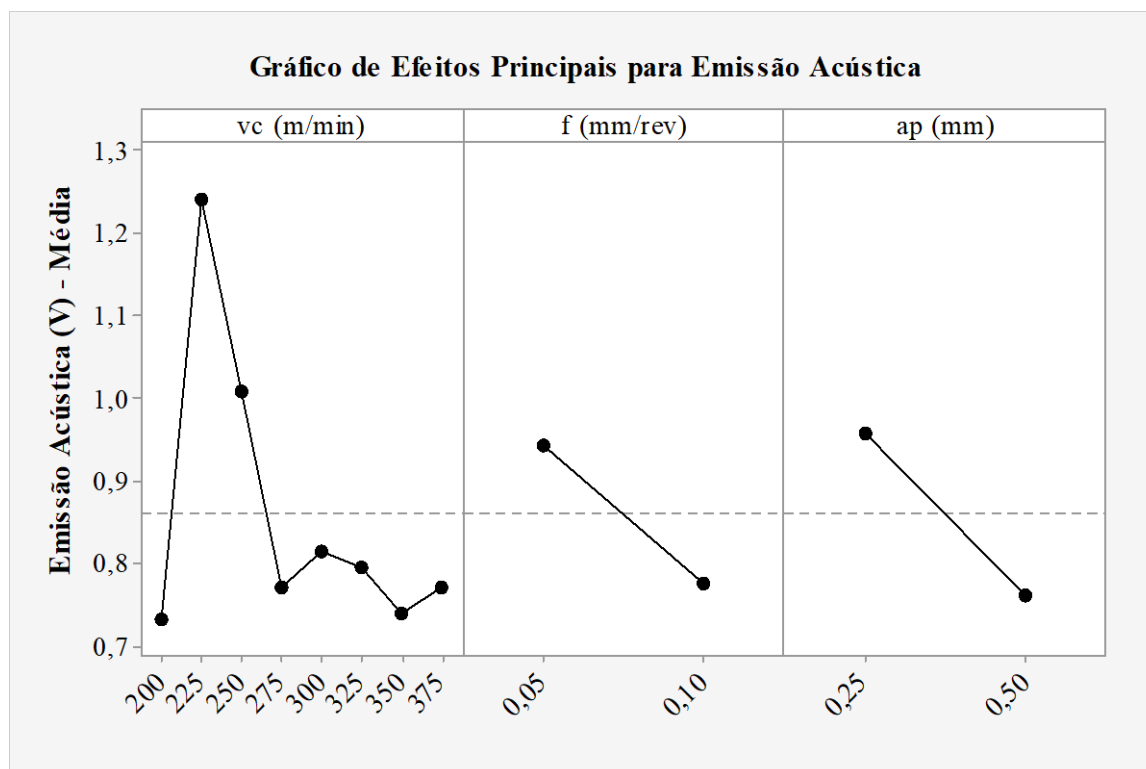
Fonte: Próprio autor

#### 4.6 RESULTADOS PARA VARIÁVEL EMISSÃO ACÚSTICA (EA)

Na Figura 88, os menores valores das médias para (EA) ocorreram para ( $v_c$ ) no nível de 200 m/min com valor de 0,73 V, ( $f$ ) no nível de 0,10 mm/rev com valor de 0,77 V e ( $a_p$ ) no nível de 0,50 mm com valor de 0,76 V. O valor da média das médias para (EA), linha tracejada, foi de 0,85 V. O teste de normalidade de Anderson-Darling mostrou que a distribuição de dados para a vibração não é normal, ou seja, os dados não seguem uma distribuição normal. Na Tabela

10, verificou-se que para os fatores ( $v_c$ - $f$ - $a_p$ ) os valores de (F) são menores do que 4, sendo assim, a associação não é estatisticamente significativa.

Figura 88 – Gráfico de Efeitos Principais para (EA).



Fonte: Próprio autor

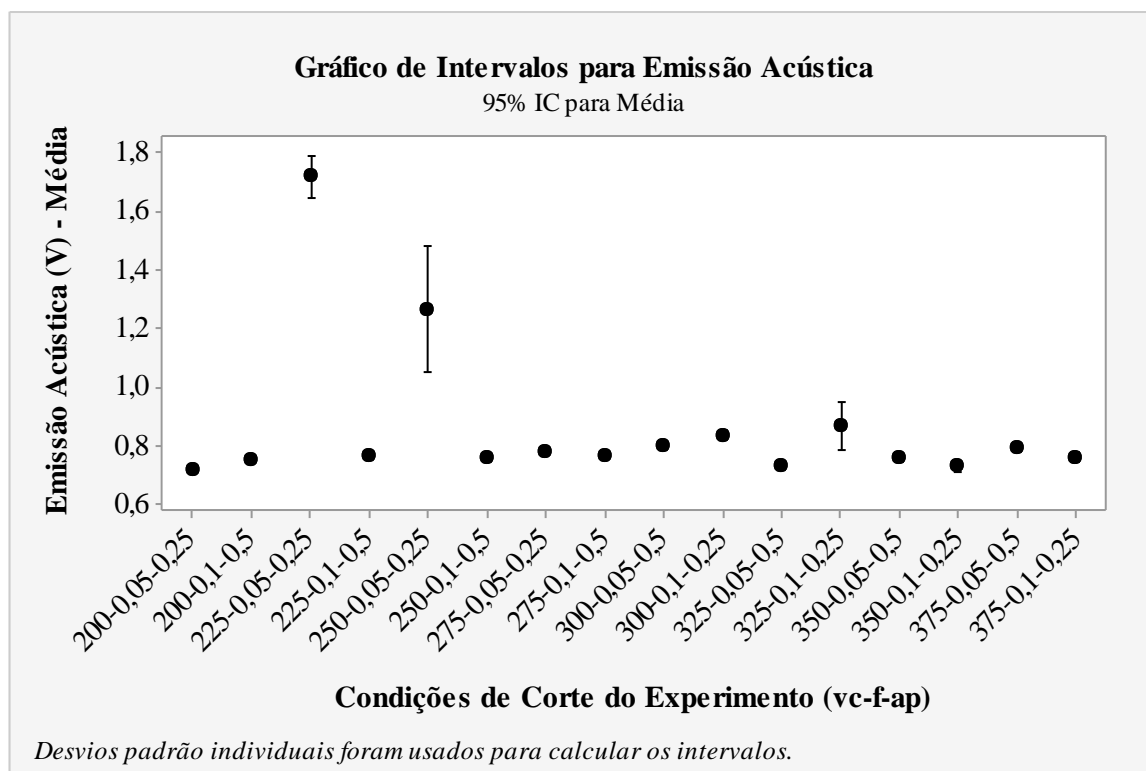
Tabela 10 – Análise de Variância (ANOVA) para (EA).

Fonte	Graus de Liberdade	SQ seq	SQ (Aj.)	QM (Adj.)	F	Valor-P
$v_c$ (m/min)	7	0,4399	0,4399	0,06284	1,11	0,459
$f$ (mm/rev)	1	0,1113	0,1113	0,11135	1,96	0,211
$a_p$ (mm)	1	0,1536	0,1536	0,15356	2,70	0,151
Erro de residuos	6	0,3407	0,3407	0,05678		
Total	15	1,0455				

Fonte: Próprio autor

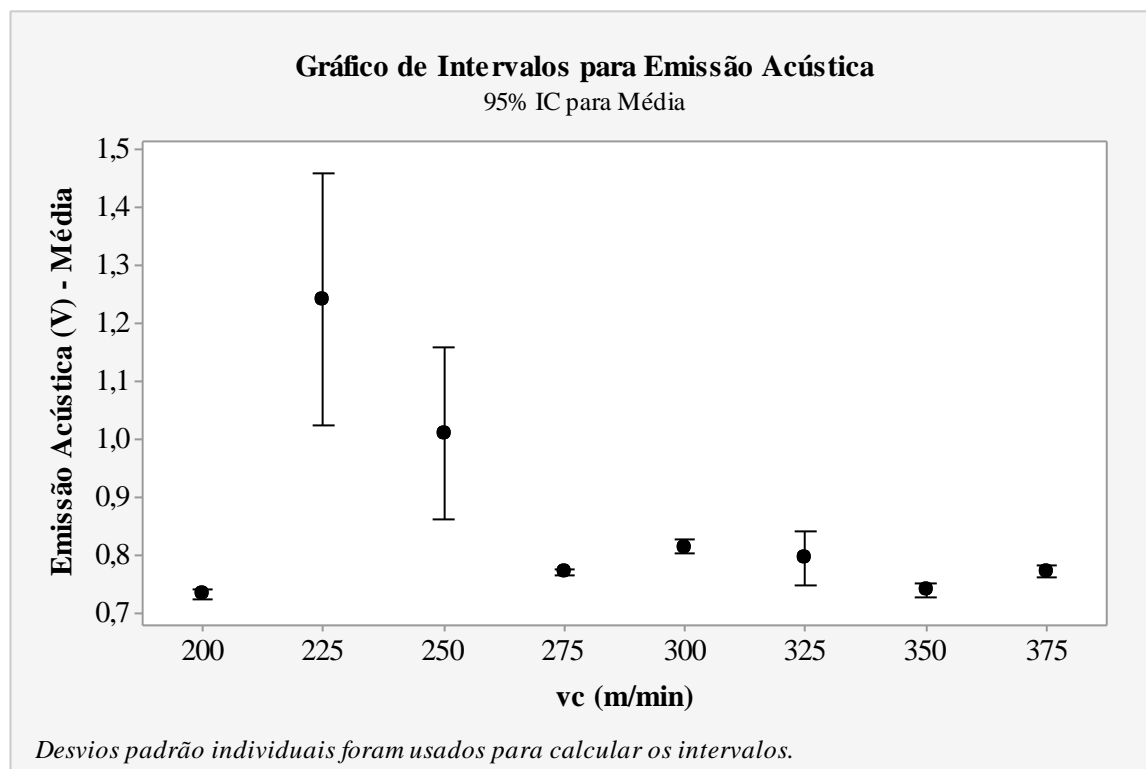
Na Figura 89, a combinação (200-0,05-0,25) resultou o menor valor das médias igual a 0,71 V. Na Figura 90, o menor valor das médias para (EA) ocorreu para ( $v_c$ ) no nível de 200 m/min com valor de 0,73 V.

Figura 89 – Gráfico de Intervalos das 16 combinações para (EA).



Fonte: Próprio autor

Figura 90 – Gráfico de Intervalos das velocidades de corte para (EA).

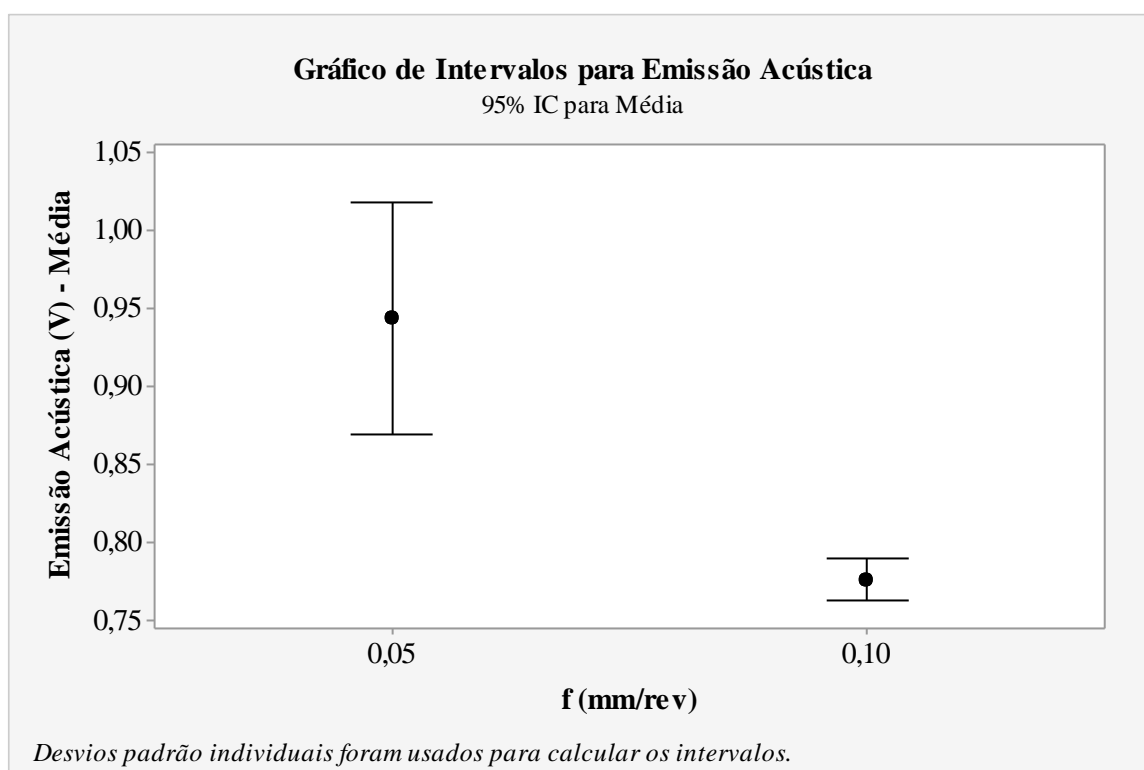


Fonte: Próprio autor

Na Figura 91, o menor valor das médias para (EA) ocorreu para ( $f$ ) no nível de 0,10 mm/rev com valor de 0,77 V. A alteração do nível mais baixo para um nível mais alto de ( $f$ ) teoricamente, causaria um maior valor de (EA) devido a uma maior seção do cavaco, porém ocorreu o contrário do esperado. Na Figura 94, o menor valor das médias ocorreu para ( $a_p$ ) no nível de 0,50 mm igual a 0,76 V e para esse fator também ocorreu o contrário do que era esperado.

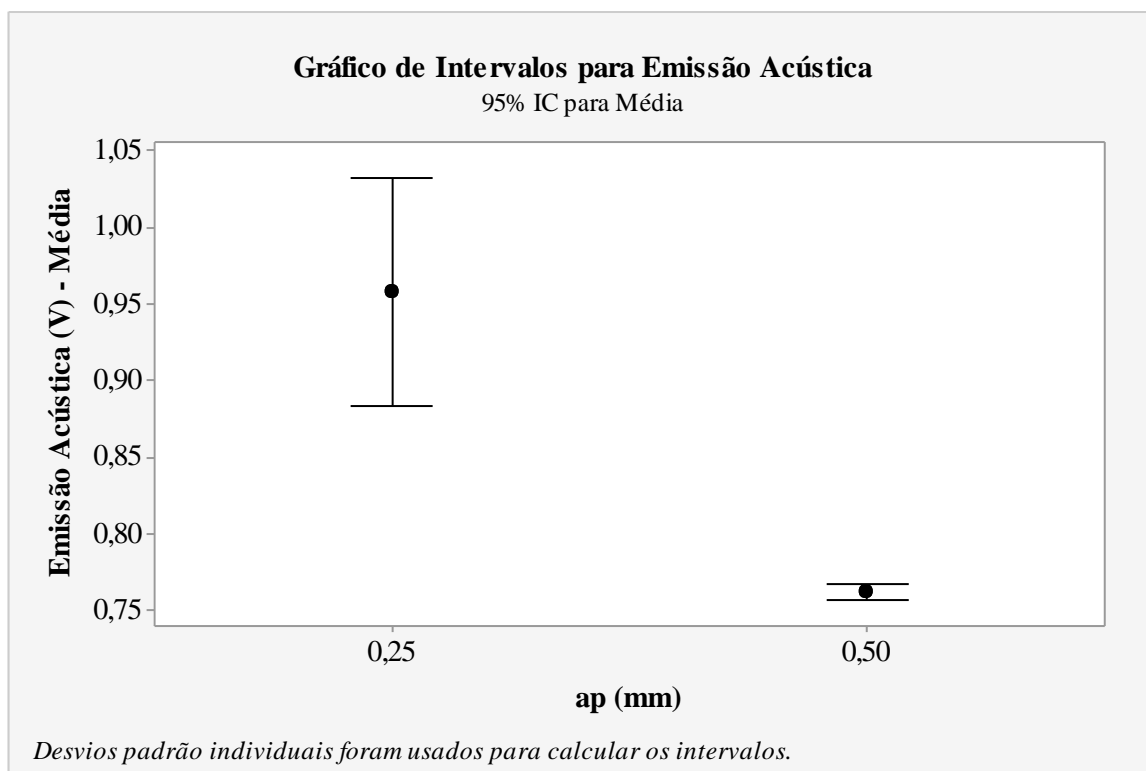
Na Figura 92, existem dois grupos, o primeiro grupo é aquele que ao aumentar o nível de ( $f$ ) ocorreu uma queda no valor da (EA) e o segundo grupo é aquele que ao aumentar o nível de ( $f$ ) ocorreu um aumento. No primeiro grupo estão as ( $v_c$ ) nos níveis de 225, 250, 275, 350 e 375 m/min e no segundo grupo estão as ( $v_c$ ) nos níveis de 200, 300 e 325 m/min. O menor valor das médias para (EA) ocorreu na combinação (200 m/min e 0,05 mm/rev) com valor de 0,71 V.

Figura 91 – Gráfico de Intervalos dos avanços para (EA).



Fonte: Próprio autor

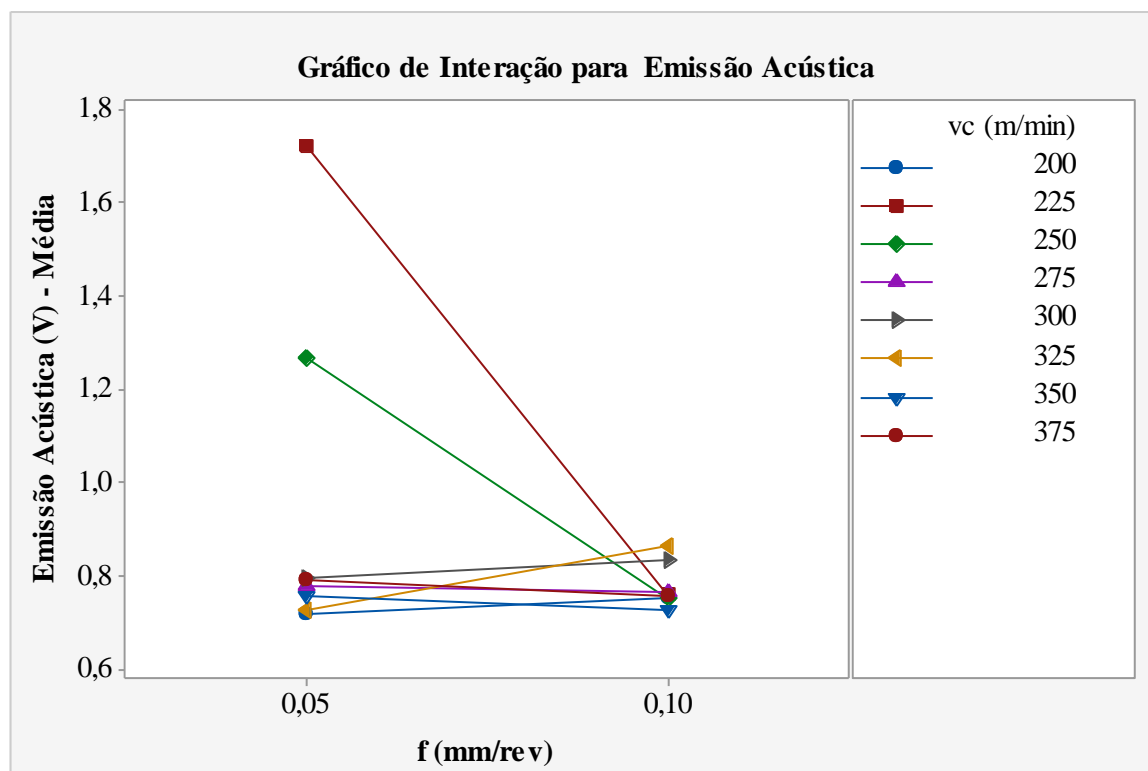
Figura 92 – Gráfico de Intervalos das profundidades de corte para (EA).



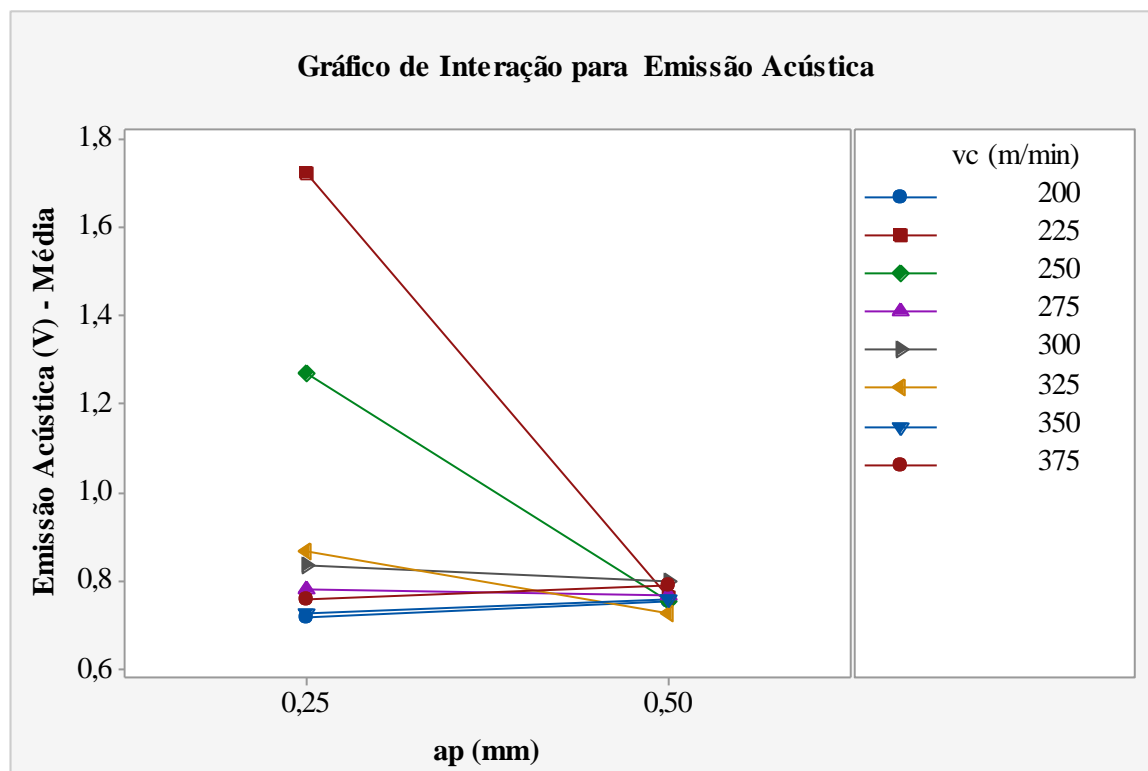
Fonte: Próprio autor

Na Figura 93, existem dois grupos, o primeiro grupo é aquele que ao aumentar o nível de ( $f$ ) ocorreu uma queda no valor da (EA) e o segundo grupo é aquele que ao aumentar o nível de ( $f$ ) ocorreu um aumento. No primeiro grupo estão as ( $v_c$ ) nos níveis de 225, 250, 275, 350 e 375 m/min e no segundo grupo estão as ( $v_c$ ) nos níveis de 200, 300 e 325 m/min. O menor valor das médias para (EA) ocorreu na combinação (200 m/min e 0,05 mm/rev) com valor de 0,71 V.

Na Figura 94, ocorreram dois grupos, o primeiro grupo é aquele que ao aumentar o nível da ( $a_p$ ) ocorreu uma queda na (EA) e o segundo grupo é aquele que ao aumentar o nível da ( $a_p$ ) ocorreu um aumento. No primeiro grupo estão as ( $v_c$ ) nos níveis de 225, 250, 275, 300 e 325 m/min e no segundo grupo estão as ( $v_c$ ) nos níveis de 200, 350 e 375 m/min. O menor valor das médias para (EA) ocorreu na combinação (200 m/min e 0,25 mm) com valor de 0,71 V. A combinação dos níveis das ( $v_c$ ) com ( $a_p$ ) no nível de 0,50 mm resultaram em valores das médias bem próximos, diferentemente do que aconteceu para a combinação com a ( $a_p$ ) no nível de 0,25 mm.

Figura 93 – Gráfico de Interação ( $v_c$ ) x ( $f$ ) para (EA).

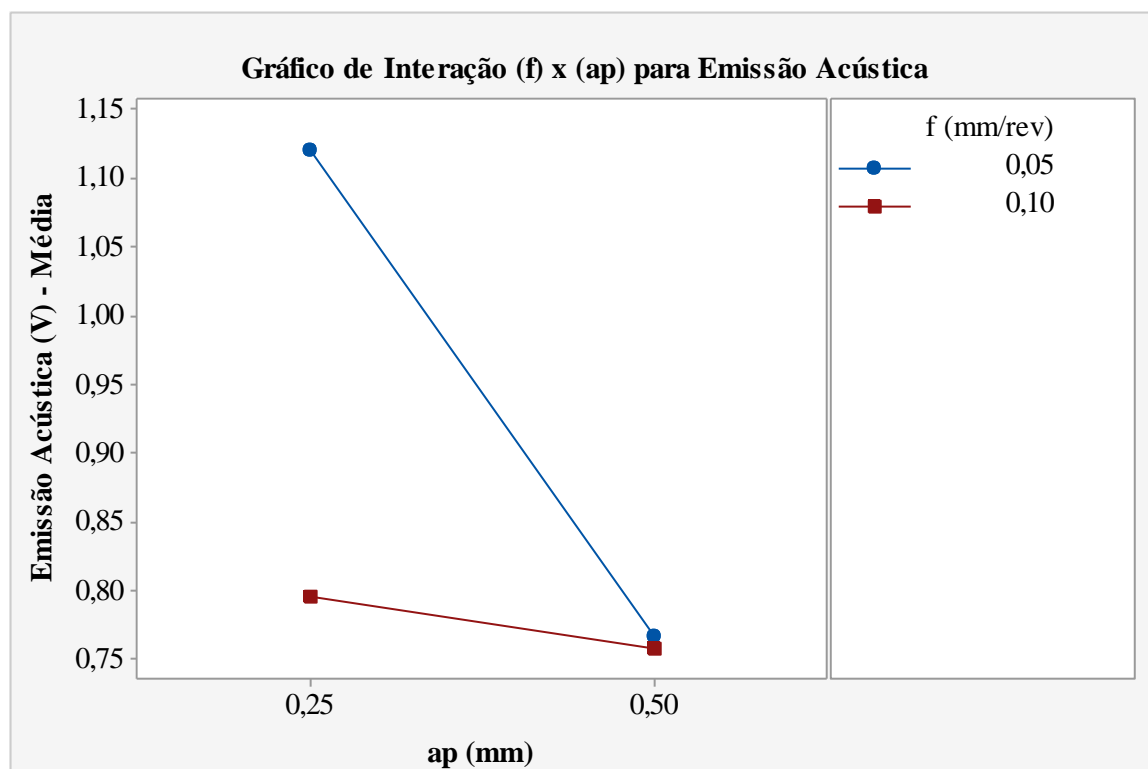
Fonte: Próprio autor

Figura 94 – Gráfico de Interação ( $v_c$ ) x ( $a_p$ ) para (EA).

Fonte: Próprio autor

Na Figura 95, o menor valor das médias para (EA) ocorreu na combinação (0,10 mm/rev e 0,50 mm) com valor de 0,75 V.

Figura 95 – Gráfico de Interação ( $f$ ) x ( $a_p$ ) para (EA).



Fonte: Próprio autor

#### 4.7 RESUMO DOS MELHORES RESULTADOS

Na Tabela 11, verificam-se quais foram as melhores condições de corte, ou seja, as condições mais eficientes em relação às variáveis de saída.

Tabela 11 – Resumo dos melhores resultados para as variáveis de saída.

Nº Experimento	$v_c$ (m/min)	$f$ (mm/rev)	$a_p$ (mm)	Variável de Saída	Valor
6	325	0,10	0,25	$VB_{máx}/l_c$	0,000276 mm/m
4	275	0,05	0,25	Rugosidade ( $R_a$ )	0,480 $\mu\text{m}$
6	325	0,10	0,25	Rugosidade ( $R_t$ )	4,195 $\mu\text{m}$
3	250	0,05	0,25	Potência de Usinagem	658,2 W
2	225	0,05	0,25	Vibração	2,90 mm/s
1	200	0,05	0,25	Emissão Acústica	0,715 V

Fonte: Próprio autor

#### 4.8 ANÁLISE DAS FERRAMENTAS DE CORTE E CAVACOS

Nessa seção, estão as imagens digitais das arestas das ferramentas de corte e seus respectivos cavacos. Nesse trabalho foram realizados muitos experimentos, dessa forma, não seria possível analisar todas as arestas das ferramentas de corte. Sendo assim, adotou-se apresentar imagens digitais das ferramentas de corte que, através de suas avarias e desgastes, pudessem contribuir e enriquecer o trabalho com detalhes significativos do processo de usinagem. No processo de usinagem, de uma forma geral, para maioria dos experimentos ocorreu desgaste por mecanismo de abrasão e desgaste de cratera. Porém, em alguns experimentos ocorreram presença de material aderido à ferramenta de corte e quebra.

Nas Figuras 96, 97 e 98, que correspondem ao experimento (Nº 1) na combinação (200-0,05-0,25), tem-se as imagens digitais da ferramenta de corte e cavacos obtidos após processo de usinagem. Na Figura 96, ocorreu o mecanismo de desgaste por abrasão, mecanismo esse que esteve presente em várias ferramentas de corte utilizadas nos experimentos.

Figura 96 – Desgaste por abrasão da ferramenta para combinação (200-0,05-0,25).



Fonte: Próprio autor

Na Figura 97, ocorreu desgaste de cratera na ferramenta de corte, esse desgaste esteve presente em várias ferramentas de corte utilizadas nos experimentos. Na Figura 98, ocorreram cavacos na forma emaranhados, nos quais se percebe uma coloração azulada que indica que possivelmente ocorreu elevadas temperaturas de corte durante o processo de usinagem.

Figura 97 – Desgaste de cratera da ferramenta para combinação (200-0,05-0,25).



Fonte: Próprio autor

Figura 98 – Cavacos para combinação (200-0,05-0,25).



Fonte: Próprio autor

Nas Figuras 99, 100 e 101, que correspondem ao experimento (Nº 4) na combinação (225-0,10-0,50), tem-se as imagens digitais da ferramenta de corte e cavacos obtidos após processo de usinagem. Na Figura 99, ocorreu o mecanismo de desgaste por abrasão. Na Figura 100, ocorreu o desgaste de cratera da ferramenta de corte.

Figura 99 – Desgaste por abrasão da ferramenta para combinação (225-0,10-0,50).



Fonte: Próprio autor

Figura 100 – Desgaste de cratera da ferramenta para combinação (225-0,10-0,50).



Fonte: Próprio autor

Na Figura 101, ocorreram cavacos na forma emaranhados, nos quais se percebe uma coloração azulada que indica que também possivelmente ocorreu elevadas temperaturas de corte durante o processo de usinagem.

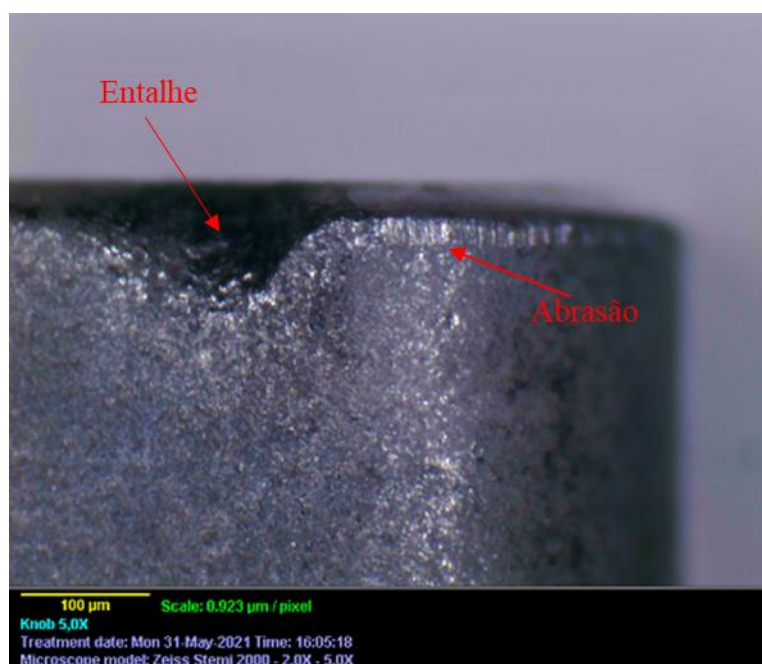
Figura 101 – Cavacos para combinação (225-0,10-0,50).



Fonte: Próprio autor

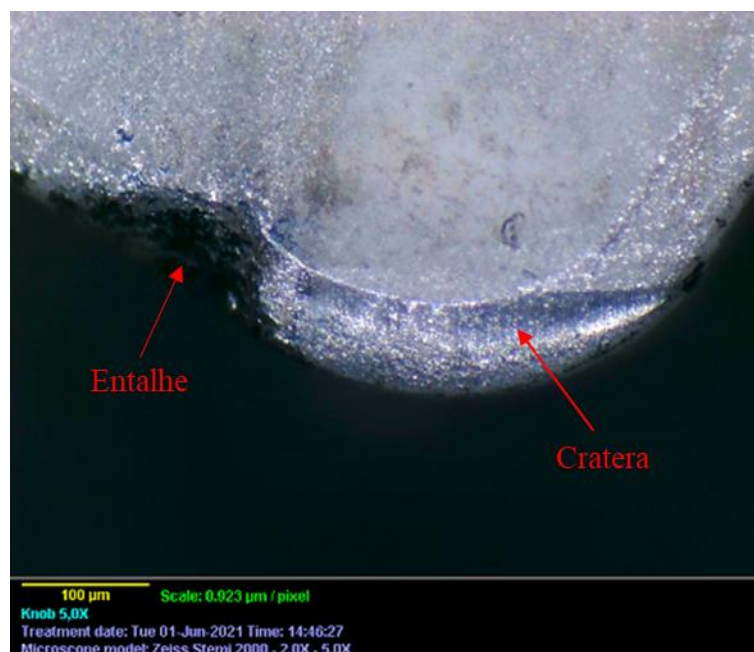
Nas Figuras 102, 103 e 104, que correspondem ao experimento (Nº 9) na combinação (300-0,05-0,50), tem-se as imagens digitais da ferramenta de corte e cavacos obtidos após processo de usinagem. Na Figura 102, ocorreu desgaste por mecanismo de abrasão e entalhe. Na Figura 103, ocorreu desgaste de cratera e entalhe da ferramenta de corte

Figura 102 – Desgaste por abrasão e entalhe da ferramenta para combinação (300-0,05-0,50).



Fonte: Próprio autor

Figura 103 – Desgaste de cratera e entalhe da ferramenta para combinação (300-0,05-0,50).



Fonte: Próprio autor

Na Figura 104, ocorreram cavacos na forma de arcos, nos quais se percebeu uma coloração dourada, e uma diminuição do patamar de temperatura de corte que ocorreram possivelmente devido ao aumento da ( $a_p$ ) que facilitou a quebra do cavaco.

Figura 104 – Cavacos para combinação (300-0,05-0,50).



Fonte: Próprio autor

Nas Figuras 105, 106 e 107, que correspondem ao experimento (Nº 13) na combinação (350-0,05-0,50), tem-se as imagens digitais da ferramenta de corte, superfície de saída e cavacos obtidos após processo de usinagem. Na Figura 105, ocorreu desgaste por mecanismo de abrasão e material aderido a ferramenta de corte. Na Figura 106, ocorreu o desgaste de cratera e verificou-se também presença de material aderido a ferramenta.

Figura 105 – Desgaste por abrasão da ferramenta para combinação (350-0,05-0,50).



Fonte: Próprio autor

Figura 106 – Desgaste de cratera da ferramenta para combinação (350-0,05-0,50).



Fonte: Próprio autor

Na Figura 107, tem-se cavacos na forma de emaranhados, nos quais se percebe uma coloração azulada.

Figura 107 – Cavacos para combinação (350-0,05-0,50).



Fonte: Próprio autor

Nas Figuras 108, 109 e 120, que correspondem ao experimento (Nº 8) na combinação (275-0,10-0,50), tem-se as imagens digitais da ferramenta de corte e cavacos obtidos após processo de usinagem. Na Figura 108, ocorreu a quebra da ferramenta de corte. Na Figura 109, verificou-se também detalhes da quebra da ferramenta de corte. Na Figura 48 (Gráfico de Efeitos Principais para  $VB_{máx}/l_c$ ), verificou-se que para ( $v_c$ ) no nível de 275 m/min ocorreram os maiores valores das médias para a variável desgaste de flanco por comprimento de corte usado (0,001365 mm/m). Sendo assim, possivelmente os maiores desgastes no flanco e de cratera somados ocasionaram a quebra da ferramenta de corte.

Figura 108 – Quebra da ferramenta para combinação (275-0,10-0,50).



Fonte: Próprio autor

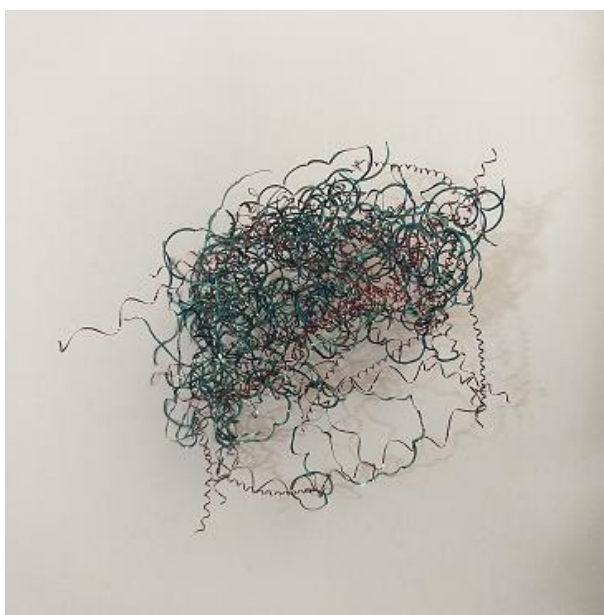
Figura 109 – Detalhes da quebra da ferramenta para combinação (275-0,10-0,50).



Fonte: Próprio autor

Na Figura 110, tem-se as imagens digitais dos cavacos, nos quais se percebe uma mistura de coloração dourada e verde, a quebra da ferramenta interferiu diretamente na forma dos cavacos. Verificou-se cavacos nas formas em fita helicoidal e emaranhados.

Figura 110 – Cavacos para combinação (275-0,10-0,50).



Fonte: Próprio autor

#### 4.9 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE VIDA

Os ensaios de vida foram realizados com base nos experimentos com os menores valores das médias para o desgaste de flanco ( $VB_{\text{máx}}$ ), considerando as profundidades de corte ( $a_p$ ) de 0,25 e 0,50 mm.

##### **Ensaio 1:**

$$v_c = 225 \text{ m/min}$$

$$f = 0,05 \text{ mm/rev}$$

$$a_p = 0,25 \text{ mm}$$

$$VB_{\text{máx}} = 0,065 \text{ mm (média)}$$

$$Q_1 = 2,81 \text{ cm}^3/\text{min}$$

##### **Ensaio 2:**

$$v_c = 200 \text{ m/min}$$

$$f = 0,10 \text{ mm/rev}$$

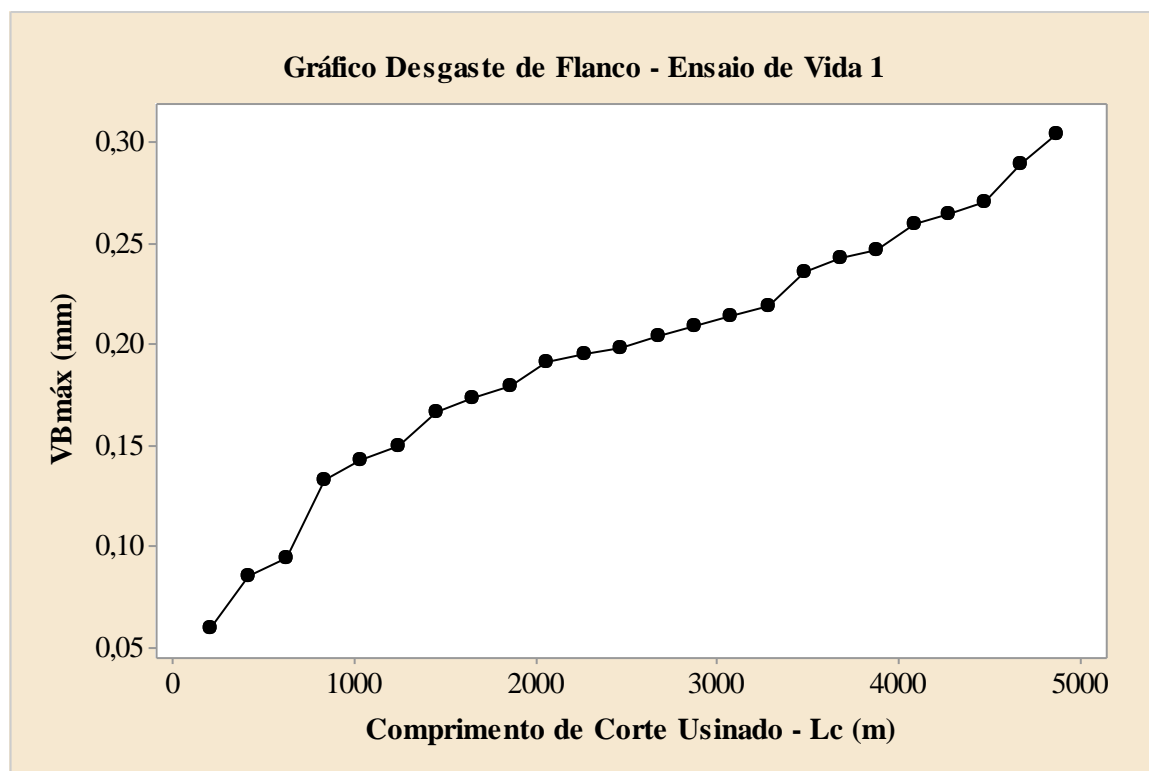
$$a_p = 0,50 \text{ mm}$$

$$VB_{\text{máx}} = 0,061 \text{ mm (média)}$$

$$Q_2 = 10 \text{ cm}^3/\text{min (taxa de remoção de material)}$$

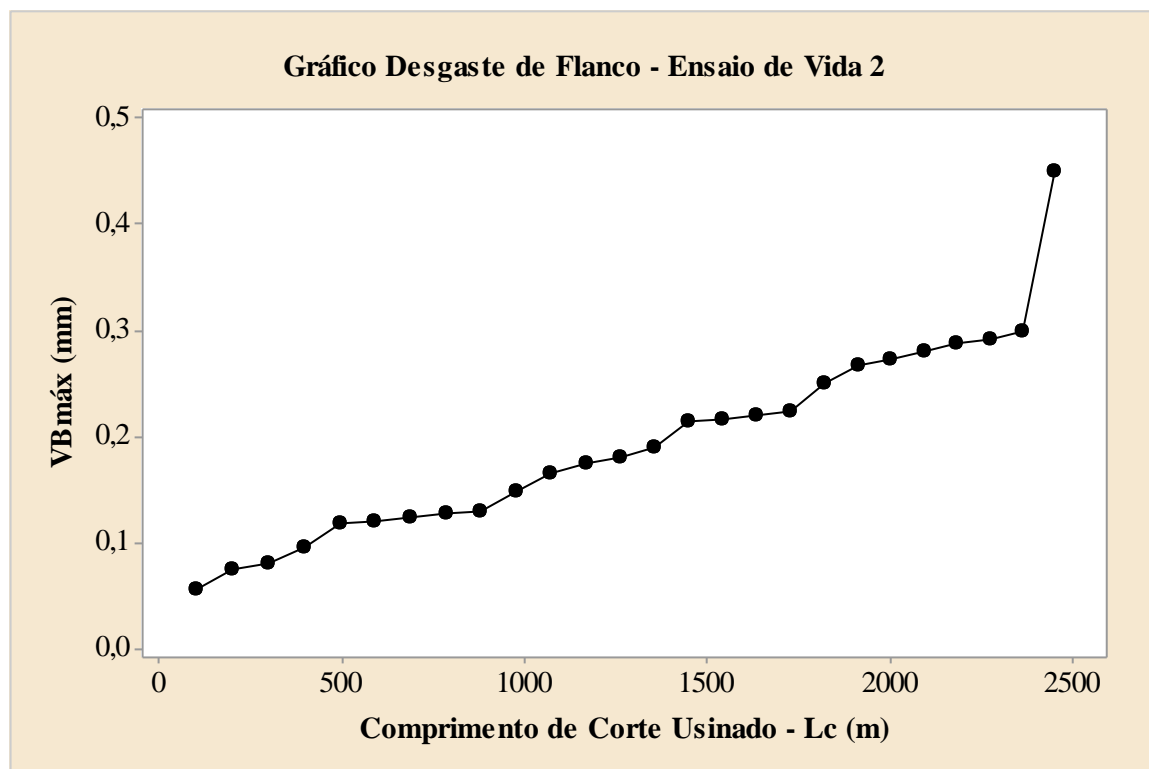
Nas Figuras 111 e 112, ensaios de vida 1 e 2, observou-se que o comprimento de corte usinado para o ensaio de vida 1 foi praticamente o dobro do obtido para o ensaio de vida 2. A maior taxa de remoção de material para o ensaio de vida 2 ( $Q_2 = 10 \text{ cm}^3/\text{min}$ ) em relação ao ensaio de vida 1 ( $Q_1 = 2,81 \text{ cm}^3/\text{min}$ ) afetou diretamente o desgaste da ferramenta de corte. No ensaio de vida os ensaios são de longa duração e nos experimentos os ensaios são de curta duração. Sendo assim, foi observado que a diferença de desgaste de flanco das combinações nos ensaios de vida 1 e 2 são pequenas nos ensaios de baixa duração, porém nos ensaios de longa duração, o fato do ensaio de vida 2 ter o dobro do avanço e profundidade de corte resultou no maior desgaste da ferramenta.

Figura 111 – Gráfico ensaio de vida 1 (225-0,05-0,25).



Fonte: Próprio autor

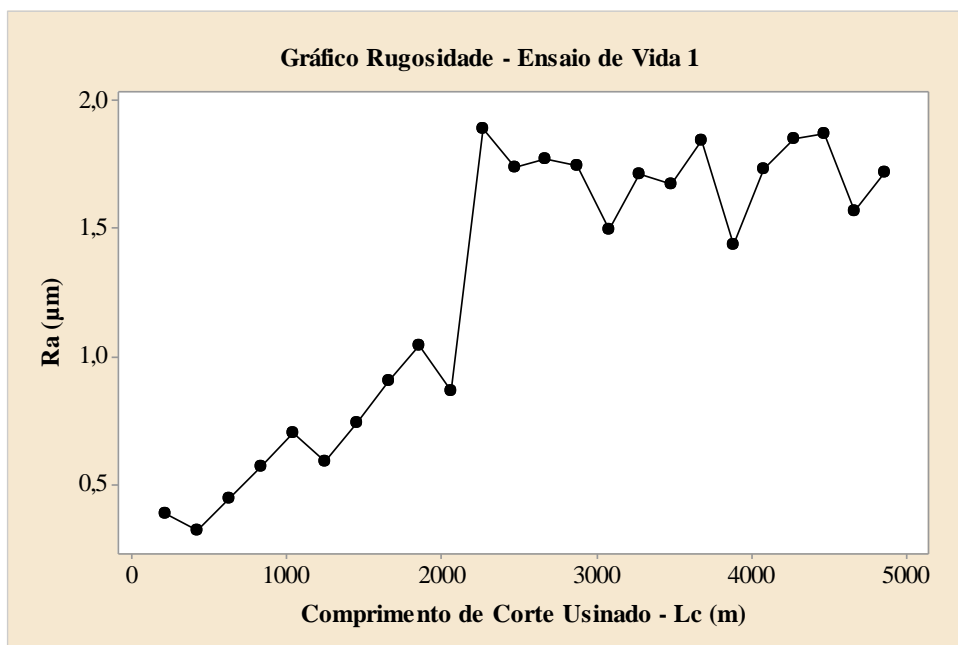
Figura 112 – Gráfico ensaio de vida 2 (200-0,10-0,50).



Fonte: Próprio autor

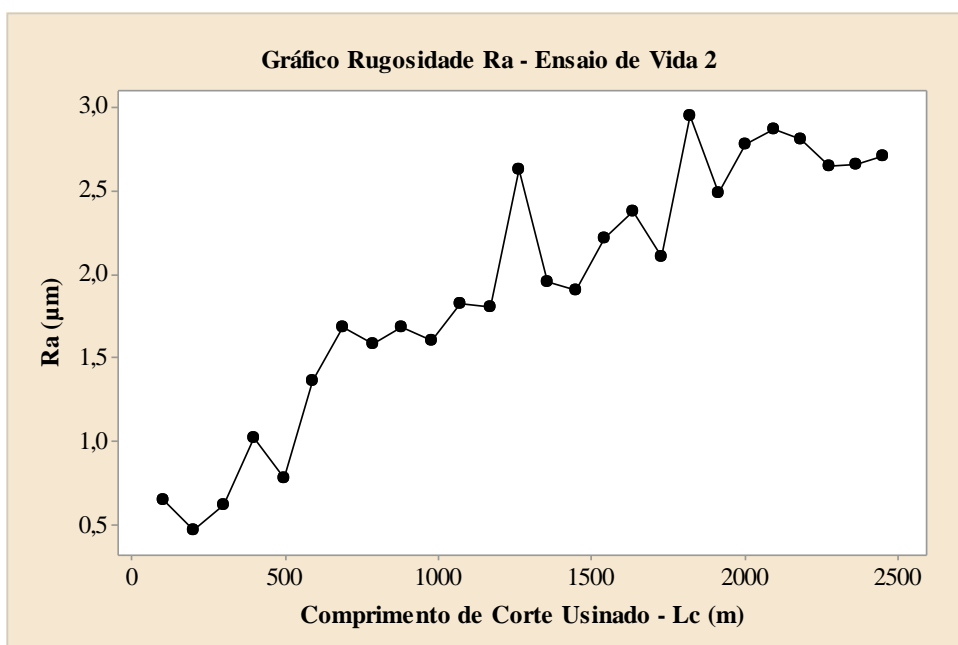
Nas Figuras 113 e 114, tem-se os gráficos para rugosidade ( $R_a$ ) obtidas para os ensaios de vida 1 e 2 *versus* comprimento de corte usinado. Verificou-se que para o ensaio de vida 1 ocorreu uma menor rugosidade ( $R_a$ ) em comparação ao ensaio de vida 2, sendo que para o ensaio de vida 2 o comprimento de corte usinado era aproximadamente a metade ( $\approx 2500$  m) e para o ensaio de vida 1 era de ( $\approx 5000$  m).

Figura 113 – Gráfico ( $R_a$ ) para ensaio de vida 1 (225-0,05-0,25).



Fonte: Próprio autor

Figura 114 – Gráfico ( $R_a$ ) para ensaio de vida 2 (200-0,10-0,50).



Fonte: Próprio autor

Nas Figuras 115 e 116, tem-se as imagens digitais da ferramenta de corte utilizada no ensaio de vida 1 (225-0,05-0,25). Na Figura 115, ocorreu desgaste por mecanismo de abrasão na ferramenta de corte e na Figura 116, desgaste de cratera.

Figura 115 – Desgaste de abrasão para o ensaio de vida 1 (225-0,05-0,25).



Fonte: Próprio autor

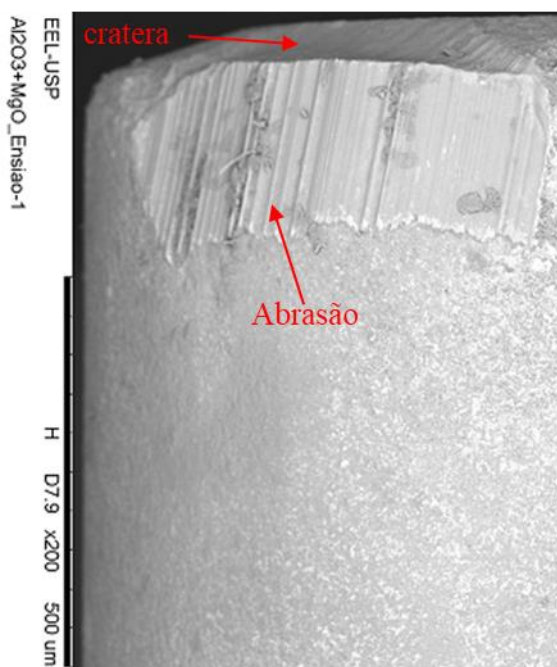
Figura 116 – Desgaste de cratera para o ensaio de vida 1 (225-0,05-0,25).



Fonte: Próprio autor

Nas Figuras 117 e 118, tem-se as imagens digitais do MEV e EDS, respectivamente, da ferramenta de corte utilizada no ensaio de vida 1. Na Figura 117, confirma-se a presença de desgaste por abrasão e por cratera.

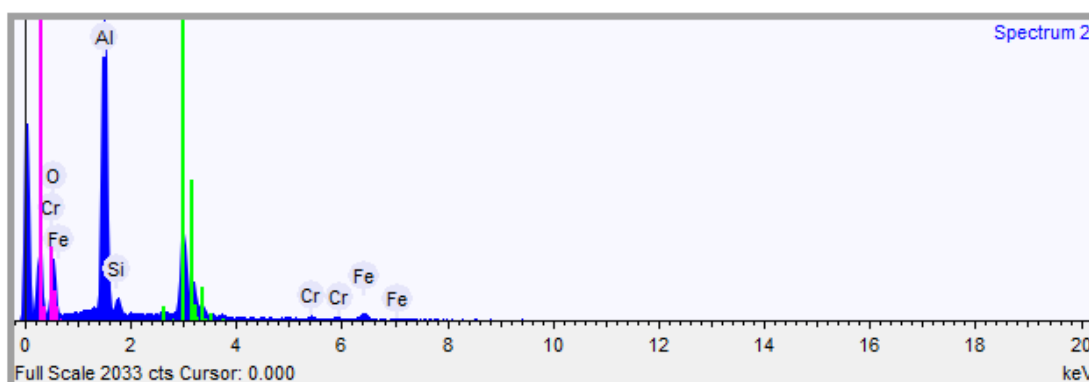
Figura 117 – MEV da ferramenta do ensaio de vida 1 (225-0,05-0,25).



Fonte: Próprio autor

Na Figura 118, com auxílio da análise de EDS da região desgastada pelo mecanismo de abrasão, identificada pelos sulcos paralelos que ficaram registrados na superfície da ferramenta de corte, tem-se a presença de material aderido na superfície da ferramenta de corte. O material aderido na ferramenta de corte é comprovado pela presença dos elementos ferro (Fe) e cromo (Cr), elementos que pertencem à composição química do aço inoxidável.

Figura 118 – EDS da ferramenta de corte do ensaio de vida 1 (225-0,05-0,25).



Fonte: Próprio autor

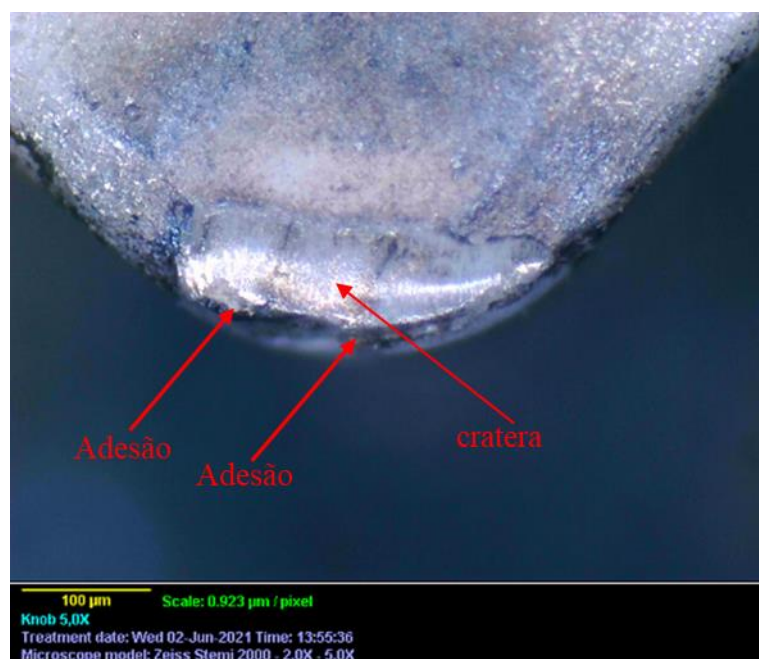
Nas Figuras 119 e 120, tem-se as imagens digitais da ferramenta de corte utilizada no ensaio de vida 2 (200-0,10-0,50). Na Figura 119, desgaste por mecanismo de abrasão e adesão; na Figura 120, desgaste de cratera e adesão.

Figura 119 – Desgaste de abrasão e adesão para ensaio de vida 2 (200-0,10-0,50).



Fonte: Próprio autor

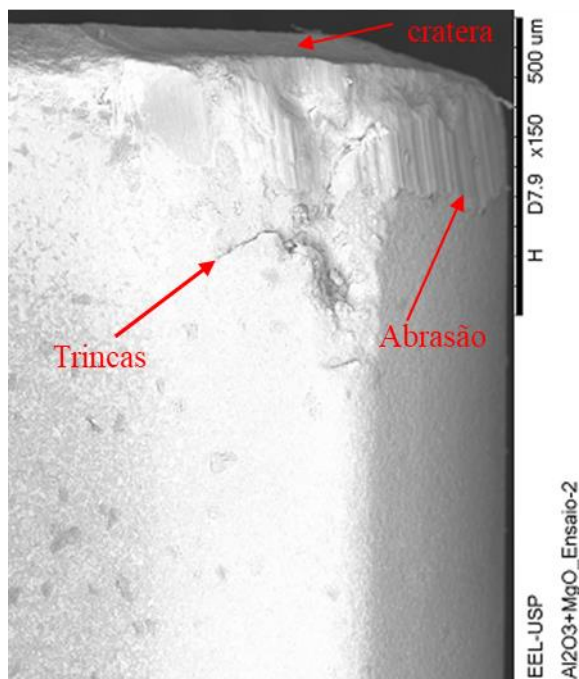
Figura 120 – Desgaste de cratera e adesão para ensaio de vida 2 (200-0,10-0,50).



Fonte: Próprio autor

Nas Figuras 121 e 122, tem-se as imagens digitais do MEV e EDS, respectivamente, da ferramenta de corte utilizada no ensaio de vida 2. Na Figura 121, ocorreu desgaste por abrasão, desgaste de cratera e trincas.

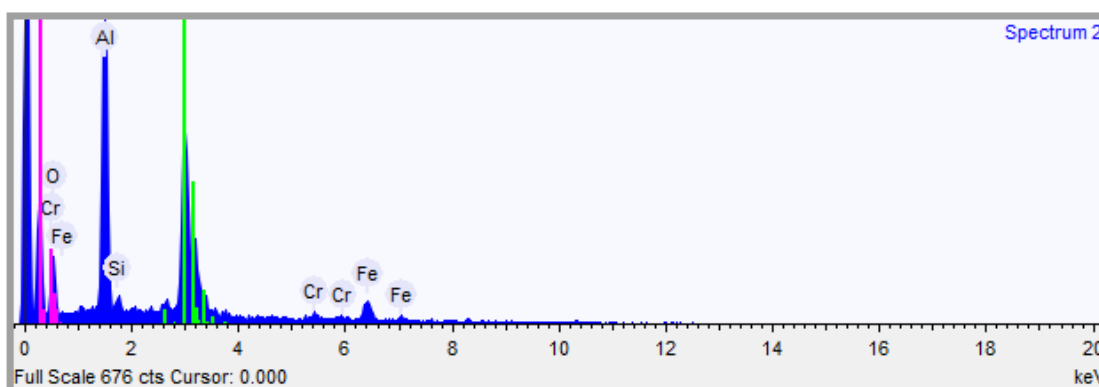
Figura 121 – MEV da ferramenta de corte do ensaio de vida 2 (200-0,10-0,50).



Fonte: Próprio autor

Na Figura 122, com auxílio da análise de EDS da região desgastada pelo mecanismo de abrasão, tem-se a presença de material aderido da peça usinada na superfície da ferramenta de corte. O material aderido na ferramenta de corte é comprovado pela presença dos elementos químicos ferro (Fe) e cromo (Cr), elementos que pertencem à composição química do aço inoxidável.

Figura 122 – EDS da ferramenta de corte do ensaio de vida 2 (200-0,10-0,50).



Fonte: Próprio autor

## 5 CONCLUSÃO

- $(VB_{m\acute{a}x}/l_c)$ : Melhor condição (225-0,05-0,25) com 0,000307 mm/m. A  $(v_c)$  em 275 m/min resultou em maior desgaste,  $(f)$  valores pr3ximos para ambos os n3veis e  $(a_p)$  em 0,50 mm um desgaste elevado devido a maior remoção de material.
- Rugosidade  $(R_a)$ : Melhor condição (275-0,05-0,25) com 0,480  $\mu\text{m}$ . A  $(v_c)$  nos n3veis (200-225-250-275-300 m/min) resultaram patamares menores com tend4ncia de queda. Os fatores  $(f)$  em 0,10 mm/rev e  $(a_p)$  em 0,50 mm resultaram no aumento da rugosidade.
- Rugosidade  $(R_t)$ : Melhor condição (325-0,10-0,25) com 4,195  $\mu\text{m}$  e os fatores  $(f-a_p)$  foram significativos. A  $(v_c)$  nos n3veis (225-250-275-300 m/min) resultaram patamares menores. O fator  $(f)$  em 0,10 mm/rev, ao contr3rio do esperado, resultou em menor valor de rugosidade. O fator  $(a_p)$  em 0,50 mm resultou em maior valor de rugosidade.
- Pot4ncia de usinagem: A combinação (250-0,05-0,25) com 658,2 W e os fatores  $(v_c-f-a_p)$  foram significativo. Para  $(v_c)$  verificou-se que o aumento dos n3veis resultaram em uma queda consider3vel da pot4ncia. O aumento dos n3veis dos fatores  $(f)$  e  $(a_p)$  resultaram em maior pot4ncia de usinagem.
- Vibração: A combinação (225-0,05-0,25) com 2,90 mm/s e os fatores  $(f-a_p)$  foram significativos. O fator  $(v_c)$  no intervalo de 200 a 275 m/min resultou uma m4dia maior para os valores de vibração, por4m no intervalo de 300 a 375 m/min uma m4dia menor para os valores de vibração. Os fatores  $(f)$  e  $(a_p)$  nos n3veis maiores (0,10 mm/rev e 0,50 mm) resultaram em maiores valores de vibração.
- Emiss3o ac3stica: A combinação (200-0,05-0,25) com 0,715 V. Para  $(v_c)$  os n3veis (200-275-300-325-350-375 m/min) resultaram patamares menores de (EA). Os fatores  $(f)$  e  $(a_p)$  nos n3veis maiores resultaram em valores menores de (EA).
- Ferramentas de corte e cavacos: As ferramentas de corte apresentaram desgaste de abras3o, cratera, entalhe, quebra e material da peça aderido a ferramenta; os cavacos ocorreram na forma emaranhada, de arcos e de fita helicoidal.
- Ensaio de vida: No ensaio de vida 1 (225-0,05-0,25) o comprimento de corte usinado foi de aproximadamente 5000 m e  $(R_a)$  igual a 1,721  $\mu\text{m}$ ; no ensaio de vida 2 (200-0,10-0,50) foi de aproximadamente 2500 m e  $(R_a)$  igual a 2,708  $\mu\text{m}$ .

## REFERÊNCIAS

ABELLAN-NEBOT, J. V.; ROGERO, M. O. Sustainable machining of molds for tile industry by minimum quantity lubrication. **Journal of Cleaner Production**, v. 240, p. 118082, 2019. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118082>>. Acesso em: 13/12/2020.

ARANDA, M. H.; JUNG, C. F.; TEN CATEN, C. S. Aplicação do Projeto de Experimentos para Otimização de uma Inovação Tecnológica. **Revista Gestão Industrial**, v. 04, n. 02, p. 116-132, 2008. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/193861/000719079.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 26/01/2021.

ABNT NBR ISO 3685:2017. **Ensaio de vida da ferramenta de ponta única para torneamento**. Rio de Janeiro: 2017. 61.

ABNT NBR ISO 4287:2008. **Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade**. Rio de Janeiro: 2008. 18p.

BAGABER, S. A.; YUSOFF, A. R. Multi-objective optimization of cutting parameters to minimize power consumption in dry turning of stainless steel 316. **Journal of Cleaner Production**, v. 157, p. 30-46, 2017. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.231>>. Acesso em: 20/12/2020.

BENEDCITO, E.; CAROU, D.; RUBIO, E. M. Technical, Economic and Environmental Review of the Lubrication/Cooling Systems Used in Machining Processes. **Procedia Engineering**, v. 184, p. 99-116, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817315801>>. Acesso em: 01/12/2020.

BENLAHMIDI, S. et al. Design optimization of cutting parameters when turning hardened AISI H11 steel (50 HRC) with CBN7020 tools. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 89, n. 1-4, p. 803-820, 2017. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-016-9121-3>>. Acesso em: 22/12/2020.

BENSOUILAH, H. et al. Performance of coated and uncoated mixed ceramic tools in hard turning process. **Journal of the International Measurement Confederation**, v. 82, p. 1-18, 2016. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2015.11.042>>. Acesso em: 02/09/2020.

BOBZIN, K. High-performance coatings for cutting tools. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, n. 2016, 2016. CIRP. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.11.004>>. Acesso em: 08/09/2020.

BYERS, J. P. **Metalworking Fluids**. 3th ed. CRC Press, 2017.

CALLISTER JR, W. D, RETHWISCH, D. G. *Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução*. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CHANDRASEKARAN, K. et al. Machinability study on AISI 410 with different layered inserts turning during dry conditions. **Indian Journal of Engineering and Materials Sciences**, v. 20, n. 5, p. 398-404, 2013. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/279921840\\_Machinability\\_study\\_on\\_AISI410\\_with\\_different\\_layered\\_inserts\\_in\\_CNC\\_turning\\_during\\_dry\\_conditions](https://www.researchgate.net/publication/279921840_Machinability_study_on_AISI410_with_different_layered_inserts_in_CNC_turning_during_dry_conditions)>. Acesso em: 20/09/2020.

CHEN, X. Q; ZENG, H; LI, H. Z. In-process sensing and monitoring for inteligente machining: overview and implementation. **Int. J. Process. Syst. Eng. (IJPSE)**, v. 1, n. 1-12, 2008.

CHIAVERINI, V.. In \_\_. **Aços e ferros fundidos**. 6. ed. São Paulo: ABM, 1988.

COLPAERT, H.. In \_\_. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008.

CORRÊA, J. G.; SCHROETER, R. B.; MACHADO, A. R. Tool life and wear mechanism of carbide tools used in machining of martensitic and supermartensitic stainless steels. **Tribology International**, v. 105, n. July 2016, p. 102-117, 2017. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2016.09.035>>. Acesso em: 21/12/2020.

COSTA E SILVA, A. L. V.; MEI, P. R. Aços ferramenta, inoxidáveis e ligas especiais. In \_\_. **Aços e Ligas Especiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2010. p. 363-473.

DALMAU, A. et al. Tribocorrosion behavior of new martensitic stainless steels in sodium chloride solution. **Wear**, v. 368-369, p. 146-155, 2016. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2016.09.002>>. Acesso em: 20/09/2020.

DAVIM, J. P. Design of optimisation of cutting parameters for turning metal matrix composites based on the ortogonal arrays. **Journal of Material Processing Technology**, v. 132, n. 1-3, p. 340-344, 2003. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013602009469>>. Acesso em: 16/02/2021.

DE PAULA, M. A. et al. Application on non-commercial ceramic cutting tool in machining of hardened stainless steel. **Materials Research Express**, v. 6, n. 4, p. 46550, 2019. IOP Publishing. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1088/2053-1591/aafd4a>>. Acesso em: 29/12/2020.

DESCHAMPS, F. **Contribuições para o desenvolvimento de um sistema de visão aplicado ao monitoramento do desgaste de ferramenta de corte – o sistema tool spy**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2004. Disponível em: <[http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/9896/1/CT\\_COMET\\_2017\\_2\\_01.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/9896/1/CT_COMET_2017_2_01.pdf)>. Acesso em: 17/02/2021.

DINIZ, A. E.; MACHADO, Á. R.; CORRÊA, J. G. Tool wear mechanism in the machining of steels and stainless steels. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 87, n. 9-12, p. 3157-3168, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-016-8704-3>>. Acesso em: 17/08/2020.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. Usinabilidade dos Materiais. In \_\_\_\_\_. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 9. ed. São Paulo: Artliber, 2014.

DURAND-CHARRE, M. Stainless steels. In \_\_\_\_\_. **Microstructure of Steels and Cast Irons**. Paris: Springer, 2003. p. 305-330.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1970. 751 p.

GEVORKYAN, E. et al. Ceramica cutting tools out of nanostructured refractory compounds. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 68, p. 142-144, 2017. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2017.07.006>>. Acesso em: 07/09/2020.

GOIND, G. S; SARKAR, P. Dry machining: A step towards sustainable machining – Challenges and future directions. **Journal of Cleaner Production**, v. 165, p. 1557-1571, 2017. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.235>>. Acesso em: 17/08/2020.

GRIGORIEV, S. N. et al. Materials, properties, manufacturing methods and cutting performance of innovative ceramic cutting tools – a review. **Manufacturing Review**, v. 6, p. 19, 2019. Disponível em: <<https://mfr.edp-open.org/articles/mfreview/abs/2019/01/mfreview190014/mfreview190014.html>>. Acesso em: 25/12/2020.

GRZESIK, W. Cutting tool materials, Adv. Mach. Processes Metallic Mater. 2 (2017).

GUTIÉRREZ-GONZÁLEZ, C. F. et al. Effect of TiC addition on the mechanical behaviour of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC whiskers composites obtained by SPS. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 36, n. 8, p. 2149-2152, 2016. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2016.01.050>>. Acesso em: 25/12/2020.

HASSUI, A. **Estudo da vibração durante o corte e centelhamento na retificação cilíndrica de mergulho**. 2002. 179 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

HEGAB, H.; KISHAWY, H. A.; DARRAS, B. Sustainable cooling and lubrication strategies in machining process: A comparative study. **Procedia Manufacturing**, v. 33, p. 786-793, 2019. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.04.099>>. Acesso em: 29/11/2020.

HUBBARD, K. M.; CALLAHAN, R. N.; STRONG, S. D. A standardized model for the evaluation of machining coolant/lubricant costs. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 36, n. 1-2, p. 1-10, 2008. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-006-0806-x>>. Acesso em: 01/12/2020.

JADHAV, B. R.; DALAVI, S. B; PATIL, A. P. Review Paper of Dry Machining. **International Journal of Science Technology & Engineering**, v. 6, n. 7, p. 11–15, 2020. Disponível em: <<http://ijste.org/Article.php?manuscript=IJSTEV6I7004>>. Acesso em: 29/11/2020.

JIAO, R.; CHEN, B. Application of Green Manufacturing Process in Cutting. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 782, n. 2, 2020. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/782/2/022023/meta>>. Acesso em: 19/12/2020.

KALADHAR, M.; SUBBAIAH, K. V.; RAO, C. H. S. Machining of austenitic stainless steels – a review. **International Journal of Machining and Machinability of Materials**, v. 12, n. 1/2, p. 178-192, 2012. Disponível em: <<http://doi.org/10.1504/ijmmm.2012.048564>>. Acesso em: 16/09/2020.

KAYNAK, Y.; LU, T.; JAWAHIR, I. S. Cryogenic machining-induced surface integrity: A review and comparison with dry, mql, and flood-cooled machining. **Machining Science and Technology**, v. 18, n. 2, p. 149-198, 2014. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10910344.2014.897836>>. Acesso em: 14/12/2020.

KRAUSS, G. **Steels: Processing, Structure, and Performance**. Ohio: ASM International, 2005. 613 p.

KROLCZYK, G. M. et al. Ecological trends in machining as a key factor in sustainable production – A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 218, p. 604-615, 2019. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.017>>. Acesso em: 01/09/2020.

KUMAR, A. S.; DURAI, A. R.; SORNAKUMAR, T. Development of alumina–ceria ceramic composite cutting tool. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 22, p. 17–20, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2003.10.005>>. Acesso em: 08/09/2020.

KUMAR, A. S.; DURAI, A. R.; SORNAKUMAR, T. Wear behaviour of alumina based ceramic cutting tools on machining steels. **Tribology International**, v. 39, n. 3, p. 191-197, 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X0500037X>>. Acesso em: 28/12/2020.

LI, H; CHEN, Y. **Handbook of Manufacturing Engineering and Technology**. 2013

LIKE, Q. et al. Types, Performance and Application of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> System Ceramic Cutting Tool. **Journal of Rare Earths**, v. 25, n. SUPPL. 2, p. 322-326, 2007. Disponível em: <>. Acesso em: 26/12/2020.

LIN, F. J. T.; DE JONGHE, L. C.; RAHAMAN, M. N. Microstructure refinement of sintered alumina by two-step sintering technique. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 80, n. 9, p. 2269-2277, 1997. Disponível em: <<https://ceramics.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1151-2916.1997.tb03117.x>>. Acesso em: 27/12/2020.

LIU, Y. et al. Wear resistance of carbide tools with textured flank-face in dry cutting of green alumina ceramics. **Wear**. v. 372-373, p. 91-103, 2017. 10.1016/j.wear.2016.12.001. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/312333896\\_Wear\\_resistance\\_of\\_carbide\\_tools\\_with\\_textured\\_flank-face\\_in\\_dry\\_cutting\\_of\\_green\\_alumina\\_ceramics](https://www.researchgate.net/publication/312333896_Wear_resistance_of_carbide_tools_with_textured_flank-face_in_dry_cutting_of_green_alumina_ceramics)>. Acesso em: 20/12/2020.

LO, K. H.; SHEK, C. H.; LAI, J. K. L. Recent developments in stainless steels. **Materials Science and Engineering R**. v. 65, n. 4-6, p. 39-104, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mser.2009.03.001>>. Acesso em: 20/09/2020.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3º Ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2015.

MACHADO, A. R.; DINIZ, A. E. Tool wear analysis in the machining of hardened steels. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 92, n. 9-12, p. 4095-4109, 2017. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-017-0455-2>>. Acesso em: 22/12/2020.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. 7ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2019.

RAJASEKHAR, A. Heat Treatments Methods Applied to AISI 431 Martensitic Stainless Steels. **International Journal of Scientific & Engineering Research**. V. 6, n. 4, p. 547-553, 2015. Disponível em: < <https://www.ijser.org/onlineResearchPaperViewer.aspx?Heat-Treatment-Methods-Applied-To-AISI-431-Martensitic-Stainless-Steels.pdf>>. Acesso em: 20/09/2020.

ROSA, J. L. et al. Electrodeposition of copper on titanium wires: Taguchi experimental design approach, **Journal of Materials Processing Technology**, v.209, p. 1181-1188, 2009. Disponível em:< <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013608002446>>. Acesso em: 27/01/2021.

SAHU, S.; CHOUDHURY, B. B. Optimization of Surface Roughness Using Taguchi Methodology & Prediction of Tool Wear in Hard Turning Tools. **Materials Today: Proceedings**, v. 2, n. 4-5, p. 2615-2623, 2015. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.218>>. Acesso em: 29/01/2021.

SANDIVIK. Disponível em: <<http://www.sandvik.coromant.com>>. Acesso em: (15/01/2001).

SHARMA, A. K.; TIWARI, A. K.; DIXIT, A. R. Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, v. 127, p. 1-18, 2016. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.146>>. Acesso em: 28/08/2020.

SIDDHPURA, M.; SIDDHPURA A.; BHAVE, S. **Vibration as a parameter for monitoring the health of precision machine tools**. In: Conference, International conference on frontiers in design and manufacturing engineering, Coimatore (India), Macmillan, India, 2008. Disponível em: <Vibration as a parameter for monitoring the health of precision machine tools (researchgate.net)>. Acesso em: 13/03/2021.

SINGH, G.; AGGARWAL, V.; SINGH, S. Critical review on ecological, economical and technological aspects of minimum quantity lubrication towards sustainable machining. **Journal of Cleaner Production**, v. 271, p. 122185, 2020. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122185>>. Acesso em: 17/08/2020.

SREEJITH, P. S.; NGOI, B. K. A. Dry machining: Machining of the future. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 101, n. 1, p. 287-291, 2000. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00445-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00445-3)>. Acesso em: 07/09/2020.

STÅHL, J. E. **Metal cutting: theories and models**. Lund, Sweden: Division of Production and Materials Engineering, Lund University, 2012.

TACUCHI, G; ELSAYED, E; HSIANG, T. **Taguchi – Engenharia da Qualidade em Sistemas de Produção**. McGraw-Hill, 1990.

TAGUCHI, G.; CHOWDHURY, S.; WU, Y. **Taguchi's Quality Engineering - Handbook**. First ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005.

TOPOGLOU, N. et al. Investigation of the Influence of CO<sub>2</sub> Cryogenic Application on Tool Wear. **Procedia CIRP**, v. 63, p. 745-749, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procirp.2017.03.351>>. Acesso em: 15/12/2020.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. Introduction: Historical and Economic Context. In \_\_\_\_\_. **Metal Cutting**. 4th ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000.

TSAI, M. C. et al. Phase transformation in AISI 410 stainless steel. **Materials Science and Engineering**, v. 332, n. 1-2, p. 1-10, 2002. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509301017105?via%3Dihub>>. Acesso em: 20/09/2021.

UYSAL, A.; DEMIREN, F; ALTAN, E. Applying Minimum Quantity Lubrication (MQL) Method on Milling of Martensitic Steel by Using Nano MoS<sub>2</sub> Reinforced Vegetable Cutting Fluid. **Procedia – Social and Behavioral Sciences**, v. 195, p. 2742-2747, 2015. Elsevier B. V. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S187704281503863X>>. Acesso em: 13/12/2020.

VISHWAS, C. J. et al. Effect of Machining Parameters on Surface integrity during Dry Turning of AISI 410 martensitic stainless steel. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 376, n. 1, 2018. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/376/1/012127>>. Acesso em: 20/09/2020.

WICKRAMASINGHE, K. C. et al. Green Metalworking Fluids for sustainable machining applications: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 257, p. 120552, 2020. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120552>>. Acesso em: 14/12/2020.

ZHAO, B. et al. Fabrication and mechanical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC<sub>w</sub> – TiC<sub>np</sub> ceramic tool material. **Ceramics International**, v. 43, n. 13, p. 10224-10230, 2017. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884217308507>>. Acesso em: 24/12/2020.

ZHAO, F; SHARMA, A. Environmentally Friendly Machining. In: Nee, A. **Handbook of Manufacturing Engineering and Technology**. Springer, London, 2015. Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4670-4\\_14](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4670-4_14)>. Acesso em: 25/11/2020.

MITSUBISHICARBIDE. Disponível em: <<http://www.mitsubishicarbide.net>>. Acesso em: (15/01/2021).

WORLDSTAINLESS. Disponível em: <<https://www.worldstainless.org>>. Acesso em: 29/09/2020.