

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ALEXANDRE MAIER EURICH

**CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE USINADA POR FRESAMENTO DE
FACEAMENTO POR MEIO DA RUGOSIDADE AO LONGO DA VIDA DA
FERRAMENTA**

PONTA GROSSA

2021

ALEXANDRE MAIER EURICH

**CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE USINADA POR FRESAMENTO DE
FACEAMENTO POR MEIO DA RUGOSIDADE AO LONGO DA VIDA DA
FERRAMENTA**

**Characterization of the machined surface by face milling by means of the
roughness along the life of the tool**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Aldo Braghini Junior

PONTA GROSSA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao autor e que licenciem as novas criações sob termos idênticos.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Ponta Grossa



ALEXANDRE MAIER EURICH

**CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE USINADA POR FRESAMENTO DE FACEAMENTO POR
MEIO DA RUGOSIDADE AO LONGO DA VIDA DA FERRAMENTA.**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Fabricação Mecânica e Materiais.

Data de aprovação: 24 de maio de 2021

Prof. Aldo Braghini Junior, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Marcio Ferreira Hupalo, Doutorado - Universidade Estadual de Ponta Grossa

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 24/05/2021.

https://sistemas2.utfpr.edu.br/dpls/sistema/aluno06/mpCADEDocsAssinar.pcTelaAssinaturaDoc?p_pescodnr=105542&p_cadedocpescodnr=9552&p_cadedoccodnr=9845&p_cargo=&p_tipo=3&p_retorno=

Dedico este trabalho aos meus familiares.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado capacidade e sabedoria para realizar esta pesquisa.

A toda minha família, em especial aos meus pais, irmãos e avó, pelo apoio constante e incondicional, sempre colocando minha educação a frente de todas as outras coisas.

Aos meu orientador Aldo Braghini Junior, pela confiança depositada, pela orientação prestada, ao qual se dedicou fielmente na elaboração desta pesquisa.

Aos companheiros de pesquisa e laboratório, que trabalharam em conjunto, pela troca de informações e pelo auxílio prestado.

À Universidade Tecnológica Federal no Paraná, por proporcionar materiais e equipamentos necessários para a elaboração da pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, pela cooperação.

À agência de fomento CAPES, pelo apoio financeiro prestado.

Enfim, agradeço a todos os que, por algum motivo, contribuíram para a realização desta pesquisa.

No que diz respeito ao desempenho, ao compromisso, ao esforço e à dedicação, não existe meio termo. Ou você faz uma coisa bem feita, ou não faz.

(Ayrton Senna)

RESUMO

EURICH, Alexandre Maier. **Caracterização da superfície usinada por fresamento de faceamento por meio da rugosidade ao longo da vida da ferramenta.** 2021. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2021.

O acabamento superficial é gerado, dentre outros fatores, pela impressão do perfil da aresta de corte da ferramenta na peça sendo usinada. Arestas de corte em condições originais (que não sofreram desgaste) tendem a gerar superfícies usinadas mais regulares e com melhor acabamento superficial. No entanto, à medida que a ferramenta sofre desgaste, a sua aresta passa a apresentar geometrias com irregularidades e, estas irregularidades, passam a ser impressas na superfície da peça. Muitos pesquisadores têm desenvolvido pesquisas que avaliam o acabamento superficial do material usinado para diferentes condições de usinagem e diferentes ferramentas de corte, porém ainda existem algumas questões pouco exploradas, principalmente nos quesitos de: acompanhar, periodicamente, as mudanças geométricas nas ferramentas de corte por ocasião do desgaste; avaliar, além da rugosidade média, outros parâmetros de rugosidade que ajudem a caracterizar a superfície da peça à medida que a ferramenta sofre desgaste e; buscar relações, mesmo que qualitativamente, dos comportamentos dos parâmetros de rugosidade com as mudanças geométricas da aresta de corte. Frente a isto, a presente pesquisa tem como objetivo avaliar o comportamento da rugosidade de superfícies fresadas à medida que a aresta de corte secundária da ferramenta modifica a sua geometria original por desgaste. Os experimentos de fresamento de faceamento foram realizados em blocos de aço ABNT 1045, para algumas condições de usinagem e utilizando-se de duas ferramentas de corte semelhantes (ambas de metal duro e ISO P40), porém de fabricantes distintos. Dados de rugosidade foram obtidos por meio de um perfilômetro óptico (o qual também permitiu avaliações da topografia da superfície usinada) e os desgastes inspecionados por um microscópio eletrônico de varredura (MEV). Os desgastes máximos de flanco da aresta secundária de corte, medidos periodicamente nas análises em MEV, foram utilizados para determinar o tempo de vida das ferramentas de corte para cada condição de usinagem. Foi feito o monitoramento da aresta secundária de corte para acompanhar a mudança geométrica da mesma pois é esta aresta que gera a superfície usinada. Quando havia adesão na aresta de corte, notava-se vales mais pronunciados, picos reduzidos com cristas mais largas e fator de achatamento com valor negativo na topografia da peça. A ferramenta com maior ângulo de cunha, além de ter apresentado tempo de vida maior, apresentou menores alternâncias nos comportamentos dos parâmetros de rugosidade. Ambas as ferramentas falharam pelos desgastes de entalhe que evoluíram a partir de trincas térmicas e não por terem alcançado o valor pré-determinado de desgaste máximo de flanco (200 μm).

Palavras-chave: Acabamento superficial. Rugosidade. Desgaste de ferramentas de corte. Usinagem. Superfície usinada.

ABSTRACT

EURICH, Alexandre Maier. **Characterization of the machined surface by face milling by means of the roughness along the life of the tool**. 2021. 173 p. Dissertation (Master Degree in Mechanical Engineering) - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2021.

The surface finish is generated, among other factors, by printing the profile of the cutting edge of the tool on the part being machined. Cutting edges in original conditions (which did not wear) tend to generate regular machined surfaces, with a better surface finish. However, as the tool suffer wear, its edge starts to present irregular geometries and, these irregularities, start to be printed on the surface of the part. Many researchers have developed researches that evaluates the surface finish of the machined material for different machining conditions and different cutting tools, however there are still some issues little explored, mainly in terms of: monitoring, periodically, the geometric changes in the cutting tools because of the wear; evaluate, besides the medium roughness, other roughness parameters that present a behavior as the tool wears and; search relationships, even if qualitatively, between the behavior of the roughness parameters and the geometric changes of the cutting edge. In view of this, the present research aims to evaluate the roughness behavior of milled surfaces as the secondary cutting edge of the tool changes its original geometry due to wear. The face milling experiments were carried out on ABNT 1045 steel blocks, for some machining conditions and using two similar cutting tools (both carbide and ISO P40), but from different manufacturers. Roughness data were obtained by means of an optical profilometer (which also allowed evaluations of the topography of the machined surface) and the wear inspected by a scanning electron microscope (SEM). The maximum flank wear of the secondary cutting edge, measured periodically in the SEM analysis, was used to determine the life of the cutting tools for each machining condition. Was made the monitoring of the secondary cutting edge to accompany its geometric change because it is the edge that generates the machined surface. When there was adhesion at the cutting edge, were observed more pronounced valleys, reduced peaks with wider ridges and negative skewness in the topography of the piece. The tool with a higher wedge angle, besides to having a longer life time, showed less changes in the behavior of the roughness parameters. Both tools failed due the wear of notch that evolved from thermal cracks and not because they reached the predetermined value of maximum flank wear (200 μm).

Keywords: Surface finish. Roughness. Cutting tools wear. Machining. Machined surface.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração das características de um mecanismo de formação de cavaco.	24
Figura 2 - Influência da razão entre o raio da aresta (r_e) e a espessura de corte (h_1) com a pressão específica de corte.....	26
Figura 3 - Ilustração de diferentes relações entre espessura de corte (h_1) e espessura mínima de corte (h_{min}).	27
Figura 4 - Ilustração das superfícies presentes em um processo de usinagem e das arestas de corte.	28
Figura 5 - Ilustração, comparativa, entre corte discordante e concordante.....	29
Figura 6 - Avanço por dente (f_z) e avanço por rotação (f).	30
Figura 7 - Grandezas de velocidade envolvidas no fresamento.....	30
Figura 8 - Profundidade de corte axial (a_p) e radial (a_e).	31
Figura 9 - Influência da porcentagem de cobalto da ferramenta de metal duro em relação aos valores de dureza <i>Vickers</i> da mesma.....	33
Figura 10 - Microestrutura típica do substrato de uma ferramenta de metal duro.	33
Figura 11 - Relação de propriedades de alguns revestimentos.	34
Figura 12 - Representação de alguns valores de ângulo de saída.	35
Figura 13 - Representação de alguns valores de ângulo de folga	36
Figura 14 - Ilustração dos ângulos gerados pela combinação dos ângulos da ferramenta avulsa com os ângulos dos assentos do cabeçote fresador.....	36
Figura 15 - Ilustração de diferentes ângulos de saída (positivo, negativo e neutro), axiais e radiais.	37
Figura 16 - Ilustração de diferentes ângulos de posição.	38
Figura 17 - Principais tipos de desgaste em ferramentas de corte.....	40
Figura 18 - Efeitos do desgaste na superfície usinada e nas superfícies do cavaco removido.	42
Figura 19 - Textura de uma superfície.	43
Figura 20 - Perfil geométrico de uma superfície.....	44
Figura 21 - Representação da linha média.	44
Figura 22 - Representação da amplitude e do espaçamento em perfis de rugosidade.	45
Figura 23 - Exemplo da metodologia utilizada para a medição da rugosidade média.	47
Figura 24 - Representação esquemática de R_a em determinados comprimentos de amostras.	47

Figura 25 - Representação esquemática de Rz para determinado comprimento de avaliação e seu equacionamento.....	48
Figura 26 - Representação esquemáticas dos parâmetros de rugosidade Rp, Rv e Rt.	49
Figura 27 - Superfícies com os mesmos valores de Ra em diferentes perfis.....	49
Figura 28 - Representação dos fatores de assimetria e curvas de distribuição de amplitude.....	50
Figura 29 - Representação do parâmetro de rugosidade Rku.....	51
Figura 30 - Curva <i>Abbott-Firestone</i>	52
Figura 31 - Determinação do parâmetro R_k	53
Figura 32 - Determinação dos parâmetros R_{pk} e R_{vk} e dos limites M_{r1} e M_{r2}	54
Figura 33 - Comparação dos valores de R_k , R_{vk} e R_{pk} para diferentes perfis com os mesmos valores de R_a	54
Figura 34 - Exemplo de um perfil de rugosidade (linha azul), que provém da média de 50 leituras (linhas cinzas).....	55
Figura 35 - Exemplo de um mapa topográfico gerado em um perfilômetro óptico. ...	56
Figura 36 - Método de medição dos parâmetros de prefixo R a partir de um rugosímetro.....	58
Figura 37 - Influência da geometria do raio do apalpador na obtenção do perfil da rugosidade.	58
Figura 38 - Ilustração esquemática de um perfilômetro óptico.....	59
Figura 39 - Contribuição geométrica do avanço e do raio de ponta na rugosidade em um processo de torneamento.....	60
Figura 40 - Influência da evolução do desgaste na geração da superfície usinada. .	62
Figura 41 - Fluxograma da seção de materiais e métodos.	65
Figura 42 - Fluxograma das atividades desenvolvidas para a caracterização das ferramentas de corte e seus respectivos cabeçotes.	66
Figura 43 - Dimensões (em mm) do bloco de aço ABNT 1045 fresado nos experimentos.....	68
Figura 44 - Amostras confeccionadas, para caracterização do material, a partir dos blocos de aço.	68
Figura 45 - Fluxograma das atividades desenvolvidas para a caracterização das amostras do aço ABNT 1045.	69
Figura 46 - Dimensões (em mm) das amostras fabricadas a partir do bloco padrão.	70
Figura 47 - Fluxograma das atividades desenvolvidas nos pré-testes.....	73
Figura 48 - Fluxograma de atividades desenvolvidas nos ensaios de fresamento....	74
Figura 49 - Configuração utilizada para as operações de fresamento em uma vista superior.	77
Figura 50 - Imagens da ferramenta A (a, b) e seu respectivo cabeçote (c).....	80

Figura 51 - Imagens da ferramenta B (a, b) e seu respectivo cabeçote (c).....	80
Figura 52 - Medição do ângulo de folga efetivo e do ângulo de saída axial da ferramenta A.	82
Figura 53 – Medição do ângulo de saída axial da ferramenta A.	82
Figura 54 - Imagem de EDS da ferramenta A, revelando a composição química dos revestimentos e do substrato.	84
Figura 55 - Imagem de EDS da ferramenta B, revelando a composição química do revestimento e do substrato.	85
Figura 56 – Exemplos dos resultados das análises microestruturais das amostras para: (a), (b) seções longitudinais; (c), (d) seções transversais.	87
Figura 57 - Desgaste de flanco na ferramenta A para 40 min de usinagem: exemplo da metodologia de medição utilizada.	88
Figura 58 - Imagens do flanco da ferramenta para os dois intervalos da condição 1 onde houve baixa evolução no desgaste: 37,9 min, 44,2 min, 69,5 min e 75,8 min.	90
Figura 59 - Acompanhamento das trincas térmicas, no ensaio da condição 1, na aresta de corte primária, para: 12,6 min, 31,6 min, 44,2 min, 50,6 min, 94,8 min e 101,1 min.	92
Figura 60 - Acompanhamento das trincas térmicas, no ensaio da condição 2, na aresta de corte primária, para: 12,2 min, 24,4 min, 48,7 min e 67 min.	113
Figura 61 - Acompanhamento da perda de material no sentido radial na aresta de corte secundária para a condição 2 e nos intervalos: 30,5 min e 67 min.	115
Figura 62 - Imagens do flanco da ferramenta para os intervalos da condição 3 onde houve baixa evolução no desgaste: 50,6 min e 56,9 min.	127
Figura 63 - Acompanhamento das trincas térmicas, no ensaio da condição 3, na aresta de corte primária, para: 19 min e 132,7 min.	128
Figura 64 - Acompanhamento das trincas térmicas, no ensaio da condição 4, na aresta de corte primária, para: 12,2 min, 48,7 min e 109,6 min.	142

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Fresadora modelo FH4 do fabricante <i>Clark Machine</i>	71
Fotografia 2 - Perfilômetro óptico.	72

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Valores de desgaste de flanco máximo para a condição 1.....	89
Gráfico 2 - Rugosidade média para a condição 1.	96
Gráfico 3 - Rugosidade de pico, de vale e fator de assimetria, avaliados em linha, para a condição 1.....	97
Gráfico 4 - Rugosidade de pico, de vale e fator de assimetria, avaliados em área de amostragem, para a condição 1.....	98
Gráfico 5 - Comparativo entre os valores de R_p e S_p , para a condição 1.....	99
Gráfico 6 - Comparativo entre os valores de R_v e S_v , para a condição 1.....	99
Gráfico 7 - Altura reduzida de picos, profundidade reduzida de vales e <i>skewness</i> , avaliados em linha, para a condição 1.	100
Gráfico 8 - Altura reduzida de picos, profundidade reduzida de vales e <i>skewness</i> , avaliados em área de amostragem, para a condição 1.....	100
Gráfico 9 - Valores de desgaste máximo de flanco para a condição 2.....	112
Gráfico 10 - Rugosidade média para a condição 2.	117
Gráfico 11 - Rugosidade de pico, de vale e fator de assimetria, avaliados em linha, para a condição 2.....	118
Gráfico 12 - Rugosidade de pico, de vale e fator de assimetria, avaliados em área de amostragem, para a condição 2.....	118
Gráfico 13 - Comparativo entre os valores de R_p e S_p , para a condição 2.....	119
Gráfico 14 - Comparativo entre os valores de R_v e S_v , para a condição 2.	120
Gráfico 15 - Altura reduzida de picos, profundidade reduzida de vales e <i>skewness</i> , avaliados em linha, para a condição 2.	121
Gráfico 16 - Altura reduzida de picos, profundidade reduzida de vales e <i>skewness</i> , avaliados em área de amostragem, para a condição 2.....	121
Gráfico 17 - Valores de desgaste máximo de flanco para a condição 3.....	126
Gráfico 18 - Rugosidade média para a condição 3.	129
Gráfico 19 - Rugosidade de pico, de vale e fator de assimetria, avaliados em linha, para a condição 3.....	130
Gráfico 20 - Rugosidade de pico, de vale e fator de assimetria, avaliados em área de amostragem, para a condição 3.....	131
Gráfico 21 - Comparativo entre os valores de R_p e S_p , para a condição 3.....	132
Gráfico 22 - Comparativo entre os valores de R_v e S_v , para a condição 3.	132
Gráfico 23 - Altura reduzida de picos, profundidade reduzida de vales e <i>skewness</i> , avaliados em linha, para a condição 3.	133
Gráfico 24 - Altura reduzida de picos, profundidade reduzida de vales e <i>skewness</i> , avaliados em área de amostragem, para a condição 3.....	134

Gráfico 25 - Valores de desgaste máximo de flanco para a condição 4.....	141
Gráfico 26 - Rugosidade média para a condição 4.	144
Gráfico 27 - Rugosidade de pico, de vale e fator de assimetria, avaliados em linha, para a condição 4.....	145
Gráfico 28 - Rugosidade de pico, de vale e fator de assimetria, avaliados em área de amostragem, para a condição 4.....	145
Gráfico 29 - Comparativo entre os valores de R_p e S_p , para a condição 4.....	146
Gráfico 30 - Comparativo entre os valores de R_v e S_v , para a condição 4.....	147
Gráfico 31 - Altura reduzida de picos, profundidade reduzida de vales e <i>skewness</i> , avaliados em linha, para a condição 4.	148
Gráfico 32 - Altura reduzida de picos, profundidade reduzida de vales e <i>skewness</i> , avaliados em área de amostragem, para a condição 4.....	149
Gráfico 33 - Comparação dos tempos de vida útil das ferramentas de corte, para as quatro condições de fresamento.	155
Gráfico 34 - Gráficos comparativos das rugosidades médias (S_a) entre as quatro condições de usinagem.....	157
Gráfico 35 - Gráficos comparativos das alturas máximas de pico (S_p) entre as quatro condições de usinagem.....	159
Gráfico 36 - Gráficos comparativos das alturas reduzidas de pico (S_{pk}) entre as quatro condições de usinagem.....	160
Gráfico 37 - Gráficos comparativos das profundidades máximas de vale (S_v) entre as quatro condições de usinagem.	161
Gráfico 38 - Gráficos comparativos das profundidades reduzidas de vale (S_{vk}) entre as quatro condições de usinagem.....	162
Gráfico 39 - Gráficos comparativos dos fatores de assimetria ou <i>skewness</i> (S_{sk}) entre as quatro condições de usinagem.....	163

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Relação de associação entre os parâmetros R e seus respectivos parâmetros S	57
Quadro 2 - Comparação entre estado de degradação da aresta secundária da ferramenta e perfil topográfico da superfície usinada para alguns intervalos de fresamento da condição 1.....	101
Quadro 3 - Comparação entre estado de degradação da aresta secundária da ferramenta e perfil topográfico da superfície usinada para alguns intervalos de fresamento da condição 2.....	122
Quadro 4 - Comparação entre estado de degradação da aresta secundária da ferramenta e perfil topográfico da superfície usinada para alguns intervalos de fresamento da condição 3.....	135
Quadro 5 - Comparação entre estado de degradação da aresta secundária da ferramenta e perfil topográfico da superfície usinada para alguns intervalos de fresamento da condição 4.....	150

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comprimentos de amostragem e avaliação recomendados para cada faixa de rugosidade média.....	46
Tabela 2 - Parâmetros de corte recomendados pelos fabricantes das ferramentas de corte, particulares ao tipo de material usinado no presente trabalho.	67
Tabela 3 - Valores dos parâmetros de corte disponibilizados pela máquina: informados pelo fabricante e medidos.	75
Tabela 4 - Matriz de experimentos.	76
Tabela 5 - Número de passes e tempo efetivo de corte para cada condição de usinagem.....	76
Tabela 6 - Tabela comparativa dos valores geométricos das ferramentas A e B.....	81
Tabela 7 - Tabela comparativa dos valores geométricos dos cabeçotes A e B.	81
Tabela 8 - Valores dos ângulos efetivos do conjunto ferramenta-cabeçote A.....	83
Tabela 9 - Valores dos ângulos da ferramenta B.	83
Tabela 10- Valores dos ângulos do cabeçote B.	83
Tabela 11 - Valores dos ângulos efetivos do conjunto ferramenta-cabeçote B.....	83
Tabela 12 - Valores de dureza obtidos nas amostras do material.....	86
Tabela 13 - Composição química das amostras, obtidas por espectrometria de emissão óptica.	86

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a_e	Largura de corte (mm)
a_p	Profundidade de corte (mm)
EDS	
f	Avanço (mm/rotação)
f_z	Avanço por aresta (mm/aresta)
h_1	Espessura de corte (mm)
h_2	Espessura média do cavaco (mm)
h_{\min}	Espessura mínima de corte (mm)
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
n	Rotação (rpm)
r_e	Raio da aresta de corte (mm)
R_a/S_a	Rugosidade média (μm)
R_p/S_p	Altura máxima de pico (μm)
R_{pk}/S_{pk}	Altura reduzida dos picos (μm)
R_{sk}/S_{sk}	Fator de assimetria
R_v/S_v	Profundidade máxima de vale (μm)
R_{vk}/S_{vk}	Profundidade reduzida dos vales (μm)
UTFPR-PG	Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Ponta Grossa
$V_{B,\max}$	Desgaste máximo de flanco (μm)
v_f	Velocidade de avanço (mm/min)
v_c	Velocidade de corte (m/min)
z_c	Número de insertos do cabeçote fresador
α	Ângulo de folga
β	Ângulo de cunha
γ	Ângulo de saída
γ_0	Ângulo de saída efetivo
γ_f	Ângulo de saída radial
γ_p	Ângulo de saída axial
\emptyset	Ângulo de cisalhamento
χ_r	Ângulo de posição

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 OBJETIVO GERAL	21
1.1.1 Objetivos Específicos.....	21
1.2 JUSTIFICATIVA.....	22
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	23
2.1 PROCESSO DE USINAGEM E MECANISMO DE FORMAÇÃO DE CAVACO.....	23
2.2 PROCESSO DE USINAGEM POR FRESAMENTO DE FACEAMENTO	28
2.2.1 Grandezas de Avanço	29
2.2.2 Grandezas de Velocidade.....	30
2.2.3 Grandezas de Penetração	31
2.3 FERRAMENTAS DE CORTE E SUAS GEOMETRIAS.....	32
2.3.1 Geometrias das Ferramentas de Corte.....	35
2.4 MECANISMOS E TIPOS DE DESGASTE EM FERRAMENTAS DE CORTE ..	39
2.5 RUGOSIDADE	43
2.5.1 Perfil Geométrico	44
2.5.2 Sistema M.....	44
2.5.3 Comprimentos da Amostragem	45
2.5.4 Parâmetros de Rugosidade de Amplitude	46
2.5.4.1 Desvio aritmético médio ou rugosidade média (R_a)	46
2.5.4.2 Desvio médio quadrático do perfil (R_q).....	48
2.5.4.3 Altura máxima do perfil (R_z)	48
2.5.4.4 Altura máxima de pico (R_p), profundidade máxima de vale (R_v) e altura total do perfil (R_t)	48
2.5.4.5 Fator de assimetria - <i>skewness</i> (R_{sk}).....	49
2.5.4.6 Fator de achatamento ou Curtose - <i>Kurtosis</i> (R_{ku})	51
2.5.5 Curva <i>Abbott-Firestone</i>	52
2.5.5.1 Parâmetros R_k , R_{pk} e R_{vk}	53
2.5.6 Parâmetros de Rugosidade em Área	55
2.5.7 Técnicas para a Caracterização da Rugosidade	57
2.5.7.1 Método de contato: rugosímetro	57
2.5.7.2 Método sem contato: perfilômetro óptico	59
2.5.8 Influência de Parâmetros e Condições de Usinagem no Acabamento Superficial.....	60
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	65
3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	66
3.1.1 Ferramentas de Corte e Cabeçotes de Fresamento.....	66
3.1.2 Material Usinado	67
3.1.2.1 Amostras para impressão da superfície usinada	70

3.1.3 Máquina Ferramenta.....	70
3.1.4 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e Espectroscópio de Energia Dispersiva (EDS).....	71
3.1.5 Perfilômetro Óptico	71
3.2 PRÉ-TESTES	72
3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	73
3.4 ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS.....	77
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	79
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS FERRAMENTAS DE CORTE E DOS CABEÇOTES DE FRESAMENTO	79
4.2 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL USINADO	86
4.3 PRÉ-TESTES	87
4.4 RELAÇÃO ENTRE ESTADO DE DESGASTE E PERFIL DE RUGOSIDADE GERADO.....	88
4.4.1 Condição 1.....	89
4.4.2 Condição 2.....	111
4.4.3 Condição 3.....	126
4.4.4 Condição 4.....	141
4.5 COMPARAÇÃO ENTRE AS CONDIÇÕES DE USINAGEM.....	155
4.6 COMENTÁRIOS GERAIS SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS	163
5 CONCLUSÕES	166
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	166
REFERÊNCIAS.....	168

1 INTRODUÇÃO

Um processo de fabricação busca produzir peças conforme a necessidade de cada projeto e com a melhor qualidade possível. No entanto, estes processos nunca são perfeitos e produzem produtos finais com erros geométricos e dimensionais. Dentre os erros mais comuns, estão os desvios no perfil da topografia da superfície da peça, ou rugosidade, que é um dos parâmetros que define a qualidade do acabamento superficial.

Dos processos utilizados para fabricar peças e preparar as superfícies, a usinagem é o mais utilizado. Este é o processo que permite a obtenção de baixos níveis de rugosidade, gerados, entre outros fatores, pela impressão do perfil da aresta de corte da ferramenta na peça usinada. Partindo desta afirmação, crê-se que a utilização de uma ferramenta em seu perfeito estado, fabrica peças com valores de rugosidade muito menores quando comparadas a peças produzidas com ferramentas que sofreram desgaste.

A evolução dos desgastes em ferramentas é algo previsto e, que ocorre, principalmente, devido à combinação de altas temperaturas e altos esforços mecânicos durante o processo de corte. Uma ferramenta em processo de desgaste sofre perda contínua de material e mudanças no perfil da aresta de corte, gerando, conseqüentemente, uma superfície usinada com perfil irregular e uma piora na rugosidade da peça.

Independente da magnitude da rugosidade e dos desgastes, eles devem ser monitorados e suas causas devem ser conhecidas para que, durante o processo, medidas possam ser tomadas no intuito de reduzi-los. Portanto, em trabalhos como os de Agarwal (2012), Wang et al. (2012), Santhanakumar et al. (2016), Hassanpour et al. (2016), Zhao et al. (2017) e Policena et al. (2018), avalia-se a rugosidade do material da peça para diferentes condições de usinagem, que variam em: tipo de material usinado, combinações dos parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte), tipos de operação (torneamento, fresamento e furação) e/ou tipos de ferramentas. Além do mais, em pesquisas como de Zhang et. al (2012), Čerče, Pušavec e Kopač (2015), Yuan et. al (2019), Gowthaman e Jagadeesha (2020) o foco são as ferramentas de corte: como os ângulos e as geometrias de aresta de corte e do raio de ponta que contribuem para a geração do perfil de rugosidade.

Por fim, observa-se que o estudo do perfil do acabamento superficial em processos de usinagem tem sido muito pesquisado e tem sido abordado de diferentes formas. Frente a isto, observou-se um ponto pouco explorado nesta linha de pesquisa que é a avaliação do comportamento de outros parâmetros de rugosidade, além da rugosidade média - R_a (amplamente utilizado), de modo a analisar o comportamento destes parâmetros à medida que a ferramenta de corte sofre alterações em suas geometrias por desgaste. Algo que também não foi explorado foi a caracterização da mudança da topografia da peça usinada à medida que a ferramenta muda o seu perfil geométrico. Deste modo, o estudo dos efeitos da mudança da aresta de corte, à medida que se desgasta, vai contribuir para o aumento do entendimento da relação entre degradação da aresta de corte e alteração da superfície usinada da peça.

Diante da problemática exposta apresentam-se os objetivos desta pesquisa, que podem ser entendidos em nível geral e específico.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o comportamento da rugosidade de superfícies fresadas à medida que a aresta de corte secundária da ferramenta modifica a sua geometria original por desgaste.

1.1.1 Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral seja alcançado deve-se:

- Caracterizar as ferramentas de corte de metal duro, em suas condições iniciais;
- Caracterizar, do ponto de vista metalográfico e de dureza, os materiais usinados (blocos de aço ABNT 1045);
- Analisar o comportamento dos parâmetros de rugosidade, na superfície usinada;
- Caracterizar as mudanças na aresta de corte ao longo da vida da mesma;
- Relacionar, qualitativamente, o comportamento da rugosidade com as mudanças da geometria da aresta secundária de corte da ferramenta.

1.2 JUSTIFICATIVA

A busca por melhorias na qualidade superficial em peças que constituem componentes mecânicos é cada vez maior no cenário industrial, pois implicam em acréscimos na resistência à corrosão, na condição de deslizamento e na aparência.

Frente a isto, é importante tanto o entendimento do comportamento da rugosidade à medida que a aresta de corte da ferramenta sofre mudanças, quanto da influência da geometria da aresta de corte na topografia impressa na peça usinada. Análises de resultados como estes permitirão estabelecer condições que geram um bom acabamento superficial. Estas condições, além de promover um aperfeiçoamento na qualidade do produto, poderão trazer redução de custos e melhor controle no processo de fabricação.

Dado o caso que há defasagem de pesquisas que caracterizam o desgaste da aresta de corte ao longo da vida da ferramenta com auxílio de MEV e EDS, a contribuição da presente pesquisa traz novas informações para o estudo do desgaste da ferramenta de corte.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho é subdividido em seis capítulos, sendo o capítulo 1 composto pela introdução, já apresentada.

No capítulo 2 é exposta uma revisão bibliográfica sobre fresamento, buscando enfatizar os tipos de desgaste que podem ocorrer em ferramentas de corte e quais as consequências destas anomalias neste processo de fabricação. Também é feita uma abordagem sobre acabamento superficial e alguns parâmetros de rugosidade.

No capítulo 3 são expostos os materiais e métodos empregados ao longo da pesquisa.

No capítulo 4 estão dispostos os resultados preliminares e discussões pertinentes aos ensaios realizados.

Por fim, no Capítulo 5 estão dispostas conclusões e, em sequência, as referências bibliográficas utilizadas como apoio para a realização da pesquisa.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Esta seção é subdividida em outras cinco subseções: a primeira que detalha o processo de usinagem e o mecanismo de formação de cavaco; a segunda que detalha a operação de fresamento e define os principais parâmetros de corte; a terceira que aborda sobre as ferramentas de corte e suas geometrias; a quarta que descreve os tipos e mecanismos de desgaste e; a quinta que detalha os principais parâmetros e grandezas dos perfis de rugosidade e a influência de algumas variáveis dos processos de fresamento na geração deste perfil.

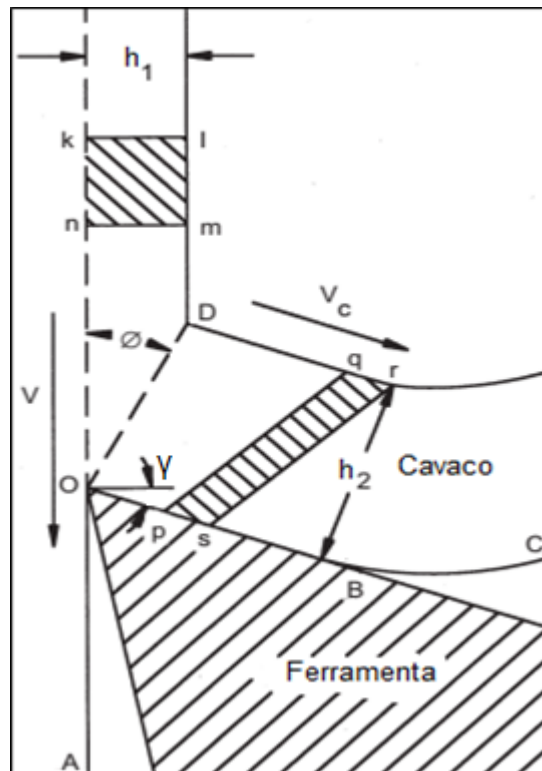
2.1 PROCESSO DE USINAGEM E MECANISMO DE FORMAÇÃO DE CAVACO

Apesar da grande presença dos processos de usinagem no cenário industrial, Machado (2009) destaca a imprevisibilidade deste processo principalmente pelo fato de envolver a combinação de grandes magnitudes e taxas de deformação. Além disso, é um processo com inúmeros parâmetros de entrada que podem resultar em diversas combinações no produto final.

Segundo Stephenson e Agapiou (2016), a usinagem é um processo de fabricação que garante as formas, as dimensões e o acabamento de uma peça por meio da remoção controlada de cavaco realizada através da ação de cisalhamento de uma ferramenta sobre um metal bruto. De acordo com Diniz et. al (2010), o corte do material se dá pelo cisalhamento concentrado ao longo de um plano conhecido como plano de cisalhamento.

Para que o corte ocorra e o cavaco seja removido, há um processo conhecido como mecanismo de formação de cavaco, que envolve alguns fenômenos, tais como: deformação elástica e plástica, atrito e cisalhamento. Este mecanismo, representado na Figura 1, descreve as características do processo onde o material é removido da peça através da ferramenta.

Figura 1 - Ilustração das características de um mecanismo de formação de cavaco.



Fonte: Trent e Wright (2000)

Quanto a Figura 1, observa-se alguns elementos do processo de formação de cavaco, são elas:

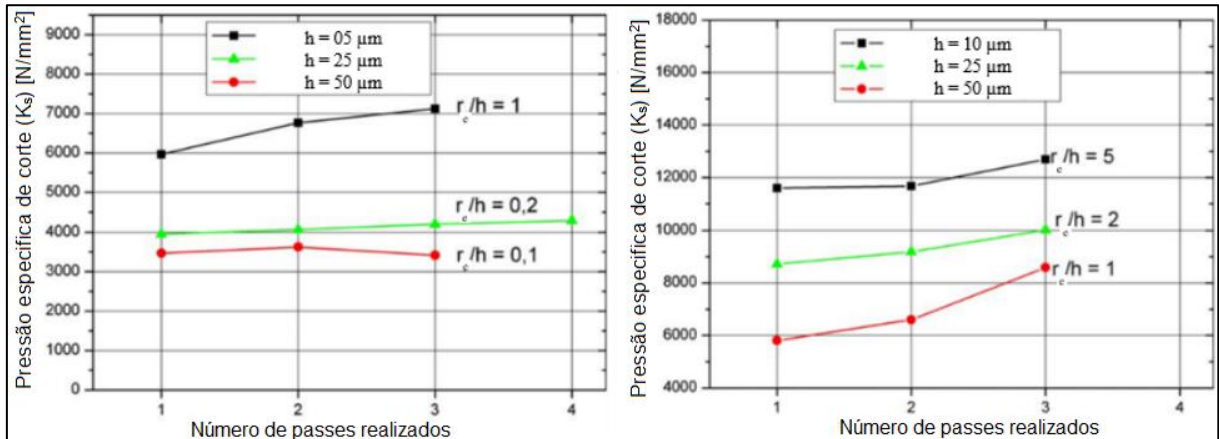
- Ângulo de cisalhamento (ϕ): é o ângulo formado entre o plano de trabalho (AO) e o plano de cisalhamento (OD); este ângulo sofre redução quando há grande deformação do cavaco, e vice-versa. O ângulo de saída (γ) tem muita influência na geração do ângulo de cisalhamento: ferramentas com ângulos de saída mais positivos tendem a facilitar a formação de cavaco e, deste modo, aumentam o ângulo de cisalhamento (ϕ) e não geram deformações exageradas;
- Espessura do cavaco não deformado ou espessura de corte (h_1): no corte ortogonal e não tridimensional, equivale ao valor da profundidade de corte utilizado no processo de usinagem;
- Espessura média do cavaco (h_2): no corte ortogonal e não tridimensional, é a espessura do cavaco que foi formado, depois de ter sofrido recalque e deformação;

- Zona primária de deformação: é a região que compreende ao plano de cisalhamento (OD), ou seja, da extremidade da ferramenta até a superfície livre do cavaco;
- Zona secundária de deformação: é a região que compreende ao plano OB, região está onde há grande atrito gerado pelo escoamento do cavaco com a superfície de saída da ferramenta.

Segundo Machado (2009), o fenômeno de formação de cavaco é periódico e ocorre sob altíssimas velocidades de deformação, seguidas da ruptura do material da peça. Neste sentido, a formação de cavaco se dá em quatro etapas: recalque inicial; deformação e ruptura; deslizamento das lamelas e; saída do cavaco. No caso específico da Figura 1, trata-se de uma ferramentas com ângulos de saída (γ) e folga (α) positivos e, portanto, com um ângulo de cunha reduzido; estas características tornam a geometria da aresta de corte mais aguda (“afiada”), facilitando o processo de recalque e penetração no material; além do mais, o ângulo de saída positivo não se torna uma barreira no processo, reduzindo a magnitude de deformação e facilitando o escoamento do cavaco sobre a superfície de saída.

Ainda sobre as características do mecanismo de formação de cavaco, Silva (2020) divide este mecanismo em duas categorias que se distinguem pela diferença entre os valores do raio da aresta de corte (r_e) e da espessura de corte (h_1): macrousinagem (ou usinagem convencional), onde o raio da aresta (r_e) é menor que a espessura de corte (h_1) e; microusinagem, onde o raio da aresta (r_e) é igual ou menor que a espessura de corte (h_1). No primeiro caso, trata-se de um fenômeno onde a penetração, o recalque e o cisalhamento são facilitados. Já para o segundo caso, aumenta-se a tendência em remover cavaco com alto grau de deformação e conformação. Fleischer, Schulze e Kotschenreuther (2009), pesquisaram a influência de diversas razões entre r_e e h_1 nos valores de pressão específica de corte (K_s).

Figura 2 - Influência da razão entre o raio da aresta (r_e) e a espessura de corte (h_1) com a pressão específica de corte.



Fonte: Fleischer, Schulze e Kotschenreuther (2009)

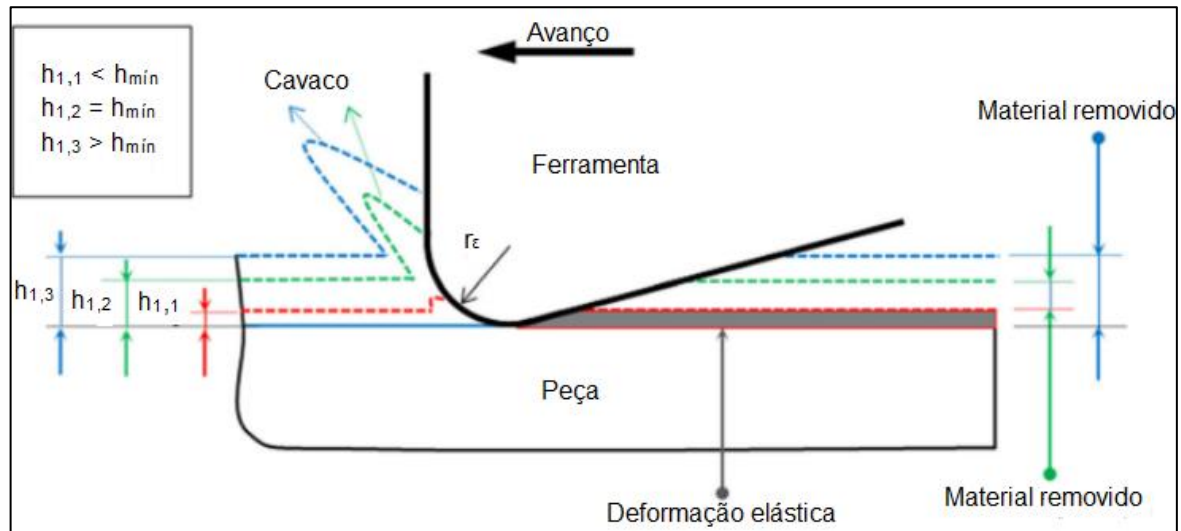
Conforme a Figura 2, os pesquisadores obtiveram resultados que apontam maiores pressões específicas de corte à medida que os raios de aresta se tornam maiores que a espessura do cavaco. Como a pressão específica de corte é diretamente proporcional à força de corte, condições de macrousinagem ($r_e < h_1$) acabam resultando em esforços mais brandos quando comparados aos da microusinagem ($r_e > h_1$).

Neste aspecto, cabe a conceituação da espessura mínima de corte (h_{\min}) que representa a menor espessura para que ocorra a ruptura do material por meio da formação do cavaco, e, conseqüentemente, com a remoção e escorregamento de material pela superfície de saída da ferramenta.

De acordo com Rezaei, Sadeghi e Budak (2018) o fenômeno da espessura mínima de corte (h_{\min}) pode ocorrer das seguintes maneiras, Figura 3:

- $h_{1,1} < h_{\min}$: espessura de corte (h_1) menor do que a h_{\min} . Não há remoção de material sob a forma de cavaco e está ocorrendo deformação tanto elástica quanto plástica da porção de material nas vizinhanças da aresta de corte;
- $h_{1,2} = h_{\min}$: espessura de corte se aproxima da h_{\min} e o cavaco começa a se formar por cisalhamento, porém o material ainda sofre deformação elástica e recuperação;
- $h_{1,3} > h_{\min}$: por fim, quando a espessura de corte é maior que a h_{\min} , o material é removido sob a forma de cavaco.

Figura 3 - Ilustração de diferentes relações entre espessura de corte (h_1) e espessura mínima de corte (h_{\min}).



Fonte: Rezaei, Sadeghi e Budak (2018)

O mecanismo de formação de cavaco influencia na qualidade da peça produzida no processo de usinagem. Sendo assim, torna-se importante a atenção sobre as relações do raio da aresta da ferramenta com a espessura de corte e da espessura de corte com a espessura mínima de corte. Uma formação de cavaco por ação exclusiva de cisalhamento, com redução de deformações, esforços e temperatura, tende a gerar peças com melhor acabamento superficial, formas mais precisas e tolerâncias dimensionais mais ajustadas.

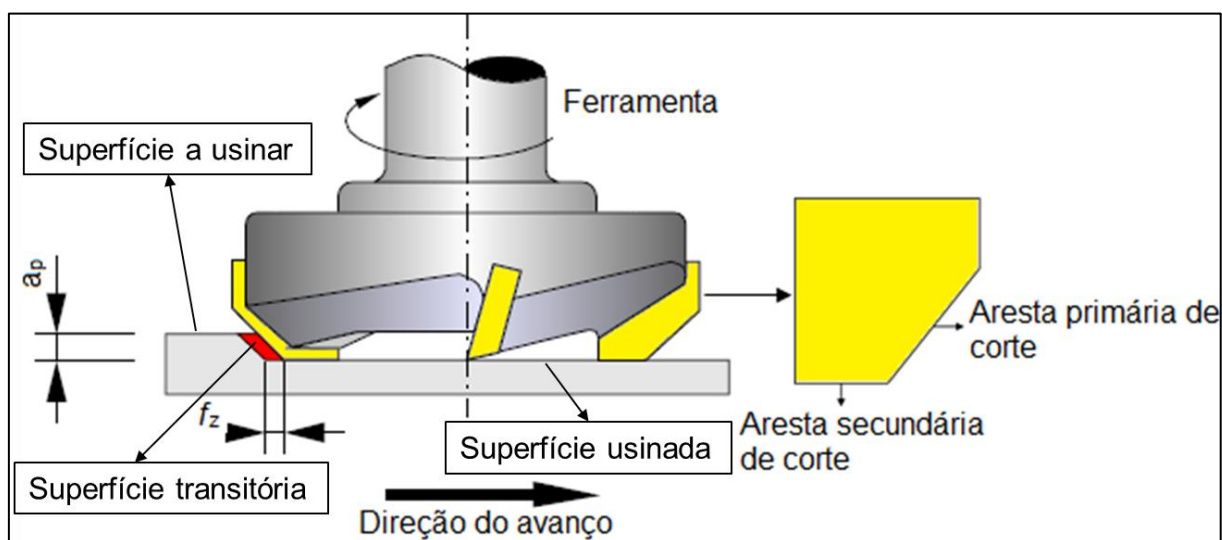
Segundo Rahman et al. (2017), a relação entre r_e / h_1 influencia no tipo de mecanismo de remoção de material, conforme:

- Cisalhamento: $(r_e / h_1) < 1$. Fenômeno desejado em operações de usinagem, onde o material recalcado pela aresta da ferramenta é comprimido, deslocado para a superfície de saída e, posteriormente, removido como cavaco pelo movimento de avanço da ferramenta;
- Extrusão/Sulcamento: $r_e / h_1 = 1$ e $r_e / h_1 \approx 1$. Condição em que parte do material é removido por cisalhamento e, a outra parte, por deformação plástica/extrusão/sulcamento do material;
- Atrito/Deformação: $r_e / h_1 > 1$. A remoção do material se dá unicamente por deformação do material com elevada deformação elástica-plástica, sem a formação de cavaco.

2.2 PROCESSO DE USINAGEM POR FRESAMENTO DE FACEAMENTO

Entre os processos de usinagem convencionais, destaca-se o fresamento. Segundo Trent e Wright (2000), neste tipo de operação a ferramenta é rotacionada enquanto a peça, fixada a mesa da máquina fresadora, é responsável pelos movimentos de avanço longitudinal e transversal. A operação de fresamento, utilizada na execução dos ensaios da presente pesquisa, é o faceamento (conforme Figura 4) que tem por objetivo produzir superfícies planas e, preferencialmente, isentas de deformação residual na seção transversal da peça.

Figura 4 - Ilustração das superfícies presentes em um processo de usinagem e das arestas de corte.



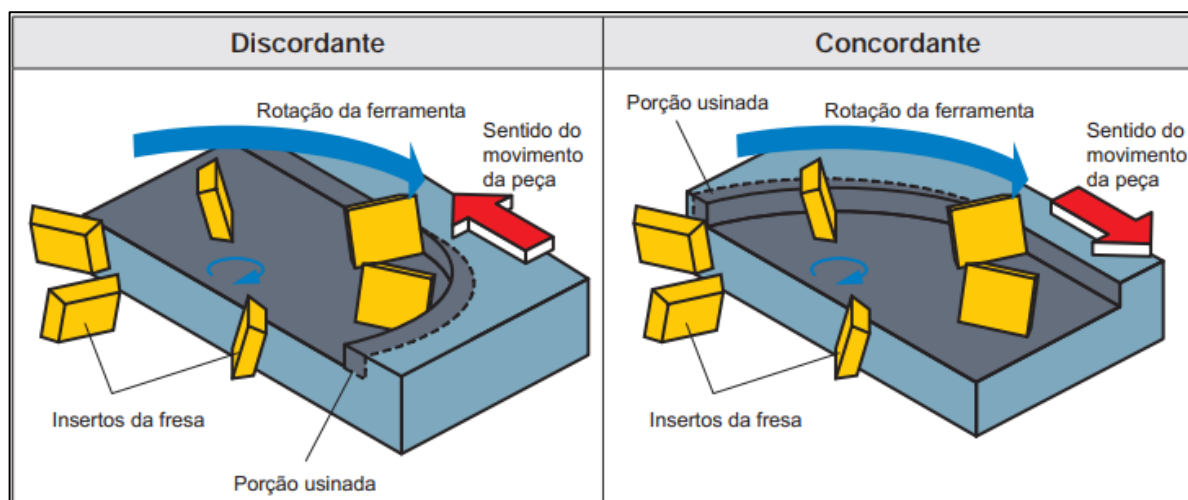
Fonte: disponível em: < <https://docplayer.com.br/28204171-Aula-29-processo-de-fresamento-operacoes-de-corte.html> > Acesso em 23 mar. 2021

Com base na Figura 4, pode-se caracterizar três superfícies em processos de usinagem: superfície a usinar, que corresponde à região do material que ainda não foi submetido ao processo de usinagem; superfície usinada, que corresponde à superfície que já passou pelo processo de corte e; superfície transitória, intermediária entre as duas outras e que está sob processo de formação de cavaco. Quanto a geração destas superfícies, a aresta primária de corte realiza o corte na superfície transitória e é a principal responsável pelo mecanismo de formação de cavaco e, a aresta secundária de corte (ou alisadora), tem maior influência e contribuição no acabamento da superfície usinada.

Os processos de fresamento podem ser classificados quanto ao tipo de corte, concordante ou discordante, conforme a Figura 5. Enquanto o corte concordante ocorre para situações onde o sentido de rotação coincide com o sentido de avanço da

peça e, sob aspecto de vida da ferramenta, é mais vantajoso, o discordante ocorre para situações onde o sentido de rotação da ferramenta é oposto ao sentido do movimento de avanço da peça.

Figura 5 - Ilustração, comparativa, entre corte discordante e concordante.



Fonte: *Mitsubishi Tools* (2020)

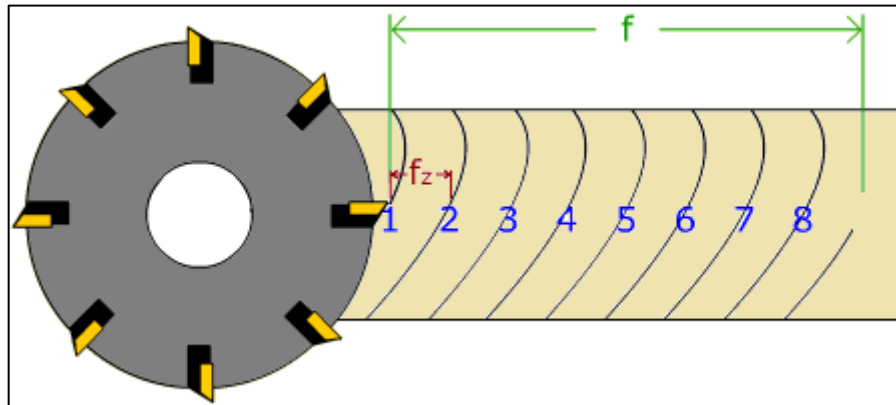
Nota-se ainda, na Figura 5, que no corte discordante a espessura dos cavacos aumenta a partir do início do corte, já no corte concordante o inverso é observado: a espessura dos cavacos diminui a partir do início do corte.

Por fim, nestas operações de fresamento, existem algumas grandezas envolvidas no corte do material. Segundo Machado (2009), o entendimento destas grandezas e o estabelecimento de movimentos apropriados entre a peça e a ferramenta são essenciais para que a remoção do cavaco seja favorecida e, com isso, obtenha-se uma peça com boa qualidade final. Nas próximas seções, serão abordadas as principais grandezas envolvidas no processo de fresamento de faceamento.

2.2.1 Grandezas de Avanço

São grandezas envolvidas no movimento de avanço, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Avanço por dente (f_z) e avanço por rotação (f).



Fonte: Sandvik (2012)

Onde:

- f [mm/rotação] é o percurso de avanço, em milímetros, por rotação da ferramenta;
- f_z [mm/aresta] é o avanço por aresta de corte medido na direção de avanço e correspondente à distância entre duas trilhas de usinagem. É dado pela Equação (1):

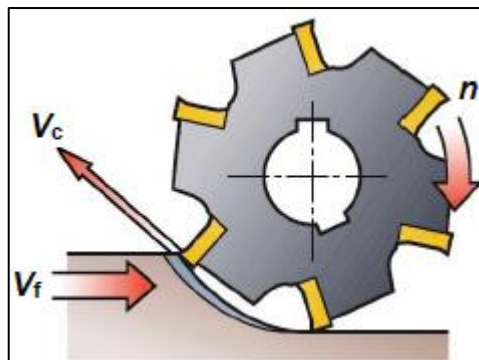
$$f = z_c \cdot f_z \quad (1)$$

onde z_c é o número de insertos utilizados no cabeçote fresador.

2.2.2 Grandezas de Velocidade

A Figura 7 ilustra as três grandezas de velocidade: de rotação, de avanço e de corte.

Figura 7 - Grandezas de velocidade envolvidas no fresamento.



Fonte: Sandvik (2012)

Onde:

- n [rpm] é a frequência de rotação do eixo árvore;

- v_f [mm/min] é a velocidade de avanço, também conhecida como avanço da mesa, que representa a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta de corte da ferramenta, segundo a direção e o sentido de avanço. É dada pela Equação (2):

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

- v_c [m/min] é a velocidade de corte, que representa uma velocidade tangencial instantânea em um ponto qualquer selecionado na aresta de corte da ferramenta durante o movimento de corte. É proporcionado pela rotação da máquina:

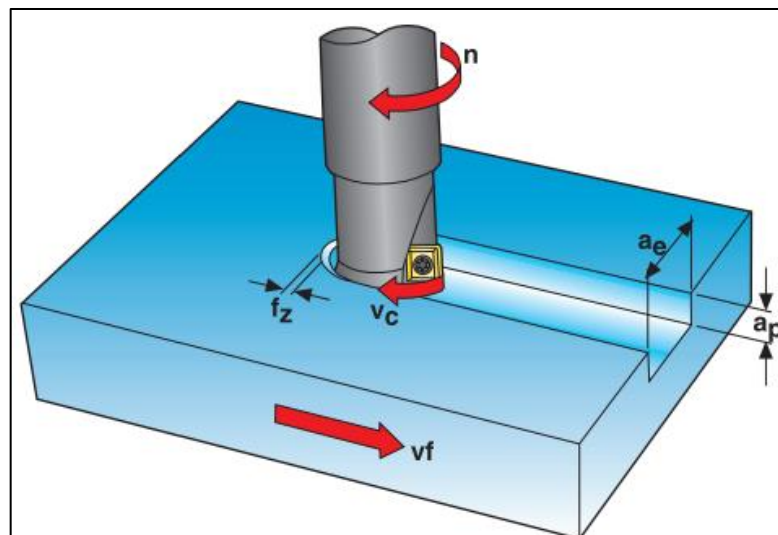
$$V_c = \frac{n \cdot \pi \cdot D_c}{1000} \quad (3)$$

onde D_c é o diâmetro efetivo de corte do cabeçote fresador (em mm).

2.2.3 Grandezas de Penetração

São grandezas que descrevem as relações de penetração entre a ferramenta e a peça, conforme a Figura 8.

Figura 8 - Profundidade de corte axial (a_p) e radial (a_e).



Fonte: SECO tools (2021)

Onde:

- a_p é a profundidade de corte axial [mm] e representa a quantidade que a ferramenta penetra na peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho;

- a_e é a profundidade de corte radial ou largura de corte [mm] e representa a largura de corte da ferramenta, medida no plano de trabalho e perpendicular à direção de avanço.

2.3 FERRAMENTAS DE CORTE E SUAS GEOMETRIAS

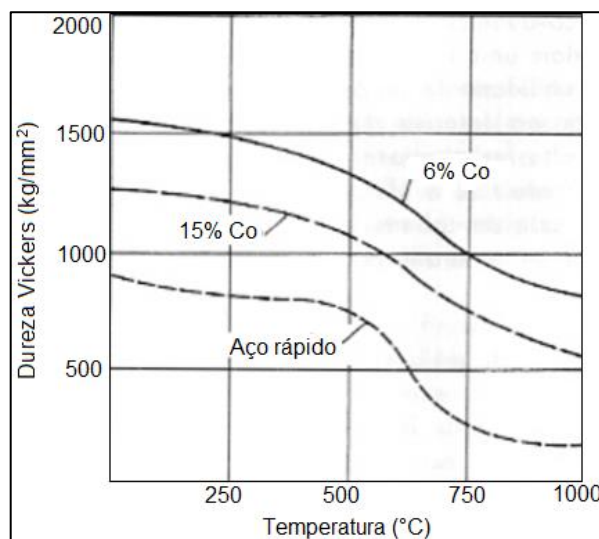
Atualmente, no mercado, há uma gama de diferentes ferramentas de corte que se diferenciam, principalmente, pelo tipo de substrato, tipo de revestimento e formas e dimensões. A seleção correta de qual ferramenta e quais parâmetros de corte utilizar é de suma importância para uma operação de usinagem bem-sucedida.

Em um contexto geral, uma ferramenta com propriedades desejáveis deve ter, segundo Machado (2009), uma boa combinação dos seguintes aspectos: alta dureza, tenacidade adequada, resistência ao cisalhamento, ao desgaste abrasivo, à compressão, ao impacto, à altas temperaturas, ao choque térmico e ser inerte quimicamente. Todas estas características não estão presentes em apenas uma classe de ferramenta necessariamente, mas, dependendo da condição de usinagem, busca-se selecionar uma ferramenta que prioriza algumas destas propriedades.

As ferramentas de metal duro, utilizadas nos experimentos da presente pesquisa, têm grande presença no cenário industrial por apresentar uma boa combinação entre dureza, resistência mecânica e tenacidade. Segundo Diniz et. al (2010), as ferramentas de metal duro são fabricadas a partir da metalurgia do pó de partículas endurecidas (materiais refratários, normalmente), que são sinterizados com um ou mais metais do grupo do ferro (Ferro, Níquel ou Cobalto). No geral, são ferramentas cujo substrato é formado por carboneto de tungstênio em matriz de cobalto (WC + Co).

As diferenças nas propriedades mecânicas dos substratos deste tipo de ferramentas variam de acordo com: a proporção de carbonetos e cobalto e; a adição de outros carbonetos na matriz, tais como o carboneto de titânio (TiC), o carboneto de tântalo (TaC) e o carboneto de Nióbio (TiNb). Neste contexto, ferramentas com maior proporção de carbonetos (fase dura) tendem a ser mais resistentes ao desgaste e, desta maneira, mais utilizadas em operações de acabamento. Em contrapartida, ferramentas com maior proporção de cobalto tendem a ser mais tenazes, utilizadas, principalmente, em operações de desbaste. A variação da dureza *Vickers* (HV) pode ser observada na Figura 9.

Figura 9 - Influência da porcentagem de cobalto da ferramenta de metal duro em relação aos valores de dureza Vickers da mesma.

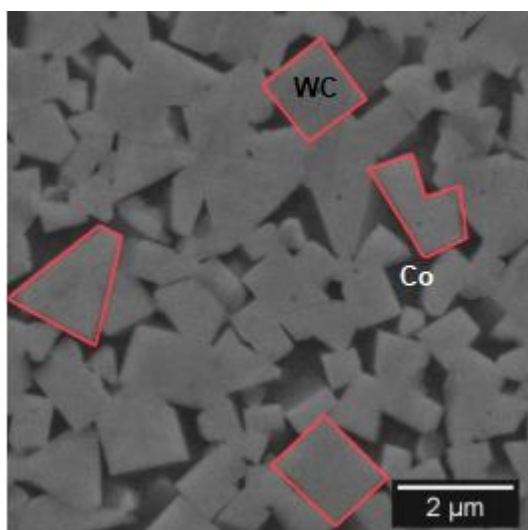


Fonte: Diniz et. al (2010)

Ao se analisar a Figura 9, observa-se que ambas as ferramentas de metal duro (6% Co e 15% Co) apresentam valores de dureza maiores quando comparados àqueles demonstrados pela ferramenta de aço rápido, inclusive, elas não apresentam uma redução abrupta de dureza a altas temperaturas de corte. Pode-se ainda confirmar o que foi descrito anteriormente: ferramentas de metal duro com maior porcentagem de cobalto tendem a apresentar redução nos seus valores de dureza.

A microestrutura de uma ferramenta de metal duro, composta por carboneto de tungstênio (WC) em uma matriz de cobalto (Co) é ilustrada na Figura 10.

Figura 10 - Microestrutura típica do substrato de uma ferramenta de metal duro.

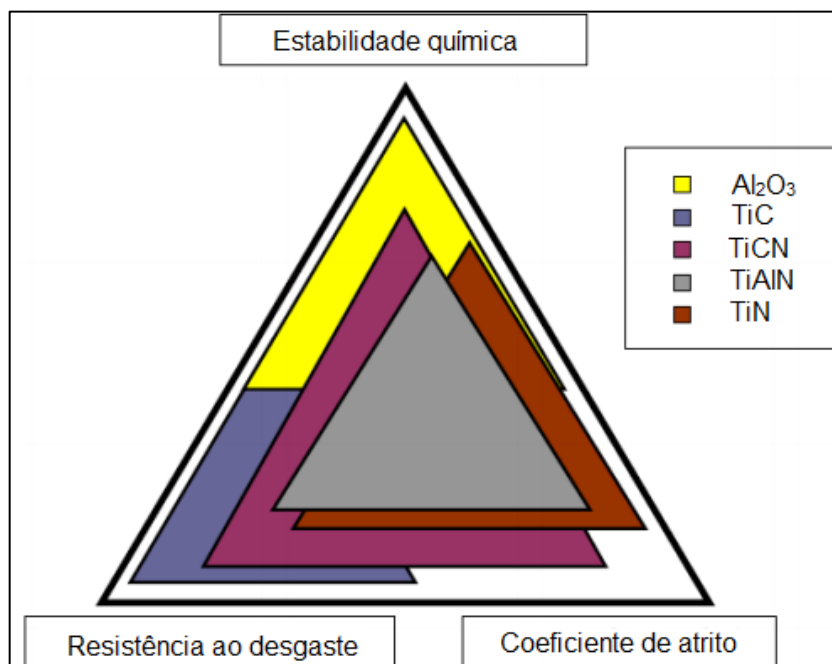


Fonte: Sabino (2020)

Já na década de 1990, de todas as ferramentas de metal duro utilizadas na indústria, as revestidas já representavam mais de 90%, com crescimento acentuado (SANTOS e SALES, 2007). De acordo com Diniz et. al (2010), a finalidade de revestir uma ferramenta é aumentar a resistência ao desgaste e melhorar as condições tribológicas nas interfaces ferramenta-cavaco e ferramenta-peça, aumentando assim a vida útil das mesmas por redução dos esforços e das temperaturas envolvidas no corte. Logicamente, condições mais brandas de usinagem acarretam em produtos otimizados quanto às formas, dimensões e acabamento superficial.

Baseado na tecnologia de fabricação, as ferramentas podem ser revestidas por deposição química a vapor (CVD) ou deposição física a vapor (PVD). Entre os revestimentos mais utilizados, destacam-se: o óxido de alumínio (Al_2O_3), o carboneto de titânio (TiC), o carbonitreto de titânio (TiCN), o nitreto de titânio alumínio (TiAlN) e o nitreto de titânio (TiN). As diferenças entre as propriedades destes revestimentos são ilustradas na Figura 11.

Figura 11 - Relação entre as propriedades de alguns revestimentos.



Fonte: Lima (2016)

É importante salientar ainda que, de acordo com Diniz et. al (2010), geralmente o revestimento nitreto de titânio (TiN) é usado como único revestimento ou, em caso de múltiplas camadas, o primeiro deles, ou seja, que está em contato com a superfície do substrato da ferramenta, por conta da afinidade química entre ambos.

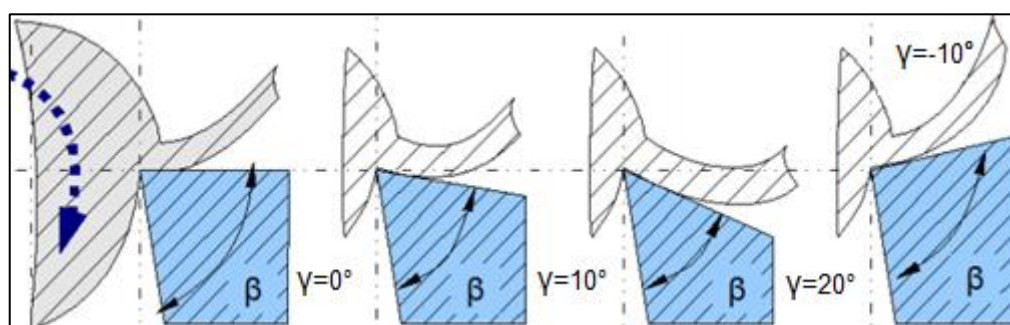
2.3.1 Geometrias das Ferramentas de Corte

Outros fatores que têm grande influência no mecanismo de formação de cavaco e, conseqüentemente, na qualidade do produto usinado estão relacionados às geometrias das ferramentas, entre eles: ângulo de saída (γ), ângulo de folga (α), ângulo de cunha (β) e raio da aresta (r_e).

Durante a formação do cavaco, dois mecanismos ocorrem em sequência. Primeiramente, sob ação da aresta cortante, ocorre o recalque de cavaco da matéria prima. Posteriormente, ele passa a deslizar sobre a face superior da ferramenta, conhecida como superfície de saída. Esta superfície é responsável pela deformação e direcionamento do cavaco até que o mesmo sofra ruptura e seja removido do material. Frente a isto, mudanças nos ângulos de saída (γ) acarretam em grandes mudanças nos esforços de usinagem.

À medida que se aumenta o ângulo de saída, há menor deformação do cavaco e, portanto, menores esforços, menor temperatura e menor desgaste da ferramenta. Quatro geometrias de ferramenta produzindo cavaco são ilustradas na Figura 12. De acordo com Hübner (2016), ferramentas demasiadamente positivas podem quebrar devido o enfraquecimento gerado pela redução do ângulo de cunha (β), no entanto, tem-se, como vantagem, a redução das forças de corte e uma considerável melhora no acabamento superficial.

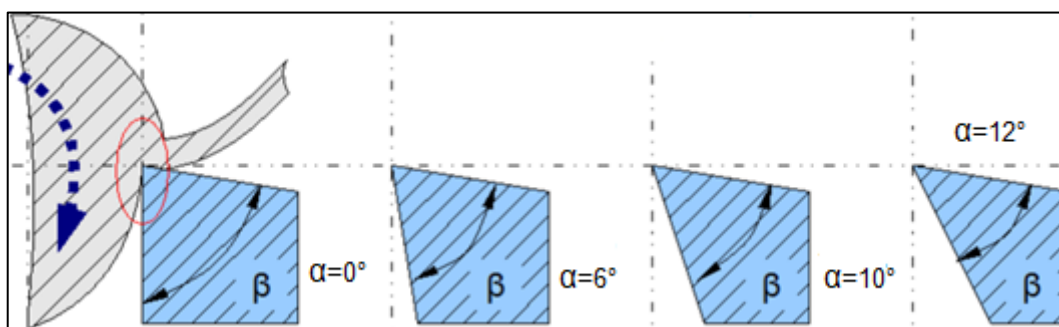
Figura 12 - Representação de alguns valores de ângulo de saída.



Fonte: Stoeterau (2020)

Diferentemente do ângulo de saída, o de folga (γ) é responsável por evitar o contato direto entre a ferramenta e a superfície usinada, conforme Figura 13. Este atrito é indesejado pois pode danificar o acabamento da superfície usinada da peça e gerar temperatura desnecessária na superfície de folga da ferramenta. Segundo Diniz et. al (2010), valores ideais de ângulo de folga devem variar entre 5° a 10°.

Figura 13 - Representação de alguns valores de ângulo de folga.

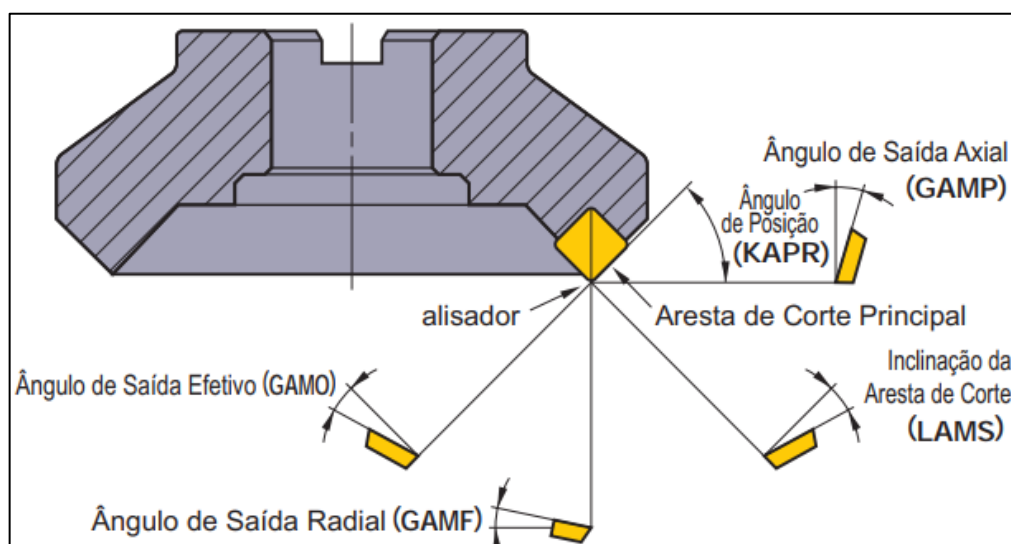


Fonte: Stoeterau (2020)

Como pode-se observar na Figura 12 e na Figura 13, o valor do ângulo de cunha (β) varia conforme os valores dos ângulos de saída e de folga. A redução excessiva deste ângulo, que teoricamente seria um ganho ao mecanismo de formação de cavaco, deve ser controlada, pois acarreta em fragilidade e altas temperaturas na aresta de corte, já que a área é reduzida e torna-se difícil a dissipação de calor.

Em operações de fresamento de faceamento com insertos intercambiáveis, as geometrias dos encostos do cabeçote fresador também devem ser levadas em consideração e relacionados com os valores das ferramentas avulsas. A Figura 14 ilustra um inserto montado no cabeçote fresador e aponta os ângulos formados.

Figura 14 - Ilustração dos ângulos gerados pela combinação dos ângulos da ferramenta avulsa com os ângulos dos assentos do cabeçote fresador.

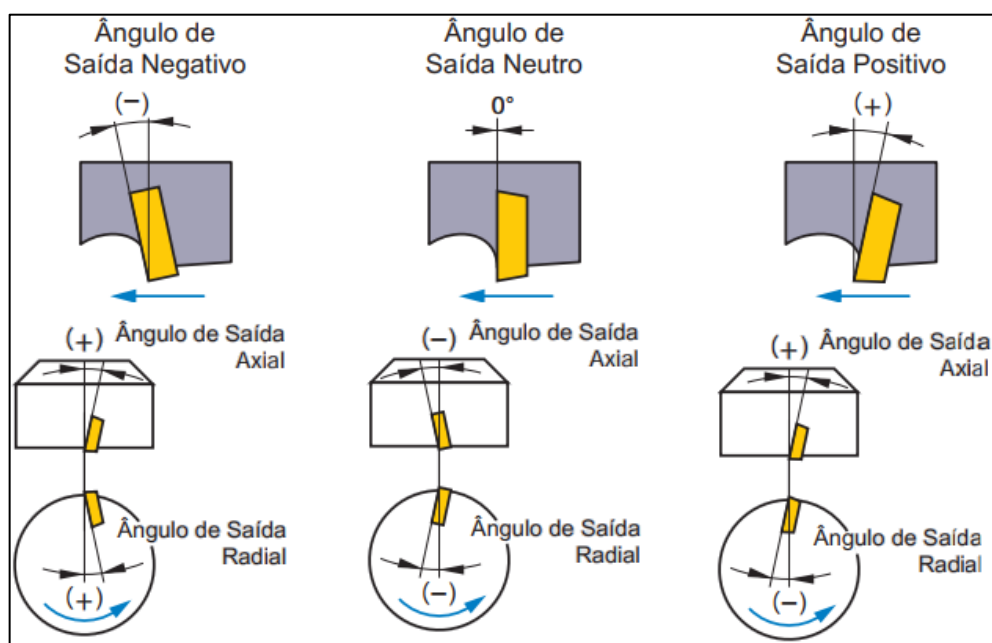


Fonte: Mitsubishi Tools (2020)

Os ângulos expostos na Figura 14 são obtidos por meio da soma ou subtração dos ângulos dos assentos do cabeçote com os ângulos da ferramenta avulsa, obtendo-se: ângulo de saída radial (γ_f) e ângulo de saída axial (γ_p). Estes dois ângulos

também podem ser classificados como neutro, positivo e negativo, conforme a Figura 15.

Figura 15 - Ilustração de diferentes ângulos de saída (positivo, negativo e neutro), axiais e radiais.

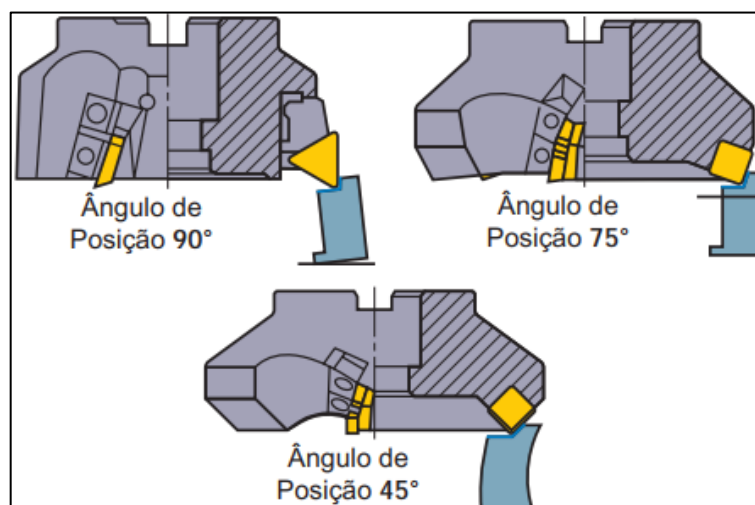


Fonte: *Mitsubishi Tools* (2020)

Cabe ressaltar que ângulos positivos tendem a favorecer o mecanismo de formação de cavaco por cisalhamento e, conseqüentemente, na redução dos esforços envolvidos no corte e na temperatura.

Outro ângulo de importância no processo é o ângulo de posição (χ_R), definido como o ângulo formado entre o plano de corte da ferramenta e o plano de trabalho, tendo significância no processo de formação de cavaco e, conseqüentemente, na qualidade da peça produzida. De acordo com Santos (2001), à medida que se aumenta o ângulo de posição, diminui-se a largura de corte e aumenta-se a espessura do cavaco; frente a isto, a força de corte é distribuída em uma área maior do cavaco, reduzindo a pressão específica de corte. Ângulos de posição recomendados estão entre 45° e 60°, principalmente por possibilitarem um melhor fluxo do cavaco e reduzir as vibrações envolvidas no corte. Três valores de ângulo de posição são ilustrados na Figura 16.

Figura 16 - Ilustração de diferentes ângulos de posição.



Fonte: Mitsubishi Tools (2020)

Outro elemento que tem grande contribuição na formação de cavaco e, principalmente, na qualidade do acabamento superficial é a geometria da aresta de corte da ferramenta. Entre as geometrias de maior presença no cenário industrial, destacam-se: as arredondadas, as chanfradas e as agudas (sem chanfro e arredondamento). De acordo com Diniz et. al (2010), ferramentas com arestas de corte com arredondamentos maiores tendem a ser mais resistentes, proporcionando cortes mais suaves com melhor acabamento superficial.

De acordo com Stephenson e Agapiou (2016), a rugosidade média, em operações de fresamento, é diretamente proporcional ao avanço por dente e inversamente ao raio de ponta da ferramenta. Sendo assim, para acabamentos mais refinados, seria conveniente utilizar ferramentas com raios de ponta maiores. No entanto, o aumento excessivo deste raio acaba diminuindo a eficiência de corte da ferramenta, em que a mesma passa a remover material por deformação e não por cisalhamento.

Stephenson e Agapiou (2016) apontam ainda que insertos de aresta de corte chanfrada levam certa vantagem em relação às demais quando o quesito é acabamento superficial, já que permite a obtenção de superfícies mais planas e trilhas de usinagem sem cristas e mais largas.

Mesmo frente a todos estes conhecimentos e avanços tecnológicos no desenvolvimento de ferramentas de corte, é natural que sofram desgaste à medida que sejam utilizadas. Na seção a seguir, será feita uma abordagem sobre os mecanismos e tipos de desgaste.

2.4 MECANISMOS E TIPOS DE DESGASTE EM FERRAMENTAS DE CORTE

De acordo com Wang et. al (2018), muitas pesquisas na área de desgaste de ferramentas em processos de usinagem têm sido realizadas e apontam, em sua maioria, que estas estão sujeitas a severos choques térmicos e mecânicos durante o processo. Os esforços causados por estes choques são gerados na aresta de corte ou em regiões próximas, afetando a sua integridade. Conseqüentemente, o comportamento do desgaste nas arestas de corte é um fator importante na formação da superfície usinada, objeto de estudo da presente pesquisa.

Segundo Diniz et. al (2010), o desgaste pode ser caracterizado como a perda gradativa de material da ferramenta e/ou acompanhada de mudança no perfil da sua aresta de corte. Como consequência disto, a remoção de material é cada vez mais ineficaz, podendo acarretar em uma piora no acabamento superficial e uma dificuldade em se obter tolerâncias ajustadas.

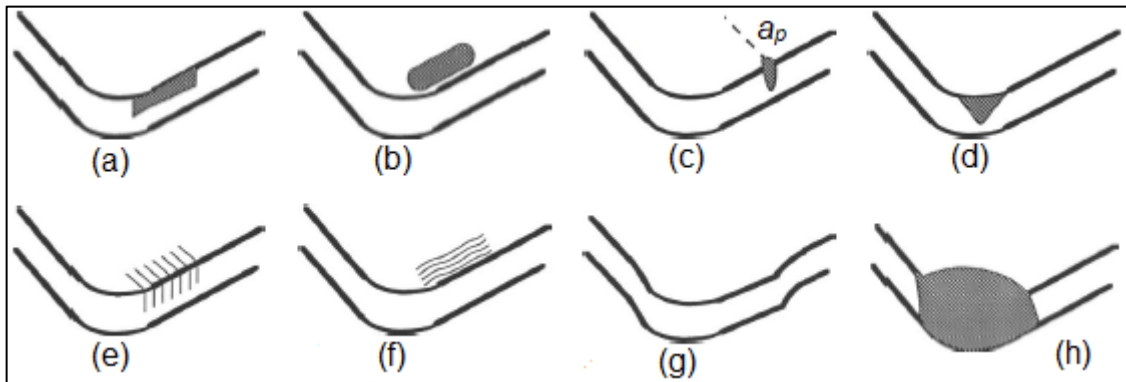
Segundo Stephenson e Agapiou (2016), alguns mecanismos físicos proporcionam o desenvolvimento dos desgastes e merecem destaque:

- **Abrasão:** ocorre quando partículas endurecidas do cavaco ou da peça entram em contato e removem material da ferramenta. É incentivado por excesso de temperaturas, a altas velocidades de corte, que diminuem a dureza da ferramenta. Ocorre principalmente na superfície de folga e é a principal causa do desgaste de flanco e de entalhe;
- **Adesão:** ocorre quando pequenas partículas da ferramenta aderem e se soldam no cavaco devido à fricção e, por fim, são removidos da superfície da ferramenta. É comum na usinagem de materiais mais dúcteis a baixas velocidades de corte e baixas temperaturas;
- **Difusão:** um constituinte da ferramenta de corte difunde ou forma uma solução sólida com o material usinado e/ou o cavaco. A taxa de difusão depende da afinidade química entre o material da ferramenta e o material da peça, do tempo de contato e da temperatura do processo. Ocorre principalmente na superfície de saída e é a principal causa do desgaste de cratera;

- Oxidação: ocorre quando elementos da ferramenta reagem com o ar ou o fluido de corte (a base de água), na região da aresta de corte. É incentivada por altas velocidades de corte e altas temperaturas.

Os principais tipos de desgaste são ilustrados na Figura 17:

Figura 17 - Principais tipos de desgaste em ferramentas de corte.



Fonte: Stephenson e Agapiou (2016)

O desgaste de flanco V_B (Figura 17 (a)) é caracterizado pela perda gradual de material na superfície de folga, em decorrência do contato entre peça e ferramenta. Na banda de desgaste, pode-se realizar duas medições principais: desgaste de flanco máximo ($V_{B,máx}$), definido como a maior altura de desgaste; e desgaste de flanco médio ($V_{B,a}$), definido como a média aritmética de alguns valores de desgaste na extensão da banda.

O desgaste de cratera (Figura 17 (b)) consiste na perda gradual de material da superfície de saída da ferramenta devido a colisão dos cavacos, em altas temperaturas, com essa região. Ao passo que no desgaste de flanco e cratera as perdas de material são microscópicas, no desgaste por lascamento (Figura 17 (d)) há perda maior de material de maneira repentina na aresta de corte da ferramenta.

O desgaste por entalhe, com ocorrência frequente em ferramentas de corte e representado pela Figura 17 (c), é representado pela perda gradual de material em um ponto coincidente ao valor da profundidade de corte (a_p). Esta perda ocorre tanto na superfície de folga quanto na de saída.

A Figura 17 (e) e a Figura 17 (f) ilustram, respectivamente: trincas de origem térmica, perpendiculares a aresta, provenientes de altos gradientes de temperatura no processo e; trincas mecânicas, paralelas a aresta, provenientes de variações dos esforços mecânicos.

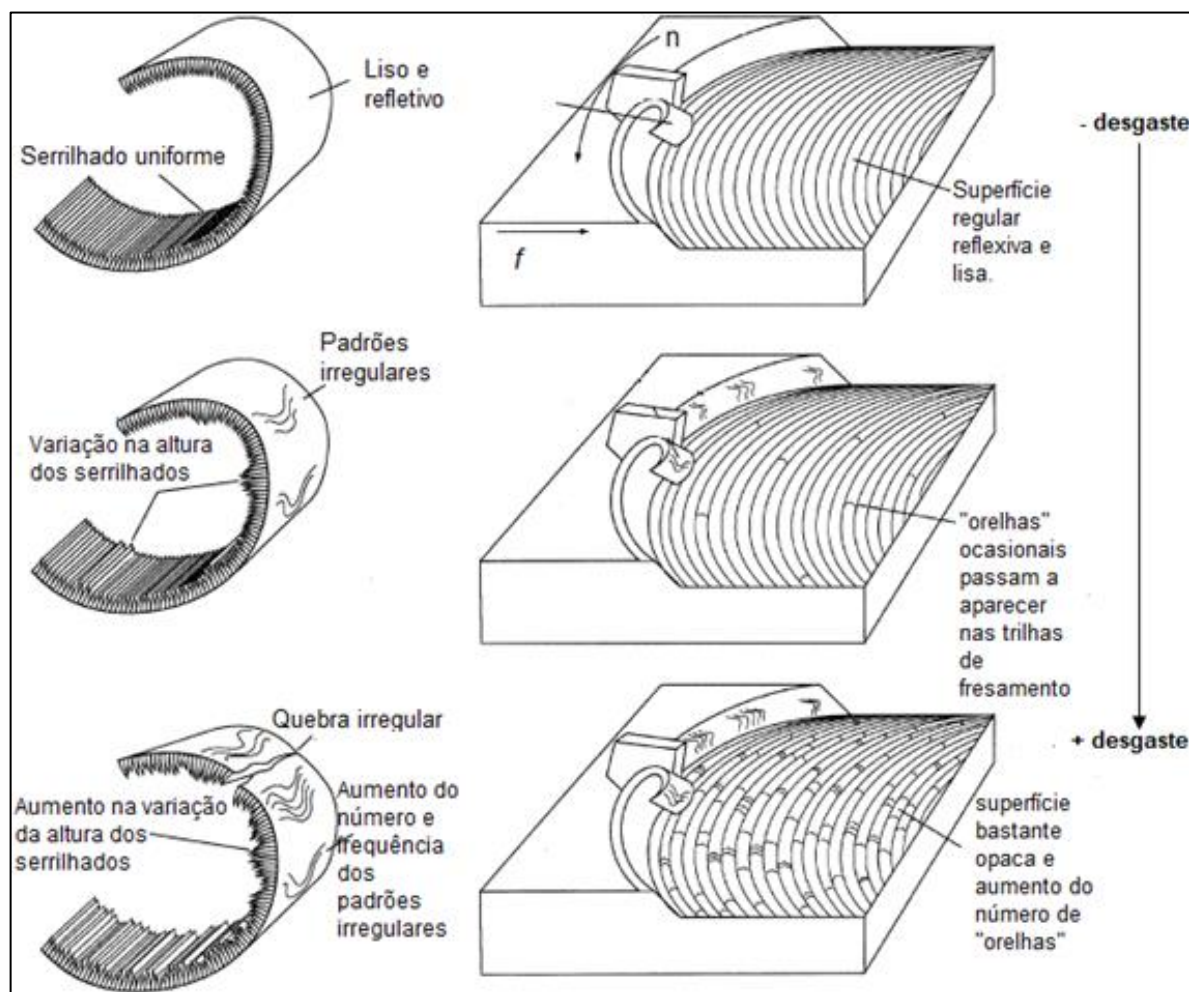
As ferramentas podem ainda sofrer grandes deformações plásticas na aresta de corte e em regiões adjacentes (Figura 17 (g)) por conta de elevadas pressões aliadas a altas temperaturas. Além do mais, o crescimento excessivo de qualquer um dos tipos de desgaste pode ocasionar a quebra da ferramenta (Figura 17 (h)), caracterizada pela perda catastrófica da sua aresta de corte e de regiões adjacentes.

Outro tipo de desgaste é caracterizado não pela perda de material da aresta da ferramenta, mas sim pelo acúmulo de material proveniente, principalmente, do cavaco. Este desgaste, denominado de adesão, consiste na soldagem, por alta pressão e temperatura, de volumes de materiais provenientes do cavaco nas superfícies de saída e de folga da ferramenta de corte. Estas porções de material aderido geram volumes adicionais a aresta de corte que, como consequência, influenciarão na geração da superfície da peça produzida através da produção de vales mais profundos e picos com cristas largas e deformadas.

Imagina-se então que uma ferramenta que sofreu desgaste e, conseqüentemente, sofreu alterações no perfil da aresta de corte, passa a imprimir esta região irregular na superfície do material usinado, acarretando em uma redução na qualidade da peça, principalmente no que tange o acabamento superficial.

Por fim, conclui-se que o conjunto de alguns tipos de desgaste ou a presença de um tipo por si só acarreta alterações significativas na aresta de corte da ferramenta e, conseqüentemente, na sua capacidade de corte. Trent e Wright (2000) ilustram, através da Figura 18, a piora no acabamento superficial e a maior dificuldade em remover cavaco em processos de fresamento, à medida que a ferramenta sofre desgaste.

Figura 18 - Efeitos do desgaste na superfície usinada e nas superfícies do cavaco removido.



Fonte: Trent e Wright (2000)

Como pode ser observado na Figura 18, os efeitos da evolução do desgaste podem ser analisados sob dois aspectos: da morfologia do cavaco e da impressão na superfície usinada. Quando se observa o cavaco, nota-se que, quando a ferramenta está em ótimas condições, os serrilhados são uniformes e a sua superfície posterior é lisa e refletiva; no entanto, a medida que a ferramenta sofre desgaste, a altura dos serrilhados fica cada vez mais variada e a superfície posterior passa a apresentar fissuras e padrões irregulares.

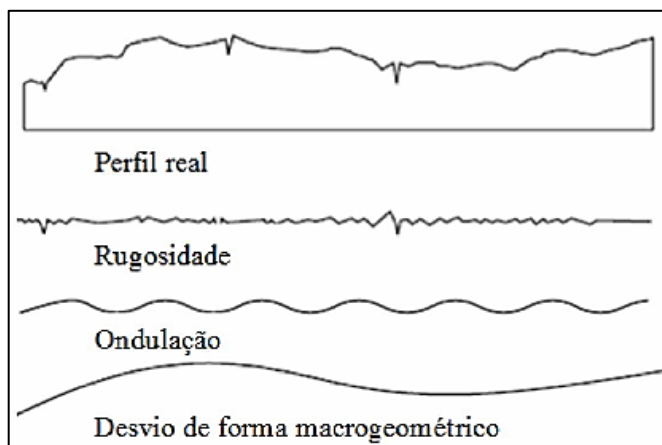
Quanto a superfície usinada, nota-se que, em perfeito estado, as ferramentas geram superfícies regulares e reflexivas; no entanto, à medida que o desgaste ocorre, as superfícies passam a ficar mais opacas e aumenta-se a frequência do aparecimento de “orelhas” entre as trilhas de usinagem.

2.5 RUGOSIDADE

Um processo de fabricação tem como objetivo principal produzir peças intercambiáveis com a melhor relação entre funcionalidade e custo. Porém, nenhum processo é perfeito e quando as superfícies das peças são analisadas com recursos adequados, elas apresentam irregularidades (OLIVEIRA, 2004).

Segundo Neto (2017), as irregularidades macrogeométricas incluem, entre outras, divergências de ondulações e desvios de circularidade e planeza, podendo ser verificados por instrumentos convencionais de medição, tais como relógio apalpador e relógio comparador. Já os desvios microgeométricos são os desvios no perfil da topografia do material (rugosidade), que varia por regiões de vale e de pico, e são verificados com equipamentos específicos, tais como o rugosímetro e o perfilômetro óptico. Tais irregularidades podem ser observadas na Figura 19.

Figura 19 - Textura de uma superfície.



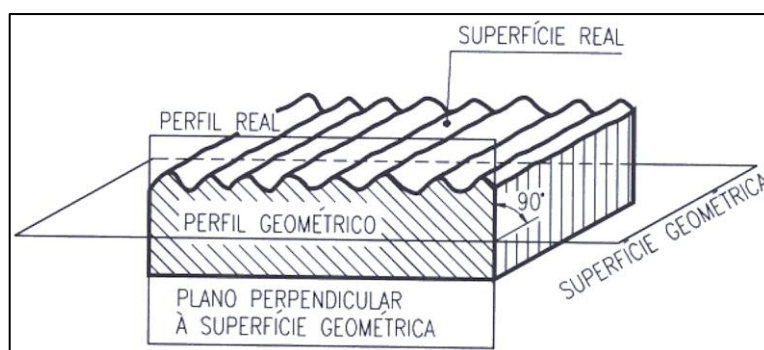
Fonte: Neto (2017)

Em uma peça mecânica, a medição dos valores de rugosidade de uma superfície permite avaliar a qualidade do acabamento superficial, sendo um acabamento melhor e mais refinado para menores valores de rugosidade, e vice-versa. Segundo Alves (2011), a qualidade do acabamento superficial desempenha um papel importante no funcionamento de partes mecânicas, influenciando na qualidade de deslizamento, na resistência ao desgaste, na possibilidade de ajuste forçado, na resistência à corrosão e à fadiga, na resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluídos e lubrificantes, na vedação e na aparência.

2.5.1 Perfil Geométrico

O conceito de perfil geométrico é utilizado para definir a rugosidade. Tal perfil consiste na interseção da superfície geométrica com um plano perpendicular, conforme a Figura 20.

Figura 20 - Perfil geométrico de uma superfície.



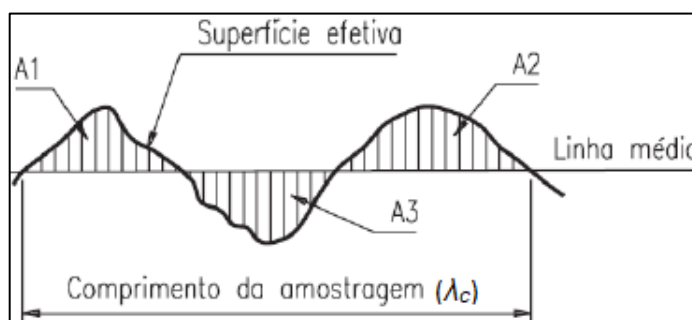
Fonte: Alves (2011)

O perfil real, exposto na Figura 20, é definido como a interseção da superfície real com um plano perpendicular, resultando em uma linha irregular representada por regiões de pico e de vale, ondulações e desvios macrogeométricos. Já a superfície efetiva é aquela representativa da real, geralmente obtida por meio de um rugosímetro ou um perfilômetro; é a efetiva que permite a análise e inspeção do perfil de rugosidade.

2.5.2 Sistema M

O sistema M é o responsável por fazer considerações a respeito da linha média de um perfil. A linha média, representada na Figura 21, é paralela à direção geral do perfil, no comprimento de amostragem, e é a referência para a medição da maioria dos parâmetros de rugosidade.

Figura 21 - Representação da linha média.



Fonte: Agostinho et. al (1977)

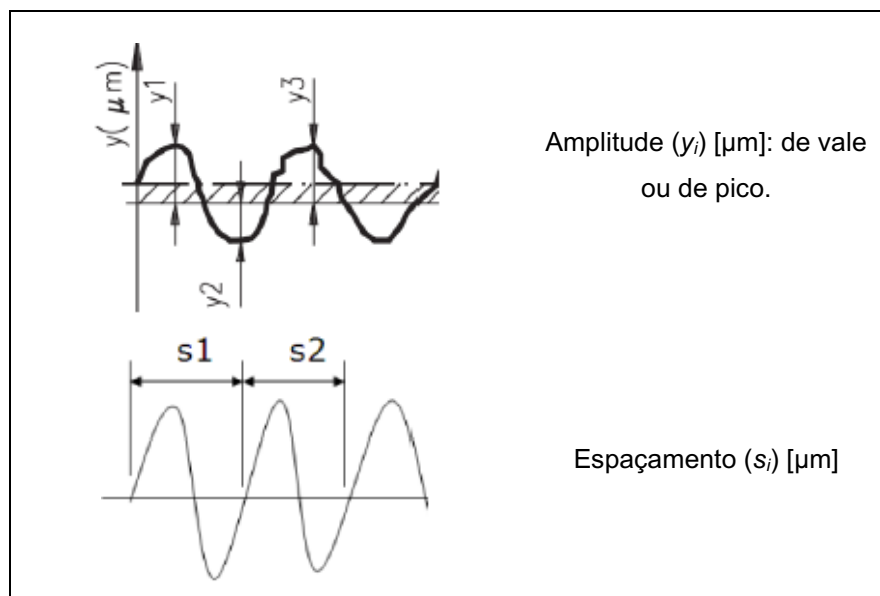
Para a determinação desta linha deve-se adotar que a somatória das áreas dos picos, acima da linha, deve ser igual a somatória das áreas dos vales, abaixo da linha. Para o caso particular da Figura 21:

$$A1 + A2 = A3 \quad (4)$$

onde $A1$ é a área do pico 1, $A2$ do pico 2 e $A3$ a área do vale 3.

Faz-se importante ainda o conhecimento de algumas grandezas, tais como: amplitude e espaçamento, conforme Figura 22.

Figura 22 - Representação da amplitude e do espaçamento em perfis de rugosidade.



Fonte: Agostinho et. al (1977)

Os valores de amplitude (y_i) são medidos na direção do eixo das ordenadas e representam as alturas dos picos (valores positivos) e as profundidades dos vales (valores negativos). Já os valores de espaçamento (s_i), medidos na direção do eixo das abscissas, é representado como o comprimento entre o início de um pico e o final de um vale subsequente.

2.5.3 Comprimentos da Amostragem

O comprimento de amostragem (λ_c), ou *cut-off*, é definido, segundo a Norma ABNT ISO 4287 (2002), como o comprimento, na direção do eixo das abscissas, usado para identificar as irregularidades características do perfil avaliado. Já o comprimento de avaliação (l_m) é definido como o comprimento, na direção do eixo das abscissas, usado para estabelecer o perfil avaliado e pode conter um ou mais comprimentos de amostragem. De acordo com a norma ABNT ISO 4288 (2008), um

comprimento de avaliação recomendado deve equivaler a cinco vezes o valor do *cut-off*. Esta consideração pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1 - Comprimentos de amostragem e avaliação recomendados para cada faixa de rugosidade média.

Rugosidade média R_a (μm)	Comprimento de amostragem λ_c (mm)	Comprimento de avaliação l_m (mm)
$0,006 < R_a \leq 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < R_a \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < R_a \leq 2$	0,8	4
$2 < R_a \leq 10$	2,5	12,5
$10 < R_a \leq 80$	8	40

Fonte: ISO 4288 (2008)

2.5.4 Parâmetros de Rugosidade de Amplitude

Os parâmetros de amplitudes são, segundo Gadelmawla et. at (2002), os parâmetros mais importantes para caracterizar a topografia da superfície.

2.5.4.1 Desvio aritmético médio ou rugosidade média (R_a)

É um parâmetro de rugosidade amplamente utilizado para controle de qualidade do acabamento superficial de peças. É definida como o desvio médio das irregularidades de rugosidade em relação a uma linha média para determinados comprimentos amostrais. Conforme ISO 4287 (1997), a expressão matemática para cálculo da rugosidade média é dada por:

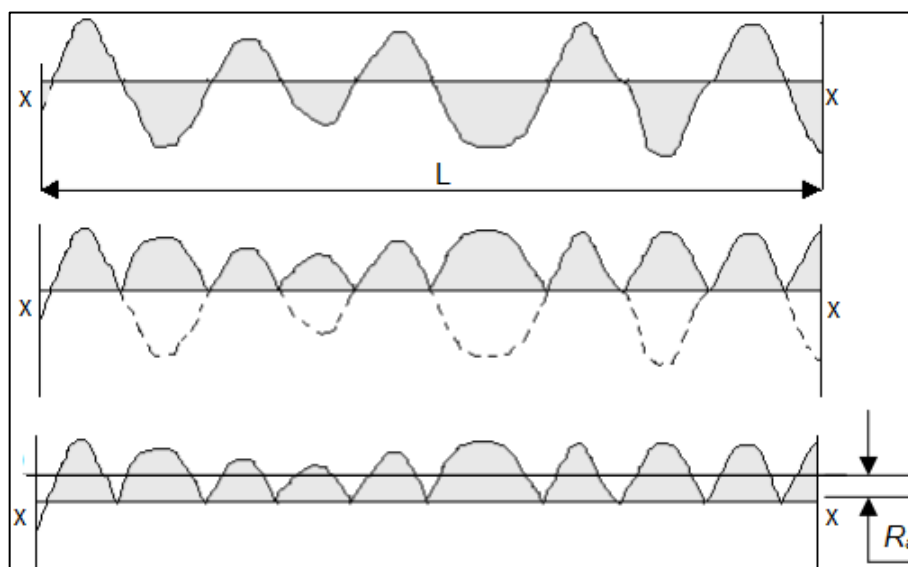
$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad (5)$$

Segundo Taylor Hobson (1990), o método de medição da rugosidade média segue as seguintes etapas:

- Geração de uma linha média (x-x), definida no perfil de rugosidade gerado;
- Todas as porções que representam vales são espelhadas, em relação a linha média, passando a representar picos;
- Medição de uma altura média do perfil a partir da linha média x-x.

Esta explanação pode ser observada na Figura 23.

Figura 23 - Exemplo da metodologia utilizada para a medição da rugosidade média.

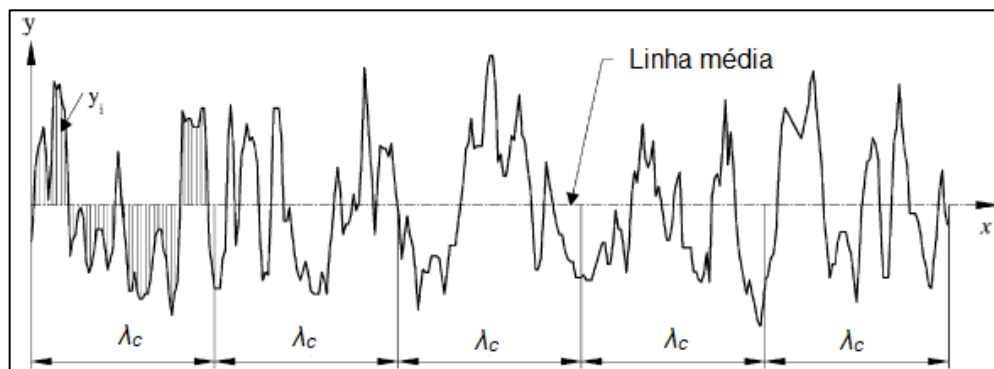


Fonte: Freitas (2006)

Segundo Whitehouse (1994), o parâmetro de rugosidade média, embora severamente limitado em termo de informações fornecidas sobre a superfície, é o parâmetro de rugosidade amplamente utilizado no cenário industrial. Além do mais, com a busca pelo melhor entendimento do comportamento da geração de superfícies, tem-se estabelecidos vários outros parâmetros que permitem avaliar uma superfície.

Uma outra abordagem para cálculo da rugosidade média pode ser observada em Gadelmawla et. at (2002), conforme a Figura 24. O desvio médio de rugosidade (R_a) é calculado por uma média aritmética dos módulos dos valores obtidos de y_i . Onde y_i representa o valor das amplitudes, no eixo das ordenadas, do perfil em relação a linha média.

Figura 24 - Representação esquemática de R_a em determinados comprimentos de amostras.



Fonte: Gadelmawla et. at (2002)

De acordo com Machado (2009), o parâmetro de rugosidade R_a , avaliado isoladamente, não é suficiente para identificar algumas características importantes de uma superfície, pois superfícies geometricamente distintas podem apresentar o mesmo valor de R_a .

2.5.4.2 Desvio médio quadrático do perfil (R_q)

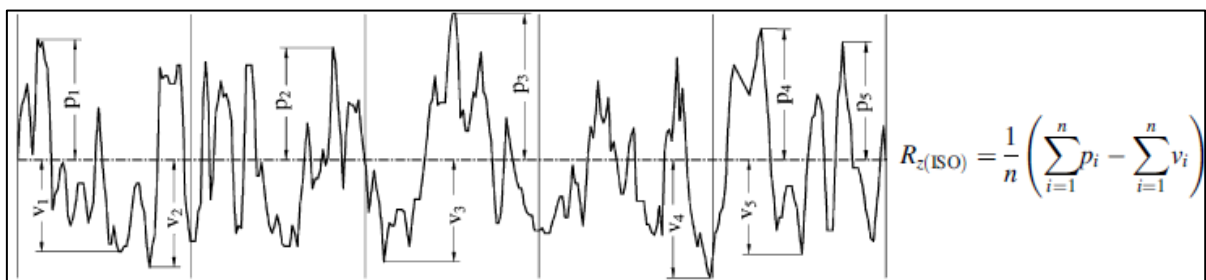
Também conhecido como RMS, este parâmetro tem como objetivo, segundo Machado (2009), ampliar os valores dos picos e vales isolados ou esporádicos, podendo evidenciar marcas ou defeitos em superfícies de acabamento fino. Segundo Whitehouse (1994), é um parâmetro de natureza estatística e difícil de medir a partir de um perfil. No entanto, é representado, matematicamente, como a raiz quadrada da média dos quadrados dos valores de amplitude (y_i):

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (6)$$

2.5.4.3 Altura máxima do perfil (R_z)

É definida como a média das diferenças de altura entre os cinco picos mais altos com os cinco vales mais baixos, em determinado comprimento de avaliação. A representação deste parâmetro assim como o equacionamento matemático para calculá-lo estão dispostos na Figura 25.

Figura 25 - Representação esquemática de R_z para determinado comprimento de avaliação e seu equacionamento.



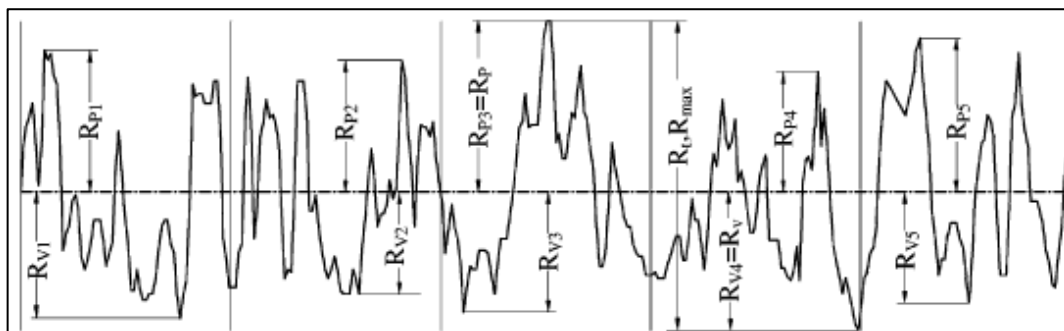
Fonte: Gadelmawla et. at (2002)

2.5.4.4 Altura máxima de pico (R_p), profundidade máxima de vale (R_v) e altura total do perfil (R_t)

Enquanto R_p corresponde à maior altura de pico em relação a linha média, ao longo do comprimento de avaliação, R_v representa maior profundidade de vale em

relação a linha média, ao longo do mesmo comprimento. Já R_t (ou R_{max}) é definido como a distância, medida no eixo das ordenadas, entre o vale mais profundo e o pico mais alto. Estes parâmetros estão dispostos na Figura 26.

Figura 26 - Representação esquemática dos parâmetros de rugosidade R_p , R_v e R_t .



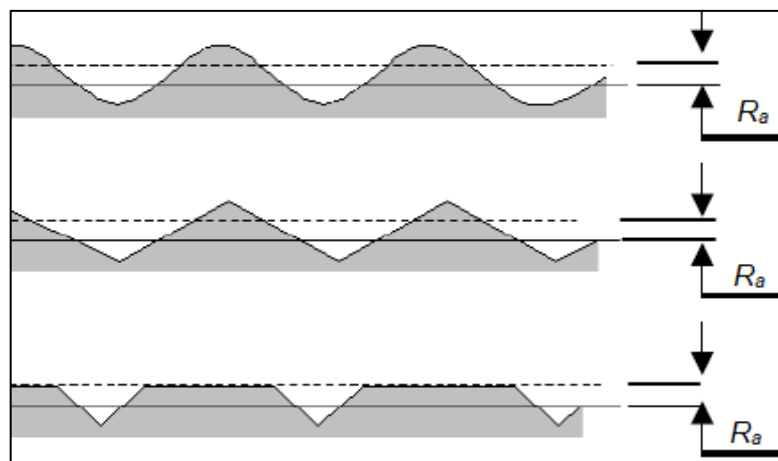
Fonte: Gadelmawla et. at (2002)

Tomando como exemplo o perfil exposto na Figura 26, conclui-se que a altura máxima de pico é representada por R_{p3} e a profundidade máxima de vale por R_{v4} . Além disso, nota-se que a altura total do perfil é gerada pela soma dos módulos de R_{p3} e R_{v4} .

2.5.4.5 Fator de assimetria - *skewness* (R_{sk})

É o fator que avalia o formato (ou a deformação) das irregularidades no perfil de rugosidade em relação a linha média, para determinado comprimento avaliado. Este parâmetro pode ser utilizado para fazer distinções, qualitativas e quantitativas, entre dois ou mais perfis que possuem os mesmos valores de R_a e/ou R_q , mas superfícies geométricas distintas, como em casos exposto na Figura 27.

Figura 27 - Superfícies com os mesmos valores de R_a em diferentes perfis.

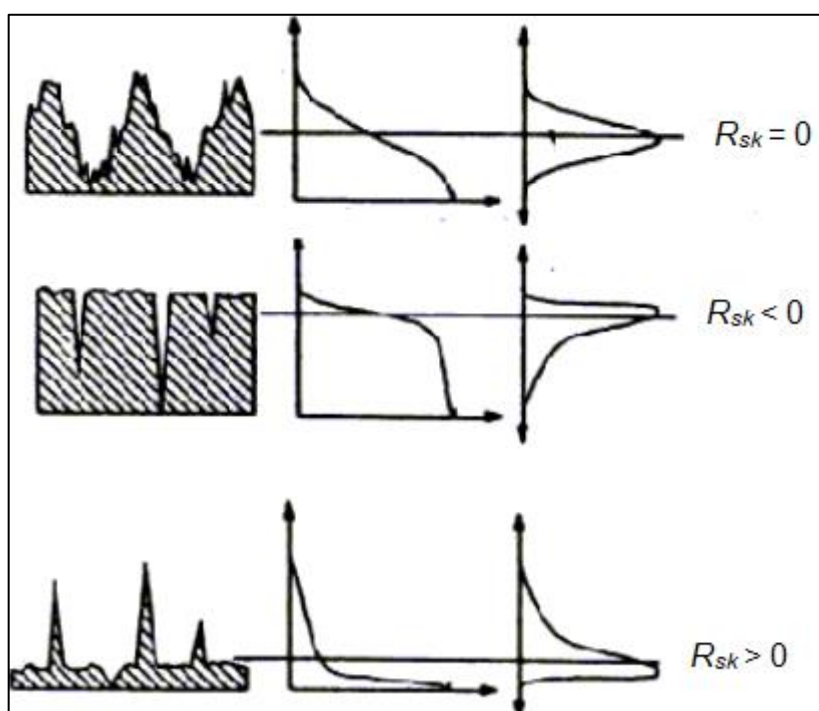


Fonte: Autoria própria

Ao se observar a Figura 27, nota-se que para mesmos valores de R_a , tem-se perfis de rugosidade distintos. O fator de assimetria (ou *skewness*) é um parâmetro que pode auxiliar na diferenciação destes perfis, visto que avalia o formato do perfil que, neste caso, são nitidamente distintos.

Segundo Gadelmawla et. al (2002), superfícies com distribuição uniforme de amplitude resultam em um valor de $R_{sk}=0$ igual a zero, apresentando um número de picos aproximadamente igual ao número de vales para determinado comprimento avaliado; perfis com picos removidos resultam em valores negativos de R_{sk} (< 0) e; perfis com picos altos em valores positivos de R_{sk} (> 0). Este conceito pode ser observado na Figura 28.

Figura 28 - Representação dos fatores de assimetria e curvas de distribuição de amplitude.



Fonte: Freitas (2006)

Em termos práticos, se o fator de assimetria apresentar valor igual a zero, representa uma superfície em que picos e vales estão bem caracterizados e distribuídos, conforme a Figura 28. À medida que o valor de *skewness* passa a ser negativo, nota-se uma predominância dos vales e picos removidos. Em contrapartida, quando estes valores tendem a ser positivos, observa-se a predominância de picos extremamente altos.

Assim como o fator de achatamento, que será comentado a seguir, o fator de assimetria é um parâmetro adimensional e é muito utilizado para se obter uma melhor

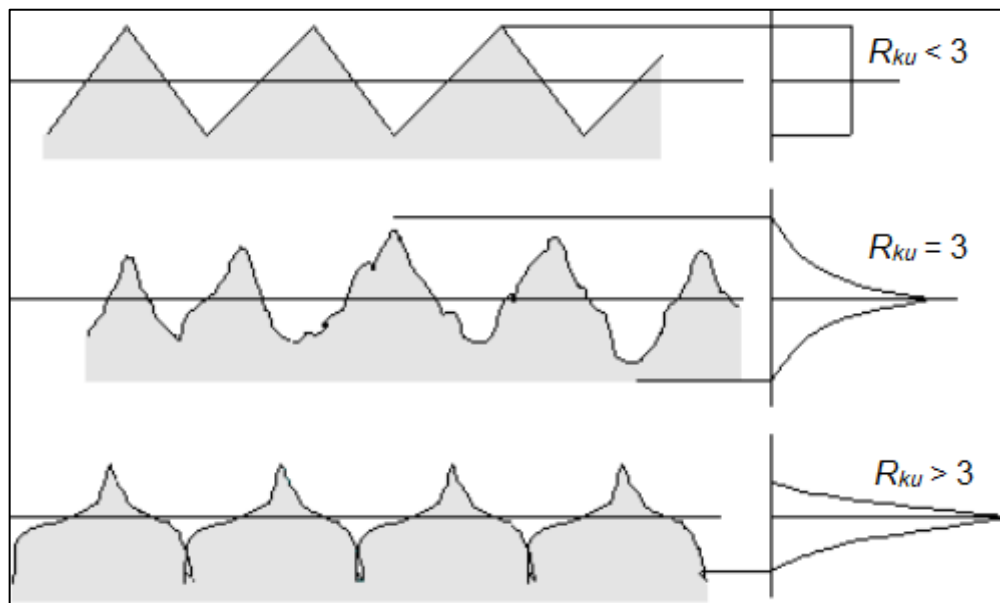
caracterização das superfícies, principalmente aquelas que possuem valores de rugosidade média iguais.

2.5.4.6 Fator de achatamento ou Curtose - Kurtosis (R_{ku})

A curtose é mais um parâmetro avaliativo do formato do perfil da superfície. Este parâmetro avalia a forma da curva de distribuição das amplitudes, ou seja, se são mais pontiagudas ou mais achatadas. O parâmetro R_{ku} também pode ser utilizado para distinguir superfícies que possuem os mesmos valores de R_a e/ou R_q .

Segundo Gadelmawla et. al (2002), se $R_{ku} < 3$ o perfil apresenta picos e vales mais largos, resultando em um perfil mais achatado e; se $R_{ku} > 3$ o perfil é mais pontiagudo, representado por picos mais altos e estreitos, conforme a Figura 29.

Figura 29 - Representação do parâmetro de rugosidade R_{ku} .



Fonte: Freitas (2006)

Em termos práticos, uma superfície com fator de achatamento (ou curtose) maior que 3, representa uma superfície mais pontiaguda e mais suscetível ao desgaste quando comparada a uma superfície com valor de R_{ku} menor que 3. (FREITAS, 2006).

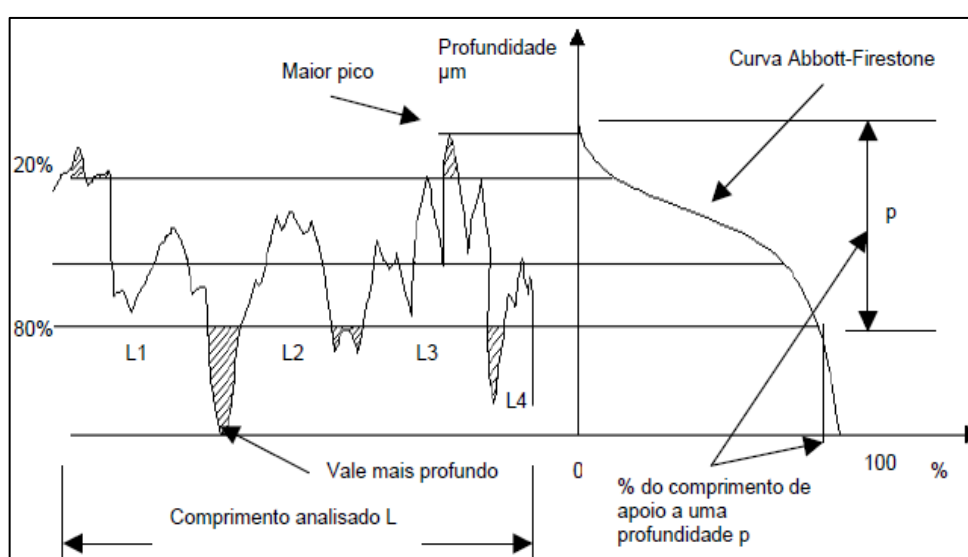
É importante salientar que superfícies com acabamento mais refinado têm valores de curtose próximos de três ($R_{ku} \approx 3$). Segundo Machado (2009), uma superfície retificada se enquadra neste caso.

2.5.5 Curva Abbott-Firestone

Abbott e Firestone, na década de 30, desenvolveram uma maneira de representar todas as propriedades de amplitude de uma superfície através da curva Abbott-Firestone, inicialmente denominada como curva da razão de apoio (*bearing ratio curve*).

Segundo a ISO 4287 (2002), esta curva é gerada através do fracionamento de uma superfície que se estendem deste o pico mais alto até o vale mais profundo, conforme a Figura 30.

Figura 30 - Curva Abbott-Firestone.



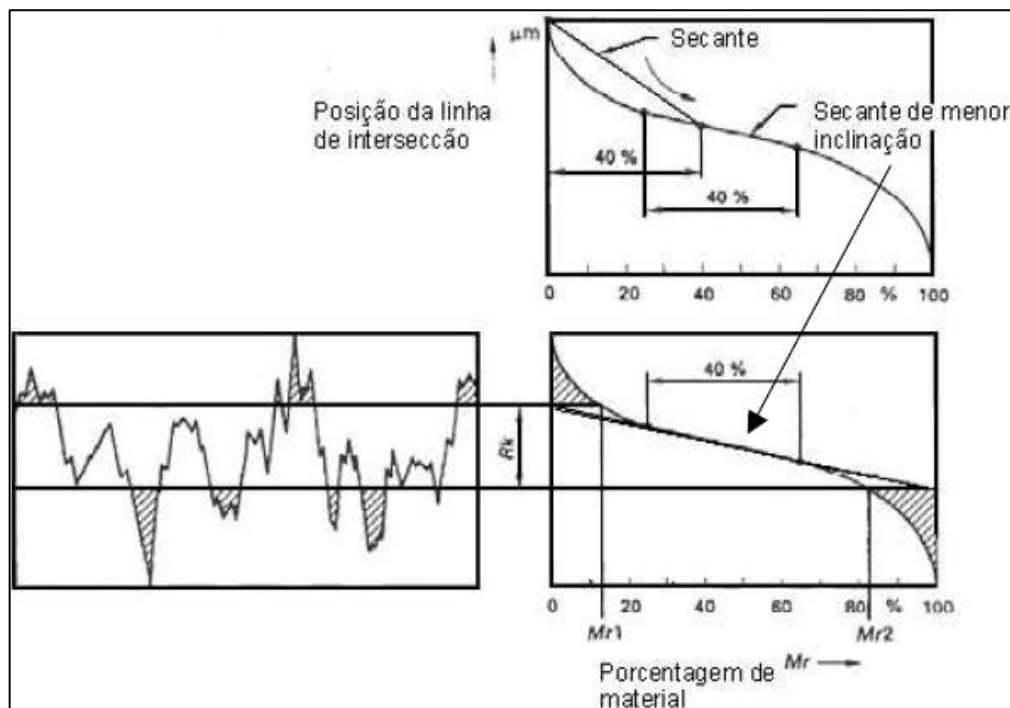
Fonte: Thomas (1999)

A partir desta curva, alguns parâmetros, normalizados pelas normas ISO 4287:2002, podem ser estipulados e têm importância para o estudo do perfil de superfícies: R_k - profundidade da rugosidade do núcleo do perfil, R_{vk} - profundidade reduzida dos vales e R_{pk} - altura reduzida dos picos. Estes parâmetros são utilizados para avaliar, em processos de manufatura, superfícies de componentes mecânicos altamente solicitados. A norma ISO 13565-2 (1996) estipulou estes parâmetros pois, segundo a ASME B46.1 (1996), o parâmetro de rugosidade tradicional R_a não fornece uma relação estreita entre a rugosidade da superfície e o desempenho de componentes mecânicos tais como mancais, cilindros de motores, pistões e anéis de vedação.

2.5.5.1 Parâmetros R_k , R_{pk} e R_{vk}

O parâmetro de rugosidade R_k , profundidade da rugosidade do núcleo, mede a altura da porção do material do núcleo da superfície. Graficamente, é representado pela interseção entre a reta secante à curva de menor inclinação com os eixos da curva *Abbott-Firestone*, conforme a Figura 31.

Figura 31 - Determinação do parâmetro R_k .

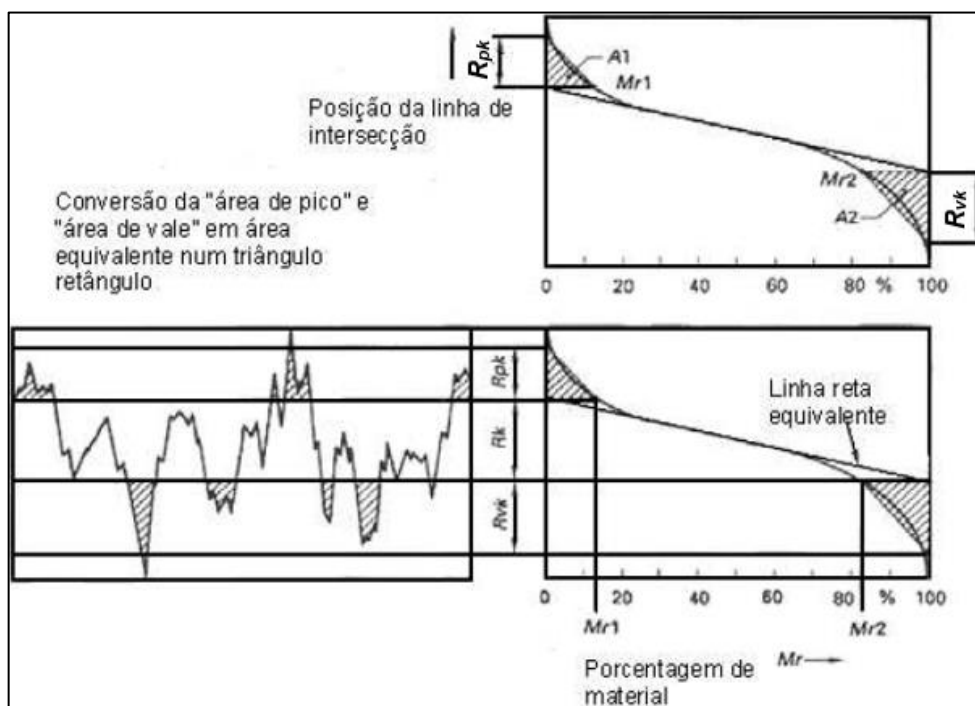


Fonte: ISO 13565-2 (1996)

Quanto a empregabilidade, um valor reduzido de R_k resulta em uma peça mecânica cuja superfície tem maior resistência ao desgaste. (FREITAS, 2006)

Enquanto o parâmetro R_{pk} representa a altura da porção dos picos protuberantes acima da rugosidade central, o R_{vk} indica a porção dos vales do perfil que se estendem no material abaixo do perfil do núcleo, conforme a Figura 32.

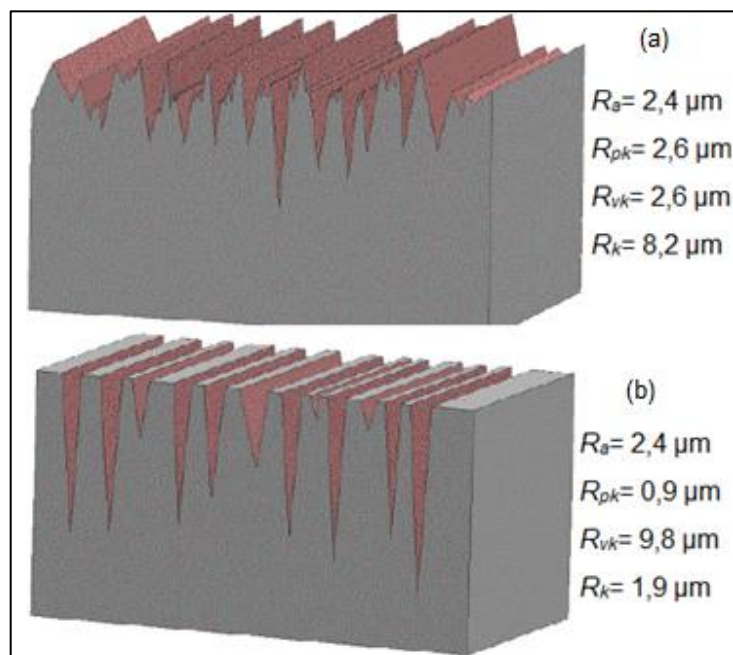
Figura 32 - Determinação dos parâmetros R_{pk} e R_{vk} e dos limites Mr_1 e Mr_2 .



Fonte: ISO 13565-2 (1996).

Frente a isto, estes parâmetros servem como base para diferenciar superfícies com os mesmos valores de R_a , como pode ser observado na Figura 33.

Figura 33 - Comparação dos valores de R_k , R_{vk} e R_{pk} para diferentes perfis com os mesmos valores de R_a .



Fonte: Thomas (1999)

É exposto, na imagem da Figura 33, duas superfícies com valores iguais de rugosidade média, porém nota-se que são perfis de rugosidade com geometrias bem

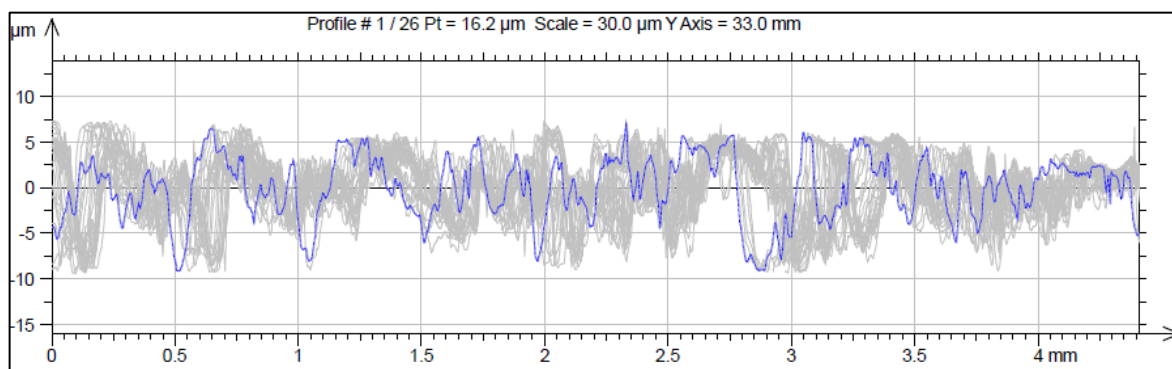
distintas. Na Figura 33 (a), o perfil apresenta uma boa distribuição entre picos e vales, inclusive os valores de R_{vk} e R_{pk} são iguais. Em contrapartida, o perfil exposto na Figura 33 (b) apresenta a predominância de vales profundos e, inclusive, o valor de R_{vk} é muito maior que o de R_{pk} . Em relação a profundidade da rugosidade do núcleo (R_k), nota-se o perfil da Figura 33 (b) apresenta um valor menor e, por isso, deve possuir uma resistência maior ao desgaste abrasivo. Por fim, nota-se que perfis com valores de R_a iguais podem representar superfícies extremamente diferentes e, portanto, revela-se a importância dos parâmetros de rugosidades extraídos da curva *Abbott-Firestone* para caracterizar numericamente estas diferenças.

É importante salientar que, enquanto os parâmetros R_p/S_p e R_v/S_v avaliam as amplitudes como um todo dos perfis, os parâmetros R_{pk} e R_{vk} avaliam apenas os picos sobressalentes e os vales profundos, ou seja, que extrapolam a rugosidade do núcleo (R_k).

2.5.6 Parâmetros de Rugosidade em Área

Nas seções anteriores foram apresentados alguns parâmetros de rugosidade. Estes parâmetros podem avaliar uma linha do perfil ou uma área de amostragem. Quando são nominados com o prefixo R (Figura 34), representam os parâmetros de rugosidade que avaliam apenas uma linha dentro de uma superfície. Em contrapartida, quando nominados com o prefixo S (Figura 35), representam uma área de amostragem dentro da superfície analisada. Os parâmetros de prefixos S , dentro da usinagem, representam uma superfície gerada pela aresta de corte como um todo e, portanto, podem ser mais representativos que os parâmetros R .

Figura 34 - Exemplo de um perfil de rugosidade (linha azul), que provém da média de 50 leituras (linhas cinzas).

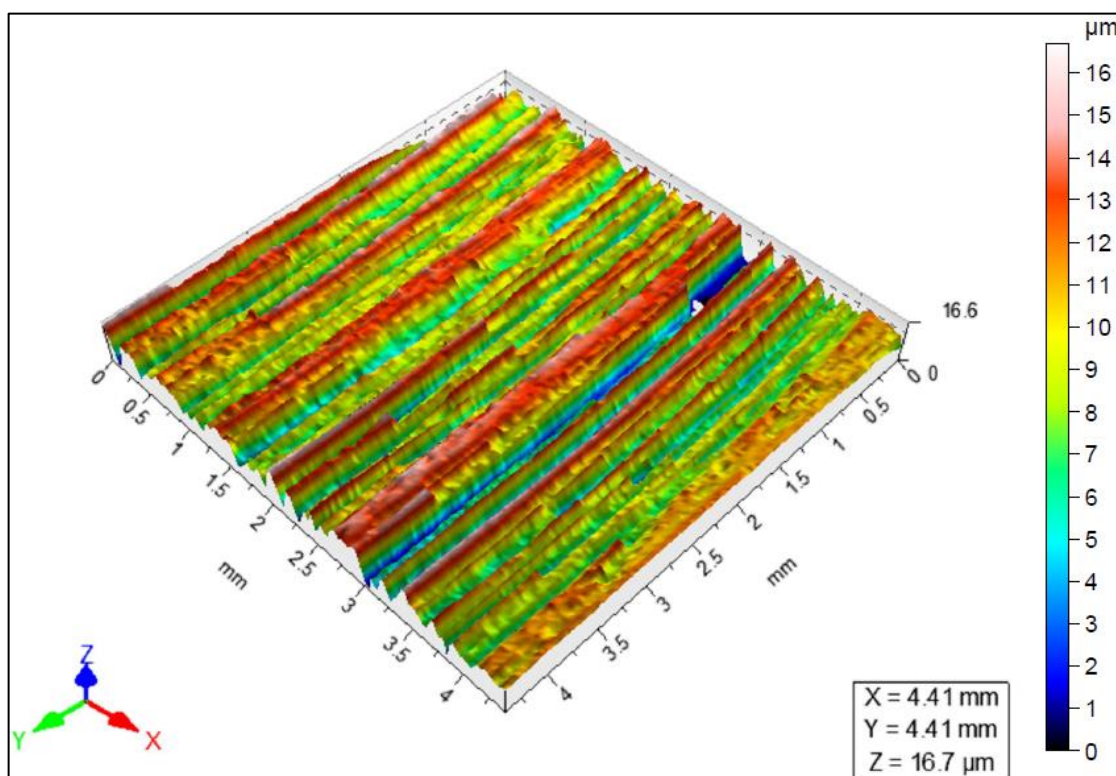


Fonte: Autoria própria

O perfil exposto na Figura 34 representa um exemplo de obtenção dos perfis de prefixo *R*, avaliados em uma linha da superfície. Com o intuito de aumentar a confiabilidade destes parâmetros, geralmente faz-se a leitura de mais de uma linha (linhas de cor cinza) para se obter uma linha média (de cor azul) que representa a média dos parâmetros de prefixo *R*.

Já uma avaliação em área, para obtenção dos valores de rugosidade de prefixo *S*, consiste em uma leitura da topografia, em uma área pré-determinada, da superfície da amostra. A Figura 35 ilustra o resultado da caracterização, por perfilometria óptica, realizada em uma superfície de um material usinado. Como pode-se observar na Figura 35, a área (de 20,25 mm²) apresenta uma série de trilhas de usinagens representadas por uma sequência de picos e vales bem definidos. Pelo fato de avaliarem uma área como um todo, acredita-se que, sob o aspecto de usinagem, os parâmetros de prefixo *S* sejam mais representativos quando comparados aos parâmetros de prefixo *R*.

Figura 35 - Exemplo de um mapa topográfico gerado em um perfilômetro óptico.



Fonte: Autoria própria

É importante salientar que a precisão e a representatividade de avaliações como a da Figura 35 sofrem influência do valor de área preestabelecido, ou seja, quanto maior a área, maior a precisão dos valores dos parâmetros de rugosidade

obtidos. No entanto, o aumento excessivo destes valores implica em tempos elevados para aquisição das imagens.

Por fim, cabe ressaltar que os parâmetros R e S podem ser relacionados uns com os outros e representam as mesmas grandezas e medições, conforme Quadro 1.

Quadro 1 - Relação de associação entre os parâmetros R e seus respectivos parâmetros S .

	Parâmetros	Parâmetros
	R	S
Rugosidade média (μm)	R_a	S_a
Desvio média quadrático (μm)	R_q	S_q
Altura máxima (μm)	R_z	S_z
Altura máxima de pico (μm)	R_p	S_p
Profundidade máxima de vale (μm)	R_v	S_v
Altura total do perfil (μm)	R_t	S_t
Fator de assimetria	R_{sk}	S_{sk}
Fator de achatamento	R_{ku}	S_{ku}
Profundidade da rugosidade do núcleo (μm)	R_k	S_k
Altura reduzida dos picos (μm)	R_{pk}	S_{pk}
Profundidade reduzida dos vales (μm)	R_{vk}	S_{vk}

Fonte: Autoria própria

Quanto a obtenção destes valores, as técnicas que utilizam contato mecânico (apalpadores) são utilizadas para obter, exclusivamente, os valores dos parâmetros de rugosidade com prefixo R e, os sem contato (interferência da luz), podem ser utilizados para obter os valores dos parâmetros de rugosidade com prefixo R e S . Estas técnicas serão descritas nas próximas seções da presente pesquisa.

2.5.7 Técnicas para a Caracterização da Rugosidade

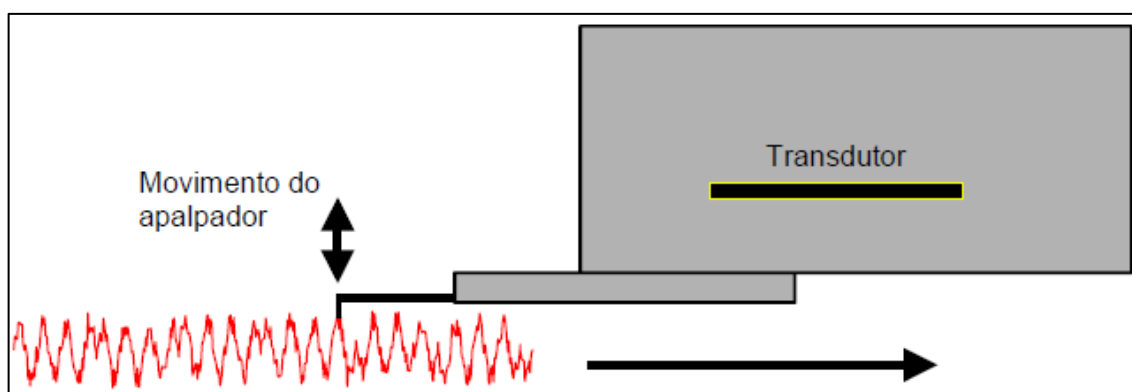
Os métodos de medição da rugosidade são divididos em dois grupos: de contato, destacando-se o rugosímetro e; sem contato, destacando-se, principalmente, o perfilômetro óptico.

2.5.7.1 Método de contato: rugosímetro

Possui grande presença no cenário industrial e leva vantagem, em relação aos métodos sem contato, por conta da facilidade de manuseio, da rapidez na leitura e preparação, da versatilidade e dos menores custos envolvidos no processo. Segundo Neto (2017), neste tipo de medição, um apalpador mecânico tem contato

físico com a superfície da peça e seu movimento vertical, devido à presença de vales e picos, representa a rugosidade da amostra. O processador do equipamento realiza a medição durante o deslizamento do apalpador em uma linha reta (parâmetros R) e, portanto, deve ser feita em várias regiões da amostra de modo a garantir a confiabilidade do resultado. A apresenta um esquema ilustrativo de como um rugosímetro realiza as medições de rugosidade.

Figura 36 - Método de medição dos parâmetros de prefixo R a partir de um rugosímetro.

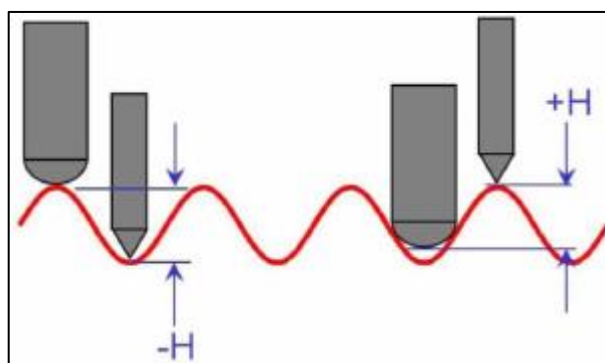


Fonte: Freitas (2006)

No caso da Figura 36, a direção do movimento do apalpador é da esquerda para direita e, à medida que se desloca, a ponta do apalpador tem movimentos verticais que são convertidos em sinais elétricos pelo transdutor, indicando os valores dos parâmetros de rugosidade nesta região.

É importante salientar que, nesta técnica, há forte influência da plasticidade e da elasticidade do material e da geometria do raio de ponta do apalpador, conforme Figura 37.

Figura 37 - Influência da geometria do raio do apalpador na obtenção do perfil da rugosidade.



Fonte: Taylor Hobson (2003)

Devido às dimensões das pontas dos apalpadores, é impossível obter o perfil real da superfície durante a medição com um rugosímetro devido a baixa capacidade

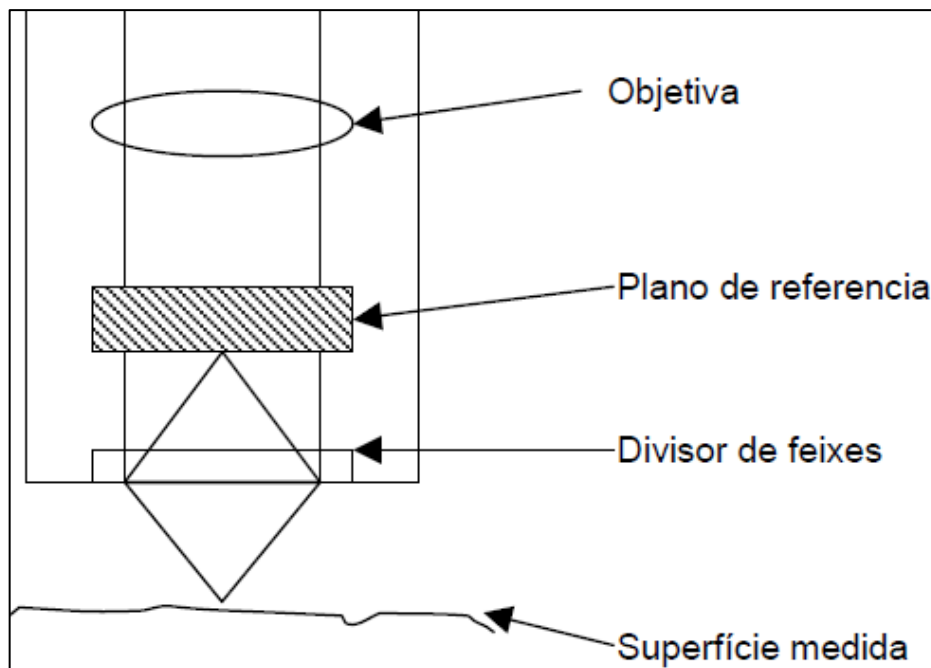
de penetração nos vales do perfil. Para casos que exigem maior precisão, o ideal seria utilizar apalpadores com raios de ponta muito pequenos. Segundo Neto (2017), por menor que seja a ponta do apalpador, o mesmo ainda não é capaz de realizar a leitura completa das irregularidades da superfície, principalmente das regiões dos vales. Com isso, há uma discrepância entre o perfil real e o perfil efetivo.

Essa dificuldade aliada a problemas como desgaste da ponta do apalpador e a deformação e marcação do perfil por abrasão com o apalpador, fazem com que a utilização do rugosímetro seja substituída por métodos de medição sem contato, principalmente o perfilômetro óptico.

2.5.7.2 Método sem contato: perfilômetro óptico

Os métodos sem contato, ou seja, sem a utilização de um apalpador mecânico e seu princípio de funcionamento pode ser observado, resumidamente, na Figura 38.

Figura 38 - Ilustração esquemática de um perfilômetro óptico.



Fonte: Whitehouse (2002)

Nesta técnica de caracterização, Segundo Carpinetti et. al (2000), a luz refletida pela superfície sendo analisada (ou medida) interfere com a luz refletida pela superfície de referência. O valor de medição da rugosidade é calculado pela diferença de fase entre os feixes de referência e os da superfície medida.

Como a luz tem maior poder de penetração que um apalpador mecânico, este método possui maior precisão quando comparado a um rugosímetro de bancada, por

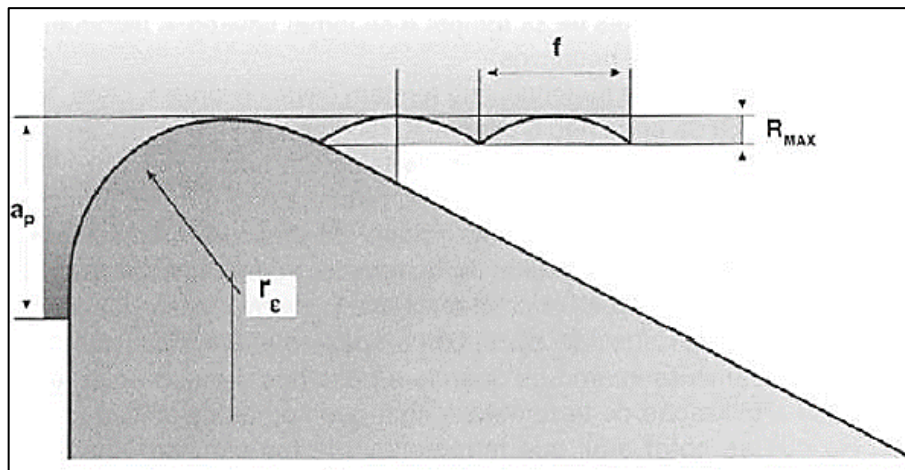
exemplo. Outra vantagem do uso desta técnica é que ela permite o levantamento de imagens topográficas, tridimensionais, da superfície analisada. Além disso, como esta técnica realiza a leitura em áreas da topografia, seus resultados permitem a análise dos parâmetros S de rugosidade.

Em contrapartida, são equipamentos de custo elevado, de maior complexidade e que demandam de maior tempo para análise, o que explica a baixa presença destes equipamentos no cenário industrial. Além disso, a perfilometria óptica é limitada pelo tamanho da mesa de medição.

2.5.8 Influência de Parâmetros e Condições de Usinagem no Acabamento Superficial

Segundo Machado (2009), em uma operação sob condições ideais de usinagem e fazendo uso de uma ferramenta nova, deve existir pouco contato entre as superfícies, não deve haver vibração e não há formação de aresta postiça, então, a rugosidade será, em teoria, formada pelas interações entre as impressões de avanço e da geometria da aresta de corte deixadas pela ferramenta na superfície da peça, conforme a Figura 39.

Figura 39 - Contribuição geométrica do avanço e do raio de ponta na rugosidade em um processo de torneamento.



Fonte: Diniz et. al (2010)

Segundo Withehouse (1994), a rugosidade teórica de uma superfície fresada pode ser calculada pela seguinte equação:

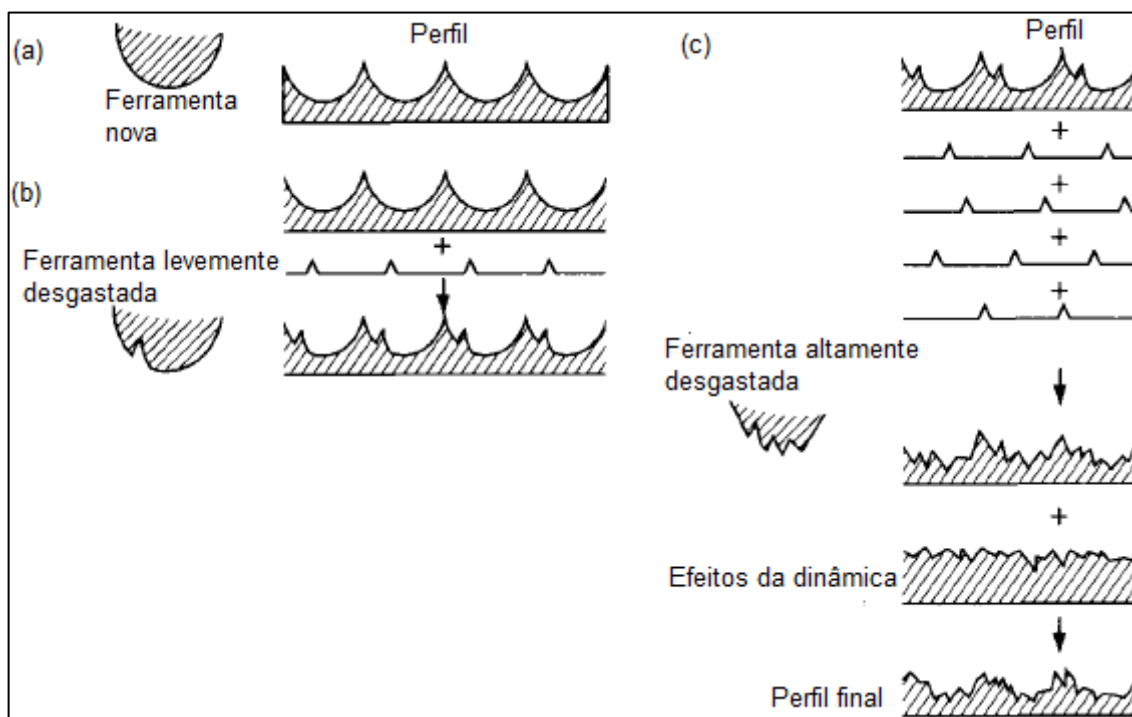
$$R_{teorica} = \frac{f_z^2}{8 \left[r_\epsilon \pm \left(f_z \cdot z_c / \pi \right) \right]} \quad (7)$$

Com base nesta relação, avanços por dente menores resultam em superfícies com menor valor de rugosidade. Além disso, ferramentas com maiores valores de raio de ponta tendem a gerar superfícies com melhor acabamento superficial. Cabe ressaltar que se trata de uma relação matemática para um valor de rugosidade teórico que, segundo Diniz et. al (2010), é difícil de se obter na prática devido a magnitude das dinâmicas presentes nos processos de usinagem.

Segundo Machado (2009), o raio de ponta não pode ter um valor excessivo pois pode induzir vibrações no sistema por conta do aumento da área de contato entre a ferramenta e a peça, no entanto, deve ter um valor correspondente a, pelo menos, o dobro do avanço por dente, para diminuir os efeitos de impressão das trilhas de usinagem.

Outra variável que tem influência no processo de geração da superfície de uma peça é o desgaste da ferramenta. Enquanto a aresta de corte de uma ferramenta nova apresenta uma geometria regular, esta regularidade passa a ser impressa na superfície da peça. No entanto, à medida que esta ferramenta perde material e se desgasta, aquela aresta de corte passa a ter uma geometria mais irregularidade, irregularidade esta que também é impressa na superfície da peça. Um exemplo desta influência pode ser observado na Figura 40.

Figura 40 - Influência da evolução do desgaste na geração da superfície usinada.



Fonte: Whitehouse (2002)

Um perfil impresso por uma ferramenta enquanto nova e gerado pela combinação entre avanço e geometria da ferramenta é ilustrado na Figura 40 (a). Para casos de redução do avanço e redução do tamanho da aresta da ferramenta, o resultado seria a redução do espaçamento entre os centros dos vales e dos picos e a redução da largura das trilhas de usinagem, respectivamente.

À medida que a ferramenta sofre desgaste, as irregularidades passam a ser impressas pontualmente na superfície da peça, conforme a Figura 40 (b). Segundo Whiteshouse (2002), quando a magnitude dos desgastes toma proporções elevadas, Figura 40 (c), a superfície gerada passa a ter influência das inúmeras irregularidades da aresta da ferramenta somadas a efeitos de dinâmica que se tornam mais evidentes, tais como desbalanceamento e vibrações.

Outro fator que influencia na geração da superfície usinada está relacionada com a rigidez da máquina ferramenta. De acordo com Diniz et. al (2010), dependendo do sistema máquina-ferramenta-dispositivo de fixação da peça (MFDP), o aumento da velocidade de corte pode resultar em aumentos expressivos da vibração. Neste sentido, máquinas convencionais, cuja transferência dos movimentos é realizada pela interação de engrenagens, tendem a apresentar maiores dinâmicas relacionadas a vibrações quando comparadas a máquinas CNC, por exemplo.

Segundo Machado (2009), de uma maneira geral, pode-se obter um melhor acabamento (redução da rugosidade) quando:

- As flexões geradas pelos esforços de usinagem ou vibrações são reduzidas;
- A ponta da ferramenta possui uma geometria arredondada;
- A ferramenta e a peça estão devidamente posicionadas e centradas;
- O material da peça é homogêneo e com ausência de defeitos (trincas e inclusões);
- A aresta de corte está sem desgaste ou quebras;
- O corte ocorre sem a presença de aresta postiça de corte (APC).

A velocidade de corte também tem a sua contribuição na geração da rugosidade: baixas velocidades de corte aliadas a baixos avanços podem propiciar o aparecimento de aresta postiça de corte e, portanto, acarretar numa piora do acabamento superficial. Velocidades de corte maiores acabam gerando uma melhora no acabamento pelo fato de dificultar o aparecimento das arestas postiças (MACHADO, 2009). A influência de arestas postiças e materiais aderidos na ferramenta está diretamente ligada a uma piora no acabamento: partes da APC, segundo Machado (2009), são cisalhadas durante o processo e permanecem aderidas à superfície da peça e; materiais aderidos, principalmente na aresta secundária de corte, tendem a aumentar a profundidade dos vales e alargar os picos do perfil de rugosidade.

O valor de velocidade de corte deve ser balanceado, sendo alto de modo que garanta um aumento na temperatura no corte que provoca uma redução na resistência ao cisalhamento do material da peça, reduzindo esforços de corte; porém, não se deve aumentar em excesso, pois para isto deve-se aumentar demasiadamente a rotação da máquina, podendo gerar vibrações prejudiciais ao processo.

De acordo com Machado (2009), é usual que, durante a formação do cavaco, porções do material da peça sejam comprimidas contra a superfície de folga da ferramenta. Quando isto acontece, parte deste material se recupera elasticamente e volta a escoar sobre a superfície de saída e outra parte passa a se deformar plasticamente em uma direção perpendicular a direção do avanço. De acordo com

Buttery e Archard (1971), fluxo lateral é a nomenclatura dada a este fenômeno e acaba gerando sulcos (ou vales) mais profundos, piorando o acabamento superficial.

Machado (2009) descreve ainda a importância de alguns ângulos geométricos da ferramenta na impressão da superfície:

- Ângulo de saída: maiores ângulos de saída reduzem as forças de corte e, portanto, as alturas dos picos e as profundidades dos vales que representam a rugosidade da superfície serão menores;
- Ângulo de folga: deve ser suficientemente alto para evitar o contato da superfície da ferramenta com a superfície usinada, já que este atrito causa esforços e flexões adicionais. Além disso, podem imprimir, na superfície usinada, os defeitos ou desgastes da ferramenta.

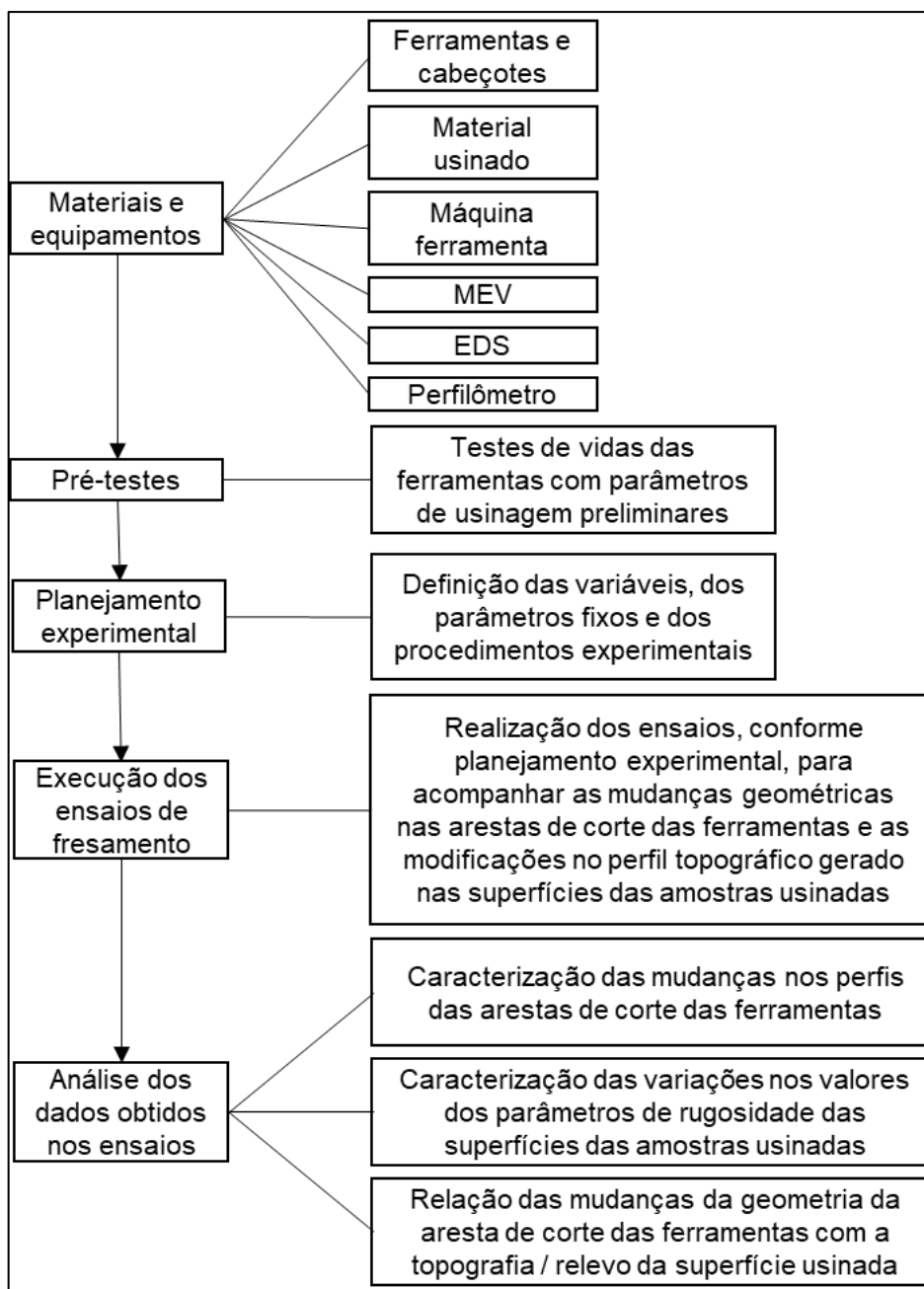
É importante destacar ainda a importância de outros fatores, além das condições de corte e da geometria da ferramenta, na geração da rugosidade de uma superfície. De acordo com Machado (2009), destaca-se: a rigidez, o alinhamento, o amortecimento, as tolerâncias e o balanceamento da máquina-ferramenta; as condições de usinabilidade do material usinado; os materiais do substrato e do revestimento das ferramentas, tais como dureza, tenacidade e condutividade térmica e; a utilização de fluido de corte.

Por fim, nota-se, ao decorrer desta seção, que o acabamento de uma superfície usinada pode sofrer influência da soma de uma série de variáveis. É importante salientar ainda que, no caso da presente pesquisa, estudar-se-á apenas a influência de algumas variáveis da ferramenta na geração do perfil topográfico da peça usinada.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção aborda a descrição dos materiais e métodos empregados para alcançar os objetivos da presente pesquisa. Uma sequência, conforme a seção será apresentada, é exposta na Figura 41.

Figura 41 - Fluxograma da seção de materiais e métodos.



Fonte: Autoria própria

Em relação à classificação, esta pesquisa possui natureza aplicada, sendo o problema quantitativo-qualitativo. Quanto aos procedimentos técnicos, esta pode ser classificada como uma pesquisa experimental, sendo o método científico, o indutivo.

3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

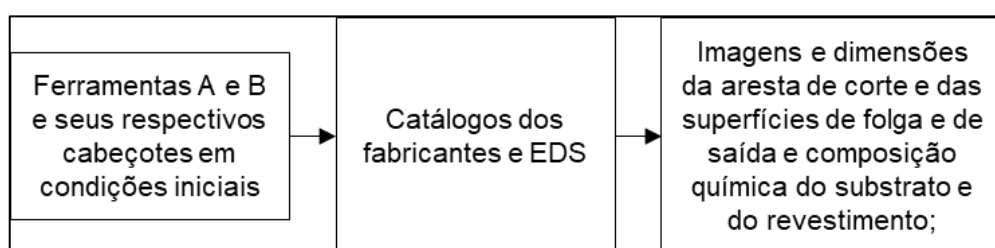
Nesta seção serão apresentados os procedimentos utilizados para obter as características das ferramentas, dos cabeçotes fresadores e do material usinado. Além disso, é descrita a máquina ferramenta utilizada nos ensaios de fresamento e os equipamentos de caracterização.

3.1.1 Ferramentas de Corte e Cabeçotes de Fresamento

Duas ferramentas de corte com características semelhantes (ambas são de metal duro e classe ISO P40), porém de fabricantes diferentes, foram selecionadas para os experimentos. Portanto, estabeleceu-se: ferramentas A, montadas no cabeçote do mesmo fabricante do inserto, e ferramentas B, no cabeçote do mesmo fabricante do inserto.

Os dois modelos de ferramentas e cabeçotes, por serem de fabricantes distintos, foram caracterizados, em suas condições iniciais, conforme procedimento exposto no fluxograma da Figura 42: dimensionalmente / geometricamente, por meio de dados dos catálogos dos fabricantes e; quanto à composição química, por meio da espectroscopia de energia dispersiva. Estas caracterizações serviram como referência para comparação e interpretação das mudanças no perfil da aresta de corte da ferramenta à medida que ela sofre desgaste.

Figura 42 - Fluxograma das atividades desenvolvidas para a caracterização das ferramentas de corte e seus respectivos cabeçotes.



Fonte: Autoria própria

A caracterização dimensional e geométrica das ferramentas foi feita por meio de informações disponibilizadas nos catálogos dos fabricantes e/ou pela medição dos ângulos através dos desenhos disponibilizados nos catálogos virtuais e com auxílio do *software Solid Edge*.

Quanto a composição química das ferramentas A e B, foi necessário o corte transversal das mesmas para posterior caracterização dos elementos constituintes do

substrato e dos revestimentos das mesmas. A técnica utilizada para esta caracterização foi a espectroscopia de energia dispersiva (EDS).

As faixas de utilização de alguns parâmetros de corte, informadas pelos fabricantes, são apresentadas na Tabela 2. A comparação destes valores com os disponíveis pela máquina fresadora é utilizada para a determinação dos valores parâmetros de corte dos experimentos da presente pesquisa.

Tabela 2 - Parâmetros de corte recomendados pelos fabricantes das ferramentas de corte, particulares ao tipo de material usado no presente trabalho.

	Velocidade de corte (v_c) [m/min]	Avanço por aresta de corte (f_z) [mm/aresta de corte]	Profundidade de corte máxima ($a_{p,max}$) [mm]
FERRAMENTA A	205 – 305	0,15 - 0,45	6
FERRAMENTA B	150 – 235	0,10 - 0,40	6

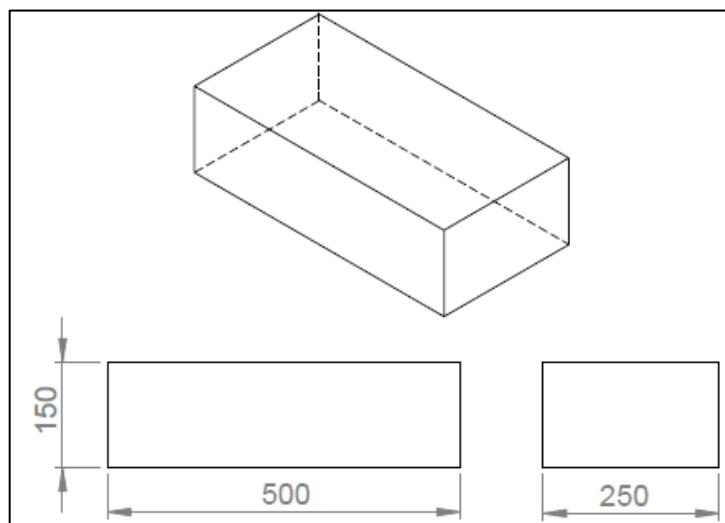
Fonte: Autoria própria

Nota-se, na Tabela 2, que estas ferramentas operam em faixas coincidentes, em determinados intervalos de parâmetros de corte. Esta característica, aliada ao fato de que ambas são ferramentas de metal duro ISO P40 e que podem ser utilizadas em usinagens de fresamento de faceamento do aço ABNT 1045, permite que os resultados das operações com estas ferramentas possam ser comparados.

3.1.2 Material Usinado

O processo de fresamento será realizado em blocos de aço ABNT 1045 comercial cujas dimensões podem ser observadas na Figura 43. Este material foi utilizado pelo fato de ter grande presença no cenário industrial e ter uma ótima relação entre custo e propriedades mecânicas.

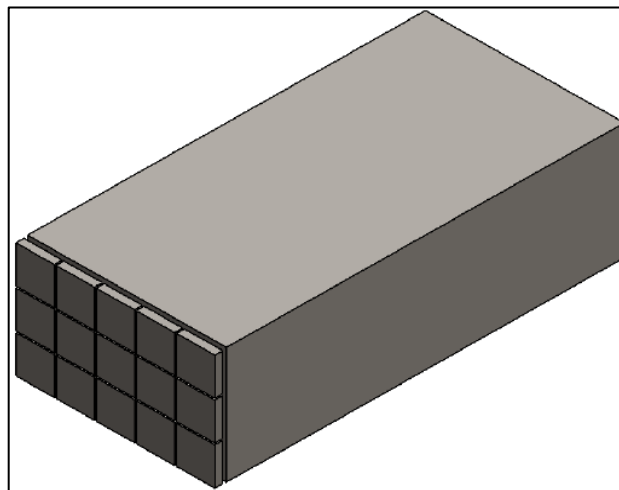
Figura 43 - Dimensões (em mm) do bloco de aço ABNT 1045 fresado nos experimentos.



Fonte: Autoria própria

Foram confeccionadas amostras com seções quadradas a partir de cada um dos blocos, conforme a Figura 44. Estas amostras serviram para a caracterização do material dos blocos.

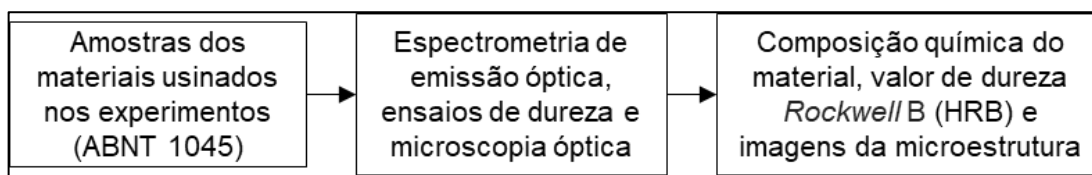
Figura 44 - Amostras confeccionadas, para caracterização do material, a partir dos blocos de aço.



Fonte: Autoria própria

O fluxograma que expõe o procedimento utilizado para identificar, precisamente, os valores de dureza e composição química de cada uma das amostras é apresentado na Figura 45.

Figura 45 - Fluxograma das atividades desenvolvidas para a caracterização das amostras do aço ABNT 1045.



Fonte: Autoria própria

Os ensaios de dureza foram realizados em um durômetro analógico de bancada do fabricante PANTEC RBS, pertencente ao Laboratório de Ensaios Destrutivos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Ponta Grossa. Foi utilizada a escala B, com uma faixa de utilização entre 20 a 100 HRB (*Rockwell B*) e penetrador de esfera de aço com 1,5875 mm de diâmetro. Foram realizadas nove identificações por amostra, totalizando 135 medições por bloco.

A composição química foi obtida pela técnica de espectrometria de emissão óptica. O ensaio foi realizado no equipamento do fabricante *Shimadzu*, modelo PDA-7000, pertencente ao Centro de Transformação de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa.

Para a realização das análises de microestrutura, foi necessário realizar algumas etapas:

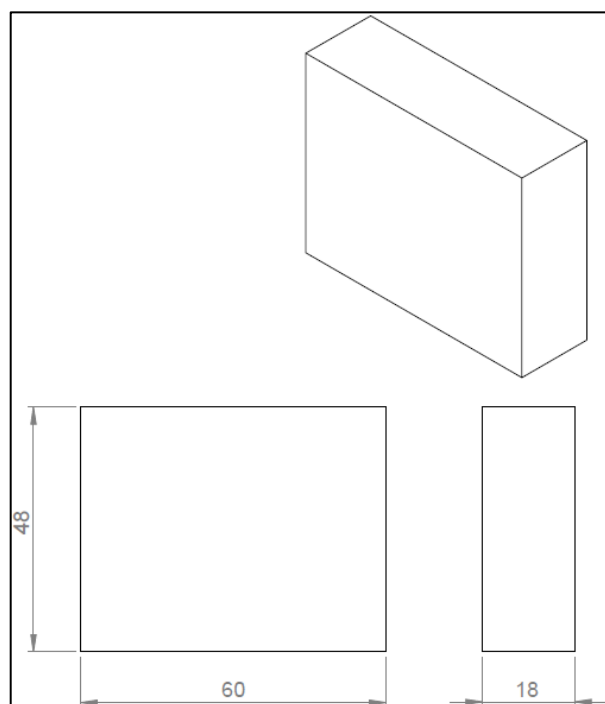
- Corte de duas porções por amostra: uma para análise da seção transversal e, a outra, da seção longitudinal;
- Embutimento das amostras;
- Lixamento das amostras seguindo a seguinte sequência de lixas: #220, #320, #400, #600, #1000, #1200;
- Polimento em alumina de 1µm;
- Ataque químico em solução de nital 5%;
- Observação utilizando um microscópio óptico.

As inspeções da microestrutura das amostras foram feitas em um microscópio óptico modelo A2.m, do fabricante ZEISS, equipado com uma câmera AxioCam MRc5. As imagens foram capturadas com ampliações de 100x e 200x. Tal equipamento pertence ao Laboratório de Preparação Metalográfica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Ponta Grossa.

3.1.2.1 Amostras para impressão da superfície usinada

Ao fim de cada tempo efetivo de corte (conjunto de passes de fresamento), estipulado no pré-teste, foi realizado um passe de fresamento em uma amostra com o intuito de gerar uma superfície a partir da aresta de corte da ferramenta em experimentação (construindo um histórico de superfícies usinadas ao longo da vida da ferramenta). No entanto, como se trata de um bloco pesado e de grandes dimensões, o manuseio e o transporte tornam-se difícil. Portanto, com o intuito de solucionar este problema e possibilitar a análise (pelo perfilômetro óptico) destas superfícies geradas, foram fabricadas amostras com dimensões reduzidas (Figura 46) a partir dos blocos padrão (Figura 43).

Figura 46 - Dimensões (em mm) das amostras fabricadas a partir do bloco padrão.



Fonte: Autoria própria

Estas medidas foram atribuídas levando em conta o tamanho da mesa de trabalho do perfilômetro óptico, para que, desta maneira, fosse possível a análise das amostras neste equipamento.

3.1.3 Máquina Ferramenta

Os ensaios de fresamento foram realizados em uma fresadora universal modelo FH4 do fabricante *Clark Machine* (Fotografia 1), localizada no bloco J2 da UTFPR-PG.

Fotografia 1 - Fresadora modelo FH4 do fabricante *Clark Machine*.



Fonte: Autoria própria

Como trata-se de uma fresadora universal, os parâmetros de corte utilizados nos experimentos foram aqueles disponibilizados pelo equipamento e que estão dentro da faixa de valores de corte recomendada pelos fabricantes das ferramentas.

3.1.4 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e Espectroscópio de Energia Dispersiva (EDS)

A microscopia eletrônica de varredura foi utilizada para caracterizar o perfil geométrico e mensurar o desgaste nas arestas de corte das ferramentas. O microscópio eletrônico de varredura utilizado foi o modelo *Vega 3* do fabricante *TESCAN*, pertencente ao laboratório de materiais da UTFPR-PG.

A espectroscopia de energia dispersiva foi utilizada para caracterizar a mudança nos revestimentos das ferramentas de corte à medida que sofrem desgaste. O sensor EDS utilizado, acoplado ao microscópio eletrônico de varredura, é o modelo *x-act* do fabricante *Oxford*.

3.1.5 Perfilômetro Óptico

Os principais objetivos que se pretendia alcançar com a utilização deste equipamento eram: a medição dos parâmetros de rugosidade (lineares e de área) e o

levantamento de imagens topográficas, tridimensionais, das superfícies geradas nas amostras.

Para a caracterização destas superfícies fez-se uso de um perfilômetro óptico modelo 3D CCI *Lite* do fabricante *Taylor Hobson* (Fotografia 2), pertencente ao laboratório de materiais da UTFPR-PG.

Fotografia 2 - Perfilômetro óptico.



Fonte: Autoria própria

Cabe ressaltar que, para o caso da presente pesquisa, fez-se uso de uma lente de ampliação de 10x e analisou-se uma área de 20,25 mm² (4,5 x 4,5 mm). Quanto aos parâmetros de rugosidade, foram obtidos os de prefixo S (que avaliam a área) e os de prefixo R (que avaliam uma linha dentro do perfil). Com o intuito de aumentar a confiabilidade do processo de medição dos parâmetros de prefixo R, optou-se por realizar a medição em 50 linhas, todas elas atribuídas em uma direção perpendicular às trilhas de usinagem.

3.2 PRÉ-TESTES

Pré-testes de fresamento, em condições idênticas para as ferramentas A e B, foram realizados com o intuito de obter as curvas de vida das ferramentas, por meio da qual é possível fazer uma estimativa do seu tempo de vida e analisar o comportamento dessas curvas. Por meio disto, foi possível estipular um valor de

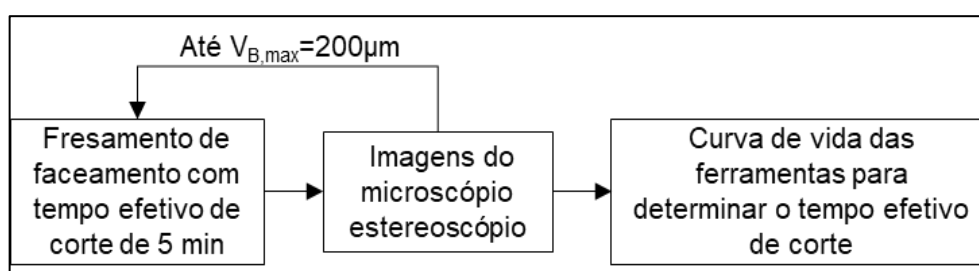
tempo efetivo de corte e um número de paradas ao longo dos experimentos, determinado para um valor de desgaste de flanco máximo ($V_{B,máx}$).

Durante os pré-testes foi atribuído um tempo de 5 minutos de corte efetivo entre as medições do desgaste de flanco, pois não havia conhecimento do comportamento da vida das ferramentas durante as operações de fresamento.

As medições de desgaste de flanco foram realizadas na superfície de folga da aresta secundária de corte das ferramentas. Os valores tomados como referência foram os maiores valores de desgaste encontrados na referida superfície, denominados de desgaste de flanco máximo ($V_{B,máx}$) e medidos nas regiões onde o substrato havia sido exposto.

Os pré-testes foram realizados conforme o procedimento exposto no fluxograma da Figura 47.

Figura 47 - Fluxograma das atividades desenvolvidas nos pré-testes.

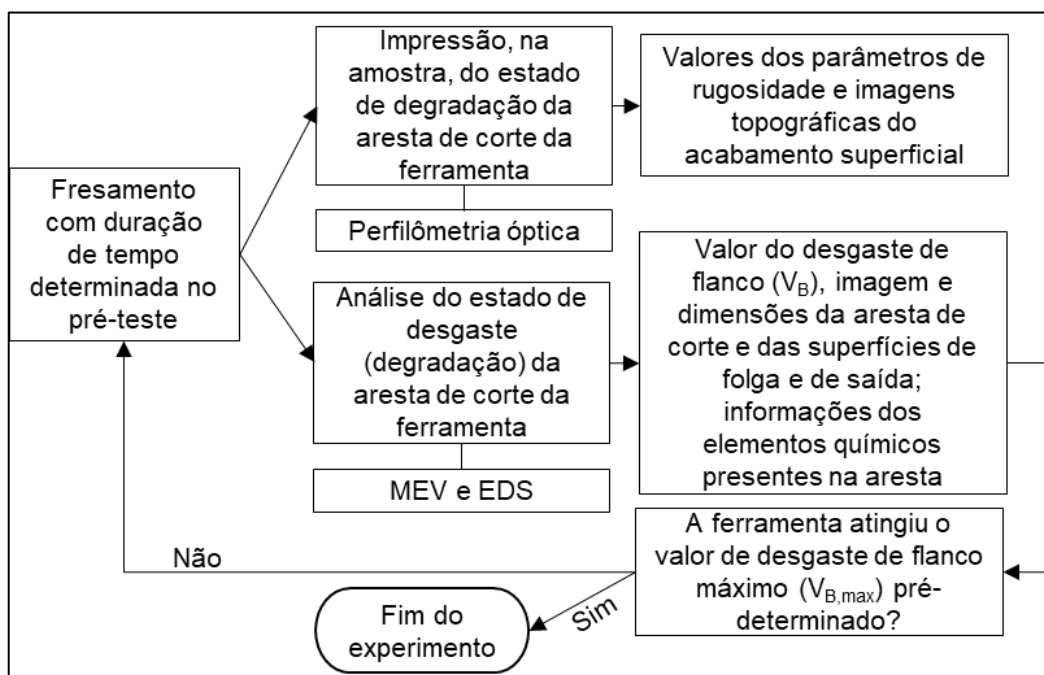


Fonte: Autoria própria

3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A experimentação foi executada conforme ilustrado no fluxograma da Figura 48, em duplicata.

Figura 48 - Fluxograma de atividades desenvolvidas nos ensaios de fresamento.



Fonte: Autoria própria

O fresamento foi realizado por determinado tempo, seguido de um intervalo em que as ferramentas foram analisadas e utilizadas para gerar uma superfície nas amostras do material da peça. O perfil topográfico impresso representa o acabamento superficial no momento da parada para medição de desgaste de flanco, ou seja, considera o estado de degradação da ferramenta naquele momento. Cabe salientar que somente as ferramentas foram avaliadas em cada parada e que as amostras usinadas foram armazenadas e analisadas, no perfilômetro óptico, somente após o fim de todos os experimentos. Isto foi realizado com o intuito de gerar maior dinamismo durante os ensaios de fresamento.

Sendo assim, após cada intervalo de usinagem, as ferramentas de corte foram caracterizadas: o desgaste de flanco e o perfil geométrico caracterizados por meio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) e; a composição química na superfície da aresta de corte por espectroscopia de energia dispersiva (EDS).

Este procedimento foi repetido até que as ferramentas de corte atingissem um desgaste de flanco máximo de 200 μm (um valor típico para este parâmetro em operações de acabamento) ou ocorresse uma avaria / quebra da ferramenta. Os tempos efetivos de corte (tempo de corte efetivo entre paradas para mediação do desgaste de flanco) para cada condição de usinagem foram determinados com base nos resultados obtidos nos pré-testes.

Conforme mencionado anteriormente, os experimentos de fresamentos de faceamento foram realizados em uma fresadora convencional e, portanto, foi necessário operar com os valores de rotação e avanço disponibilizados pelo equipamento, não tendo a flexibilidade de usar qualquer valor de parâmetro de corte para os experimentos. Além disso, fez-se a aferição dos valores informados pelos fabricantes da fresadora: a rotação, por meio de um tacômetro digital modelo *DT-2234C+*; e o avanço da mesa, por meio da relação entre o comprimento deslocado e seu respectivo tempo de translação. Estes valores foram dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores dos parâmetros de corte disponibilizados pela máquina: informados pelo fabricante e medidos.

Avanço (mm/min)				
Valore informados pelo fabricante	150	235	325	505
Valores medidos	157,5	247	342,4	529,7
Rotação (rpm)				
Valore informados pelo fabricante	466	642	864	1176
Valores medidos	499	672	915	1247

Fonte: Autoria própria

Com o intuito de estabelecer as condições de usinagem e criar uma matriz de experimentos, os parâmetros medidos, expostos na Tabela 3, e os valores de diâmetro efetivo de corte (D_c) e de número de ferramentas utilizadas (z_c) foram substituídos nas equações (1), (2) e (3).

Desta forma, foi calculado o avanço por aresta de corte (f_z) e a velocidade de corte (v_c) para cada valor de v_f (avanço da mesa) e n (rotação do eixo árvore) disponibilizado pela fresadora. A seleção de quais valores dos parâmetros mais adequados aos experimentos foi feita considerando-se os valores de avanço por aresta de corte e velocidade de corte recomendados pelos fabricantes das ferramentas e os permitidos pela fresadora.

A partir disto, estabeleceu-se condições de usinagem para a execução dos ensaios, dispostas na matriz de experimentos da Tabela 4:

Tabela 4 - Matriz de experimentos.

Número do experimento	Rotação (rpm)	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/min)	Avanço por aresta (mm/aresta)	Profundidade de corte (mm)	Ferramenta	Número de insertos
1	915	230	247	0,270	1,5	B	1
2	915	230	342,4	0,374	1,5	B	1
3	915	230	247	0,270	1,5	A	1
4	915	230	342,4	0,374	1,5	A	1

Fonte: Autoria própria

Como pode-se observar na matriz experimental (Tabela 4), algumas condições trabalham com valores de avanços diferentes.

Com o intuito de realizar os intervalos para inspeção da ferramenta e para geração de superfície usinada nas amostras do material da peça após tempos efetivos de corte próximos de 6 min (determinado nos pré-testes) para todas as condições, foram estipulados determinados números de passes para cada experimento. Tal consideração foi disposta na Tabela 5.

Tabela 5 - Número de passes e tempo efetivo de corte para cada condição de usinagem.

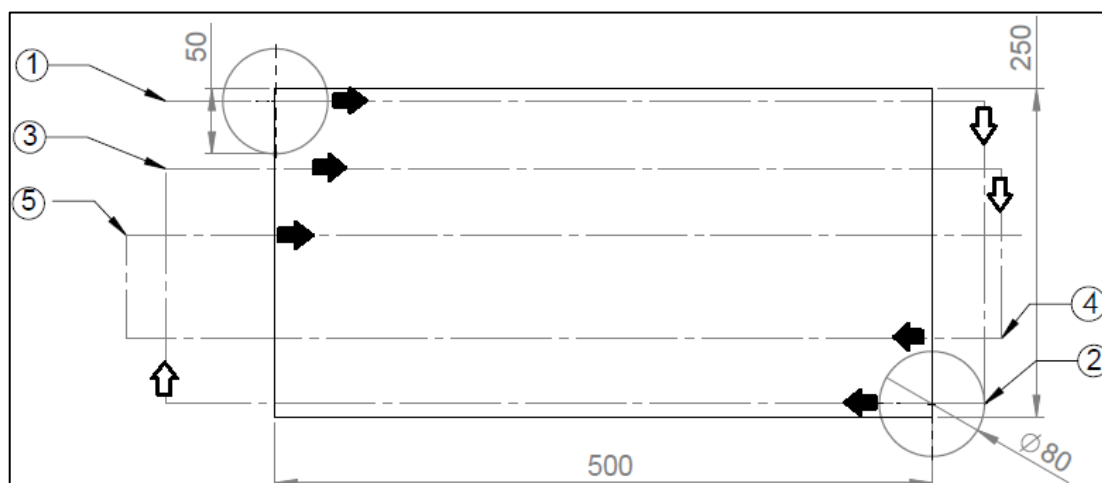
Número do experimento	Número de passes	Tempo efetivo de corte (min)
1	3	6,07
2	4	5,84
3	3	6,07
4	4	5,84

Fonte: Autoria própria

Observa-se que, para todas as condições da experimentação, foi respeitado o valor de tempo efetivo de corte aproximado de 6 minutos e que, para que isto seja garantido, condições com maiores valores de avanço foram executadas com um número maior de passes.

Foi utilizado o corte concordante durante os experimentos e uma penetração de trabalho (a_e) de 50 mm, que corresponde a 62,5% do diâmetro efetivo de corte do cabeçote. Esta configuração de trabalho pode ser observada na Figura 49, que ilustra a sequência dos passes: (1), (2), (3), (4) e (5).

Figura 49 - Configuração utilizada para as operações de fresamento em uma vista superior.



Fonte: Autoria própria

Em resumo, os experimentos foram executados para quatro condições, com seus respectivos parâmetros de corte. Para cada condição, ao fim de cada período de corte efetivo, um passe de fresamento foi executado na amostra, Figura 46, com o intuito de gerar uma superfície usinada com o estado de degradação da aresta de corte; as amostras foram armazenadas e, somente após o fim de todos os ensaios, foram avaliadas quanto o acabamento superficial por perfilometria óptica. Já as ferramentas de corte foram inspecionadas ao fim de cada tempo efetivo de corte por meio da microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de energia dispersiva. Cabe ressaltar que estas atividades foram realizadas novamente até que a magnitude do desgaste de flanco máximo da ferramenta atingisse o valor de 200 μm ou até que ocorresse uma avaria / quebra na ferramenta.

3.4 ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS

Após a realização dos ensaios e as análises das ferramentas e das amostras, dois grupos de informações foram obtidos: os valores de desgaste das ferramentas de corte e uma avaliação qualitativa da mudança na geometria da sua aresta de corte e; os valores dos parâmetros de rugosidade e as imagens topográficas das superfícies geradas nas amostras.

Com base nisto, foram realizadas as seguintes análises:

- Do comportamento da evolução dos desgastes e das mudanças nos perfis das arestas de corte das ferramentas para as condições de usinagem ensaiadas;

- Do comportamento da mudança dos valores dos parâmetros de rugosidade à medida que a ferramenta sofre desgaste;
- Da relação entre desgaste e perfil da aresta, com o acabamento superficial, representado pelos valores de rugosidade e pelas imagens topográficas das superfícies das amostras usinadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados das análises realizadas durante os ensaios de fresamento e das caracterizações do material usinado e das ferramentas de corte e seus cabeçotes.

As análises foram realizadas para as quatro condições de usinagem, com o intuito de buscar relações entre desgaste das ferramentas e os respectivos perfis de rugosidade, caracterizados pelos valores de alguns parâmetros de rugosidade, sendo eles: rugosidade média (R_a e S_a), altura máxima de pico (R_p e S_p), profundidade máxima de vale (R_v e S_v), fator de assimetria ou *skewness* (R_{sk} e S_{sk}), altura reduzida de picos (R_{pk} e S_{pk}) e profundidade reduzida de vales (R_{vk} e S_{vk}).

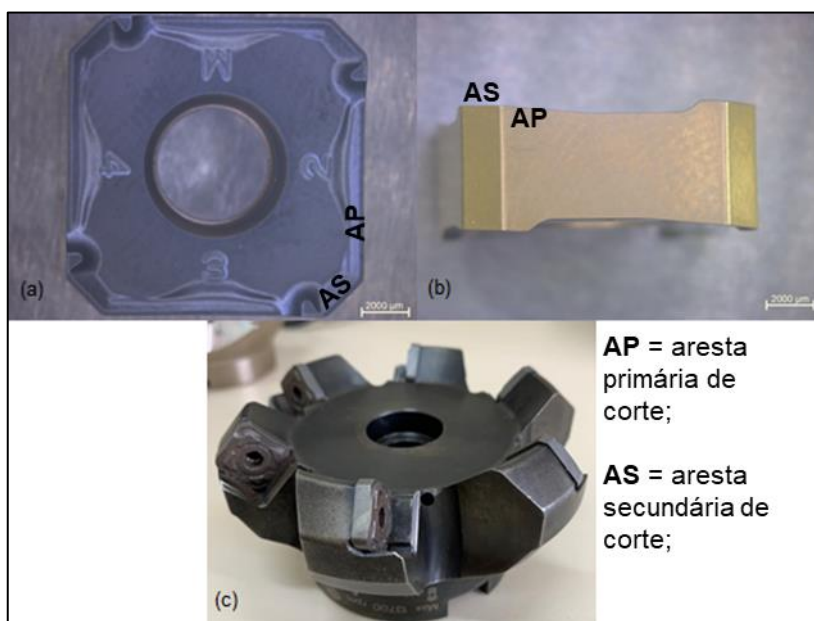
Cabe ressaltar ainda que ambas as ferramentas (A e B) tiveram suas arestas de corte principal e secundária analisadas. Na aresta principal, foi realizado um acompanhamento qualitativo do aparecimento de trincas e formação de entalhes. Já na aresta secundária, além de inspeções qualitativas, foram realizados levantamentos quantitativos do desgaste máximo de flanco.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS FERRAMENTAS DE CORTE E DOS CABEÇOTES DE FRESAMENTO

Nesta seção, serão expostos os resultados das caracterizações geométricas e de composição química das ferramentas A e B, utilizadas nos experimentos da presente pesquisa.

A Figura 50 (a, b) e a Figura 50 (c) ilustram a ferramenta A e o seu cabeçote, respectivamente.

Figura 50 - Imagens da ferramenta A (a, b) e seu respectivo cabeçote (c).

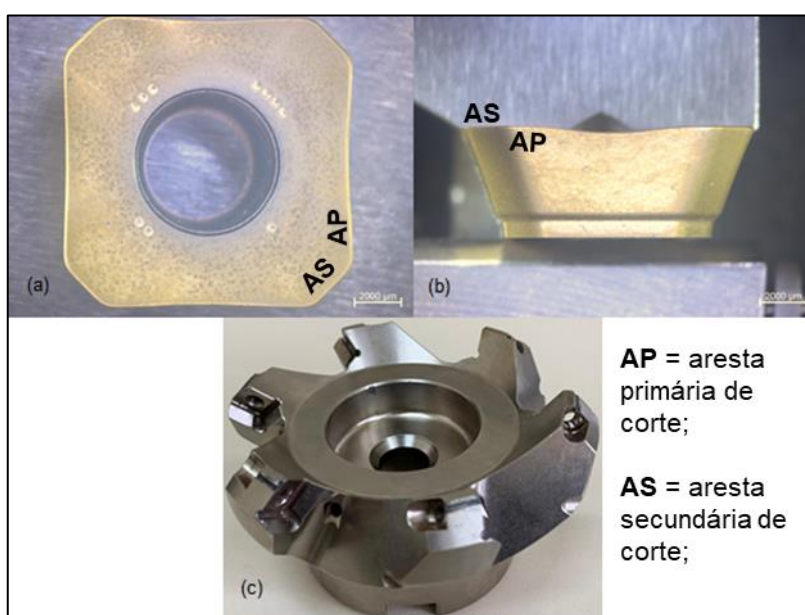


Fonte: Autoria própria

Analisando a Figura 50 (a, b), observa-se que se trata de uma ferramenta com oito arestas de corte. Quanto às arestas, estas são formadas por uma aresta de corte primária e por outra aresta secundária: enquanto a primeira atua em contato com a superfície transitória, a segunda está em contato com a região usinada.

A Figura 51 (a, b) e a Figura 51 (c) ilustram a ferramenta B e o seu cabeçote, respectivamente.

Figura 51 - Imagens da ferramenta B (a, b) e seu respectivo cabeçote (c).



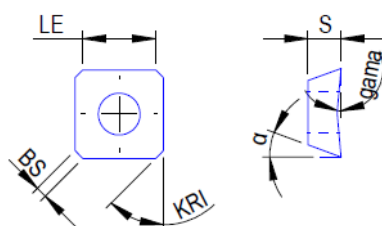
Fonte: Autoria própria

Analisando a Figura 51 (a, b), observa-se que se trata de uma ferramenta com quatro arestas, sendo estas positivas e formadas por uma aresta primária e outra secundária.

Por meio de uma revisão nos catálogos dos fabricantes das ferramentas de corte e seus respectivos cabeçotes, obteve-se algumas informações quanto as suas geometrias. Estas informações foram dispostas na Tabela 6 e na Tabela 7.

Tabela 6 - Tabela comparativa dos valores geométricos das ferramentas A e B.

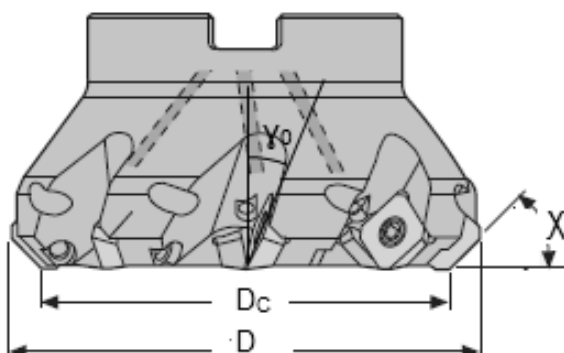
	Ferramenta A	Ferramenta B
Ângulo de saída (γ)	Não informado	7°
Ângulo de folga (α)	Não informado	20°
Espessura (S) [mm]	5,05	4,76
Comprimento efetivo da aresta de corte (LE) [mm]	8,8	10,48
Ângulo da aresta de corte principal (KRI)	45°	45°



Fonte: Autoria própria

Tabela 7 - Tabela comparativa dos valores geométricos dos cabeçotes A e B.

	Cabeçote A	Cabeçote B
Ângulo de posição (χ_r)	45°	45°
Ângulo de saída efetivo (γ_0)	Não informado	10°
Diâmetro de corte (D_c) [mm]	80	80
Diâmetro externo (D) [mm]	94,1	92
Número de assentos	6	6

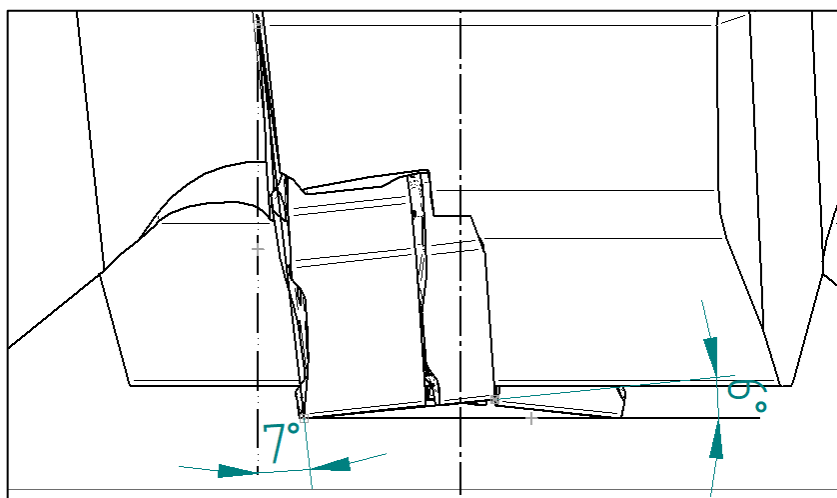


Fonte: Autoria própria

Nota-se, na Tabela 6 e na Tabela 7, que o fabricante A não disponibiliza os valores do ângulo de folga e do ângulo de saída da ferramenta e do assento do cabeçote, ângulos importantes para a caracterização da ferramenta. Além do mais, cabe ressaltar que os ângulos efetivos são gerados pela relação dos ângulos da ferramenta avulsa com os ângulos dos assentos do cabeçote fresador.

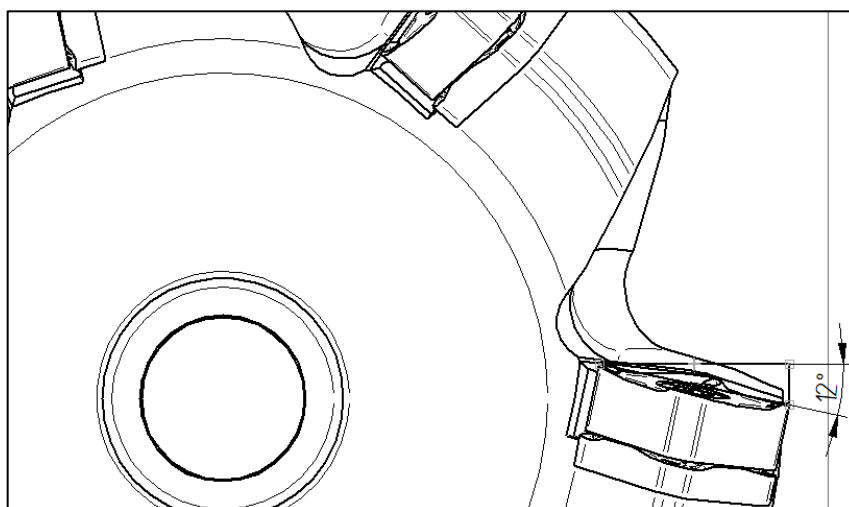
Com o intuito de identificar estes valores, realizou-se a caracterização geométrica da ferramenta A com a utilização do *software Solid Edge*. As medições foram realizadas com a ferramenta de corte montada no cabeçote fresador, já que as geometrias do mesmo também influenciam nos valores finais. Estes procedimentos podem ser observados na Figura 52 e na Figura 53.

Figura 52 - Medição do ângulo de folga efetivo e do ângulo de saída axial da ferramenta A.



Fonte: Autoria própria

Figura 53 – Medição do ângulo de saída axial da ferramenta A.



Fonte: Autoria própria

Inspecionando as medições realizadas, pôde-se fazer o levantamento dos valores das geometrias, expondo-os na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores dos ângulos efetivos do conjunto ferramenta-cabeçote A

Valores dos ângulos efetivos do conjunto ferramenta-cabeçote A	
Ângulo de saída radial (γ_r)	-12°
Ângulo de saída axial (γ_p)	-7°
Ângulo de folga (α)	6°

Fonte: Autoria própria

Já em relação a ferramenta B, os valores de suas dimensões geométricas foram informados pelo fabricante da mesma (Tabela 6 e Tabela 7) e, portanto, bastou relacionar os valores dos ângulos da ferramenta avulsa com os do cabeçote fresador:

Tabela 9 - Valores dos ângulos da ferramenta B.

Valores dos ângulos da ferramenta B	
Ângulo de saída (γ)	7°
Ângulo de folga (α)	20°

Fonte: Autoria própria

Tabela 10- Valores dos ângulos do cabeçote B.

Valores dos ângulos do cabeçote fresador B	
Ângulo de saída radial (γ_r)	- 5°
Ângulo de saída axial (γ_p)	20°
Ângulo de saída efetivo (γ_0)	10°

Fonte: Autoria própria

Para a obtenção dos ângulos efetivos, ou seja, aqueles obtidos quando a ferramenta está montada no cabeçote, relacionam-se os valores expostos na Tabela 9 e na Tabela 10:

Tabela 11 - Valores dos ângulos efetivos do conjunto ferramenta-cabeçote B

Valores dos ângulos efetivos do conjunto ferramenta-cabeçote B	
Ângulo de saída radial (γ_r)	- 5 + 7 = 2°
Ângulo de saída axial (γ_p)	20 + 7 = 27°
Ângulo de folga (α)	20 - 10 = 10°

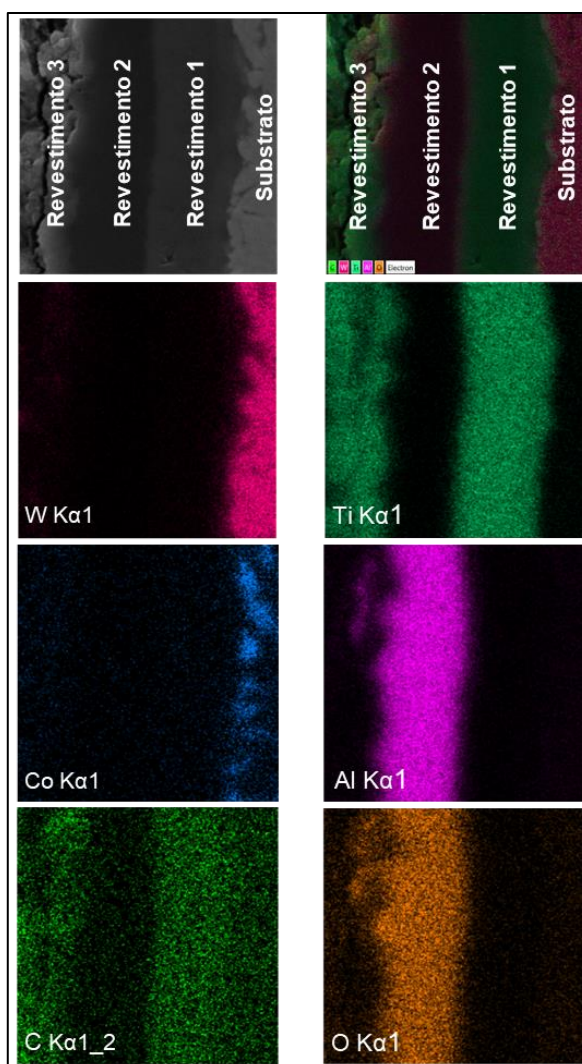
Fonte: Autoria própria

Por fim, pode-se observar que a ferramenta B possui ângulos de saída positivos e a ferramenta A possui ângulos de saída negativos. Ângulos de saída

positivos favorecem o mecanismo de formação de cavaco, reduzindo as taxas de deformação, os esforços e a temperatura.

Quanto a caracterização da composição química do substrato e dos revestimentos das ferramentas A e B, a mesma foi obtida, conforme comentado anteriormente, por espectroscopia de energia dispersiva, realizada na seção transversal de cada uma das ferramentas. Os resultados provenientes da técnica de EDS, que indica quais os elementos químicos formam o substrato e os revestimentos da ferramenta A, são dispostos na Figura 54 .

Figura 54 - Imagem de EDS da ferramenta A, revelando a composição química dos revestimentos e do substrato.



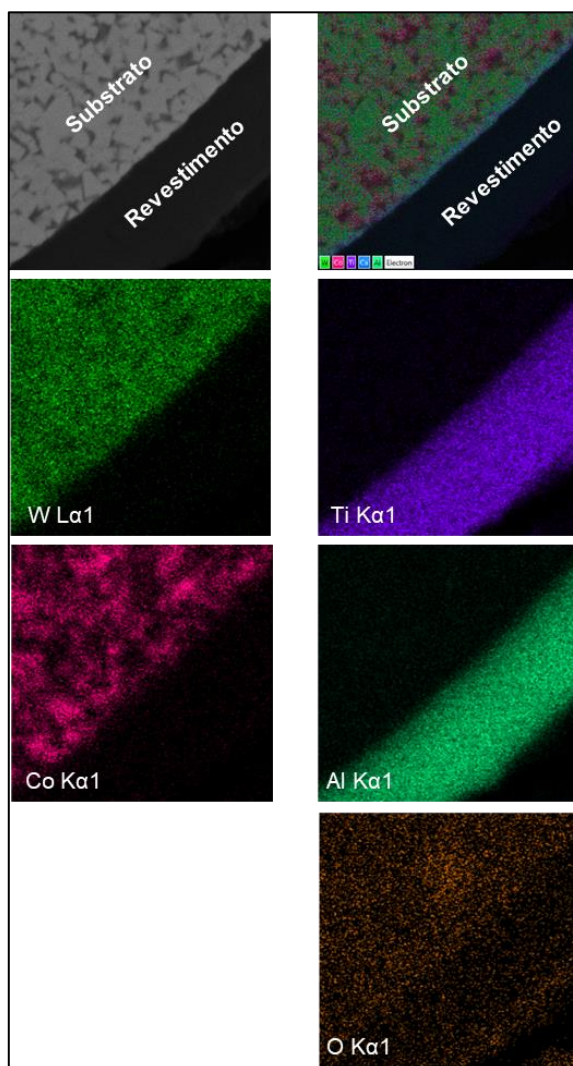
Fonte: Autoria própria

Analisando a Figura 54, observa-se que se trata de uma ferramenta de metal duro (apresenta cobalto e tungstênio no substrato) revestida por três camadas de revestimento. O revestimento na interface com o substrato é o nitreto de titânio (TiN),

seguido pelo óxido de alumínio (Al_2O_3) e, por fim, o carbonitreto de titânio (TiCN). Os revestimentos encontrados estão em concordância com as informações do catálogo do fabricante.

Analogamente à ferramenta A, a Figura 55 dispõe uma imagem proveniente da técnica de EDS realizada na ferramenta B.

Figura 55 - Imagem de EDS da ferramenta B, revelando a composição química do revestimento e do substrato.



Fonte: Autoria própria

Analisando a Figura 55, nota-se que se trata também de uma ferramenta de metal duro (apresenta cobalto e tungstênio no substrato) revestida por uma única camada de nitreto de titânio alumínio (TiAlN). Os materiais do revestimento estão de acordo com o declarado pelo fabricante em seu catálogo.

Sabino (2020), utiliza, em seu trabalho, duas ferramentas de metal duro idênticas às utilizadas na presente pesquisa e expõe as espessuras médias dos revestimentos: $6,9 \pm 0,5 \mu\text{m}$ para a ferramenta A e $3,2 \pm 0,5 \mu\text{m}$ para a ferramenta B.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL USINADO

Com base nos ensaios de dureza realizados, obteve-se os valores de dureza *Rockwell B* (HRB) médio para cada bloco. Estes valores foram convertidos em dureza *Vickers* (HV) e dispostos na Tabela 12.

Tabela 12 - Valores de dureza obtidos nas amostras do material.

	Dureza <i>Rockwell</i> (HRB)	Dureza <i>Vickers</i> (HV)
Bloco 1	$82,8 \pm 2$	$162,7 \pm 4$
Bloco 2	$83,8 \pm 1,9$	$166,4 \pm 3,8$
Bloco 3	$81,7 \pm 1,7$	$159,2 \pm 3,4$

Fonte: Autoria própria

De acordo com a norma SAE J-1397 (1992), os valores tomados como referência de dureza para o aço ABNT 1045 laminado são: dureza *Rockwell B* entre 85 e 90,7 HRB e; dureza *Vickers* entre 171 e 196 HV. Desta maneira, o material dos blocos fresados apresenta um valor de dureza, aproximadamente, 5% abaixo do valor referência mínimo para este mesmo material.

Quanto à composição química dos três blocos, os resultados foram dispostos na Tabela 13.

Tabela 13 - Composição química das amostras, obtidas por espectrometria de emissão óptica.

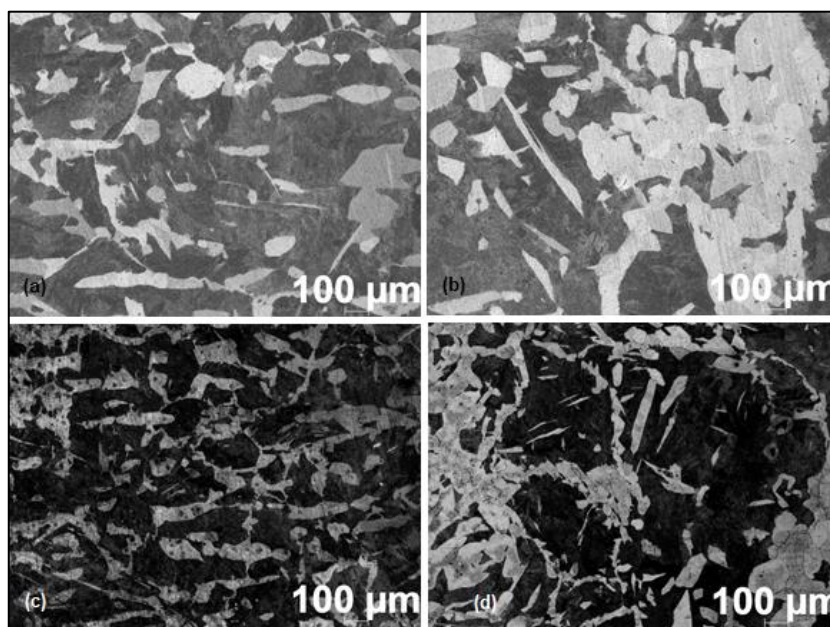
	% C	% Mn	% P	% S	% Si
Bloco 1	0,56	0,63	0,007	0,007	0,19
Bloco 2	0,57	0,62	0,006	0,007	0,18
Bloco 3	0,56	0,63	0,006	0,008	0,18

Fonte: Autoria própria

De acordo com o ASM *Handbook* (1993), os valores de referência para a composição do aço ABNT 1045 são: carbono (C) entre 0,42 e 0,5 %; manganês (Mn) entre a 0,5 a 0,8%; silício (Si) igual a 0,4%; fósforo (P) igual a 0,045% e; enxofre (S) igual a 0,045%. Frente a isto, observa-se que há uma divergência entre os valores tomados como referência e os valores encontrados nos ensaios para a porcentagem de carbono.

Por fim, são apresentados alguns exemplos dos resultados das análises microestruturais realizadas, conforme a Figura 56.

Figura 56 - Exemplos dos resultados das análises microestruturais das amostras para: (a), (b) seções longitudinais; (c), (d) seções transversais.



Fonte: Autoria própria

Analisando a Figura 56, conclui-se que se trata de uma estrutura com grande heterogeneidade e com aparente diferença entre a estrutura da seção transversal e longitudinal. Este fato pode justificar a discrepância dos valores obtidos de dureza e composição química com os indicados pela literatura para o aço ABNT 1045.

4.3 PRÉ-TESTES

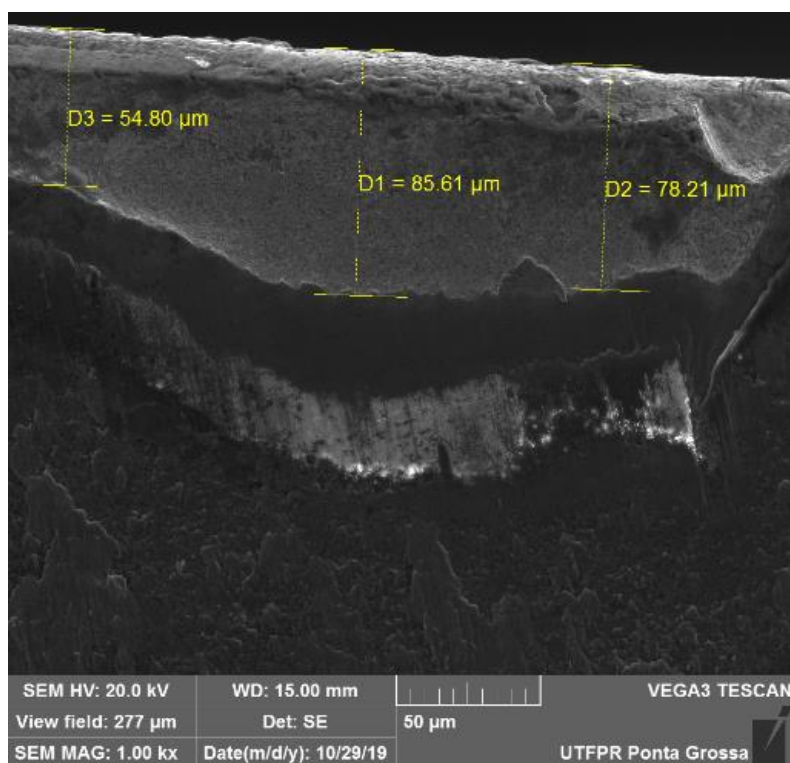
Observou-se, nos minutos iniciais de fresamento, uma considerável revelação da banda de desgaste nas arestas de corte das ferramentas. Por meio deste fato, concluiu-se que a escolha de tempos efetivos de corte de 5 minutos foi assertiva e que possibilitou um bom refinamento do comportamento do desgaste.

No entanto, para a realização de 5 minutos de fresamento, o número de passes era fracionário (2,4 passes). Com o intuito de realizar passes sem interrupção ao longo do comprimento do material usinado, estipulou-se tempos efetivos de corte de aproximadamente 6 minutos para cada condição de usinagem.

Tanto a ferramenta B como a ferramenta A também apresentam aresta primária e aresta secundária de corte. Enquanto a primeira tem muito mais influência no mecanismo de formação de cavaco, a segunda é diretamente relacionada com a

geração do acabamento da superfície usinada. Com base nisto, determinou-se que as medições de desgaste máximo de flanco seriam realizadas na aresta secundária de corte, pois é a aresta que mais interfere na geração das superfícies usinadas. O processo de medição realizado foi conforme o exemplo exposto na Figura 57.

Figura 57 - Desgaste de flanco na ferramenta A para 48,7 min de usinagem: exemplo da metodologia de medição utilizada.



Fonte: Autoria própria

O valor de desgaste máximo de flanco ($V_{B,máx}$) compreende ao maior valor de desgaste de flanco em determinada região. No caso exposto na Figura 57, o valor de $V_{B,máx}$ corresponde ao valor da medida D1, igual a 85,61 μm.

Por fim, notou-se que ambas as ferramentas foram capazes de operar até, aproximadamente, 150 minutos de usinagem. Neste ponto, apresentaram desgaste de flanco máximo de 200 μm na aresta alisadora, que foi atribuído como o valor limite de desgaste de flanco máximo ($V_{B,máx}$) para os ensaios.

4.4 RELAÇÃO ENTRE ESTADO DE DESGASTE E PERFIL DE RUGOSIDADE GERADO

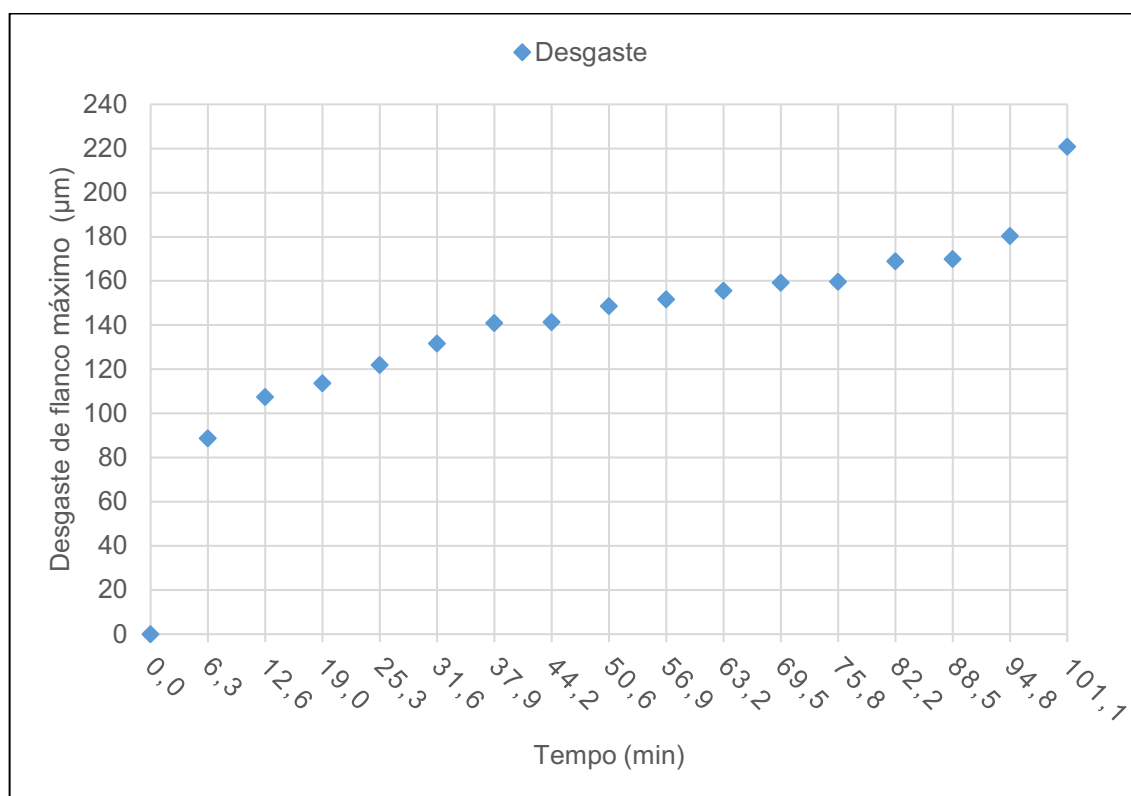
Nesta seção, buscar-se-á a relação entre o estado de degradação da ferramenta com a superfície que a mesma gera na peça, para as quatro condições de usinagem.

4.4.1 Condição 1

Os ensaios da condição 1 foram conduzidos com a utilização da ferramenta B e para velocidade de corte igual a 230 m/min e avanço por dente igual a 0,27 mm/aresta.

O Gráfico 1 apresenta os valores de desgaste máximo de flanco avaliados na superfície de folga da aresta secundária de corte.

Gráfico 1 - Valores de desgaste de flanco máximo para a condição 1.



Fonte: Autoria própria

Analisando o Gráfico 1, nota-se que a evolução do desgaste de flanco máximo ocorre de maneira crescente, sendo mais evidenciado no primeiro e no último intervalo de fresamento. Inclusive, no primeiro intervalo (6,3 minutos de usinagem), foi detectado que o revestimento foi removido por completo da região analisada na superfície de folga da aresta secundária de corte, formando um plano de desgaste nesta região que, inclusive, caracterizou o maior valor de desgaste (88,78 µm).

Observa-se ainda que, para os intervalos de fresamento que se estendem de 6,3 a 94,8 minutos, as taxas de evolução do desgaste de flanco máximo são semelhantes de um intervalo a outro. No entanto, no intervalo de 101,1 minutos, houve um aumento na magnitude do desgaste (40,44 µm) que pode ser justificado pela perda

excessiva de material da ferramenta (trincas e entalhes), que acentuaram a fragilidade da mesma, levando-a a quebra.

Cabe ressaltar ainda que, nos intervalos de 37,9 a 44,2 e 69,5 a 75,8 minutos, a evolução do desgaste de flanco foi na grandeza do décimo do micrometro, ou seja, muito discreta. Acredita-se que este fato pode ser justificado pela adesão de material na região do flanco da ferramenta, conforme pode ser visto Figura 58.

Figura 58 - Imagens do flanco da ferramenta para os dois intervalos da condição 1 onde houve baixa evolução no desgaste: 37,9 min, 44,2 min, 69,5 min e 75,8 min.

(Continua)

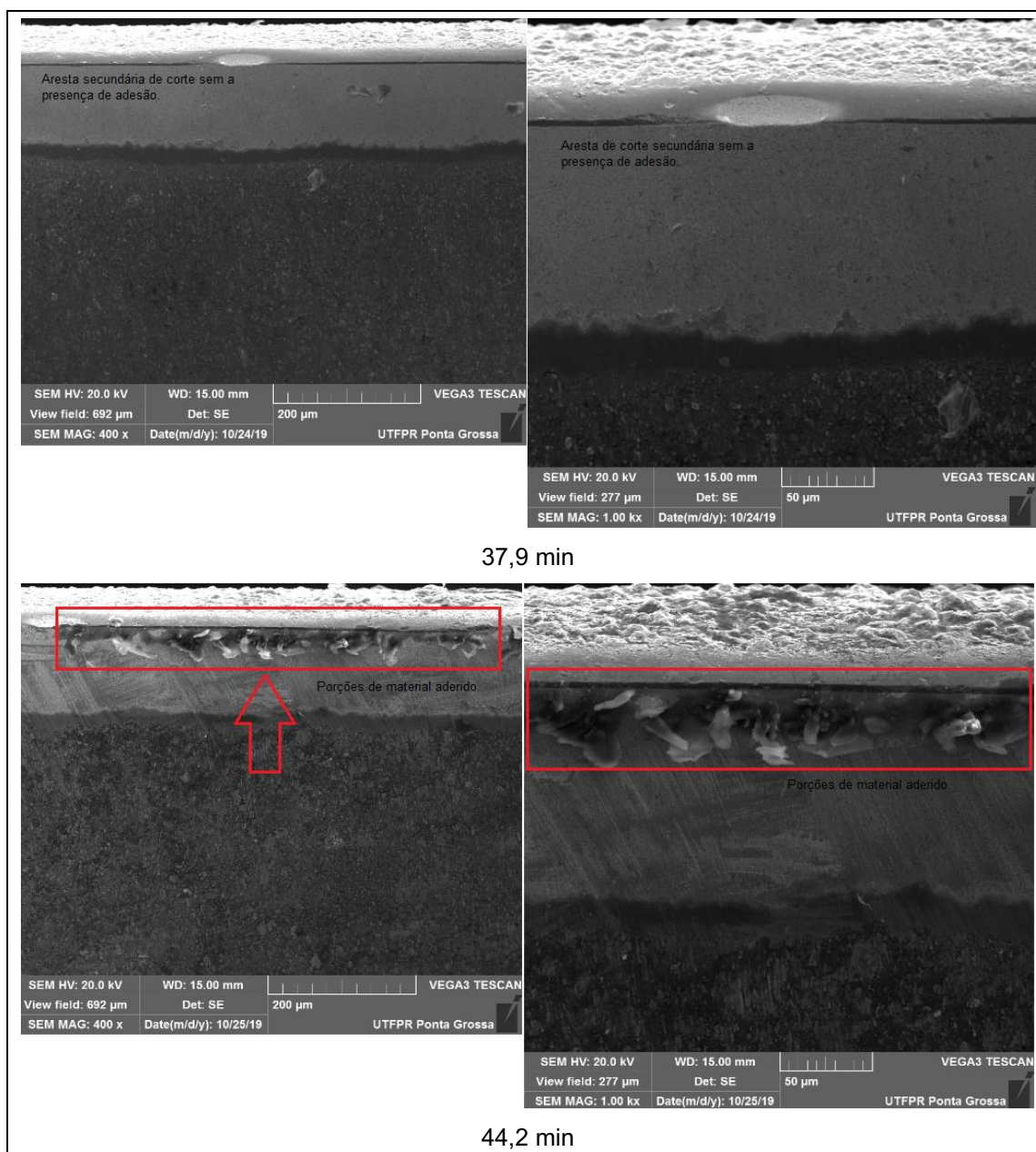
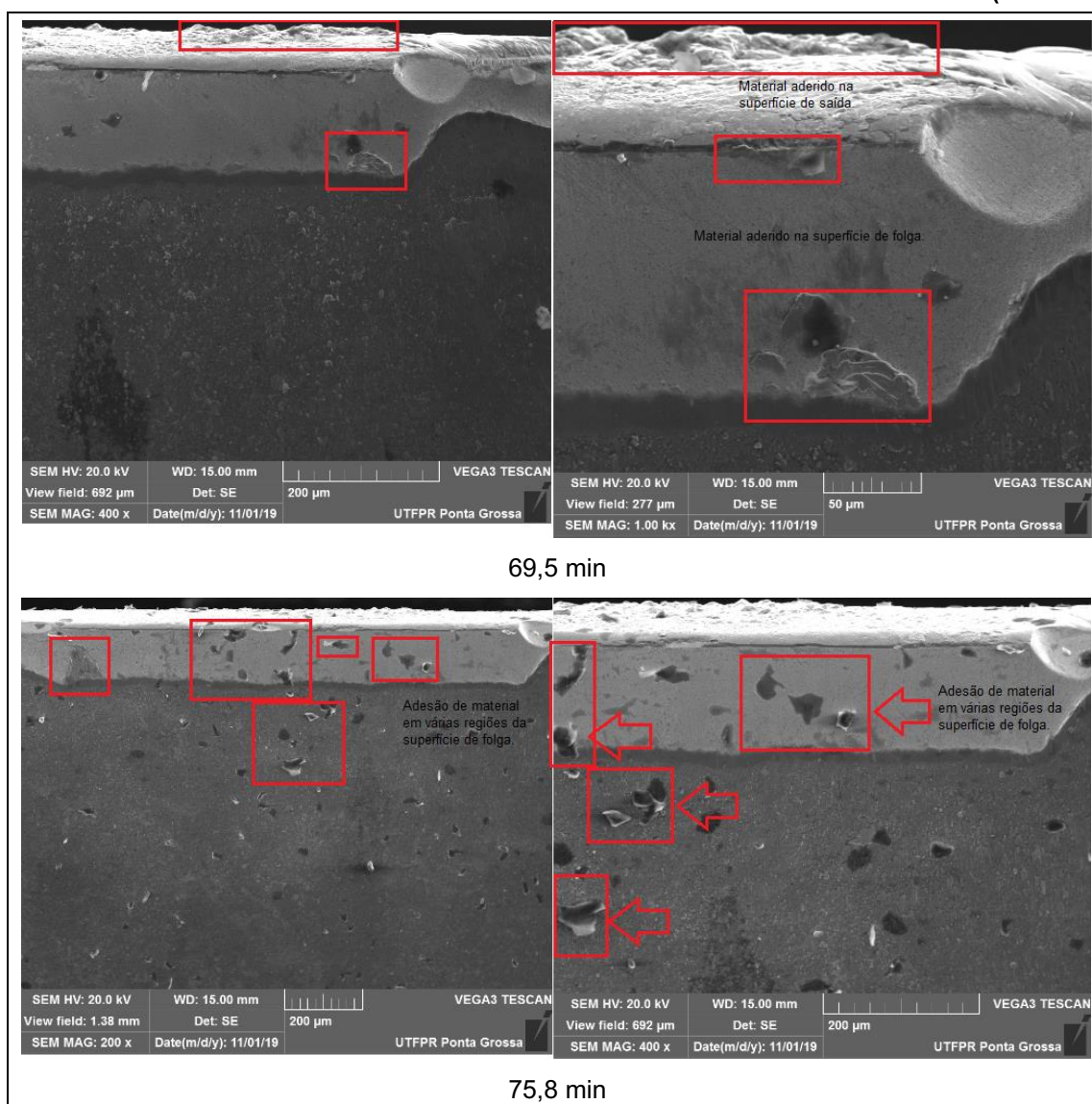


Figura 58 - Imagens do flanco da ferramenta para os dois intervalos da condição 1 onde houve baixa evolução no desgaste: 37,9 min, 44,2 min, 69,5 min e 75,8 min.

(Conclusão)



Como observado na Figura 58, não há material aderido na superfície de folga da aresta secundária de corte para o intervalo de 37,9 min. No entanto, em 44,2 min, nota-se o surgimento de várias porções de material aderidas naquela mesma região. Acredita-se, portanto, que este material aderiu entre os intervalos de 37,9 min e 44,2 min e, deste modo, teve participação na redução da evolução do valor de desgaste entre estes dois intervalos, visto que o material aderido pode ter agido como uma camada protetora desta região ao não deixa-la exposta ao atrito com a superfície da peça. Uma condição muito semelhante pode ser observada entre os intervalos 69,5 min e 75,8 min.

É importante salientar ainda que, mesmo que apenas o desgaste de flanco máximo na aresta secundária de corte tenha sido acompanhado quantitativamente, outros tipos de desgaste foram monitorados de maneira qualitativa. Neste sentido, foram observadas trincas na aresta de corte primária da ferramenta em minutos iniciais (12,6 minutos) de fresamento; estas trincas se propagaram até que favoreceram o entalhe e a quebra da ferramenta, conforme a Figura 59.

Figura 59 - Acompanhamento das trincas térmicas, no ensaio da condição 1, na aresta de corte primária, para: 12,6 min, 31,6 min, 44,2 min, 50,6 min, 94,8 min e 101,1 min.

(Continua)

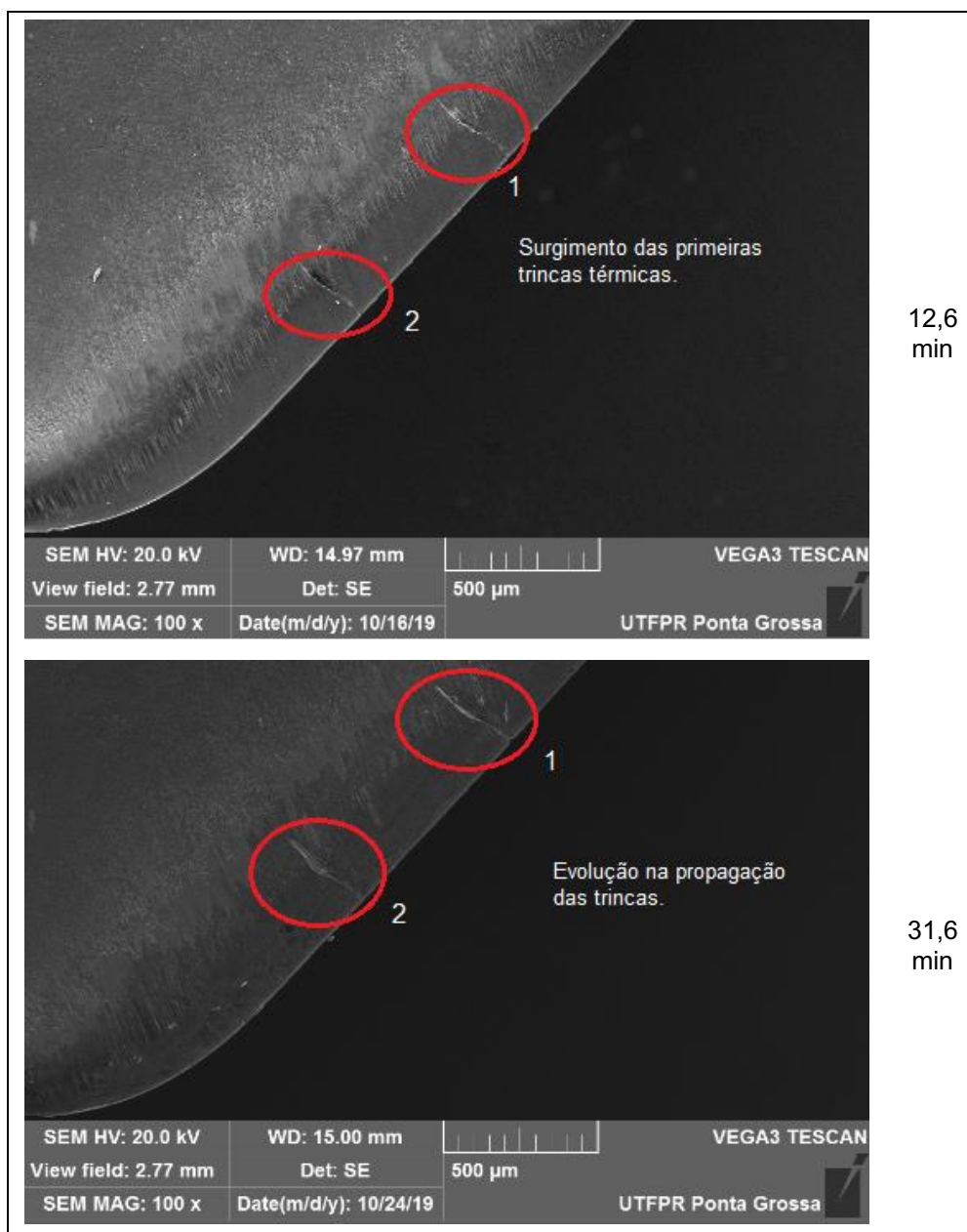


Figura 59 - Acompanhamento das trincas térmicas, no ensaio da condição 1, na aresta de corte primária, para: 12,6 min, 31,6 min, 44,2 min, 50,6 min, 94,8 min e 101,1 min.

(Continua)

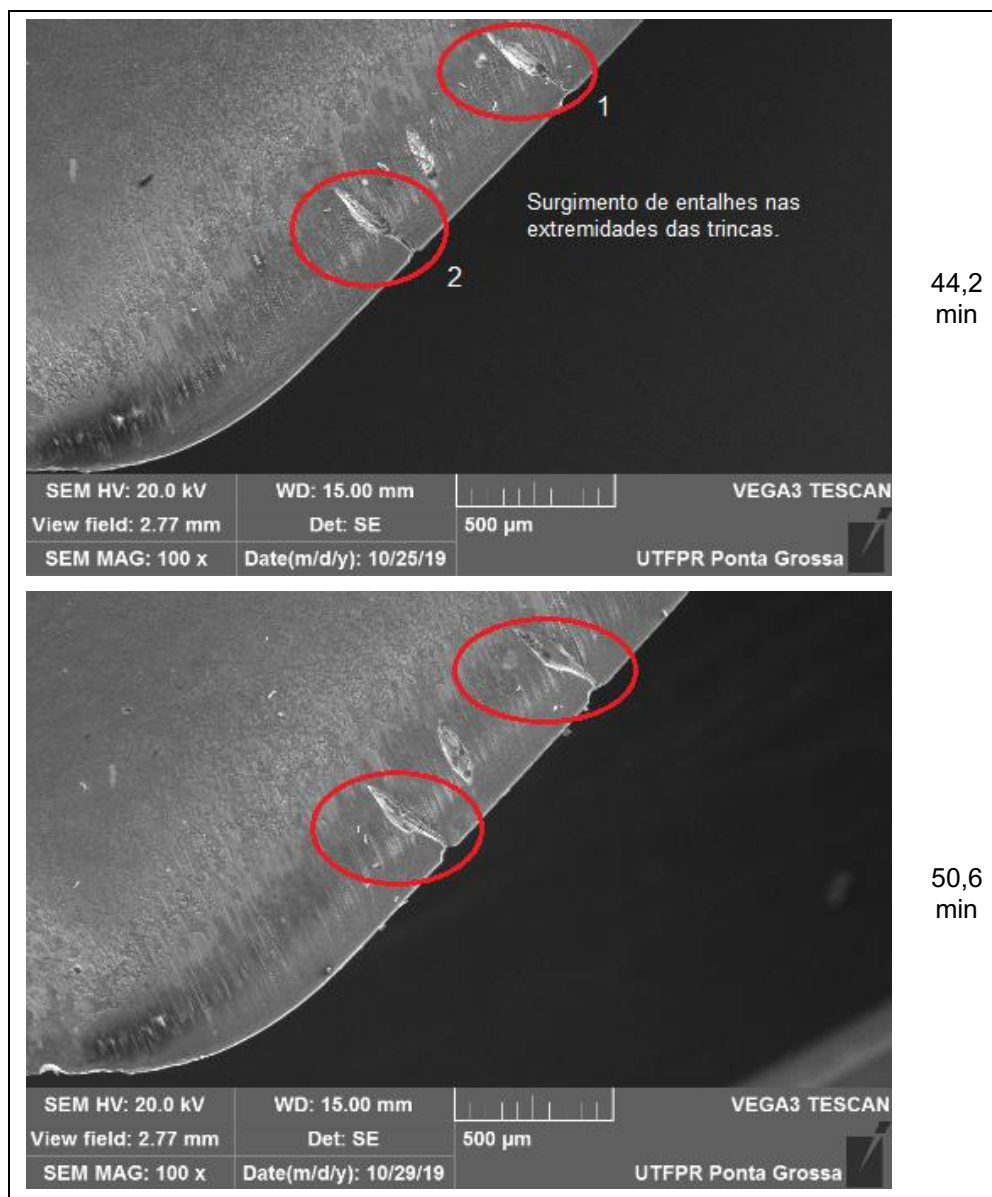
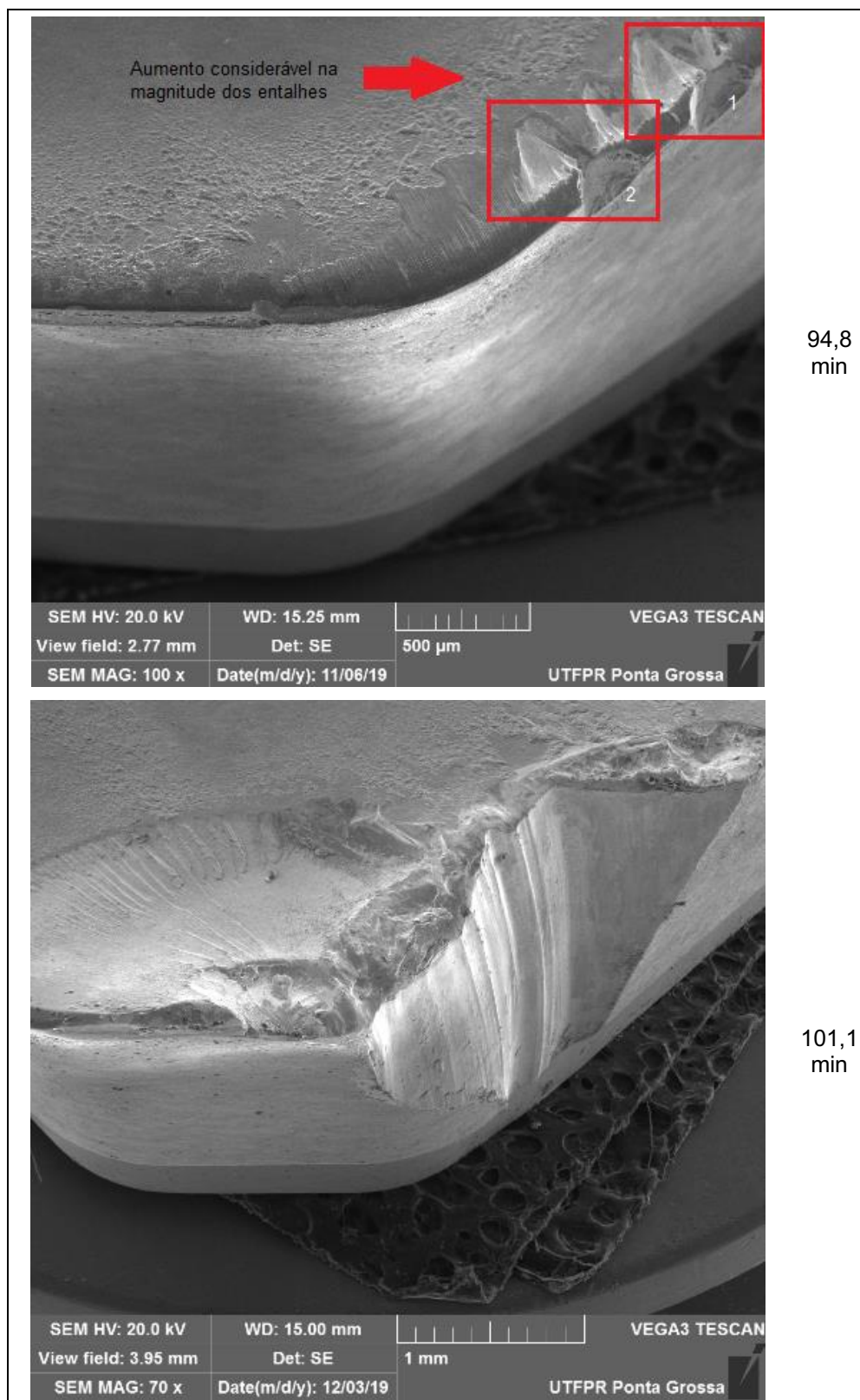


Figura 59 - Acompanhamento das trincas térmicas, no ensaio da condição 1, na aresta de corte primária, para: 12,6 min, 31,6 min, 44,2 min, 50,6 min, 94,8 min e 101,1 min.

(Conclusão)



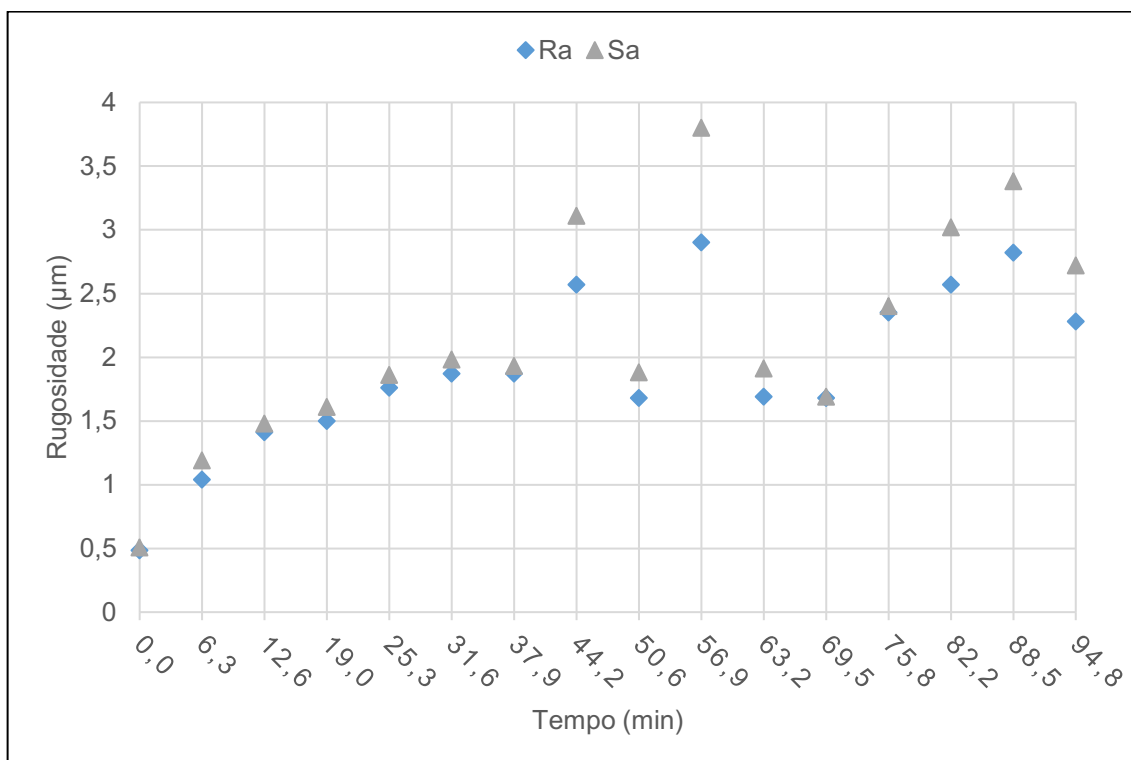
Fonte: Autoria própria

Segundo Stephenson e Agapiou (2016), trincas na direção perpendicular da aresta de corte são consideradas de origem térmica, ou seja, oriundas de variações térmicas provenientes do processo de usinagem. Com isso, observando a Figura 59, conclui-se que as trincas que surgem na ferramenta são térmicas e que passam a se propagar com grande intensidade ao longo dos ensaios até o intervalo de 94,8 minutos, onde surgem dois entalhes de grande magnitude por consequência do aumento da propagação. É importante salientar que o valor da distância entre a extremidade da ferramenta até a trinca 1 (Figura 59) coincide com o valor da profundidade de corte de 1,5 mm utilizada nos ensaios. Por fim, com a perda excessiva de material na aresta de corte, por consequência do entalhe e do desgaste de flanco máximo elevado, a ferramenta quebrou no intervalo de 101,1 minutos de fresamento.

Seguindo observando a aresta de corte primária, notou-se que a evolução das trincas térmicas e dos entalhes não geravam variações consideráveis nos valores de rugosidade, ou seja, os parâmetros de rugosidade não eram tão sensíveis à medida que a aresta de corte primária sofria desgaste. Frente a esta observação e partindo da premissa de que a aresta secundária de corte é a que tem a maior parcela de responsabilidade na geração da superfície usinada da peça, passou-se a analisar e relacionar as evoluções de desgaste desta região com os parâmetros de rugosidade.

O primeiro parâmetro avaliado e exposto é o da rugosidade média: R_a , para as medições realizadas na direção do avanço e; S_a para os valores de rugosidade média avaliados na área da amostragem e com leitura na direção do avanço. Estes parâmetros permitem uma avaliação genérica do perfil de rugosidade e seus valores foram dispostos no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Rugosidade média para a condição 1.



Fonte: Autoria própria

Como pode-se observar no Gráfico 2, a ferramenta, enquanto nova, apresenta o menor valor de rugosidade média e, a partir disto, os valores apresentam um comportamento com tendência de crescimento, conforme o esperado, até 44,2 minutos de usinagem. Após este intervalo, perde-se aquele comportamento com tendência e os valores de rugosidade passam a apresentar grande variação, com alternância entre crescimentos e decréscimos.

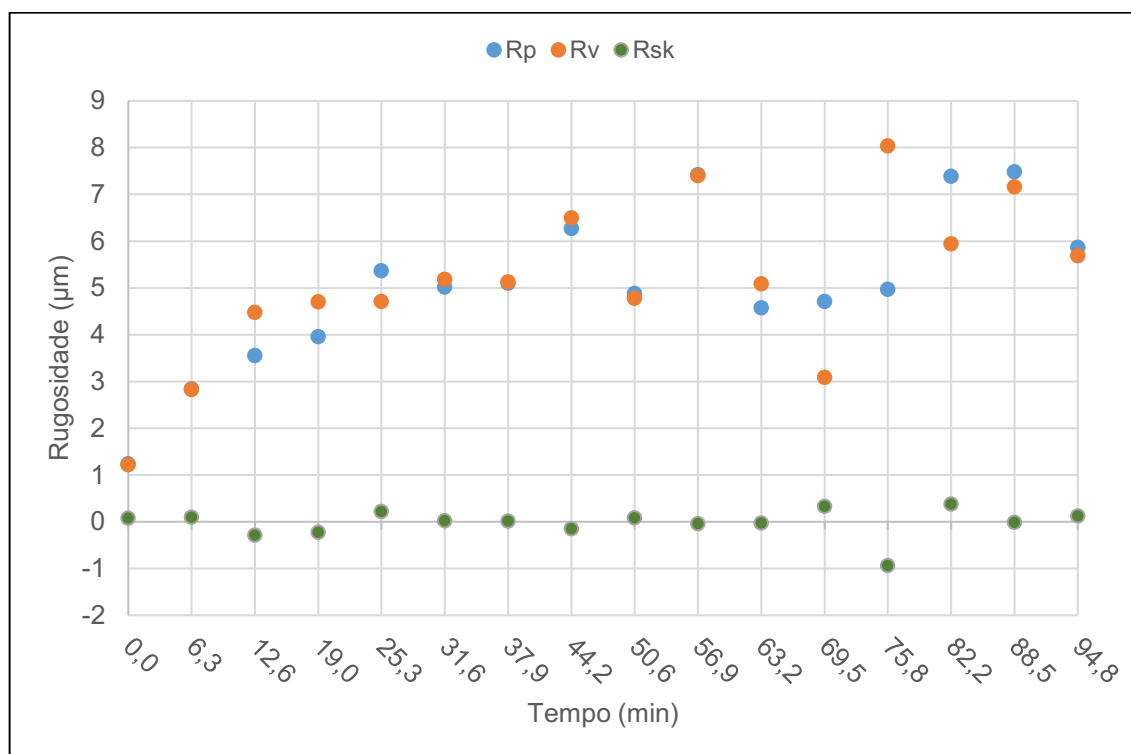
Nota-se ainda que, em alguns intervalos a partir de 44,2 min, os valores de Sa e Ra passam a ter uma diferença maior. Acredita-se que este fato ocorra pelo fato de que a ferramenta já apresentava uma evolução de desgaste considerável e, deste modo, passa a imprimir uma superfície cada vez mais irregular na peça; como o parâmetro Sa, diferente de Ra, faz a leitura em área, torna-se mais sensível às irregularidades impressas pela aresta secundária da ferramenta na peça.

Cabe salientar ainda que, como houve a quebra da ferramenta no último intervalo de fresamento (101,1 min), não foi possível fazer a impressão da superfície da última amostra e, portanto, foi impossível monitorar os valores de rugosidade nesta etapa. Esta atitude foi tomada com o intuito de preservar a integridade do cabeçote fresador.

Com o intuito de explicar este comportamento alternado e sem tendência, foram selecionados alguns parâmetros geométricos de rugosidade: altura máxima de pico (R_p e S_p), profundidade máxima de vale (R_v e S_v) e fator de assimetria ou *skewness* (R_{sk} e S_{sk}). Os mesmos foram selecionados pois também sofriam alterações significativas em seus valores ao longo dos intervalos de fresamento. Além disso, observou-se ainda que o fator de assimetria (ou *skewness*) apresenta tendência a ter valores negativos a medida que os vales aumentam em relação aos picos, por exemplo.

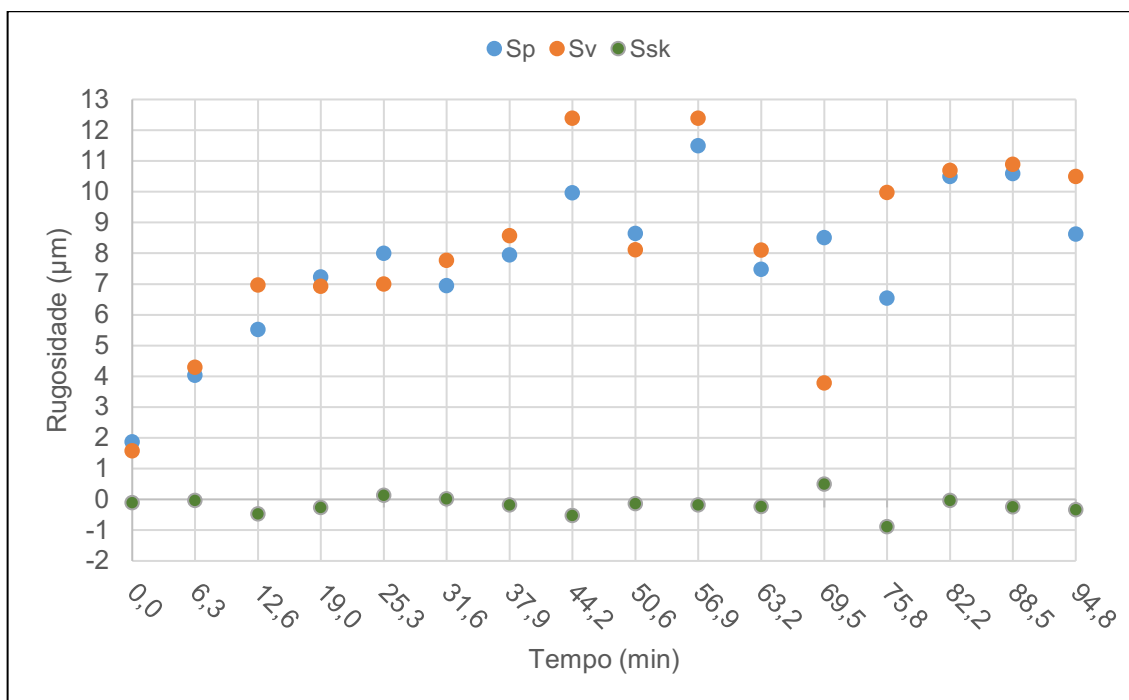
O Gráfico 3 e o Gráfico 4 expõem os valores de altura máxima de pico, profundidade máxima de vale e fator de assimetria avaliados em linha e na área de amostragem, respectivamente.

Gráfico 3 - Rugosidade de pico, de vale e fator de assimetria, avaliados em linha, para condição 1.



Fonte: Autoria própria

Gráfico 4 - Rugosidade de pico, de vale e fator de assimetria, avaliados em área de amostragem, para a condição 1.



Fonte: Autoria própria

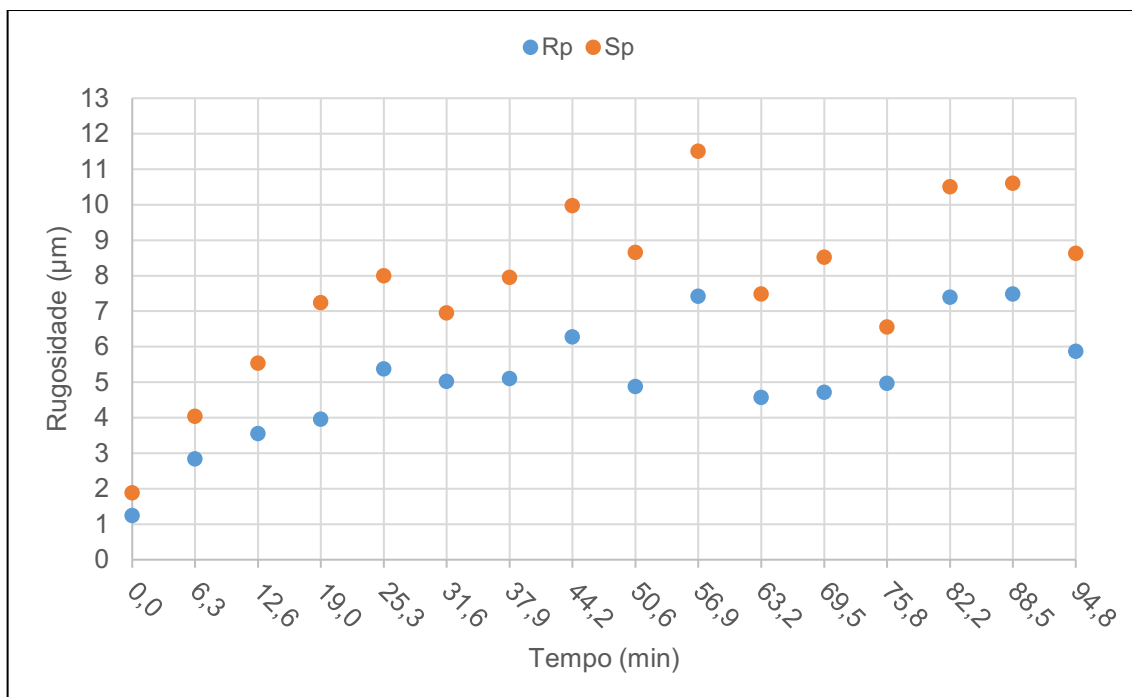
Analisando o Gráfico 3 e o Gráfico 4, nota-se que a tendência de comportamento é semelhante aos da rugosidade média, ou seja, quando há o aumento da rugosidade média (S_a ou R_a) há também o aumento dos conjuntos dos parâmetros de pico e vale (S_p/R_p e S_v/R_v). Além do mais, pode-se observar que quando a quantidade de vales é muito maior que a de picos, os valores de *skewness* tendem a diminuir e ficar negativos e, quando o número de picos é muito maior que o de vales, estes valores são positivos.

Cabe lembrar que, como exposto por Gadelmawla et. al (2002), valores de *skewness* negativos representam superfícies onde houve a remoção dos picos. Desta forma, na prática de usinagem, acredita-se que superfícies com estes valores negativos são geradas por deformação do material e não através da remoção por cisalhamento. Nestes casos, aumenta-se o grau de dificuldade em relacionar aresta de corte e superfície usinada.

Por fim, no Gráfico 5 e no Gráfico 6, estão expostos os valores dos parâmetros de rugosidade S e R, para análise dos picos e vales. O objetivo destes gráficos é permitir a análise da diferença entre os valores dos parâmetros S (que representam a área de amostragem) e dos parâmetros R. Nota-se que, como para a rugosidade

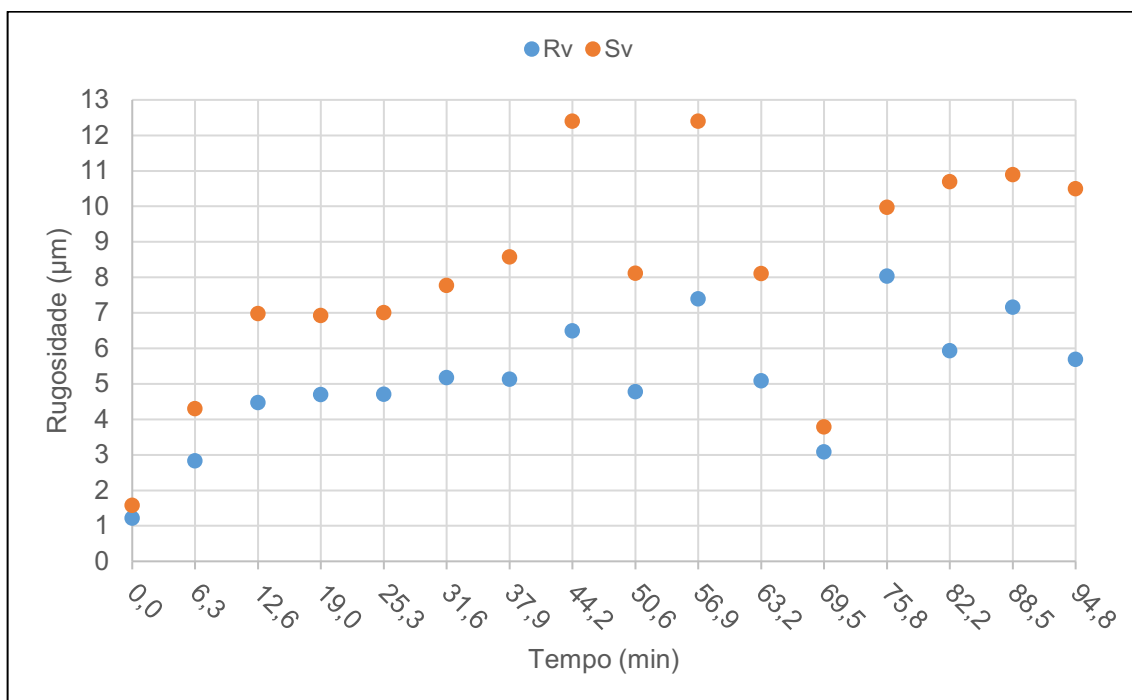
média, os valores indicados pelos parâmetros S são ligeiramente maiores e, novamente, apresentam a maior diferença nos intervalos 44,2 min e 56,9 min.

Gráfico 5 - Comparativo entre os valores de Rp e Sp, para a condição 1.



Fonte: Autoria própria

Gráfico 6 - Comparativo entre os valores de Rv e Sv, para a condição 1.

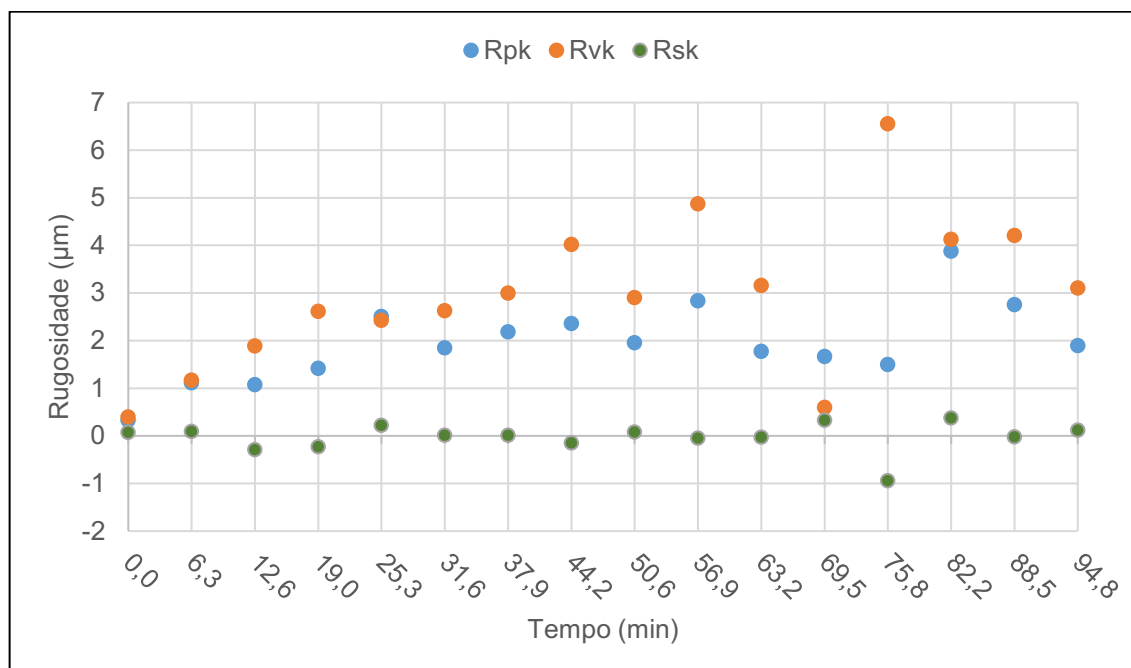


Fonte: Autoria própria

Buscando ainda uma análise do perfil topográfico da superfície, analisou-se os parâmetros de *skewness* (R_{sk} e S_{sk}) e alguns parâmetros extraídos das curvas

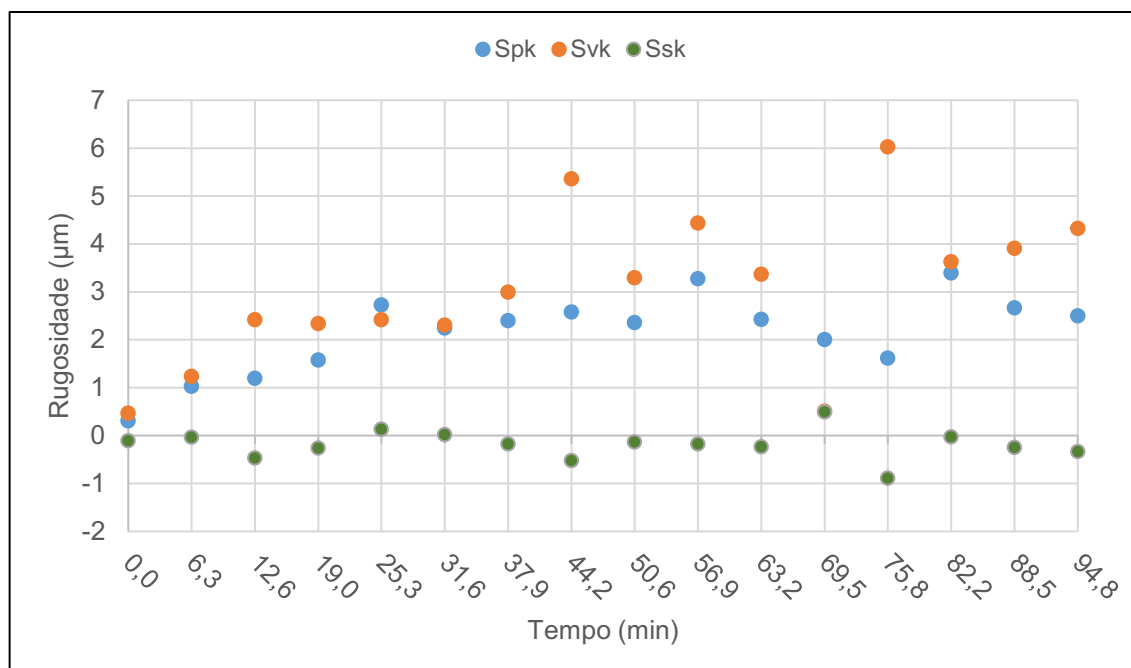
Abbott Firestone: altura reduzida de picos (Rpk e Spk) e profundidade reduzida de vales (Rvk e Svk).

Gráfico 7 - Altura reduzida de picos, profundidade reduzida de vales e *skewness*, avaliados em linha, para a condição 1.



Fonte: Autoria própria

Gráfico 8 - Altura reduzida de picos, profundidade reduzida de vales e *skewness*, avaliados em área de amostragem, para a condição 1.



Fonte: Autoria própria

Observando o Gráfico 7 e o Gráfico 8, nota-se, já em minutos iniciais de fresamento, a presença considerável de picos e vales sobressalentes ao perfil médio

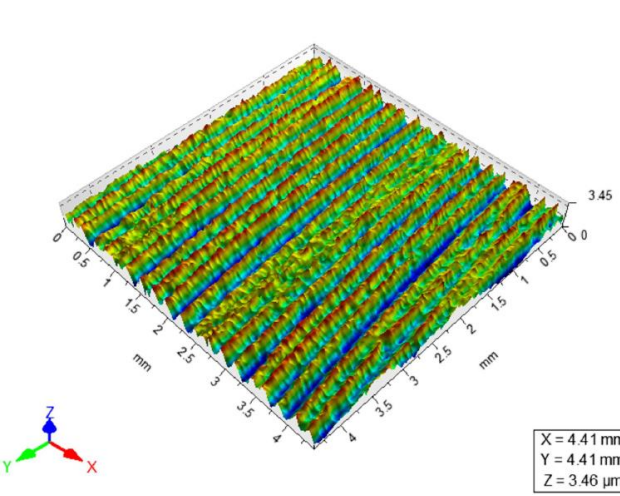
de rugosidade. A partir de 25,3 minutos de usinagem, os parâmetros R_{pk} e R_{vk} passam a apresentar um comportamento sem tendência, no entanto é nítido que os vales sobressalentes têm maior predominância que os picos na maioria dos intervalos, acarretando em perfis gerados por deformação e com picos removidos (*skewness* negativo).

Acredita-se que este comportamento ocorra pela adesão de material na aresta de corte da ferramenta ao longo do fresamento, porque estas porções de material aderido formam volumes adicionais temporários e irregulares na aresta da ferramenta, gerando superfícies com vales mais profundos e, conseqüentemente, com valores de R_{vk} maiores. Cabe ressaltar que, à medida que o fresamento ocorre, estes materiais são removidos da aresta, justificando a oscilação dos valores de vale da superfície usinada.

Por fim, para buscar um esclarecimento para o comportamento sem tendência dos valores de rugosidade e esta alternância entre picos e vales no perfil, recorreu-se a uma comparação entre o estado de degradação da ferramenta e o perfil topográfico do material usinado, conforme Quadro 2.

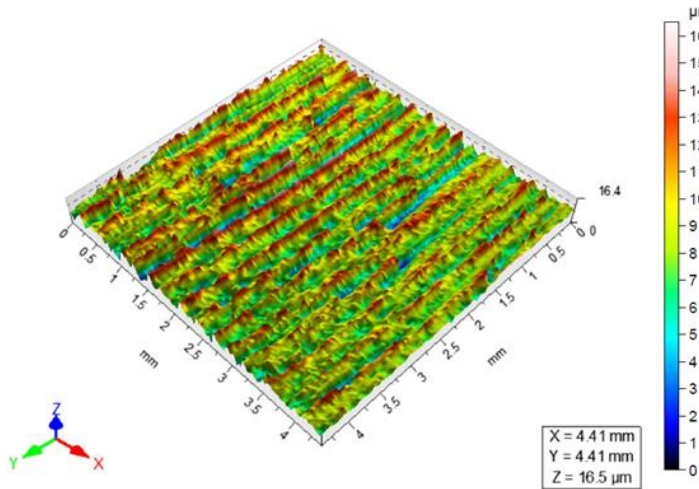
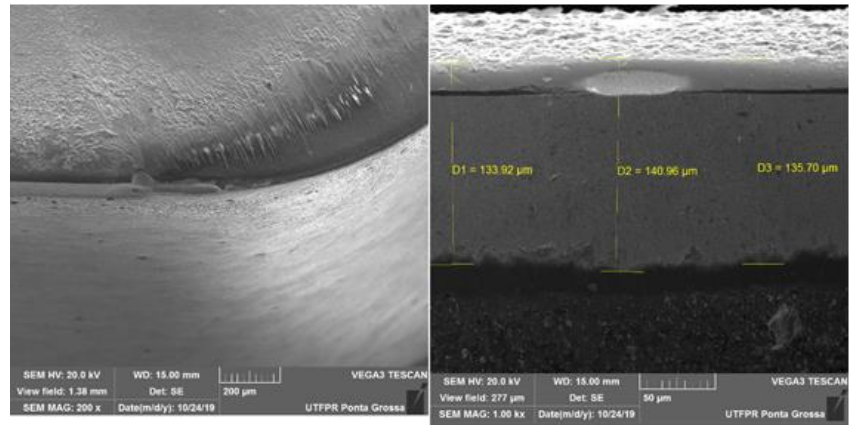
Quadro 2 - Comparação entre estado de degradação da aresta secundária da ferramenta e perfil topográfico da superfície usinada para alguns intervalos de fresamento da condição 1.

(Continua)

FERRAMENTA NOVA		$R_a=0,49 \mu\text{m}$ $S_a=0,51 \mu\text{m}$ $R_p=1,24 \mu\text{m}$ $S_p=1,88 \mu\text{m}$ $R_v=1,25 \mu\text{m}$ $S_v=1,58 \mu\text{m}$ $R_{sk}=0,08$ $S_{sk}=-0,11$ $R_{pk}=0,33 \mu\text{m}$ $S_{pk}=0,31 \mu\text{m}$ $R_{vk}=0,4 \mu\text{m}$ $S_{vk}=0,469 \mu\text{m}$
<p>Superfície gerada pela impressão da ferramenta enquanto nova; nota-se um valor reduzido de rugosidade média, inclusive com valores próximos para os parâmetros R e S, apontando regularidade no perfil da amostra. Observa-se ainda que os parâmetros que avaliam os picos e os vales apresentam valores próximos, demonstrando simetria geométrica do perfil.</p>		

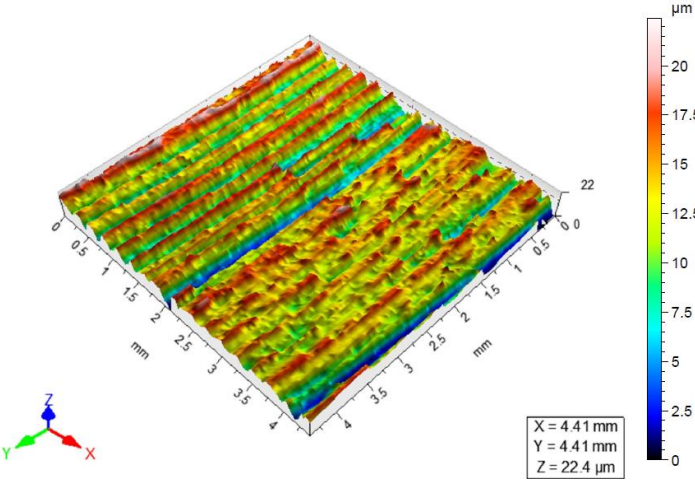
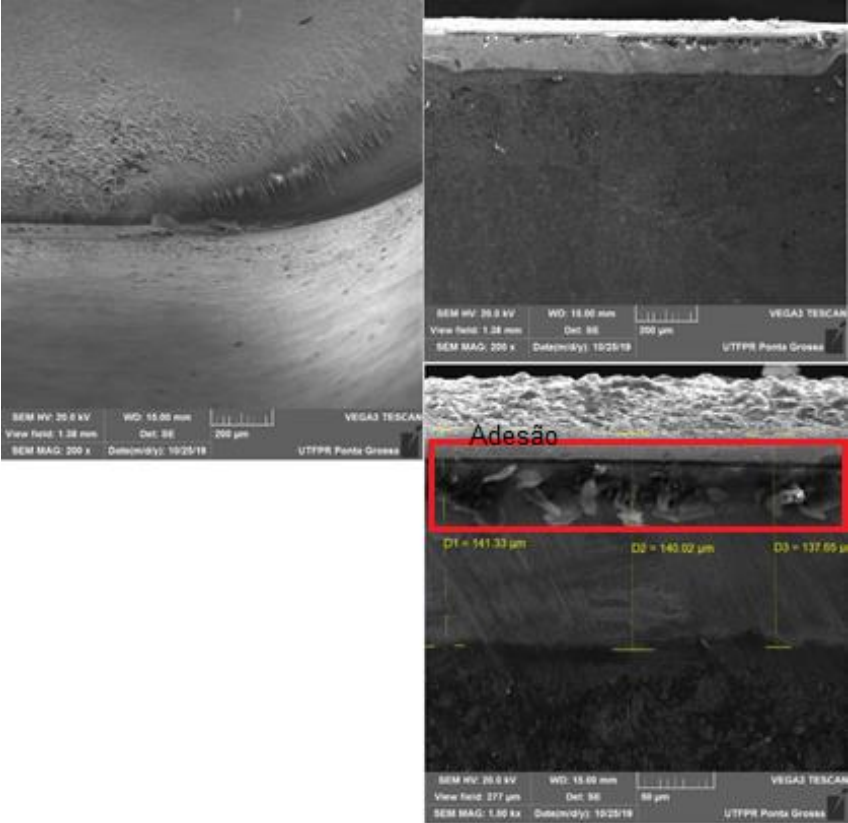
Quadro 2 - Comparação entre estado de degradação da aresta secundária da ferramenta e perfil topográfico da superfície usinada para alguns intervalos de fresamento da condição 1.

(Continua)

37,9 MINUTOS		<p> $R_a=1,87 \mu\text{m}$ $S_a=1,93 \mu\text{m}$ $R_p=5,02 \mu\text{m}$ $S_p=7,95 \mu\text{m}$ $R_v=5,18 \mu\text{m}$ $S_v=8,58 \mu\text{m}$ $R_{sk}=0,02$ $S_{sk}=-0,17$ $R_{pk}=2,19 \mu\text{m}$ $S_{pk}=2,40 \mu\text{m}$ $R_{vk}=3 \mu\text{m}$ $S_{vk}=3 \mu\text{m}$ </p>
		<p>$V_{B,max}=140,96 \mu\text{m}$</p>
<p>Apesar de estar em minutos iniciais, o valor de desgaste de flanco máximo já estava próximo de 71% do valor estipulado como parada para os ensaios (200 μm). Fazendo uma análise quantitativa, nota-se que, para análise dos parâmetros R, trata-se de um perfil simétrico e com um valor de <i>skewness</i> próximo de zero; no entanto, ao se analisar os parâmetros S, trata-se de uma superfície com muitos vales e <i>skewness</i> negativo. Por fim, analisando o mapa topográfico, verifica-se que há grandes porções onde as trilhas não estão bem caracterizadas visto que não há uma sequência bem definida entre picos e vales.</p>		

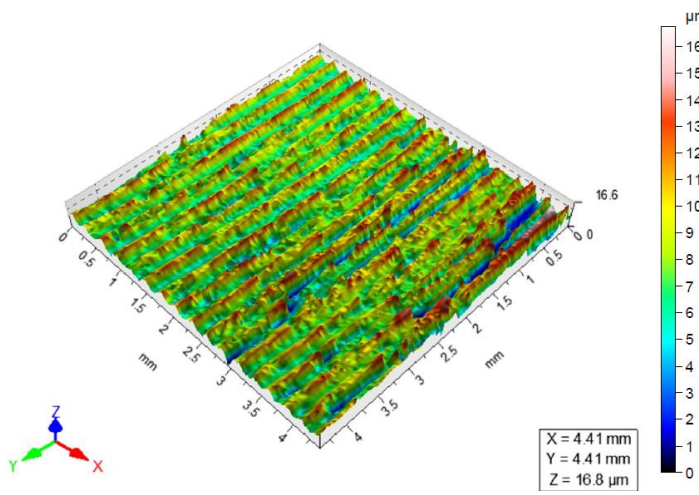
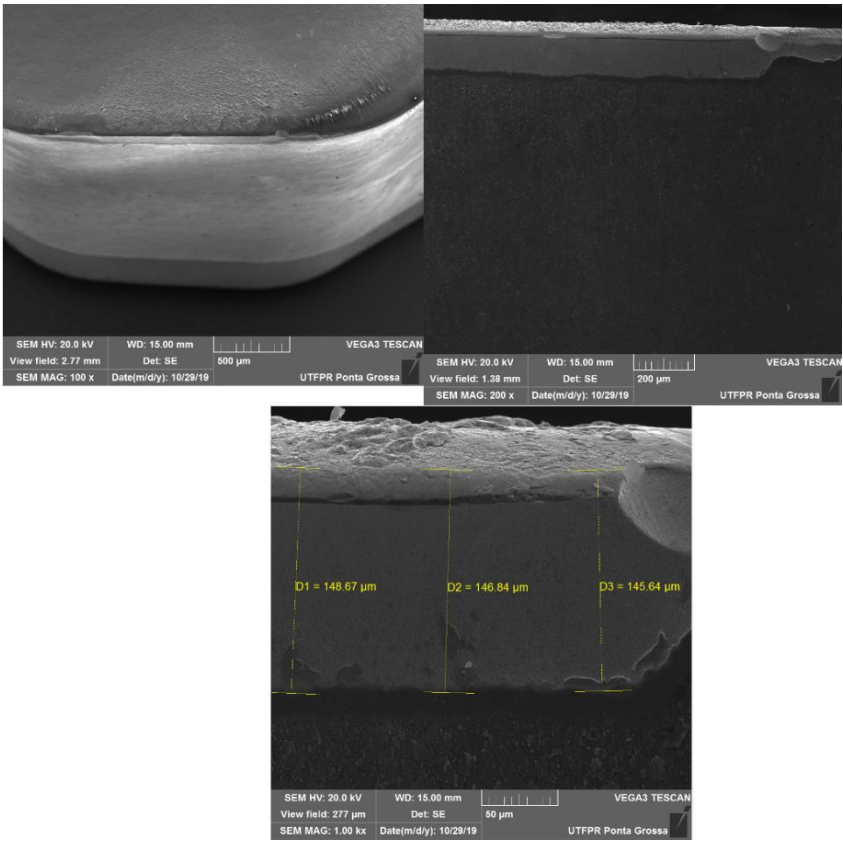
Quadro 2 - Comparação entre estado de degradação da aresta secundária da ferramenta e perfil topográfico da superfície usinada para alguns intervalos de fresamento da condição 1.

(Continua)

	 <p>X = 4,41 mm Y = 4,41 mm Z = 22,4 μm</p>	<p>Ra=2,57 μm Sa=3,11 μm Rp=6,27 μm Sp=9,97 μm Rv=6,5 μm Sv=12,4 μm Rsk=0,02 Ssk=-0,52 Rpk=2,36 μm Spk=2,58 μm Rvk=4,02 μm Svk=5,36 μm</p>
<p>44,2 MINUTOS</p>		<p>$V_{B,max}=141,33 \mu\text{m}$.</p> <p>Grande quantidade de material aderido na superfície de saída, de folga e dentro das cavidades de lascamento.</p>
<p>Uma análise qualitativa da topografia da peça, demonstra duas características quanto a morfologia do perfil de rugosidade: enquanto a área que compreende de 0 a 2 mm (no eixo x) representa ser uma superfície simétrica geometricamente e com a presença de picos e vales bem característicos, a área de 2 a 4,5 mm (no eixo x) representa uma superfície sem a característica de trilhas de usinagem, dificultando a visualização dos picos e dos vales; acredita-se que este fato justifique a grande divergência entres os valores de Ra e Sa. Por fim, acredita-se que a ausência de trilhas de usinagem bem características naquela região foi devido a adesão de material na ferramenta (conforme apontado na imagem da ferramenta), visto que este material aderido acabou gerando vales mais irregulares e picos mais largos.</p>		

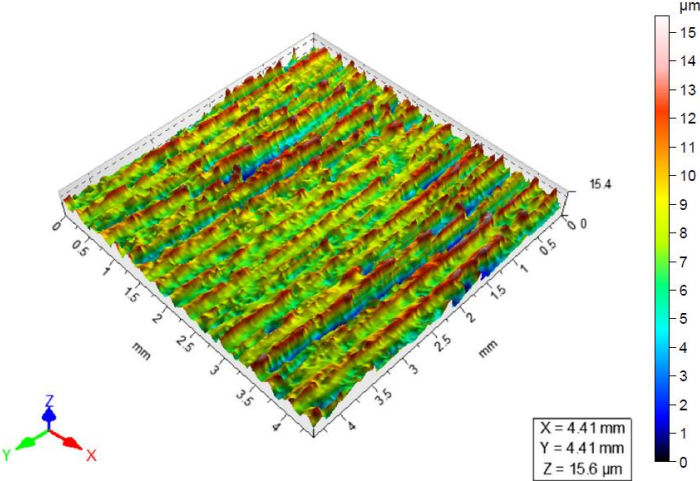
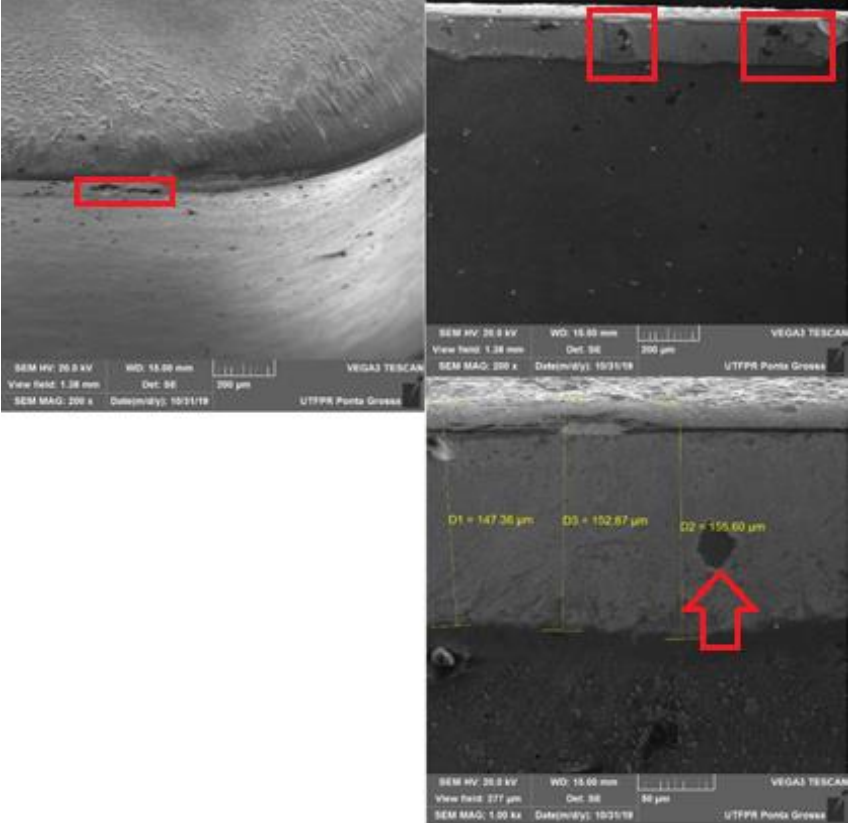
Quadro 2 - Comparação entre estado de degradação da aresta secundária da ferramenta e perfil topográfico da superfície usinada para alguns intervalos de fresamento da condição 1.

(Continua)

		<p> $Ra=1,68 \mu\text{m}$ $Sa=1,88 \mu\text{m}$ $Rp=4,88 \mu\text{m}$ $Sp=8,65 \mu\text{m}$ $Rv=4,78 \mu\text{m}$ $Sv=8,12 \mu\text{m}$ $Rsk=0,09$ $Ssk=-0,13$ $Rpk=1,96 \mu\text{m}$ $Spk=2,36 \mu\text{m}$ $Rvk=2,91 \mu\text{m}$ $Svk=3,3 \mu\text{m}$ </p>
<p>50,6 MINUTOS</p>		<p>$V_{B,max}=145,64 \mu\text{m}$.</p> <p>Redução na quantidade de material aderido, tanto na superfície de saída quanto na de folga.</p>
<p>Comparando ao intervalo anterior (44,24 min), acredita-se que a melhora da simetria geométrica do perfil e a diminuição de regiões com ausência de trilhas de usinagem ocorreram pela remoção do material aderido na aresta de corte da ferramenta.</p>		

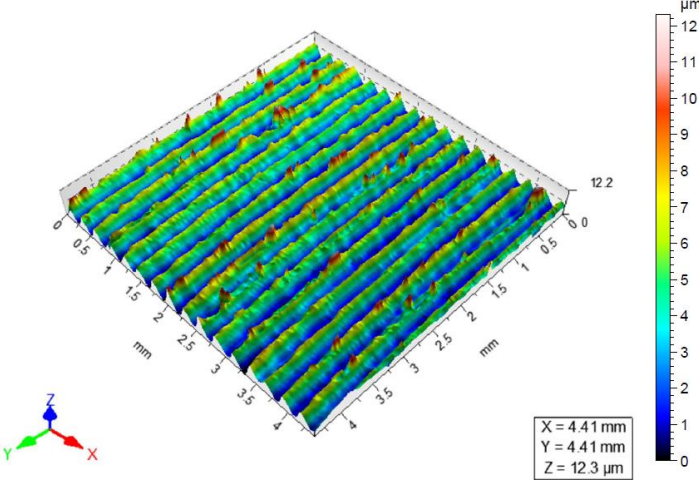
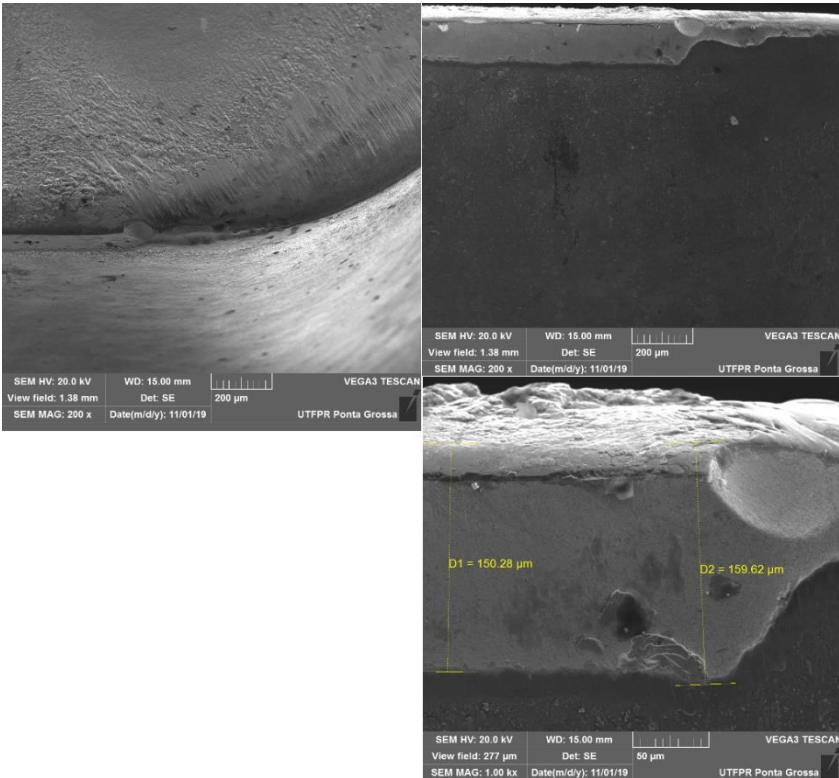
Quadro 2 - Comparação entre estado de degradação da aresta secundária da ferramenta e perfil topográfico da superfície usinada para alguns intervalos de fresamento da condição 1.

(Continua)

	 <p>X = 4,41 mm Y = 4,41 mm Z = 15,6 µm</p>	<p>Ra=1,69 µm Sa=1,91 µm Rp=4,57 µm Sp=7,48 µm Rv=5,09 µm Sv=8,11 µm Rsk=-0,03 Ssk=-0,23 Rpk=1,78 µm Spk=2,43 µm Rvk=3,10 µm Svk=3,37 µm</p>
<p>63,2 MINUTOS</p>		<p>$V_{B,max}=155,60 \mu\text{m}$.</p> <p>Acúmulo de placas de adesão na região da superfície de folga da ferramenta.</p>
<p>Nota-se que os valores de rugosidade média deste intervalo, são muito próximos dos do intervalo de 50,56 min, no entanto, são perfis completamente diferentes sob uma análise geométrica. Neste caso, nota-se um perfil muito mais picos removidos causado, provavelmente, pela presença das placas de adesão presentes na ferramenta.</p>		

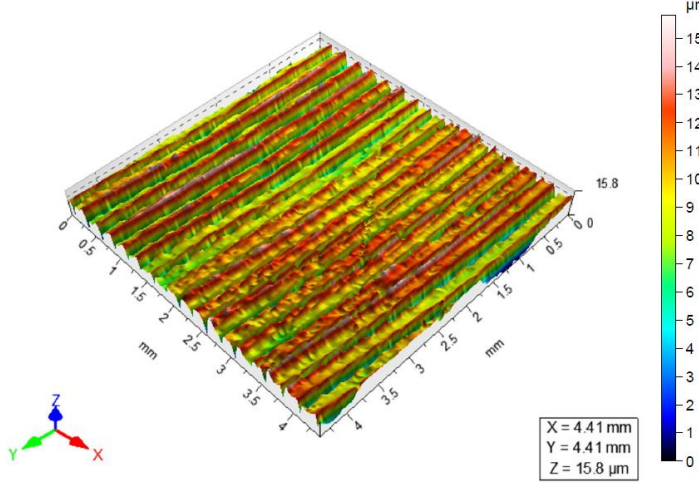
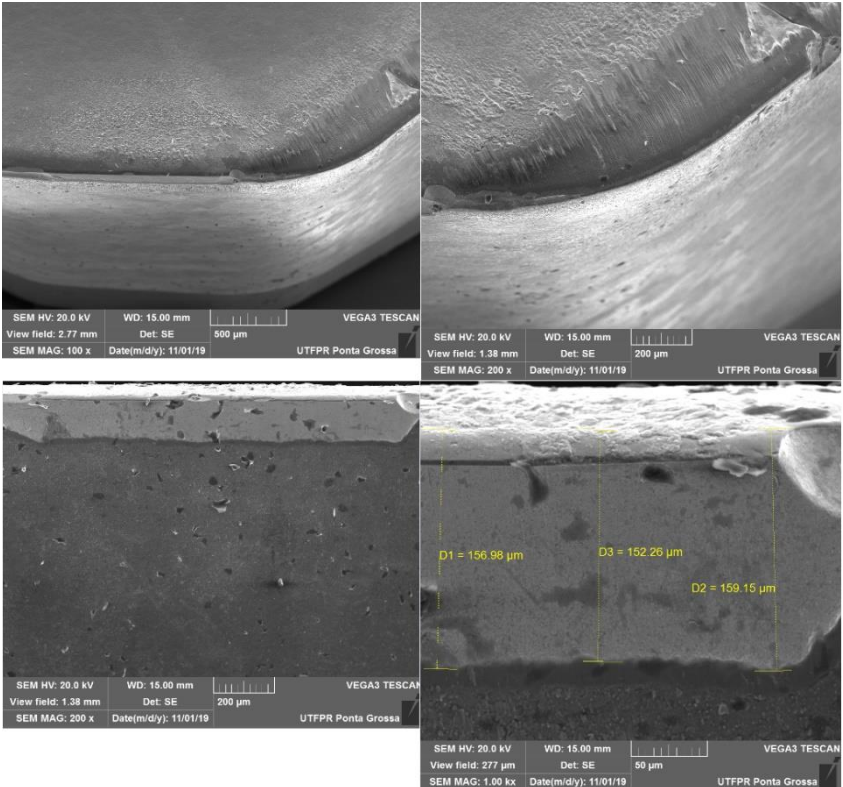
Quadro 2 - Comparação entre estado de degradação da aresta secundária da ferramenta e perfil topográfico da superfície usinada para alguns intervalos de fresamento da condição 1.

(Continua)

		<p> $R_a=1,68 \mu\text{m}$ $S_a=1,69 \mu\text{m}$ $R_p=4,71 \mu\text{m}$ $S_p=8,52 \mu\text{m}$ $R_v=3,09 \mu\text{m}$ $S_v=3,79 \mu\text{m}$ $R_{sk}=-0,33$ $S_{sk}=0,50$ $R_{pk}=1,67 \mu\text{m}$ $S_{pk}=2,01 \mu\text{m}$ $R_{vk}=0,60 \mu\text{m}$ $S_{vk}=0,51 \mu\text{m}$ </p>
<p>69,5 MINUTOS</p>		<p>$V_{B,max}=159,62\mu\text{m}.$</p>
<p>Pode-se observar que os valores de rugosidade média são muito próximos dos da amostra do intervalo anterior (63,2 min) apesar de serem perfis completamente diferentes. Como não há muito material aderido na ferramenta, acredita-se que, com o rompimento das placas de adesão, a ferramenta passou a apresentar comportamento distinto no mecanismo de formação de cavaco e, conseqüentemente, na geração da superfície da peça. Neste caso, identifica-se uma superfície com maior quantidade de picos e <i>skewness</i> positivo, diferente dos outros intervalos de fresamento.</p>		

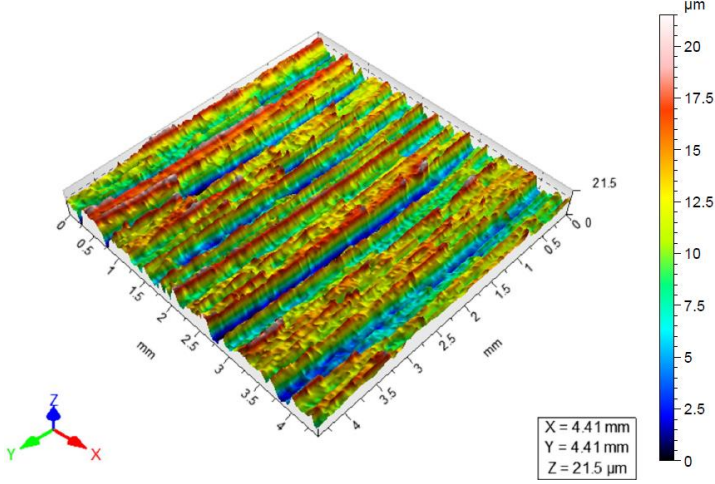
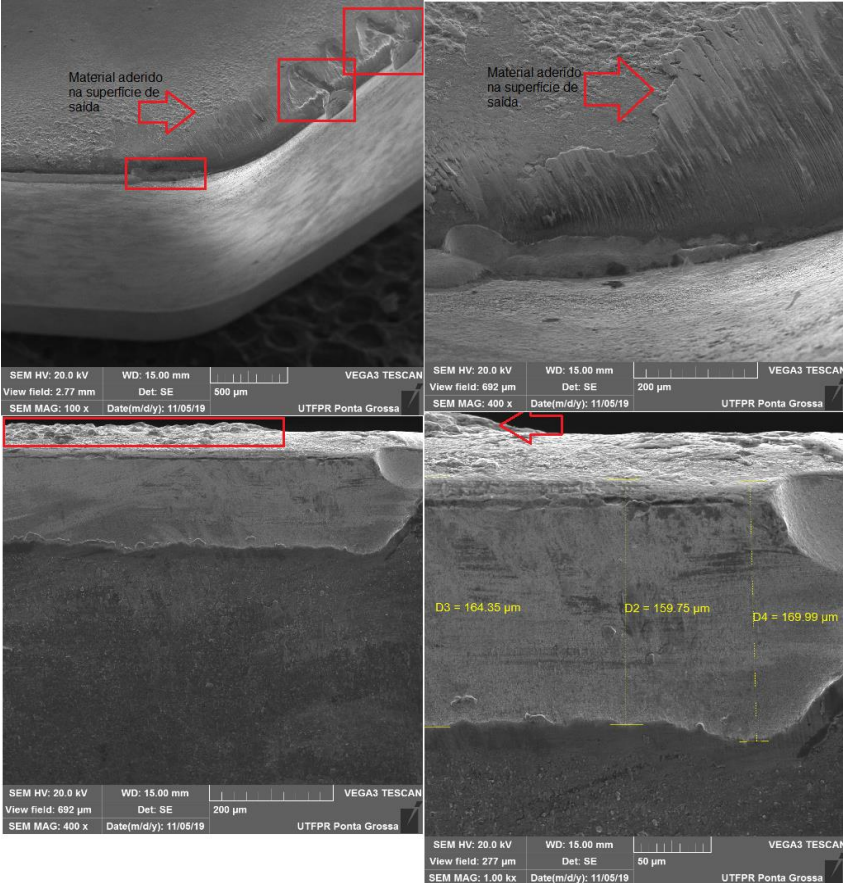
Quadro 2 - Comparação entre estado de degradação da aresta secundária da ferramenta e perfil topográfico da superfície usinada para alguns intervalos de fresamento da condição 1.

(Continua)

		<p> $R_a=2,35 \mu\text{m}$ $S_a=2,40 \mu\text{m}$ $R_p=4,97 \mu\text{m}$ $S_p=6,55 \mu\text{m}$ $R_v=8,04 \mu\text{m}$ $S_v=9,98 \mu\text{m}$ $R_{sk}=-0,94$ $S_{sk}=-0,89$ $R_{pk}=1,50 \mu\text{m}$ $S_{pk}=1,62 \mu\text{m}$ $R_{vk}=6,56 \mu\text{m}$ $S_{vk}=6,03 \mu\text{m}$ </p>
<p>75,8 MINUTOS</p>		<p>$V_{B,max}=159,15 \mu\text{m}$.</p>
<p>Observa-se, neste caso, um perfil com certa regularidade em sua geometria, porém picos bem removidos ($S_{sk}=-0,89$ e $R_{sk}=-0,94$) quando comparados a todos os outros intervalos. Acredita-se que este fato tenha ocorrido pelo fato de que a superfície de folga tenha sido planificada, interferindo diretamente na formação de cavaco. Além do mais, como uma das funções do ângulo de folga é evitar o atrito entre essa superfície com a superfície usinada da peça, todo e qualquer material aderido em uma superfície de folga planificada pode danificar e influenciar na qualidade da superfície gerada.</p>		

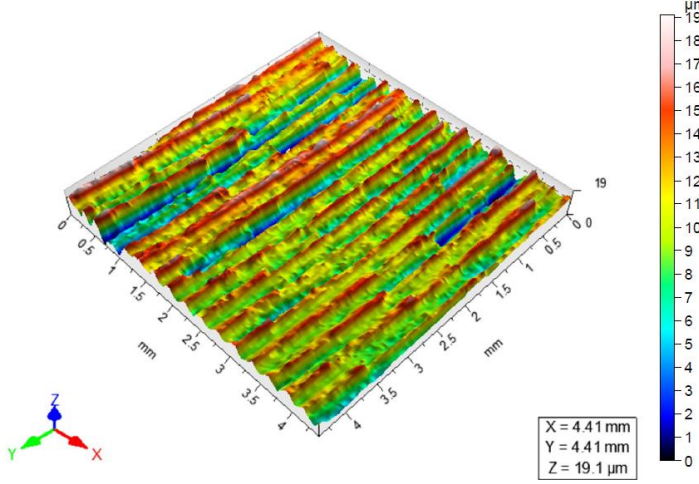
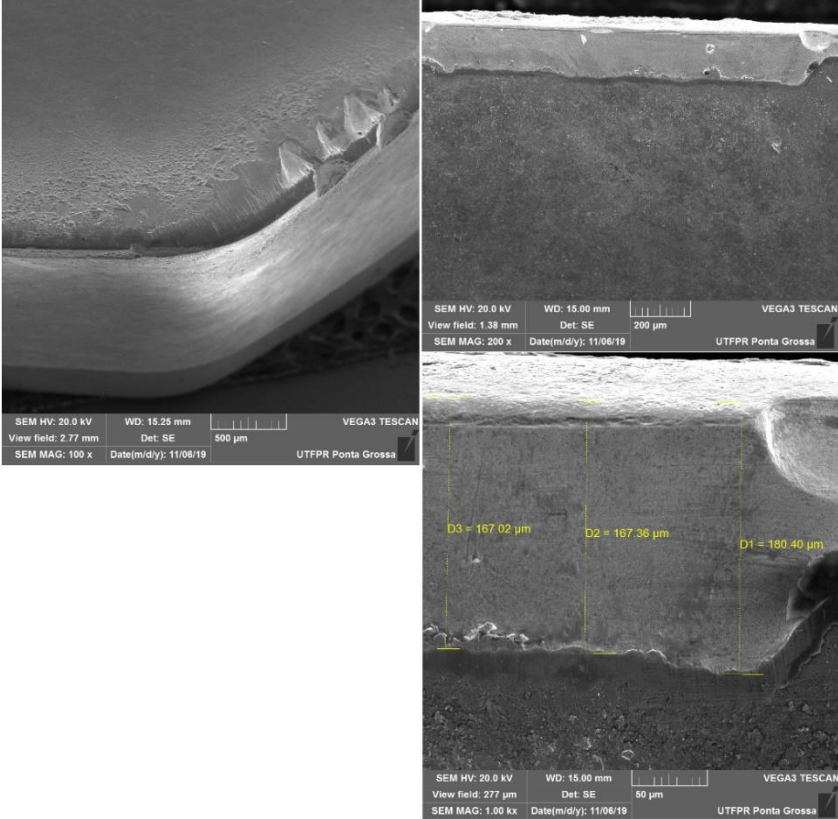
Quadro 2 - Comparação entre estado de degradação da aresta secundária da ferramenta e perfil topográfico da superfície usinada para alguns intervalos de fresamento da condição 1.

(Continua)

		<p> $Ra=2,82 \mu\text{m}$ $Sa=3,38 \mu\text{m}$ $Rp=7,48 \mu\text{m}$ $Sp=10,6 \mu\text{m}$ $Rv=7,16 \mu\text{m}$ $Sv=10,90 \mu\text{m}$ $Rsk=-0,02$ $Ssk=-0,24$ $Rpk=2,76 \mu\text{m}$ $Spk=2,67 \mu\text{m}$ $Rvk=4,21 \mu\text{m}$ $Svk=3,91 \mu\text{m}$ </p>
<p>88,5 MINUTOS</p>		<p> $V_{B,max}=169,99 \mu\text{m}$. Material aderido na superfície de saída da ferramenta; aumento considerável dos entalhes e do lascamento na aresta de alisamento. </p>
<p>Verifica-se um perfil de rugosidade bastante irregular e com picos removidos. Acredita-se que, aliado a planificação da superfície de folga, a ferramenta já tenha apresentado uma perda considerável de material, acarretando em uma maior dificuldade em propagar os esforços e dissipar o calor envolvido no processo de corte, visto que houve redução no volume de material na aresta da ferramenta, fragilizando-a.</p>		

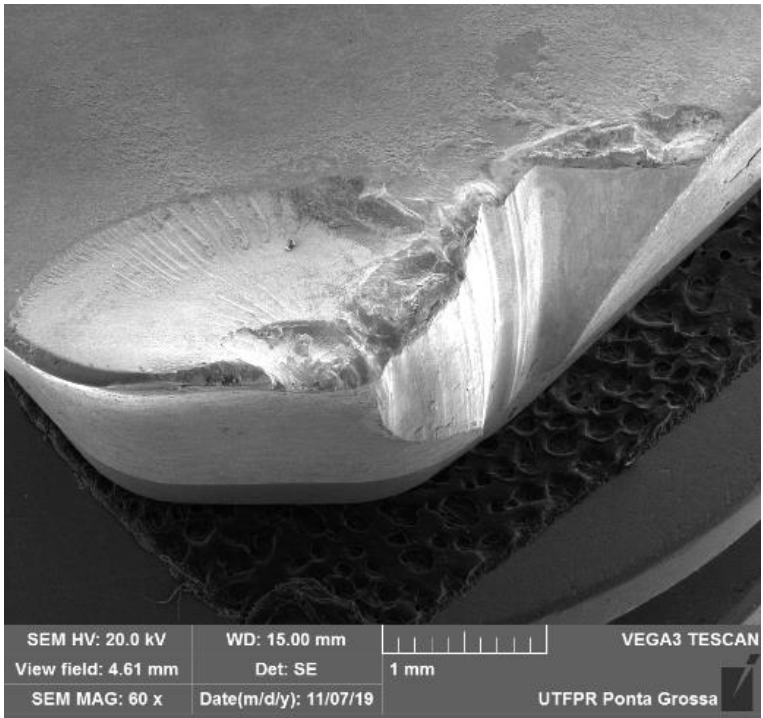
Quadro 2 - Comparação entre estado de degradação da aresta secundária da ferramenta e perfil topográfico da superfície usinada para alguns intervalos de fresamento da condição 1.

(Continua)

		<p> $R_a=2,28 \mu\text{m}$ $S_a=2,72 \mu\text{m}$ $R_p=5,87 \mu\text{m}$ $S_p=8,63 \mu\text{m}$ $R_v=5,69 \mu\text{m}$ $S_v=10,50 \mu\text{m}$ $R_{sk}=0,12$ $S_{sk}=-0,33$ $R_{pk}=1,90 \mu\text{m}$ $S_{pk}=2,50 \mu\text{m}$ $R_{vk}=3,11 \mu\text{m}$ $S_{vk}=4,33 \mu\text{m}$ </p>
<p>94,8 MINUTOS</p>		<p>$V_{B,max}=180,4 \mu\text{m}.$</p>
<p>De maneira análoga ao intervalo anterior (94,8 min), nota-se um perfil bastante irregular e com picos removidos. Pelo fato de a ferramenta estar próxima do seu fim de vida, seus elementos produtores de cavaco sofreram alteração geométrica e de forma e, portanto, não desempenham corretamente suas funções no mecanismo de formação de cavaco; nesta etapa do ensaio, a superfície está sendo gerada muito mais por deformação do que por cisalhamento.</p>		

Quadro 2 - Comparação entre estado de degradação da aresta secundária da ferramenta e perfil topográfico da superfície usinada para alguns intervalos de fresamento da condição 1.

(Conclusão)

101,1 MINUTOS	Não foi possível imprimir a amostra.	
		$V_{B,max} = 220,84 \mu\text{m}$. Quebra da ferramenta.
<p>O aumento excessivo dos desgastes presentes na ferramenta acabou por ocasionar a quebra da mesma. Com o intuito de preservar a integridade do cabeçote fresador, não foi gerada uma superfície na peça após a quebra da ferramenta.</p>		

Fonte: Autoria própria

Embora a evolução do desgaste aparenta ser benéfico em alguns casos para redução nos valores de rugosidade (Quadro 2), é obvio que o mesmo traz mudanças significativas nas geometrias da ferramenta e, conseqüentemente, no mecanismo de formação de cavaco. Além do mais, nota-se que, além do desgaste de flanco, a adesão pode ser bastante significativa na geração do perfil de rugosidade.

Justificando a falta de tendência no comportamento da rugosidade a medida que a ferramenta sofre desgaste, Wang e Liu (2018) apontam que isto pode ocorrer devido ao fato de que, com o avanço do desgaste, aumenta-se os esforços e a temperatura na região de contato entre cavaco-ferramenta e, com isso, aumenta-se a zona de deformação plástica nesta região; o aumento desta zona propicia a geração do perfil de rugosidade por meio da deformação e não cisalhamento, além de promover o escoamento lateral de material (*material side flow*), onde a remoção do cavaco é realizada sem que haja sentido e direção ordenados.

De acordo com Kishway e Elbestawi (1999, apud ZANG e LIU, 2018, p. 1958), o mecanismo de desgaste tende a aumentar o raio de ponta e de aresta da ferramenta e, conseqüentemente, a espessura mínima do cavaco; desta maneira, tem-se aumento do escoamento lateral de material e a superfície é gerada muito mais por deformação, visto que a espessura do cavaco é menor que a espessura mínima. Como pode ser analisado nas imagens das ferramentas no Quadro 2, os raios de ponta e aresta sofrem mudanças extremas em suas geometrias. Neste sentido, maiores perdas ou acúmulos de material nesta região podem criar situações distintas na geração da superfície de rugosidade, servindo como base para justificar um comportamento de rugosidade sem tendência.

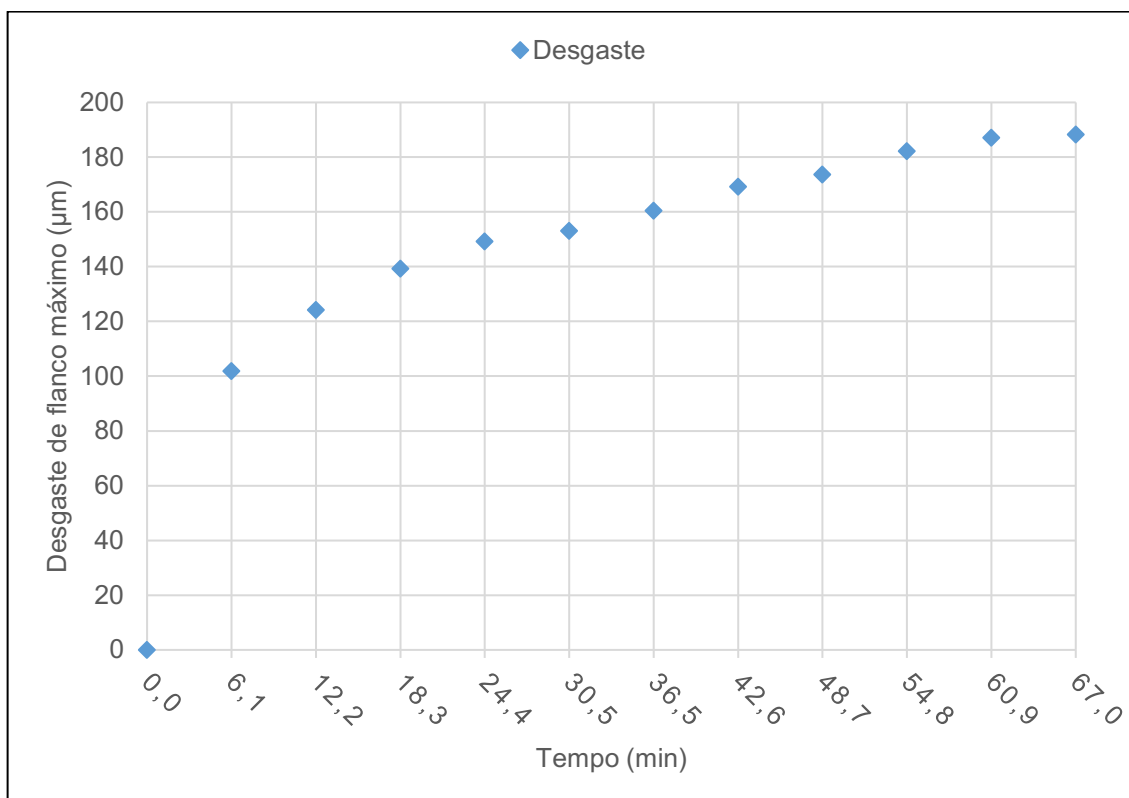
Acredita-se ainda que, à medida que a ferramenta sofre desgaste, ocorre um processo de planificação na região do plano de desgaste que tende a criar um ângulo de folga zero graus nesta região; este mecanismo facilita o atrito de uma região maior e mais larga com a superfície usinada. Além do mais, todo e qualquer material removido ou aderido na banda de desgaste terá sua contribuição na geração do perfil de rugosidade. No caso específico da presente pesquisa (Quadro 2) nota-se que a adesão pode ser significativa neste sentido, ou seja, à medida que se tem material aderido na banda de desgaste, este pode influenciar na geração do perfil, principalmente na formação de maiores profundidades de vales. É importante salientar ainda que material aderido na superfície de saída, por exemplo, também pode alterar a geometria da ferramenta e influenciar no mecanismo de formação de cavaco e, conseqüentemente, na formação da superfície usinada.

4.4.2 Condição 2

Os ensaios da condição 2 são conduzidos com a utilização da ferramenta B, velocidade de corte igual a 230 m/min e avanço por dente igual a 0,374 mm/aresta. Cabe ressaltar que, nesta condição, o valor de avanço de dente utilizado está muito próximo do valor limite recomendado pelo fabricante da ferramenta B (0,4 mm/aresta).

O Gráfico 9 apresenta os valores de desgaste máximo de flanco avaliados na superfície de folga da aresta secundária de corte.

Gráfico 9 - Valores de desgaste máximo de flanco para a condição 2.



Fonte: Autoria própria

Analisando o Gráfico 9, nota-se que os valores de desgaste de flanco máximo têm um comportamento crescente à medida que se avançam os ensaios de fresamento. Inclusive, o revestimento na região da superfície de folga da aresta de corte é completamente removido já no primeiro intervalo de fresamento. Comparando o Gráfico 9 com o Gráfico 1, observa-se que, para as mesmas ferramentas, o aumento do valor do avanço foi um fator considerável para a redução do tempo de vida da ferramenta de corte.

Como na condição 1, além do desgaste de flanco, pôde-se observar o aparecimento de trincas de origens térmicas na aresta de corte primária da ferramenta, conforme a Figura 60.

Figura 60 - Acompanhamento das trincas térmicas, no ensaio da condição 2, na aresta de corte primária, para: 12,2 min, 24,4 min, 48,7 min e 67 min.

(Continua)

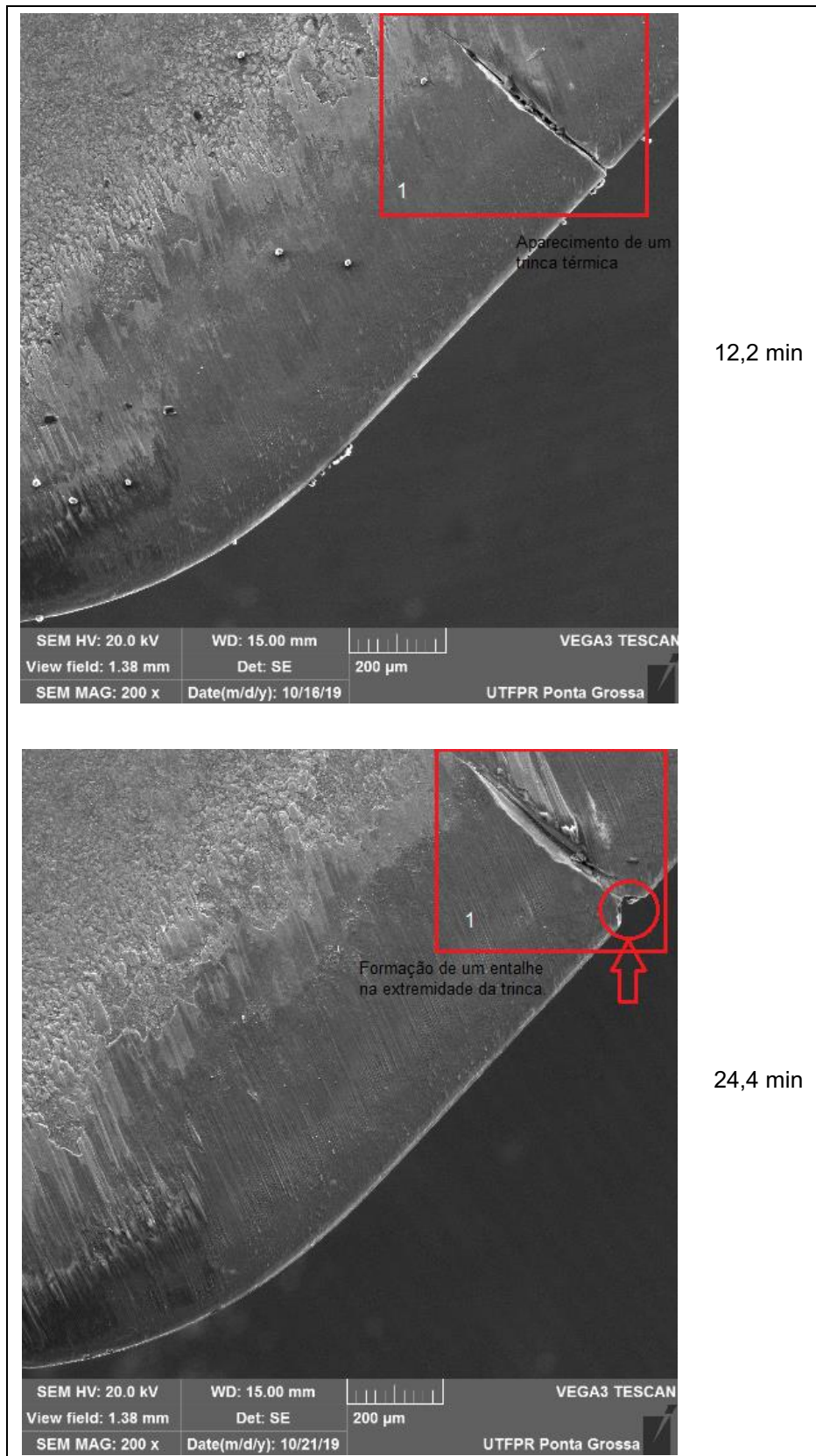
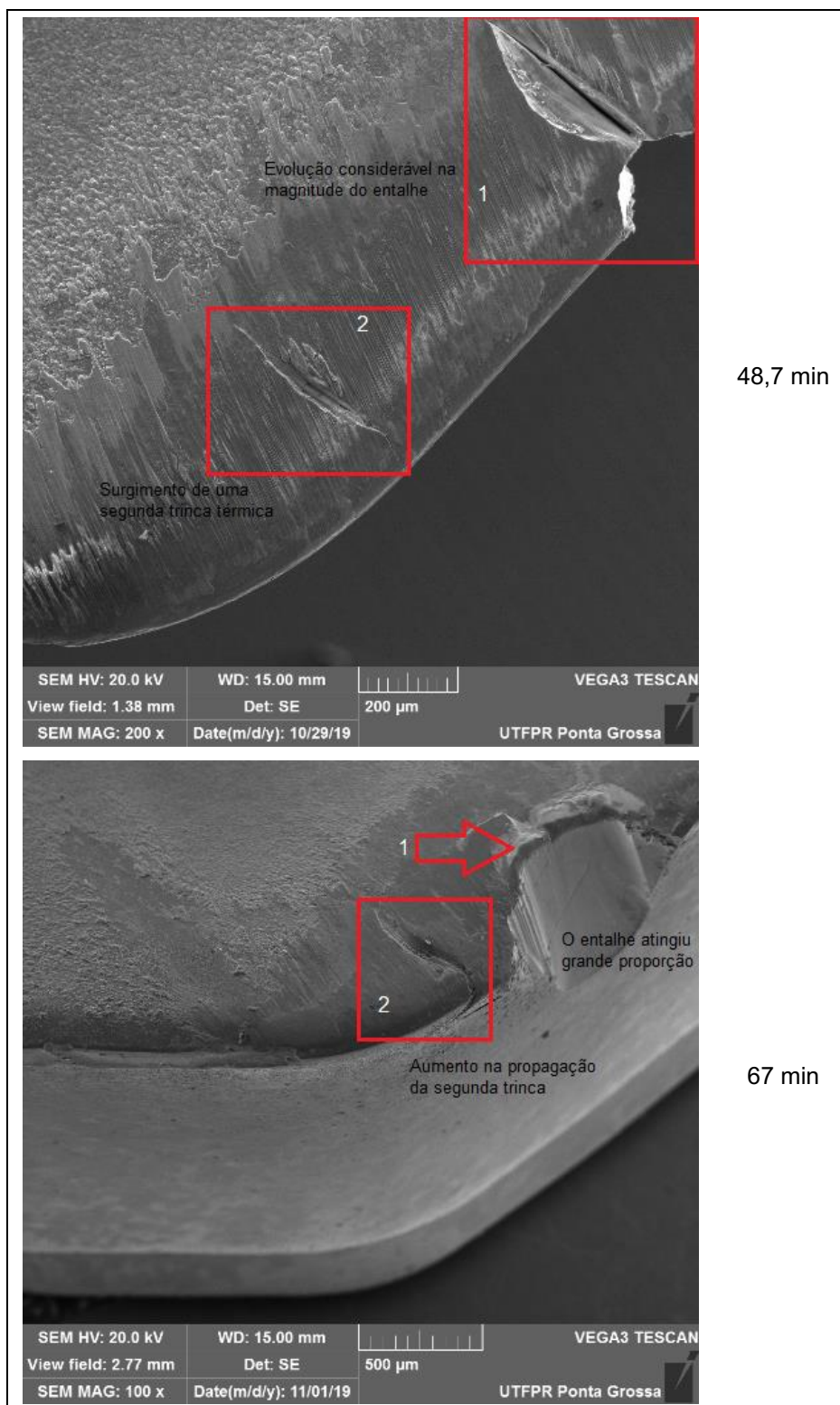


Figura 60 - Acompanhamento das trincas térmicas, no ensaio da condição 2, na aresta de corte primária, para: 12,2 min, 24,4 min, 48,7 min e 67 min.

(Conclusão)



Fonte: Autoria própria

Analisando a Figura 60, nota-se que, já em minutos iniciais de fresamento (12,18 min), houve a propagação de uma trinca térmica (trinca 1) com grande

magnitude. A propagação da trinca continuou até que, em 24,4 min, formou um entalhe na região do início da trinca. Observa-se ainda que, em 48,7 min, ocorreu o aumento do entalhe acompanhado do aparecimento de uma nova trinca (trinca 2) de origem térmica. Por fim, em 67 min, a ferramenta atingiu seu fim de vida por aumento excessivo do desgaste de entalhe; cabe salientar que o valor de desgaste de flanco máximo estipulado como fim de vida (200 μm) também não foi alcançado para esta condição.

Ainda sob o aspecto da ferramenta, notou-se que, para a condição 2, houve uma perda de material considerável que evoluiu no sentido radial da mesma, conforme a Figura 61.

Figura 61 - Acompanhamento da perda de material no sentido radial na aresta de corte secundária para a condição 2 e nos intervalos: 30,5 min e 67 min.

(Continua)

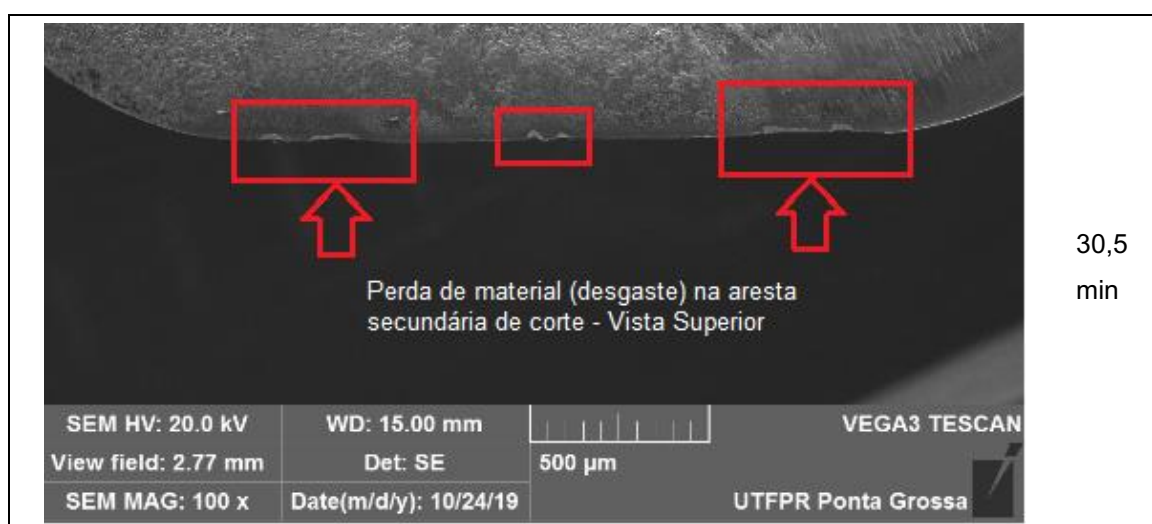
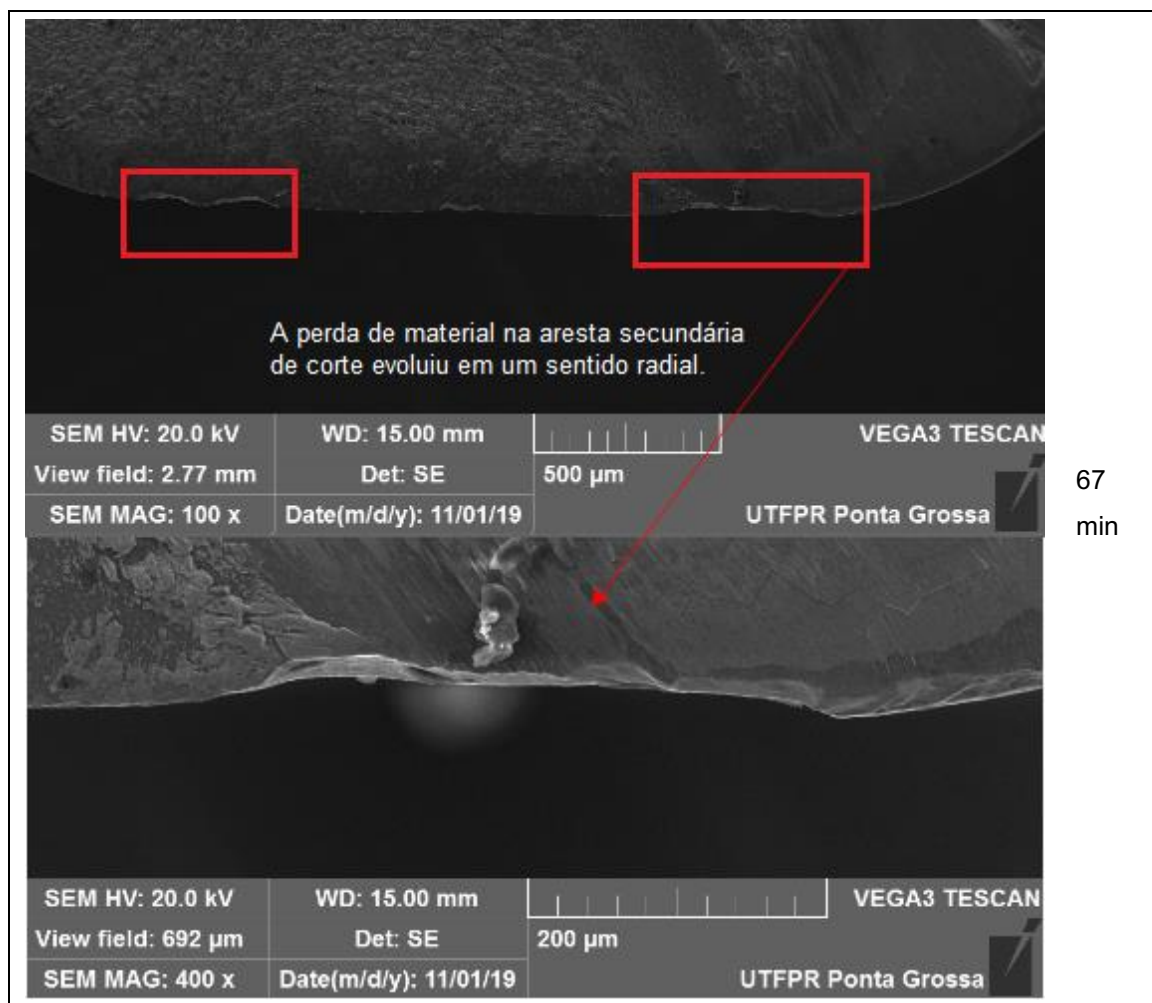


Figura 61 - Acompanhamento da perda de material no sentido radial na aresta de corte secundária para a condição 2 e nos intervalos: 30,5 min e 67 min.

(Conclusão)

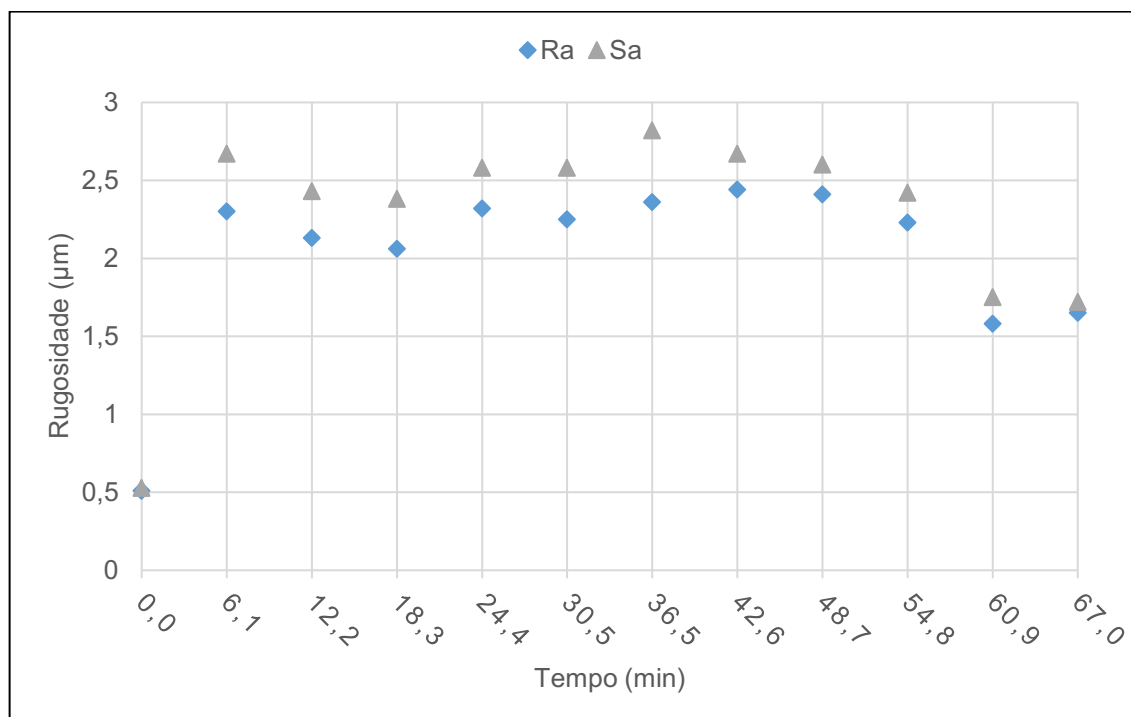


Fonte: Autoria própria

Analisando a Figura 61, nota-se o surgimento de pequenas perdas de material na aresta de corte secundária da ferramenta. À medida que os ensaios de fresamento ocorreram esta perda de material se acentuou e ocorreu no sentido radial da ferramenta, ou seja, partiu da extremidade da aresta de corte e evoluiu sentido ao centro da ferramenta. No caso exposto para 67 min, nota-se, inclusive, duas regiões em que o estado de degradação da aresta de corte já apresentava elevadas magnitudes.

Quanto ao acabamento das peças usinadas, espera-se uma piora no mesmo, visto que a condição 2 opera com um avanço por dente maior que a condição 1.

Gráfico 10 - Rugosidade média para a condição 2.

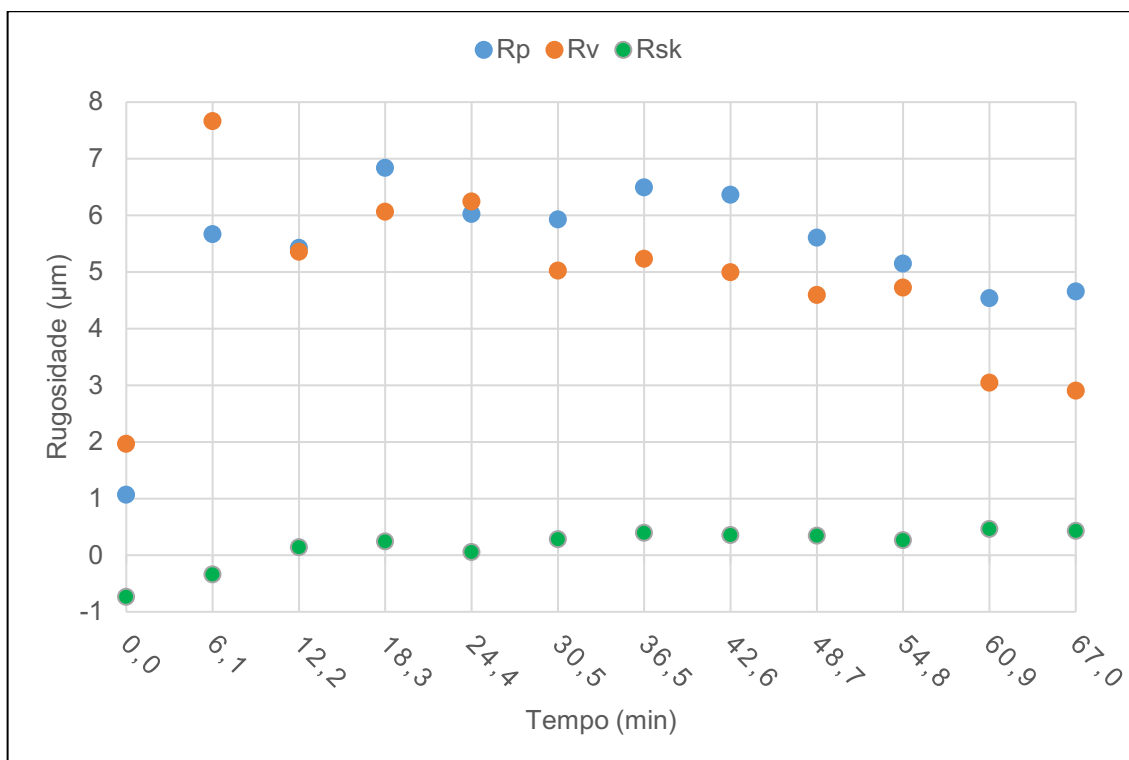


Fonte: Autoria própria

Conforme observado no Gráfico 10, o comportamento da rugosidade média apresenta uma tendência com menores variações quando comparado a condição 1 (Gráfico 2). Nota-se que, apesar dos valores de rugosidade estarem muito próximos para as duas condições, a diferença entre os valores avaliados em linha (Ra) e em área de amostragem (Sa) é menor para a condição 2. Acredita-se que este fato ocorra pelo fato do aumento, principalmente, do avanço por aresta. Mesmo que isto tenha elevado os esforços de corte e, conseqüentemente, a redução do tempo de vida da ferramenta, observa-se um melhor controle na obtenção do acabamento superficial.

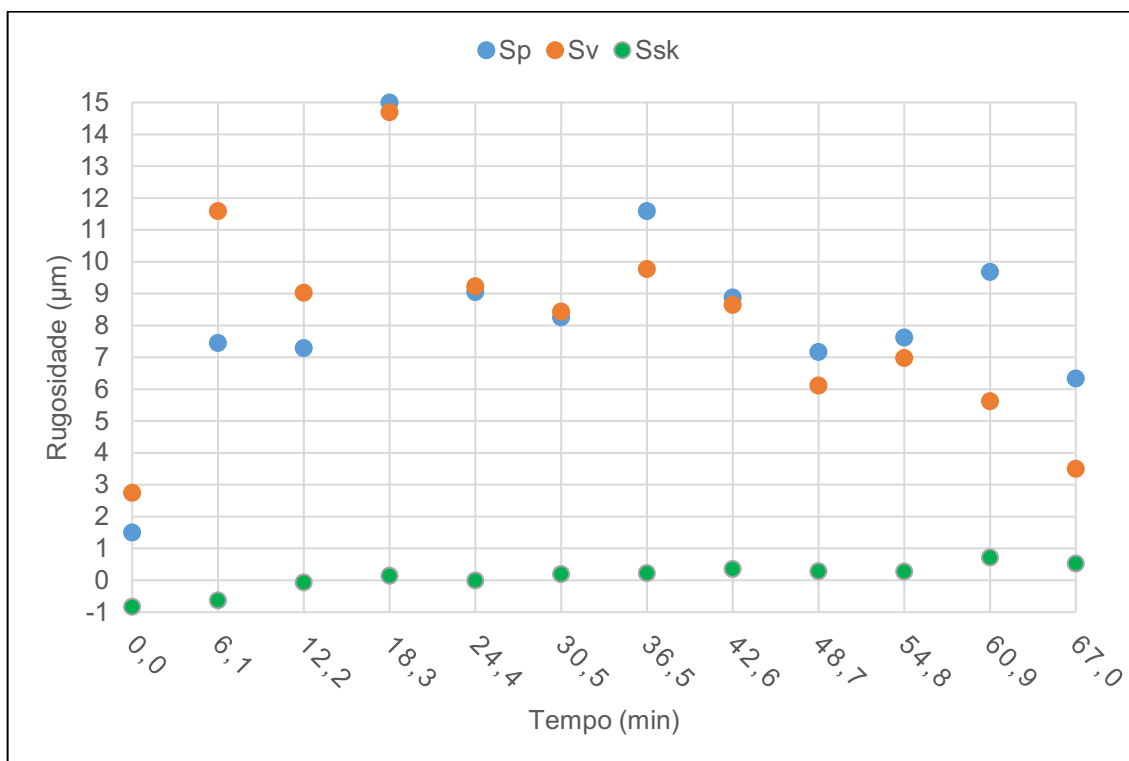
Observa-se ainda, no Gráfico 10, que os valores de rugosidade média encontram-se na faixa entre 2 a 3 µm e têm um comportamento alternado de crescimento e redução. Nos dois últimos intervalos de fresamento, há uma redução considerável nos valores tanto de Ra quanto de Sa. Por fim, com o intuito de justificar a alternância nestes valores e, principalmente, a redução dos mesmo para os últimos intervalos, buscou-se, novamente, a análise dos picos, vales e do *skewness*, no Gráfico 11 e no Gráfico 12.

Gráfico 11 - Rugosidade de pico, de vale e fator de assimetria, avaliados em linha, para a condição 2.



Fonte: Autoria própria

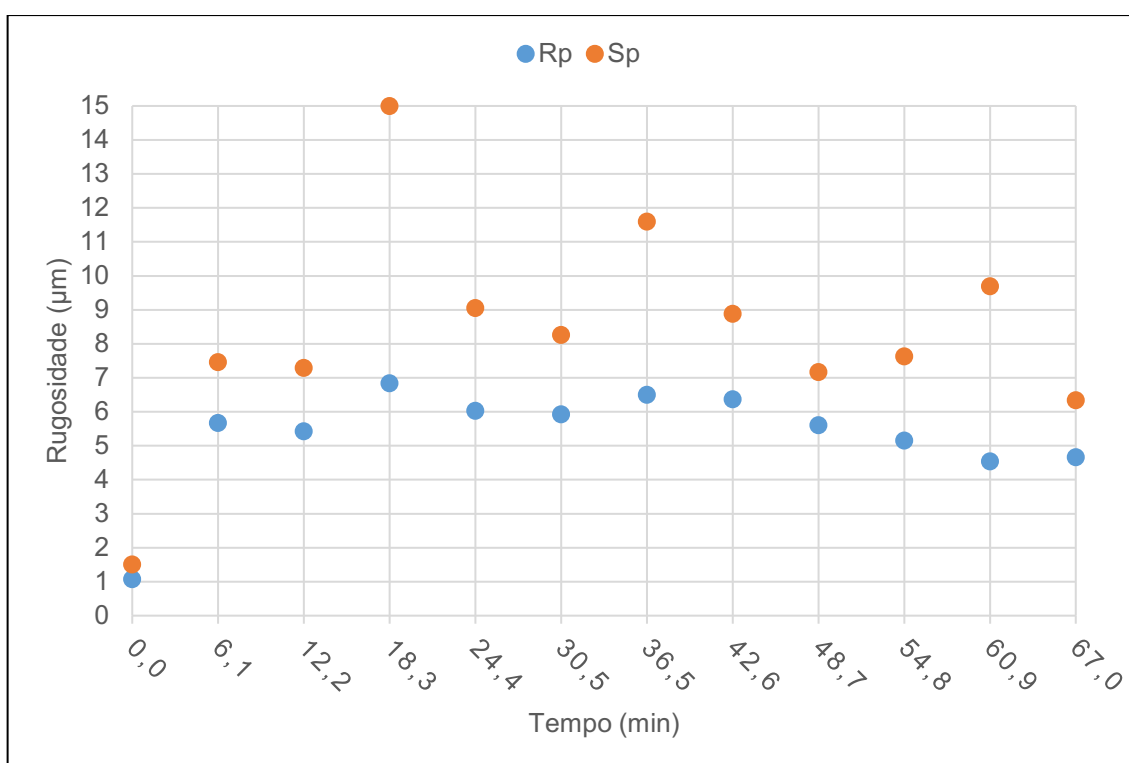
Gráfico 12 - Rugosidade de pico, de vale e fator de assimetria, avaliados em área de amostragem, para a condição 2.



Fonte: Autoria própria

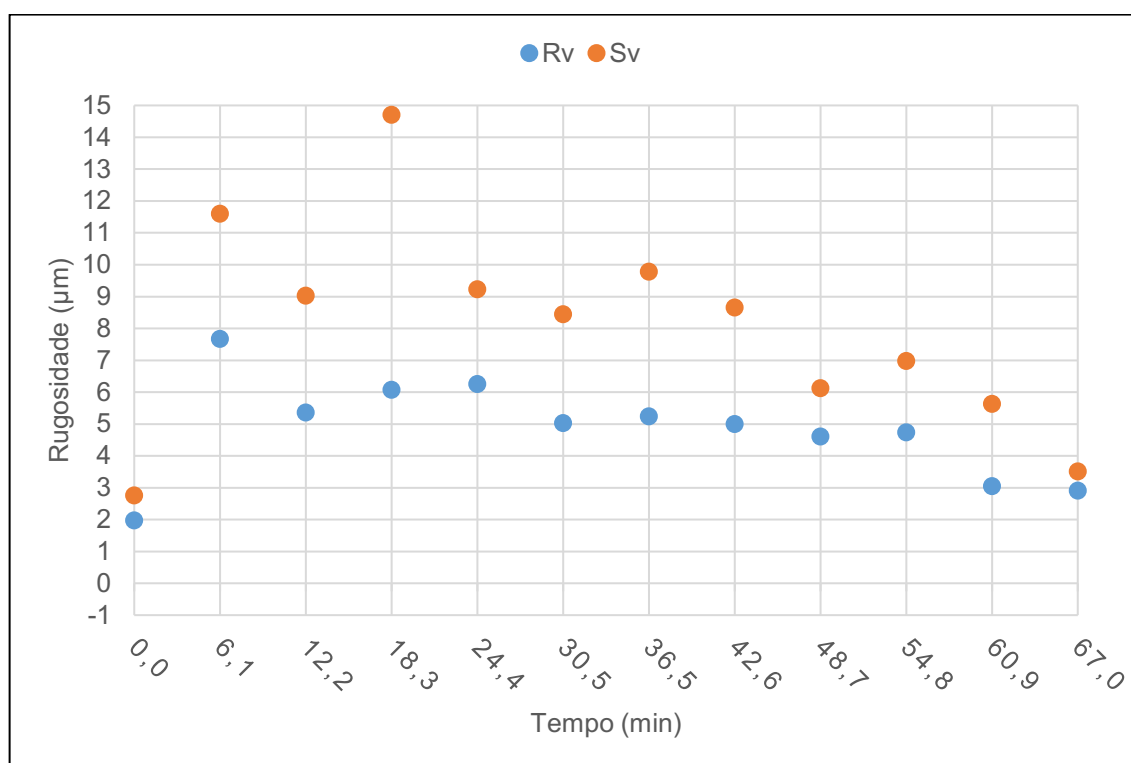
Conforme observado no Gráfico 11 e no Gráfico 12, a predominância é de picos nas superfícies geradas e, conseqüentemente, de valores de *skewness* positivos, diferentemente da condição 1. Além do mais, nota-se uma considerável alternância de crescimentos e reduções no comportamento dos parâmetros avaliados. Por fim, observa-se que os valores dos parâmetros avaliados em área de amostragem (Gráfico 12) são maiores quando comparados àqueles avaliados em linha (Gráfico 11). Inclusive, o Gráfico 13 e o Gráfico 14 permitem uma melhor análise deste aspecto.

Gráfico 13 - Comparativo entre os valores de Rp e Sp, para a condição 2.



Fonte: Autoria própria

Gráfico 14 - Comparativo entre os valores de Rv e Sv, para a condição 2.

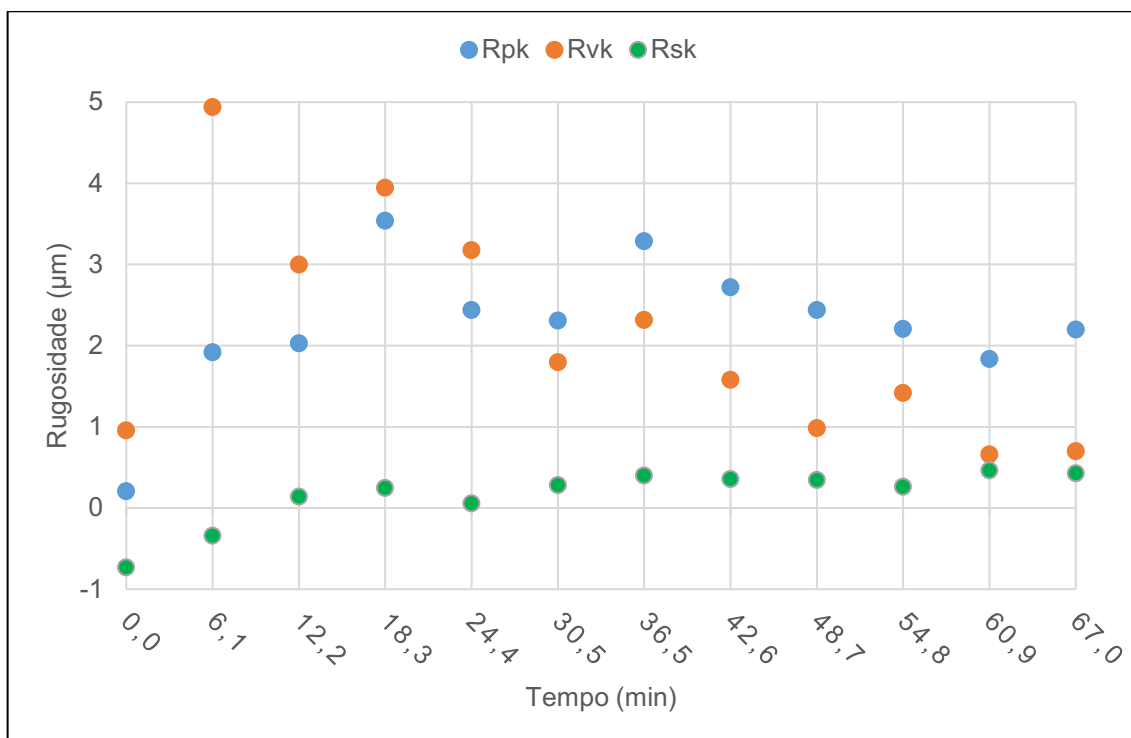


Fonte: Autoria própria

Por meio do Gráfico 13 e do Gráfico 14, comprova-se que os valores dos parâmetros avaliados em área são maiores quando comparados aos avaliados em linha. Acredita-se, no entanto, que os valores dos parâmetros S sejam muito mais representativos pois avaliam uma superfície como um todo, não apenas uma linha do perfil.

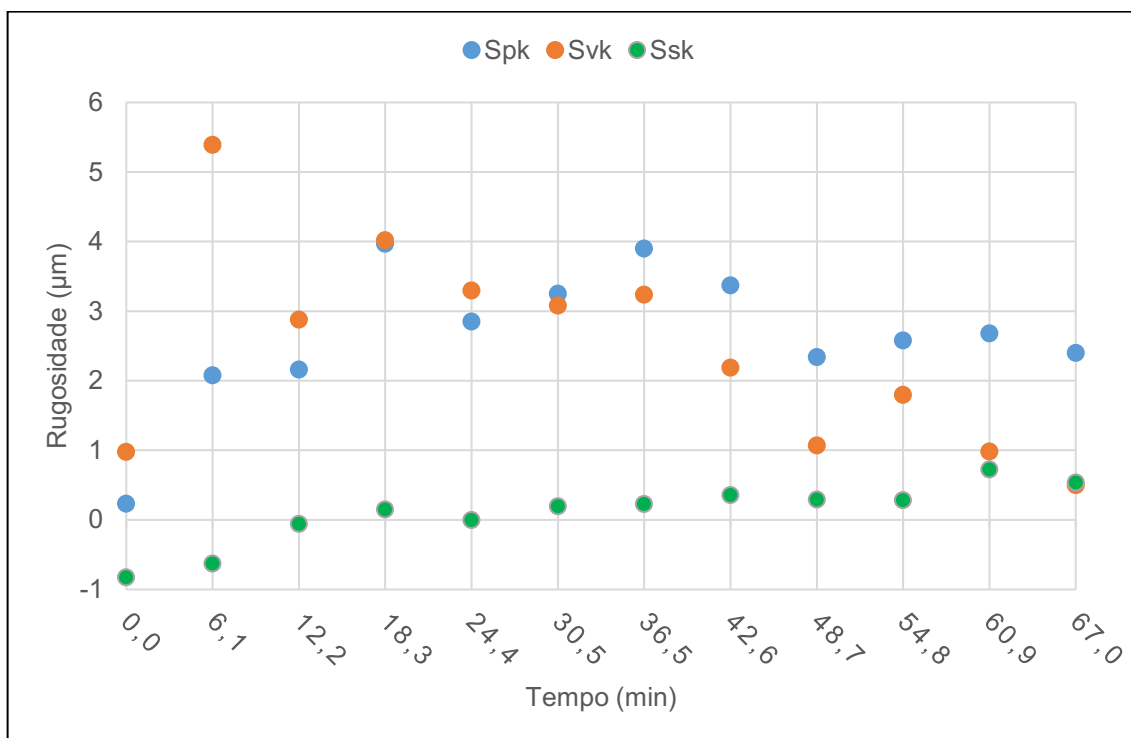
Buscando ainda uma melhor análise do perfil topográfico da superfície, analisou-se os parâmetros de *skewness* (Rsk e Ssk) e alguns parâmetros extraídos das curvas *Abbott Firestone*: altura de pico reduzida (Rpk e Spk) e profundidade de vale reduzida (Rvk e Svk). Os valores destes parâmetros foram dispostos no Gráfico 15 e no Gráfico 16.

Gráfico 15 - Altura reduzida de picos, profundidade reduzida de vales e skewness, avaliados em linha, para a condição 2.



Fonte: Autoria própria

Gráfico 16 - Altura reduzida de picos, profundidade reduzida de vales e skewness, avaliados em área de amostragem, para a condição 2.



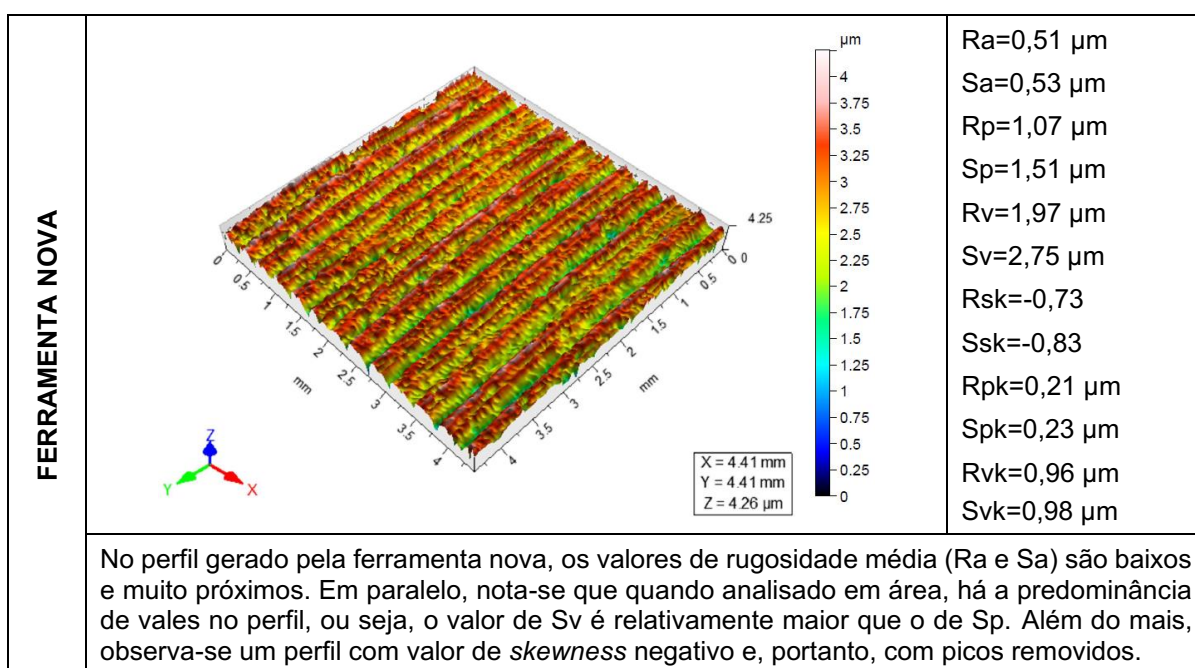
Fonte: Autoria própria

Como observado no Gráfico 15 e no Gráfico 16, há uma presença considerável de vales profundos e picos sobressalentes a partir do segundo intervalo de fresamento (6,1 min). Em paralelo, nota-se a falta de tendência no comportamento destes parâmetros avaliados. Observa-se ainda perfis com a predominância de vales profundos até o intervalo de 24,4 min; a partir daí o perfil passa a ter uma predominância de picos sobressalentes. Por fim, comparando os valores dos parâmetros de rugosidade expostos no Gráfico 15 com os do Gráfico 16, nota-se que os valores obtidos por análise em linha (R_{pk} , R_{vk} e R_{sk}) se aproximam dos analisados em área de amostragem (S_{pk} , S_{vk} e S_{sk}).

Por fim, com o intuito de esclarecer o comportamento sem tendência dos valores de rugosidade e esta alternância entre picos e vales no perfil, recorreu-se a uma comparação entre o estado de degradação da aresta secundária da ferramenta e o perfil topográfico do material usinado, conforme Quadro 3.

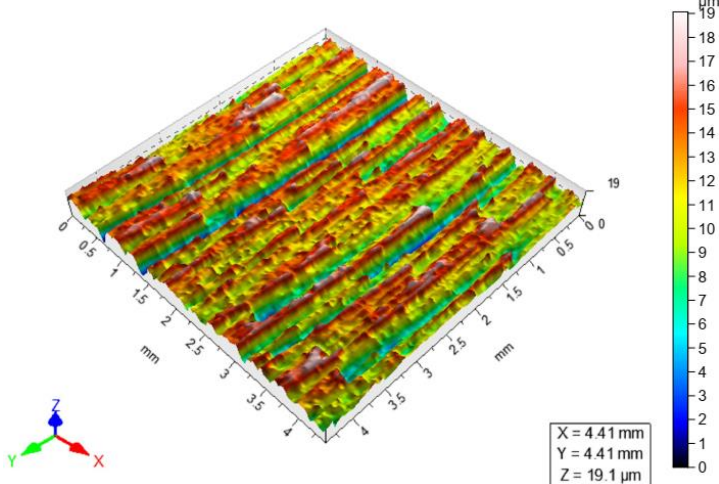
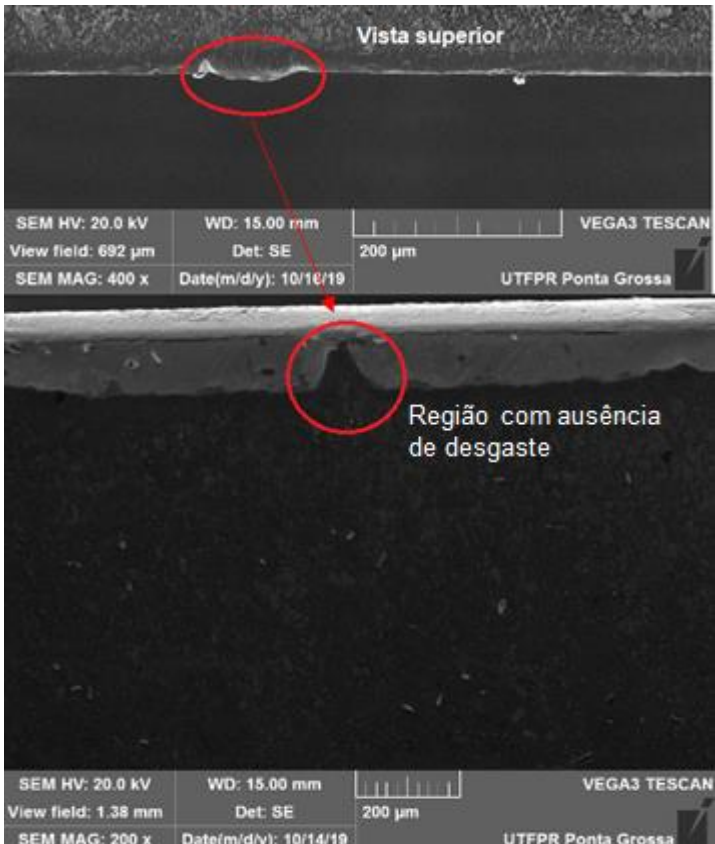
Quadro 3 - Comparação entre estado de degradação da aresta secundária da ferramenta e perfil topográfico da superfície usinada para alguns intervalos de fresamento da condição 2.

(Continua)



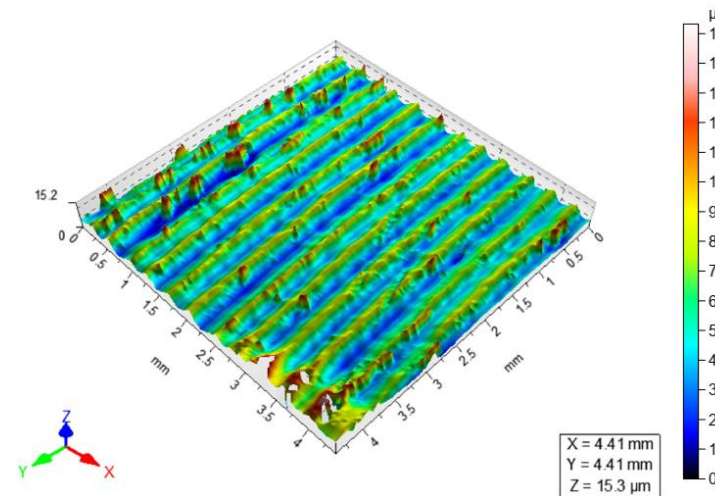
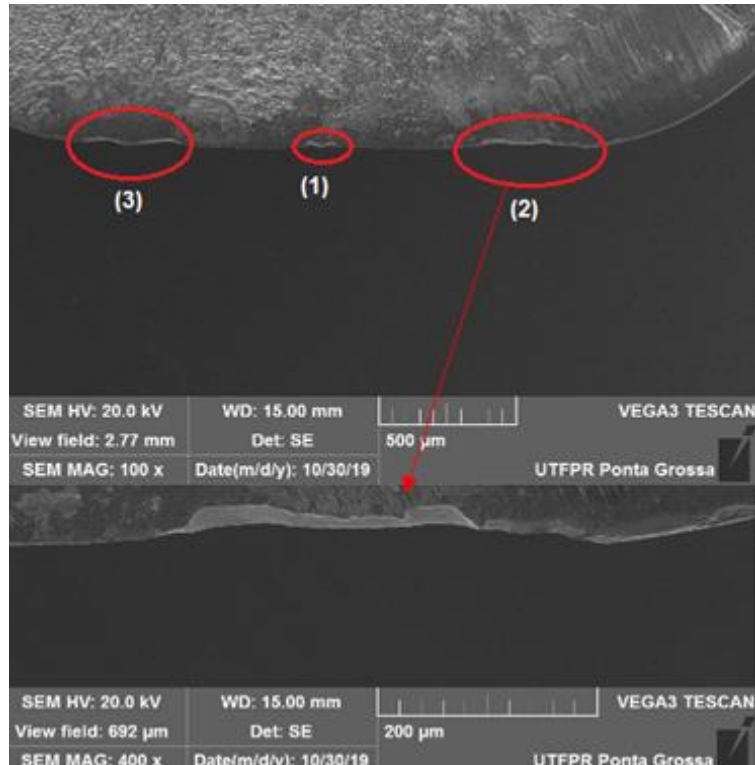
Quadro 3 - Comparação entre estado de degradação da aresta secundária da ferramenta e perfil topográfico da superfície usinada para alguns intervalos de fresamento da condição 2.

(Continua)

		<p> $Ra=2,3 \mu\text{m}$ $Sa=2,67 \mu\text{m}$ $Rp=5,67 \mu\text{m}$ $Sp=7,46 \mu\text{m}$ $Rv=7,67 \mu\text{m}$ $Sv=11,6 \mu\text{m}$ $Rsk=-0,34$ $Ssk=-0,63$ $Rpk=2,08 \mu\text{m}$ $Spk=0,23 \mu\text{m}$ $Rvk=5,39 \mu\text{m}$ $Svk=0,98 \mu\text{m}$ </p>
<p>6,1 MINUTOS</p>		<p>$V_{B,max}=101,88 \mu\text{m}$.</p> <p>Nota-se, na região da banda de desgaste, uma porção do revestimento que não foi removida; quando observada pela vista superior, é nítido que esta região forma uma protuberância na aresta de corte secundária.</p>
<p>Primeiramente, observa-se um desgaste de flanco máximo demasiadamente grande para o primeiro intervalo de fresamento, com um valor que extrapola a metade daquele estipulado como limite. Neste intervalo, os valores de Ra e Sa são muito próximos, apontando uma regularidade na superfície da peça. Por fim, acredita-se que os vales excessivamente profundos e os picos removidos possam ser justificados pela presença daquela porção de revestimento que não foi removido; acredita-se que esta região pode ser responsável por danificar a superfície usinada da peça.</p>		

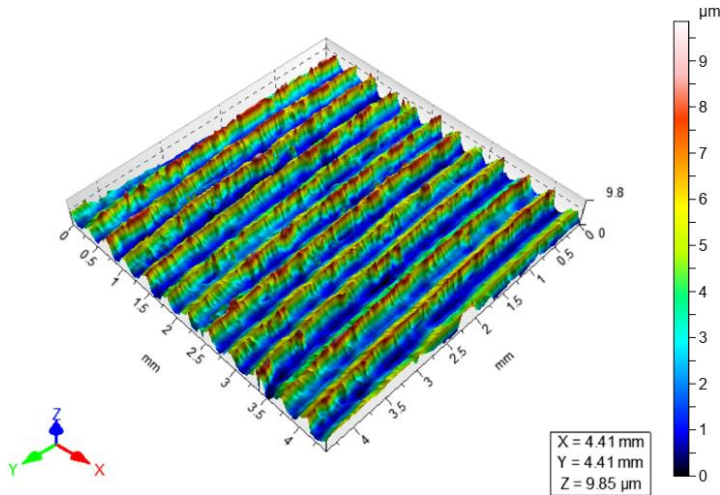
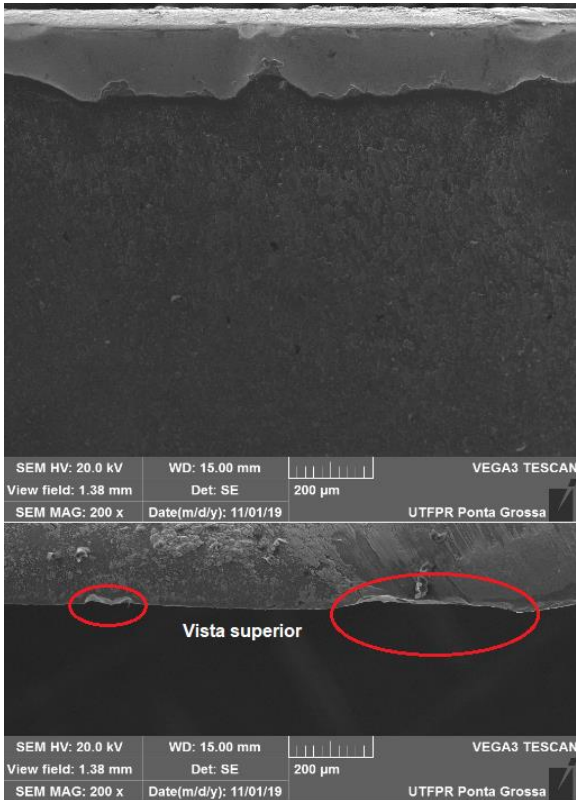
Quadro 3 - Comparação entre estado de degradação da aresta secundária da ferramenta e perfil topográfico da superfície usinada para alguns intervalos de fresamento da condição 2.

(Continua)

		<p> $R_a=1,58 \mu\text{m}$ $S_a=1,75 \mu\text{m}$ $R_p=4,54 \mu\text{m}$ $S_p=9,69 \mu\text{m}$ $R_v=3,05 \mu\text{m}$ $S_v=5,63 \mu\text{m}$ $R_{sk}=0,47$ $S_{sk}=0,73$ $R_{pk}=1,84 \mu\text{m}$ $S_{pk}=2,68 \mu\text{m}$ $R_{vk}=0,66 \mu\text{m}$ $S_{vk}=0,98 \mu\text{m}$ </p>
<p>60,9 MINUTOS</p>		<p>$V_{B,max}=187,05 \mu\text{m}$.</p> <p>Nota-se que aquela placa de revestimento foi removida, formando naquela região uma pequena perda de material (1); além do mais, há o surgimento de mais duas regiões com perda de material no sentido radial (2 e 3).</p>
<p>Nota-se, de imediato, que houve uma redução nos valores de rugosidade média; acredita-se que este fato tenha ocorrido pela remoção da placa de revestimento que havia na aresta de corte da ferramenta. Com isto, este material deixou de atritar com a superfície usinada e, portanto, gerar aquela superfície caracterizada por vales profundos e <i>skewness</i> negativo. No entanto, a perda excessiva de material no sentido radial da ferramenta possibilitou a geração de uma superfície com picos elevados.</p>		

Quadro 3 - Comparação entre estado de degradação da aresta secundária da ferramenta e perfil topográfico da superfície usinada para alguns intervalos de fresamento da condição 2.

(Conclusão)

67 MINUTOS		<p> $R_a=1,65 \mu\text{m}$ $S_a=1,72 \mu\text{m}$ $R_p=4,66 \mu\text{m}$ $S_p=6,34 \mu\text{m}$ $R_v=2,91 \mu\text{m}$ $S_v=3,51 \mu\text{m}$ $R_{sk}=0,43$ $S_{sk}=0,54$ $R_{pk}=2,2 \mu\text{m}$ $S_{pk}=2,4 \mu\text{m}$ $R_{vk}=0,7 \mu\text{m}$ $S_{vk}=0,5 \mu\text{m}$ </p>
		<p>$V_{B,max}=188,22 \mu\text{m}$.</p> <p>Apesar da ferramenta não ter atingido o desgaste de 200 μm, este intervalo foi considerado como seu fim de vida devido ao aumento excessivo do entalhe da aresta primária. Além do mais, acentuou-se a perda de material no sentido radial da ferramenta.</p>
<p>Por meio de uma análise qualitativa do perfil topográfico da peça, nota-se que, apesar da ferramenta estar em seu fim de vida, o perfil é acompanhado de uma regularidade entre vales e picos; além do mais, observa-se valores de R_a e S_a próximos e com magnitude relativamente baixa. Acredita-se que a perda de material gerada pelos desgastes alterou as geometrias e dimensões da ferramenta e, conseqüentemente, favorecendo o mecanismo de formação de cavaco, neste caso. É importante salientar que esta situação é provisória e inesperada, ou seja, pode ser que, durante a utilização de uma ferramenta no atual estado de degradação, ocorra a falha catastrófica da mesma, podendo gerar danos ao cabeçote fresador e a peça usinada.</p>		

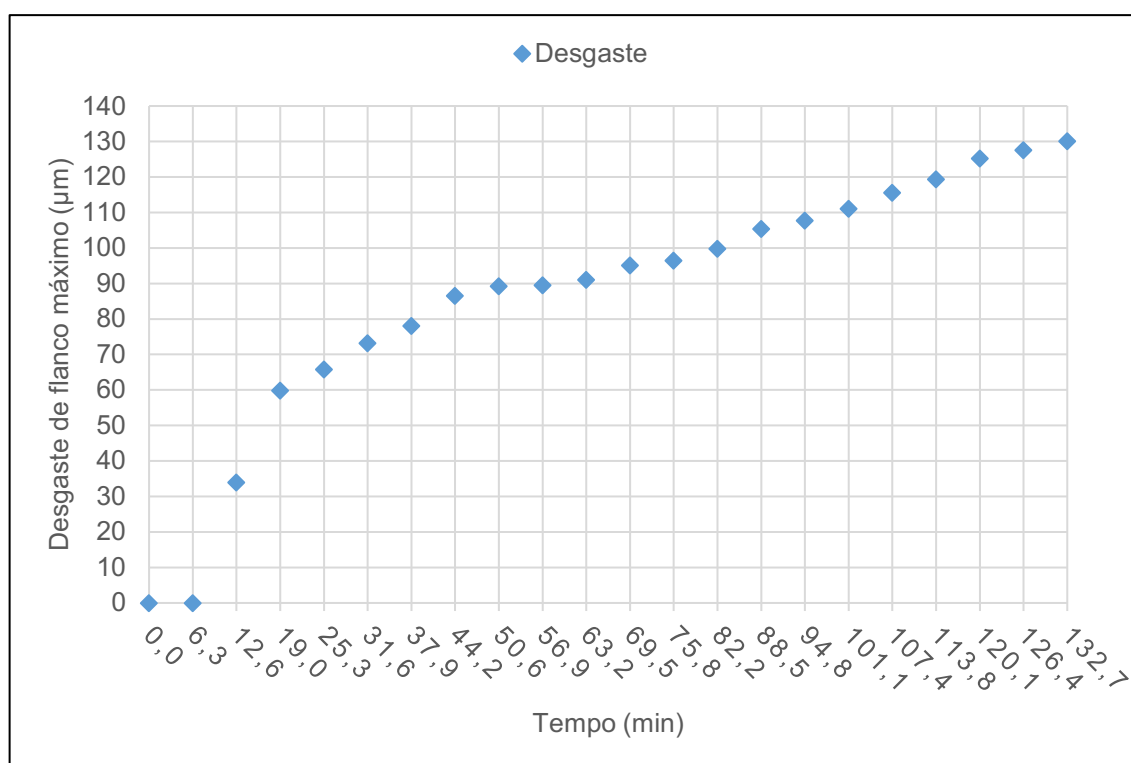
Fonte: Autoria própria

4.4.3 Condição 3

Diferentemente das condições 1 e 2, as condições 3 e 4 são ensaios de fresamento realizados com as ferramentas A, conforme discutido no capítulo de materiais e métodos da presente pesquisa. Cabe lembrar que se trata de uma ferramenta com revestimento diferente e mais robusta, com geometrias que não são positivas como a ferramenta B. Quanto aos parâmetros de corte, os ensaios foram conduzidos a velocidade de corte de 230 m/min e avanço por dente de 0,27 mm/dente.

Os valores de desgaste máximo de flanco da aresta de corte secundária foram dispostos no Gráfico 17.

Gráfico 17 - Valores de desgaste máximo de flanco para a condição 3.

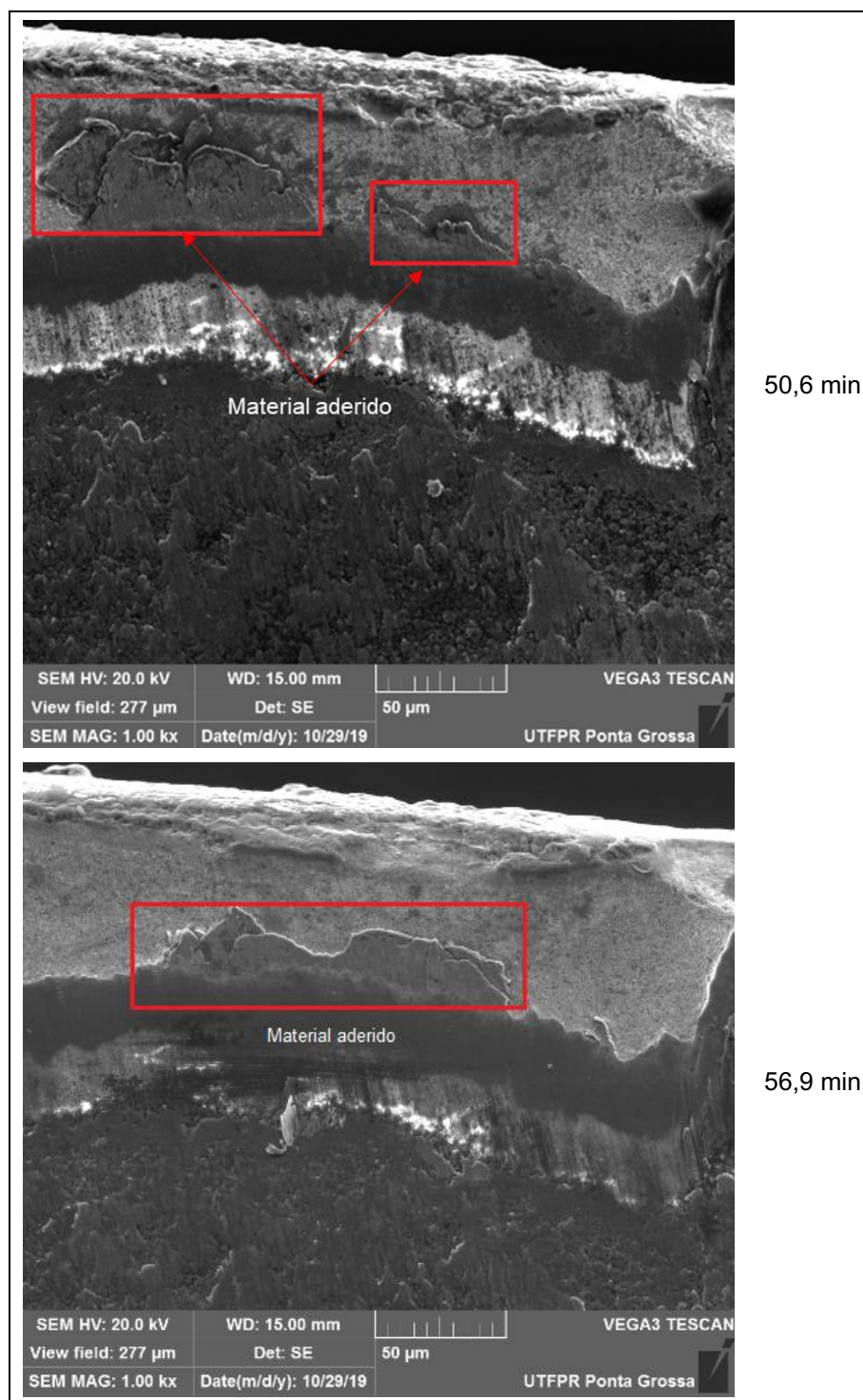


Fonte: Autoria própria

Primeiramente, nota-se que, diferentemente das condições 1 e 2, o revestimento só é completamente removido, na área analisada, a partir de 12,6 minutos de fresamento e que a evolução do desgaste de flanco é muito mais suave em intervalos iniciais, diferente da condição 2, onde o desgaste no primeiro intervalo já é de 101,2 µm. Analisando os valores de desgaste de flanco máximo dispostos no Gráfico 17, observa-se um comportamento com tendência crescente do mesmo à medida que se avançam os ensaios de fresamento, com exceção dos intervalos entre 50,6 min a 63,2 min, onde a evolução do desgaste é discreta. Com o intuito de justificar

este comportamento, recorreu-se a imagens de MEV da ferramenta de corte, conforme a Figura 62.

Figura 62 - Imagens do flanco da ferramenta para os intervalos da condição 3 onde houve baixa evolução no desgaste: 50,6 min e 56,9 min.



Fonte: Autoria própria

Conforme pode ser observado na Figura 62, há a presença de material aderido na região do flanco da superfície secundária de folga da ferramenta. Acredita-

se que, como na condição 1, este material aderido desempenhou um papel temporário como camada protetora desta região, auxiliando na redução da evolução da taxa de desgaste de flanco nestes intervalos de fresamento. No entanto, isto não é uma vantagem para o processo, visto que, quando o material aderido é removido, ele carrega consigo partículas da ferramenta e, deste modo, atenua o desgaste.

A Figura 63 expõe que, em 19 min, houve o aparecimento de um pequeno entalhe e o início da propagação de uma trinca térmica na aresta primária de corte da ferramenta. A trinca propagou e o entalhe aumentou até 132,7 minutos de fresamento; inclusive, o aumento excessivo destes desgastes foi o responsável pelo fim da vida da ferramenta e não o valor de desgaste de flanco máximo alcançado (130,1 μm , neste caso).

Figura 63 - Acompanhamento das trincas térmicas, no ensaio da condição 3, na aresta de corte primária, para: 19 min e 132,7 min.

(Continua)

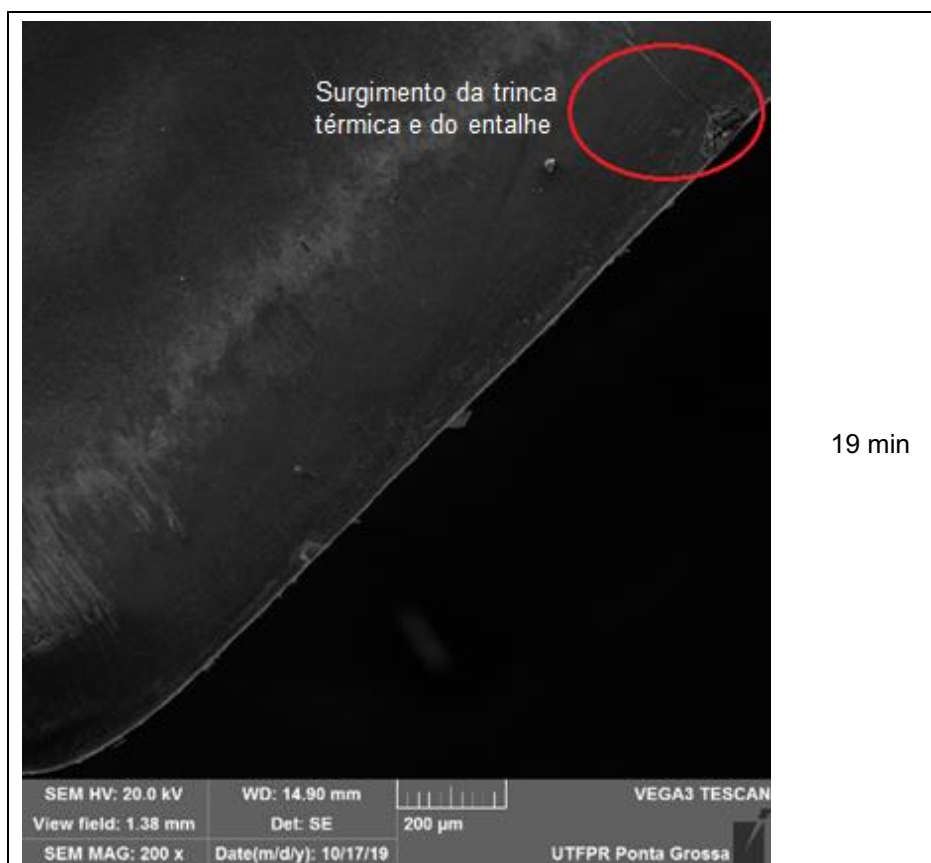
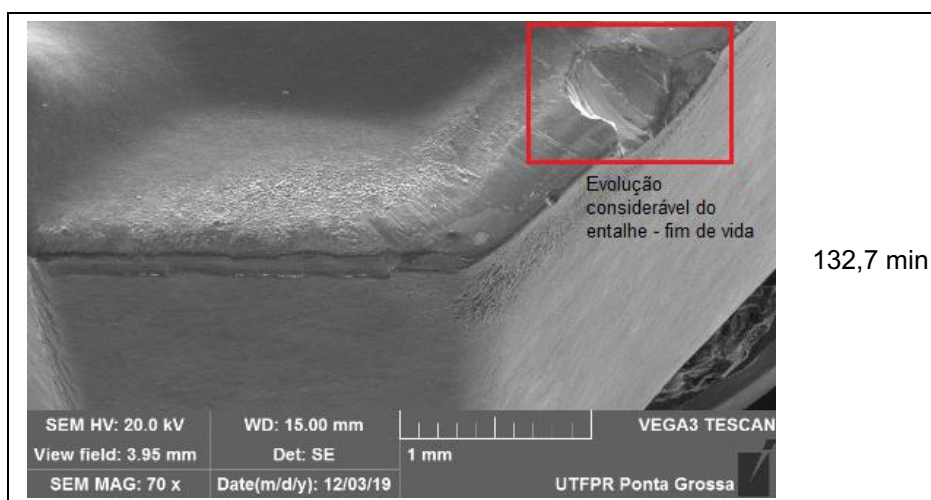


Figura 63 - Acompanhamento das trincas térmicas, no ensaio da condição 3, na aresta de corte primária, para: 19 min e 132,7 min.

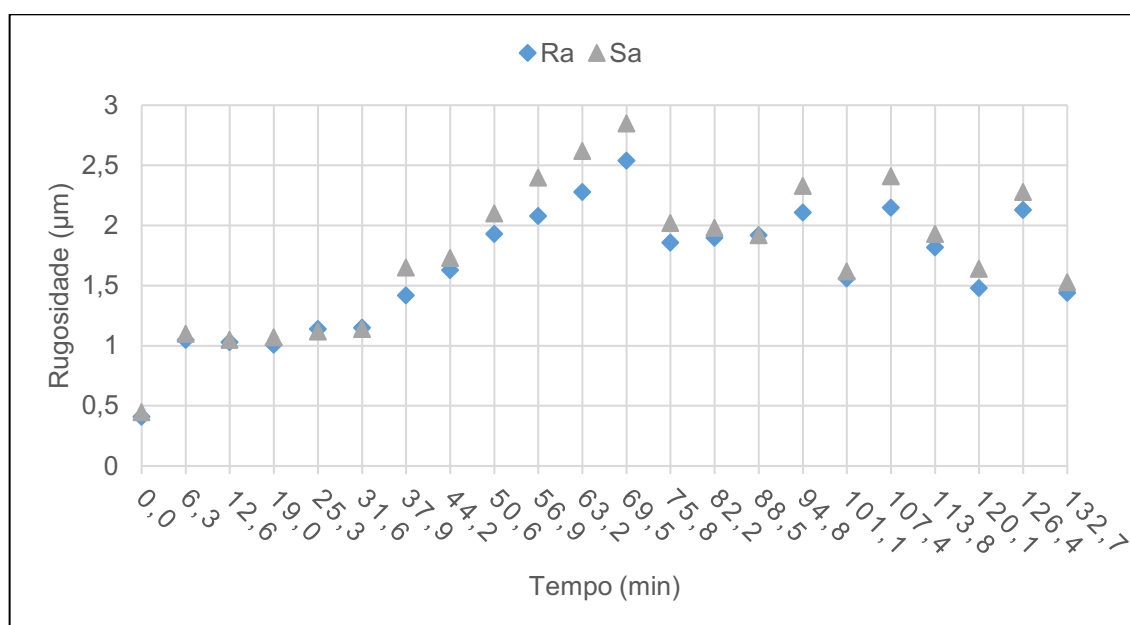
(Conclusão)



Fonte: Autoria própria

Em relação a superfície gerada na peça usinada, passa-se a analisar-se alguns parâmetros de rugosidade e, em paralelo, tentando relacioná-los com o estado de degradação da ferramenta. O primeiro parâmetro analisado foi a rugosidade média (Ra e Sa), conforme Gráfico 18.

Gráfico 18 - Rugosidade média para a condição 3.



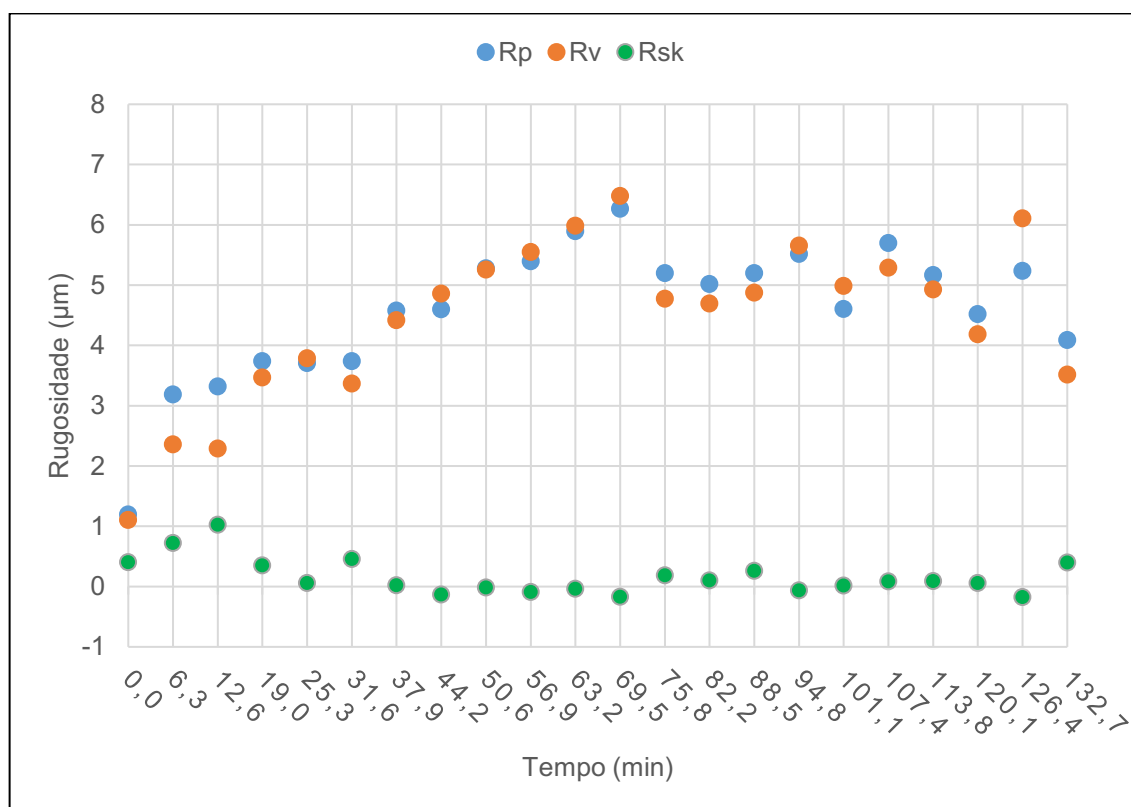
Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado no Gráfico 18, a rugosidade média apresenta um comportamento esperado até o intervalo de 69,5 min, ou seja: o menor valor para o

intervalo zero, onde a ferramenta era nova e; uma tendência de crescimento à medida que a ferramenta sofria desgaste. No entanto, a partir do intervalo de 75,8 min, perde-se aquela tendência e o comportamento passa a ter alternância entre crescimento e reduções. Acredita-se que, a partir deste intervalo, a ferramenta de corte sofreu alguma alteração em algum dos seus elementos produtores de cavaco, que acarretou esta mudança de comportamento.

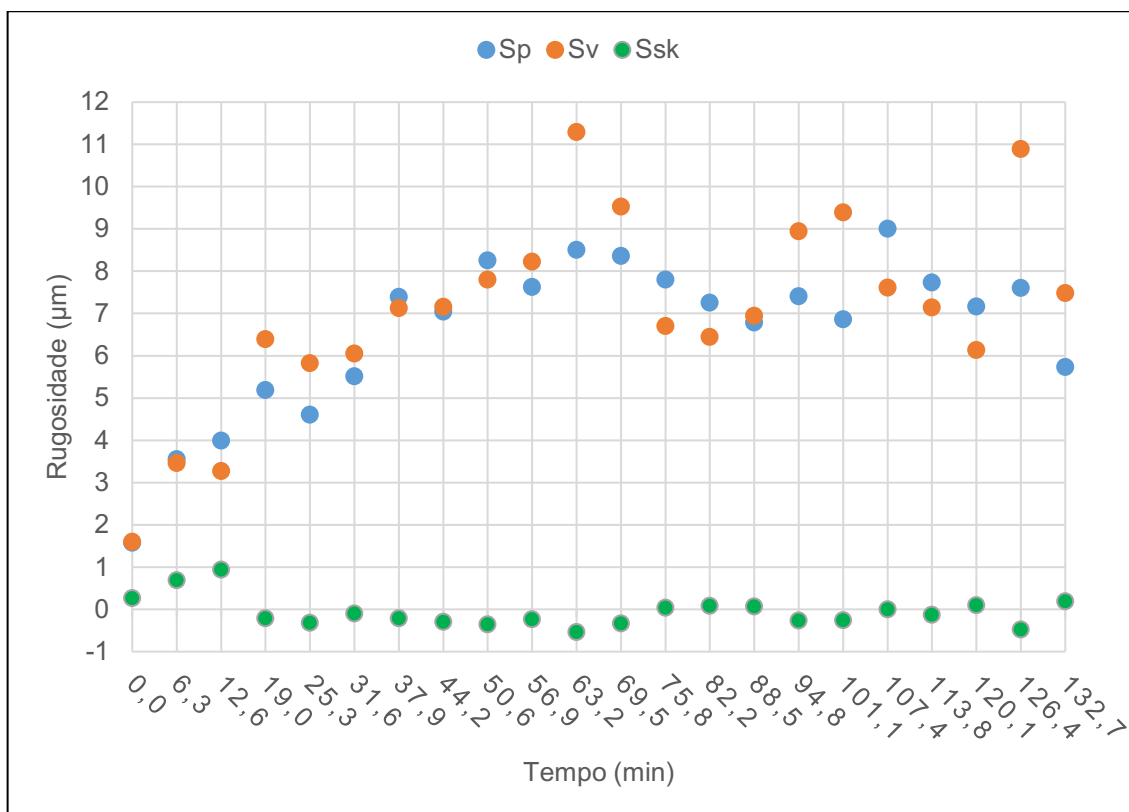
Com o intuito de explicar este comportamento alternado e sem tendência, recorre-se novamente a altura máxima de pico (R_p e S_p), a profundidade máxima de vale (R_v e S_v) e ao fator de assimetria ou *skewness* (R_{sk} e S_{sk}). Os valores destes parâmetros foram expostos no Gráfico 19 e no Gráfico 20.

Gráfico 19 - Rugosidade de pico, de vale e fator de assimetria, avaliados em linha, para a condição 3.



Fonte: Autoria própria

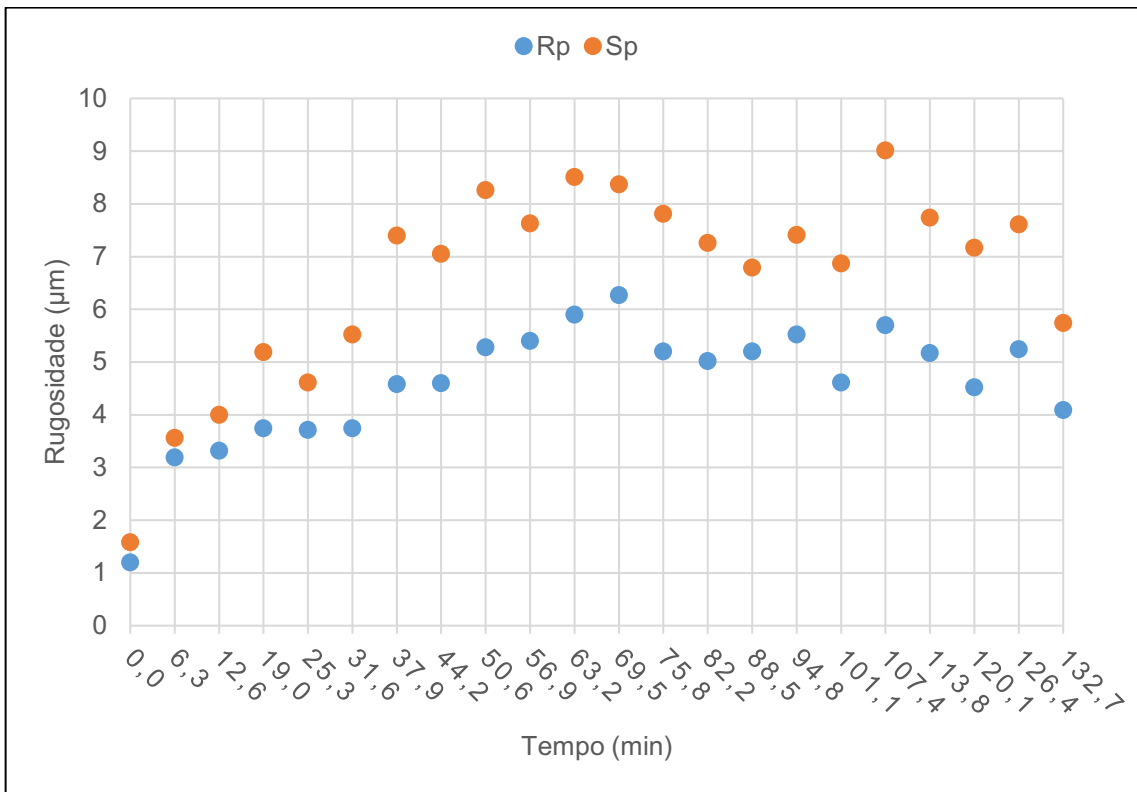
Gráfico 20 - Rugosidade de pico, de vale e fator de assimetria, avaliados em área de amostragem, para a condição 3.



Fonte: Autoria própria

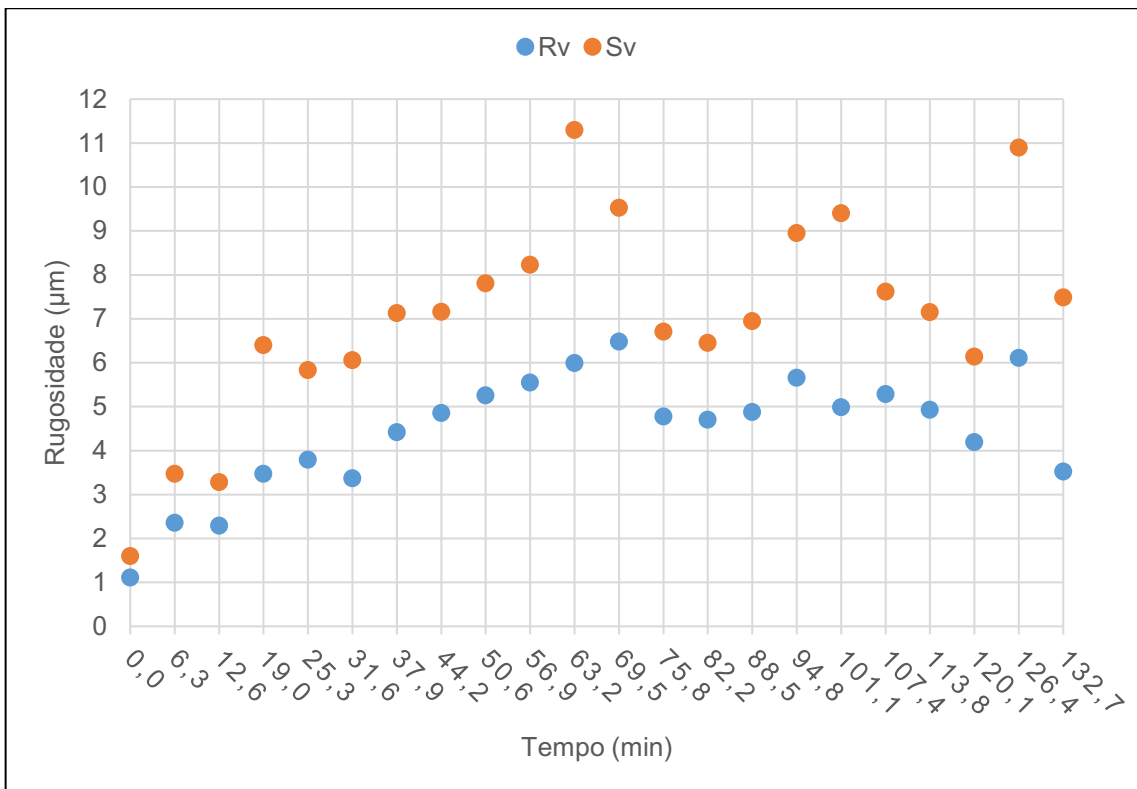
Como observado no Gráfico 19 e no Gráfico 20, as tendências dos comportamentos das alturas dos picos e das profundidades dos vales acompanha a tendência da rugosidade média. Nota-se ainda uma alternância entre a predominância de picos mais altos e vales mais profundos entre os intervalos de fresamento. Observa-se ainda que, quando as profundidades dos vales são maiores que as alturas dos picos, o valor de *skewness* tende a ser negativo. Por fim, as divergências observadas entre os valores analisados em linhas e em área de amostragem podem ser melhor verificadas no Gráfico 21 e no Gráfico 22.

Gráfico 21 - Comparativo entre os valores de Rp e Sp, para a condição 3.



Fonte: Autoria própria

Gráfico 22 - Comparativo entre os valores de Rv e Sv, para a condição 3.

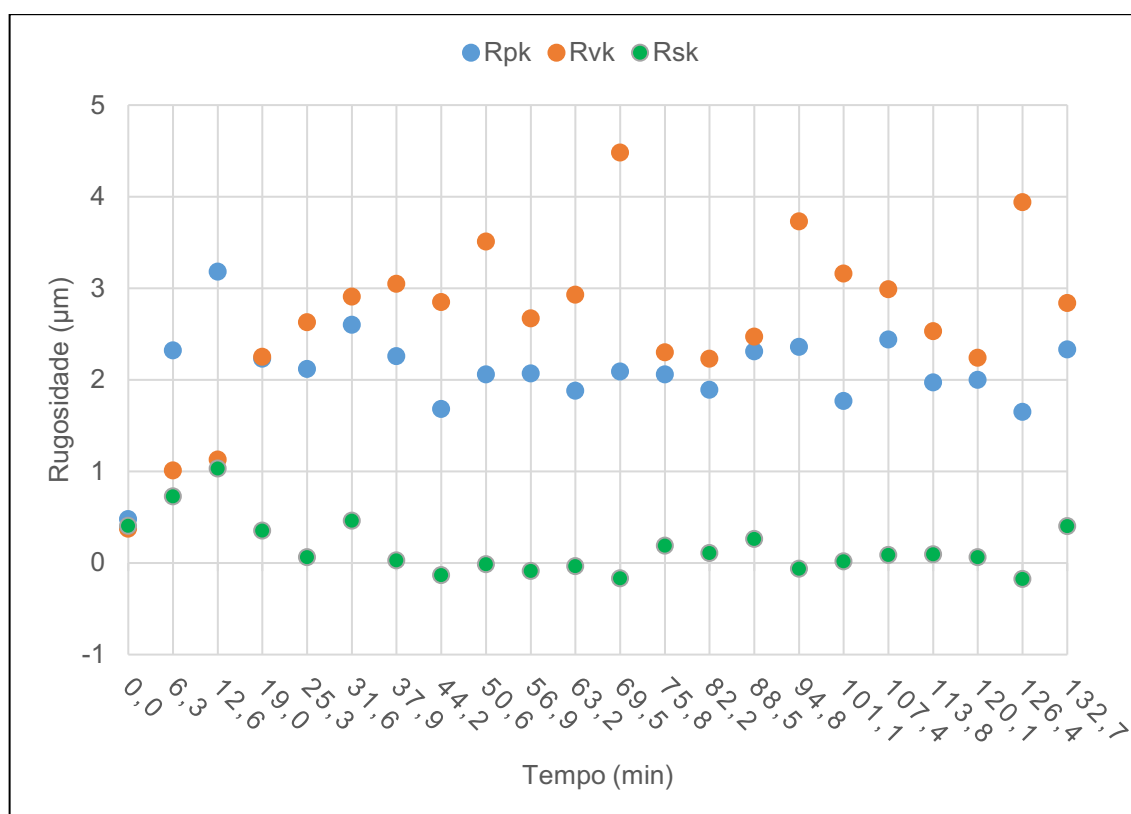


Fonte: Autoria própria

Como observado no Gráfico 21 e no Gráfico 22, os valores obtidos sob análise de área de amostragem são maiores quando comparados aqueles analisados em uma linha do perfil. No entanto, acredita-se que os parâmetros S são muito mais representativos de uma superfície, visto que analisam uma área da ferramenta e não uma linha apenas.

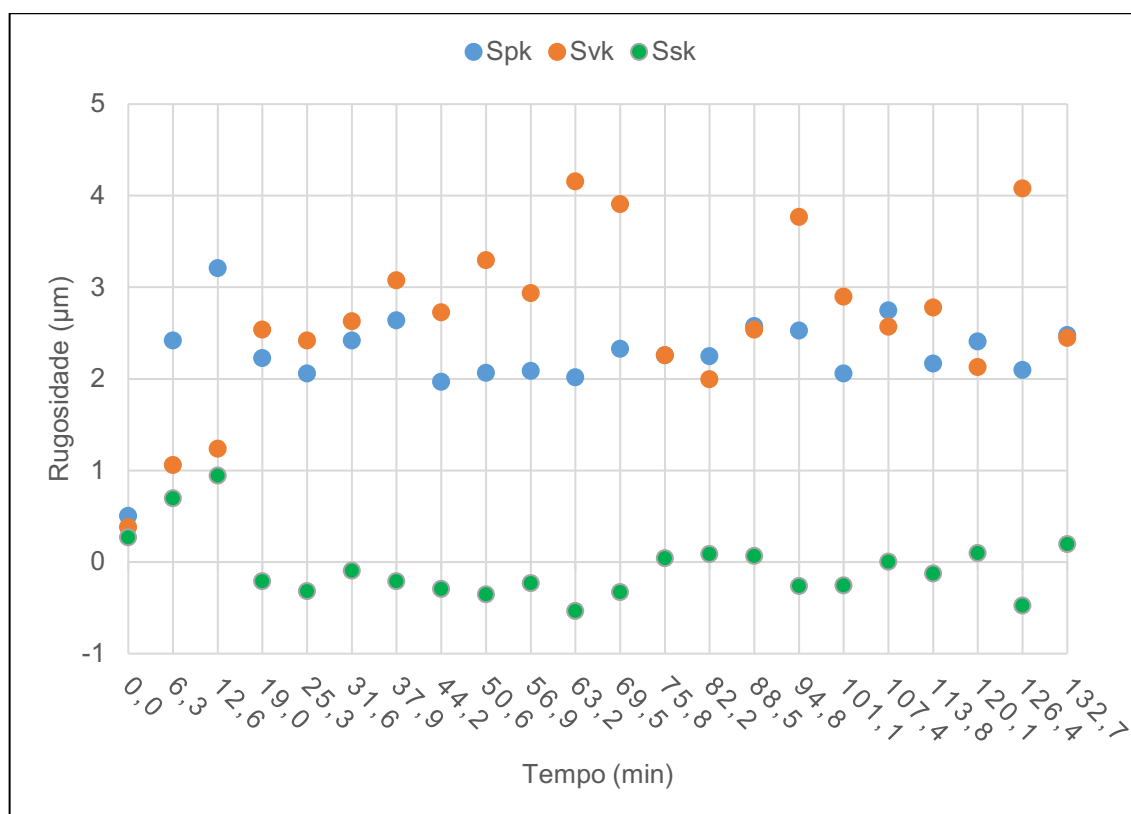
O Gráfico 23 expõe os valores dos parâmetros de altura reduzida de picos (Rpk), profundidade reduzida de vales (Rvk) e fator de assimetria (Rsk), avaliado em linhas do perfil. Já o Gráfico 24 expõe os valores destes mesmos parâmetros, mas avaliados em uma área de amostragem (Spk, Svk e Ssk).

Gráfico 23 - Altura reduzida de picos, profundidade reduzida de vales e skewness, avaliados em linha, para a condição 3.



Fonte: Autoria própria

Gráfico 24 - Altura reduzida de picos, profundidade reduzida de vales e *skewness*, avaliados em área de amostragem, para a condição 3.



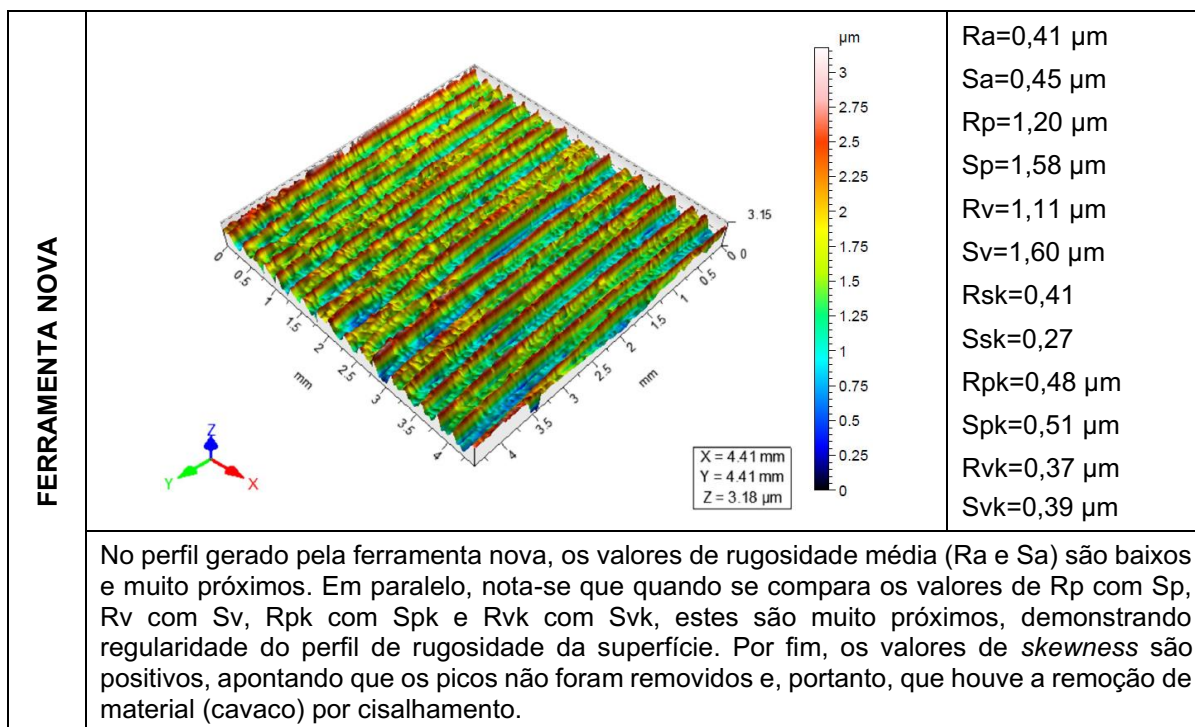
Fonte: Autoria própria

Como observado no Gráfico 23 e no Gráfico 24, há uma predominância de vales profundos. Acredita-se que isto tenha acontecido por conta de processos de adesão, em que os materiais aderidos tendem a aumentar a profundidade dos vales e alargar e remover os picos (*skewness* negativo). Além do mais, nota-se que os valores de picos sobressalentes se estabilizam no intervalo de 2 a 3 µm para a maioria dos intervalos.

Por fim, com o intuito de explicar estes comportamentos descritos anteriormente, faz-se uso de uma comparação qualitativa entre as imagens de degradação da aresta secundária da ferramenta e do perfil gerado pela mesma na superfície da peça.

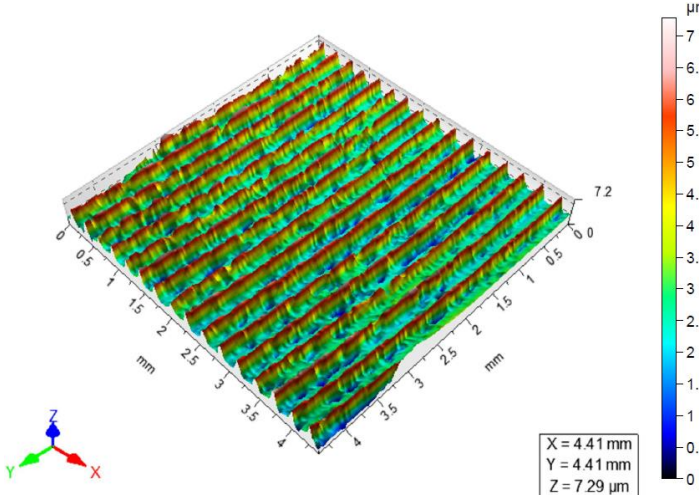
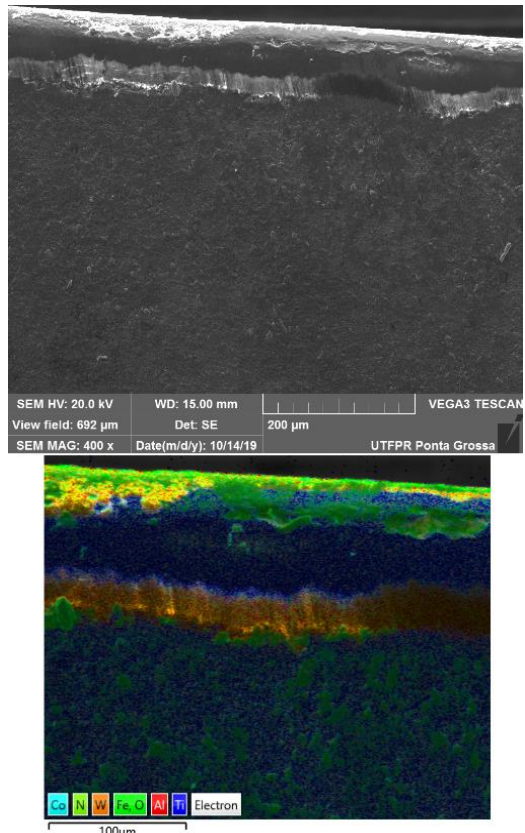
Quadro 4 - Comparação entre estado de degradação da aresta secundária da ferramenta e perfil topográfico da superfície usinada para alguns intervalos de fresamento da condição 3.

(Continua)



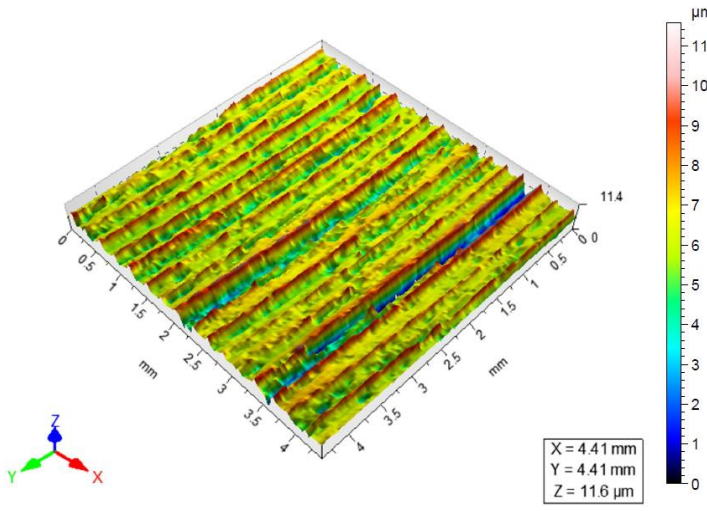
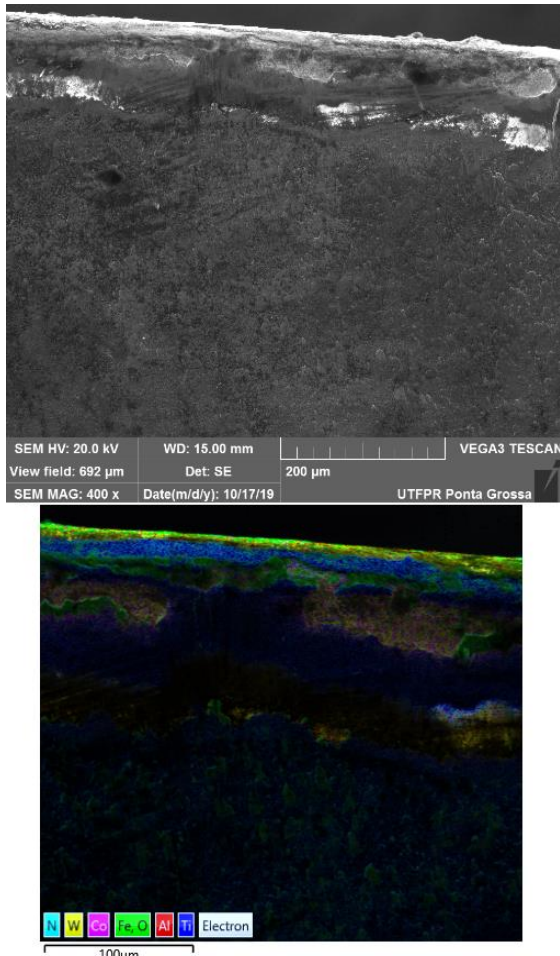
Quadro 4 - Comparação entre estado de degradação da aresta secundária da ferramenta e perfil topográfico da superfície usinada para alguns intervalos de fresamento da condição 3.

(Continua)

12,6 MINUTOS		<p> $R_a=1,03 \mu\text{m}$ $S_a=1,05 \mu\text{m}$ $R_p=3,32 \mu\text{m}$ $S_p=4,00 \mu\text{m}$ $R_v=2,29 \mu\text{m}$ $S_v=3,28 \mu\text{m}$ $R_{sk}=1,03$ $S_{sk}=0,95$ $R_{pk}=3,18 \mu\text{m}$ $S_{pk}=3,21 \mu\text{m}$ $R_{vk}=1,13 \mu\text{m}$ $S_{vk}=1,24 \mu\text{m}$ </p>
	 <p>SEM HV: 20.0 kV WD: 15.00 mm VEGA3 TESCAN View field: 692 μm Det: SE 200 μm SEM MAG: 400 x Date(m/d/y): 10/14/19 UTFPR Ponta Grossa</p> <p>Co N W Fe O Al Ti Electron</p> <p>100μm</p>	<p>$V_{B,max}=33,99 \mu\text{m}$.</p> <p>Nota-se, na região da banda de desgaste, que ainda há grande presença do revestimento, ou seja, o mesmo ainda não foi completamente removido.</p>
<p>Observa-se, para este intervalo, um perfil de rugosidade com características muito próximas daquela observada para enquanto a ferramenta era nova. Acredita-se que este fato se dê pela presença do revestimento, já que o mesmo reduz a temperatura e os esforços envolvidos no processo do corte; esta condição favorece a geração de uma superfície com melhor acabamento.</p>		

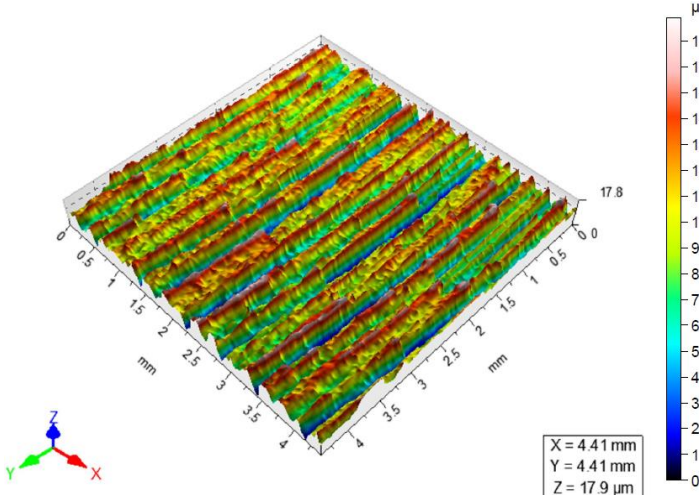
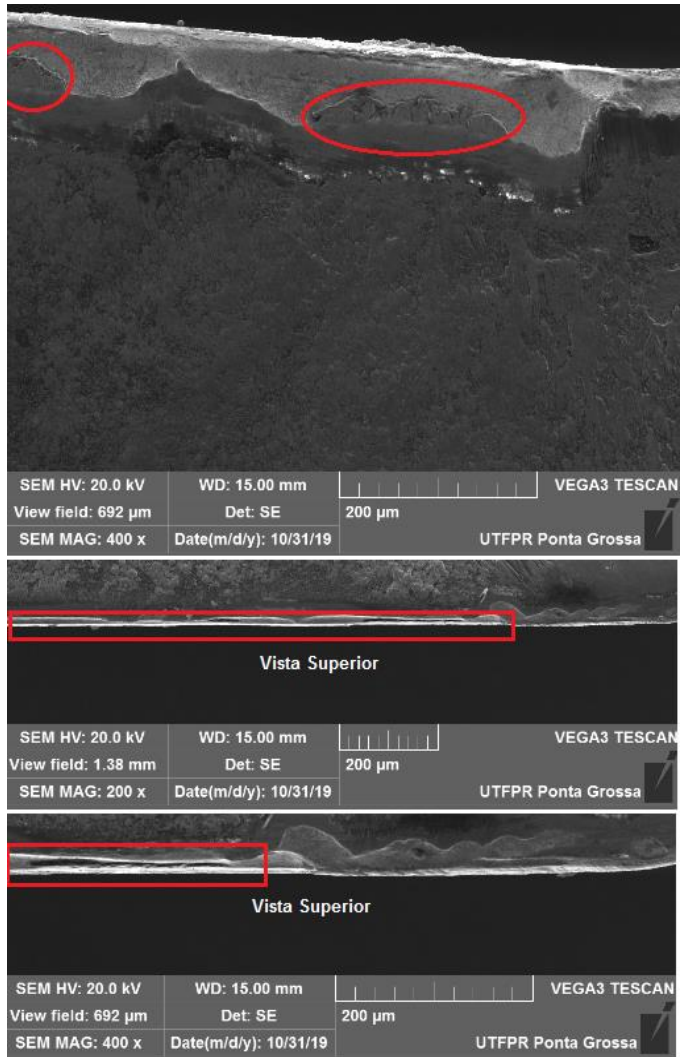
Quadro 4 - Comparação entre estado de degradação da aresta secundária da ferramenta e perfil topográfico da superfície usinada para alguns intervalos de fresamento da condição 3.

(Continua)

19 MINUTOS		<p> $Ra=1,01 \mu\text{m}$ $Sa=1,07 \mu\text{m}$ $Rp=3,74 \mu\text{m}$ $Sp=5,19 \mu\text{m}$ $Rv=3,47 \mu\text{m}$ $Sv=6,40 \mu\text{m}$ $Rsk=0,35$ $Ssk=-0,21$ $Rpk=2,23 \mu\text{m}$ $Spk=2,23 \mu\text{m}$ $Rvk=2,25 \mu\text{m}$ $Svk=2,54 \mu\text{m}$ </p>
		<p>$V_{B,max}=59,86 \mu\text{m}$.</p> <p>Nota-se, na região da banda de desgaste, que ainda há grande presença do revestimento, no entanto, há grandes áreas onde o mesmo foi removido; gerando certa irregularidade nesta superfície.</p>
<p>Como nos dois intervalos anteriores, mantem-se os valores de rugosidade média baixos. No entanto, quando se observa os valores de rugosidade obtidos em linha e em área, nota-se divergência entre eles. Além do mais, quando se compara Rsk com Ssk, observa-se que, quando analisado em linhas, trata-se de um perfil onde os picos não foram removidos; já quando analisado em área, trata-se de um <i>skewness</i> negativo e, portanto, um perfil com picos removidos. Estes fatos representam uma irregularidade no perfil, visto que linhas de análise representam perfis distintos quando comparados a áreas de amostragem.</p>		

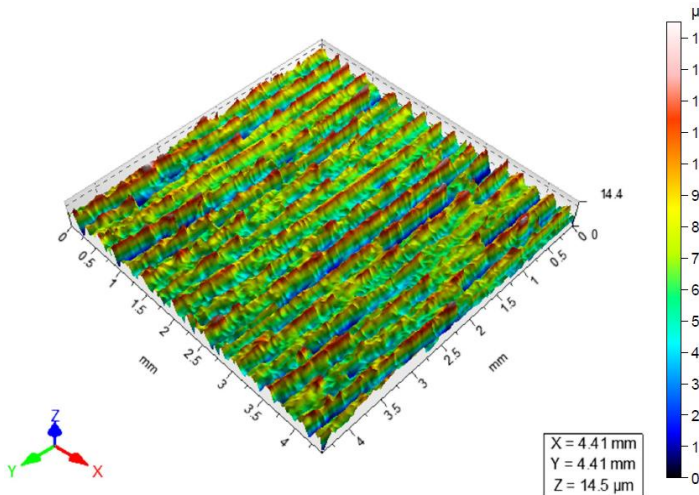
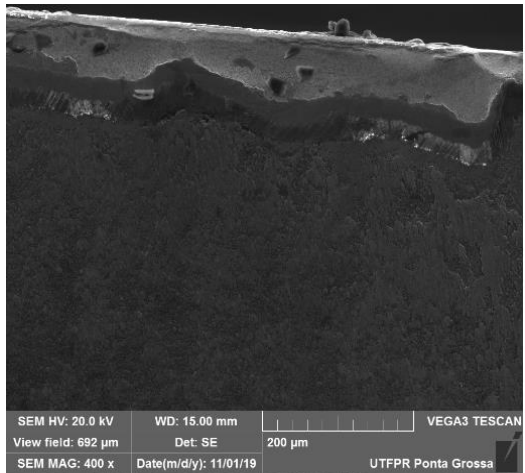
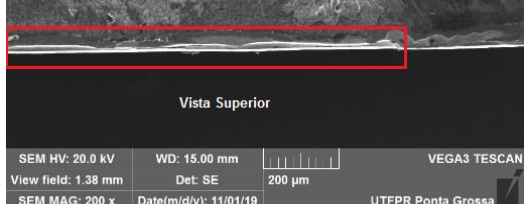
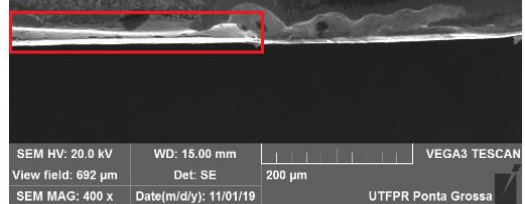
Quadro 4 - Comparação entre estado de degradação da aresta secundária da ferramenta e perfil topográfico da superfície usinada para alguns intervalos de fresamento da condição 3.

(Continua)

		<p> $R_a=2,54 \mu\text{m}$ $S_a=2,85 \mu\text{m}$ $R_p=6,27 \mu\text{m}$ $S_p=8,37 \mu\text{m}$ $R_v=6,48 \mu\text{m}$ $S_v=9,53 \mu\text{m}$ $R_{sk}=-0,17$ $S_{sk}=-0,33$ $R_{pk}=2,09 \mu\text{m}$ $S_{pk}=2,33 \mu\text{m}$ $R_{vk}=4,48 \mu\text{m}$ $S_{vk}=3,91 \mu\text{m}$ </p>
<p>69,5 MINUTOS</p>		<p> $V_{B,max}=95,11 \mu\text{m}$. </p> <p> Nota-se a presença de algumas porções de material aderido. Além do mais, há a presença de perda de material no sentido radial da ferramenta. </p>
<p>Observando o perfil de rugosidade gerado na superfície da peça, nota-se vales bastante profundos e uma geometria com a remoção dos picos (<i>skewness</i> negativo). Acredita-se que este fato tenha ocorrido pela presença de material aderido na aresta de corte de ferramenta, que acabou aprofundando mais o fundo dos vales do perfil e removendo as cristas dos picos.</p>		

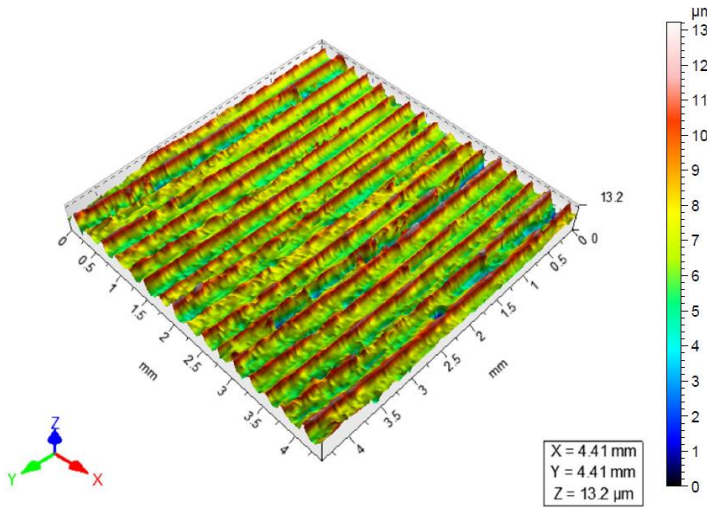
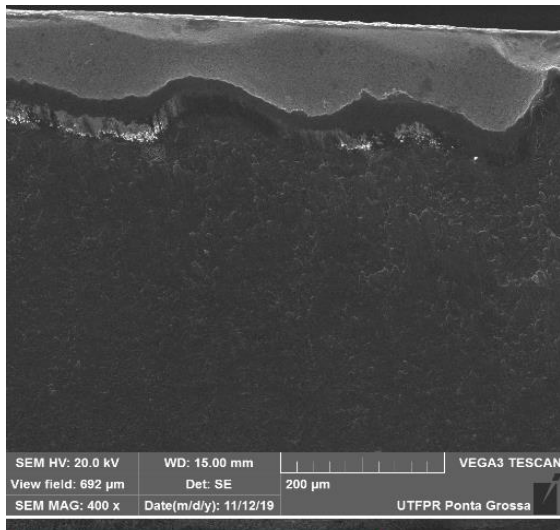

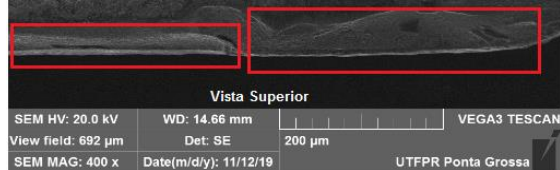
Quadro 4 - Comparação entre estado de degradação da aresta secundária da ferramenta e perfil topográfico da superfície usinada para alguns intervalos de fresamento da condição 3.

(Continua)

75,8 MINUTOS		<p> $R_a=1,86 \mu\text{m}$ $S_a=2,02 \mu\text{m}$ $R_p=5,20 \mu\text{m}$ $S_p=7,81 \mu\text{m}$ $R_v=4,78 \mu\text{m}$ $S_v=6,71 \mu\text{m}$ $R_{sk}=0,19$ $S_{sk}=0,05$ $R_{pk}=2,06 \mu\text{m}$ $S_{pk}=2,26 \mu\text{m}$ $R_{vk}=2,30 \mu\text{m}$ $S_{vk}=2,26 \mu\text{m}$ </p>
	 <p style="text-align: center;">Vista Superior</p>  	<p>$V_{B,max}=96,47 \mu\text{m}$.</p> <p>Observa-se um desgaste muito semelhante ao do intervalo anterior. Inclusive, o desgaste de flanco máximo evoluiu apenas $1,36 \mu\text{m}$.</p>
	<p>Analisando sob o aspecto da ferramenta de corte, percebe-se que a evolução do desgaste foi discreta quando comparada ao intervalo anterior (69,6 min). No entanto, observa-se um perfil de rugosidade muito diferente do intervalo anterior: rugosidade média com valor reduzido e <i>skewness</i> com valor ideal, próximo de zero. Mas, em uma análise qualitativa do perfil topográfico, nota-se que o perfil não apresenta uma regularidade tampouco a formação de picos e vales bem definidos. Acredita-se que, a partir deste intervalo de fresamento, a ferramenta de corte tenha sofrido alguma alteração em sua geometria que acabou alterando o mecanismo de formação de cavaco e, portanto, na geração do perfil de rugosidade.</p>	

Quadro 4 - Comparação entre estado de degradação da aresta secundária da ferramenta e perfil topográfico da superfície usinada para alguns intervalos de fresamento da condição 3.

(Conclusão)

132,7 MINUTOS		<p> $Ra=1,44 \mu\text{m}$ $Sa=1,53 \mu\text{m}$ $Rp=4,09 \mu\text{m}$ $Sp=5,74 \mu\text{m}$ $Rv=3,52 \mu\text{m}$ $Sv=7,49 \mu\text{m}$ $Rsk=0,40$ $Ssk=0,20$ $Rpk=2,33 \mu\text{m}$ $Spk=2,48 \mu\text{m}$ $Rvk=2,84 \mu\text{m}$ $Svk=2,45 \mu\text{m}$ </p>
	 <p style="text-align: center;">Vista Superior</p>  <p style="text-align: center;">Vista Superior</p>  <p style="text-align: center;">Vista Superior</p>	<p>$V_{B,max}=130,13 \mu\text{m}$.</p> <p>Observa-se um aumento considerável na perda de material no sentido radial da ferramenta.</p>
	<p>Por mais que a ferramenta tenha chegado ao seu fim de vida pelo aumento excessivo do desgaste de entalhe, nota-se que o perfil gerado revelou um baixo valor de rugosidade média com uma boa formação e sequencia de picos e vales. Mais uma vez, acredita-se que a perda de material no sentido radial da ferramenta alterou suas geometrias de modo que favoreceu o mecanismo de corte, gerando um bom acabamento superficial. Cabe ressaltar que se trata de uma condição aleatória e inesperada, sendo que, pela alta magnitude no entalhe, a ferramenta pode falhar catastróficamente a qualquer momento.</p>	

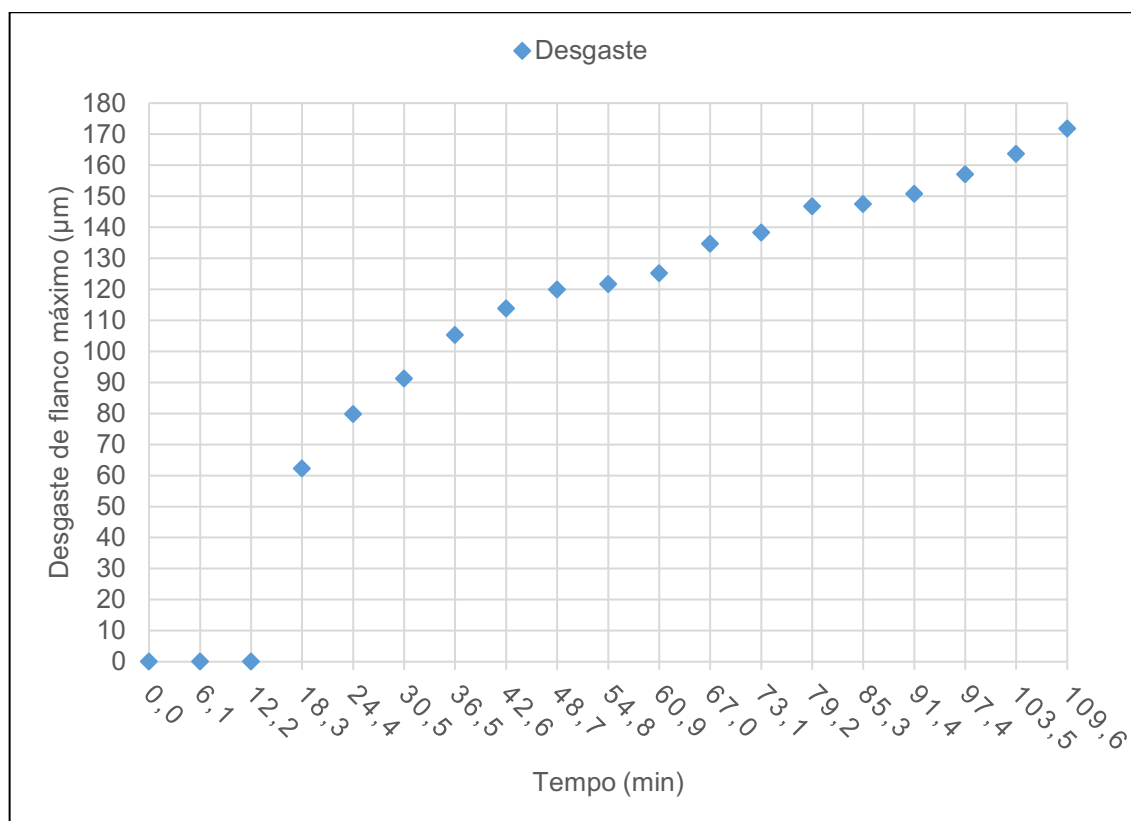
Fonte: Autoria própria

4.4.4 Condição 4

Os ensaios da condição 4 são conduzidos com a utilização da ferramenta A, velocidade de corte igual a 230 m/min e avanço por dente igual a 0,374 mm/aresta.

Como nas condições anteriores, a primeira análise foi referente ao desgaste de flanco máximo, medido na superfície secundária de folga, conforme o Gráfico 25.

Gráfico 25 - Valores de desgaste máximo de flanco para a condição 4.



Fonte: Autoria própria

Analisando o Gráfico 25, observa-se que a ferramenta A apresenta um comportamento de desgaste máximo de flanco com tendência de crescimento até a falha da mesma, em 109,6 minutos de fresamento. Nota-se ainda que o revestimento só é removido por completo a partir do intervalo de 18,3 min, aproximadamente, ponto em que se iniciaram as medidas do desgaste. Por fim, considera-se um resultado válido, visto que apresenta um tempo de vida menor, quando comparado a condição 3 (mesma ferramenta e avanço menor).

Em paralelo a análise do desgaste de flanco, verificou-se o surgimento de trincas na aresta primária de corte da ferramenta. Algumas imagens das trincas estão dispostas na Figura 64.

Figura 64 - Acompanhamento das trincas térmicas, no ensaio da condição 4, na aresta de corte primária, para: 12,2 min, 48,7 min e 109,6 min.

(Continua)

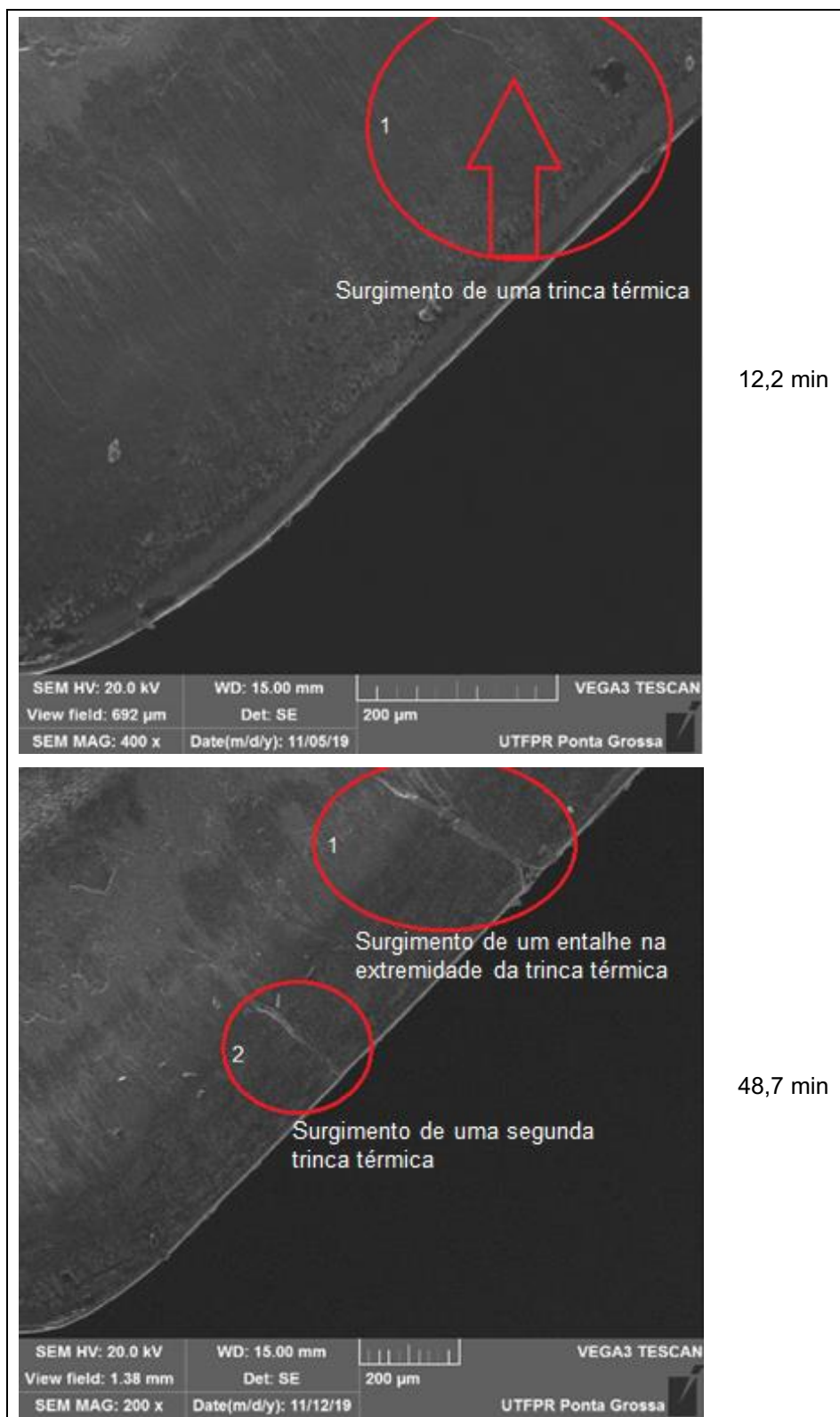
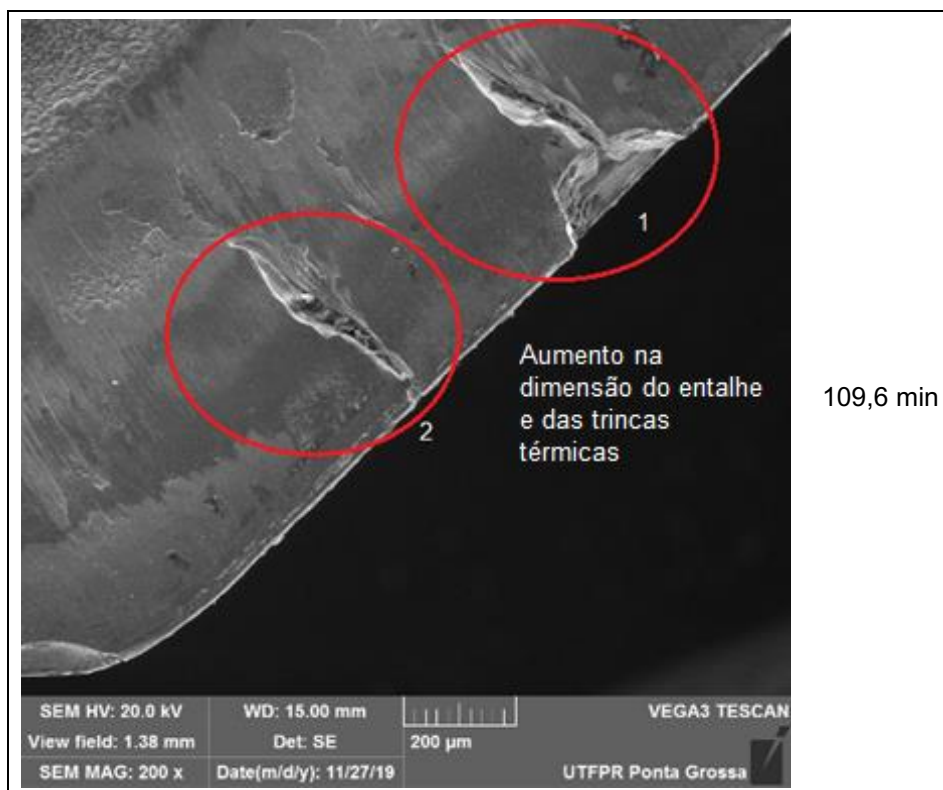


Figura 64 - Acompanhamento das trincas térmicas, no ensaio da condição 4, na aresta de corte primária, para: 12,2 min, 48,7 min e 109,6 min.

(Conclusão)

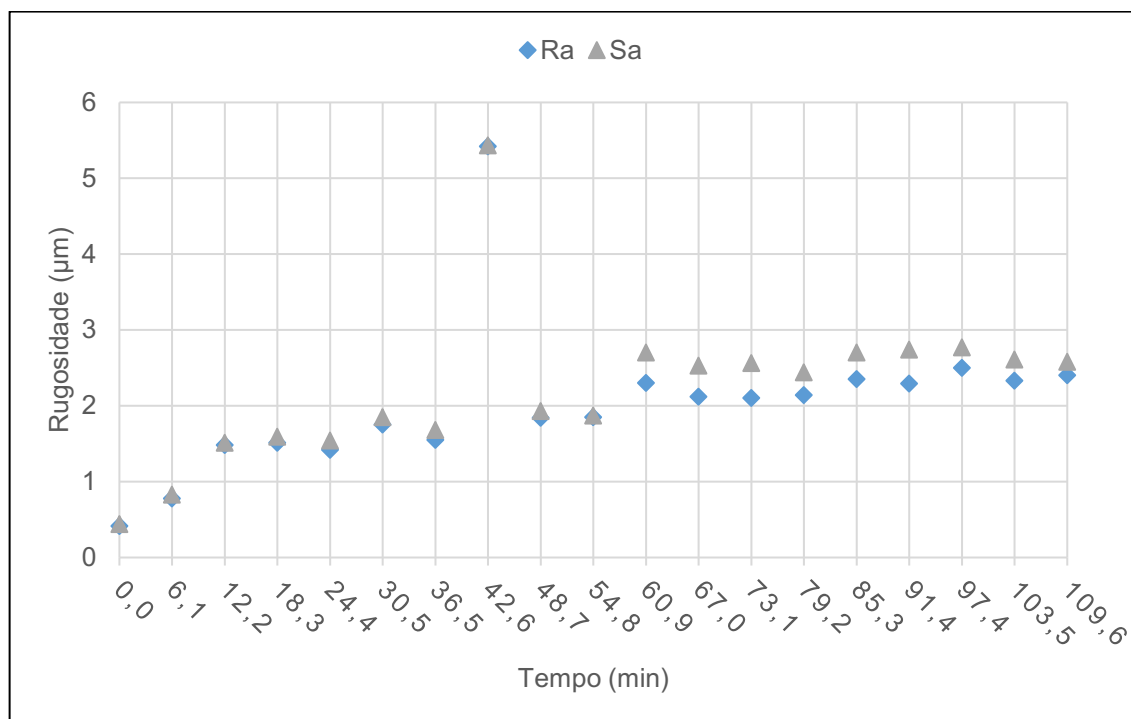


Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado na Figura 64, há o surgimento de uma trinca térmica (trinca 1) na aresta de corte primária da ferramenta no intervalo de 12,2 min. À medida que se dá sequência nos ensaios de fresamento, esta trinca se propaga até que, em 48,7 min, há a formação de um entalhe na extremidade da mesma; além do mais, neste mesmo intervalo, há o surgimento de mais uma trinca térmica (trinca 2). Além disso, é importante salientar que a grande magnitude do entalhe foi a responsável pelo fim de vida da ferramenta em 109,6 min de fresamento.

Sob o aspecto da avaliação das superfícies geradas na peça, o primeiro parâmetro analisado foi a rugosidade média, tanto em linha (R_a) quanto em área de amostragem (S_a), conforme o Gráfico 26.

Gráfico 26 - Rugosidade média para a condição 4.

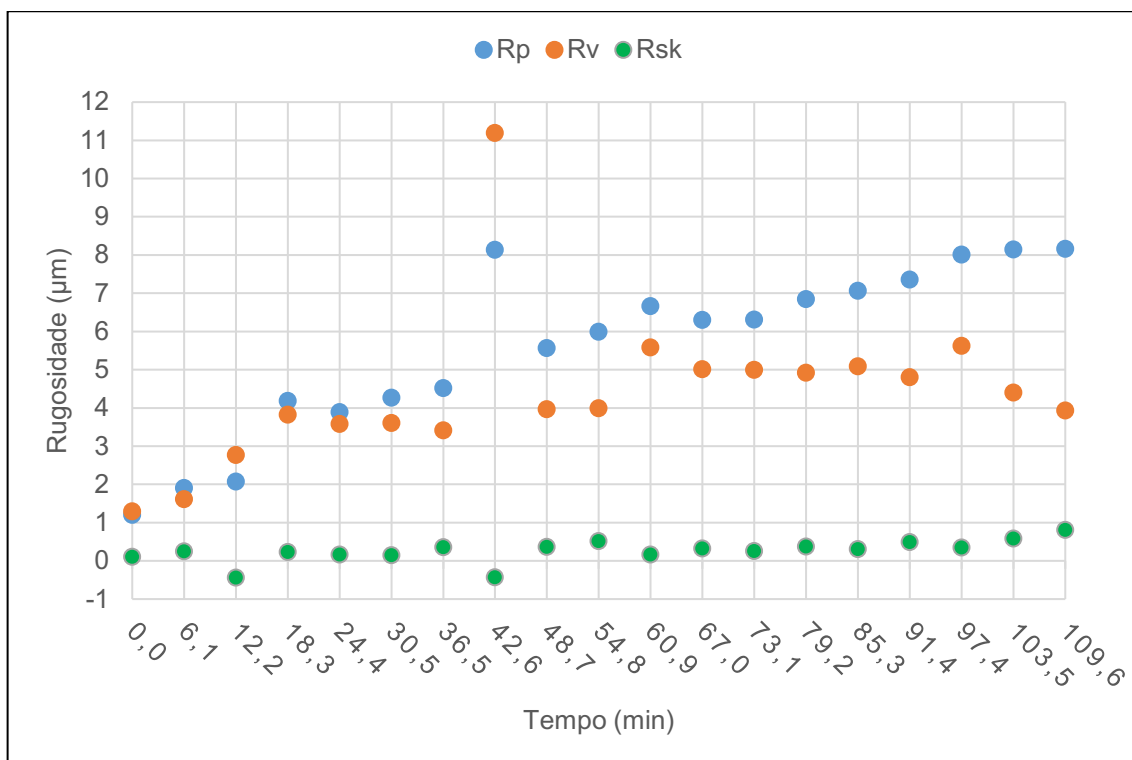


Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado no Gráfico 26, o perfil impresso na peça pela ferramenta nova é o que apresenta os menores valores de rugosidade média. Além do mais, nota-se um comportamento com tendência esperada, ou seja, com aumento dos seus valores à medida que ocorrem os ensaios de fresamento. Por fim, observa-se que os valores de Ra e Sa são muito próximos, principalmente para os intervalos que se estendem de 0 a 54,8 minutos. No entanto, observa-se uma divergência do comportamento da rugosidade (*outlier*) em 42,6 min, onde os valores de Ra e Sa aumentam demasiadamente.

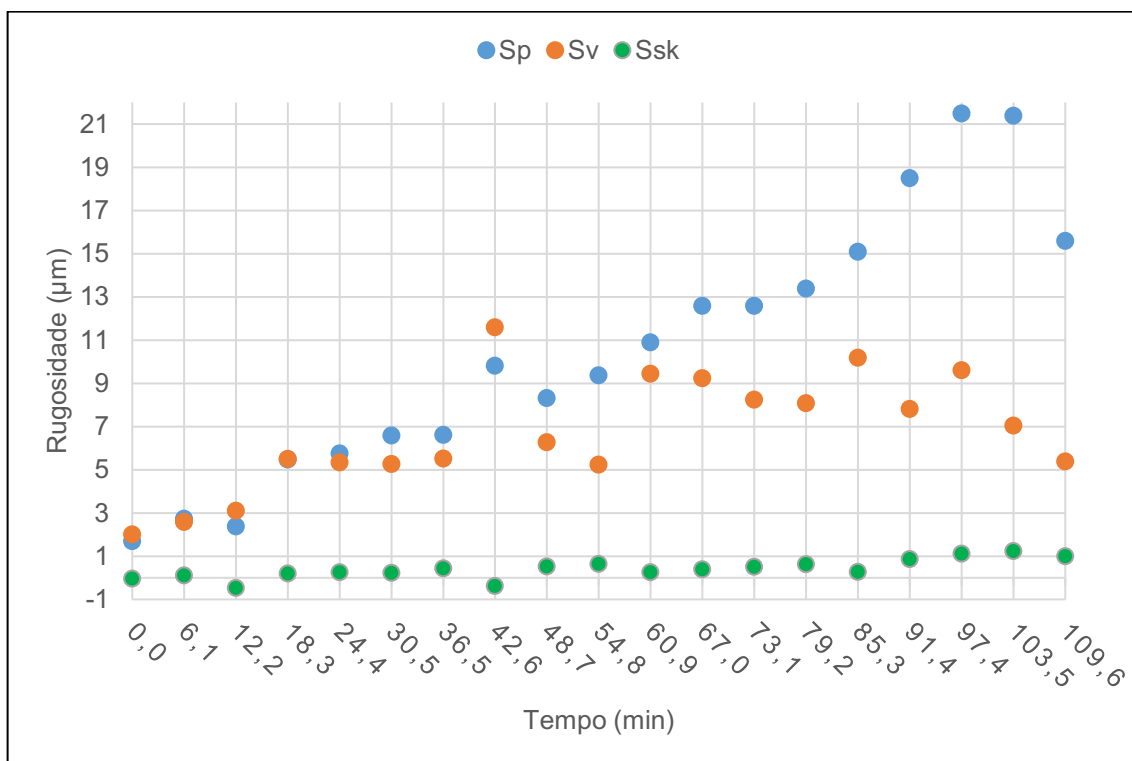
Com o intuito de realizar uma análise mais refinada dos perfis gerados nos ensaios de fresamento, analisou-se ainda rugosidade de pico, vale e fator de assimetria (*skewness*). Os valores destes parâmetros foram dispostos no Gráfico 27 e no Gráfico 28.

Gráfico 27 - Rugosidade de pico, de vale e fator de assimetria, avaliados em linha, para a condição 4.



Fonte: Autoria própria

Gráfico 28 - Rugosidade de pico, de vale e fator de assimetria, avaliados em área de amostragem, para a condição 4.

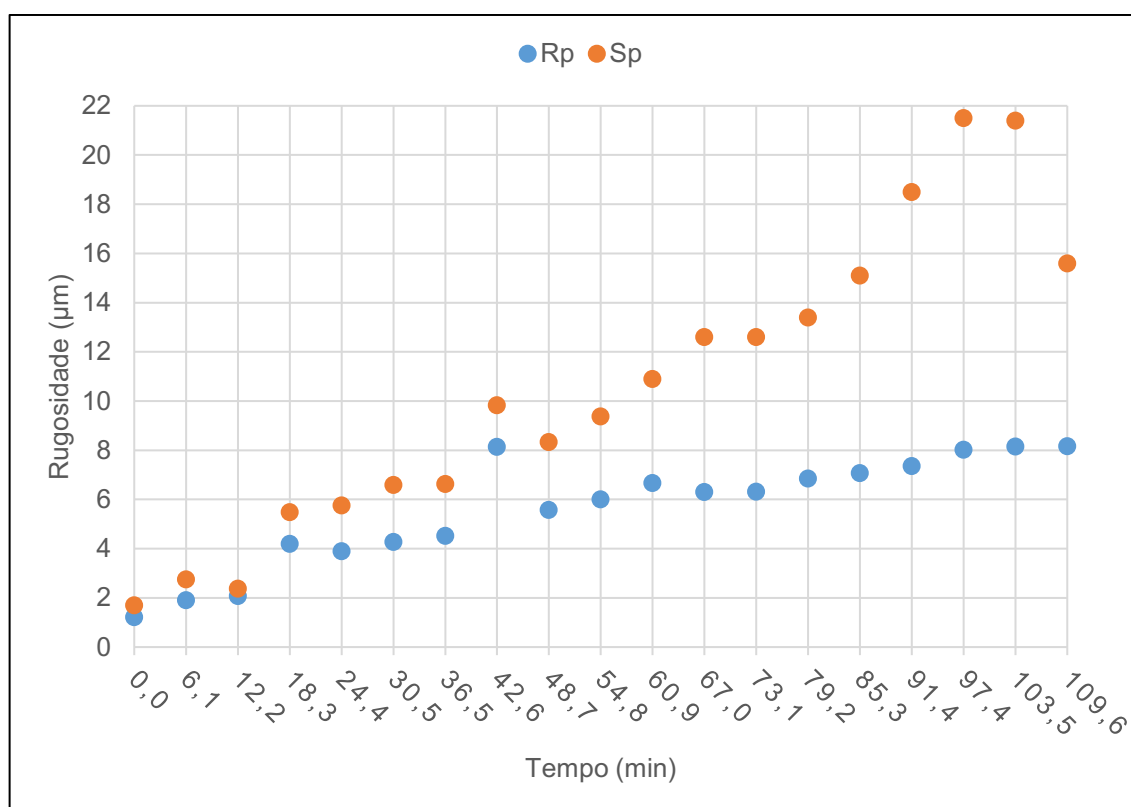


Fonte: Autoria própria

Como pode ser observado no Gráfico 27 e no Gráfico 28, há a predominância de perfis onde as alturas dos picos são maiores que as profundidades dos vales e, portanto, com *skewness* positivo. Com ressalva dos intervalos 12,2 min e 42,6 min, em que é observado uma característica inversa: profundidades de vales maiores que as alturas de picos e *skewness* negativo. Por fim, nota-se que estes parâmetros são mais sensíveis quando analisados em área (parâmetros S), visto que, além de valores maiores, resultam em aumentos nas divergências entre picos e vales, principalmente para intervalos a partir de 67 minutos.

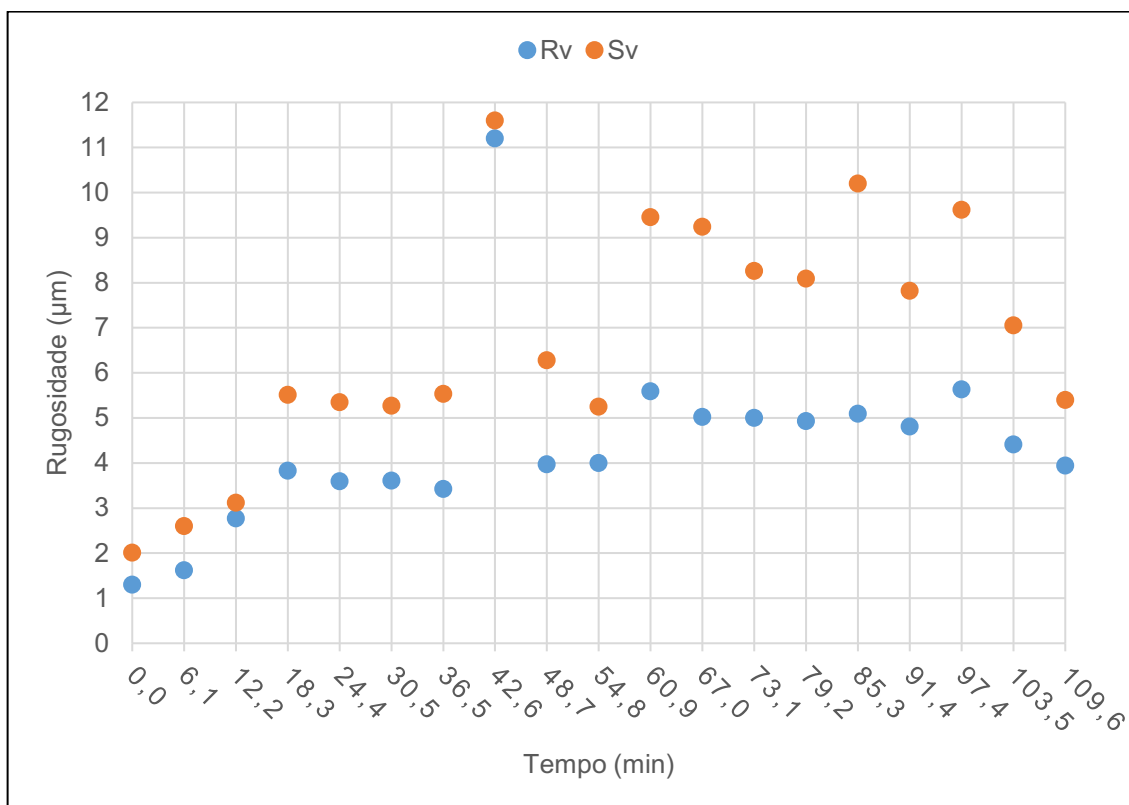
Em relação a esta observação, tem-se dois gráficos: um que apresenta os valores de Rp e Sp (Gráfico 29) e, o outro, que apresenta os valores de Rv e Sv (Gráfico 30).

Gráfico 29 - Comparativo entre os valores de Rp e Sp, para a condição 4.



Fonte: Autoria própria

Gráfico 30 - Comparativo entre os valores de Rv e Sv, para a condição 4.



Fonte: Autoria própria

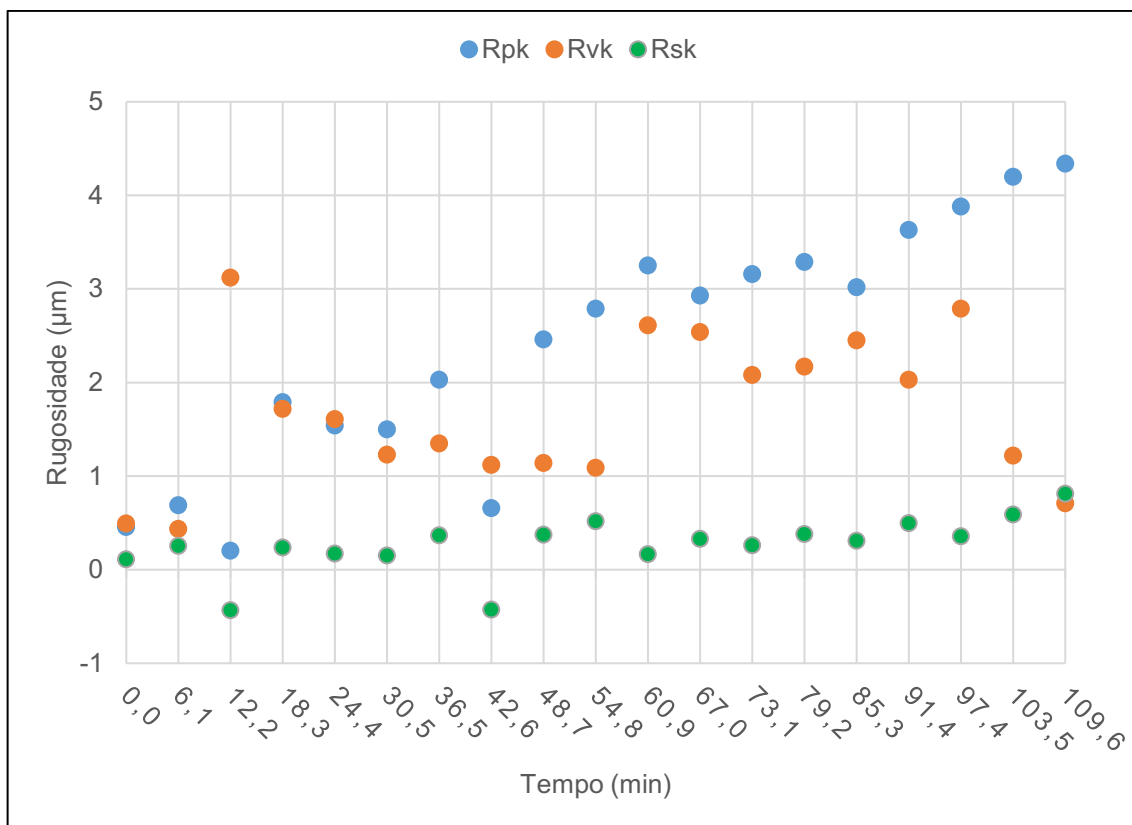
Analisando o Gráfico 29, observa-se que os valores de Rp e Sp eram muito próximos até o intervalo de 12,2 min, intervalo este em que ainda havia revestimento na região do flanco da aresta de corte secundária da ferramenta. A partir daí, passa-se a ter uma divergência maior entre os valores obtidos para Rp e Sp até que, a partir do intervalo de 48,7 min, esta diferença passa a aumentar e ser maior que 2 µm. Acredita-se que em 48,7 min a ferramenta sofre alguma alteração geométrica em sua aresta de corte e passou a criar essa discrepância entre o que era analisado em linhas (Rp) com o que era analisado em área de amostragem (Sp).

Vale lembrar ainda que é muito mais conveniente a abordagem da análise em área (Sp neste caso) pois representa um perfil gerado pela aresta como um todo da ferramenta e, portanto, muito mais representativo de uma superfície quando comparada ao Rp.

Uma condição muito semelhante para Rv e Sv pode ser observada no Gráfico 30: valores muito próximos para os intervalos que se estendem até 12,2 min e aumento da divergência dos valores a partir de 48,7 min. Além do mais, nota-se que em 42,6 min os valores de Rv e Sv também apresentam um *outlier*.

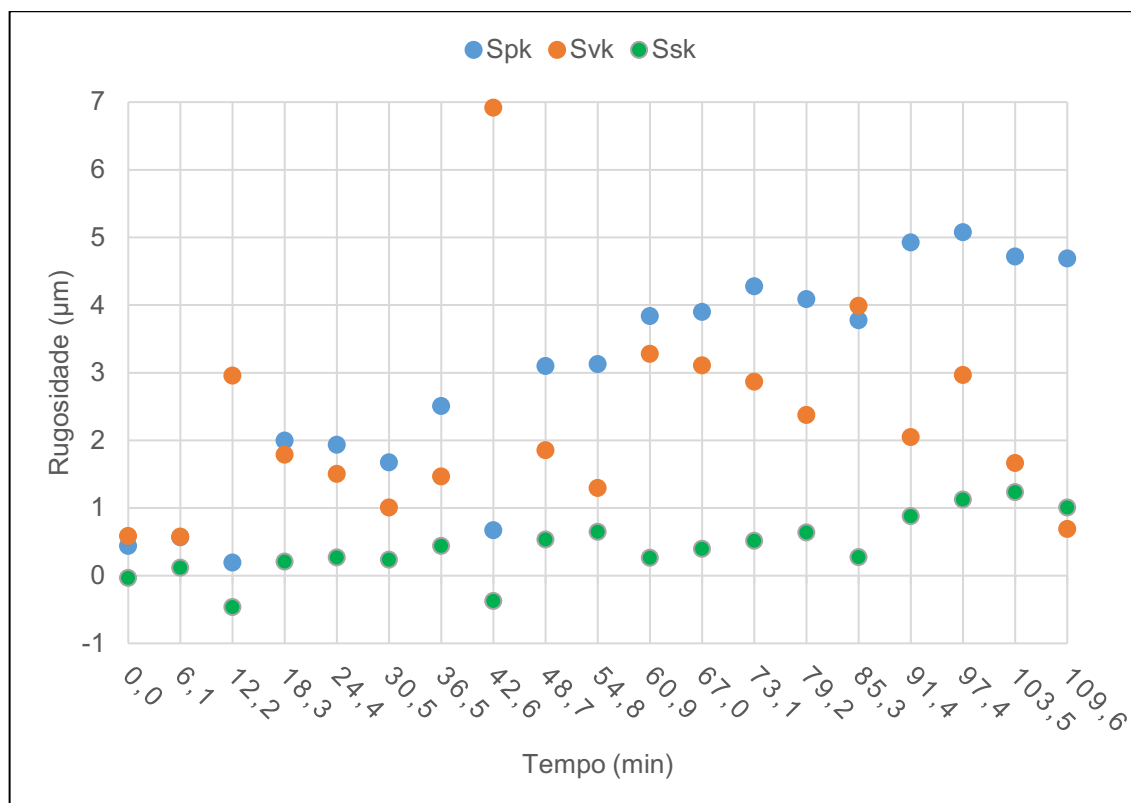
Por fim, considerou-se importante a verificação dos picos protuberantes e dos vales profundos, tanto analisados em linhas quanto em área de amostragem (Rpk, Spk, Rvk e Svk).

Gráfico 31 - Altura reduzida de picos, profundidade reduzida de vales e skewness, avaliados em linha, para a condição 4.



Fonte: Autoria própria

Gráfico 32 - Altura reduzida de picos, profundidade reduzida de vales e *skewness*, avaliados em área de amostragem, para a condição 4.



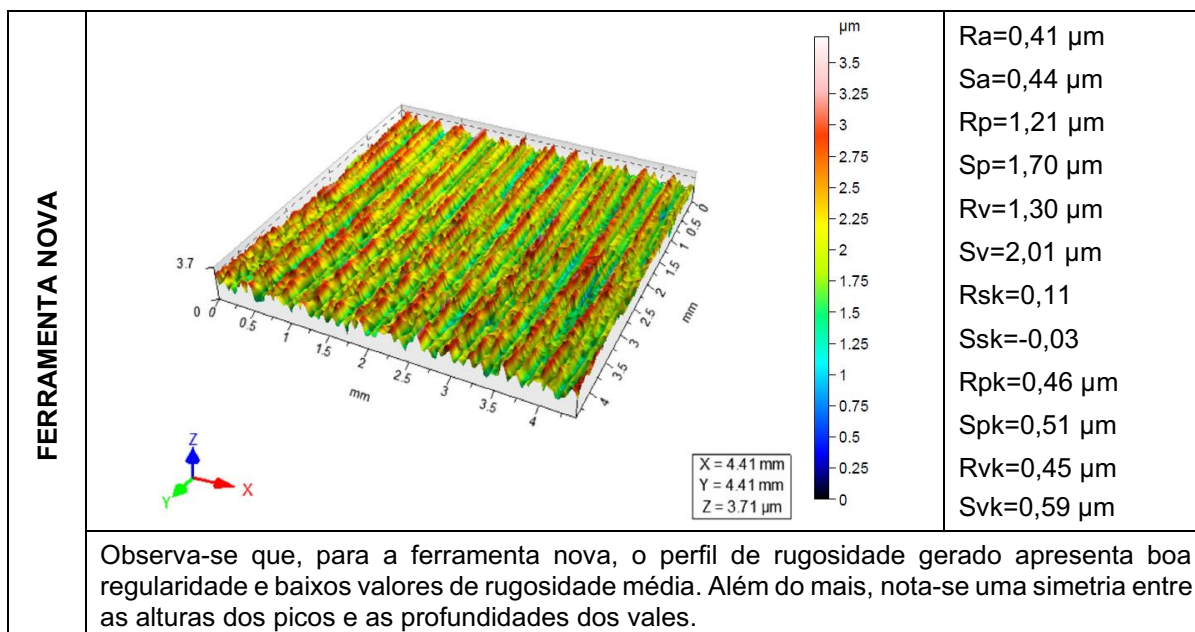
Fonte: Autoria própria

Analisando o Gráfico 31 e o Gráfico 32, nota-se mais uma vez a predominância dos picos sobressalentes em relação aos vales. Com ressalva dos intervalos 12,2 min e 42,6 min, onde os vales profundos são maiores quando comparados aos picos. Esta análise foi muito semelhante daquela obtida ao observar o Gráfico 27 e o Gráfico 28.

Por fim, com o intuito de explicar estes comportamentos descritos anteriormente, faz-se uso de uma comparação qualitativa entre as imagens de degradação da aresta secundária da ferramenta e do perfil gerado pela mesma na superfície da peça.

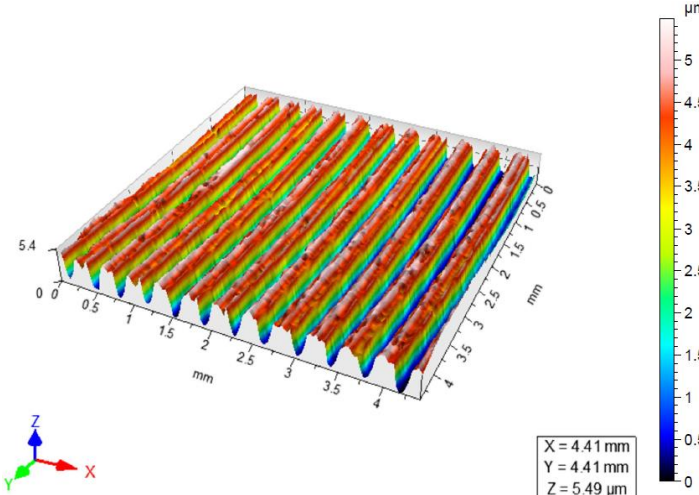
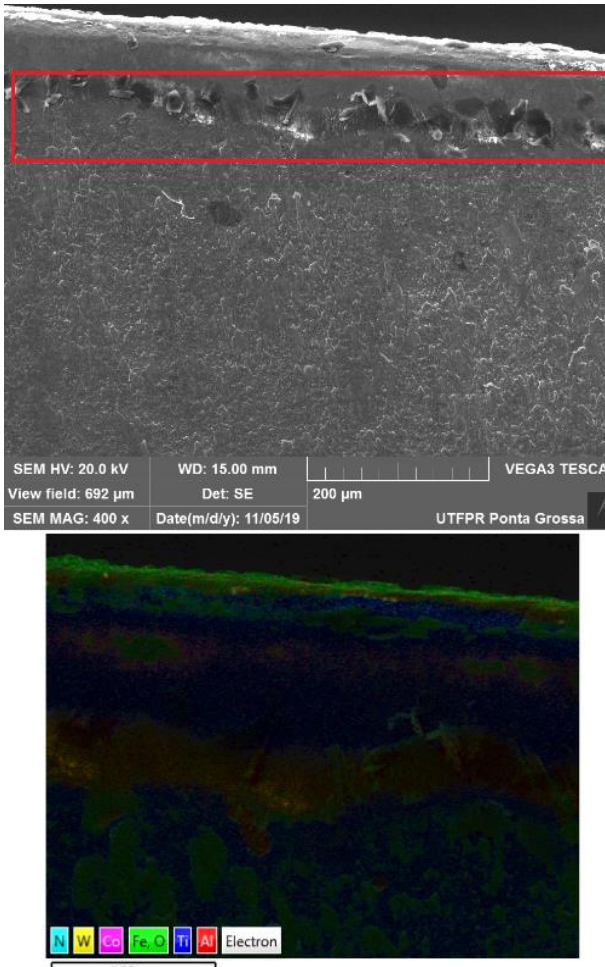
Quadro 5 - Comparação entre estado de degradação da aresta secundária da ferramenta e perfil topográfico da superfície usinada para alguns intervalos de fresamento da condição 4.

(Continua)



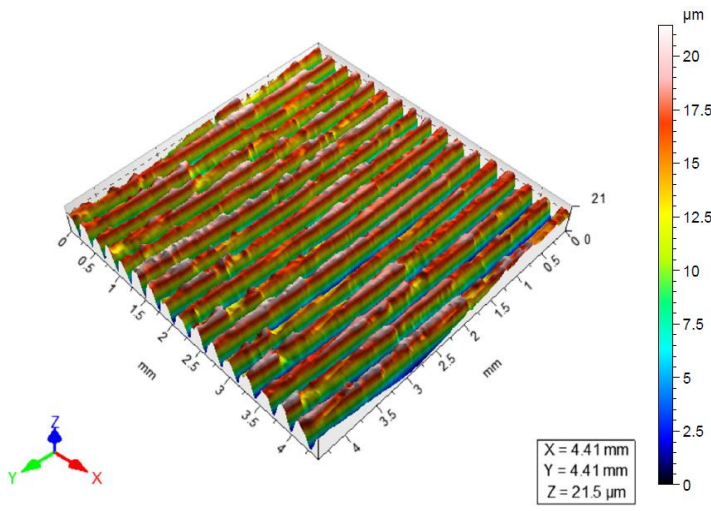
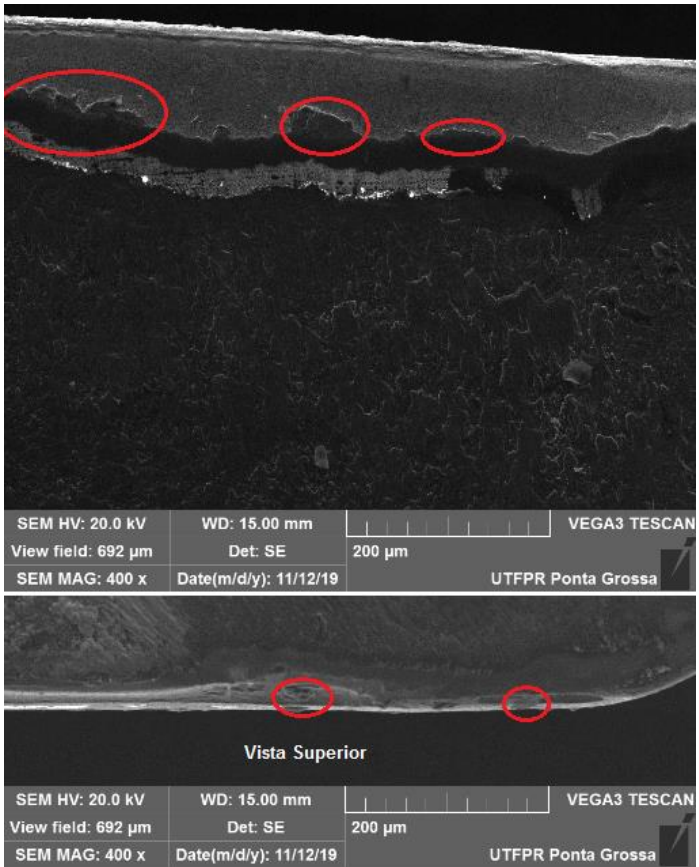
Quadro 5 - Comparação entre estado de degradação da aresta secundária da ferramenta e perfil topográfico da superfície usinada para alguns intervalos de fresamento da condição 4.

(Continua)

		<p> $R_a=1,48 \mu\text{m}$ $S_a=1,51 \mu\text{m}$ $R_p=2,08 \mu\text{m}$ $S_p=2,38 \mu\text{m}$ $R_v=2,77 \mu\text{m}$ $S_v=3,12 \mu\text{m}$ $R_{sk}=-0,43$ $S_{sk}=-0,46$ $R_{pk}=0,20 \mu\text{m}$ $S_{pk}=0,20 \mu\text{m}$ $R_{vk}=3,12 \mu\text{m}$ $S_{vk}=2,96 \mu\text{m}$ </p>
<p>12,2 MINUTOS</p>	 <p>SEM HV: 20.0 kV WD: 15.00 mm VEGA3 TESCAN View field: 692 µm Det: SE 200 µm SEM MAG: 400 x Date(m/d/y): 11/05/19 UTFPR Ponta Grossa</p> <p>N W Cu Fe O Ti Al Electron</p> <p>100µm</p>	<p>Nota-se, na região da banda de desgaste, que ainda há grande presença do revestimento (Ti), ou seja, o mesmo ainda não foi completamente removido. No entanto, observa-se grandes porções de material aderido nesta região.</p>
<p>Neste intervalo de fresamento, observa-se uma simetria no perfil de rugosidade. No entanto, o valor de <i>skewness</i> é negativo, representando a remoção dos picos; além do mais, sob uma análise qualitativa, nota-se que as cristas dos picos e os fundos dos vales são demasiadamente largos. Mesmo que o revestimento não tenha sido removido por completo da aresta da ferramenta, acredita-se que o acúmulo de material aderido nesta região tenha sido o responsável por gerar estas características na superfície.</p>		

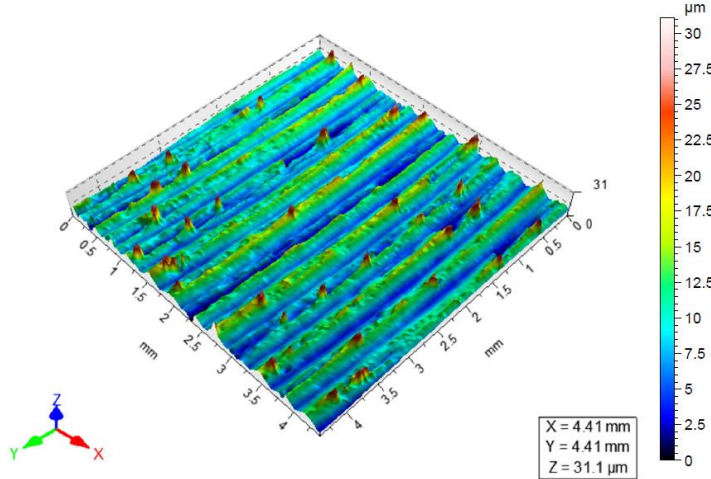
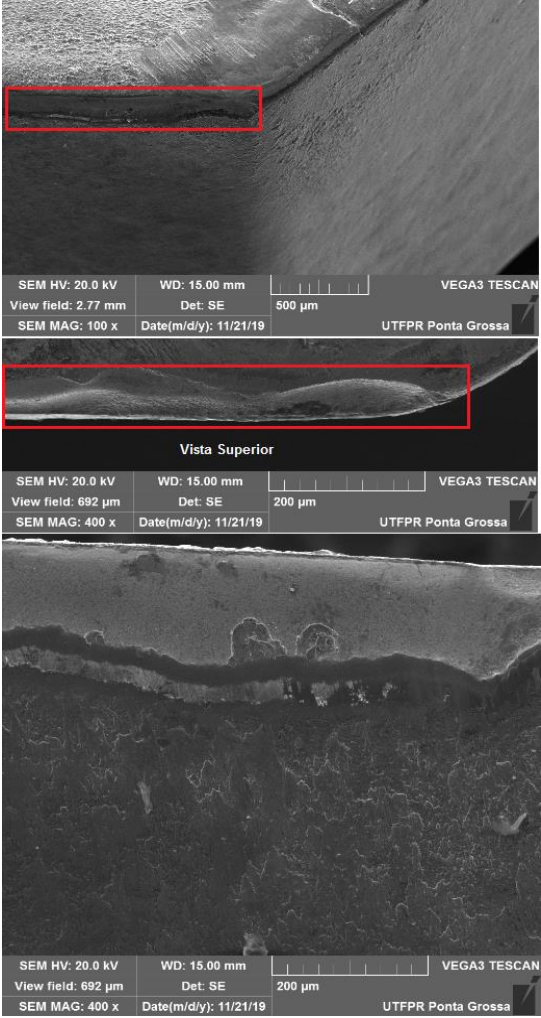
Quadro 5 - Comparação entre estado de degradação da aresta secundária da ferramenta e perfil topográfico da superfície usinada para alguns intervalos de fresamento da condição 4.

(Continua)

42,6 MINUTOS		<p> $R_a=5,42 \mu\text{m}$ $S_a=5,43 \mu\text{m}$ $R_p=8,14 \mu\text{m}$ $S_p=9,83 \mu\text{m}$ $R_v=11,2 \mu\text{m}$ $S_v=11,6 \mu\text{m}$ $R_{sk}=-0,43$ $S_{sk}=-0,37$ $R_{pk}=0,66 \mu\text{m}$ $S_{pk}=0,68 \mu\text{m}$ $R_{vk}=1,12 \mu\text{m}$ $S_{vk}=6,92 \mu\text{m}$ </p>
		<p>$V_{B,max}=113,80 \mu\text{m}$.</p> <p>Nota-se, na região da banda de desgaste, que ainda há porções de material aderido. Observa-se ainda a perda de material no sentido radial da ferramenta, ou seja, um desgaste que avança da extremidade da aresta de corte ao centro da ferramenta.</p>
<p>Observa-se valores de rugosidade média extremamente altos e que, inclusive, fogem da tendência do comportamento esperado. Nota-se ainda, alturas de pico e profundidades com valores extremamente altos e valores de <i>skewness</i> negativos, demonstrando que houve a remoção dos picos. Sob uma análise qualitativa, observa-se ainda a presença de pequenas porções de material nas extremidades das cristas dos picos. Quando se busca a justificativa da geração da superfície sob o aspecto da ferramenta de corte, não se encontra nenhum desgaste que explicasse tamanha influencia na geração do perfil de rugosidade. Acredita-se então que isto tenha ocorrido por alguma característica do material usinado, visto que se sabe que se trata de um material heterogêneo e, portanto, pode ser que a amostra da peça tenha uma propriedade de dureza reduzida.</p>		

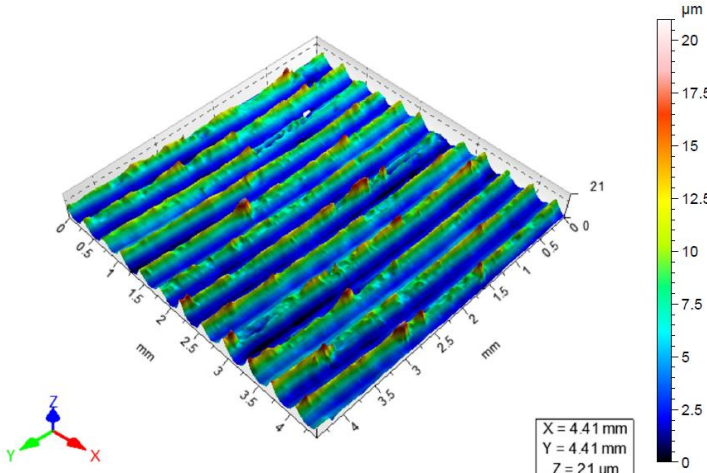
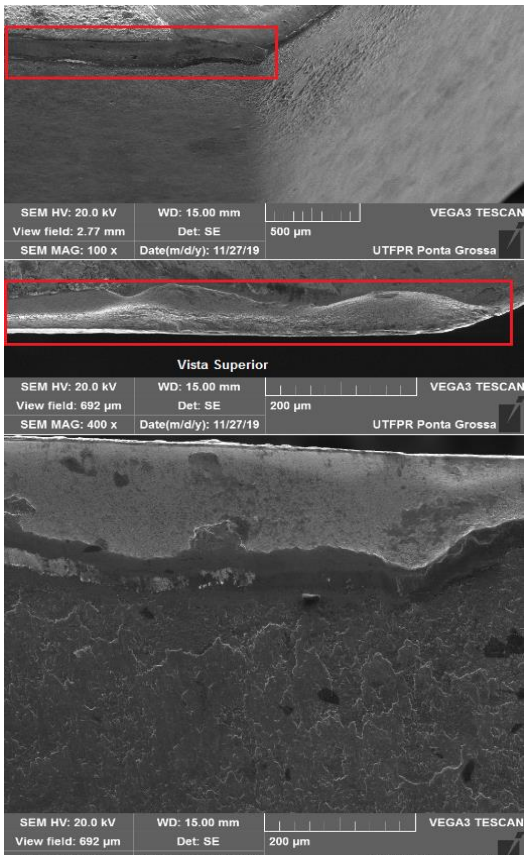
Quadro 5 - Comparação entre estado de degradação da aresta secundária da ferramenta e perfil topográfico da superfície usinada para alguns intervalos de fresamento da condição 4.

(Continua)

<p>97,4 MINUTOS</p>		<p> $Ra=2,50 \mu\text{m}$ $Sa=2,77 \mu\text{m}$ $Rp=8,02 \mu\text{m}$ $Sp=21,5 \mu\text{m}$ $Rv=5,63 \mu\text{m}$ $Sv=9,62 \mu\text{m}$ $Rsk=0,36$ $Ssk=1,13$ $Rpk=3,88 \mu\text{m}$ $Spk=5,08 \mu\text{m}$ $Rvk=2,79 \mu\text{m}$ $Svk=2,97 \mu\text{m}$ </p>
		<p>$V_{B,max}=157,07 \mu\text{m}.$</p> <p>Nota-se que, com o aumento excessivo da perda de material no sentido radial da ferramenta, a mesma sofreu uma mudança considerável nas geometrias da aresta de corte secundária; este fato tem grande influência no mecanismo de formação de cavaco e, portanto, na geração da superfície da peça.</p>
	<p>Neste intervalo, observa-se a presença de picos altos e vales profundos, mesmo com valores de rugosidade média relativamente baixos. Nota-se ainda a presença de picos maiores nas regiões das cristas. Acredita-se que estas características da superfície tenham sido geradas pela mudança geométrica da aresta de corte da ferramenta, que alterou a mudança no mecanismo de formação de cavaco.</p>	

Quadro 5 - Comparação entre estado de degradação da aresta secundária da ferramenta e perfil topográfico da superfície usinada para alguns intervalos de fresamento da condição 4.

(Conclusão)

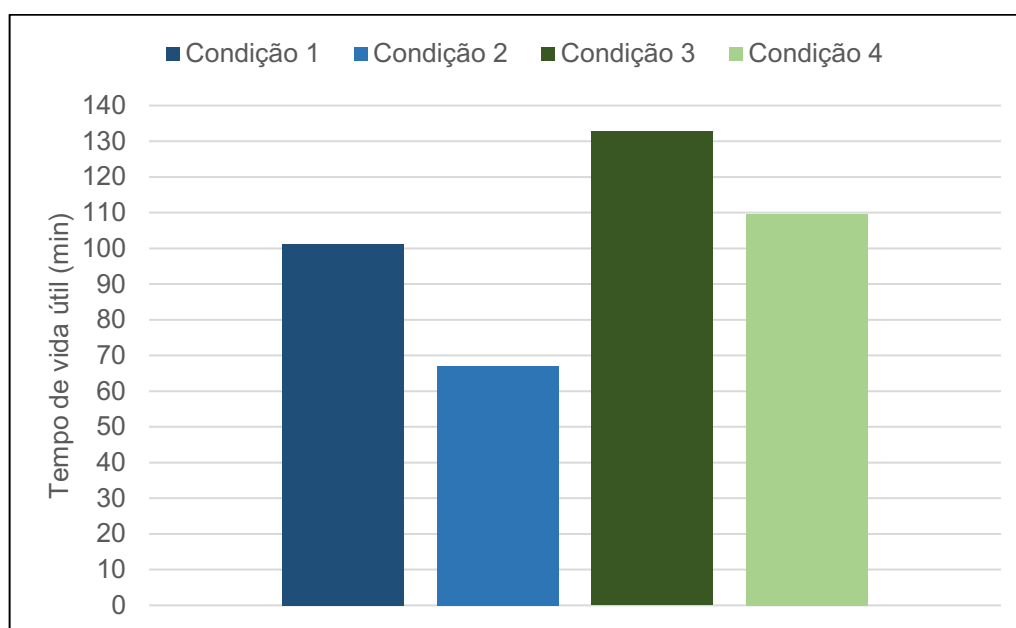
109,6 MINUTOS		<p> $R_a=2,40 \mu\text{m}$ $S_a=2,58 \mu\text{m}$ $R_p=8,17 \mu\text{m}$ $S_p=15,6 \mu\text{m}$ $R_v=3,94 \mu\text{m}$ $S_v=5,40 \mu\text{m}$ $R_{sk}=0,81$ $S_{sk}=1,01$ $R_{pk}=4,34 \mu\text{m}$ $S_{pk}=4,69 \mu\text{m}$ $R_{vk}=0,71 \mu\text{m}$ $S_{vk}=0,70 \mu\text{m}$ </p>
		<p>$V_{B,max}=171,8 \mu\text{m}$.</p> <p>Observa-se o aumento na perda de material no sentido radial da ferramenta e, conseqüentemente, na planificação da aresta de corte secundária.</p>
<p>Neste intervalo, observa-se ainda a presença de picos altos e vales profundos, mesmo com valores de rugosidade média relativamente baixos. Nota-se ainda a presença de picos maiores nas regiões das cristas. É um caso muito semelhante àquele observado no intervalo 97,4 min; no entanto, em 109,6 min, as alturas de picos e as profundidades de vales são levemente reduzidas. Acredita-se que estas características da superfície também tenham sido geradas pela mudança geométrica da aresta de corte da ferramenta, que também alterou a mudança no mecanismo de formação de cavaco.</p>		

Fonte: Autoria própria

4.5 COMPARAÇÃO ENTRE AS CONDIÇÕES DE USINAGEM

A primeira análise é quanto ao tempo de vida útil das ferramentas para as quatro condições de usinagem, ou seja, quanto tempo as ferramentas operaram até que atingissem seu fim de vida. Esta análise pode ser feita por meio do Gráfico 33.

Gráfico 33 - Comparação dos tempos de vida útil das ferramentas de corte, para as quatro condições de fresamento.



Fonte: Autoria própria

Conforme observado no Gráfico 33, quando se compara a condição 1 e a condição 2, condições que operam com as mesmas ferramentas de corte (ferramenta B), as mesmas velocidades de corte e avanços diferentes, nota-se que na Condição 1, a ferramenta tem um tempo de vida útil 33,75% maior quando comparada a ferramenta utilizada na Condição 2. Este é um resultado esperado, visto que, na condição 2, trabalha-se com avanços maiores e, portanto, com maior taxa de remoção de (cavaco).

Quando se compara a condição 3 com a condição 4, condições que operam com a ferramenta A, um resultado similar é encontrado: para a que faz uso dos menores avanços (condição 3), tem-se um tempo de vida 17,41% maior quando comparado ao tempo de vida da condição 4.

Ainda segundo o Gráfico 33, pode-se comparar o tempo de vida útil da condição 1 e da condição 3, que operam com os mesmos parâmetros de corte, no entanto, na primeira faz-se uso da ferramenta B e, na segunda, da ferramenta A. Na

condição 3, tem-se um tempo de vida maior (23,81% maior) pelo fato da ferramenta A não ter ângulos de saída positivos e, devido a isto, é uma ferramenta mais robusta. Além do mais, notou-se que os revestimentos da ferramenta A foram mais resistentes quando comparado ao da outra ferramenta e, neste caso, desempenhou por mais tempo as suas funções nas regiões da aresta de corte.

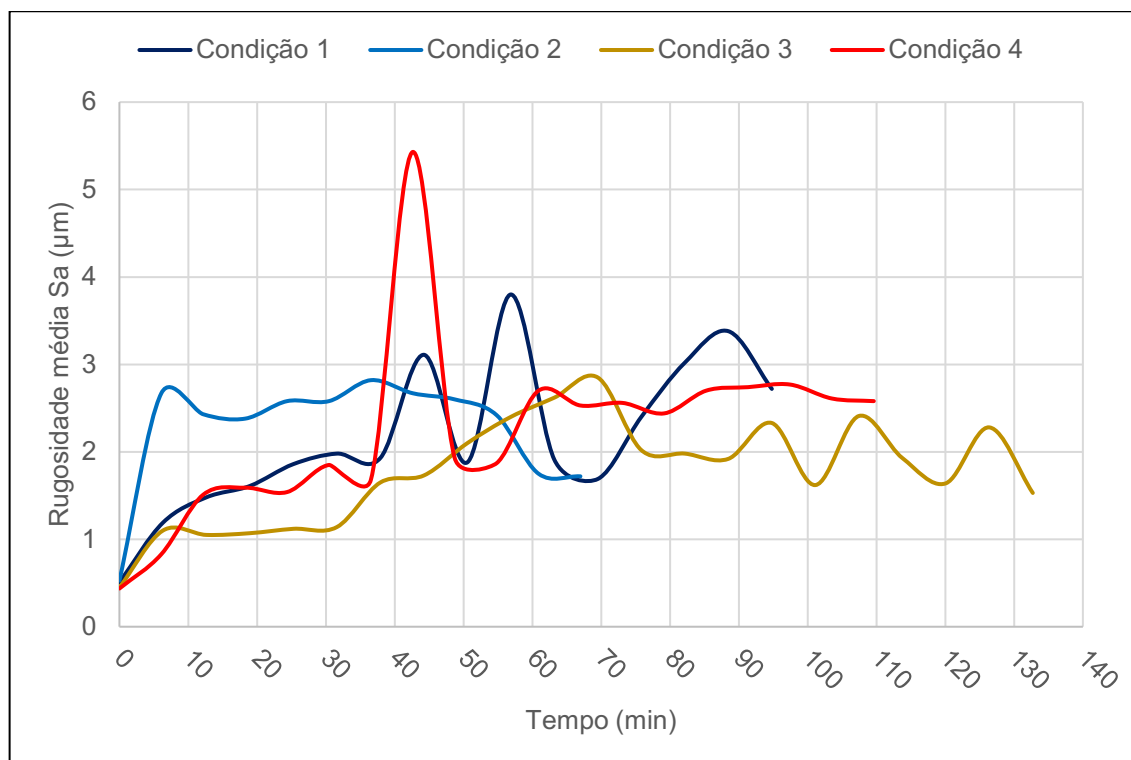
Nota-se ainda, ao comparar a condição 2 e a condição 4, que o tempo de vida da condição 4 é 32,88% maior. De maneira análoga, este fato se dá pelo fato da ferramenta B ter ângulos de saída positivos e, desta forma, ter uma aresta de corte mais frágil (ângulo de cunha menor).

Pelo fato dos intervalos de fresamento terem sido realizados a cada 6 minutos aproximadamente, não se tem a precisão do tempo de vida dos revestimentos para as quatro condições de fresamento. No entanto, observou-se que os revestimentos da ferramenta A foram mais resistentes quando comparado ao da ferramenta B. Cabe ressaltar que a região de análise foi a superfície secundária de folga. Por fim, ao se analisar os valores de desgaste máximo de flanco da ferramenta A (Gráfico 17 e Gráfico 25), observou-se que o aumento do valor do avanço foi favorável ao revestimento: na condição 3 (menor avanço) o revestimento estava presente em 4,8% do tempo de vida da ferramenta e, na condição 4 (maior avanço), estava presente em 11,1% da vida.

Buscando comparar as condições de acabamento geradas ao longo da vida das ferramentas para as quatro condições de usinagem utilizadas na presente pesquisa, recorreu-se a comparações dos comportamentos de parâmetros de rugosidade que avaliam uma superfície (parâmetros S), visto que se concluiu que estes são mais representativos.

A primeira comparação é feita em relação aos valores de rugosidade média, conforme o Gráfico 34.

Gráfico 34 - Gráficos comparativos das rugosidades médias (S_a) entre as quatro condições de usinagem.



Fonte: Autoria própria

Como pode-se observar no Gráfico 34, o comportamento da rugosidade média é altamente desorientado e sem tendência nas condições 1 e 3. Acredita-se que este fato se dê pelo fato de que estas condições operam com baixos valores de avanço e, portanto, aumenta-se a probabilidade de formação de adesão de material nas superfícies da ferramenta. O surgimento de adesão, por sua vez, além de gerar mudanças no mecanismo de formação do cavaco, é algo cíclico, ou seja, que pode ser aderido e recalçado continuamente e, inclusive, carregar consigo partículas da ferramenta no momento em que é extraído. Este comportamento cíclico gera oscilações no modo que as ferramentas influenciam na geração da superfície usinada. Cabe ressaltar ainda que as imagens provenientes das caracterizações por MEV representam o estado de degradação de uma ferramenta para um instante específico de tempo (como uma fotografia) e, portanto, não são suficientes para garantir, precisamente, condições de adesão durante os experimentos.

Nas condições 2 e 4, em que o avanço era maior e, portanto, a adesão foi menos presente, nota-se um comportamento da rugosidade com uma tendência de poucas alternâncias, salve na condição 4 onde se observou um *outlier* no intervalo 42,6 min.

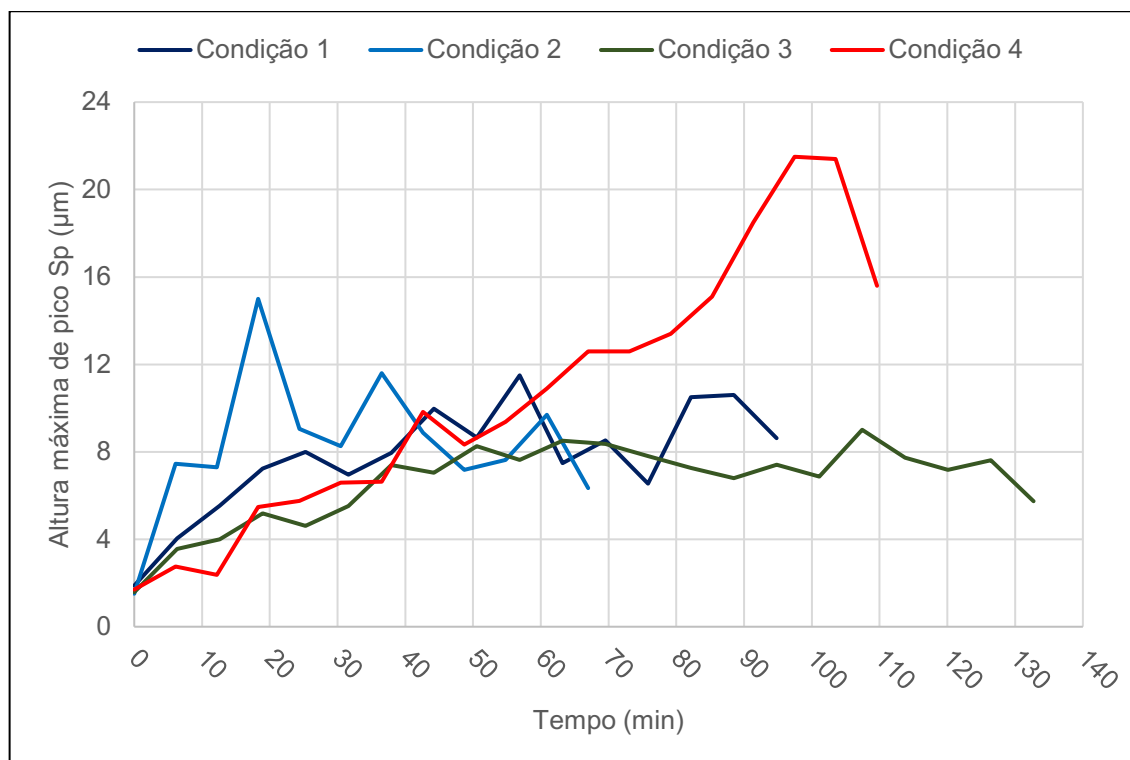
Ao se observar as imagens das ferramentas de corte, concluiu-se que nas condições 1 e 3, de menor avanço, a adesão estava presente em 55% e 51% das análises, respectivamente. Ao se analisar as condições 2 e 4, de avanço maior, estes valores passaram para 40% e 35%, respectivamente. Frente a isto, concluiu-se que a teoria se confirmou, ou seja, a adesão foi mais evidente para baixos valores de avanço. No entanto, como já comentado, não se pode garantir estas porcentagens de adesão, visto que as imagens de MEV representam uma fotografia do atual estado da ferramenta; como a adesão é algo cíclico, pode ser que segundos antes tenha sido recalçada da ferramenta ou segundos após a caracterização tenha aderido à superfície.

Ainda em relação aos resultados expostos no Gráfico 34, observou-se que a grande maioria dos valores de rugosidade média se encontram entre 1 e 3 μm , demonstrando que, em relação a este parâmetro de rugosidade, as duas ferramentas geram superfícies com valores de rugosidade média muito próximos.

Quando a análise é feita para as condições com menor avanço (condição 1 e 3), nota-se que a maioria dos valores de rugosidade média está entre 1 e 3 μm : para a condição 1, 68% das medidas têm seus valores nesta faixa e, para a condição 3, a proporção é de 95,5%. Ao se analisar as condições com maior avanço (condição 2 e 4), nota-se que a maioria dos valores de rugosidade média está entre 2 e 3 μm : para a condição 2, 75% das medidas têm seus valores nesta faixa e, para a condição 4, esta proporção é de 57,9%. Nesta análise, a teoria é confirmada: valores de avanço menores tendem a gerar superfícies com melhor acabamento.

No Gráfico 35 são expostos os valores de altura máxima de pico (S_p), para as quatro condições de usinagem.

Gráfico 35 - Gráficos comparativos das alturas máximas de pico (Sp) entre as quatro condições de usinagem.



Fonte: Autoria própria

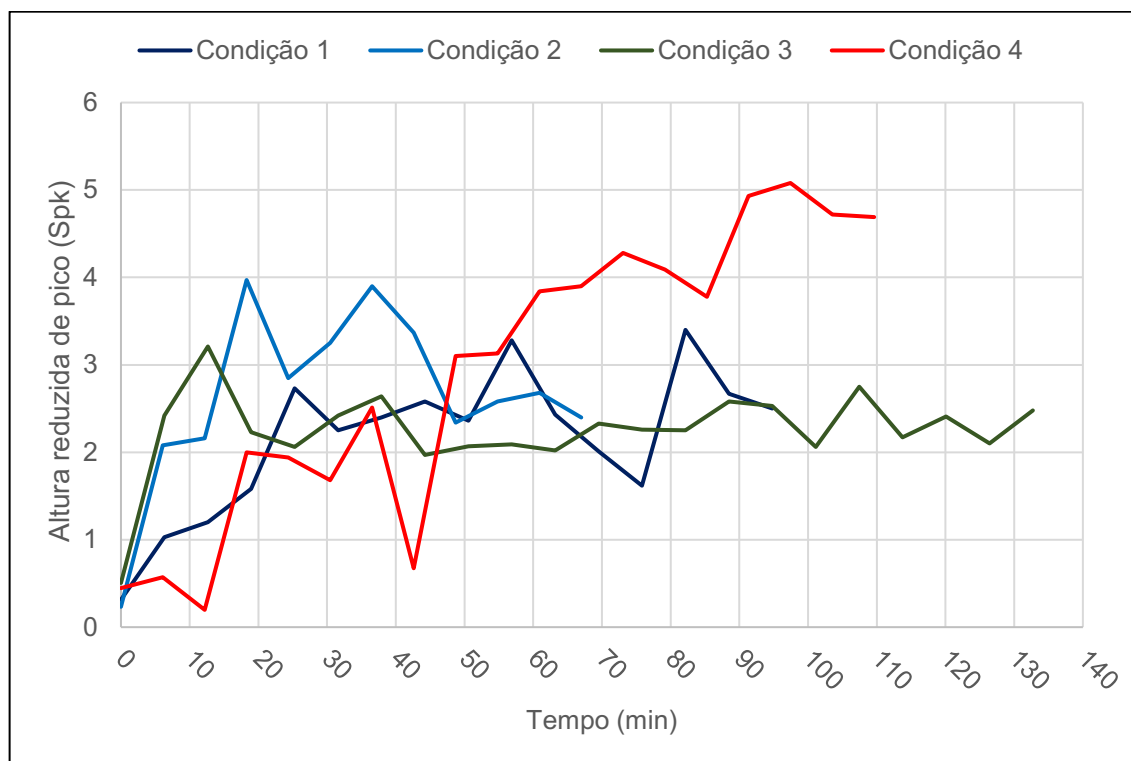
Analisando os gráficos expostos no Gráfico 35, nota-se que, nas condições 1 e 3, onde a adesão é mais evidenciada, os valores de pico são reduzidos, isto porque, durante a usinagem, o material aderido tende a remover as cristas dos picos, alargando-os. Além do mais, observa-se que, nestas condições, os valores de rugosidade não têm um comportamento tão alternado como nas condições 2 e 4, inclusive, a ferramenta A (na condição 3) gerou superfícies com valores de Sp que apresentam baixa alternância, entre 4 e 8 μm (77,3% das medidas). No entanto, ao se observar a ferramenta A operando sob avanço maior (condição 4), nota-se um comportamento crescente deste parâmetro, que supera o valor de 20 μm .

Ao se analisar os valores de Sp para as condições 1 e 2, que fazem uso da ferramenta B, nota-se comportamentos com grande alternância de seus valores; acredita-se que isto pode ocorrer pelo fato de que a ferramenta B é mais positiva e, portanto, tem uma aresta de corte mais frágil e suscetível ao desgaste.

A próxima análise (Gráfico 36) é em relação ao parâmetro altura reduzida dos picos (Spk), que avaliam os picos sobressalentes no perfil. Cabe lembrar que este

parâmetro avalia os picos protuberantes a partir da rugosidade do núcleo (R_k), diferentemente de (Sp) que avalia a altura do pico como um todo.

Gráfico 36 - Gráficos comparativos das alturas reduzidas de pico (Spk) entre as quatro condições de usinagem.

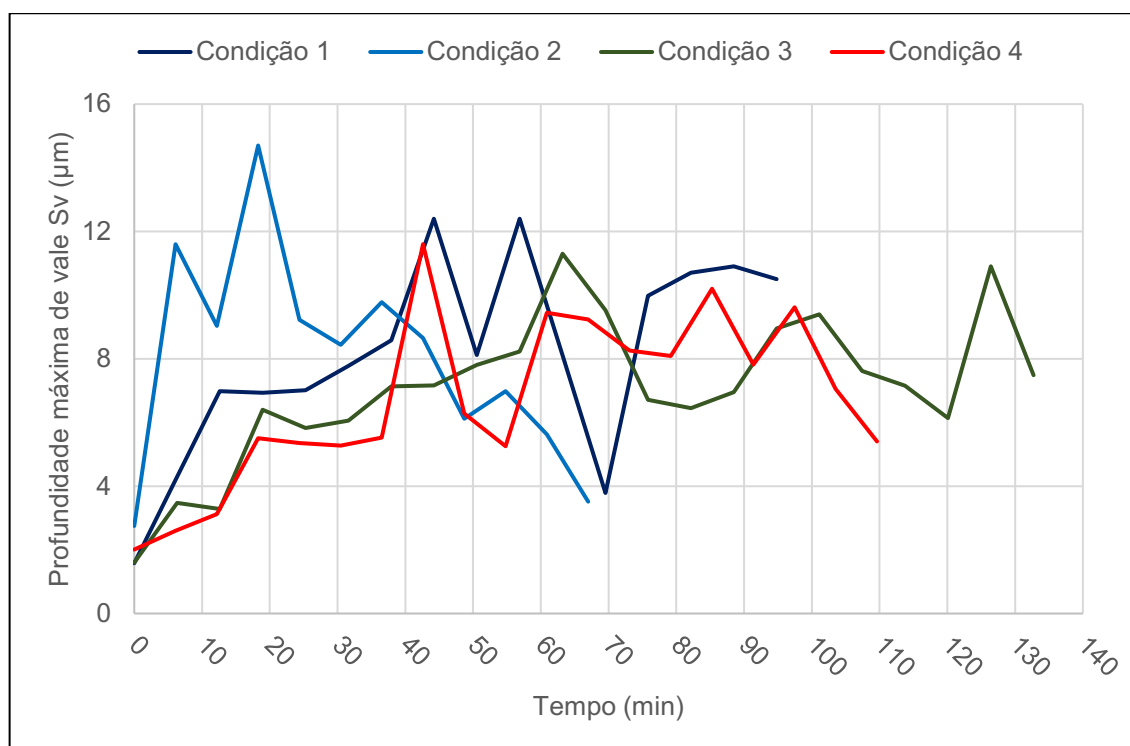


Fonte: Autoria própria

Analisando o Gráfico 36, nota-se resultados muito próximos daqueles observados no Gráfico 35: comportamento com menor alternância na condição 3, que faz uso da ferramenta A; tendência de crescimento na condição 4, ferramenta A e maior avanço, com exceção do *outlier* em 42,6 min e; valores de Spk com comportamento alternado nas condições 1 e 2, que fazem uso da ferramenta B. Além do mais, nas condições onde a adesão foi facilitada (condição 1 e 3), nota-se os menores valores de Spk, onde a maioria deles está entre 1 e 3 μm : na condição 1, 81,3% dos valores estão entre esta faixa e, na condição 3, 90,9% dos valores.

O Gráfico 37 expõe os gráficos de profundidade máxima de vale para as quatro condições de usinagem.

Gráfico 37 - Gráficos comparativos das profundidades máximas de vale (Sv) entre as quatro condições de usinagem.

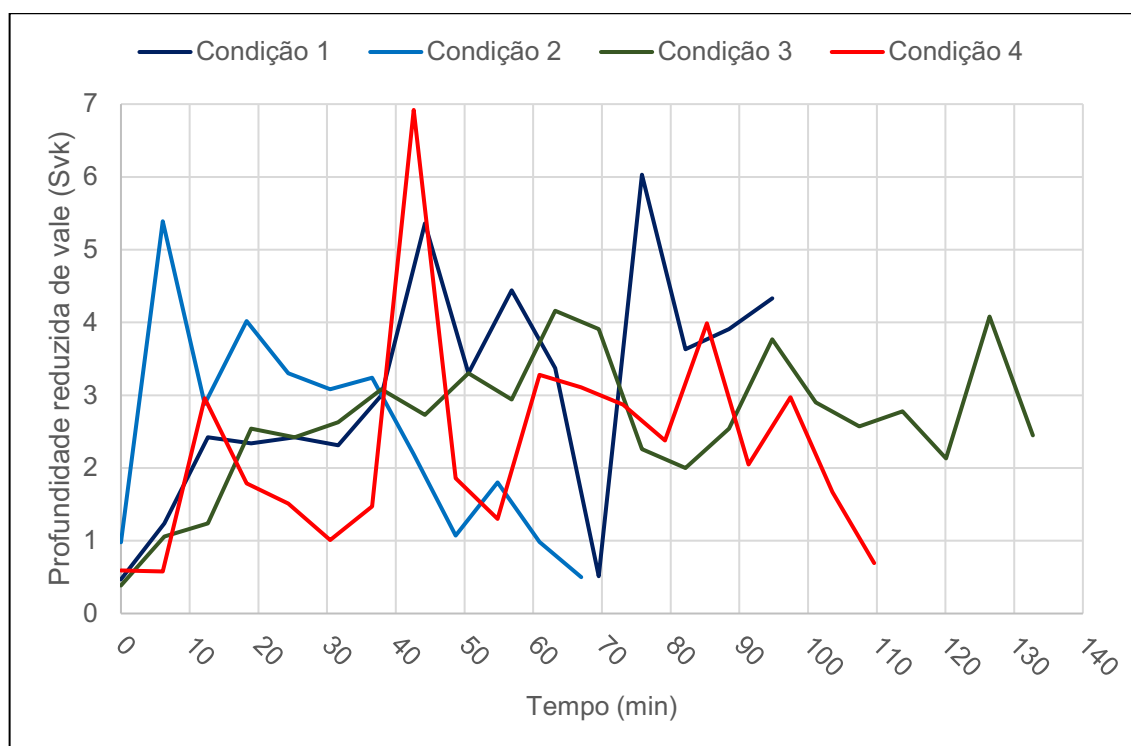


Fonte: Autoria própria

Em relação a profundidade máxima de vale (Gráfico 37), nota-se que a grande maioria dos valores está entre 4 e 12 μm : na condição 1, 81,3% dos valores estão entre esta faixa, 83,3% na condição 2, 86,4% na condição 3 e 84,2% na condição 4. Ao se comparar as condições 1 e 2, que fazem uso da ferramenta B, nota-se que mesmo para a condição de maior avanço, os valores de Sv foram altos e com comportamento desordenado. Acredita-se que este fato tenha ocorrido pela geometria da ferramenta B, positiva e com aresta de corte mais frágil, sendo mais sensível a vibrações geradas pelo aumento da dinâmica do processo de corte. Quanto às condições 3 e 4, que fazem uso da ferramenta A (mais robusta), nota-se um comportamento mais ordenado quando comparado às anteriores.

A próxima análise (Gráfico 38) é em relação ao parâmetro profundidade reduzida dos vales (S_{pk}), que avaliam os vales mais profundos no perfil. Cabe lembrar que este parâmetro avalia os vales profundos abaixo da rugosidade do núcleo (R_k), diferentemente de (S_v) que avalia a profundidade do vale como um todo.

Gráfico 38 - Gráficos comparativos das profundidades reduzidas de vale (Svk) entre as quatro condições de usinagem.



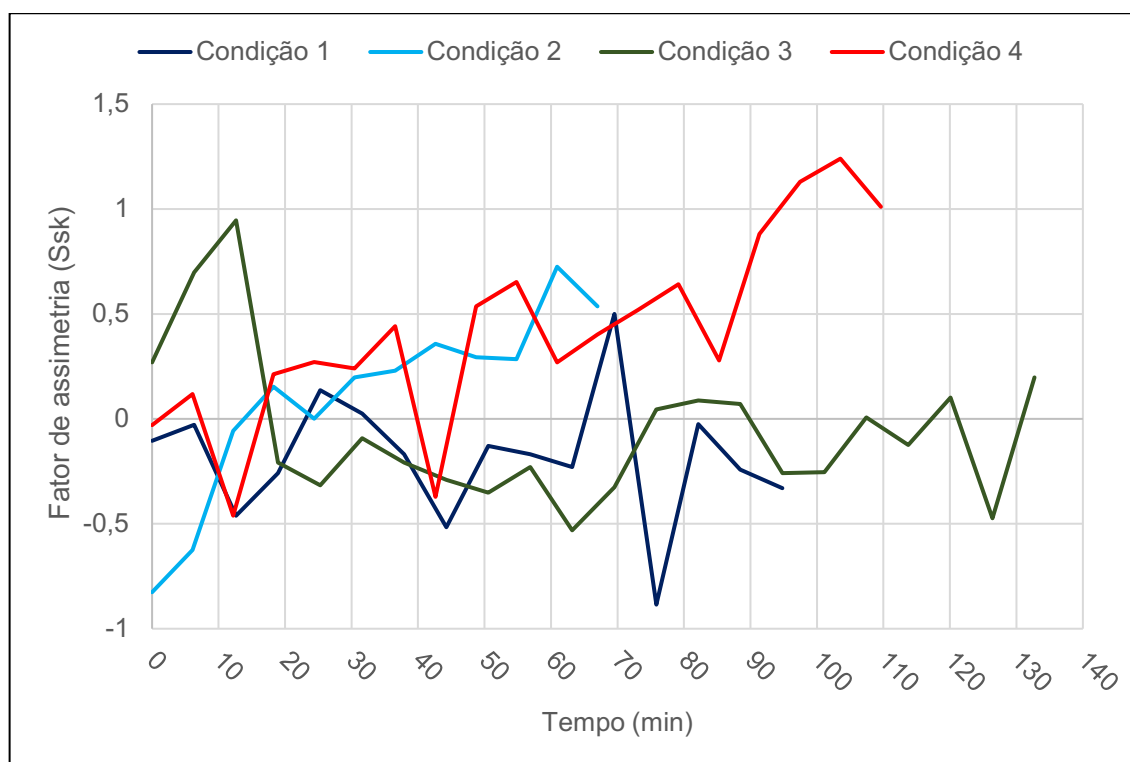
Fonte: Autoria própria

Ao se analisar o Gráfico 38, observa-se, ao comparar as condições 3 e 4 (ferramenta A), que a maioria dos valores de Svk está entre 2 e 4 μm para a condição 3 (81,2% dos valores) e entre 1 e 3 μm para a condição 4 (73,7% dos valores). Este é um resultado que se confirma com a teoria, visto que na condição 3 a adesão foi facilitada e, com isso, espera-se pela geração de vales mais profundos na superfície da peça.

Ainda sobre o Gráfico 38, analisando as condições 1 e 2 (ferramenta B), a alternância dos valores de Svk é maior quando comparados aos comportamentos das demais condições; acredita-se que este fato se dê pelo fato de que a ferramenta B apresenta ângulo de cunha menor (aresta mais frágil) e, com isso, mais suscetível ao desgaste e às dinâmicas do processo. Ao comparar as condições 1 e 2, observa-se que, na condição 1, 62,5% dos valores de Svk estão entre 2 e 4 μm e, na condição 2, 63,6% dos valores estão entre esta mesma faixa.

Por fim, foram comparados os valores obtidos para os fatores de assimetria (Ssk) para cada intervalo de fresamento, nas quatro condições de usinagem, conforme o Gráfico 39.

Gráfico 39 - Gráficos comparativos dos fatores de assimetria ou *skewness* (Ssk) entre as quatro condições de usinagem.



Fonte: Autoria própria

Ao se analisar o Gráfico 39, nota-se que para as condições de menor avanço (1 e 3), onde a adesão foi mais presente, os valores de Ssk tendem a ser negativos, que representam picos removidos; este fato se dá pelo fato de que o material aderido, facilitado em avanços reduzidos, age na remoção das cristas dos picos, alargando o perfil. Em contrapartida, ao se analisar as condições 2 e 4, de maior avanço, o oposto é observado: predominância de valores positivos para Ssk, que representam perfis onde os picos apresentam as cristas bem caracterizadas e pontiagudas.

4.6 COMENTÁRIOS GERAIS SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS

Em nenhuma das condições de usinagem atingiu-se o valor pré-determinado de valor de desgaste máximo de flanco ($200 \mu\text{m}$); inclusive, em todos os casos, o fim de vida foi atribuído por conta de desgastes do tipo entalhe nas arestas de corte primárias. Estes entalhes surgiram nas extremidades das trincas térmicas; trincas estas que surgiam já em minutos iniciais dos ensaios e numa região muito próxima do valor de profundidade de corte (a_p), $1,5 \text{ mm}$. A formação destas trincas térmicas se dá pelo grande gradiente térmico nesta região: de um lado há a presença de grande temperatura envolvida no processo e, do outro, a circulação de ar a temperatura

ambiente. Ainda em relação às trincas térmicas, notou-se que estas surgiam com antecedência nas ferramentas B; acredita-se que este fato ocorreu porque a ferramenta é positiva e, portanto, com uma cunha de corte com menor espessura e menor volume de material para dissipação do calor.

Com base em análises qualitativas das imagens dos estados de degradação das ferramentas de corte e respectiva comparação com perfis de rugosidade gerados na peça, observou-se que a adesão, além do desgaste de flanco, influencia na geração da superfície e, portanto, tornou-se difícil a busca por uma única relação entre os parâmetros de rugosidade e os valores de desgaste de flanco máximo.

Observou-se, portanto, que a geração da superfície na peça era sensível à medida que se observavam mudanças nas arestas de corte secundária das ferramentas, principalmente em casos de adesão. Nestes casos, criavam-se regiões com porções de sobressalentes nas arestas que, por sua vez, acabavam influenciando na geração da superfície através da impressão de vales mais profundos e com a deformação das cristas dos picos, achatando-os.

A ferramenta A, devido a sua maior robustez principalmente, teve um maior tempo de vida útil quando comparada as mesmas condições da ferramenta B. Além do mais, o revestimento de multicamadas da ferramenta A composto por nitreto de titânio (TiN), óxido de alumínio (Al_2O_3) e carbonitreto de titânio (TiCN) foi mais resistente que o revestimento de TiAlN (nitreto de titânio alumínio) da ferramenta B. Ainda nesse aspecto, o revestimento multicamadas apresentou um melhor desempenho para maiores valores de avanço: para o avanço menor, os revestimentos estavam presentes em 4,8% do tempo de vida e em 11,1% da vida para o avanço maior.

Ao buscar uma análise de acabamento superficial melhor, recorreu-se à análise da rugosidade média (S_a). Neste aspecto, para o menor avanço utilizado que, em teoria, deveria resultar em um acabamento mais refinado, a ferramenta B apresentou melhores resultados. Ao se analisar o Gráfico 34, nota-se que, nas condições 1 e 3, os valores de S_a se encontram entre 1 e 3 μm , no entanto a ferramenta B, condição 3, gera um comportamento onde as alternâncias de seus valores não são de grande magnitude. Acredita-se que este fato ocorra pelo fato de que a ferramenta B apresenta ângulo de cunha maior e, portanto, é mais robusta; esta

característica favorece a resistência da ferramenta contra os choques térmicos e mecânicos envolvidos no fresamento e reduz os efeitos de batimento e vibração.

Em relação às superfícies geradas nas peças, deparou-se com uma dificuldade em relacionar os valores de desgaste de flanco máximo com um único parâmetro de rugosidade, até porque, como visto anteriormente, as tendências dos comportamentos destes parâmetros eram desordenadas e compostas por acréscimos e decréscimos alternados em seus valores. A rugosidade média (S_a) foi utilizada para avaliar genericamente os perfis quanto ao acabamento. Outros parâmetros, tais como S_p , S_v , S_{pk} , S_{vk} e S_{sk} também foram considerados sensíveis a alterações nas arestas de corte das ferramentas. Estas considerações foram feitas porque os valores destes parâmetros apresentavam um comportamento com tendência e sofriam variações ao passo que alguma alteração geométrica era identificada na ferramenta de corte; além do mais, detectou-se que estes parâmetros podiam ser relacionados uns aos outros.

À medida que o corte por cisalhamento era favorecido e o desgaste ainda não era evidente, notava-se um perfil com baixo valor de S_a , S_{sk} próximo de zero e valores próximos de S_p e S_v e, S_{pk} e S_{vk} . À medida que a ferramenta sofria desgaste, perdia-se esta tendência e, para casos onde havia muita adesão, por exemplo, nota-se aumento de S_v e S_{vk} . Além do mais, quando a perda de material na aresta era demasiada e havia alteração na geometria dos elementos produtores de cavaco, a qualidade da geração da superfície variava: em alguns momentos o cavaco era removido, em sua maioria, por ação de cisalhamento e, deste modo, gerava-se peças com bom acabamento e; em um instante logo em seguida, a ferramenta passava a gerar a superfície mais por deformação do que cisalhamento em si e, portanto, havia uma piora no acabamento.

Cabe salientar ainda que os parâmetros que fazem a análise em área de amostragem (parâmetros S) são muito mais representativos da superfície gerada por fresamento pois representam e avaliam as trilhas de usinagem como um todo, trilhas estas geradas pelas arestas de corte; ao fazer as avaliações com os parâmetros R, tem-se a representatividade de uma linha do perfil de rugosidade e, portanto, com menor representatividade por não fazer um mapeamento completo da superfície.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e mencionados na seção anterior, conclui-se que:

- A ferramenta A apresentou tempos de vidas maiores quando comparados àqueles obtidos para as mesmas condições da ferramenta B;
- Em todas as condições de usinagem, os fins de vida foram atribuídos pela evolução excessiva do desgaste do tipo entalhe na aresta principal de corte ou pela quebra. Em nenhuma das condições foi alcançado o valor pré-determinado de 200 μm de desgaste máximo de flanco. Os entalhes evoluíram a partir das trincas térmicas;
- As trincas térmicas foram identificadas em todas as condições de usinagem e surgem previamente na ferramenta B (condição 1 e 2) pelo fato desta ferramenta apresentar ângulo de cunha reduzido e, com isso, dispor de pouco volume de material para dissipar o calor, sendo mais suscetível aos choques térmicos provenientes dos processos;
- O motivo de os parâmetros de rugosidade selecionados apresentarem comportamentos com alternância entre crescimentos e decréscimos em seus valores se dá pelo fato de que o processo de usinagem envolve muitas dinâmicas (tais como esforços e vibrações). Além do mais, porções de materiais da peça e do cavaco aderem, de maneira cíclica, na ferramenta, gerando grandes variações no mecanismo de corte, ou seja, em momentos o material da peça é removido unicamente por cisalhamento, em outros o material da peça é deformado e, em outros casos, pela combinação de cisalhamento e deformação;
- Não foi possível estabelecer uma relação entre o estado de degradação da ferramenta com a topografia impressa na superfície da peça relacionando, apenas, os valores dos desgastes máximos de flanco com os valores dos parâmetros de rugosidade.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se a réplica dos experimentos realizados na presente pesquisa em um centro de usinagem que, além de ser mais versátil quanto

a utilização de valores de parâmetros de corte, é uma máquina ferramenta mais precisa e robusta. Em paralelo, recomenda-se o monitoramento de dados como temperatura, forças de corte e vibrações.

REFERÊNCIAS

- ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas). **NR ISO 3274**: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Características nominais de instrumentos por contato (pontas de apalpação). Rio de Janeiro, 2008. 19 f.
- ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas). **NR ISO 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 2002. 18 f.
- ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas). **NR ISO 4288**: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. Rio de Janeiro, 2008. 16 f.
- ABNT (Associação Brasileira De Normas Técnicas). **NBR ISO 13565-2**: Geometrical product specification (GPS) - Surface texture: Profile method; surfaces having stratified functional properties - Part 2: Height characterization using the linear material ratio curve. Rio de Janeiro, 1996. 20 f.
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **ASM HANDBOOK VOLUME 1**: Properties and selection - Irons steels and high performance alloys. Ohio: Materials Park, 1993. 2521 p., v. 1.
- ASME (The American Society of Mechanical Engineers). **ASME B46.1:1995**: Surface Texture (Surface Roughness, Waviness, and Lay). 1995. 30 f.
- AGARWAL, N. Surface roughness modeling with machining parameters (speed, feed & depth of cut) in CNC milling. **MIT International Journal of Mechanical Engineering**, [s.l.], v. 2, n. 1, p. 55-61, jan. 2012.
- AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**. Edgard Blücher, 1977. 295 p.
- ALVES, M. L. **Reconhecimento da rugosidade em imagens monocromáticas por meio de análise da textura**. 2011. 197 f. Tese (Doutorado) - Programa Francisco Eduardo Mourão Saboya de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2011.

AMORIM, H. J. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. 2002. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.

CARPINETI, L. C. R. **Rugosidade Superficial**. USP-EESC, 2000.

ČERČE, L.; PUĽAVEC, F.; KOPAČ, J. 3D cutting tool-wear monitoring in the process. **Journal of Mechanical Science And Technology**, [s.l.], v. 29, n. 9, p. 3885-3895, set. 2015. Springer. <http://dx.doi.org/10.1007/s12206-015-0834-2>.

DAS, S. R.; KUMAR, A.; DHUPAL, D. Effect of machining parameters on surface roughness in machining of hardened AISI 4340 steel using coated carbide inserts. **International Journal of Innovation and Applied Studies**, [s.l.], v. 2, n. 4, p. 445-453, abr. 2013.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. São Paulo: Artliber, 2010. 268 p.

FLEISCHER, J.; SCHULZE, V.; KOTSCHENREUTHER, J. Extension of cutting force formulae for microcutting. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 2, n. 1, p. 75–80, 2009.

FREITAS, E. S. R. **Parâmetros topográficos para avaliação, caracterização e controle tribológicos de superfícies de engenharia**. 2006. 118 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2006.

GADELMAWLA, E. S.; KOURA, M. M.; MAKSOUD, T. M. A.; ELEWA, I. M.; SOLIMAN, H. H. Roughness parameters. **Journal of Materials Processing Technology**, v 123, p. 133-145. jan. 2002. Elsevier BV.

GALLO, G. B. **Influência do tratamento térmico sobre a tenacidade de um aço AISI SAE 1045 com médio teor de carbono, avaliada por ensaios de impacto**. 2006. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2006.

GOWTHAMAN, S; JAGADEESHA, T. Comparative studies of variation in end mill radial rake angle and cutting conditions on cutting force and surface integrity during

machining of nimonic 263. **Materials Research Express**, [s.l.], v. 7, n. 3, 9 mar. 2020. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/2053-1591/ab7ab9>.

HASSANPOUR, H.; SADEGHI, M. H.; RASTI, A.; SHAJARI, S. Investigation of surface roughness, microhardness and white layer thickness in hard milling of AISI 4340 using minimum quantity lubrication. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], v. 120, p. 124-134, mai. 2016. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.091>.

HÜBNER, H. B. **Estimação da rugosidade gerada no processo de fresamento frontal via redes neurais artificiais**. 2016. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016.

HUGOSSON, H. W.; ENGQVIST, H. The connection between the electronic structure and the properties of binderless tungsten carbides. **International Journal of Refractory Metals & Hard Materials**, Sweden, n. 21, p. 55-61, 2003.

LIMA, R. O. C. **Avaliação de insertos de metal duro revestidos com TiN pelo processo de gaiola catódica rotatória**. 2016. 158 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2016.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Blucher, 2009. 384 p.

MUSFIRAH, A. H.; GHANI, J. A.; HARON, C. H. C. Tool wear and surface integrity of inconel 718 in dry and cryogenic coolant at high cutting speed. **Wear**, [s.l.], v. 376-377, p. 125-133, abr. 2017. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2017.01.031>.

NETO, W. S. M. **Comparação do efeito do método de medição com contato e sem contato na rugosidade**. 2017. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2017.

NIAKI, F. A.; MEARS, L. A. comprehensive study on the effects of tool wear on surface roughness, dimensional integrity and residual stress in turning IN718 hard-to-machine alloy. **Journal of Manufacturing Processes**, [s.l.], v. 30, p. 268-280, dez. 2017. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.09.016>>. Acesso em: 12 set. 2018.

OLIVEIRA, C. J. **Avaliação da influência de sistemas de filtragem aplicados a topografia de superfícies em usinagens**. 2004. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2004.

PEREIRA, L. C. **Influência das condições de usinagem do brunimento flexível na rugosidade de cilindros de blocos de compressores herméticos**. 2016. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2016.

POLICENA, M. R.; DEVITTE, C.; FRONZA, G.; GARCIA, R. F.; SOUZA, A. J. Surface roughness analysis in finishing end-milling of duplex stainless steel UNS S32205. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 98, n. 5-8, p. 1617-1625, 22 jun. 2018. Springer. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-018-2356-4>.

RAHMAN, M. A. et al. Variation of surface generation mechanisms in ultra-precision machining due to relative tool sharpness (RTS) and material properties. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 115, n. November, p. 15–28, 2017.

REZAEI, H.; SADEGHI, M. H.; BUDAK, E. Determination of minimum uncut chip thickness under various machining conditions during micro-milling of Ti-6Al-4V. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 95, n. 5–8, p. 1617–1634, 2018.

RIBEIRO, J. E.; CÉSAR, M. B.; LOPES, H. Optimization of machining parameters to improve the surface quality. **Procedia Structural Integrity**, [s.l.], v. 5, p. 355-362, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.prostr.2017.07.182>

Rugosidade de uma superfície. Disponível em: <http://engenhariodemateriais.com.br/2017/02/08/rugosidade-de-uma-superficie/>. Acesso em: 24 out. 2018.

SAE (The Engineering Society for Advancing Mobility Land Sea Air and Space). **SAE J-1397**: Estimades mechanical properties and machinability of steel bars. Warrendale, 1992. 11 f.

SANTHANAKUMAR, M.; ADALARASAN, R.; SIDDHARTH, S.; VELAYUDHAM, A. An investigation on surface finish and flank wear in hard machining of solution treated and aged 18 % Ni maraging steel. **Journal of The Brazilian Society of**

Mechanical Sciences And Engineering, [s.l.], v. 39, n. 6, p. 2071-2084, 30 mai. 2016. Springer. <http://dx.doi.org/10.1007/s40430-016-0572-0>.

SANTOS, A. L. B. **Metodologia via redes neurais para a estimativa da rugosidade e do desgaste de ferramentas de corte no processo de fresamento frontal**. 2001. 194 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2001.

SANDVIK. **Manual Técnico de Usinagem**: Parte D - Fresamento, Sandvik Coromant, São Paulo, 197 p., 2012.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F.; **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Artliber, 2007.

SILVA, T. M. DA. **Uma contribuição ao estudo da espessura mínima de usinagem**. 2020. 152 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2020.

SMITH, G. T. **Industrial metrology**: surfaces and roundness. Londres: Springer, 2002. 352 p.

STEPHENSON, D. A.; AGAPIOU, J. S. **Metal cutting theory and practice**. Nova Iorque: CRC Press, 2016. 956 p.

STIPKOVIC, M. A.; BORDINASSI, É. C.; FARIAS, A.; DELIJAICOV, S. Surface Integrity Analysis in Machining of Hardened AISI 4140 Steel. **Materials Research**, [s.l.], v. 20, n. 2, p. 387-394, 23 jan. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-0420>.

STOETERAU, R. L. **Fundamentos dos processos de usinagem**. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/PMR2202-AULA%20RS1.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2020.

TAYLOR HOBSON. **Surface finish metrology**. 2003. 329 slides.

THOMAS, R. T. **Rough surfaces**. Londres: Imperial College Press, 1999, 278p.

TRENT, E.; Wright, P. **Metal Cutting**. California: Butterworth-Heinemann, 2000. 464f.

WANG, M.; XU, B.; ZHANG, J.; DONG, S.; WEI, S. Experimental observations on surface roughness, chip morphology, and tool wear behavior in machining Fe-based amorphous alloy overlay for remanufacture. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 67, n. 5-8, p. 1537-1548, 21 nov. 2012. Springer. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-4588-z>.

WANG, B.; LIU, Z. Influences of tool structure, tool material and tool wear on machined surface integrity during turning and milling of titanium and nickel alloys: a review. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 98, n. 5-8, p. 1925-1975, 28 jun. 2018. Springer. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-018-2314-1>

WHITEHOUSE, D. J. **Handbook of surface metrology**. Filadélfia: Institute of Physics Publishing. 1994. 998 p.

WHITEHOUSE, D. **Surfaces and their measurement**. Londres: Hermes Penton Science. 2002. 4425 p.

YUAN, L.; GUO, T.; QIU, Z.; FU, X.; HU, X. Measurement of geometrical parameters of cutting tool based on focus variation technology. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 105, n. 5-6, p. 2383-2391, 30 out. 2019. Springer. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-019-04452-0>.

ZHANG, P. P.; YIN, Z. D.; YAN, X. Effect of Insert Style in Milling of Titanium Alloy (TC18). **Applied Mechanics and Materials**, [s.l.], v. 159, p. 99-103, mar. 2012. Trans Tech Publications. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.159.99>.

ZHAO, T.; ZHOU, J. M.; BUSHLYA, V.; STÄHL, J. E. Effect of cutting edge radius on surface roughness and tool wear in hard turning of AISI 52100 steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 91, n. 9-12, p. 3611-3618, 26 jan. 2017. Springer. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-017-0065-Z>.