

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO PROFISSIONAL

**CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE SUPERFICIAL EM DIFERENTES ETAPAS
DO PROCESSO DE POLIMENTO POR RODAS FLAP E BUFFING**

RODRIGO NAPPI BIASIN

CAXIAS DO SUL

2016

RODRIGO NAPPI BIASIN

**CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE SUPERFICIAL EM DIFERENTES ETAPAS
DO PROCESSO DE POLIMENTO POR RODAS FLAP E BUFFING**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, visando à obtenção de grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projeto e fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann

**CAXIAS DO SUL
2016**

B579c Biasin, Rodrigo Nappi

Caracterização da qualidade superficial em diferentes etapas do processo de polimento por rodas flap e buffing / Rodrigo Nappi Biasin. – 2016.

129 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2016.

Orientação: Rodrigo Panosso Zeilmann.

1. Polimento. 2. Rodas Flap. 3. Buffing. 4. Caracterização superficial. I. Zeilmann, Rodrigo Panosso, orient. II. Título.

"Caracterização da qualidade superficial em diferentes etapas do processo de polimento por Rodas Flap e *Buffing*"

Rodrigo Nappi Biasin

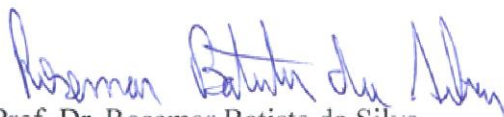
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, Área de Concentração: Projeto e Fabricação.

Caxias do Sul, 24 de maio de 2016.

Banca Examinadora:



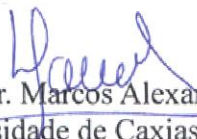
Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann (orientador)
Universidade de Caxias do Sul



Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva
Universidade Federal de Uberlândia



Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels
Universidade de Caxias do Sul



Prof. Dr. Marcos Alexandre Luciano
Universidade de Caxias do Sul

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família e à minha namorada, cujo apoio e incentivo nas horas mais difíceis foram os maiores responsáveis por tornar possível a conclusão deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me conceder força, esperança e iluminação. À minha família e à minha namorada pela paciência. Ao professor Rodrigo Panosso Zeilmann pela orientação e discussões técnicas realizadas. Ao professor Gerson Luis Nicola pelo auxílio e dedicação demonstrada na execução da parte prática do trabalho. Aos meus colegas do Grupo de Usinagem, no período de 2013 a 2016, pelo companheirismo e auxílio nos momentos de necessidade. E a todos que contribuíram para que este trabalho existisse.

RESUMO

Este trabalho dedica-se à caracterização das superfícies geradas durante as diferentes etapas do processo de polimento com rodas flap e *buffing*. O mesmo foi concebido tendo como base uma situação real de substituição de um processo de manufatura manual por um processo mecanizado. A mecanização do processo é importante, uma vez que os custos envolvidos de mão de obra e material são elevados, assim como os custos relacionados à rejeição de um componente nesta etapa de fabricação, devido ao valor já agregado ao mesmo. Devido à pouca informação disponível na literatura especializada sobre esses processos, foi constatado que a verificação dos elementos que compõem as superfícies geradas pelos processos é de fundamental importância para o entendimento dos mesmos. Com base nisso, foram estudadas as superfícies geradas durante as diferentes etapas que compõem o processo de polimento, de forma manual e mecanizada. As etapas consistem no polimento com o uso sequenciado de rodas flap com granulometria mesh P180, P240 e P320 e, por último, a etapa de *buffing*. Foram utilizados para a caracterização da superfície usinada: microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo (MEV-EC), medição de rugosidade e medição de parâmetros de área superficiais (tridimensionais). Os resultados possibilitaram a identificação dos elementos que compõem a superfície, bem como a identificação das modificações da mesma durante cada etapa do processo de polimento. As medições dos parâmetros indicam diminuição da rugosidade a cada etapa do processo de polimento por rodas flap. Também sugerem que a superfície passou a apresentar picos mais agudos e vales mais rasos com a progressão do processo. Também foi possível comparar as superfícies geradas de forma manual e mecanizada. A última apresentou uma menor dispersão dos parâmetros medidos. A superfície final, gerada pelo processo de *buffing*, é equivalente para os processos mecânico e manual. No entanto, a medição dos parâmetros não apontou diferenças entre a superfície gerada por *buffing* e rodas flap 320, apesar de haver diferença visual entre ambas. Os resultados sugerem que isso esteja relacionado com a escala de atuação do processo de *buffing*, que atua numa escala inferior à detectável pelos métodos de medição utilizados.

Palavras chaves: Polimento, rodas flap, *buffing*, caracterização superficial.

ABSTRACT

This work was aimed to the characterization of surfaces generated during the different stages of the polishing process with flap wheels and buffing. The process was designed based on a real situation of replacing a manual manufacturing process by a mechanized process. The mechanization of the process is important, due the high costs involved with labor and material, as well as costs related to the rejection of a component in this manufacturing stage, due to already added value to it. Due to the limited information available in specialized literature, it was found that the verification of the elements that compose the surfaces have a fundamental importance for the understanding of these processes. Based on this, the surfaces generated during the different stages that compose the manual and mechanized polishing process were investigated. The steps consist of polishing with the use of sequenced flap wheels with mesh P180, P240 and P320, ending with the buffing process. It was used for characterization: Field Emission Scanning Microscopy (FESEM), roughness measurement and surface area measurement parameters (three-dimensional). It was possible to identify the surface details, as well as changes of the same during each step of the polishing process. The parameters measurement indicates a decrease in roughness at each stage of the flap wheels polishing process. They also suggest that the surface began to show sharper peaks and shallower valleys with the progression of the process. It was also possible to compare the surfaces generated manually and mechanically. The latter exhibited a lower dispersion of the measured parameters. The final surface, generated by the buffing process is equivalent to the mechanized and manual processes. However, measurement of the parameters showed no differences between the surfaces generated by buffing and flap wheels 320 mesh, although there are differences between them. The results suggested that this difference it is related to the buffing process operation scale, which operates on a lower scale than detectable by measuring methods used.

Key words: Polishing; Flap Wheels; Buffing; Surface characterization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos processos de acabamento de acordo com o princípio de remoção	23
Figura 2 – Classificação dos processos de fabricação de acordo com sua aplicação	24
Figura 3 – Classificação dos processos de polimento	26
Figura 4 – Mecanismos de remoção durante o processo de formação de cavaco.	28
Figura 5 – Princípios de remoção utilizados na remoção por grãos abrasivos.....	30
Figura 6 - Processo de remoção em materiais dúcteis.....	31
Figura 7 – Remoção de material em materiais duros	32
Figura 8 – Remoção de material empregando abrasivos não ligados.....	33
Figura 9 – Componentes básicos de uma ferramenta abrasiva.....	34
Figura 10 – Exemplo de Roda flap.....	36
Figura 11 – Forças atuando no processo de polimento por flap wheels. A) Forças atuando sem o contato da roda com a peça. B) Forças atuando sobre o grão abrasivo	37
Figura 12 - Fatores de influência sobre o processo de acabamento por rodas flap	38
Figura 13 – Superfícies geradas pelo processo de polimento com rodas flap a partir de uma superfície torneada. (Ampliação de 200 vezes.).....	39
Figura 14 – Exemplo de processo de <i>buffing</i>	40
Figura 15 – Principais componentes do processo de <i>buffing</i>	41
Figura 16 – Estratégias de <i>buffing</i>	44
Figura 17 - Medição e comportamento da força gerada devido à interferência de contato. (a) condição de medição das forças; (b) comportamento da força com o aumento da interferência de contato.....	46
Figura 18 – Superfície obtida através do processo de <i>color buffing</i>	47
Figura 19 – Diversas camadas que compõem a superfície de um sólido	48
Figura 20 – Classificação dos desvios estruturais de uma superfície.....	48
Figura 21 – Técnicas de verificação de superfície de acordo com o processo utilizado.....	50
Figura 22 - Perfis obtidos através da medição com perfilômetro tipo apalpador.....	52
Figura 23 - Erro associado ao uso do patim	53
Figura 24 - Representação gráfica de R_p , R_v e R_z	56
Figura 25 – Definição de <i>skewness</i> e a amplitude da curva de distribuição.....	57
Figura 26 – Definição de R_{ku}	58

Figura 27 – Representação de R_dq	59
Figura 28 – Resolução obtida por diferentes métodos de avaliação da superfície.	60
Figura 29 – Exemplo de parâmetros de superfície relacionados a altura para brunimento e retificação	65
Figura 30 – Exemplo de execução do processo manual e mecanizado	66
Figura 31 - Etapas do processo de polimento manual	67
Figura 32 – Estratégia utilizada no polimento mecanizado (vista superior)	69
Figura 33 – Etapas do processo mecanizado	70
Figura 34 – Amostras utilizadas para as análises de textura e parâmetros espaciais.	72
Figura 35 – Adaptador e seus componentes empregados no polimento em centro de usinagem	74
Figura 36 – Direções de Medição de Rugosidade	75
Figura 37 – Micrografia por MEV-EC. As imagens superiores representam o processo manual; as inferiores, o processo mecânico. Ampliação de 1000 vezes.	77
Figura 38 – Superfície gerada pelo uso de rodas flap. As imagens superiores referem-se ao processo manual; as inferiores, ao mecanizado. Ampliação de 10.000 vezes.....	79
Figura 39 – Superfícies obtidas após o processo de <i>buffing</i> . A – Polimento manual; B – Polimento Mecânico. Ampliação de 10.000 vezes.....	81
Figura 40 – Gráfico de R_a no sentido longitudinal	82
Figura 41 – Gráfico de R_a no sentido transversal	83
Figura 42 – Gráfico de R_q no sentido longitudinal	85
Figura 43 – Gráfico de R_q no sentido transversal	85
Figura 44 – Gráfico de R_z no sentido longitudinal	87
Figura 45 – Gráfico de R_z no sentido transversal	87
Figura 46 – Gráfico de R_{ku} no sentido transversal	88
Figura 47 – Gráfico de R_{sk} no sentido transversal.....	89
Figura 48 – Gráfico de R_dq no sentido transversal	91
Figura 49 – Comparativo da superfície	93
Figura 50 – Gráfico comparativo dos valores mensurados de S_a e S_q	95
Figura 51 – Gráfico comparativo dos valores mensurados de S_v e S_p	96
Figura 52 – Gráfico comparativo de S_z	96
Figura 53 – Gráfico comparativo de S_{ku}	97
Figura 54 – Gráfico comparativo de S_{sk}	98
Figura 55 – Pino de base	113

Figura 56 – Flange maior	113
Figura 57 – Bucha para panos de polimento	113
Figura 58 – Flange menor.....	114
Figura 59 – Adaptador para pino de base	114
Figura 60 – Montagem do dispositivo de fixação para as rodas flap 180 e 320	114
Figura 61 - Montagem do dispositivo de fixação para as rodas flap 240.....	115
Figura 62 - Montagem do dispositivo de fixação para o processo de <i>buffing</i>	115
Figura 63 – Catálogos Roda Flap 1	117
Figura 64 – Catálogo Rodas Flap 2	118
Figura 65 – Catálogo composto abrasivo Massa 2.....	119
Figura 66 – Catálogo pano Ventilado.....	119
Figura 67 – Recomendação de velocidades para o pano ventilado	120
Figura 68 – Catálogo Sebo Composto.....	120

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Efeito do aumento dos parâmetros sobre a rugosidade Ra.....	39
Quadro 2 – Materiais comumente utilizados para a fabricação de panos de <i>buffing</i>	42
Quadro 3 – Tipos de abrasivos utilizados no <i>buffing</i>	44
Quadro 4 - Parâmetros recomendados para diversos tipos de <i>buffing</i>	45
Quadro 5 – Relação entre os parâmetros de rugosidade e as propriedades funcionais de uma superfície.	59
Quadro 6 – Técnicas utilizadas na avaliação de superfícies.....	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos acabamentos obtidos por diferentes processos de usinagem	25
Tabela 2 – Parâmetros de acordo com a ISO 4287:1997	55
Tabela 3 - Parâmetros utilizados no processo mecanizado	71
Tabela 4 – Ferramental utilizado	73
Tabela 5 – ANOVA – Roda Flap 180 – Manual x Mecanizado – [Ra] – Transversal.....	83
Tabela 6 – ANOVA – <i>Buffing</i> – Manual x Mecanizado - [Ra] – Transversal	83
Tabela 7 – ANOVA – Roda 320 x <i>Buffing</i> – [Ra] – Processo Manual – Transversal	84
Tabela 8 – ANOVA – Roda 320 x <i>Buffing</i> – [Ra] – Processo Mecanizado – Transversal	84
Tabela 9 - ANOVA – <i>Buffing</i> – Manual x Mecanizado - [Rq] – Transversal.....	86
Tabela 10 – ANOVA – Roda Flap 180 – Manual x Mecanizado - [Rdq] – Transversal	91
Tabela 11 – ANOVA – Roda Flap 320 – Manual x Mecanizado - [Rdq] – Transversal	92
Tabela 12 – ANOVA – <i>Buffing</i> – Manual x Mecanizado - [Rdq] – Transversal	92
Tabela 13 – ANOVA – Roda Flap 180 – Manual x Mecanizado – [Ra] – Longitudinal.....	121
Tabela 14 – ANOVA – Roda Flap 240 – Manual x Mecanizado – [Ra] – Transversal.....	121
Tabela 15 – ANOVA – Roda Flap 240 – Manual x Mecanizado – [Ra] – Longitudinal.....	121
Tabela 16 – ANOVA – Roda Flap 320 – Manual x Mecanizado – [Ra] – Transversal.....	121
Tabela 17 – ANOVA – Roda Flap 320 – Manual x Mecanizado – [Ra] – Longitudinal.....	121
Tabela 18 – ANOVA – <i>Buffing</i> – Manual x Mecanizado – [Ra] – Longitudinal.....	122
Tabela 19 – ANOVA – Roda Flap 180 – Manual x Mecanizado – [Rq] – Transversal.....	122
Tabela 20 – ANOVA – Roda Flap 180 – Manual x Mecanizado – [Rq] – Longitudinal.....	122
Tabela 21 – ANOVA – Roda Flap 240 – Manual x Mecanizado – [Rq] – Transversal.....	122
Tabela 22 – ANOVA – Roda Flap 240 – Manual x Mecanizado – [Rq] – Longitudinal.....	122
Tabela 23 – ANOVA – Roda Flap 320 – Manual x Mecanizado – [Rq] – Transversal.....	122
Tabela 24 – ANOVA – Roda Flap 320 – Manual x Mecanizado – [Rq] – Longitudinal.....	123
Tabela 25 – ANOVA – <i>Buffing</i> – Manual x Mecanizado – [Rq] – Longitudinal	123
Tabela 26 – ANOVA – Roda Flap 180 – Manual x Mecanizado – [Rz] – Transversal.....	123
Tabela 27 – ANOVA – Roda Flap 180 – Manual x Mecanizado – [Rz] – Longitudinal.....	123
Tabela 28 – ANOVA – Roda Flap 240 – Manual x Mecanizado – [Rz] – Transversal.....	123
Tabela 29 – ANOVA – Roda Flap 240 – Manual x Mecanizado – [Rz] – Longitudinal.....	123
Tabela 30 – ANOVA – Roda Flap 320 – Manual x Mecanizado – [Rz] – Transversal.....	124
Tabela 31 – ANOVA – Roda Flap 320 – Manual x Mecanizado – [Rz] – Longitudinal.....	124
Tabela 32 – ANOVA – <i>Buffing</i> – Manual x Mecanizado – [Rz] – Transversal.....	124

Tabela 33 – ANOVA – <i>Buffing</i> – Manual x Mecanizado – [Rz] – Longitudinal.....	124
Tabela 34 – ANOVA – Roda Flap 180 – Manual x Mecanizado – [Rku] – Transversal.....	124
Tabela 35 – ANOVA – Roda Flap 180 – Manual x Mecanizado – [Rku] – Longitudinal.....	124
Tabela 36 – ANOVA – Roda Flap 240 – Manual x Mecanizado – [Rku] – Transversal.....	125
Tabela 37 – ANOVA – Roda Flap 240 – Manual x Mecanizado – [Rku] – Longitudinal.....	125
Tabela 38 – ANOVA – Roda Flap 320 – Manual x Mecanizado – [Rku] – Transversal.....	125
Tabela 39 – ANOVA – Roda Flap 320 – Manual x Mecanizado – [Rku] – Longitudinal.....	125
Tabela 40 – ANOVA – <i>Buffing</i> – Manual x Mecanizado – [Rku] – Transversal	125
Tabela 41– ANOVA – <i>Buffing</i> – Manual x Mecanizado – [Rku] – Longitudinal	125
Tabela 42 ANOVA – Roda Flap 180 – Manual x Mecanizado – [Rsk] – Transversal.....	126
Tabela 43 – Roda Flap 180 – Manual x Mecanizado – [Rsk] – Longitudinal	126
Tabela 44 – Roda Flap 240 – Manual x Mecanizado – [Rsk] – Transversal	126
Tabela 45 – Roda Flap 240 – Manual x Mecanizado – [Rsk] – Longitudinal	126
Tabela 46 – Roda Flap 320 – Manual x Mecanizado – [Rsk] – Transversal	126
Tabela 47 – Roda Flap 320 – Manual x Mecanizado – [Rsk] – Longitudinal	126
Tabela 48 – <i>Buffing</i> – Manual x Mecanizado – [Rsk] – Transversal	127
Tabela 49 – <i>Buffing</i> – Manual x Mecanizado – [Rsk] – Longitudinal	127
Tabela 50 – Roda Flap 180 – Manual x Mecanizado – [Rdq] – Longitudinal	127
Tabela 51– Roda Flap 240 – Manual x Mecanizado – [Rdq] – Transversal.....	127
Tabela 52 – Roda Flap 240 – Manual x Mecanizado – [Rdq] – Longitudinal	127
Tabela 53– Roda Flap 320 – Manual x Mecanizado – [Rdq] – Longitudinal.....	127
Tabela 54 – <i>Buffing</i> – Manual x Mecanizado – [Rdq] – Longitudinal.....	128
Tabela 55– ANOVA – Roda 320 x <i>Buffing</i> – [Rq] – Processo Manual – Transversal	128
Tabela 56– ANOVA – Roda 320 x <i>Buffing</i> – [Rq] – Processo Mecanizado – Transversal...	128
Tabela 57 – ANOVA – Roda 320 x <i>Buffing</i> – [Rz] – Processo Manual – Transversal	128
Tabela 58 – ANOVA – Roda 320 x <i>Buffing</i> – [Rz] – Processo Mecanizado – Transversal ..	128
Tabela 59 – ANOVA – Roda 320 x <i>Buffing</i> – [Rku] – Processo Manual – Transversal	129
Tabela 60 – ANOVA – Roda 320 x <i>Buffing</i> – [Rku] – Processo Mecanizado – Transversal	129
Tabela 61 – ANOVA – Roda 320 x <i>Buffing</i> – [Rsk] – Processo Manual – Transversal.....	129
Tabela 62 – ANOVA – Roda 320 x <i>Buffing</i> – [Rsk] – Processo Mecanizado– Transversal .	129
Tabela 63 – ANOVA – Roda 320 x <i>Buffing</i> – [Rdq] – Processo Manual– Transversal	129
Tabela 64 – ANOVA – Roda 320 x <i>Buffing</i> – [Rdq] – Processo Mecanizado– Transversal .	129

LISTA DE SÍMBOLOS

R_a	Desvio aritmético médio do perfil avaliado
R_q	Desvio médio quadrático do perfil avaliado
R_z	Altura máxima do perfil
R_{sk}	Skewness
R_{ku}	Kurtosis
R_{dq}	Inclinação quadrática média do perfil avaliado
S_a	Desvio médio aritmético de rugosidade
S_q	Desvio médio quadrático de rugosidade
S_p	Maior Altura de Pico
S_v	Maior Profundidade de Vale
S_z	Maior altura da superfície amostral
S_{sk}	<i>Skewness</i>
S_{ku}	<i>Kurtosis</i>
F_{ns}	Força normal à trajetória do grão
F_{ts}	Força tangencial à trajetória do grão
h_{cu}	Profundidade de penetração
T_μ	Espessura crítica de corte
$h_{cu\ eff}$	Espessura efetiva do cavaco
q_t	Calor total
q_{kss}	Calor dissipado pelo atrito
q_s	Calor absorvido pelo abrasivo
q_{span}	Calor absorvido pelo cavaco
q_w	Calor absorvido pela peça
F_{rc}	Força de arrasto devido ao deslocamento de ar
F_c	Força centrífuga
F_{gc}	Força centrífuga atuante sobre o grão
F_{fg}	Força exercida pelo flap sobre o grão
F_{rp}	Força de resistência perpendicular à trajetória do grão
F_{rt}	Força de resistência tangencial à trajetória do grão
n_b	Sentido de rotação do grão
n_p	Sentido de rotação da peça

λ_c	Filtro de perfil
R_p	Altura máxima de pico do perfil
R_v	Profundidade máxima do vale do perfil
R_t	Altura total do perfil
R_c	Altura média dos elementos do perfil
m	Número de amostras obtidas
n	Número de amostras obtidas
Z_t	Distância entre pico e vale adjacente
$Z(x)$	Distância do pico ou vale até a linha média
l	Comprimento amostral
l_r	Comprimento amostral
R_{sm}	Largura média dos elementos do perfil
X_s	Largura dos elementos do perfil
$R\Delta q$	Inclinação quadrática média do perfil avaliado
Θ	Inclinação do perfil

LISTA DE ABREVIATURAS

GUS	Grupo de Usinagem
EUROSTAT	Gabinete de Estatísticas da União Europeia
EU	<i>Europe Union</i> - União Europeia
MEV-EC	Microscopia Eletrônica de Varredura por Emissão de Campo
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> - Organização Internacional para Normalização
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
<i>SiC</i>	Carboneto de Silício
<i>Al₂O₃</i>	Óxido de Alumínio
CBN	Nitreto Cúbico de Boro
ASM	<i>American Society for Metals</i>
<i>SiO₃</i>	Tripoli-Sílica
<i>Fe₂O₃</i>	Óxido de Ferro
<i>Cr₂O₃</i>	Óxido de Cromo
CNC	Comando Numérico Computadorizado
SEM	<i>Scanning Electron Microscopy</i> – Microscopia Eletrônica de Varredura
AFM	<i>Atomic force Microscopy</i> – Microscopia por Força Atômica
MET	Microscopia Eletrônica de Transmissão
STEM	<i>Scanning Transmission Eletronic Microscopy</i> – Microscopia Eletrônica de Transmissão de Varredura
SCM	<i>Scanning Capacitive Microscopy</i> – Microscopia Capacitiva de Varredura
ACF	<i>Autocorrelation function</i> – Função de autocorrelação
Sal	Comprimento de autocorrelação
Str	Razão de textura de uma superfície
Sdq	Gradiente médio quadrático do declive da superfície amostral
Sdr	Razão de área superficial
FEPA	<i>Federation of the European Producers of abrasives</i> – Federação dos Produtores Europeus de Abrasivos
ANOVA	Análise de Variância

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
1.1	JUSTIFICATIVA	20
1.2	OBJETIVO GERAL	21
1.3	OBJETIVO ESPECÍFICOS.....	21
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	PROCESSOS DE ACABAMENTO	23
2.2	PROCESSOS DE POLIMENTO	25
2.3	PROCESSOS DE REMOÇÃO COM GEOMETRIA NÃO DEFINIDA	27
2.3.1	Formação de cavaco	28
2.3.2	Ferramenta abrasiva revestida.....	34
2.3.3	Ferramental na usinagem com abrasivos não ligados.....	35
2.4	POLIMENTO POR RODAS FLAP	36
2.5	BUFFING	40
2.6	CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE.....	47
2.6.1	Composição de uma superfície e técnicas de avaliação	47
2.6.2	Análise visual de textura	50
2.6.3	Perfilômetro tipo apalpador	51
2.6.4	Medição de rugosidade em perfis circulares	54
2.6.5	Parâmetros de rugosidade bidimensionais	54
2.6.6	Interferômetros de luz branca	60
2.6.7	Medição de parâmetros espaciais.....	61
3	METODOLOGIA.....	66
3.1	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	66
3.1.1	Etapas do processo manual.....	66
3.1.2	Etapas do processo mecanizado	69
3.2	PARÂMETROS DE PROCESSO.....	71
3.3	MATERIAIS.....	72
3.3.1	Corpos de Prova.....	72
3.3.2	Ferramental utilizado	72
3.3.3	Maquinário utilizado.....	73

3.4	ANÁLISES POR MEV-EC	74
3.5	MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE	74
3.6	MEDIÇÃO DE PARÂMETROS DE SUPERFÍCIE.....	75
4	RESULTADOS	77
4.1	INSPEÇÃO VISUAL via MEV-EC	77
4.2	RUGOSIDADE BIDIMENSIONAL.....	81
4.3	PARÂMETROS DE SUPERFÍCIE.....	92
5	CONCLUSÕES.....	100
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	101
	REFERÊNCIAS	102
	ANEXO A – INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES À REVISÃO	108
	ANEXO B – ADAPTADOR	113
	ANEXO C – CATÁLOGOS	117
	ANEXO D – ANOVAS.....	121

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA

Este trabalho deriva de um projeto desenvolvido pelo grupo de usinagem da Universidade de Caxias do Sul (GUS) associado com uma empresa parceira, pertencente ao ramo de acessórios automotivos. A finalidade do projeto consiste em substituir um processo de acabamento manual por um processo de acabamento automatizado, aumentando a qualidade superficial das peças e a redução/eliminação do trabalho manual. De acordo com Pilný e Bissacco (2015), o polimento manual, principalmente envolvendo geometrias complexas, é um processo que demanda mão de obra qualificada sem garantias de repetitividade. De acordo com os autores, a automatização do processo proporciona a geração de uma superfície com menor quantidade de defeitos, sendo necessário para isso monitoramento e controle do processo.

O processo abordado neste trabalho consiste em três etapas de polimento com rodas flap seguido por uma etapa final de *buffing* com o uso de panos ventilados. Com o objetivo de aumentar o conhecimento técnico e científico sobre esses processos, foi conduzida uma pesquisa que apontou a escassez de conteúdo aprofundado que abordasse o comportamento ou caracterizasse a superfície gerada pelos mesmos. Slătineanu et al. (2010) (assim como a ASM, 1994), autores que estudaram o polimento com rodas flap, apontam a escassez de informações na literatura especializada sobre condições adequadas para o uso desse processo. Nenhuma outra publicação mais atual foi encontrada na literatura.

O conhecimento técnico sobre a superfície, e sobre como a mesma é gerada, é de fundamental importância para a mecanização do processo, bem como o funcionamento correto de uma peça manufaturada. Bet (1999) salienta que o estado da superfície pode influenciar o desempenho de um componente das mais variadas formas possíveis, desde condições de acoplamento do mesmo, até a falha prematura do componente em questão. Leach (2011) estima que 10% das falhas de componentes manufaturados estão associadas a efeitos relacionados a condição da superfície.

Não somente o desempenho dos componentes está associado à condição da superfície, mas também os custos envolvidos na fabricação. De acordo com o Gabinete de Estatísticas da União Europeia (EUROSTAT), em uma pesquisa realizada na União Europeia UE, os processos de acabamento consistem em aproximadamente 15% do total dos custos de manufatura, sendo que, quando os valores de rugosidade requeridos para o componente são

inferiores a 1 μm (caso observado no projeto com a empresa), esse percentual aumenta drasticamente (PUSAVEC; KENDA, 2014). A rejeição de um componente após essa etapa de produção ocasiona alto prejuízo financeiro devido a todos os custos de fabricação já agregados ao produto (PILNÝ; BISSACCO, 2015).

Nesse contexto, este trabalho foi concebido de forma a proporcionar o estudo da superfície gerada com o uso de rodas flap e *buffing*, tanto de forma manual, metodologia utilizada atualmente, como de forma mecanizada. A escolha dessas duas formas de processo visa possibilitar o entendimento das diferenças existentes entre as metodologias de forma a facilitar uma possível transição do processo manual para o mecanizado.

A posse desse conhecimento é essencial para o âmbito industrial e para o âmbito científico. No âmbito industrial, permitirá a identificação e a correção de falhas em peças manufaturadas, assim como a redução de custos inerentes ao processo, seja por perdas ou por uso incorreto do mesmo. No que se refere ao âmbito científico, fornecerá as condições básicas para que diversos outros trabalhos sejam realizados. Alguns desses trabalhos estão associados ao desenvolvimento de melhores formas de utilização de cada processo e à interpretação correta da influência dos parâmetros de trabalho.

1.2 OBJETIVO GERAL

Caracterizar a superfície nas diferentes etapas que compõem os processos de acabamento manual e mecanizado.

1.3 OBJETIVO ESPECÍFICOS

- a) Avaliar a textura dos três diferentes processos, através de microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo (MEV-EC).
- b) Caracterizar os parâmetros de rugosidade 2D, de acordo com a norma NBR ISO 4287:1997. Os parâmetros estudados são o desvio aritmético médio do perfil avaliado (R_a), desvio médio quadrático do perfil avaliado (R_q), altura máxima do perfil (R_z), *Skewness* (R_{sk}), *Kurtosis* (R_{ku}), inclinação quadrática média do perfil avaliado (R_{dq}).

c) Caracterizar os parâmetros de rugosidade 3D, de acordo com a norma ISO 25178-2:2012. Os parâmetros a serem avaliados são o desvio médio aritmético de rugosidade (S_a); desvio médio quadrático de rugosidade (S_q), maior altura de pico (S_p), maior profundidade de vale (S_v), maior altura da superfície amostral (S_z), *Skewness* (S_{sk}) e *Kurtosis* (S_{ku}).

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é dividido em seis capítulos. O presente capítulo (primeiro) é introdutório ao tema a ser discutido. O segundo capítulo, Revisão Bibliográfica, apresenta a fundamentação teórica para o entendimento e embasamento da realização do projeto. A terceira parte, Metodologia, descreve detalhadamente as etapas de elaboração do presente trabalho, desde a obtenção das amostras até os procedimentos de análise utilizados. O quarto capítulo, Resultados, apresenta o produto da aplicação da metodologia, juntamente com a análise fundamentada com base na literatura. A quinta seção apresenta as conclusões obtidas com base nas análises do quarto capítulo. Por fim, o sexto capítulo apresenta sugestões para futuros trabalhos.

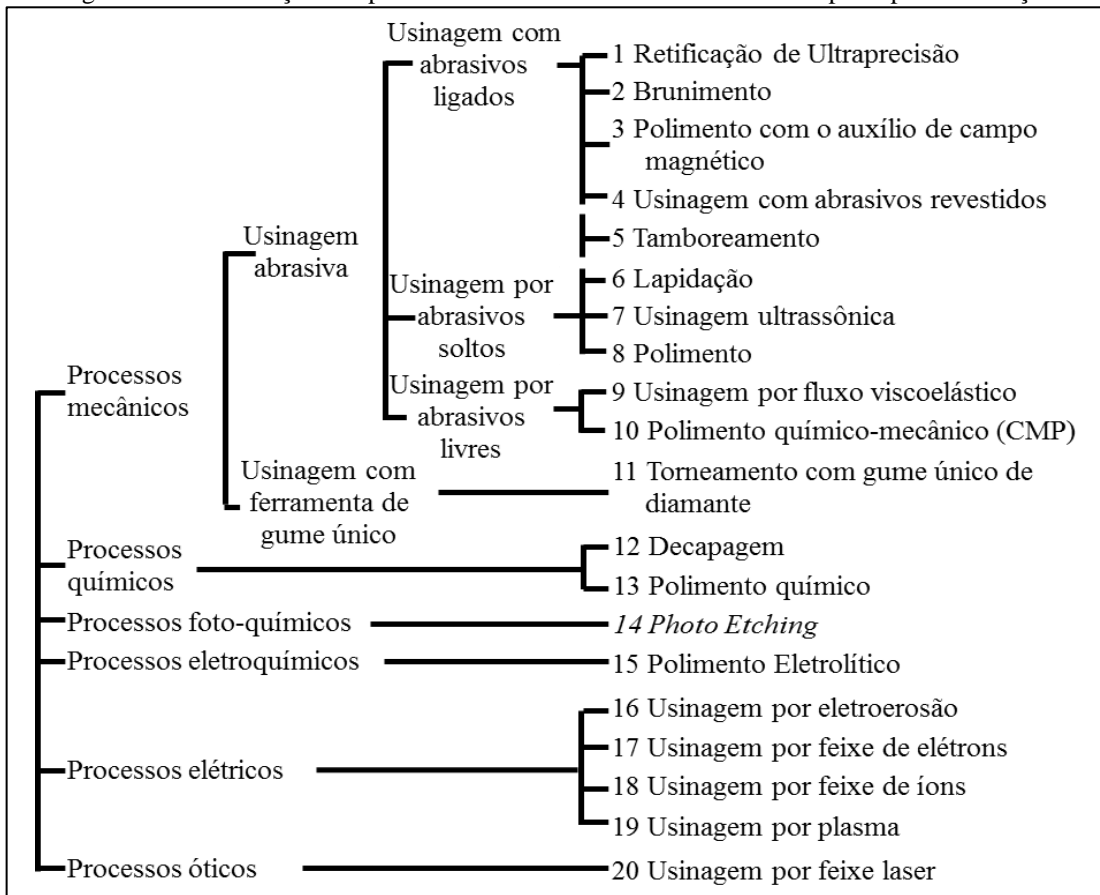
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROCESSOS DE ACABAMENTO

Existem diversas definições e formas de classificação para acabamento. Slătineanu et al. (2010) definem acabamento como o processo final aplicado a uma peça, ou que se destina a reduzir a rugosidade de uma determinada superfície. Uma definição mais restrita, voltada à usinagem com ferramentas de geometria não definida, é apresentada por Kutz (2006), segundo o qual o termo acabamento é utilizado quando um processo de usinagem com partículas abrasivas finas é empregado para gerar superfícies lisas e melhorar a condição da estrutura metalúrgica da superfície.

No âmbito das classificações, Taylor et al. (2013) e Komanduri et al. (1997) dividem a classificação dos processos de acabamento de acordo a fonte de energia utilizada para a remoção. O primeiro conjunto de autores divide os processos de acabamento em quatro classes: mecânica, química, elétrica e eletroquímica, enquanto que o segundo grupo classificação mais completa, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Classificação dos processos de acabamento de acordo com o princípio de remoção



Fonte: Adaptado de Komanduri et al. (1997).

Uma forma de classificação mais abrangente é apresentada na figura 2 por Kalpakjian et al. (2009), que classificam os processos de acordo com sua empregabilidade e qualidade superficial (representada por Ra) possível de ser obtida.

Figura 2 – Classificação dos processos de fabricação de acordo com sua aplicação

Processo	Rugosidade (Ra) [μm]												
	50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,01	0,03	0,01
Usinagem Grosseira													
Corte com maçarico													
Retificação grosseira													
Serrar													
Fundição													
Fundição em areia													
Fundição em molde permante													
Fundição de precisão													
Fundição em molde													
Conformação													
Laminação a quente													
Forjamento													
Extrusão													
Laminação a frio, trefilação													
Usinagem Convensional													
Aplainamento													
Fresamento													
Brochamento													
Escareamento													
Torneamento, Mandrilamento													
Furação													
Usinagem Avançada													
Usinagem química													
Usinagem por eletroerosão													
Usinagem por feixe de elétrons													
Usinagem a laser													
Usinagem eletroquímica													
Processos de Acabamento													
Brunimento													
Tamboreamento													
Retificação eletroquímica													
Retificação													
Eletropolimento													
Polimento													
Lapidação													
Superacabamento													

Fonte: Adaptado de Kalpakjian et al. (2009).

São apresentados como processos de acabamento processos que utilizam remoção mecânica, como a retificação, processos como o eletropolimento, cujo princípio de remoção é

eletroquímico e retificação eletroquímica, cujo mecanismo de remoção combina remoção eletroquímica e mecânica (BRALLA, 2007). Além daqueles apresentados como processos de acabamento na Figura 2, Kalpakjian et al. (2009) acrescentam mais alguns em um detalhamento dessa categoria. Dessa forma, adicionam à lista de processos de acabamento os processos que empregam abrasivos revestidos, remoção por escovas, polimento químico-mecânico (CMP, utilizado principalmente na fabricação de semicondutores), polimento como o auxílio de campos magnéticos e *buffing*.

2.2 PROCESSOS DE POLIMENTO

Para Arunachalam et al. (2015) e Segreto et al. (2015), polimento é um dos processos de acabamento de maior emprego nos últimos estados de manufatura. Segreto et al. (2015) definem polimento como o processo de criar uma superfície mais lisa que a inicial. Uma classificação quantitativa de acabamento polido é apresentada por Davis et al. (1989), conforme mostra a Tabela 1, a seguir.

Tabela 1 – Classificação dos acabamentos obtidos por diferentes processos de usinagem

Classe	Ra [μm]	Tolerância [mm]	Processos	Custo relativo de produção
Superacabamento	0,1	0,0125	Retificação, lapidação, microbrunimento.	40
Polido	0,2	0,0125	Retificação, brunimento, lapidação.	35
Retificado	0,4	0,2500	Retificação, lapidação.	25
Alisado	0,8	0,5000	Retificação, fresamento.	18
Fino	1,6	0,0750	Fresamento, retificação, brochamento.	13
Semifino	3,2	0,1000	Fresamento, retificação, brochamento, torneamento.	9
Médio	6,3	0,1750	Conformação, fresamento, torneamento.	6
Semigrosso	12,5	0,3300	Fresamento, torneamento.	4
Grosso	25,0	0,6350	Torneamento.	2
Limpeza	50,0	1,2500	Torneamento.	1

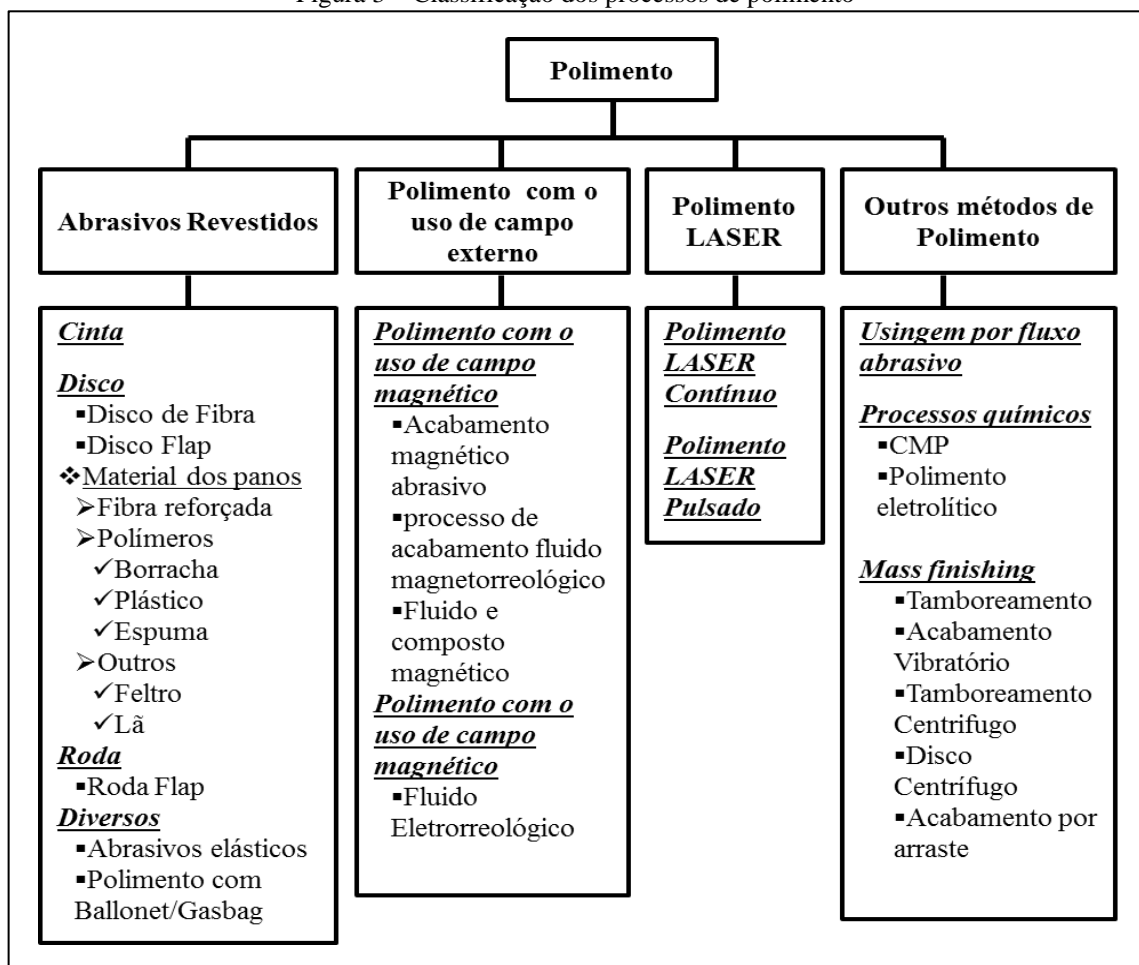
Fonte: Adaptado de Davis et al. (1989).

Conforme a classificação apresentada na Tabela 1, um acabamento polido apresenta Ra na faixa de 0,2 μm e uma tolerância dimensional de 0,0125 mm. Outro fator relevante

nessa classificação é o custo relativo de produção. O acabamento polido apresenta o segundo custo mais elevado dentro dos diversos acabamentos superficiais citados, ficando atrás somente do processo de superacabamento. São citados como processos capazes de alcançar essa faixa de qualidade superficial a retificação, o brunimento e a lapidação.

Uma classificação mais abrangente dos processos de polimento é apresentada por Arunachalam et al. (2015), em que os processos são divididos de acordo seu mecanismo de remoção. Segundo os autores, essa classificação, apresentada na Figura 3, a seguir, é bastante utilizada para pesquisas acadêmicas e pela indústria.

Figura 3 – Classificação dos processos de polimento



Fonte: Adaptado de Arunachalam et al. (2015).

Os autores apresentados a seguir defendem o polimento não como um único processo, mas como uma sequência de vários processos visando ao alisamento da superfície. Roswell (2006) aponta que o polimento utilizado na indústria apresenta duas etapas: a etapa inicial é voltada para a remoção de marcas, como riscos, impressões deixadas na superfície por dos processos anteriores, poros e outros defeitos; a etapa posterior é focada na redução da

rugosidade, que irá de fato gerar a aparência polida da superfície. O estudo realizado por Kuo (1997), sobre o polimento de moldes, reforça a existência desta divisão. O mesmo divide o processo de polimento em duas partes: a primeira parte é o polimento pesado, fase em que é removida a maioria das marcas, deixando apenas uma camada fina para a segunda etapa; a segunda fase é a responsável por gerar um acabamento final desejado, sem alterar as dimensões da peça. Dieste et al. (2013) realizaram um estudo detalhado da sequência do processo de polimento visando otimizar o mesmo. Para que o objetivo fosse alcançado, a etapa posterior deveria remover completamente as marcas deixadas pelo processo anterior. Em cada etapa foram utilizados diferentes parâmetros cinemáticos e dinâmicos, assim como diferentes materiais, como partículas abrasivas de diferentes tamanhos. Essas abrangiam grãos grosseiros, como o P80 até grãos finos, com dimensões aproximadas de 1 μm como os encontrados na pasta de alumina.

Komanduri et al. (1997) fazem uma ressalva a respeito da utilização de termos como polimento, acabamento, lapidação e brunimento. Todos eles são empregados para processos de acabamento de precisão. O termo polimento pode ser utilizado para se referir a qualquer processo empregado a fim de melhorar a qualidade superficial sem alterar a forma geométrica ou precisão da peça trabalhada. A lapidação tem seu foco não no acabamento, mas na precisão de forma. O brunimento é semelhante à lapidação, porém com o objetivo de gerar uma superfície com forma e precisão características. Acabamento é um termo que pode ser utilizado para se referir a qualquer um dos processos acima, incluindo polimento.

2.3 PROCESSOS DE REMOÇÃO COM GEOMETRIA NÃO DEFINIDA

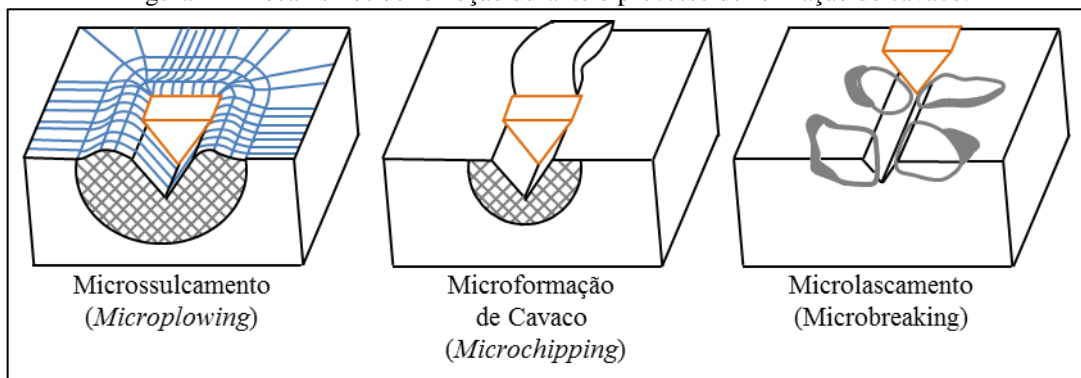
Um abrasivo é uma partícula dura que apresenta gumes e forma irregular, capaz de remover pequenas quantidades de material através da formação de pequenos cavacos. Pelo fato de ser duro, o abrasivo tem grande utilização em processos de acabamento de materiais tratados termicamente, e materiais muito duros, como cerâmicas e vidros. O mesmo também pode ser utilizado para cortar barras de perfis estruturais ou concreto, remover carepas de solda e limpar peças através de jateamento (KALPAKJIAN et al., 2009).

Os processos de usinagem que empregam geometria não definida normalmente são processos que permitem a obtenção de superfícies de alta qualidade e precisão. Inicialmente esses processos eram empregados somente para operações de acabamento, no entanto, com o advento de formas de retificação de alta eficiência, altas taxas de remoção se tornaram possíveis para operações de desbaste (KLOCKE, 2009).

2.3.1 Formação de cavaco

O processo de remoção que ocorre no contato da partícula abrasiva com a superfície depende principalmente das propriedades físicas da ferramenta e da peça. Mediante a variação dessas propriedades, três mecanismos distintos de remoção podem ser observados, microssulcamento, microformação de cavaco e microlascamento, conforme representação da Figura 4, a seguir.

Figura 4 – Mecanismos de remoção durante o processo de formação de cavaco.



Fonte: Adaptado de Marinescu et al. (2007).

De acordo com Marinescu et al. (2007), no mecanismo de microssulcamento, ocorre uma deformação elastoplástica do material em direção das bordas do sulco gerado pela passagem do grão. A remoção de material gerada por esse mecanismo é muito pequena, e ocorre pela sobreposição dos efeitos gerados pela passagem dos grãos abrasivos, que acaba por gerar a fratura do material conformado para as bordas do sulco. Na microformação de cavaco, ocorre a formação do cavaco semelhante ao observado no uso de geometria definida. O volume do cavaco é igual ao volume do sulco gerado pelo grão. Tanto o microssulcamento quanto a microformação de cavaco ocorrem na usinagem de materiais dúcteis. A relação entre os dois vai depender da combinação do abrasivo com o material da peça, dos parâmetros de remoção e da geometria do gume do grão. Por fim, o microlascamento é causado pela formação e propagação de trincas. Nesse tipo de remoção, a quantidade de material removido pode ser maior que a dimensão do sulco gerado pelo grão. Esse tipo de remoção ocorre em materiais frágeis.

Esses mecanismos ocorrem devido ao desgaste abrasivo gerado pela ação dos grãos. Marinescu et al. (2006) definem desgaste abrasivo como a remoção de material de superfícies em movimento relativo, causada por saliências de partículas duras presentes entre superfícies, ou fixas em uma delas.

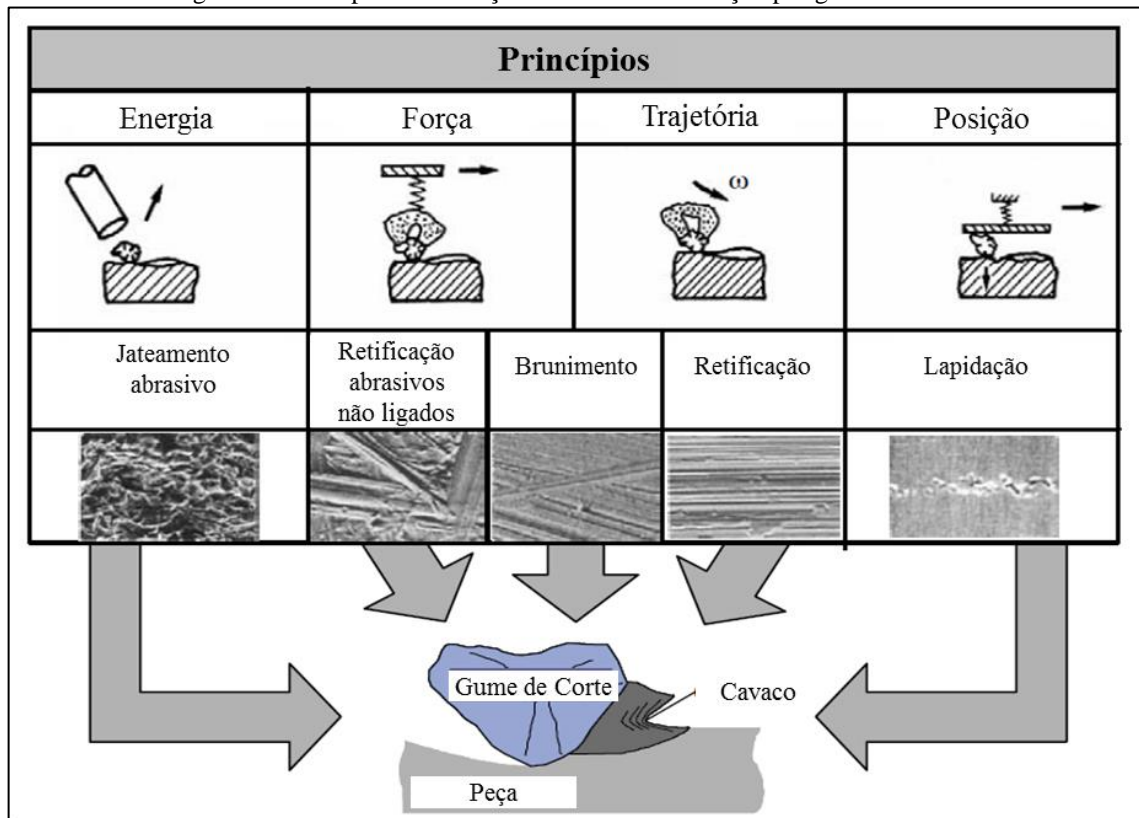
A classificação mais comum é a divisão do desgaste abrasivo em dois corpos e três corpos. O primeiro abrange as operações que utilizam abrasivos ligados ou presos rigidamente em um dos corpos, enquanto o segundo engloba operações que empregam abrasivos livres, capazes de rolar ou deslizar entre as superfícies da peça e ferramenta. A abrasão entre dois corpos é mais severa, chegando a desgastes três vezes superiores aos observados em mecanismos de três corpos, para uma mesma condição de aplicação de carga. Isso se deve ao fato de que o grão abrasivo livre executa movimentos que não causarão a remoção de material durante todo o tempo de contato, como o movimento de rotação. Na condição de abrasão por dois corpos, o grão é capaz de penetrar mais profundamente na peça, uma vez que sua posição é fixa e o mesmo se comporta como uma ferramenta de geometria definida (MARINESCU et al., 2006).

Apesar de os mecanismos serem os mesmos, existem diferenças entre as duas formas de desgaste: no caso da abrasão por dois corpos, o grão abrasivo utilizado tende a ser maior que o utilizado na abrasão por três corpos; o mesmo ocorre com relação à pressão de contato entre grão e peça. Essa diferença de tamanho e pressão resulta na geração de sulcos mais profundos nos processos abrasivos por dois corpos. Por sua vez, a abrasão com três corpos exige um amplo suprimento de material abrasivo, e a distribuição dos mesmos entre a ferramenta é de difícil controle. Além disso, a pressão exercida por grãos pequenos é menor, o que ocasiona marcas menos profundas sobre a superfície (MARINESCU et al., 2006).

Na prática, os dois tipos de abrasão estão presentes na maior parte dos processos que se utilizam do desgaste abrasivo. Marinescu et al. (2012) comentam que a presença de grãos soltos em um processo de abrasão por dois corpos é uma consequência do processo. Isso se deve ao fato de o material removido da peça e pedaços de grãos fraturados não serem removidos completamente da zona de corte e ficarem espalhados entre a ferramenta e a peça. O efeito contrário é observado em processos de abrasão por três corpos, como a lapidação, em que grãos abrasivos soltos acabam encravando na ferramenta e assumindo um comportamento de abrasão por dois corpos (MARINESCU et al., 2006).

Os tipos de desgaste abrasivo e os mecanismos de remoção estão associados a diferentes princípios de remoção empregados. Esses se referem à forma como o grão abrasivo entra em contato com a peça. Klocke (2009) apresenta quatro princípios básicos de remoção: energia (*Energy-bound*), força (*force bound*), trajetória (*track bound*) e posição (*space bound*), que estão representados na Figura 5, a seguir.

Figura 5 – Princípios de remoção utilizados na remoção por grãos abrasivos



Fonte: Adaptado de Klocke (2009).

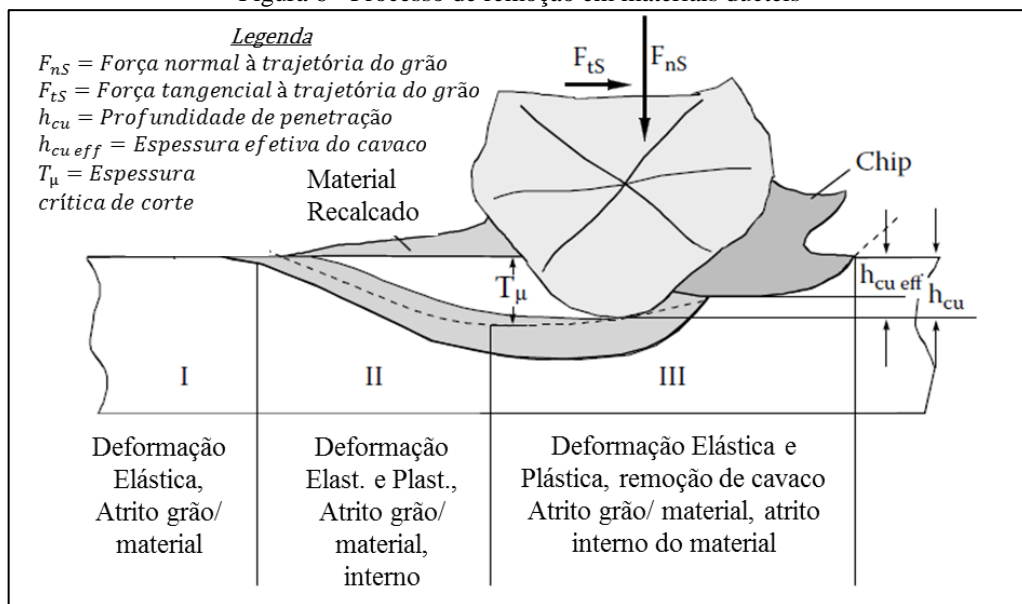
O princípio de remoção mais encontrado em processos de geometria não definida é o de trajetória, no qual o grão abrasivo é fixo na ferramenta, o que possibilita percorrer um traçado definido sobre a superfície da peça. O princípio de força, por sua vez, também pode ser encontrado no uso de ferramentas com abrasivos ligados, como alguns processos de retificação e brunimento, e em processos com abrasivos não ligados. Nesse princípio a ferramenta é colocada em contato com a superfície com uma força controlada, de maneira a manter sempre uma pressão constante da ferramenta sobre a peça. Nesse caso o grão abrasivo solto não pode mais rolar sobre a superfície da peça, deixando sulcos finos sobre a superfície (KLOCKE, 2009).

Os outros dois princípios são encontrados em aplicações com grãos abrasivos não ligados. No caso do princípio de posição, a distância entre a peça e a ferramenta é mantida constante, de modo que o grão rola sobre a superfície devido ao movimento relativo entre peça e ferramenta. Durante esse movimento os grãos são constantemente atritados sobre a superfície, gerando uma série de pequenas e consecutivas crateras, alisando e endurecendo a superfície. Para Martin (1975 apud KLOCKE, 2009), a sobreposição dos efeitos gerados pelo rolamento dos grãos acaba fadigando a superfície da peça, causando a remoção de material.

O último princípio de remoção é o de energia, que remove material pela transferência de uma grande quantidade de energia cinética concedida ao grão abrasivo para a superfície da peça sendo usinadas. Um exemplo é o processo de jateamento abrasivo, no qual partículas abrasivas colidem sobre a superfície da peça formando crateras. A deformação plástica gerada na formação dessas crateras aumenta a dureza da superfície, porém, torna a mesma quebradiça, permitindo, dessa forma, a remoção de material (KLOCKE, 2009).

A formação do cavaco na usinagem abrasiva ocorre através da utilização de um dos princípios citados anteriormente, para cada qual está associado um tipo de desgaste abrasivo e, obviamente, os mecanismos de remoção. Uma das maneiras mais fáceis de explicar a formação do cavaco é a análise do comportamento observado durante o princípio de trajetória, para materiais dúcteis, representado na Figura 6, a seguir.

Figura 6 - Processo de remoção em materiais dúcteis



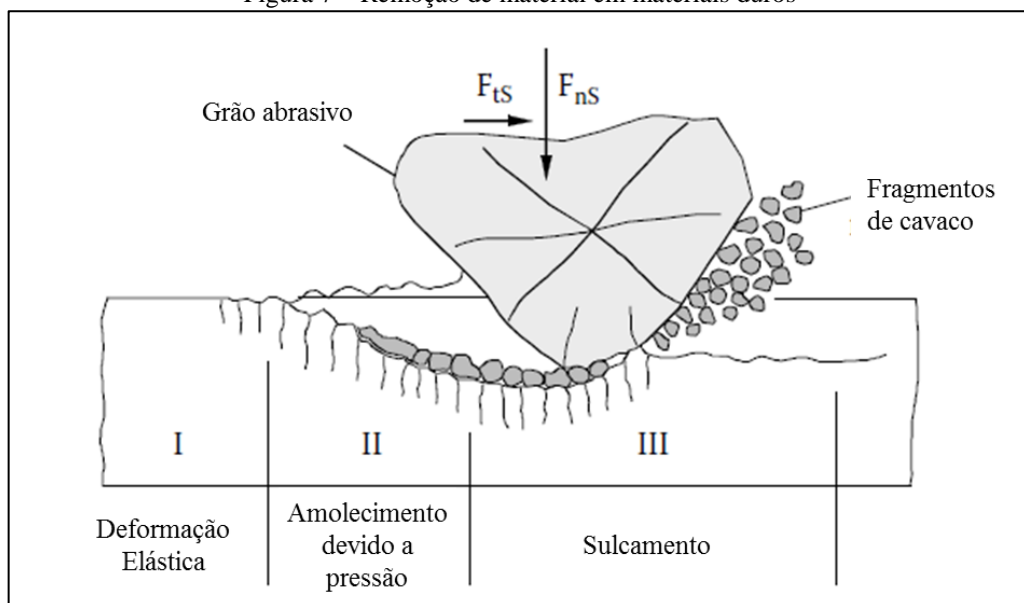
Fonte: Adaptado de Koning e Klocke (1996, apud MARINESCU et al., 2007).

Na zona I observa-se apenas deformação elástica do material, sendo que apenas na zona II tem-se o início da deformação plástica. Devido à forma do gume do grão abrasivo, o ângulo formado entre este e a peça, inicialmente, é muito pequeno, resultando na não formação de cavaco. Dessa forma, o material é apenas empurrado para as laterais do caminho, formando elevações na lateral do mesmo (conforme Marinescu et al., 2007, microsulcamento) (KLOCKE, 2009). Somente se o gume do grão penetrar a uma profundidade h_{cu} , na qual a espessura do cavaco não deformado for igual à espessura crítica de corte T_{μ} , ocorrerá o início da formação do cavaco (mecanismo de microformação de cavaco). Após o início, a formação de cavaco ocorre simultaneamente como deslocamento de

material para as laterais do sulco formado. Dessa forma, é crucial, para a eficiência do processo, conhecer quanto da espessura de material afetada pela passagem do grão (h_{cu}) é removida na forma de cavaco e qual é a espessura efetiva do cavaco $h_{cu\,eff}$. O processo de formação de cavaco está representado na etapa III da Figura 6 (MARINESCU et al., 2007).

No caso de materiais duros e frágeis, o comportamento durante a remoção de material apresenta algumas diferenças em relação ao descrito para materiais dúcteis, uma vez que a remoção ocorre predominantemente através de indução de trincas, caracterizando a remoção por fratura frágil (MARINESCU et al., 2007). A formação do cavaco nessas condições é apresentada na Figura 7. Assim como nos materiais dúcteis, deformações elastoplásticas também estão presentes, porém em menores proporções, devido à baixa ductilidade dos materiais frágeis e ou muito duros. Bifano et al. (1987 apud MARINESCU et al., 2007) e Komanduri e Ramamohan (1994 apud MARINESCU et al., 2007) comentam que esse comportamento pode ser derivado do pressuposto de que, abaixo de um limite de espessura do cavaco, a energia convertida é insuficiente para a formação de uma trinca superficial e acaba sendo convertida em deformação plástica. Esse limite é definido pela tensão máxima suportada pelo material.

Figura 7 – Remoção de material em materiais duros



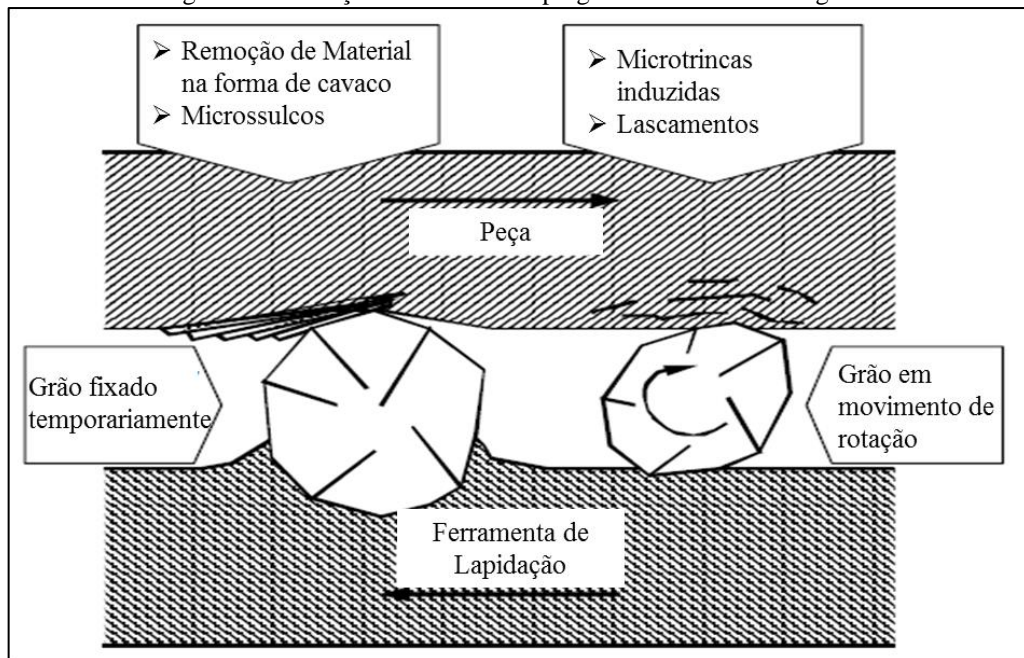
Fonte: Saljé e Moehlen (1987, apud MARINESCU et al., 2007).

A transição do comportamento elastoplástico para a fratura frágil está relacionada com a espessura de material afetada pela passagem do grão. Essa espessura é influenciada pela geometria do gume e pelo material da peça. Maiores raios de gume dos grãos favorecem

a deformação elastoplástica e aumentam a profundidade limite necessária para que ocorra a transição de deformação elastoplástica para fratura frágil. Dessa forma, maiores raios de gume necessitam de uma maior interferência entre o grão e a peça, para que ocorra a fratura frágil. Como consequência, tensões de contato de Hertz ocorrem abaixo do gume, dificultando a formação de trincas (MARINESCU et al., 2007).

A remoção de material na utilização de abrasivos não ligados é demonstrada na Figura 8. De acordo com o que foi apresentado sobre desgaste abrasivo de três corpos, existem grãos que assumem comportamento de remoção abrasiva por dois corpos. O comportamento dos abrasivos não ligados é descrito por Simpfendörfer (1988, apud KLOCKE, 2009) para o processo de lapidação. Os grãos não ligados executam um movimento cicloidal no qual os diversos gumes penetram a superfície da peça constantemente. Em materiais dúcteis, ocorre a deformação plástica até a ocorrência da remoção por fadiga. Já em materiais frágeis e duros, são geradas trincas através do contato dos grãos com a superfície que, ao se propagarem, provocam a fratura do material e assim sua remoção.

Figura 8 – Remoção de material empregando abrasivos não ligados



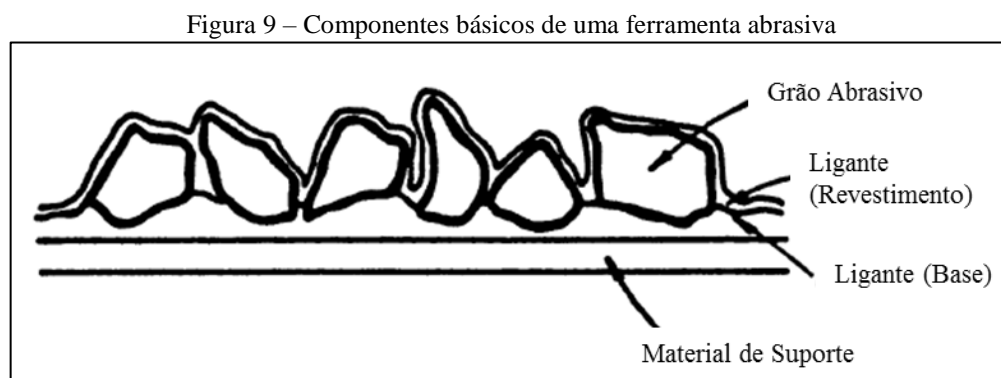
Fonte: Adaptado de Klocke (2009).

O comportamento descrito na Figura 8 está relacionado à atuação de um único grão. No entanto, em um processo real de remoção, existe a sobreposição dos efeitos de remoção gerados por cada grão abrasivo. Dessa forma, devido ao grande número de grãos atuando

sobre o componente trabalhado, a remoção de material é a soma da quantidade de cavaco removida por cada grão individualmente (KLOCKE, 2009).

2.3.2 Ferramenta abrasiva revestida

Os principais elementos que compõem uma ferramenta de abrasivos revestidos são material de suporte, ligante e grão abrasivo (KING; HAHN, 1986). A Figura 9 apresenta os componentes básicos de uma ferramenta revestida.



Fonte: Adaptado de King e Hahn (1986)

O material de suporte tem a função de transportar o abrasivo sem deformar ou romper mediante os esforços aplicados. Pode ser feito de papel, filmes plásticos, fibra vulcanizada e pano, e em várias aplicações devem ser à prova d'água (KING; HAHN, 1986).

A função do ligante é unir os grãos entre si e ao suporte a ser revestido (KLOCKE, 2009; MARINESCU et al., 2012). Segundo Klocke (2009), os principais ligantes para abrasivos revestidos são cola, resinas sintéticas e vernizes. Ainda segundo ele, primeiro é depositada uma camada base sobre o material de suporte, onde serão acomodados os abrasivos. Após a deposição dos abrasivos, os mesmos serão revestidos por mais uma camada de ligante que pode ser composta por um ligante diferente do ligante de base.

Os últimos componentes, os grãos abrasivos, são as ferramentas utilizadas para a remoção de material. Entre os principais fatores na escolha do grão abrasivo encontram-se o tamanho, a geometria e o material do grão. Grãos mais finos são utilizados para processos que necessitam de um melhor acabamento (KING; HAHN, 1986). Com relação à geometria, estudos como o de Rasim et al. (2015) apontam a importância dos ângulos dos grãos nas forças geradas durante o processo e na remoção de material. Apesar da importância, a determinação da geometria não é trivial e é feita de forma estatística, uma vez que é

praticamente impossível garantir que todos os grãos apresentem a mesma forma e a mesma posição (KLOCKE, 2009; MARINESCU et al., 2007). Por fim, os materiais mais utilizados como abrasivos são o Carbetto de Silício (SiC) e o Óxido de Alumínio (Al_2O_3). Em alguns casos especiais, outros tipos de abrasivos podem ser utilizados, como o *Zircon corindun*, utilizado na remoção de grandes quantidades de material e na usinagem de aços (DENNIS, 1989 apud KLOCKE, 2009).

2.3.3 Ferramental na usinagem com abrasivos não ligados

Na usinagem com abrasivos livres, o ferramental é composto por ferramenta, composto e grãos abrasivos. A ferramenta varia e depende do processo. Panos utilizados no processo de *buffing* (OBERG, 2012), almofadas para o polimento, e ferramentas rígidas na lapidação, com formato da geometria desejada à superfície da peça, são exemplos de ferramentas utilizadas em processos com abrasivos não ligados (MARINESCU et al., 2006).

Diferentemente do que ocorre nos processos com abrasivos ligados ou revestidos, nos processos que empregam abrasivos soltos, como polimento e lapidação, o abrasivo é adicionado na forma de um composto, no qual os abrasivos estão contidos num meio ou num ligante. (MARINESCU et al., 2012). De acordo com Sax (2007), o composto pode ser encontrado na forma sólida ou pastosa, e sua função é suspender e transportar os abrasivos livres dispersos neste material. De acordo com Dickman (2007), o material do composto pode ser dividido em compostos com ou sem a adição de graxa. A graxa utilizada pode ser de origem animal, vegetal, ou mineral. Os compostos que não apresentam gordura são, em sua grande maioria, compostos por água, cola e abrasivos. Durante a usinagem, esses grãos livres devem ser aderidos à ferramenta pelo composto (MARINESCU et al., 2012). Os materiais mais comuns são a estearina, ácido oleico, parafina, gorduras, ceras e pastas à base de petróleo (SAX, 2007).

As características de importância do grão abrasivo na usinagem com abrasivos não ligados são praticamente as mesmas dos processos com ferramentas que utilizam revestimento abrasivo. As principais diferenças são o tamanho do grão, que, para o polimento e lapidação, apresentam dimensões na faixa de um micrometro e até inferior (MARINESCU et al., 2006), e o material, que, além dos utilizados no polimento com ferramentas revestidas, também são frequentemente utilizados diamante, nitreto de boro cúbico (CBN), óxido de ferro, óxido de cromo, entre outros (MARINESCU et al., 2012).

2.4 POLIMENTO POR RODAS FLAP

O polimento realizado com rodas flap se encaixa na categoria de polimento com ferramentas flexíveis. Esse tipo de ferramenta abrasiva é capaz de mudar sua forma de maneira a se adequar à superfície da peça a ser trabalhada (SLĂTINEANU et al., 2010). De acordo com a ASM (1994), as rodas flap podem ser usadas com abrasivos ligados, para o processo de polimento, ou recoberto com vários tipos de materiais, para o *buffing*. Sua construção básica consiste em um cubo metálico que contém tiras de abrasivos ligados ou tiras específicas para *buffing*. No perímetro externo da roda, existem encaixes específicos para a colocação dessas tiras. Os cubos podem ser recarregáveis ou descartáveis. Um Exemplo de rodas flap é apresentado na Figura 10

Figura 10 – Exemplo de Roda flap

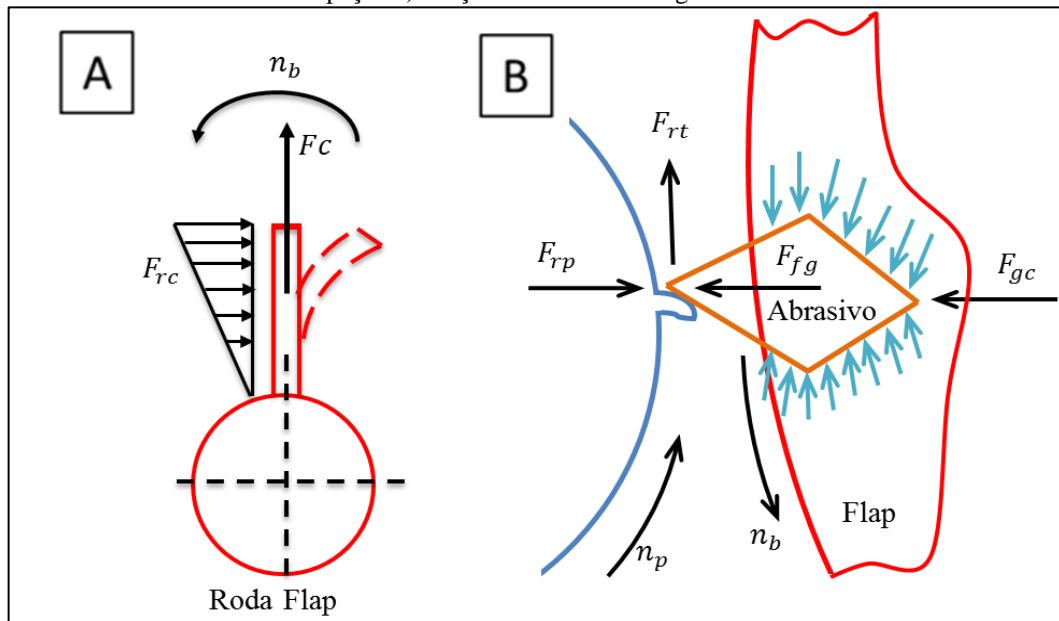


Fonte: <http://www.lojachimas.com/RODA-DE-LIXA-PG-50x150MM--50-MARROM-FURO-4-5CM-POLIKONTOUR-FLAP/prod-1882500/>

A remoção de material ocorre de forma uniforme desde o momento em que a roda é colocada em contato com a peça até seu total desgaste. Isso se deve ao fato de que, à medida em que ocorre o desgaste do flap, novos grãos ficam expostos e entram em contato com a peça (ASM, 1994). Segundo Slătineanu et al. (2010), os grãos são fixados nas tiras, que podem ser de tecido ou papel, por uma cola resistente, porém flexível. O grão deve ser escolhido de forma que a remoção gerada por ele seja capaz de diminuir a rugosidade apresentada pela peça antes do processo, de acordo com as exigências de projeto.

As forças que atuam no processo de polimento por rodas flap podem ser divididas em forças que atuam sobre os flaps e forças que atuam sobre os grãos, conforme mostra a Figura 11, a seguir. Quando a roda flap é colocada em movimento, surge uma força de arrasto devido ao deslocamento de ar (F_{rc}), que atua sobre as tiras flexíveis. Essa força gera uma deformação elástica no flap, antes mesmo de este entrar em contato com a peça. Outra força que resulta do movimento de rotação da roda flap é a força centrífuga (F_c), que atua sobre o flap de maneira radial ao eixo de giro da ferramenta, resultando na tração do flap. As forças descritas são apresentadas na Figura 11 A, a seguir.

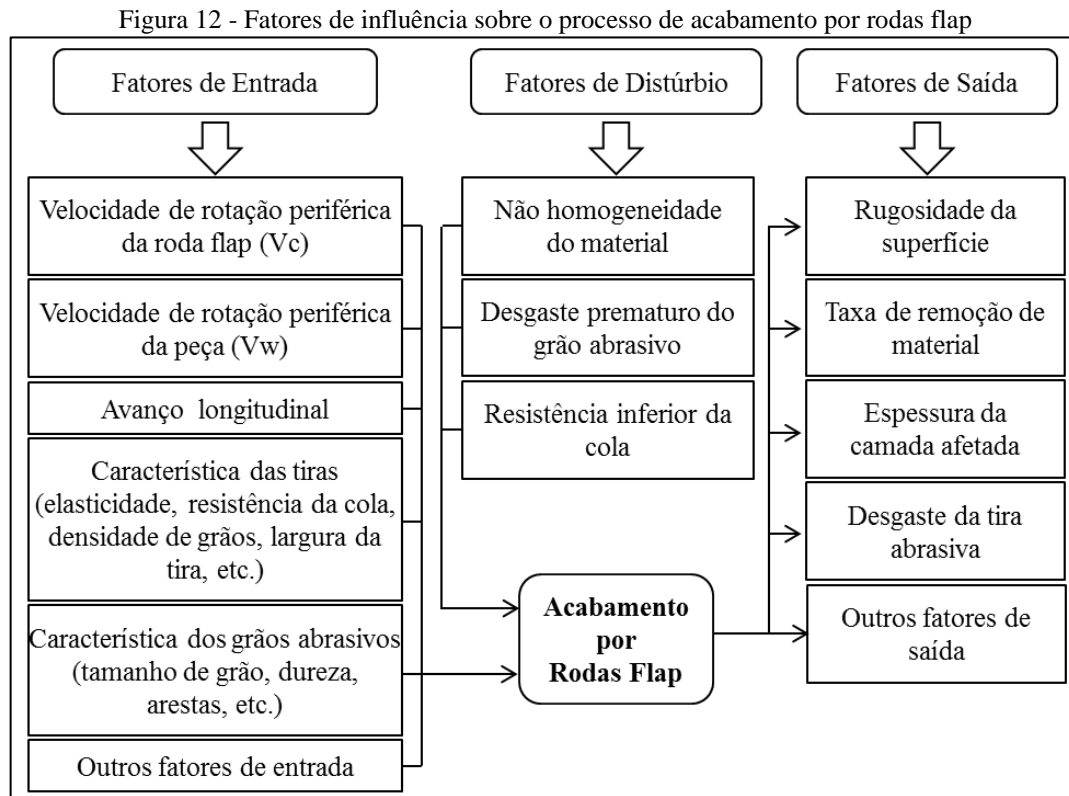
Figura 11 – Forças atuando no processo de polimento por flap wheels. A) Forças atuando sem o contato da roda com a peça. B) Forças atuando sobre o grão abrasivo



Fonte: Adaptado de Slătineanu et al. (2010).

O grão abrasivo, por sua vez, também é submetido a uma força centrífuga (F_{gc}), resultante do movimento das massas somadas dos grãos abrasivos e do flap, que apresenta direção sempre radial ao eixo da roda. Existe também uma força exercida pelo flap sobre o grão (F_{fg}), que resulta no movimento tangencial do mesmo sobre a superfície trabalhada. Por fim, a resistência à força de penetração, exercida pela peça sobre o grão, ocasiona o surgimento de duas forças, uma perpendicular à trajetória do grão (F_{rp}) e outra tangencial à trajetória (F_{rt}), mas em sentido oposto ao deslocamento. As forças que atuam sobre cada grão abrasivo estão representadas na Figura 11 B (SLĂTINEANU et al., 2010). Na figura, n_b e n_p indicam o sentido de rotação do grão e da peça, respectivamente.

Slătineanu et al. (2010) apresentam os principais fatores de influência sobre o processo de acabamento por rodas flap, representados na Figura 12. Esses fatores podem ser divididos em fatores de entrada, de distúrbios e fatores de saída.

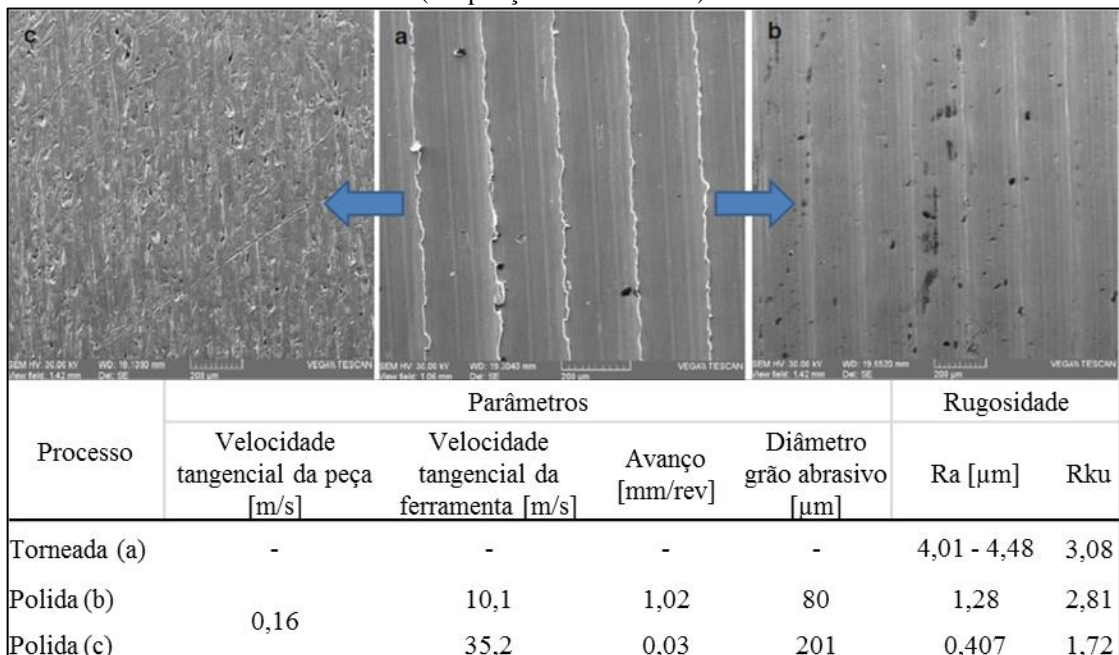


Fonte: Adaptado de Slătineanu et al. (2010, apud ZEILMANN et al., 2015).

Os fatores de entrada podem ser intencionalmente alterados de maneira a modificar as características do processo e da superfície gerada. Entre os mais importantes destacam-se a velocidade de rotação da roda flap, a velocidade do avanço longitudinal, a área de contato entre ferramenta e peça, características físicas e químicas dos grãos abrasivos e das tiras abrasivas. Os distúrbios, por sua vez, são fatores de difícil controle, que podem alterar involuntariamente a qualidade do produto final. Encaixam-se neste ponto imperfeições e não homogeneidade do material da peça, desgaste e remoção prematura dos grãos abrasivos e redução da resistência do material ligante durante o processo. Tanto os fatores de entrada como os distúrbios são fatores que influenciam no resultado do processo. Os fatores de saída consistem no produto gerado pela soma dos outros dois fatores. Slătineanu et al. (2010) apresentam como fatores de saída fatores de interesse do processo, como a rugosidade resultante, principal motivo pela utilização do processo, e a taxa de remoção de material e outros adversos, como a geração de camada afetada e desgaste da roda flap.

Slătineanu et al. (2010) realizaram um estudo aprofundado sobre o processo de polimento com rodas flap em superfícies cilíndricas, incluindo modelagem matemática e ensaios experimentais. As superfícies geradas através do ensaio experimental, assim como os parâmetros utilizados, estão representadas na Figura 13. As superfícies foram geradas em um único passe e apresentam Ra inferior ao apresentado antes da realização do processo.

Figura 13 – Superfícies geradas pelo processo de polimento com rodas flap a partir de uma superfície torneada. (Ampliação de 200 vezes.)



Fonte: Adaptado de Slătineanu et al. (2010).

O referido estudo mostra que a ordem de grandeza da rugosidade Ra resultante do processo pode ser modificada através da alteração de parâmetros como velocidade tangencial da roda flap, tamanho de grão do abrasivo, velocidade de rotação da peça e avanço longitudinal da mesma, nessa ordem. O efeito de cada parâmetro sobre a rugosidade Ra está representado no Quadro 1. O aumento da velocidade tangencial da roda flap ocasiona a redução de Ra, enquanto o aumento do tamanho da partícula abrasiva, da rotação da peça e do avanço longitudinal ocasiona o aumento de Ra.

Quadro 1 – Efeito do aumento dos parâmetros sobre a rugosidade Ra

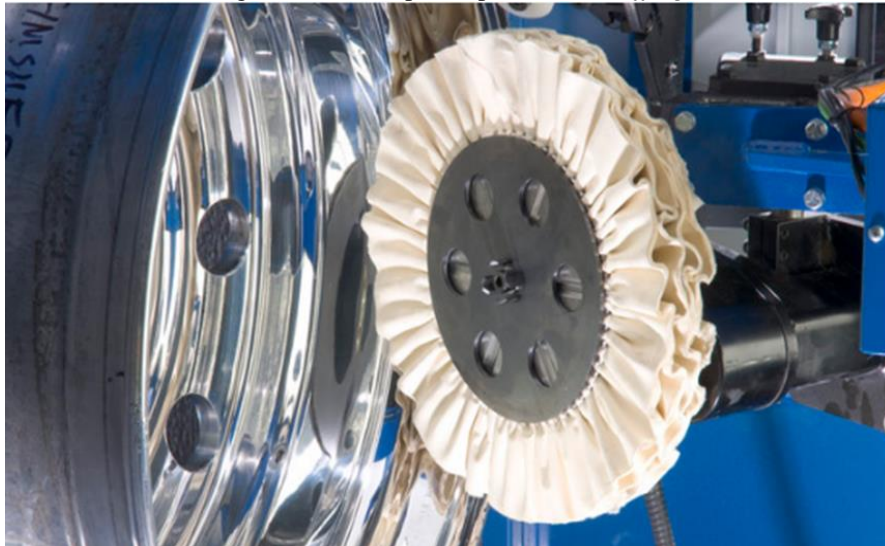
Parâmetro aumentado	Velocidade tangencial da roda flap	Tamanho da partícula abrasiva	Rotação da peça	Avanço longitudinal
Efeito na rugosidade [Ra]	↓	↑	↑	↑

Fonte: O autor.

2.5 BUFFING

Buffing é um processo de acabamento empregado para conceder características finais à superfície da peça. O mesmo também é utilizado para condicionar superfícies geradas através de outros métodos de fabricação, como fundição, usinagem com ferramentas de geometria definida e conformação, para posteriores tratamentos superficiais, como cromagem e pintura (SAX, 2007; ASM, 1994). A ASM (1994) apresenta o polimento e o *buffing* como processos dedicados a melhorar as condições de arestas e da superfície de uma peça trabalhada, para fins decorativos e funcionais. Segundo a mesma, a superfície lisa e refletiva gerada pelo processo é consequência do rearranjo e refinamento das marcas de abrasão, que pode ocorrer até escalas microscópicas. A Figura 14 exemplifica o processo de *buffing*.

Figura 14 – Exemplo de processo de *buffing*



Fonte: <http://www.nepean.com/transport/products-services/vis-polish/robotic-aluminium-wheel-polishing-machine>

Dickman (1995) alerta que não se deve confundir polimento com *buffing*, pois, para o autor, *buffing* é um processo posterior ao polimento. Enquanto a principal função do polimento é alisar a superfície através da remoção de material, o *buffing* visa conceder um determinado acabamento, que pode variar de semi-brilhante a espelhado brilhante ou lustroso. Oberg (2012) acrescenta que o processo de *buffing* utiliza grãos abrasivos livres, enquanto o polimento convencional utiliza grãos abrasivos ligados.

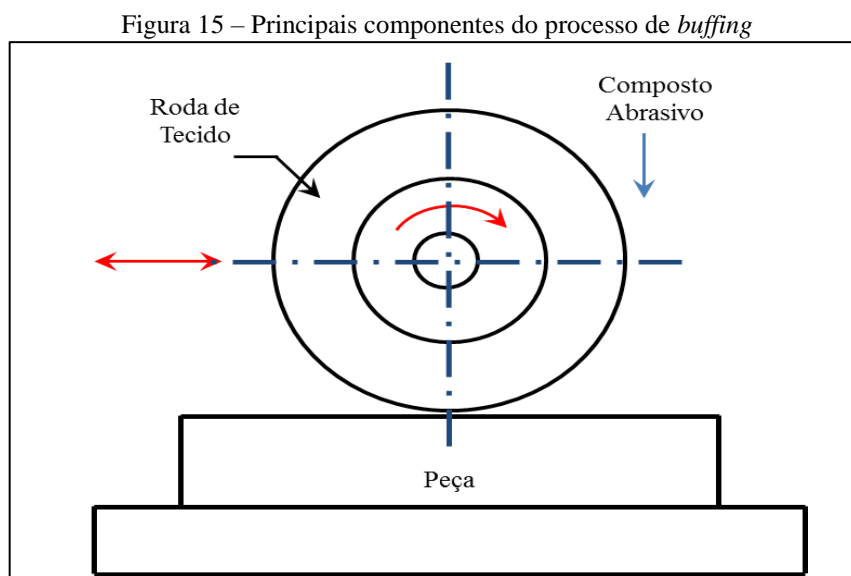
Para Sax (2007), o objetivo do *buffing* não é remover uma grande quantidade de metal, mas sim gerar uma superfície lisa, livre de defeitos. Para que isso seja possível, riscos

profundos e outras marcas mais severas devem ser removidos antes do *buffing*, através do polimento com rodas de polimento ou cintas abrasivas.

De acordo com Dickman e Millman (1995), o processo de *buffing* pode ser classificado em quatro categorias básicas: acabamento acetinado (*satin finishing*), *buffing* de alisamento (*cutdown buffing*), *buffing* semi-lustroso (*cut-and-color buffing*) e *buffing* lustroso (*luster buffing* ou *color buffing*). O acabamento acetinado produz uma superfície acetinada, com linhas direcionais, podendo apresentar um aspecto escovado. O *buffing* de alisamento produz um início de alisamento da superfície, enquanto o *buffing* semi-lustroso produz um aspecto lustroso intermediário. Por fim, o *buffing* lustroso produz uma superfície refletiva ou espelhada.

O *buffing* pode ocorrer de maneira manual ou semiautomática. A operação manual é um trabalho demorado, empregado para superfícies complexas, sendo possível trabalhar toda a superfície de interesse. Ao trabalhar com geometrias mais simples, processos semiautomáticos podem ser empregados. Para obter bons resultados em termos de qualidade e custos, é interessante que a peça seja projetada tendo em mente o processo de *buffing* para o acabamento (DE GARMO et al., 2011).

No processo de *buffing*, a peça é colocada em contato direto com uma ferramenta rotativa, impregnada por um composto adequado ao tipo de operação, capaz de remover material até produzir, com precisão, uma superfície lisa, brilhante e lustrosa (ASM, 1994; DE GARMO et al., 2011). Os principais componentes do processo de *buffing* são apresentados na Figura 15. O processo consiste basicamente em ferramenta, peça e adição do material abrasivo.



Fonte: Adaptado de El-hofy e Hassan (2014).

As ferramentas são rodas de tecido (ou rodas de *buffing*), compostas de discos, inteiros ou costurados, de diversos tipos de materiais (ver Quadro 2 para uma descrição mais detalhada), cuja função é carregar composto abrasivo (OBERG, 2012). Segundo Sax (2007), os tecidos usados no *buffing* são designados pela contagem de fios e pelo peso do tecido: tecidos com baixa contagem de fios e feitos de materiais mais leves são utilizados para a usinagem de metais macios, plásticos e para acabamento lustroso final; tecidos mais densos, pesados e materiais mais rígidos são utilizados na remoção de material e de defeitos superficiais.

Quadro 2 – Materiais comumente utilizados para a fabricação de panos de *buffing*

Material	Características
100% Algodão*	Quebra naturalmente quando submetido à pressão e abrasão. Apresenta uma superfície renovável, macia e maleável. Boa capacidade de absorção, sendo capaz de reter tanto tratamento como compostos. Boa resiliência, conformando-se adequadamente às formas da superfície. Não deixa resíduo.
Poliéster/Algodão (normalmente 50/50)*	Poliéster sinteticamente misturado com algodão para formar cada fio. Boa resistência ao desgaste, apresentando longa vida útil, resiliência e tenacidade. Propriedades de absorção não tão boas quanto as do algodão. Mais suscetível ao calor e amolecimento.
Sisal*	Bastante agressivo. Pouca capacidade de absorção.
Pano e sisal*	Camadas intercaladas de sisal e pano. Melhor absorção devido ao algodão. Menos marcas de abrasão do que o sisal puro.
Flanela**	Pode ser no estilo Dornet e Canton. Utilizado para produzir um brilho lustroso onde os outros panos falham. Usado principalmente em joias.
Tecidos de lã**	Utilizados em plásticos, prata e materiais macios.
Couro de ovelha**	Usados para evitar riscos ou borrões em ligas com chumbo.
Couro de ovelha curtido com vegetais**	Usado para operações mais agressivas.
Couro de ovelha curtido com alumínio**	Utilizado para <i>buffing</i> lustroso.
Fibras sintéticas**	Utilizadas devido à sua resistência à água. Baixas velocidades, na faixa de 762 m/min.

Fonte: *Nelson (1996), ** Sax (2007).

Além do material, outro fator de influência no resultado do processo de *buffing* é a forma de construção da roda. O pano deve ser construído de forma a ser capaz de prover um bom contato com a peça, de contornar formas e ter uma boa flexibilidade e resiliência para regressar à forma original (ASM, 1994; NELSON, 1996). A ferramenta deve ser capaz de envolver a peça de maneira a utilizar sempre a periferia da roda. Sua flexibilidade e capacidade de contornar superfícies devem permanecer relativamente constantes até o desgaste total do pano (NELSON, 1996).

Os discos para *buffing* podem ser construídos nas formas sem costura, com costura, panos trabalhados (*bias-type buff*), panos franzidos e panos flap (SAX, 2007). A construção sem costura é utilizada para lustrar e permite um desgaste mais homogêneo, no entanto, o uso pode levar ao desfiar do pano, resultando em maior desgaste, maior consumo de abrasivo e a um acabamento indesejado. Nesses casos, a força centrífuga gerada devido à rotação é a responsável por manter as camadas na posição, tornando a roda coesa (DE GARMO et al., 2011; SAX, 2007). As rodas com costura são utilizadas para operações em condições mais severas, onde é exigido uma maior remoção de material. Quanto mais próximas forem as costuras, materiais mais duros podem ser trabalhados e imperfeições mais profundas podem ser removidas (SAX, 2007).

Outras formas de construção das rodas de *buffing* apresentam uma construção mais elaborada. Os panos trabalhados combinam flexibilidade e poder de remoção. Além disso, são autoventilados, o que permite trabalhar com baixas temperaturas e os torna resistentes a chamas. São bastante utilizados para *buffing* de alisamento e lustroso, e apresentam uma boa adaptação a formas variadas. O pano trabalhado mais comum é a roda ventilada, projetado para garantir que o aquecimento da zona de corte seja o menor possível. Os panos franzidos, por sua vez, são construídos de diversas formas para diferentes aplicações, no entanto, todos apresentam como característica a formação de uma periferia de roda corrugada e franjada (SAX, 2007). Por fim, os panos flap foram desenvolvidos para o polimento e *buffing* de para-choques, são suaves e podem ser compostos de abrasivos revestidos (rodas flap, ver capítulo anterior), sisal, tecido e combinações destes.

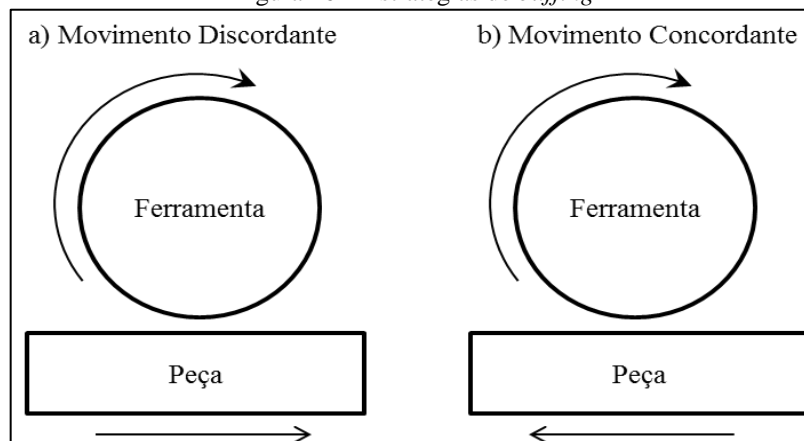
Associado com o uso de panos de *buffing*, o processo utiliza abrasivos ou compostos abrasivos que aderem à superfície da ferramenta (ASM, 1994). As principais características dos abrasivos para processos que utilizam abrasivos livres foram comentadas na seção 2.3, anteriormente. As aplicações mais comuns dos diversos tipos de abrasivos no *buffing* são apresentadas no Quadro 3. De acordo com El-Hofy e Hassan (2014), o composto abrasivo pode ser aplicado na forma de barra ou na forma de um jato.

Quadro 3 – Tipos de abrasivos utilizados no *buffing*

Tipo de Abrasivos	Simbologia	Escala de Mohs	Descrição
Óxido de alumínio (fundido)	Al ₂ O ₃	8.9+	Para metais duros. Utilizado para operações <i>cutting down</i> .
Óxido de alumínio (calcinado)	Al ₂ O ₃	8.9+	Para metais duros. Utilizado para processo de <i>buffing</i> lustroso o <i>color buffing</i> .
Tripoli-Sílica	SiO ₃	7	Utilizado para operações de <i>buffing</i> mais severas e operações de <i>cut-and-color</i> para alumínio, latão cobre e zinco. Perigoso à saúde.
Carbeto de Silício	SiC	9.6	Mais duro que o óxido de alumínio.
Óxido de Ferro	Fe ₂ O ₃	6	Utilizado em metais preciosos para acabamento de alta lustrosidade.
Óxido de Cromo	Cr ₂ O ₃	8.9	Usado para obter outra lustrosidade em materiais ferrosos e não ferrosos.

Fonte: Adaptado de Dickman (2007).

Além do ferramental adequado para cada tipo de operação, a estratégia adotada é fundamental para a obtenção do resultado desejado. De acordo com um informativo da Caswell Plating, existem dois tipos básicos de estratégias de movimentação para o *buffing*, apresentados na Figura 16. O movimento discordante, Figura 16a, é conhecido como movimento de corte (*cut motion*). Essa estratégia é utilizada para produzir superfícies lisas, semi-brilhantes e uniformes. Nesse tipo de estratégia, uma pressão média a pesada deve ser utilizada. O movimento concordante, Figura 16b, é conhecido como movimento de lustrar (*color motion*), e proporciona uma superfície brilhante e limpa. A pressão utilizada é de media a leve.

Figura 16 – Estratégias de *buffing*

Fonte: Adaptado de Caswell Plating.

A estratégia adequada a cada situação deve ser utilizada em conjunto com parâmetros adequados de processo. Entre os principais parâmetros, destacam-se a pressão de

contato, a velocidade de rotação, o ângulo de posicionamento da roda e o tempo de contato (NELSON, 1996). Algumas recomendações de parâmetros para diversas categorias de *buffing* estão mostradas a seguir, no Quadro 4.

Quadro 4 - Parâmetros recomendados para diversos tipos de *buffing*

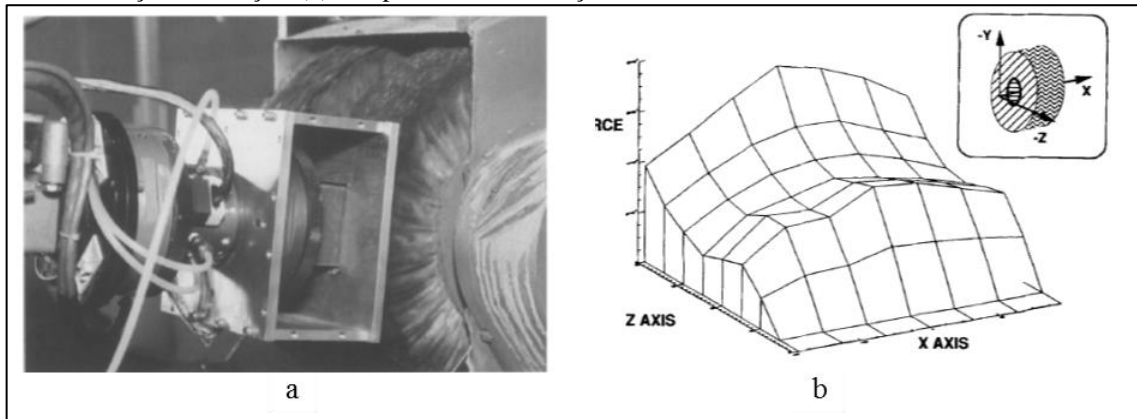
Material	Acabamento Acetinado	<i>Buffing</i> de alisamento	Operações de lustre
Aço carbono e aço inox	Carbeto de silício ou óxido de alumínio com composto <i>greaseless</i> . Rodas <i>Loose</i> ou ventiladas. Velocidades entre 22,8 a 33,0 m/s.	Composto de tripoli em barras ou líquido. Rodas soltas, ventiladas ou costuradas.	Compostos em barra ou líquidos de óxido de cromo verde e/ou óxido de alumínio não fundido. Rodas soltas ou ventiladas. Velocidades entre 8000 a 10000 sfm.

Fonte: Adaptado de Dickman (2007).

Outro fator de importância é a pressão de contato, que deve ser escolhida adequadamente, para conceder o melhor acabamento de maneira econômica e segura. Uma pressão insuficiente tornará o processo ineficiente. Por outro lado, uma pressão excessiva pode resultar em queima da superfície, assim como em redução da velocidade ou colapso da ferramenta (CASWELL PLATING). Para que o pano de *buffing* mantenha uma pressão de contato constante sobre a peça, o mesmo deve apresentar uma densidade adequada. A maior parte das rodas de *buffing* tende a aumentar a densidade à medida que o desgaste aumenta. Estudos sobre o *buffing* de alisamento (*cut buffing*) mostram que uma maior pressão de contato proporciona uma maior taxa de remoção, porém, quanto maior a pressão, maior o aquecimento da peça, sendo este um fator limitante da magnitude da pressão a ser aplicada. Já no *color buffing* pressões menores são desejáveis, uma vez que geram uma superfície com menos riscos (NELSON, 1996).

Tarnoff et al. (1992) abordaram pontos específicos de diferentes formas de programação de robôs através da aplicação na programação off-line de uma estação de limpeza e rebarbação. Os autores analisaram o comportamento da força de contato de uma roda feita com panos de algodão com a finalidade obter uma forma de controle da força durante o processo, uma vez que erros no comprimento radial de interferência podem gerar acabamento indesejado e forças excessivas sobre a peça e a ferramenta. Os mesmos observaram aumento gradual da força à medida que o comprimento de interferência aumentava, na usinagem de uma peça plana. A configuração ferramenta/peça e o gráfico do comportamento de forças são mostrados na Figura 17.

Figura 17 - Medição e comportamento da força gerada devido à interferência de contato. (a) condição de medição das forças; (b) comportamento da força com o aumento da interferência de contato.



Fonte: Tarnoff et al. (1992).

A velocidade de rotação do pano pode ser considerada como sendo a velocidade de deslocamento de qualquer ponto da periferia do pano relativa à superfície da peça. Na medida em que a roda desgasta, gerando uma redução em seu diâmetro, a velocidade tangencial diminui. Essa redução deve ser considerada na escolha da ferramenta, de forma que o máximo desgaste seja alcançado ainda na faixa de velocidade adequada para a operação realizada. Caso contrário, a parte restante de material da ferramenta seria desperdiçada, aumentando custos (NELSON, 1996). Para aços, geralmente recomenda-se uma velocidade tangencial entre 8000 e 10000 sfm (40,6 e 50,8 m/s) para operações de alisamento e 3000 a 7500 sfm (15,2 a 38,1 m/s) para operações de lustre (*color buffing*).

Para as operações de alisamento, o ângulo de contato do pano com a peça pode ser crítico para a remoção dos riscos gerados pelo polimento anterior e outras não conformidades da superfície. De acordo com Nelson (1996), estudos mostraram que a existência de um ângulo de ataque em relação às marcas deixadas pelo processo anterior pode proporcionar melhor acabamento. Em um dos estudos citado por Nelson (1996), referente ao uso de *buffing* em superfícies planas de aço inoxidável, uma melhor remoção de riscos e marcas de oscilação da superfície foi obtida com a utilização de um ângulo de 15°, se comparada com 0° e 30°. Nas máquinas automáticas, nem sempre é possível especificar um ângulo de inclinação do pano, porém, através de rotação da peça ou de dispositivos de fixação específicos, esses ângulos podem ser simulados.

O tempo de usinagem é outro fator de relevância do processo: quanto maior o tempo de contato, maior o calor gerado (tendo como consequência maior temperatura na zona de corte) e maior o custo da operação. Muitas superfícies podem perder o aspecto polido gerado

pelo *buffing* se o tempo de atuação for muito longo, o que pode ocasionar uma rejeição da peça trabalhada (NELSON, 1996).

Não foram encontrados na literatura, até o presente momento, que analisem a integridade resultante da usinagem através do processo de *buffing*. Dessa forma, não é possível associar a influência dos parâmetros no resultado no acabamento da superfície. A Figura 18, a seguir, mostra uma superfície gerada pelo processo de *buffing*. Não são apresentados os parâmetros utilizados para a geração da mesma.

Figura 18 – Superfície obtida através do processo de *color buffing*



Fonte: Cutchin e Hammond-Green.

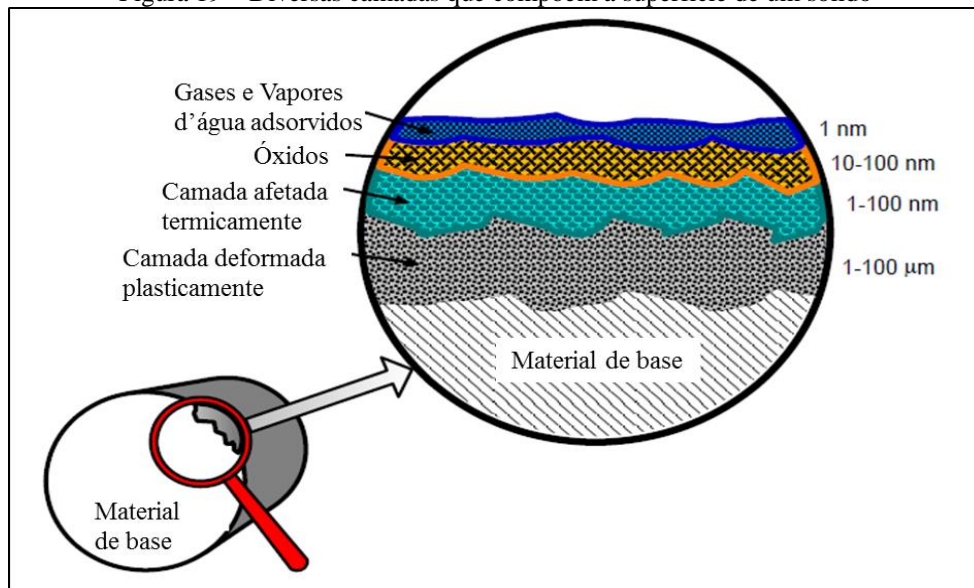
2.6 CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE

2.6.1 Composição de uma superfície e técnicas de avaliação

Existe uma infinidade de superfícies que podem ser obtidas através dos mais diversos processos de fabricação. As superfícies geradas pelos processos descritos anteriormente tendem a ser lisas e refletivas, no entanto, até superfícies que apresentem um aspecto liso e polido são compostas por várias camadas.

De maneira geral, a superfície é composta de uma camada mais externa, na qual materiais presentes no ambiente, como vapor d'água e hidrocarbonetos, são adsorvidos. Logo abaixo dessa camada existe uma camada composta por óxidos. Em seguida encontra-se uma camada resultante do derretimento e fluxo de material em virtude das temperaturas envolvidas. A última camada alterada, antes do material de base, é composta por deformações plásticas que resultam no aumento da dureza da mesma. Nem todas as camadas estão presentes em todas as superfícies, e seu surgimento depende do processo de fabricação empregado (DAVIM, 2010). As camadas são exemplificadas na Figura 19.

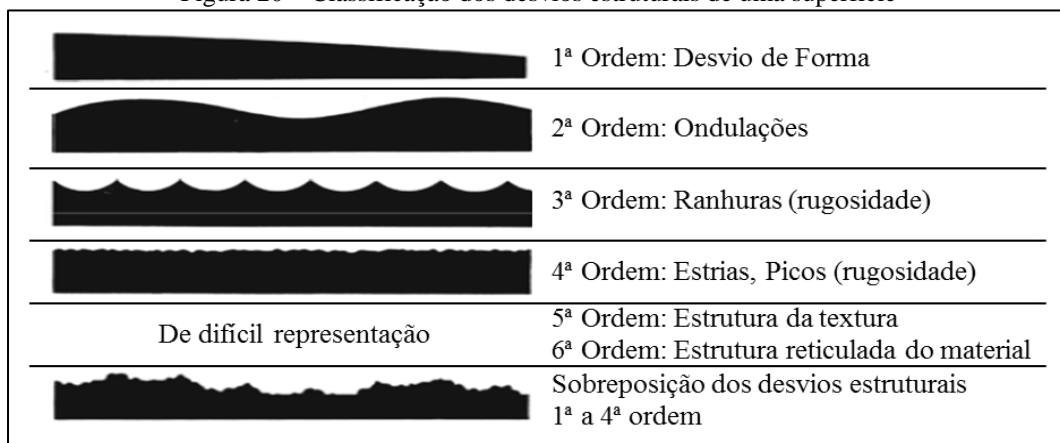
Figura 19 – Diversas camadas que compõem a superfície de um sólido



Fonte: Adaptado de Davim (2010).

Em termos de geometria, a superfície normalmente é dividida em macrogeometria e qualidade superficial. A macrogeometria é definida em termos de desvios de dimensão, forma e posição. A qualidade superficial é mensurada através de parâmetros de rugosidade (KLOCKE, 2009). Na Figura 20, é apresentada uma classificação genérica dos desvios estruturais que compõem a geometria de uma superfície.

Figura 20 – Classificação dos desvios estruturais de uma superfície



Fonte: Adaptado de (DIN EN ISO 4760/1982, apud KLOCKE, 2009).

De acordo com Klocke (2009), a superfície medida difere da superfície real, uma vez que os métodos de medição não são capazes de reproduzir com exatidão a superfície a ser medida. Para tentar minimizar essa diferença, inúmeras técnicas de avaliação de superfícies foram desenvolvidas ao longo dos anos. Algumas das técnicas utilizadas são apresentadas no Quadro 6 do Anexo A.

A primeira forma empregada para avaliar o acabamento de uma superfície consistia no simples passar de uma unha sobre a superfície, método de avaliação que persiste até hoje, através da comparação do toque da superfície com uma superfície padrão (BLUNT; JIANG, 2003).

Outra forma de avaliação de superfície antiga e ainda de larga aplicação é a inspeção visual. De acordo com Withehouse (2002), a maioria dos engenheiros e metalúrgicos está familiarizada com a aparência de uma superfície usinada, seja por inspeção visual a olho nu ou através de microscópio. Segundo o autor, dessa forma é possível obter informações sobre o padrão e espaçamento dos objetos de textura observados. Porém, as noções de profundidade, necessárias para as aplicações de engenharia, não são perceptíveis através do uso desse método.

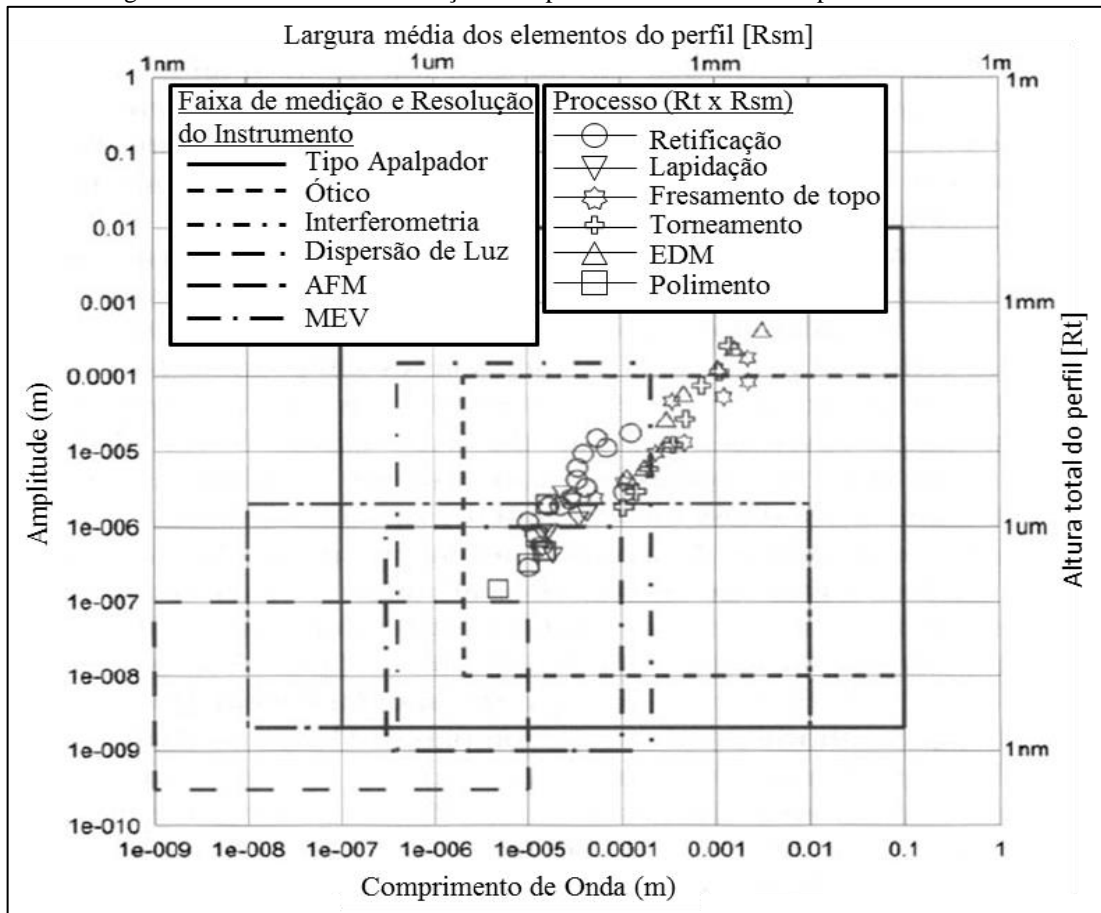
O uso de técnicas de inspeção qualitativa, de forma isolada, pode causar divergências sobre a real condição de uma superfície analisada. Entre suas diversas limitações estão as divergências em virtude de interpretações de diferentes avaliadores. Esse foi um dos motivos da necessidade de criar métodos que permitissem a caracterização de forma quantitativa de uma superfície. Uma das primeiras tentativas ocorreu através do uso de um perfilômetro tipo apalpador (medidor bidimensional). O método foi bem aceito e amplamente difundido, resultando no surgimento de várias normas, provenientes das mais diversas entidades, entre elas a ISO. Cada norma aborda seus próprios parâmetros de caracterização, com suas próprias definições e metodologia de cálculo (BLUNT; JIANG, 2003).

Juntamente com a evolução da engenharia nas últimas décadas, através do aumento da exigência de acabamentos e de tolerâncias dimensionais mais estreitas, cresceu a necessidade de relacionar a textura de uma peça à sua função. No entanto, a medição do perfil de rugosidade (rugosidade bidimensional) fornece pouca informação nesse sentido. A determinação da funcionalidade de uma superfície só pode ser obtida através da caracterização tridimensional da superfície (LEACH, 2011). As técnicas de avaliação de superfície em três dimensões são relativamente novas se comparadas às técnicas bidimensionais, e são regidas pela norma ISO 25178-2, que apresenta mais de 40 parâmetros superficiais utilizados para caracterização (FRANCO; SINATORA, 2015).

Na Figura 19, é apresentada a aplicabilidade de alguns instrumentos de avaliação para a análise de superfícies geradas por diversos processos de fabricação. Os instrumentos estão representados de acordo com seus alcances e resoluções, e os processos são apresentados conforme a qualidade da superfície gerada (função da altura total do perfil, R_t , e

da largura média dos elementos do perfil, R_{sm}). Para o processo de polimento são indicados, entre outros, o uso de perfilômetros do tipo apalpador, perfilômetros óticos e o uso de MEV.

Figura 21 – Técnicas de verificação de superfície de acordo com o processo utilizado



Fonte: Adaptado de Griffiths (2001).

2.6.2 Análise visual de textura

Apesar da existência de técnicas extremamente sofisticadas destinadas à caracterização de uma superfície, a análise da mesma através de microscopia ótica ainda é a mais utilizada. Normalmente consiste na primeira etapa de caracterização de uma superfície, usada principalmente para a seleção de áreas de interesse para uma análise mais detalhada por outros métodos de medição (BRUNE et al., 1997).

Uma das formas utilizadas para análise visual é a microscopia ótica, que pode ser de transmissão (utilizada para analisar seções de superfícies finas ou seções transparentes) ou de reflexão (utilizada em superfícies opacas). A microscopia ótica geralmente permite ampliações da ordem de 2000 vezes, com uma resolução na faixa do comprimento da onda da fonte de luz utilizada (em torno de 200 nm) (BRUNE et al., 1997).

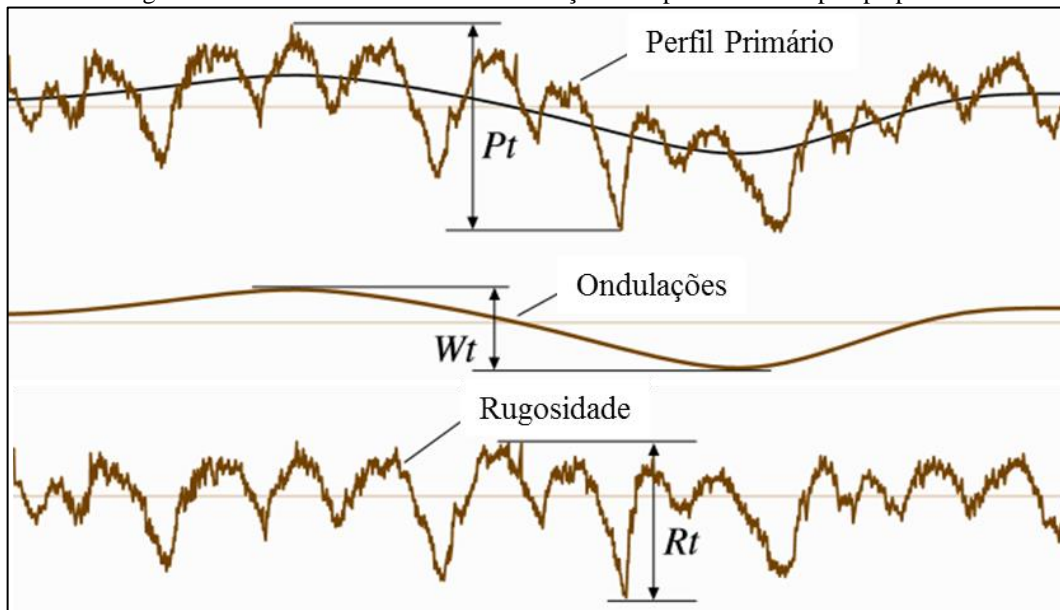
Outro método utilizado para a análise visual da textura da superfície é a microscopia eletrônica de varredura (MEV), que permite análises em escalas nanométricas a micrométricas. São comuns resoluções de 1 a 5 nm, podendo atingir valores menores. Uma característica importante dessa técnica é a grande profundidade de campo, responsável em parte pela aparência tridimensional das imagens. Neste tipo de análise, a área a ser examinada é irradiada com um fino feixe de elétrons, que varre a superfície da amostra para formar a imagem. A interação do feixe com a superfície acaba gerando vários tipos de sinais que são captados pelo aparelho. Entre os sinais gerados, os de maior interesse são os elétrons secundários e os elétrons refletidos, pois são fundamentalmente afetados pelas diferenças na superfície. O contraste gerado pela reflexão dos elétrons, associado com o efeito de suavização das sombras causado pelos elétrons secundários e o efeito de profundidade de campo compõem o efeito tridimensional das micrografias obtidas por MEV (GOLDSTEIN et al., 2003). Uma versão mais poderosa do MEV é a microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo (MEV-EC). De acordo com Gnanamoorthy et al. (2014), o MEV-EC apresenta vantagens significativas, como maior resolução de foco e capacidade de medir estruturas e propriedades micromecânicas.

2.6.3 Perfilômetro tipo apalpador

O instrumento mais utilizado para a medição de rugosidade bidimensional é o perfilômetro do tipo apalpador. O mesmo apresenta alta versatilidade e pode ser usado em praticamente todos os tipos de itens. Também pode ser adaptado a vários tipos de equipamentos, como máquinas de comando numérico computadorizado (CNC) para a medição de geometrias complexas. Um perfilômetro tipo apalpador apresenta alto grau de precisão, robustez e fácil manuseio (CZICHOS et al., 2011).

Nesse tipo de instrumento, o estilete é a parte do sistema que toca e percorre a superfície, deslizando sobre a superfície a uma velocidade constante. O sinal mecânico obtido é transformado em sinal elétrico por um transdutor. Uma vez em que o estile percorre a superfície, o sinal gerado terá a forma do perfil desta. A *International Organization for Standardization* (ISO) opera com três diferentes tipos de sinal que podem ser separados do perfil da superfície através do processo de filtragem dos dados: o perfil primário (*P-profile*), ondulações (*W-profile*) e rugosidade (*R-profile*). Os mesmos estão exemplificados na Figura 20. (CZICHOS et al., 2011).

Figura 22 - Perfis obtidos através da medição com perfilômetro tipo apalpador



Fonte: Adaptado de Czichos et al. (2011).

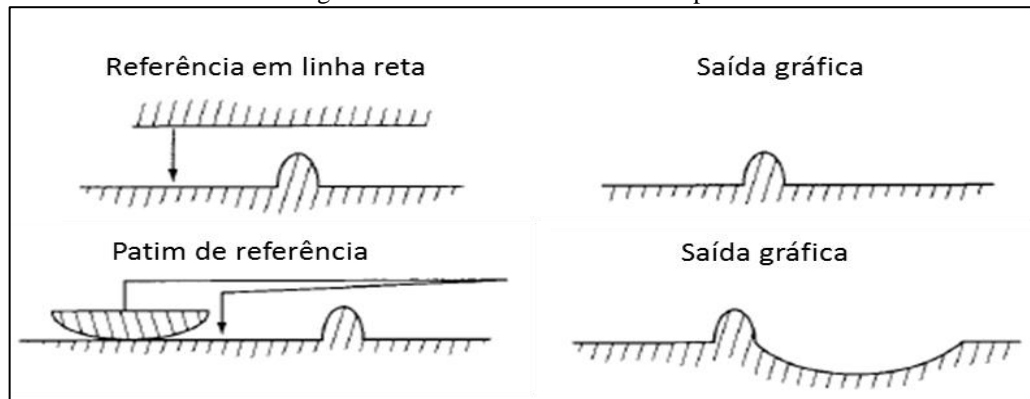
Os perfis são separados através do uso de filtros. A importância do filtro consiste em sua capacidade de isolar comprimentos de ondas que são importantes do ponto de vista funcional. As definições mais modernas de filtro apresentadas na ISO são baseadas nos filtros Gaussianos de Cut-off, conhecidos por apresentar uma concordância de fase e robustez a elementos isolados, como arranhões (CZICHOS et al., 2011).

No que diz respeito à obtenção dos dados, para Whitehouse (2002), todos os instrumentos de medição são de fato calibres, o que significa que, enquanto a medição ocorre, esta deve ser comparada a um valor de referência. A forma mais popular é conhecida como referência intrínseca. Em um perfilômetro tipo apalpador, este elemento, acoplado junto ao sensor, é conhecido como patim. O patim apresenta dimensões muito superiores se comparadas às do estilete, o que permite que o mesmo se sobreponha ao espaçamento existente entre os picos que compõem o perfil a ser medido.

No entanto, deve-se tomar cuidado com o uso desse tipo de filtro mecânico. Na Figura 21, é apresentada uma comparação entre as medições com patins e sem patins, a partir da qual é possível verificar como o uso do mesmo pode distorcer uma medição. O uso do patim nunca proporciona uma superfície de referência totalmente paralela à superfície medida. No entanto, esse erro é aceitável, desde que respeitadas algumas características construtivas na confecção do equipamento, como o raio do patim e o espaçamento entre este e o estilete (WHITEHOUSE, 2002). Atualmente existem perfilômetros do tipo apalpador, como

o Mytutoio SJ-400, que apresentam filtros digitais que permitem a compensação de forma, podendo, assim, serem medidos perfis sem o uso de patim.

Figura 23 - Erro associado ao uso do patim



Fonte: Adaptado de Whitehouse (2002).

O patim serve de referência para as variações de altura devido à medição obtida pelo sensor. No caso de um perfilômetro tipo apalpador, este sensor é o estilete, que pode ser do tipo esférico ou truncado. O primeiro apresenta uma estrutura piramidal com raio de ponta entre 2,5 e 10 μm . Esse tipo de estilete distorce o perfil medido, uma vez que pode gerar erros como o alisamento de degraus, arredondamento de picos e incapacidade de penetrar em vales mais estreitos que o raio da esfera. Esses efeitos são agravados à medida que o raio do estilete aumenta. Outra forma de estilete é a do tipo truncado, que apresenta como estilete uma pirâmide com ângulos de 90° , tendo sua ponta achatada de forma retangular de dimensões típicas de 3 e 8 μm . Esse tipo de estilete é menos comum e não pode medir eventos menores que três micrometros de espaçamento e picos maiores que oito micrometros de altura (GRIFFITHS, 2001).

As medições em que o estilete é utilizado desviam do perfil real de quatro formas. Uma, descrita anteriormente, é a incapacidade de medir o fundo de vales muito estreitos. Isso resulta em medições de vales menos profundos, o que torna a superfície mais lisa que a real. O segundo erro se deve ao arredondamento de picos e degraus, gerando erros de forma. Esses erros não afetam a medição em altura, mas acabam por suavizar e arredondar os picos presentes no perfil. O terceiro erro resulta no aumento da largura dos picos e no estreitamento dos vales. O contato do pico com as paredes da esfera acaba distorcendo a medição, de forma que os picos medidos apresentem-se mais largos do que realmente são, e, de maneira inversa, o mesmo é observado na medição de vales, pois a espessura dos vales se torna menor. O quarto e último desvio do perfil real é a incapacidade de medir efeitos do perfil que não sejam

perpendiculares à superfície, como rebaixos, saliências e reentrâncias. Essa incapacidade acaba resultando em um erro de forma (GRIFFITHS, 2001).

Outros tipos de problemas estão relacionados ao uso de perfilômetros tipo apalpador. Um deles é a endentação, deformação plástica da superfície a ser medida resultante da ação do estilete durante a medição (HILLMANN et al., 1984). Outro problema é a adesão de material na ponta do estilete durante a medição, de modo que a formação de gume postiço na ponta do estilete causa a suavização das medições. Esses efeitos de endentação e gume postiço normalmente não são um problema para a peça medida, pois, na maioria dos casos, sua magnitude é muito menor do que a apresentada pelos picos e vales que compõem o perfil. Porém, em superfícies que exijam um acabamento ultrafino, o uso de perfilômetros tipo apalpador pode ser considerado uma técnica destrutiva. Esse efeito foi observado em esferas em próteses de bacia, em que a endentação acelerou o desgaste do copo de polietileno que ali é encaixado (DOWSON, 1985). Por fim, existem os desvios à captação de dados digital, em que o sinal não é captado continuamente, mas de maneira discreta (GRIFFITHS, 2001).

2.6.4 Medição de rugosidade em perfis circulares

No passado, a medição de superfícies curvas necessitava de uma vasta gama de instrumentos com resolução suficiente para medir textura juntamente com forma. Além disso, os mesmos deveriam ser arranjados de tal forma que a geometria do elemento em estudo não influenciasse a medida. No caso de superfícies curvas que apresentassem raios de grande dimensão, o erro poderia ser minimizado através do uso de um comprimento de amostragem (*cut-off*) curto e um patim adaptado ao instrumento, de forma a compensar o arco gerado na medição. No entanto, caso o patim se localizasse antes ou depois do estilete, ocorreriam erros devido à altura da referência. Essa variação de altura pode ser compensada através do uso de patins com o estilete centrado, obedecendo ao princípio de Abbe (SMITH, 2013).

Atualmente, existem três técnicas recomendadas para a medição de superfícies curvas. A primeira é o uso de patins curvo, no lugar do patim reto convencional, de forma que o sensor é guiado por uma referência curva. A segunda consiste em manter o sensor estacionário, enquanto a peça é rotacionada a uma baixa velocidade. Por fim, o sensor é deslocado radialmente em relação à superfície.

2.6.5 Parâmetros de rugosidade bidimensionais

Os valores medidos durante a perfilometria são utilizados para calcular os mais diversos parâmetros de rugosidade. De acordo com Griffiths (2001), centenas de parâmetros foram propostos e existem inúmeras normas que regem os mesmos. A ISO possui diversas normas relacionadas ao assunto. A ISO 4287:1996 é responsável por definir os parâmetros de textura, enquanto a norma ISO 4288:1996 trata das regras e dos procedimentos necessários para realizar a medição (SMITH, 2013).

Os parâmetros utilizados nessas normas fazem uso de definições gerais importantes, como a definição de linha média. Segundo a norma ABNT ISO 4287/2002 (equivalente a ISO 4287:1997), a linha média é a linha correspondente ao componente do perfil de onda longa suprimida pelo filtro de perfil λ_c . De acordo com Withehouse (2002), a linha média deve dividir igualmente a área abrangida pelo perfil de rugosidade, acima e abaixo da mesma.

Outras duas definições importantes são as utilizadas para comprimento de amostragem e comprimento de avaliação. Para a ABNT ISO 4287/2002, comprimento de amostragem é o comprimento utilizado para a análise das características do perfil, enquanto o comprimento de avaliação é o comprimento do perfil utilizado para a avaliação. Dessa forma, um comprimento de avaliação pode conter mais de um comprimento de amostragem. O número de comprimentos de amostragem padrão é cinco, de modo que o comprimento de avaliação deve conter cinco comprimentos de amostragem.

A ISO 4287:1997 define três séries de catorze parâmetros cada, utilizados para a quantificação do perfil, ondulações e rugosidade, e apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de acordo com a ISO 4287:1997

	Amplitude								Distância	Híbridos	Curvas e parâmetros associados			
	Pico-Vale				Valor Médio									
Rugosidade	Rp	Rv	Rz	Rc	Rt	Ra	Rq	Rsk	Rku	RSm	RΔq	Rmr(c)	Rδc	Rmr
Ondulação	Wp	Wv	Wz	Wc	Wt	Wa	Wq	Wsk	Wku	WSm	WΔq	Wmr(c)	Wδc	Wmr
Estrutura	Pp	Pv	Pz	Pc	Pt	Pa	Pq	Psk	Pku	PSm	PΔq	Pmr(c)	Pδc	Pmr

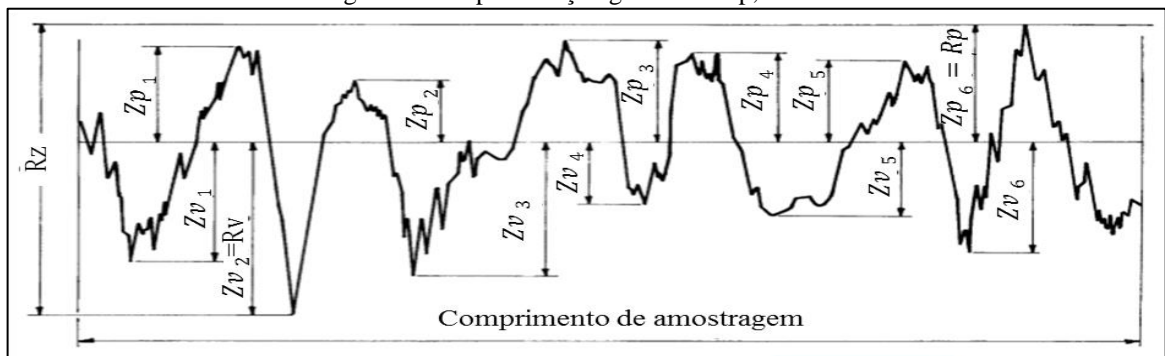
Fonte: Adaptado de Czichos et al. (2011).

Os parâmetros de rugosidade bidimensional são divididos em quatro categorias: parâmetros de amplitude, que podem ser subdivididos em parâmetros de pico e vale e parâmetro de média das amplitudes; parâmetros de espaçamento; parâmetros híbridos e curvas; e parâmetros relacionados. Os parâmetros necessários para o entendimento deste trabalho serão descritos a seguir, a começar pelos parâmetros de amplitude. Alguns parâmetros complementares podem ser encontrados no Anexo A.

Os parâmetros de altitude (pico e vale) descritos a seguir estão contidos na norma ABNT ISO 4287/2002:

- *Altura máxima pico do perfil (Rp)*: a maior altura de pico encontrada em relação à linha média dentro de um comprimento de amostragem;
- *Profundidade máxima do vale do perfil (Rv)*: determinado de maneira análoga a Rp, porém, o parâmetro a ser medido é a profundidade do maior vale;
- *Altura máxima do perfil (Rz)*: distância vertical entre o topo do pico mais alto e o fundo do vale mais profundo dentro do comprimento de amostragem. Rz pode ser representado matematicamente por $Rz = Rp + Rv$. A Figura 22 representa os parâmetros Rp, Rv e Rz.

Figura 24 - Representação gráfica de Rp, Rv e Rz



Fonte: Adaptado de (ABNT ISO 4287/2002).

Completam os parâmetros de altitude, os parâmetros de média das ordenadas, conforme descrição a seguir (ABNT ISO 4287/2002):

- *Desvio aritmético médio do perfil avaliado (Ra)*: expressa o valor médio do valor absoluto dos eventos verticais em relação à linha média. Pode ser definido matematicamente pela Eq.(1), sendo l o comprimento amostral e $Z(x)$ a distância do pico ou vale até a linha média.

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (1)$$

De acordo com Davim (2010), esse é o parâmetro de maior difusão, utilizado no ajuste de processos de usinagem e em controle de qualidade de produtos. Possui fácil definição e medição, e está presente em praticamente todas as normas. No entanto, o mesmo não apresenta significado físico, além de ser insensível a pequenas variações no perfil e de não fornecer informações sobre o comportamento longitudinal do perfil.

Desvio médio quadrático do perfil avaliado (Rq): raiz quadrada da média dos valores dos eventos verticais elevados ao quadrado. Pode ser definido matematicamente pela Eq.(2), sendo l o comprimento amostral e $Z(x)$ a distância do pico ou vale até a linha média. Segundo Davim (2010), esse parâmetro é mais sensível a variações em picos e vales do que Ra.

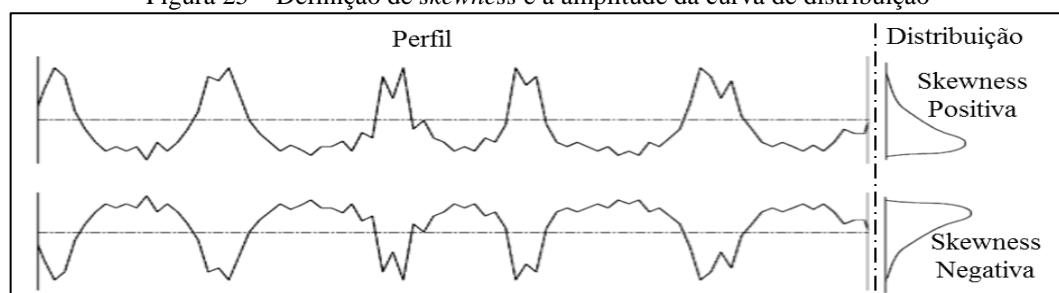
$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx} \quad (2)$$

- *Fator de assimetria do perfil avaliado – skewness* (Rsk): quociente entre a média dos valores dos eventos verticais em relação à linha média $Z(x)$ ao cubo e Rq ao cubo, no comprimento de amostragem. Na Eq.(3) lr é o comprimento amostral.

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z^3(x)| dx \right] \quad (3)$$

Segundo Gadelmawla et al. (2002), Rsk é utilizado para a medir a simetria do perfil em relação à linha média. No caso de uma superfície simétrica, Rsk tem valor zero. Na Figura 25, são exemplificados as diferentes possibilidades de superfície em relação a Rsk.

Figura 25 – Definição de *skewness* e a amplitude da curva de distribuição



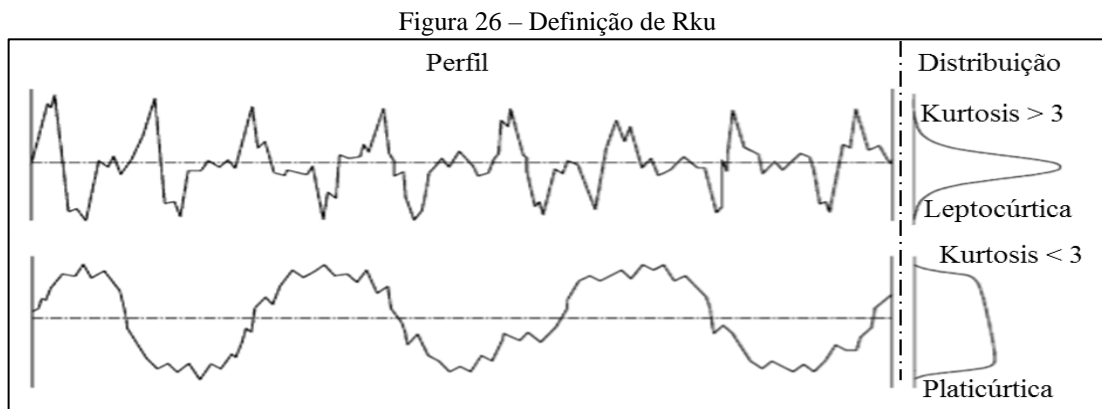
Fonte: Adaptado de Gadelmawla et al. (2002).

Caso a superfície apresente riscos profundos ou tenha seus picos removidos, a mesma deverá apresentar valor de Rsk negativo. Se a superfície apresentar picos elevados ou vales preenchidos, os valores encontrados de Rsk serão positivos. De acordo com Davim (2010), superfícies negativas apresentam uma face com “grande quantidade de material” com poucos vazios, e superfícies positivas apresentam faces “vazias”, porosas. Segundo o autor, esse parâmetro é de grande importância em aplicações tribológicas, como o controle da superfície funcional de rolamentos, controle de desgaste, entre outros.

- *Fator de achatamento do perfil avaliado – kurtosis (Rku):* quociente entre o valor médio dos valores dos eventos verticais em relação à linha média elevados à quarta potência e o valor Rq à quarta potência, respectivamente, no comprimento de amostragem. Calculado conforme a Eq.(4):

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z^4(x)| dx \right] \quad (4)$$

Segundo Davim (2010), uma superfície que apresente o valor de Rku inferior a três apresenta picos mais arredondados, enquanto a superfície que apresentar valores superiores a três apresenta picos mais agudos (Figura 26). De acordo com o mesmo autor, esse parâmetro fornece informações a respeito da área de contato da superfície e de sua resistência ao desgaste, assim como permite detectar a periodicidade dos eventos da superfície. Gadelmawla et al. (2002) reforçam que esse parâmetro pode ser utilizado para diferenciar perfis que apresentem mesmo Ra, porém formas diferentes.



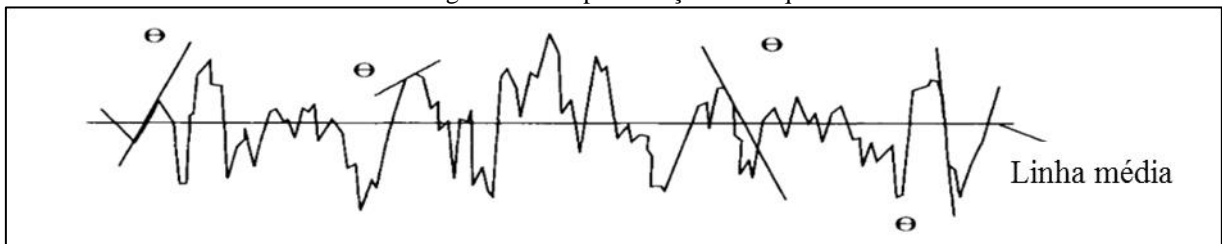
Fonte: Adaptado de Gadelmawla et al. (2002).

A última classe de parâmetros utilizada é composta por um único parâmetro, o parâmetro híbrido, apresentado a seguir.

- *Inclinação quadrática média do perfil avaliado* ($R\Delta q - Rdq$): raiz quadrada da média das inclinações, dZ/dX , no comprimento de amostragem.

A definição do parâmetro é representada na Figura 27, em que θ equivale a dZ/dX . As equações na sequência descrevem matematicamente Rdq . Withehouse (2002) alerta que o valor utilizado de θ é seu valor absoluto. Para Davim (2010), Rdq está ligado às condições de atrito e lubrificação de uma superfície. O mesmo também é sensível a mudanças no perfil medido, como o desgaste da mesma e é dado pela Eq.(5):

Figura 27 – Representação de Rdq



Fonte: Withehouse (2002).

$$R\Delta q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l (\theta(x) - \bar{\theta})^2 dx} \quad \text{com} \quad \bar{\theta} = \frac{1}{l} \int_0^l (\theta(x)) dx \quad (5)$$

Davim (2010) relaciona os parâmetros de rugosidade descritos com as diversas funcionalidades de uma superfície. Essas relações são mostradas no Quadro 5.

Quadro 5 – Relação entre os parâmetros de rugosidade e as propriedades funcionais de uma superfície.
(Dois asteriscos indicam uma influência pronunciada)

Propriedades Funcionais	Ra, Rq	Rp	Rt, Rz	Rsk	Rku	Rsm	RΔa
Contato/Rigidez de Contato	*		**	*	*	**	*
Resistência à Fadiga	*	*	**		*		**
Condutividade Térmica	*	**				**	*
Condutividade Elétrica	*					*	*
Reflexividade			**				**
Atrito e Desgaste	*		**	**	**	*	**
Lubrificação	*	*	**	**	*		*
Selo Mecânico	*		**	**			**
Corrosão por Fadiga	*	*		*		*	*
Tolerâncias de Montagem	*		**				*

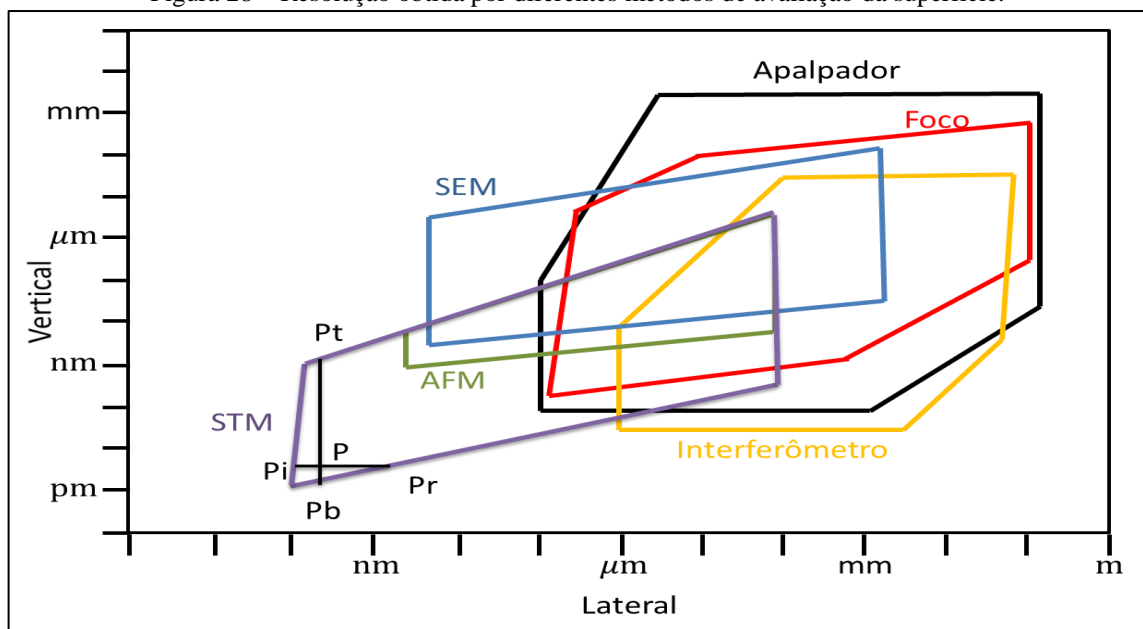
Fonte: Adaptado de Davim (2010).

A norma ABNT ISO 4287/2002 também aborda parâmetros relacionados a curvas. Maiores informações a respeito desses parâmetros podem ser encontradas em Bet (1999).

2.6.6 Interferômetros de luz branca

Apesar de ser recente a avaliação da superfície através de parâmetros espaciais, existe uma grande variedade de equipamentos dedicados a esse fim. Entre as opções disponíveis há os perfilômetros do tipo apalpador e óticos, interferômetros, microscopia eletrônica e microscopia de varredura por sonda. A microscopia eletrônica inclui a microscopia eletrônica de varredura (MEV), microscopia eletrônica de transmissão (MET) e microscopia eletrônica de transmissão de varredura (STEM). A microscopia de varredura por sonda abrange a microscopia de tunelamento, microscopia por força atômica (AFM), microscopia de varredura por emissão de campo, microscopia capacitiva de varredura (SCM), microscopia de varredura térmica e microscopia de varredura acústica (STOUT; BLUNT, 2000). A resolução possível de ser alcançada por alguns desses processos pode ser observada na Figura 28.

Figura 28 – Resolução obtida por diferentes métodos de avaliação da superfície.



Fonte: Adaptado de Stout e Blunt (2000).

Entre os métodos apresentados, encontra-se a perfilometria ótica, que se refere a qualquer método ótico utilizado para reconstruir o perfil de uma superfície. Encaixam-se nessa categoria, entre outros, a interferometria por luz branca, laser ou métodos confocais. Na

interferometria, a medição ocorre pela medição da mudança de fase de um feixe refletido pela superfície em relação a um feixe de referência. Conforme o feixe percorre a superfície, a variação da altura do perfil da superfície ocasiona mudanças de fase entre os feixes de medida e referência. Essa mudança de fase do feixe de medição é diretamente proporcional ao comprimento do caminho percorrido pelo mesmo, desde a emissão até a captação, ocorrida após a reflexão (STOUT; BLUNT, 2000).

A interferometria por luz branca é um método de ampla utilização na medição de superfícies de precisão, pois permite a medição de membranas delicadas e materiais macios sem ocasionar danos a estes. É um método relativamente rápido, tendo em vista que a medição consiste apenas em um escaneamento vertical da superfície avaliada. A interferometria por luz branca apresenta uma resolução vertical cuja limitação ocorre pela precisão na qual o sinal da fase refletida pode ser identificado, normalmente em torno de um milésimo do comprimento médio de onda (faixa sub-nanométrica). A resolução lateral é regida pelo limite de difração de Rayleigh que, para lentes de grande abertura numérica, é em torno de $0,5 \mu\text{m}$ (GAO et al., 2008).

A maior parte dos interferômetros utiliza laser com fontes de luz, pois o laser apresenta um longo comprimento de coerência, o que torna fácil a obtenção de franjas de interferência, diferentemente do que ocorre com o uso de luz branca, que apresenta um curto comprimento de coerência e necessita que os caminhos de luz sejam corrigidos. Com o uso de fontes de luz branca, existe grande facilidade em localizar as franjas devido à interferência, no entanto, qualquer reflexão parasita poderá resultar na formação de franjas indesejáveis, que podem conduzir a erros de medição (WYANT, 2002). A fonte de luz branca fornece iluminação de largo espectro que ajuda a superar a ambiguidade "ordem de franja" inerente a uma fonte monocromática. No caso de elementos topográficos mais rasos, uma fonte de luz monocromática pode ser utilizada para obter resultados mais precisos (GAO et al., 2008; BARYSHEV et al., 2013).

2.6.7 Medição de parâmetros espaciais

Apesar da grande aplicabilidade dos parâmetros de rugosidade 2D, Stout e Blunt (2000) apontam que existem deficiências relacionadas à sua utilização. A principal causa está relacionada à pouca contribuição desses parâmetros para a descrição global e controle de uma superfície. Outro fator importante é a incapacidade dos parâmetros bidimensionais relacionarem a aplicação da superfície com seu desempenho e requisitos funcionais. Grant

(2002) comenta que essa incapacidade levou à proliferação e à expansão incontrolável dos parâmetros de rugosidade bidimensionais, sendo que muitos deles se mostraram inadequados para esse objetivo.

Num primeiro momento, o interesse pela textura tridimensional tinha como objetivo alcançar um entendimento completo dos detalhes que compõem uma superfície. No entanto, seu desenvolvimento ficava restrito às limitações tecnológicas existentes, como equipamentos e métodos de processamento não adequados. Atualmente essa limitação foi superada de forma que a medição em três dimensões, nos dias atuais, é instrumento básico e indispensável para a representação de uma superfície (GRANT, 2002).

A medição tridimensional consiste basicamente na junção de vários perfis paralelos, regularmente espaçados, de forma a reconstruir a superfície (GRANT, 2002). Os parâmetros de medição tridimensionais derivam, em sua maioria, dos parâmetros bidimensionais. Como a maioria dos parâmetros possui o mesmo nome, a nomenclatura foi alterada para evitar erros de interpretação: enquanto os parâmetros bidimensionais se utilizam da simbologia R, os parâmetros espaciais são representados por S (CARNEIRO, 1995).

Entre as características particulares inerentes à medição de superfícies em três dimensões, uma das mais importantes se refere à quantidade de amostras. Diferentemente dos parâmetros 2D, em que a rugosidade é obtida através de dados de vários comprimentos amostrais, a rugosidade 3D é obtida de apenas uma área de análise (STOUT; BLUNT, 2000).

A norma que apresenta a forma de cálculo dos parâmetros tridimensionais é a ISO 25178-2 *Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Areal — Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters*. A descrição de cada parâmetro foi retirada de Leach (2013). Entre os diversos parâmetros contidos na norma, os parâmetros verticais são descritos a seguir. A norma contém parâmetros espaciais e híbridos, que são descritos com mais detalhes no Anexo A. Além desses, existem os parâmetros mistos e os parâmetros relacionados com curvas e funções. Todos esses parâmetros são abordados pela norma ISO 25178-2, e um maior detalhamento dos mesmos pode ser encontrado na norma em questão e em Leach (2013).

- *Desvio médio aritmético de rugosidade* (S_a): parâmetro que representa a média aritmética dos valores ordinais absolutos na área de avaliação, dado pela Eq. (6):

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| dx dy \quad (6)$$

- *Desvio médio quadrático de rugosidade* (Sq): parâmetro que apresenta a raiz quadrática das médias dos valores ordinais absolutos na área de avaliação, dado pela Eq. (7):

$$Sq = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dx dy} \quad (7)$$

De acordo com Leach (2013), Sa e Sq estão diretamente relacionados. Segundo o mesmo autor, Sq possui significância estatística maior e normalmente apresenta um significado físico, como, por exemplo, ser diretamente relacionado à energia superficial e à forma como a luz é refletida pela superfície.

- *Skewness* (Ssk): razão entre a média dos valores de altura do perfil ao cubo pelo cubo de Sq, dentro da área amostral. O Ssk é calculado de acordo com a expressão a seguir, na qual A é área amostral e z a altura dos eventos, em relação à superfície média. É dada pela Eq. (8):

$$Ssk = \frac{1}{Sq^3} \frac{1}{A} \iint_A z^3(x, y) dx dy \quad (8)$$

A Skewness representa a forma da distribuição das alturas na superfície. Isso ocorre através da descrição da distribuição dos eventos em relação ao plano médio. Para uma superfície com uma distribuição simétrica ou gaussiana, a Ssk é zero. Caso a maior parte do material da superfície se encontre abaixo da linha média, a Ssk retornará um valor negativo. Caso esteja acima, o valor será positivo. Superfícies que necessitem de picos que sofram rápido desgaste e precisem de retenção de lubrificante, como no caso de rolamentos, apresentam um valor de Ssk negativo. Um caso de Ssk positivo é encontrado em superfícies torneadas (LEACH, 2013).

Entre suas limitações está o fato de Ssk não fazer distinção se os picos do perfil estão distribuídos acima ou abaixo do plano médio. Além disso, Ssk sofre grande influência de eventos isolados, como picos altos e vales profundos. Pode-se dizer, de uma maneira geral, que Ssk está relacionado com diversas características da

superfície, como a capacidade de suportar carga e a porosidade da mesma (LEACH, 2013).

- *Kurtosis (Sku)*: medida da agudez da distribuição de altura do perfil através da razão dos valores de altura na quarta potência e a quarta potência de Sq, na área amostral. Dada pela Eq. (9):

$$Ssk = \frac{1}{Sq^4} \frac{1}{A} \iint_A z^4(x, y) dx dy \quad (9)$$

Todos os valores obtidos para Sku são positivos, sendo que uma distribuição gaussiana apresenta valor igual a três. Esse parâmetro não somente detecta a concentração da distribuição dos picos em relação à linha média, mas também detecta se os mesmos apresentam uma característica aguda (Sku superior a três) ou robusta (Sku inferior a três) (LEACH 2013). Devido às elevadas potências, Sku e Ssk devem ser analisados com cautela, pois podem resultar em valores não representativos.

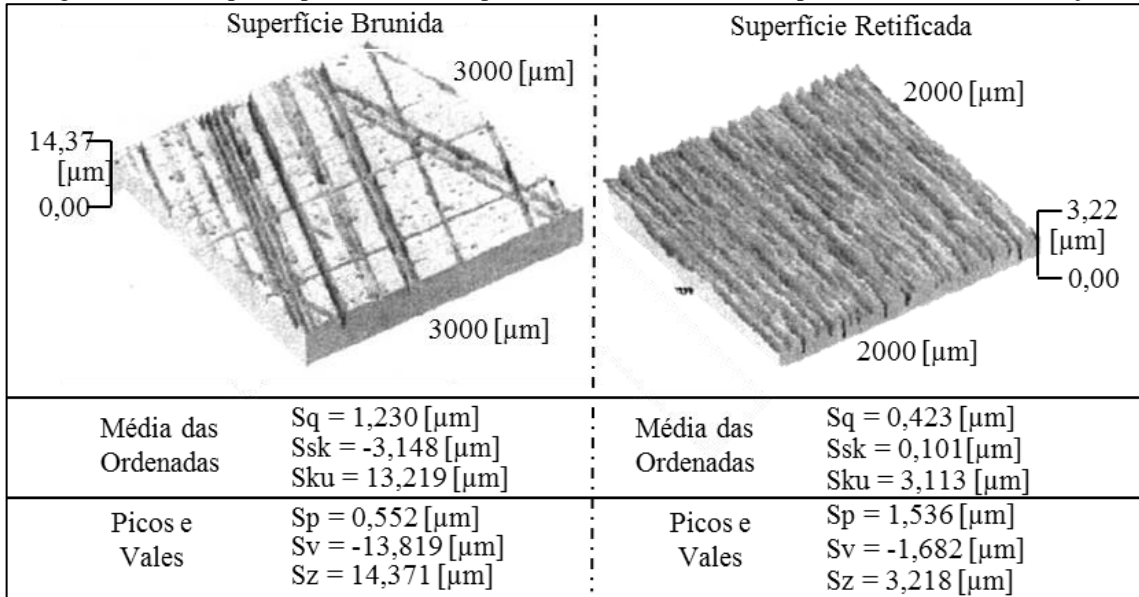
- *Maior altura de pico (Sp)*: representa a maior altura de pico dentro da área amostral.
- *Maior profundidade de vale (Sv)*: maior profundidade de vale dentro da área amostral.
- *Maior altura da superfície amostral (Sz)*: esse parâmetro é a soma dos valores absolutos de Sp e Sv. Dado pela Eq. (10):

$$Sz = Sp + |Sv| = Sp - Sv \quad (10)$$

O parâmetro Sz deve ser utilizado com cautela, uma vez que é sensível a picos e vales isolados. Esse parâmetro pode ser utilizado para identificar alguma condição inadequada de fabricação, como rebarba ou poro em decorrência de material de má qualidade ou mau processamento (LEACH, 2013).

A Figura 29, a seguir, apresenta um exemplo de parâmetros de altura para superfícies brunidas e retificadas.

Figura 29 – Exemplo de parâmetros de superfície relacionados a altura para brunimento e retificação



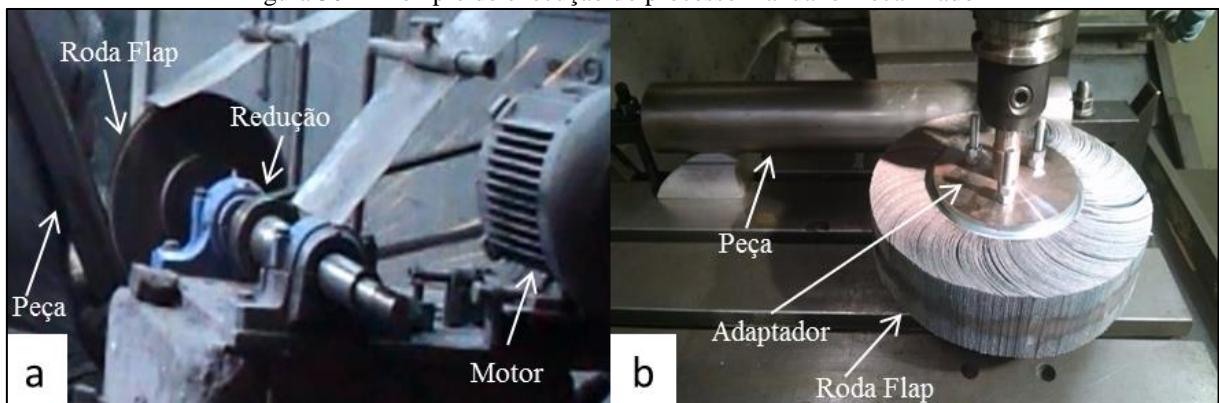
Fonte: Adaptado de Blunt e Jiang (2003).

3 METODOLOGIA

3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Este trabalho tem como objetivo caracterizar os eventos presentes na superfície nas diferentes etapas que compõem os processos de acabamento manual e acabamento mecanizado. Para que isso fosse possível, foi necessário estabelecer um critério para que o processo mecanizado fosse desenvolvido. O critério estabelecido foi o de que a superfície gerada pelo processo de *buffing* pelo processo manual e pelo mecanizado deveriam ser equivalentes. Essa equivalência foi definida por inspeção visual (ambas as superfícies deveriam alcançar um aspecto visual determinado por um avaliador qualificado). A Figura 30 exemplifica o processo manual (a) e mecanizado (b).

Figura 30 – Exemplo de execução do processo manual e mecanizado



Fonte: O autor.

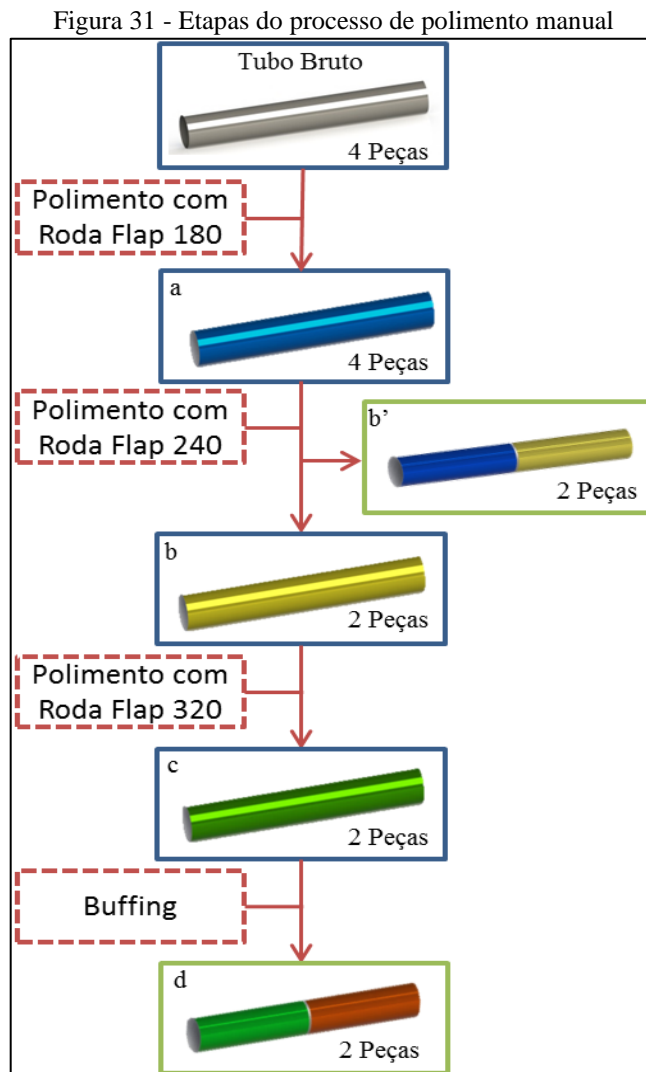
Após o processamento das peças, foram preparadas amostras da superfície gerada em cada etapa. Para a caracterização da superfície, as amostras foram submetidas à inspeção de textura através de MEV-EC, rugosidade e medição de parâmetros espaciais.

3.1.1 Etapas do processo manual

As amostras foram obtidas de forma a interferir o menos possível nos equipamentos e nas condições existentes na empresa que realiza o processo manual. O processo observado durante a execução deste trabalho consistia no polimento de peças tubulares com o uso de rodas flap com granulometria mesh 180, 240 e 320, nessa ordem. O acabamento final era realizado através do processo de *buffing*, com o uso de rodas ventiladas e barras com grãos

abrasivos. Em todas as etapas foram utilizadas, para a lubrificação, barras de sebo composto (nome comercial usado pela empresa fornecedora ACRE Caxias, para sebo animal com abrasividade cujo catalogo pode ser consultado no anexo D). A aplicação do lubrificante consistia em colocar a barra com o lubrificante sólido em contato com a ferramenta em movimento.

As amostras foram confeccionadas em uma empresa por um operador habilitado do setor metal mecânico da região de Caxias do Sul, seguindo a técnica empregada para o polimento de peças tubulares comuns. A estratégia de corte utilizada é a concordante. As etapas do processo manual são ilustradas na figura Figura 31 e descritas na sequência:



Fonte: O autor.

- a) preparação da roda flap 180: fixação da roda no eixo do motor a ser utilizado. Dressamento da roda com um pedaço de tubo, a fim de modificar a superfície de

contato da roda, inicialmente plana, para um formato de meio tubo. Adição de lubrificante e massa abrasiva na roda;

b) polimento da amostra com roda flap 180: foram polidas quatro amostras de tubos ao longo de todo seu comprimento (Figura 31-*a*). Os passes foram realizados no sentido longitudinal, com movimento concordante. Foram realizados passes sobrepostos (quantidade não definida) até que o operador considerar, a partir da análise visual, que a superfície gerada estava em conformidade;

c) repetição da etapa (a) para a roda flap 240;

d) repetição da etapa (b) para a roda flap 240, com a diferença de que, das quatro amostras polidas anteriormente, duas foram polidas totalmente (Figura 31-*b*), e duas foram polidas em apenas metade de seu comprimento (Figura 31-*b'*);

e) repetição da etapa (a) para a roda flap 320;

f) repetição da etapa (b) para a roda flap 320, com a diferença de que, das quatro amostras polidas anteriormente, apenas as amostras polidas totalmente com a roda 240 foram polidas pela roda flap 320 (Figura 31-*c*). Foi polida toda a extensão de seu comprimento;

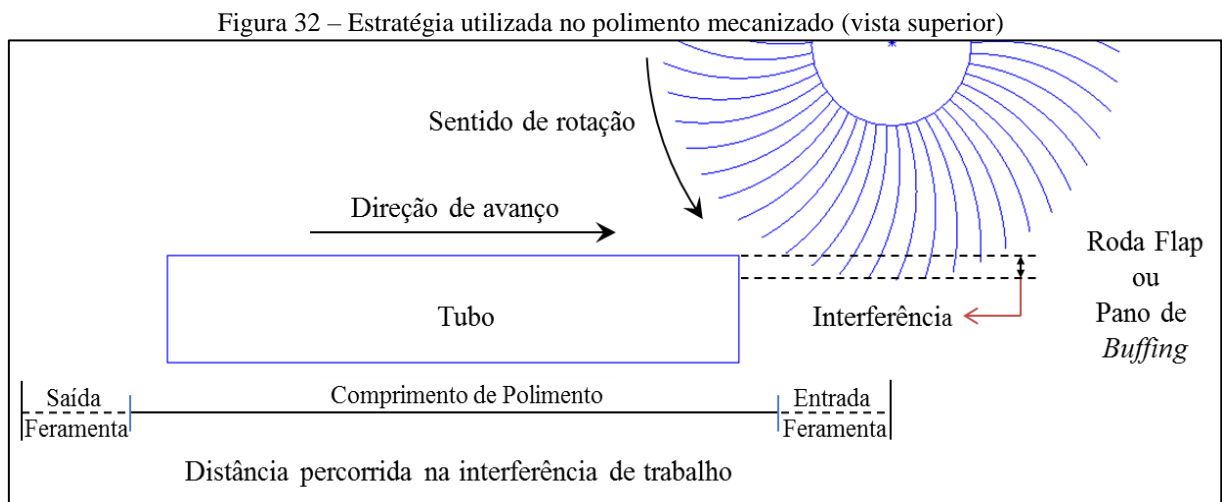
g) preparação do pano ventilado para *buffing*: foram montados seis panos, um ao lado do outro, no eixo do motor a ser utilizado. O mesmo pedaço de tubo usado para a operação de dressagem das rodas flap foi empregado para deformar os panos externos, com o objetivo de torná-los mais macios. Foram adicionados o abrasivo e o lubrificante no pano;

h) polimento com os panos de *buffing*: foram polidas metade de cada uma das duas amostras polidas anteriormente pela roda flap 320 (Figura 31-*d*). Os passes foram realizados no sentido longitudinal, com movimento concordante. Diferentemente do polimento com as rodas flap, em que o passe era executado de forma rápida, o passe pela roda de pano ocorre de maneira mais lenta e controlada.

3.1.2 Etapas do processo mecanizado

O processo mecanizado foi conduzido em um centro de usinagem. Para isso, um dispositivo de fixação para as amostras foi projetado, bem como um adaptador para o *spindle* da máquina, capaz de sustentar as rodas flap e os panos de *buffing*. As dimensões dos componentes do adaptador utilizado podem ser consultadas no Anexo B.

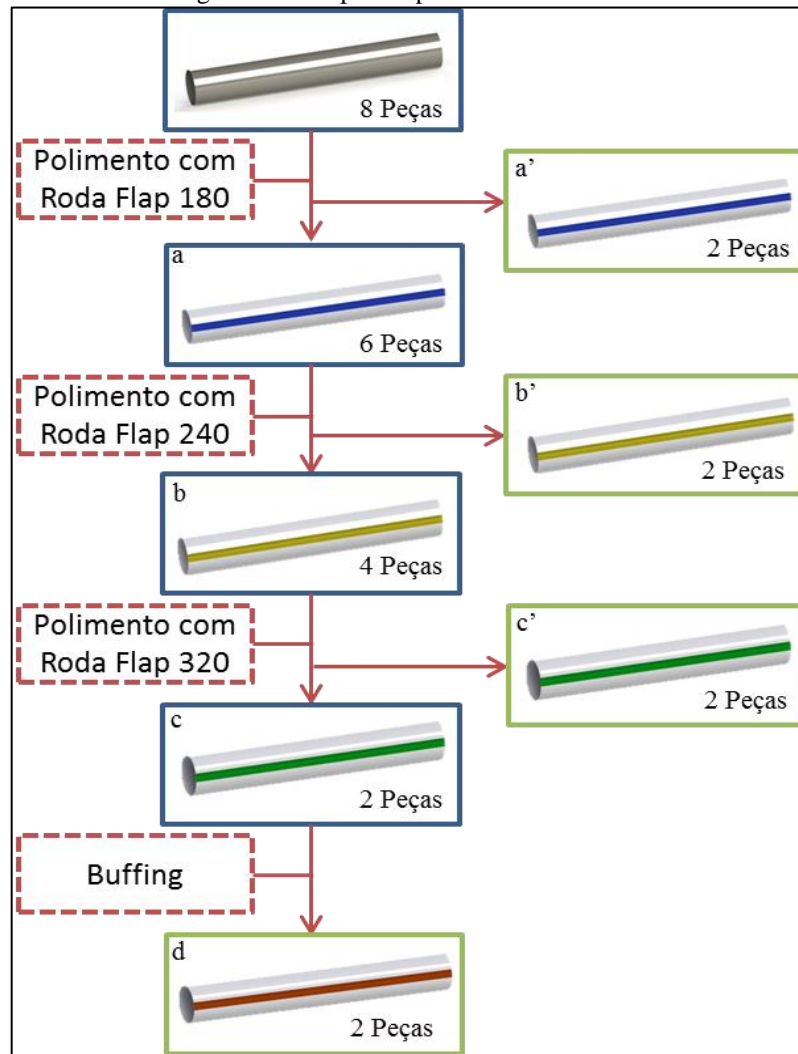
A figura 32 ilustra a estratégia utilizada para todas as etapas de polimento mecânico (Rodas flap e *buffing*). O processo utilizou estratégia de corte concordante. O movimento de rotação foi exercido pela ferramenta e o movimento de avanço, tangencial a mesma, foi realizado pela peça. Durante o início e o final do movimento de avanço (entrada e saída da ferramenta) não há contato da ferramenta com a peça. Essa precaução foi adotada para garantir que a ferramenta entrasse em contato com a peça apenas na interferência de trabalho, garantindo assim que a interferência fosse constante ao longo de todo comprimento de polimento.



Fonte: O Autor

Para a lubrificação, sebo animal cozido foi utilizado no polimento por rodas flap 240 e 320 e no processo de *buffing*. A necessidade do uso do mesmo foi verificada através da realização de um pré-teste, no qual as superfícies obtidas sem o uso do lubrificante apresentavam marcas azuladas devido ao alto atrito e à temperatura elevada. Diferentemente do processo manual, em que o lubrificante era adicionado à periferia da ferramenta, o mesmo foi adicionado sobre a superfície da peça. O processo foi conduzido conforme descrito a seguir, e sua sequência está representada na Figura 33:

Figura 33 – Etapas do processo mecanizado



Fonte: O autor.

- a) polimento com roda flap 180: a roda flap foi fixada no *spindle* do centro de usinagem através do dispositivo desenvolvido. A ferramenta foi referenciada em rotação de trabalho, para evitar variação de posicionamento decorrente do aumento do diâmetro da ferramenta, causado pela rotação da mesma. Um único passe foi realizado ao longo do comprimento do tubo, resultando em uma faixa de superfície polida de aproximadamente 15 mm. Oito tubos foram polidos, dos quais dois foram separados como amostras para a caracterização da superfície (Figura 33–a')
- b) polimento com roda flap 240: semelhante ao anterior, tendo como diferença a adição de lubrificante sobre a peça. Seis peças polidas anteriormente (Figura 33–a), foram repassadas pela roda 240. Duas das peças polidas pela roda 240 foram separadas como amostras para a caracterização da superfície (Figura 33–b');

- c) polimento com roda flap 320: semelhante à roda flap 240. Quatro peças polidas pela roda 240 (figura 33–b); foram repassadas pela roda 320. Novamente duas peças foram separadas como amostras após o polimento para a caracterização da superfície (figura 33–c’);
- d) polimento com panos de *buffing*: foi montados no dispositivo de adaptação um conjunto de quatro panos para dar forma a roda de *buffing*. O material abrasivo foi adicionado na periferia da roda, de forma a recobrir toda a superfície. A peça foi posicionada de forma idêntica às etapas anteriores. O sebo animal foi passado sobre a mesma. As duas peças resultantes da etapa anterior (figura 33–c) foram repassadas pelo pano (Figura 33–d), para serem utilizadas como amostras geradas pelo processo de *buffing*.

3.2 PARÂMETROS DE PROCESSO

Para o processo manual, o único parâmetro possível de ser mensurado foi a rotação da ferramenta, na faixa de 4500 rpm. A interferência, velocidade de avanço e número de passes variam de acordo com o operador e sua percepção de uma superfície adequada para aquela operação.

Em contrapartida, o processo mecanizado foi realizado mantendo um maior controle dos parâmetros sobre a superfície, conforme descrição na Tabela 3. Os parâmetros foram definidos com base em informação dos catálogos das ferramentas e em experimentos prévios. Os mesmos foram escolhidos de forma que o resultado do processo de *buffing* fosse equivalente à superfície gerada manualmente. O processo mecanizado foi realizado em um único passe.

Tabela 3 - Parâmetros utilizados no processo mecanizado

Etapa	Interferência [mm]	Velocidade de Rotação [rpm]	Velocidade de Avanço [mm/min]
Roda Flap 180	4	2000	1300
Roda Flap 240	2,5	1700	3000
Roda Flap 320	4	2000	1300
Buffing	3	2500	800

Fonte: O autor.

3.3 MATERIAIS

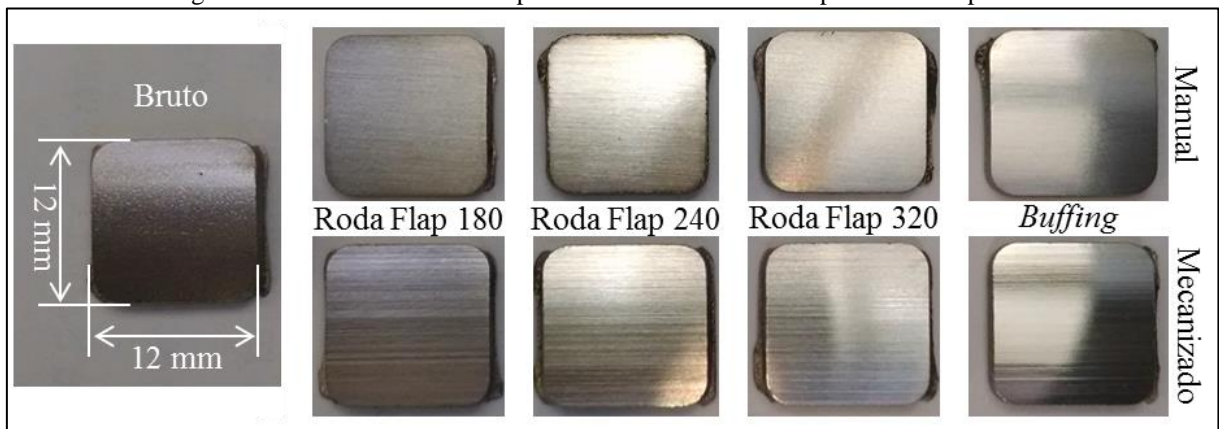
Nesta seção serão apresentados os corpos de prova, ferramental, maquinário e adaptadores utilizados para a execução do experimento, tanto de forma manual quanto de forma mecanizada.

3.3.1 Corpos de Prova

Como corpos de prova foram utilizados tubos com costura, de Aço AISI 1010, laminados a frio, com diâmetro externo de 70 mm, espessura de parede de 1,5 mm e comprimento de 450 mm. Os mesmos fazem parte do mesmo lote. Em virtude de limitações financeiras e de material foram utilizados 14 corpos de prova, sendo quatro utilizados no processo manual, oito no processo mecanizado, e dois como referência de superfície bruta.

As amostras tubulares foram utilizadas na medição da rugosidade bidimensional. Para a obtenção das micrografias e medição tridimensional de rugosidade, foram retiradas amostras menores dos tubos, com o auxílio de um processo de eletroerosão. As dimensões dessas amostras menores são apresentadas na Figura 34. Para tal, um eletrodo foi especialmente desenvolvido de maneira a possibilitar a separação das amostras sem danificar a superfície de ambas.

Figura 34 – Amostras utilizadas para as análises de textura e parâmetros espaciais.



Fonte: O autor.

3.3.2 Ferramental utilizado

O ferramental utilizado em ambos os processos, com exceção do material utilizado como lubrificante. Foram utilizados três tipos de roda flap (de nome comercial Acreroda),

com diferentes granulometria mesh, P180, P240 e P320, nomenclatura de acordo com a Federação dos Produtores Europeus de Abrasivos (FEPA). Também foram utilizados panos de *buffing* ventilados, comercializados como pano ventilado branco. Para o processo manual foi utilizado um jogo de seis panos, enquanto para o processo mecanizado foram usados dois jogos de quatro panos. Na Tabela 4 são apresentados os materiais utilizados.

Tabela 4 – Ferramental utilizado

		Roda Flap 180	Roda Flap 240	Roda Flap 320	Conjunto de 4 panos	Conjunto de 6 panos
Processo	Manual	1	1	1	-	1
	Mecanizado	1	1	1	2	-

Fonte: O autor.

Além do material apresentado na Tabela 4, a Massa Abrasiva N°2 foi utilizada na etapa de *buffing*, tanto para o processo manual quanto para o mecanizado. Nesse composto abrasivo estavam gravadas as informações “S. Paulo Brasil, MASSA LUSTROMAX N 2, para lustrar, Ind. Brasileira”. Para a lubrificação foi utilizado sebo composto (comercializado com este nome) para o processo manual. Este, de acordo com o catálogo do produto, possui abrasividade, sendo fabricado com base em gordura animal. O mesmo foi aplicado em todas as etapas do processo manual. Para o processo mecanizado foi utilizado sebo bovino cozido. Neste caso, o lubrificante foi utilizado nas etapas de polimento por roda flap 240, 320 e *buffing*.

Todo o ferramental utilizado foi adquirido na empresa Acre Caxias, com exceção do sebo natural. Os catálogos encontram-se no Anexo C.

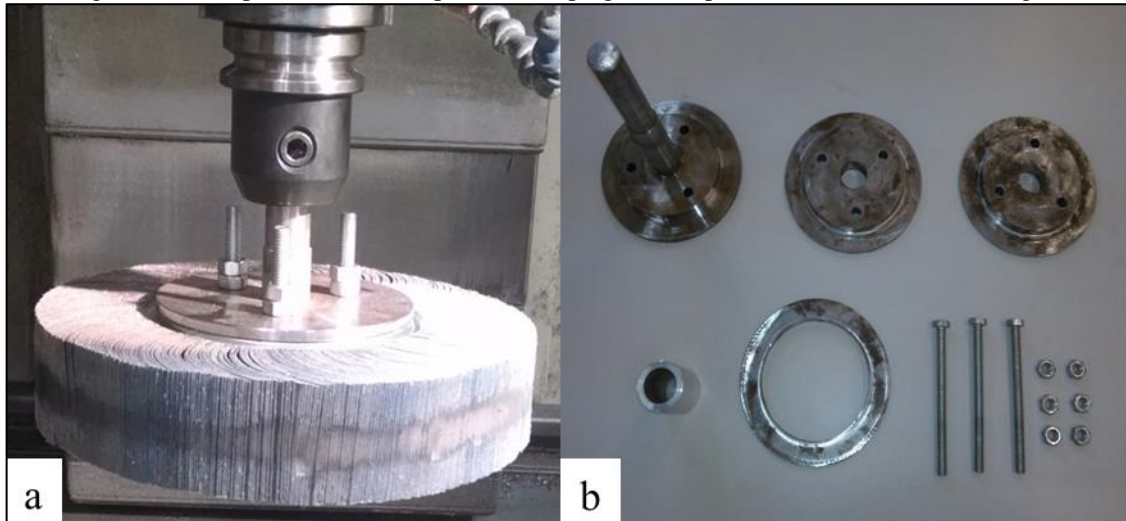
3.3.3 Maquinário utilizado

No processo manual foram utilizados motores de 1,5 Hp com rotação de 3450 rpm, acompanhado de um sistema de polias que tinha como objetivo aumentar a rotação para 4500 rpm. A verificação do fabricante não foi possível.

No processo mecanizado foi necessária a utilização de um adaptador. O mesmo, assim como seus componentes, é mostrado na Figura 35. A Figura 35-a retrata o adaptador montado, enquanto a Figura 35-b são mostrados os diferentes componentes usados de acordo com a roda ou pano utilizado. O adaptador permitiu realizar a operação de polimento em um centro de usinagem CNC, marca Dyna Myte, modelo DM 4500, com potência de 4,5 kW, e rotação

máxima do eixo árvore de 6000 rpm. Ensaios preliminares foram realizados para verificar a viabilidade do processo, bem como seus efeitos sobre o equipamento.

Figura 35 – Adaptador e seus componentes empregados no polimento em centro de usinagem



Fonte: O autor.

3.4 ANÁLISES POR MEV-EC

Para a análise por Microscopia Eletrônica de Varredura por Emissão de Campo (MEV-EC), foi utilizado microscópio marca TESCAM, modelo MIRA 3 LM. As medições foram realizadas no Laboratório Central de Microscopia Professor Israel Baumvol, na Universidade de Caxias do Sul. Para este trabalho foram utilizadas imagens representativas da superfície obtidas em ampliações de 1.000 vezes e 10.000 vezes.

3.5 MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE

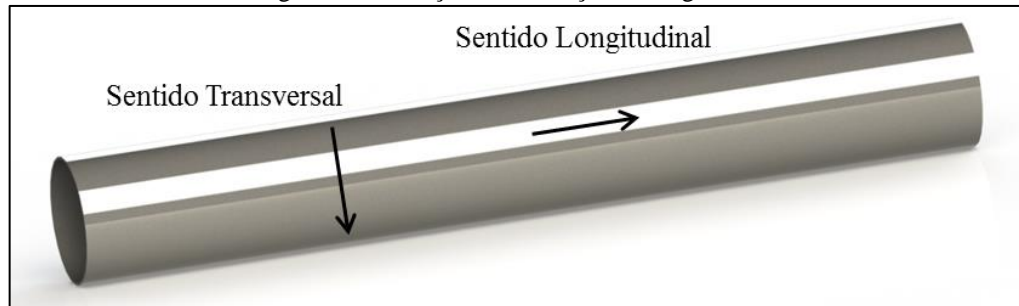
Os parâmetros de rugosidade foram mensurados com o uso de um perfilômetro portátil da marca Mitutoyo, modelo SJ-301, com resolução de 0,01 μm e raio da ponta do estilete de diamante de 5 μm e conicidade de 90°.

Uma consideração importante deve ser feita a respeito da utilização desse perfilômetro. O equipamento utilizado não é o equipamento adequado para a medição de rugosidade em peças curvas, pois utiliza um patim do tipo linear e seu movimento é apenas de translação. Como todas as medidas foram efetuadas com os tubos na mesma posição, a tendência é que o erro seja sistemático e esteja presente em todas as medições realizadas no sentido transversal. Dessa forma, os resultados aqui presentes de rugosidade em duas

dimensões medidos perpendicularmente à superfície da amostra não são as mais adequadas para comparação com dados obtidos de outra forma.

Foram efetuadas vinte leituras para cada amostra para posterior tratamento estatístico. Dez foram efetuadas no sentido longitudinal, paralelas à direção de avanço da ferramenta e do tubo, e dez foram realizadas no sentido transversal, perpendicular ao avanço da ferramenta, como representado na Figura 36. Cada amostra de superfície foi replicada uma vez, totalizando vinte medições em cada sentido de análise, para cada superfície investigada. Foi utilizado um comprimento amostral de 0,08 mm e filtro de Gauss. Todos os parâmetros avaliados seguem a norma ABNT ISO 4287/2002. Todos os valores obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA).

Figura 36 – Direções de Medição de Rugosidade



Fonte: O autor.

Os parâmetros estudados são os seguintes: o desvio aritmético médio do perfil avaliado (R_a); o desvio médio quadrático do perfil avaliado (R_q); a altura máxima do perfil (R_z); a *Skewness* (R_{sk}); a *Kurtosis* (K_u); e a inclinação quadrática média do perfil avaliado (R_{dq})

3.6 MEDIÇÃO DE PARÂMETROS DE SUPERFÍCIE

As medições dos parâmetros de superfície foram realizadas na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Para realizar as medições foi utilizado um microscópio ótico Bruker, modelo Countour GT-K 3D, que funciona com o uso do princípio de interferometria por luz branca. Através dessas medições foram gerados os perfis 3D da superfície e calculados os parâmetros espaciais. A área amostral utilizada é de $157,6 \mu\text{m} \times 118,2 \mu\text{m}$. Todos os parâmetros foram obtidos conforme a norma ISO 25178-2. Os parâmetros medidos são o desvio médio aritmético de rugosidade (S_a), o desvio médio quadrático de rugosidade

(Sq), a maior altura de pico (Sp), a maior profundidade de vale (Sv), maior altura da superfície amostral (Sz), a *Skewness* (Ssk) e a *Kurtosis* (Sku).

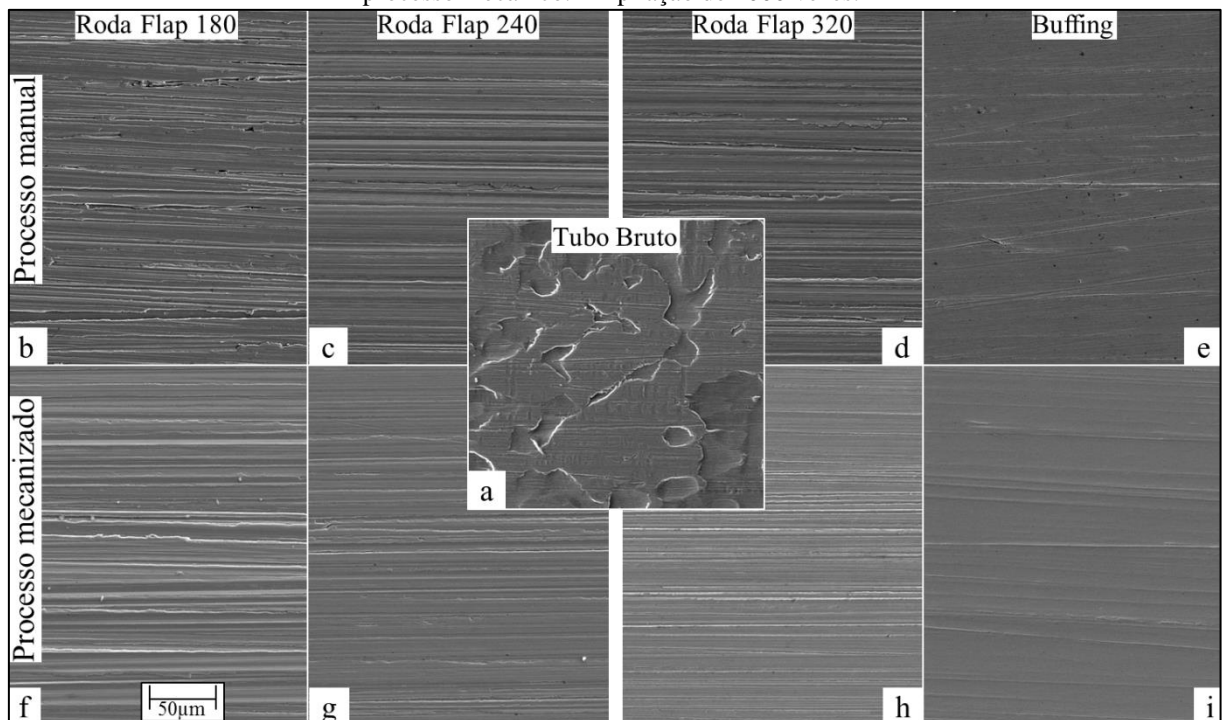
4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos durante as medições, tendo como foco a caracterização da superfície gerada nas diferentes etapas dos processos. Serão discutidas as modificações ocorridas na superfície ao longo dos processos. Também serão abordadas as diferenças entre as superfícies geradas pelos processos manual e mecanizado.

4.1 INSPEÇÃO VISUAL VIA MEV-EC

A inspeção visual foi realizada com o objetivo de caracterizar as superfícies geradas nas diferentes etapas de cada processo e verificar diferenças entre os processos mecânico e manual. As micrografias por MEV-EC das diferentes etapas do processo são apresentadas na Figura 37.

Figura 37 – Micrografia por MEV-EC. As imagens superiores representam o processo manual; as inferiores, o processo mecânico. Ampliação de 1000 vezes.



Fonte: O autor.

Observa-se que superfície bruta (Figura 37-a) é característica do processo de laminação utilizado na fabricação do tubo, na qual são empregados cilindros texturizados para conformar o material. Ela apresenta sulcos por toda sua extensão. O material ao redor destes sulcos foi deformado plasticamente de forma a assumir uma aparência plana e nivelada,

apresentando característica levemente alongada na direção de laminação. Jing et al. (2015) estudaram a evolução da superfície durante o processo de laminação a frio após a utilização de um processo de redução de hidrogênio. De acordo com os autores, logo após o primeiro passe, a maioria das bolhas e poros presentes na superfície sofrem alterações em sua geometria, tendo sua profundidade reduzida e suas dimensões laterais aumentadas. Outra mudança decorrente do processo de laminação é a alteração das características das trincas presentes na superfície, que se tornam mais rasas em virtude da deformação plástica que ocorre devido às grandes pressões utilizadas na laminação. Após a laminação essas trincas podem deixar de ser visíveis.

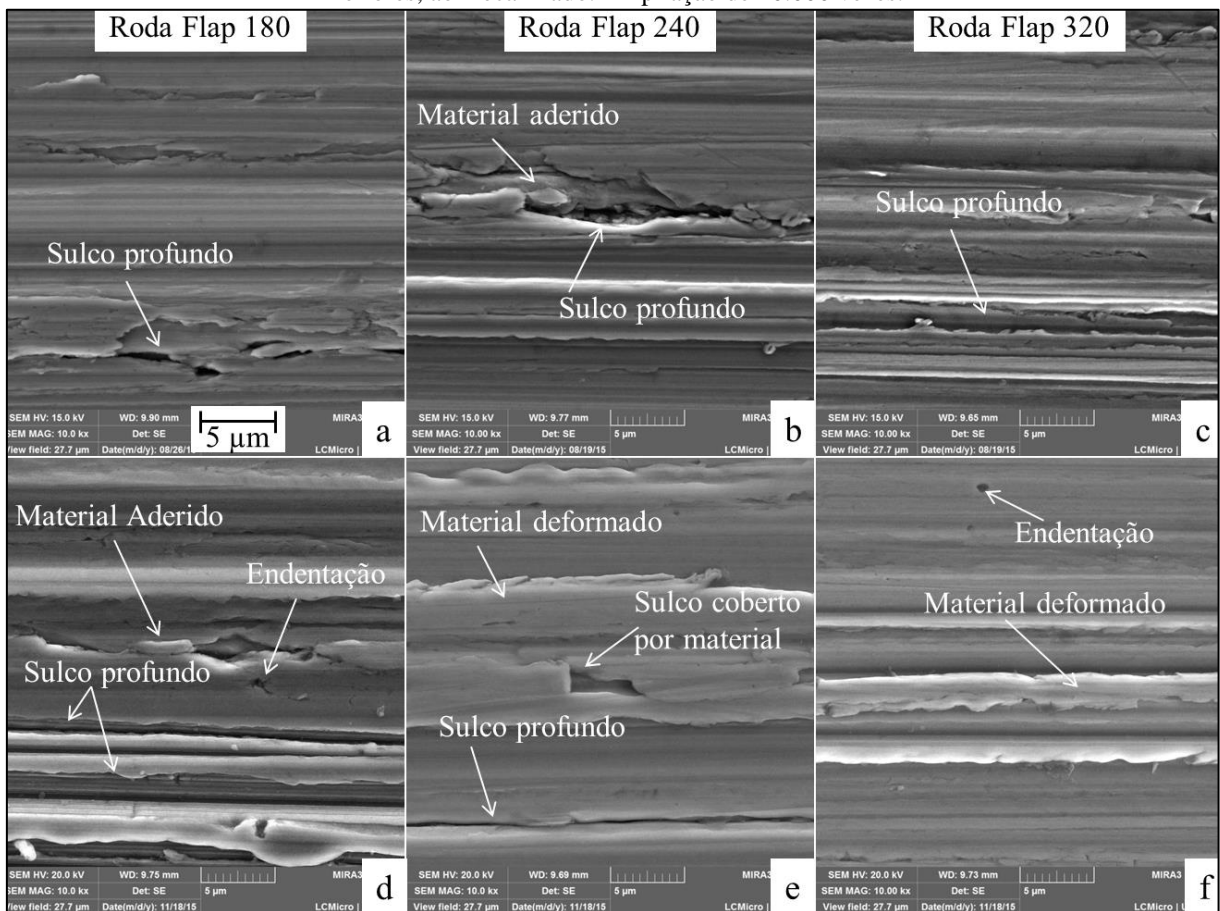
Também pode ser observado que a superfície resultante após a primeira etapa do processo (polimento com roda flap 180), tanto no manual (Figura 37-b) como no mecanizado (Figura 37-f), apresenta uma grande mudança na textura da superfície. Após essa etapa, a superfície se torna anisotrópica, com estrias definidas ao longo do comprimento do tubo. As etapas seguintes (polimento com a roda 240, Figuras 37-c e 37-g, e posteriormente 320, Figuras 35-d e 35-h) aparentam causar uma suavização dos riscos presentes na mesma.

Akhiani e Szpunar (2013) estudaram o efeito da rugosidade sobre a textura e seu efeito na oxidação em tubos de cobertura de Zircaloy-4, utilizados na indústria nuclear. Em seu estudo, os autores comparam superfícies geradas por um processo de polimento com grit 60 e um processo de retificação equivalente, e concluem que a diferença das texturas está apenas na magnitude dos efeitos superficiais, que são muito mais severos na retificação. Zhou et al. (2016) identificaram quatro tipos de defeitos em superfícies retificadas: sulcos profundos, material deformado plasticamente sobre a superfície, material aderido e endentações. Os mesmos foram identificados nas superfícies polidas por rodas flap e *buffing* e estão representados na Figura 38.

No processo de polimento manual, os sulcos profundos presentes na superfície gerada com o uso de rodas flap estão presentes em todas as etapas e possuem dimensões superiores às observadas no polimento mecanizado. Os eventos marcados como sulcos profundos na Figura 38 são eventos na superfície que apresentam grande profundidade em relação aos demais eventos existentes na mesma. Os sulcos profundos podem ou não estar cobertos por material aderido ou deformado plasticamente. Segundo Zhou et al. (2016), o surgimento de sulcos profundos está relacionado ao uso de grãos de maior diâmetro. A intensidade dos sulcos presentes na superfície gerada pelo processo manual pode estar associada à forma como o mesmo é conduzido, uma vez que o ferramental utilizado tanto no processo manual como no mecanizado é o mesmo. As dificuldades em controlar os parâmetros de processo,

como a força de contato e as condições ambientais desfavoráveis, como a presença de poeira e particulado gerado durante o processo, podem estar relacionadas à formação dos sulcos profundos. Em contrapartida, o processo mecanizado, conduzido em condições de maior controle, ambiental e de processo, apresenta sulcos mais suaves e menos profundos, sendo perceptível a diminuição das dimensões das marcas superficiais com a evolução das etapas de roda flap.

Figura 38 – Superfície gerada pelo uso de rodas flap. As imagens superiores referem-se ao processo manual; as inferiores, ao mecanizado. Ampliação de 10.000 vezes.



Fonte: O autor.

As deformações plásticas, por sua vez, são visíveis em todas as etapas do uso de rodas flap, tanto no processo manual quanto no processo mecanizado. No processo manual, é possível visualizar uma redução da quantidade de material deformado plasticamente entre as superfícies geradas pela roda flap de 180 e 240 (Figuras 38-a e 38-b), seguido por um aumento após o uso da roda flap 320 (Figura 38-c). De acordo Zhou et al. (2016), uma variação na força é capaz de aumentar a quantidade de material deformado presente na superfície, caso esta seja aumentada ou reduzida em relação à força necessária para gerar a

menor quantidade de material deformado. Como as etapas são realizadas por operadores diferentes durante o processo manual, é cabível supor que a força empregada por eles seja diferente. No processo mecânico verifica-se a diminuição da quantidade de material deformado sobre a superfície em comparação com a etapa anterior em todas as situações (Figuras 38-d, 38-e e 38-f). Zeilmann et al. (2015) estudaram a relação entre o comprimento de interferência e a força gerada no polimento com rodas flap. A força medida não apresentou alteração com a mudança do comprimento de interferência de um para dois milímetros. Como o comprimento de interferência utilizado no polimento mecânico foi de quatro milímetros para a roda flap 180 e 320 e 2,5 mm para a roda flap 240, é de se esperar que não haja alteração significativa na superfície em virtude de variação na força.

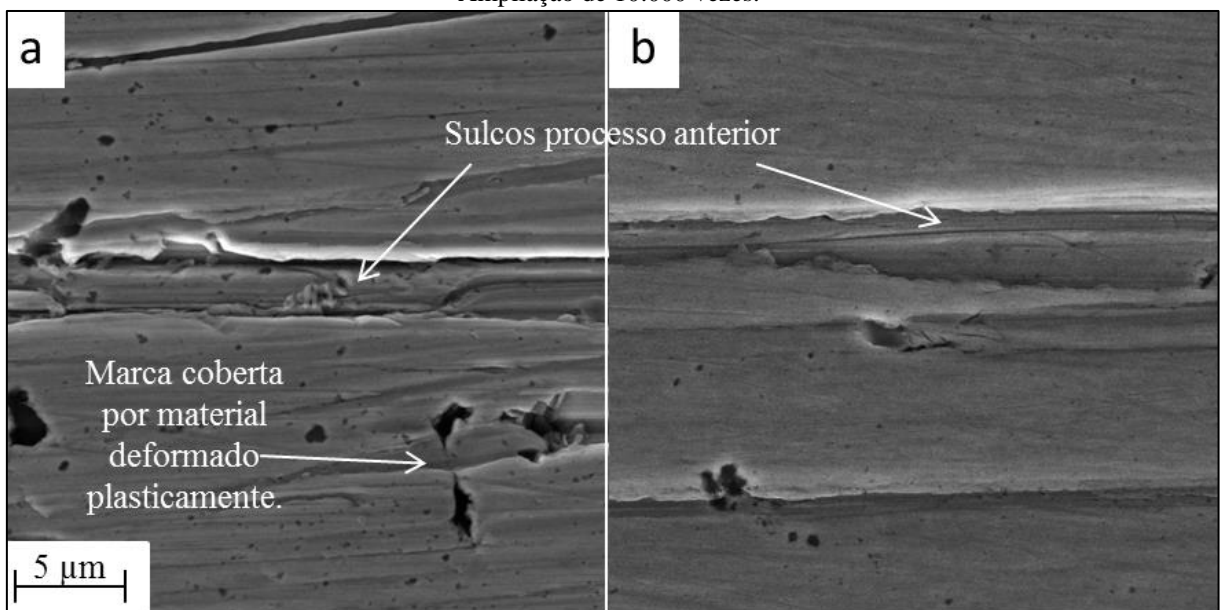
Uma análise mais detalhada do material deformado através da Figura 38 revela uma condição interessante da superfície. No processo de polimento, a etapa posterior deveria remover ou suavizar as marcas resultantes do processo anterior. No entanto, percebe-se que as marcas geradas pelo processo anterior não são removidas completamente. Em vez disso, o material deformado pelo processo posterior acaba cobrindo os sulcos presentes na superfície, induzindo à falsa conclusão de que o alisamento da superfície ocorreu pela remoção das mesmas. Essa situação está exemplificada na Figura 38-e.

As endentações e o material aderido são visíveis apenas em grandes ampliações. Estão presentes em praticamente todas as etapas que envolvem o uso de rodas flap. As endentações são impressões deixadas na superfície quando um grão abrasivo encravado na mesma é arrancado, sem executar movimento de corte, tendo como resultado uma marca com o formato similar à geometria da parte encravada do grão. O material aderido, por sua vez, é encontrado com menos frequência, sendo visualizado na Figura 38 apenas nas superfícies geradas por roda flap 240, para o processo manual (Figura 38-b), e no uso da roda flap 180 (Figura 38-d), no processo mecanizado. No entanto, há a possibilidade de este estar presente em todas as superfícies geradas por rodas flap, uma vez que a distinção entre o material aderido e o material deformado plasticamente não é trivial.

O processo de *buffing*, por sua vez, proporciona a geração de uma superfície com características diferentes observadas no polimento por rodas flap. A Figura 37, apresentada anteriormente, sugere um alisamento considerável da superfície após o *buffing*. Apesar de poderem ser observados riscos finos, grande parte da superfície apresenta uma característica plana, contrastando com a superfície obtida através do processo de polimento manual, no qual o padrão de riscos gerados pela ferramenta é bem característico.

A Figura 39, mostra em detalhes a superfície gerada pelo processo de *buffing*. Pode-se observar que o polimento manual (Figura 39-a) apresenta riscos devido ao *buffing*, enquanto a superfície gerada pelo processo mecanizado (Figura 39-b) praticamente não apresenta riscos. Os sulcos maiores provavelmente são resultantes das etapas anteriores ao *buffing*, possuindo espessura semelhante aos riscos observados no polimento com roda flap 180. Na superfície gerada pelo processo de polimento manual, é possível identificar marcas que parecem ter sido parcialmente cobertas por material deformado.

Figura 39 – Superfícies obtidas após o processo de *buffing*. A – Polimento manual; B – Polimento Mecânico. Ampliação de 10.000 vezes.



Fonte: O autor.

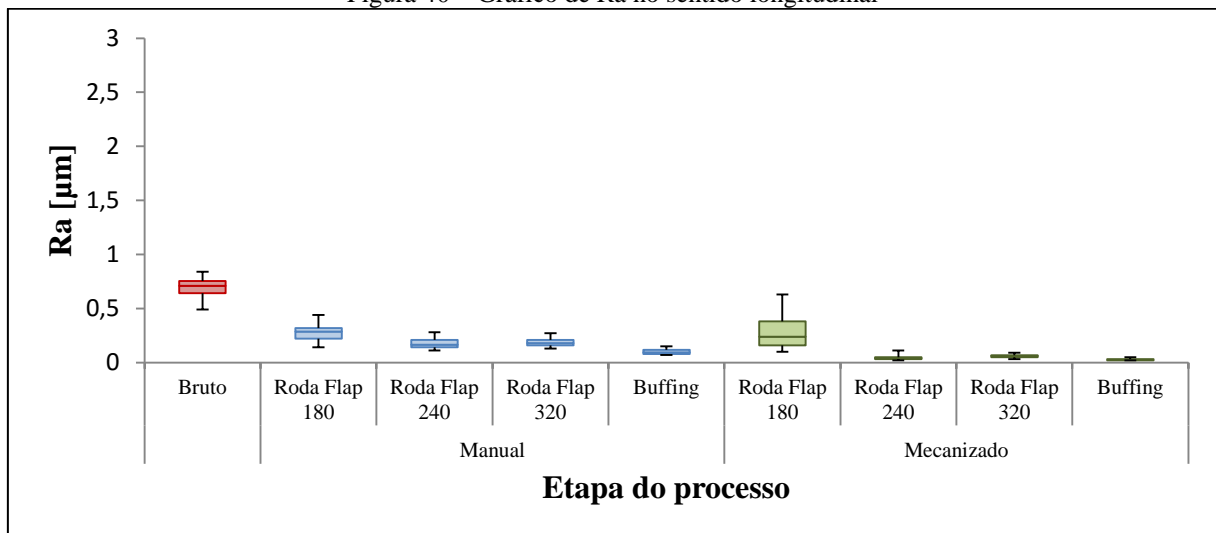
4.2 RUGOSIDADE BIDIMENSIONAL

As Figuras 40 e 41 apresentam os valores medidos de R_a no sentido longitudinal e transversal para a superfície da peça bruta e após cada etapa dos processos manual e mecânico.

Na comparação entre os valores medidos na peça bruta, tanto no sentido longitudinal quanto no sentido transversal, pode-se observar que a faixa de valores medidos é praticamente a mesma. Em relação aos resultados obtidos pelos processos manual e mecânico, é possível observar um comportamento ligeiramente diferente no sentido longitudinal (Figura 40), no qual o processo manual apresenta pouca variação de R_a durante o uso das rodas flap e apresenta diminuição na mesma com o uso do *buffing*. Em contrapartida, no processo mecânico (Figura 41), a rugosidade praticamente não varia se comparada aos resultados

obtidos com o uso das rodas 240, 320 e *buffing*. O processo mecânico aparenta ter uma magnitude de Ra no sentido longitudinal inferior ao obtido com o processo manual. O fato de Ra ser levemente maior nas etapas de polimento manual pode estar atrelado a uma possível dificuldade do operador em manter a peça paralela à direção de avanço durante o processo. Como as medidas são realizadas na direção longitudinal ao tubo, é de se esperar que o perfilômetro meça alguns poucos sulcos, passando a maior parte do período de medição dentro de um sulco ou em cima de um vale. Dessa forma, quanto maior for o ângulo do eixo de rotação da ferramenta em relação à direção de avanço, maior será a quantidade de sulcos contida no perfil medido e, conseqüentemente, maior será o valor de Ra.

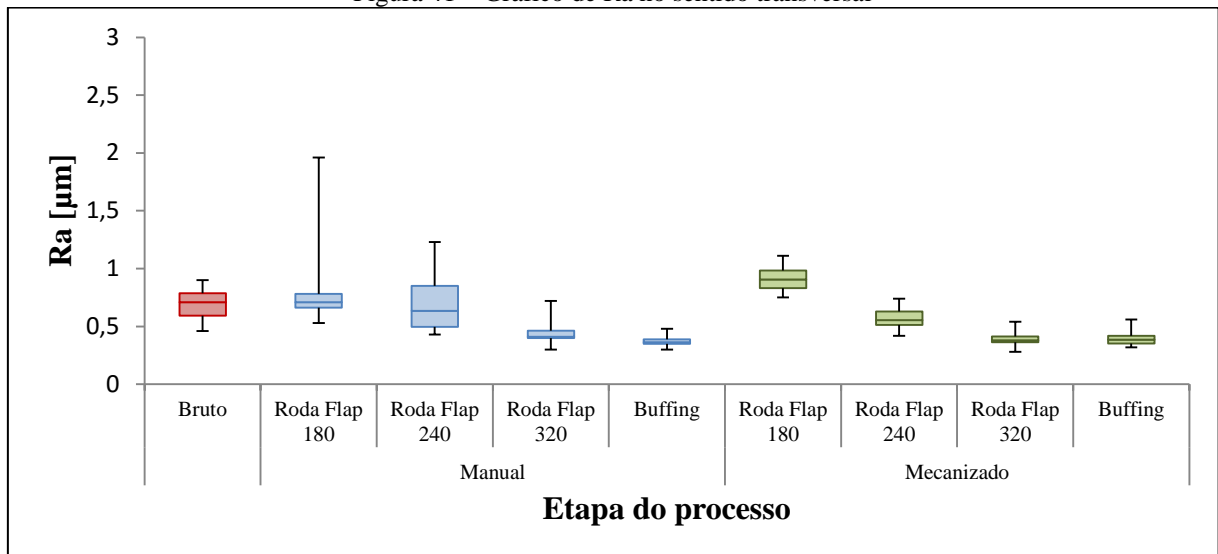
Figura 40 – Gráfico de Ra no sentido longitudinal



Fonte: O autor.

A principal diferença de Ra transversal (Figura 41) entre o processo mecânico e o manual reside na roda flap 180. Os valores medidos para o processo manual são ligeiramente menores que os obtidos pelo processo mecanizado. Em contrapartida, o comportamento observado é semelhante para as três últimas etapas do processo, que consiste na diminuição dos valores de Ra após cada operação. Os valores obtidos no uso da roda flap 320 e do pano de *buffing* não apresentam variação gráfica significativa dos valores de Ra, apesar das diferenças na morfologia da superfície observada, o que sugere que o processo de *buffing* atua em uma escala muito menor do que o processo de rodas flap e que, apesar de alterar as características da superfície, não se mostra capaz de diminuir a média dos eventos presentes na mesma.

Figura 41 – Gráfico de Ra no sentido transversal



Fonte: O autor.

Foram realizadas ANOVAS para validar estatisticamente as análises baseadas nos gráficos de rugosidade. As Tabelas 5 e 6 apresentam, respectivamente, os resultados da comparação de Ra para a etapa de polimento de rodas flap 180 e *buffing*, obtidos através das medições realizadas no sentido transversal.

Tabela 5 – ANOVA – Roda Flap 180 – Manual x Mecanizado – [Ra] – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 180	0,05	1	0,05	0,70	4,10	0,41	Não significativa
Erro	2,78	38	0,07				
Total	2,83	39					

Fonte: O autor.

Tabela 6 – ANOVA – *Buffing* – Manual x Mecanizado - [Ra] – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 180	0,00	1	0,00	1,90	4,10	0,18	Não significativa
Erro	0,09	38	0,00				
Total	0,09	39					

Fonte: O autor.

A ANOVA da Tabela 5 aponta que os valores medidos de Ra para o polimento com rodas flap 180 no sentido transversal, tanto para o processo manual, como para o mecanizado, são estatisticamente iguais. Essa informação contrapõe a observação realizada, embasada na Figura 41, de que os valores observados de Ra para o polimento com rodas flap 180 seriam

diferentes entre os processos mecânico e manual. Em contrapartida, a ANOVA da Tabela 6 confirma a igualdade observada no gráfico da figura 41 entre as etapas do processo de *buffing* manual e mecanizado. Também foram realizadas ANOVAS comparando os resultados obtidos entre as etapas de polimento com rodas flap 320 e *buffing* para o processo manual (Tabela 7) e mecanizado (Tabela 8).

Tabela 7 – ANOVA – Roda 320 x *Buffing* – [Ra] – Processo Manual – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 320 x <i>Buffing</i>	0,04	1	0,04	9,13	4,10	0,004	Significante
Erro	0,19	38	0,00				
Total	0,23	39					

Fonte: O autor.

Tabela 8 – ANOVA – Roda 320 x *Buffing* – [Ra] – Processo Mecanizado – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 320 x <i>Buffing</i>	0,00	1	0,00	0,00	4,10	0,95	Não significativa
Erro	0,11	38	0,00				
Total	0,11	39					

Fonte: O autor.

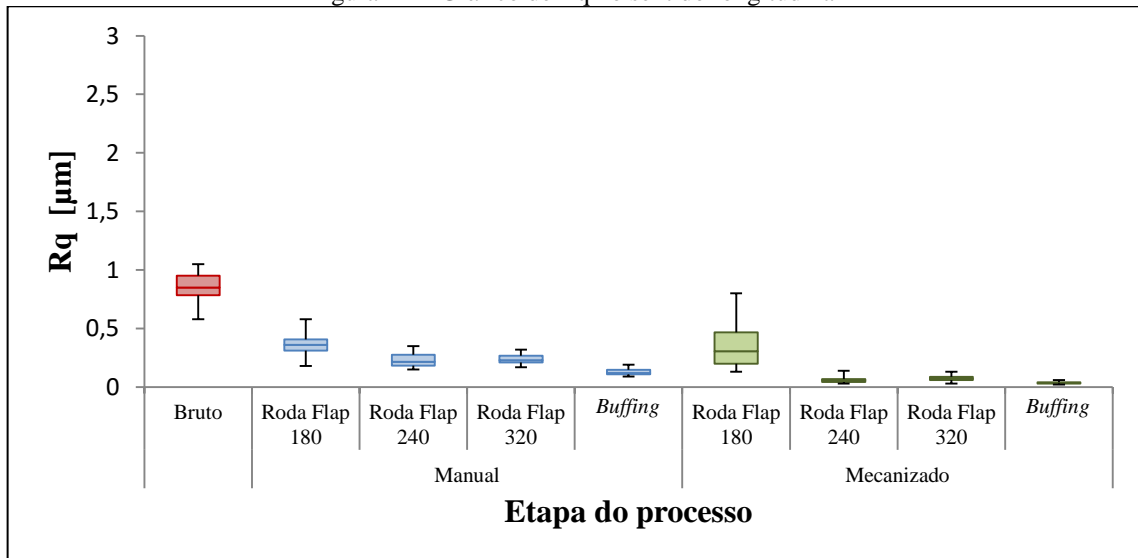
O resultado da ANOVA da tabela 7 aponta diferença estatística entre os valores de Ra medidos após as etapas de polimento manual por roda flap 320 e *buffing*. No entanto, a ANOVA da tabela 8, realizada para comparar as superfícies geradas pelas etapas de polimento mecanizado por roda flap 320 e *buffing*, mostra que as superfícies geradas por essas etapas apresentam valor de Ra estatisticamente equivalente.

Esses resultados, divergentes entre si, chamam a atenção. As observações realizadas durante a análise por MEV-EC, apresentadas anteriormente, sugerem a existência de diferenças entre a superfície gerada por roda flap 320 e o processo de *buffing*, tanto as geradas de forma manual quanto as geradas de forma mecanizada. Além disso, a ANOVA da tabela 6 confirma que as superfícies geradas pela etapa de *buffing* são equivalentes. Os resultados sugerem que o processo de *buffing* teve atuação diferente no processo manual e mecanizado. No processo manual, essa etapa ocasionou uma redução da média dos eventos verticais presentes na superfície, enquanto no processo mecanizado o processo de *buffing* não alterou a média dos eventos. Essa redução de Ra para o processo manual pode estar vinculada a fatores de entrada, como o número de passes, comprimento de interferência, e velocidade de avanço da peça, que variam constantemente de acordo com o operador. Já para o processo

mecanizado, onde os parâmetros de entrada são bem definidos e o processo apresenta um maior controle, é possível concluir que os parâmetros e condições utilizadas para o processo de *buffing* não causam redução de Ra. No entanto, as imagens de MEV-EC sugerem que, apesar de não haver diferença em termos de Ra, existem diferenças morfológicas entre as duas superfícies.

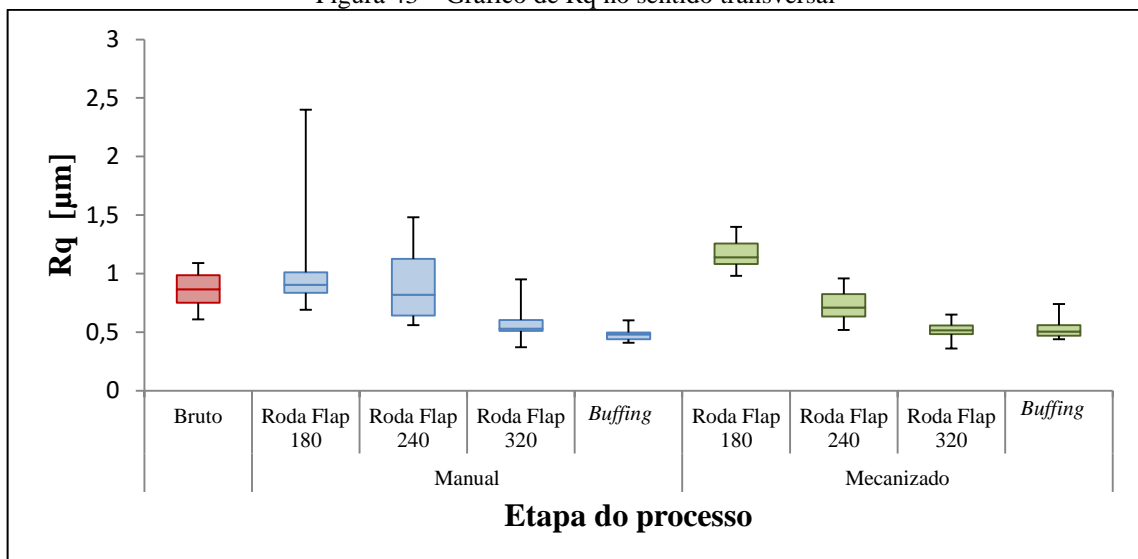
O segundo parâmetro de rugosidade estudado foi Rq. Os valores mensurados no sentido longitudinal e transversal estão representados, respectivamente, nas Figuras 42 e 43.

Figura 42 – Gráfico de Rq no sentido longitudinal



Fonte: O autor.

Figura 43 – Gráfico de Rq no sentido transversal



Fonte: O autor.

Como Rq sofre maior influência de eventos isolados em comparação a Ra, como picos mais agudos e vales mais profundos, era provável que os valores encontrados fossem ligeiramente superiores aos apresentados pelo parâmetro anterior. Com exceção deste fato, o comportamento apresentado no gráfico das figuras 42 e 43 por Rq segue o mesmo comportamento apresentado por Ra. No entanto, a ANOVA da tabela 9, mostra a existência de diferenças entre os resultados obtidos nas etapas de *buffing* para o processo manual e mecanizado, medidas no sentido transversal. Essa diferença pode ser causada pela presença de picos ou vales mais acentuados em comparação com a média na superfície gerada mecanicamente.

Tabela 9 - ANOVA – *Buffing* – Manual x Mecanizado - [Rq] – Transversal

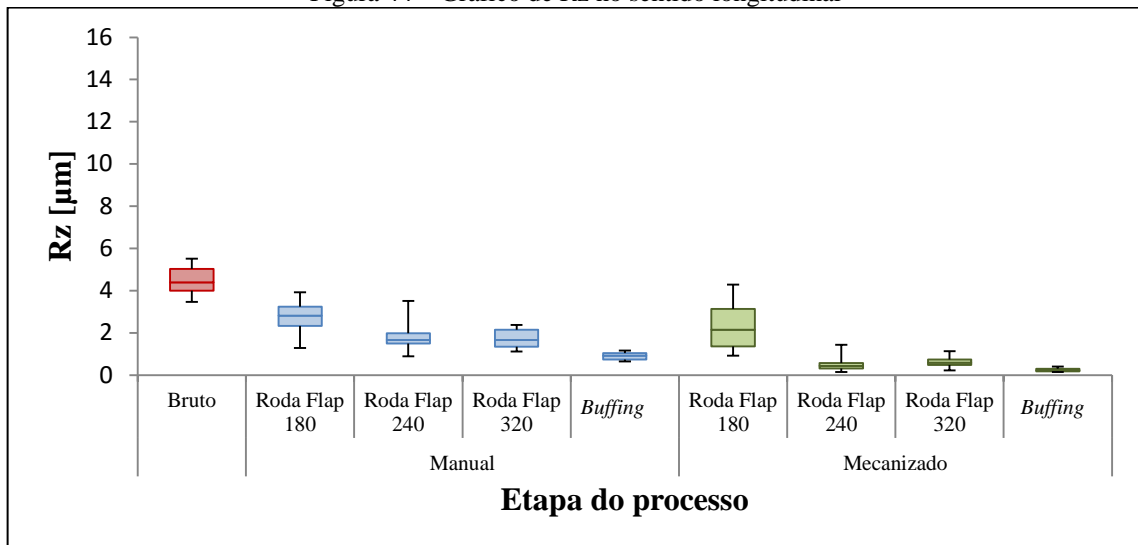
Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
<i>Buffing</i>	0,02	1	0,02	4,61	4,10	0,038	Significante
Erro	0,13	38	0,00				
Total	0,14	39					

Fonte: O autor.

As ANOVA realizadas para Rq comparando as superfícies geradas nas etapas de polimento com roda flap 320 e *buffing*, para o processo mecanizado e manual, no sentido transversal, apresentaram os mesmos resultados obtidos para Ra. Existe diferença para o processo manual, porém não existe diferença para a superfície gerada pelo processo mecânico. As ANOVAS para Rq podem ser observadas no Anexo D.

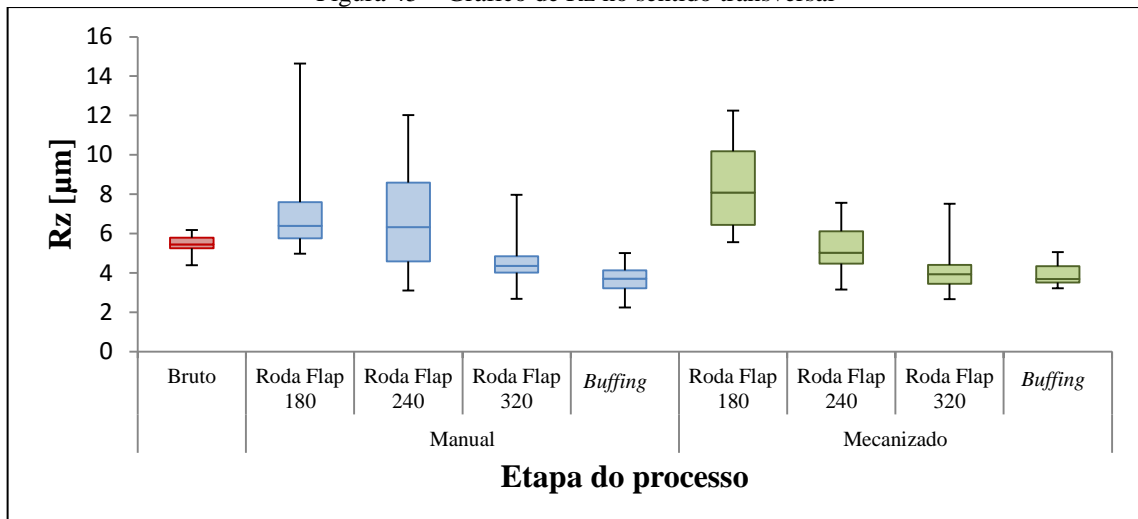
Os gráficos com os valores medidos de Rz, longitudinalmente e transversalmente, são apresentados nas Figuras 44 e 45, respectivamente. Novamente o comportamento observado segue a mesma tendência observada para Ra e Rq, no entanto, existem algumas diferenças, a saber: em comparação com Rq, os valores observados nas medições longitudinais de Rz são, no mínimo, cinco vezes superiores. Isso significa que a maior distância de pico a vale dentro do comprimento de amostragem é mais de cinco vezes o valor da média quadrática. Além disso, existe uma maior dispersão dos valores mensurados, o que dificulta afirmar, pela análise gráfica, que os valores medidos são diferentes uns dos outros. Uma maior amplitude de dispersão é observada nas medições transversais, nas quais os valores medidos nas etapas de polimento com rodas flap 180 e 240, para o processo manual, e com a roda flap 180, para o processo mecânico, são superiores aos valores observados na superfície bruta.

Figura 44 – Gráfico de Rz no sentido longitudinal



Fonte: O autor.

Figura 45 – Gráfico de Rz no sentido transversal



Fonte: O autor.

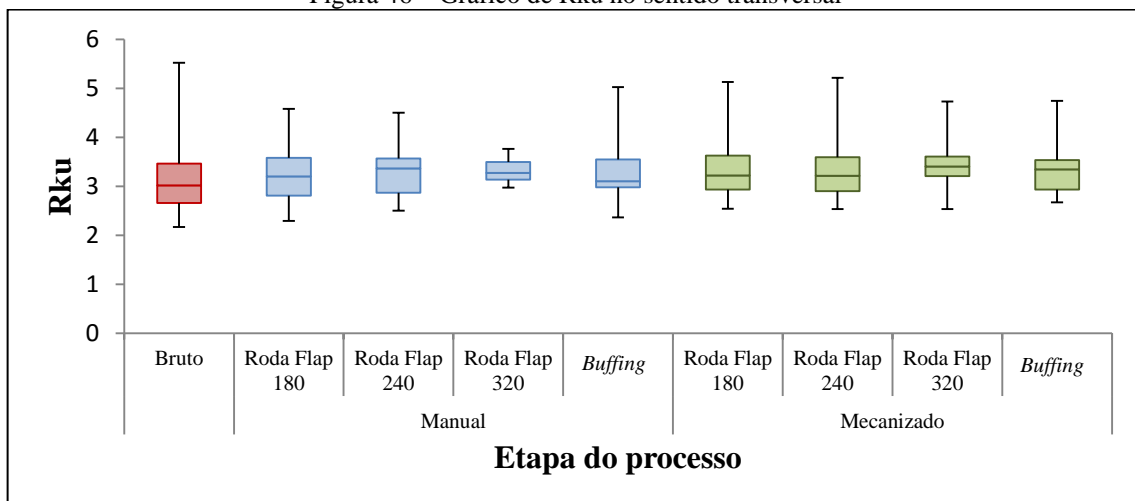
O efeito do aumento de Rz nas etapas iniciais do processo pode ser explicado pela necessidade de remover todos os tipos de marcas presentes nas superfícies e pelo fato da mudança de característica morfológica da mesma. A superfície bruta apresenta eventos com uma direção ligeiramente preferencial, com a maioria dos elementos distribuídos aleatoriamente ao longo da mesma. Já a superfície gerada por rodas flap apresenta uma característica fortemente orientada composta de sulcos e picos alinhados. A roda flap 180 tem como objetivo remover todas as marcas, presentes no tubo, incluindo as mais severas. Essas marcas podem apresentar profundidades e extensões diferentes, uma vez que a superfície bruta apresenta uma superfície texturizada, composta por marcas de diferentes profundidades

e material deformado plasticamente, distribuídos de forma aleatória pela superfície. Dessa forma, a remoção de material pela roda flap 180 deve ser severa, de maneira a gerar uma superfície com eventos de magnitude conhecidos, para que as etapas posteriores possam realizar a diminuição da rugosidade. As superfícies geradas pelas rodas flap, por sua vez, apresentam picos e vales em sucessão alinhados paralelamente a direção de avanço da ferramenta o que facilita que picos mais elevados e vales mais profundos estejam presentes na medição transversal do perfil medido, resultando em um maior valor de Rz.

A dispersão elevada medida no sentido transversal pode ter como origem sulcos mais profundos gerados durante o polimento com roda flap 180, que não são removidos pelo polimento com as rodas posteriores e pelo processo de *buffing*. Como o parâmetro Rz representa a distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de amostragem, eventos residuais isolados têm grande influência na medição do mesmo. Dessa forma, apenas uma marca profunda presente dentro do comprimento de medição de quatro milímetros (foram utilizados cinco comprimentos de amostragem de 0,8 mm) é o suficiente para influenciar o resultado de Rz. Apesar disso as ANOVAS realizadas para Rz seguem o mesmo caminho observado para Ra. As análises estão no Anexo D.

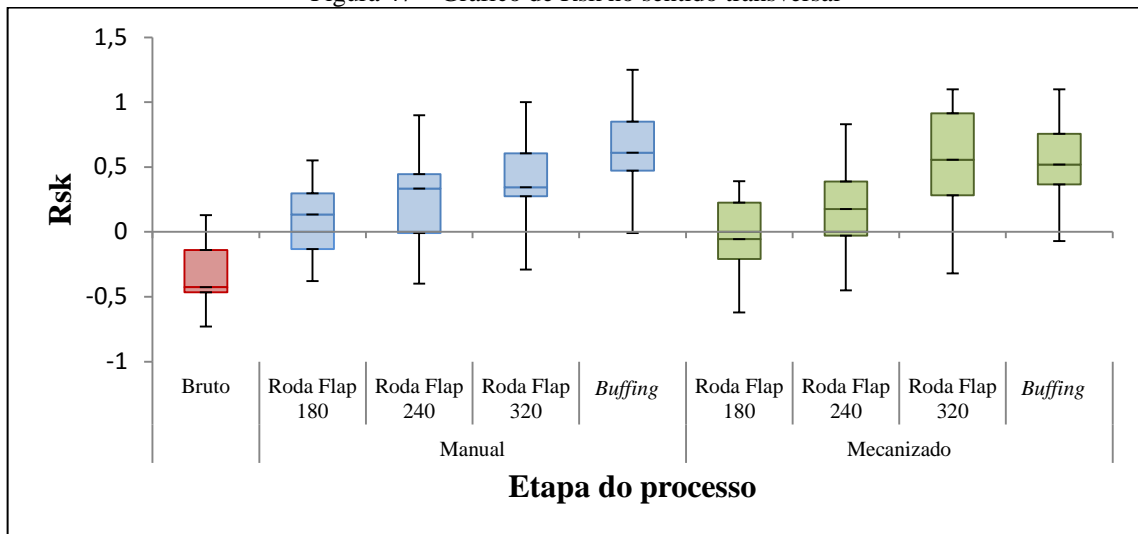
Nas Figuras 46 e 47 são apresentados os valores transversais dos parâmetros Rku e Rsk, respectivamente. Os gráficos obtidos através da análise dos valores longitudinais são apresentados no Anexo D. Ambos os parâmetros são dedicados à caracterização da forma do perfil da superfície. As medições efetuadas de forma longitudinal medem os eventos ao longo de seu comprimento, tendendo sempre a fornecer valores de uma superfície plana e semelhante entre si.

Figura 46 – Gráfico de Rku no sentido transversal



Fonte: O autor.

Figura 47 – Gráfico de Rsk no sentido transversal



Fonte: O autor.

Os valores apresentados para Rku na Figura 46, ao serem confrontados com as informações apresentadas no capítulo 2, sugerem que todas as superfícies geradas pelo processo de polimento possuem um comportamento gaussiano, apresentando picos nem muito agudos nem arredondados. Essa informação, associada aos valores obtidos de Ra e Rq, pode ser indicativa de que a magnitude dos eventos verticais da superfície foi diminuída e de que as diferentes etapas do processo não alteram o padrão de textura do perfil. A diminuição de Ra e Rq de uma etapa para outra e a igualdade de Rku entre as mesmas sugerem que cada nova etapa substitui as marcas geradas pela etapa anterior.

A informação contida na Figura 47 sugere um aumento em Rsk a cada etapa do processo manual. Para o processo mecanizado, Rsk aumenta a cada etapa de polimento com rodas flap, mantendo-se constante após a etapa de *buffing*. Esse aumento em Rsk sugere que a superfície acaba por adquirir característica de picos ligeiramente mais agudos e vales mais rasos a cada passe. Não há diferença significativa entre o processo mecanizado e o manual.

Segundo Bet (1999), o parâmetro Rsk pode ser utilizado em conjunto com Ra para distinguir superfícies obtidas por métodos de fabricação diferentes. Ao comparar a superfície obtida com o uso da roda flap 320 e *buffing*, Rsk é praticamente o mesmo tanto para o processo manual como para o mecanizado. O mesmo ocorre com Ra e Rq, o que sugere que as superfícies obtidas pelo processo de rodas flap 320 e *buffing* são muito semelhantes.

No entanto, fica muito difícil dizer que os eventos medidos na superfície gerada por *buffing* são realmente causados por esse processo. Conforme comentado no capítulo 2, o tamanho comum de raio de ponta do estilete utilizado em perfilômetros mecânicos tipo

apalpador é de 5 μm . Levando-se em conta que o tamanho médio de grão para uma roda flap 320 (P320), de acordo com a norma FEPA, é de $46,2 \mu\text{m} \pm 1,5$, e que o mesmo reveste a ferramenta, o que configura remoção abrasiva principalmente por dois corpos (ver capítulo 2), supõe-se que as marcas deixadas sobre a superfície podem ser mensuradas pelo perfilômetro. Em contrapartida, o grão contido em compostos abrasivos utilizados no *buffing* geralmente apresenta dimensões inferiores às observadas no abrasivo de ferramentas revestidas. Dessa forma, as impressões deixadas na superfície por esse processo podem ser muito pequenas, possuindo espessuras estreitas que podem ser inferiores ao raio de ponta do estilete, o que tornaria impossível mensurá-las sem a indução de erros significativos com o uso de perfilômetros tipo apalpador. As micrografias da figura Figura 39 reforçam esse entendimento, uma vez que é possível observar marcas na superfície gerada por *buffing*, principalmente no polimento manual, com dimensões muito inferiores às observadas na superfície gerada pelo uso da roda flap 320 (Figura 38).

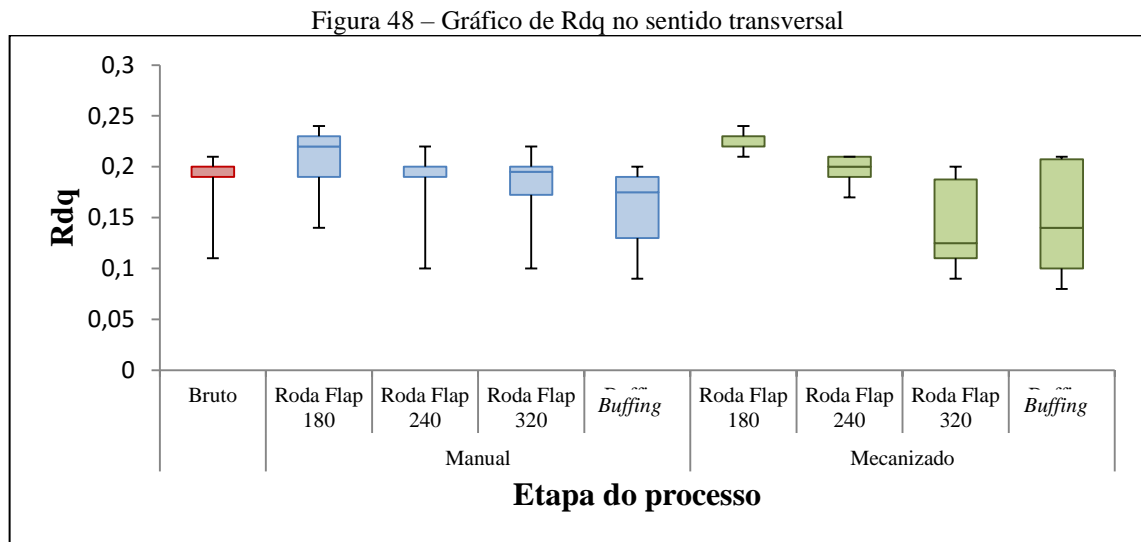
Uma das características do processo de *buffing* é a superfície brilhante resultante após o processo (Figura 34, capítulo 3). Chadwick e Kentridge (2015) comentam que a rugosidade apresenta duas escalas, meso e microescala. Para esses autores, as alterações na percepção do brilho ocorrem em nível de microescala, possível faixa de atuação do *buffing*. Uma vez que os parâmetros R_a , R_{ku} e R_{sk} são parâmetros que se baseiam em eventos verticais, seria plausível supor que os eventos mensurados no *buffing* são picos e vales produzidos pela roda flap 320 em mesoescala (baixa frequência), e supor que o *buffing* atua numa escala inferior, a microescala (alta frequência). Dessa forma, o processo de *buffing* alteraria muito pouco a geometria do perfil de rugosidade mensurado, pois atuaria em eventos de menor dimensão contidos no mesmo, melhorando o acabamento do perfil de rugosidade. Essa divisão da rugosidade em duas escalas diferentes não é comum para processos de remoção mecânica, porém, é de comum utilização para processos de eletropolimento. Segundo Pendyala et al. (2014), o processo de eletropolimento é dividido em nivelamento anódico e microalisamento. O primeiro atuaria na redução de picos, nivelando a superfície (mesoescala). O segundo atuaria na supressão de defeitos superficiais e na orientação cristalográfica da superfície (microescala). Ainda segundo Pendyala et al. (2014), a influência individual dos mesmos não pode ser mesurada com rugosímetros tradicionais, pois necessitam de uma grande resolução lateral. Os autores recomendam o uso de microscopia de força atômica com o auxílio do método de densidade espectral de potência.

As análises de variância realizadas para R_{ku} e R_{sk} não mostraram variações estatisticamente significativas nas medições efetuadas no sentido transversal, tanto para o

processo manual como para o mecanizado, seja na comparação da superfície gerada por *buffing*, entre os processos, ou entre as etapas de polimento com rodas flap 320 e *buffing*. Os resultados estão no Anexo D.

O último parâmetro bidimensional analisado, R_{dq}, está representado para a medição transversal na Figura 48. Não é possível afirmar, pelo gráfico, que existe diferença entre R_{dq} nas diferentes etapas do processo manual. No entanto, no processo mecanizado, existe uma variação de R_{dq}. Este é maior para a superfície gerada pela roda flap 180, apresentando uma redução até a roda flap 320, e mantendo-se constante no processo de *buffing*.

O gráfico aponta uma possível diferença entre as superfícies geradas após o uso da roda flap 320. Apesar da grande dispersão apresentada para os resultados do processo mecanizado, é possível observar que a maioria dos valores medidos no processo mecanizado é inferior aos observados no processo manual.



Fonte: O autor.

As Tabelas 10, 11 e 12, apresentam os resultados das ANOVAS realizadas para comparar as etapas entre os processos de polimento por roda flap 180 e 320, assim como o *buffing*, respectivamente, no sentido transversal de medição.

Tabela 10 – ANOVA – Roda Flap 180 – Manual x Mecanizado - [R_{dq}] – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 180	0,00	1	0,00	7,50	4,10	0,01	Significante
Erro	0,02	38	0,00				
Total	0,03	39					

Fonte: O autor.

Tabela 11 – ANOVA – Roda Flap 320 – Manual x Mecanizado - [Rdq] – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 180	0,02	1	0,02	17,08	4,10	0,00	Significante
Erro	0,05	38	0,00				
Total	0,07	39					

Fonte: O autor.

Os resultados das análises de variâncias confirmam a diferença entre os processos na superfície após o polimento com roda flap 180, mostram que existe diferença entre os valores de Rdq para a superfície resultante após o uso da roda flap 320 e apontam que não existe diferença entre as superfícies geradas por *buffing*.

Tabela 12 – ANOVA – *Buffing* – Manual x Mecanizado - [Rdq] – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
<i>Buffing</i>	0,00	1	0,00	1,44	4,10	0,24	Não significante
Erro	0,09	38	0,00				
Total	0,09	39					

Fonte: O autor.

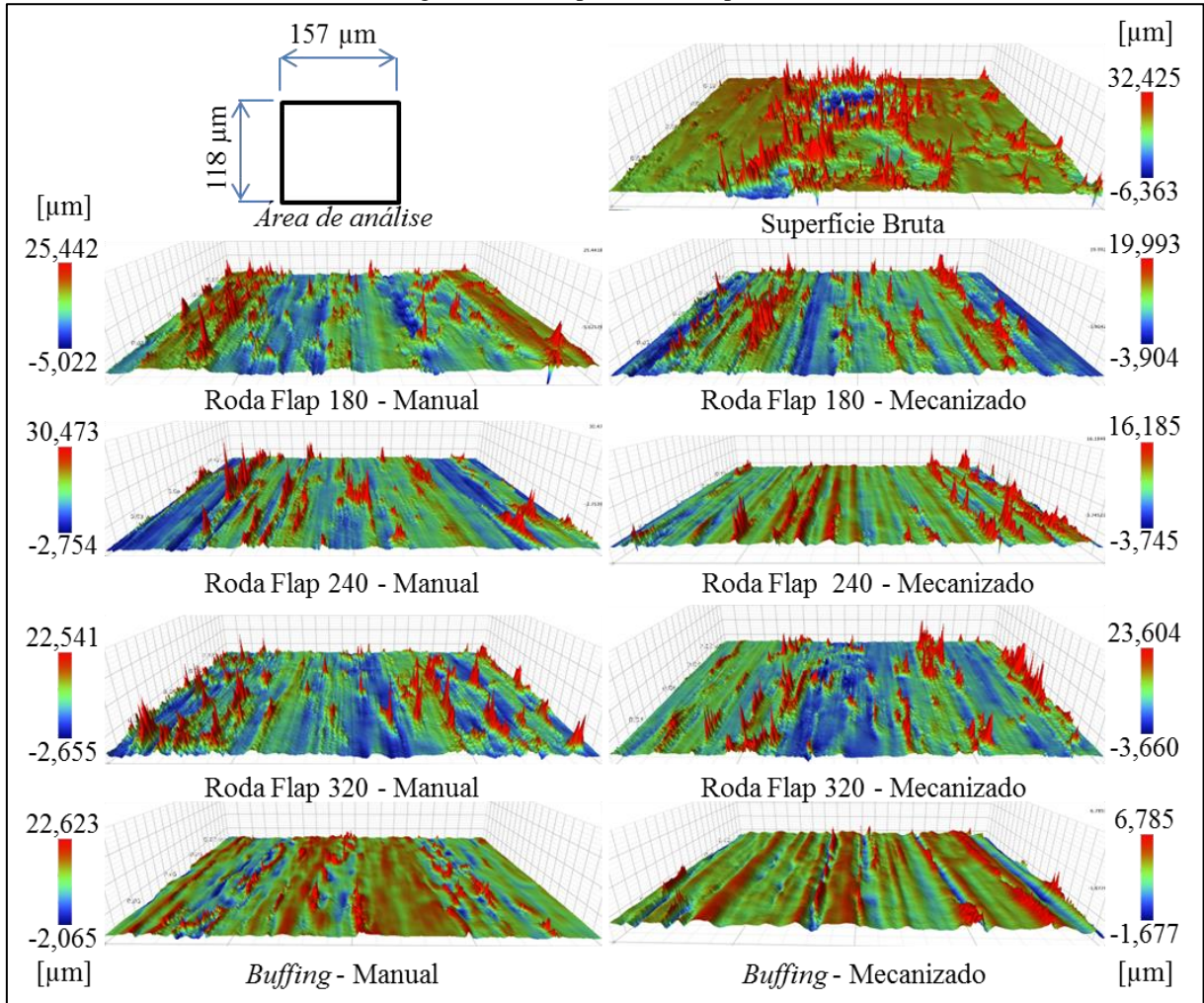
De acordo com Kuzinovski et al. (2009), o aumento de Rdq está relacionado à diminuição da refletividade da superfície, assim como ao aumento no atrito, desgaste, elasticidade da superfície, barulho e vibração. O argumento vem ao encontro do entendimento apresentado anteriormente para Rsk e Rku. Os valores de Rdq sugerem que não deveria haver diferença em termos de brilho e refletividade da superfície. Uma vez que os valores de rugosidade medidos não apresentam diferenças, a possibilidade do processo de *buffing* atuar apenas nos eventos de alta frequência do perfil de rugosidade é reforçada. Isso explicaria a diferença perceptível de brilho na superfície gerada após o processo de *buffing* em relação à superfície gerada pela roda flap 320.

4.3 PARÂMETROS DE SUPERFÍCIE

Os parâmetros de superfície permitem que, após sua medição, seja possível reconstruir uma réplica da topografia mensurada. Na Figura 49 é apresentada a reconstrução da superfície, gerada com base nos dados obtidos após a medição por interferometria de luz branca das superfícies resultantes de cada etapa do processo de polimento manual e

mecanizado. Isso permite que seja possível comparar as superfícies medidas com a superfície real, obtida com o uso de microscopia por MEV-EC.

Figura 49 – Comparativo da superfície



Fonte: O autor.

A superfície gerada pela microscopia eletrônica de luz branca é condizente com as micrografias obtidas por MEV-EC. Como pode ser observado, o perfil da superfície bruta apresenta regiões planas com crateras, enquanto os perfis gerados pelo polimento com as rodas flap 180, 240 e 320 apresentam riscos e sulcos orientados. Também se verifica que a superfície obtida através do *buffing* apresenta uma topografia mais regular, com maior quantidade de áreas planas e menor quantidade de picos em relação à registrada após o uso das rodas flap.

No entanto, a análise do perfil gerado sugere cautela na interpretação dos valores obtidos através do processo de *buffing*. As imagens da Figura 49 sugerem a existência de diferenças significativas entre as superfícies geradas pelo processo manual em comparação

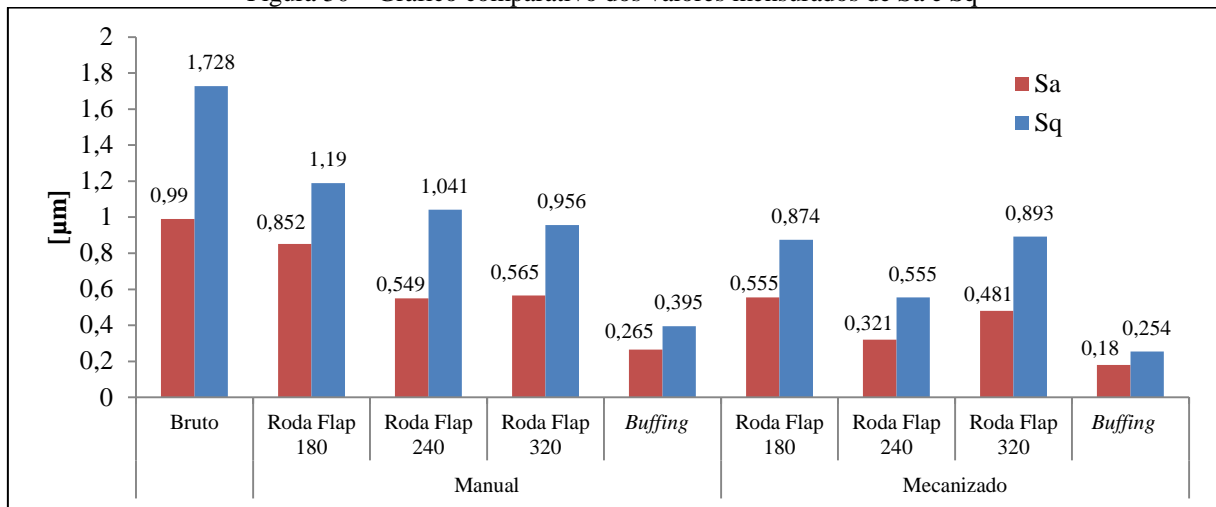
com o processo mecanizado, relacionadas à dimensão dos maiores eventos verticais. Uma a escala da imagem registra o valor de maior pico para o processo de *buffing* manual quase quatro vezes superior ao registrado no mecanizado. Também é possível observar diferenças entre os valores máximos obtidos para a etapa de rodas flap 240, onde os valores obtidos para o processo manual são duas vezes o valor registrado para o processo mecanizado.

A análise da Figura 49, isoladamente, não permite maiores observações. Desta forma as dimensões dos eventos da superfície serão estudados através dos parâmetros de superfície S_a , S_q , S_p , S_v , S_z , S_{sk} e S_{ku} , na sequência deste capítulo. As informações obtidas através desses parâmetros devem ser confrontadas com as imagens das micrografias e os resultados obtidos anteriormente através da medição de rugosidade bidimensional. O cruzamento dessas informações deve auxiliar o entendimento da diferença entre os eventos verticais encontrada na etapa de *buffing* para os dois processos.

Na Figura 50 são apresentados os resultados obtidos através da medição de S_a e S_q . Ambos os parâmetros apresentam o mesmo comportamento para cada processo: no processo manual, ambos diminuem de magnitude a cada nova etapa do polimento; em contrapartida, no processo mecânico, ocorre a diminuição de S_a e S_q nas etapas de polimento com roda flap 180 e 240, seguido de um aumento com o uso da roda flap 320, e nova queda dos valores após o *buffing*. Os parâmetros espaciais S_a e S_q apresentam um comportamento semelhante ao observado em R_a e R_q . Uma vez que S_a e S_q são gerados a partir da varredura da superfície, era de se esperar que os mesmos demonstrassem algumas semelhanças com seus equivalentes bidimensionais, uma vez que a varredura da superfície é construída a partir da junção de vários perfis bidimensionais que compõe a superfície.

Em contrapartida, o comportamento observado na análise dos parâmetros S_a e S_q após o processo de *buffing* é diferente do comportamento observado para os parâmetros bidimensionais R_a e R_q . Os parâmetros espaciais sugerem uma redução de mais de 50% no valor das médias, na comparação das superfícies geradas pelo processo de polimento com rodas flap 320 com as geradas pelo processo de *buffing*. Por sua vez, os parâmetros bidimensionais mensurados no sentido transversal não acusam diferença entre essas duas superfícies. Dong et al. (1994) comentam que tanto R_q como S_q são sofrem influência do tamanho da amostra. As dimensões da área amostral usada para a medição de S_q é de 0,16 mm x 0,16 mm, enquanto o comprimento amostral utilizado para a medição de R_q é de 0,8 mm. Essa diferença no tamanho da amostra pode ser a responsável pela mudança de comportamento entre os parâmetros bidimensionais e os espaciais.

Figura 50 – Gráfico comparativo dos valores mensurados de Sa e Sq



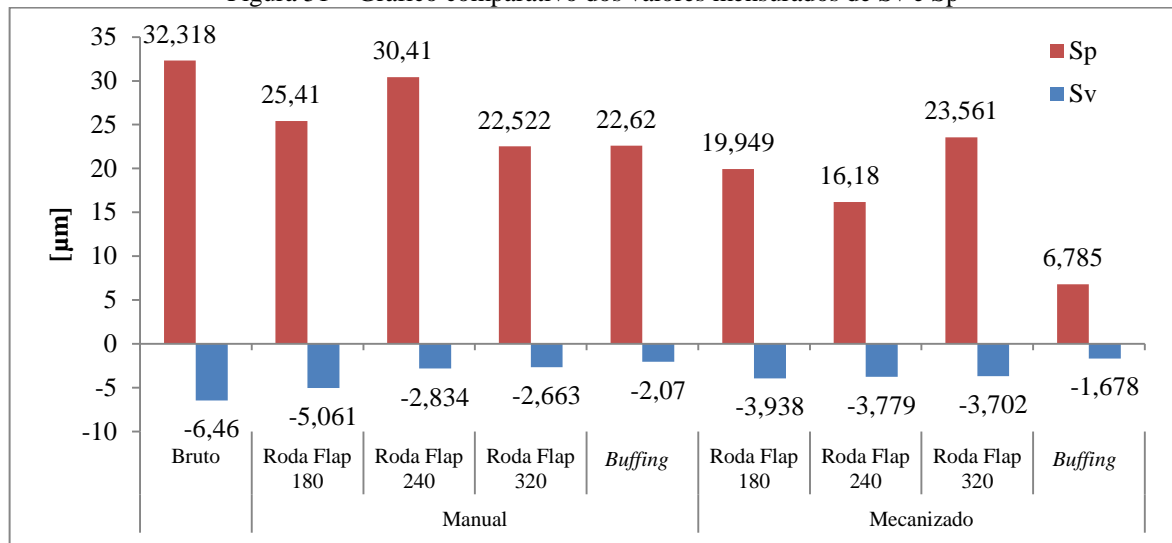
Fonte: O autor.

Para Blunt e Jiang (2003), Sq representa apenas o desvio padrão estatístico da superfície mensurada. Isso significa que as superfícies geradas pelo processo de *buffing* são mais homogêneas que a bruta e as geradas pelo processo de polimento com rodas flap. Leach (2013) comenta que muitos modelos utilizados para relacionar a refletividade de uma superfície estão relacionados com Sq. O comportamento desse parâmetro indica que a superfície gerada por *buffing* seria mais refletiva se comparada ao processo de roda flap 320. Esse comportamento de refletividade pode ser observado na Figura 34 do capítulo 3.

Os valores mensurados para Sv e Sp são apresentados na Figura 51. As medições apontam valores de Sp muito superiores aos valores obtidos para Sv, o que indica que a superfície apresenta picos agudos provavelmente causados pela medição de material recalçado durante a passagem dos grãos. Essa teoria é reforçada por uma análise dos perfis apresentados na Figura 49, anteriormente. Pode-se observar que os eventos de maior amplitude encontram-se dispostos em linhas, de maneira a caracterizar o contorno do sulco causado pela passagem do grão. No entanto, os valores de Sp são eventos isolados e, quando confrontados com o perfil gerado e com os valores obtidos para Sa e Sq, percebe-se que não são condizentes com a totalidade da superfície.

Os valores de Sv, por sua vez, são mais próximos da média da superfície. No polimento por roda flap, indicam os sulcos gerados pelos grãos abrasivos. No *buffing*, Sv provavelmente é regido por eventos residuais, sendo condizente com os sulcos gerados pelo uso de rodas flap. Essa característica é bastante visível no polimento manual, em que os valores de Sv, medidos após o processo de *buffing*, são muito semelhantes aos eventos medidos no uso das rodas flap 240 e 320.

Figura 51 – Gráfico comparativo dos valores mensurados de Sv e Sp

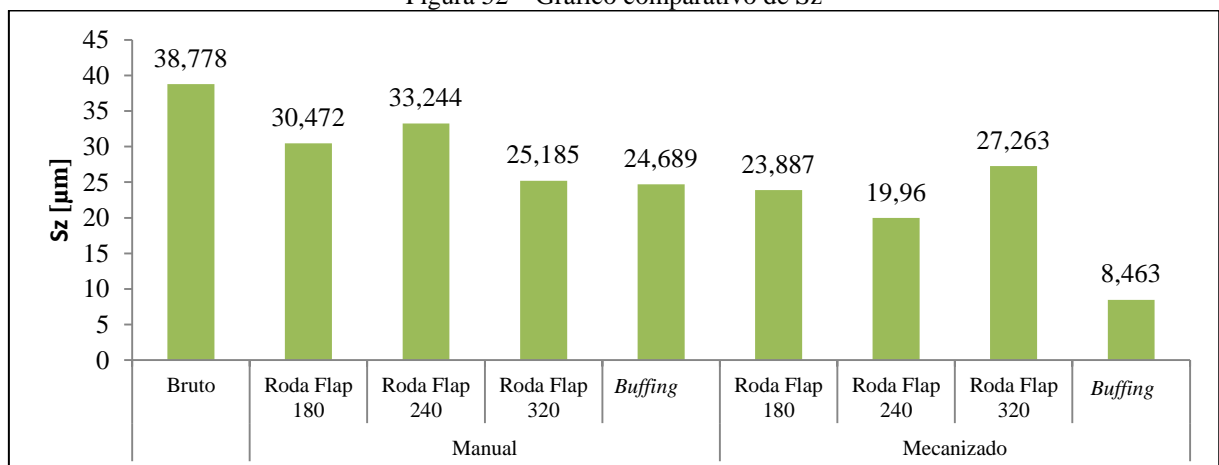


Fonte: O autor.

A análise da superfície gerada por *buffing*, com base nos resultados obtidos para o processo manual, reforça o entendimento apresentado anteriormente, de que o processo não é capaz de modificar a superfície, mas apenas suavizar os eventos de alta frequência, que seriam eventos de microescala. Para o processo mecanizado, é possível que a área de análise apresente uma redução das marcas pelo uso das rodas flap de forma mais regular e, por esse motivo, apresenta valores de Sp e Sv inferiores aos obtidos pelo processo manual.

A Figura 52 apresenta o comportamento de Sz. Uma vez que Sz é formado pela soma de Sv e Sp, o mesmo deveria apresentar valores elevados. Pode-se observar que as maiores distâncias entre os eventos máximo e mínimo foram medidas no processo manual, sendo superiores em todas as etapas comparando-se ao processo mecanizado.

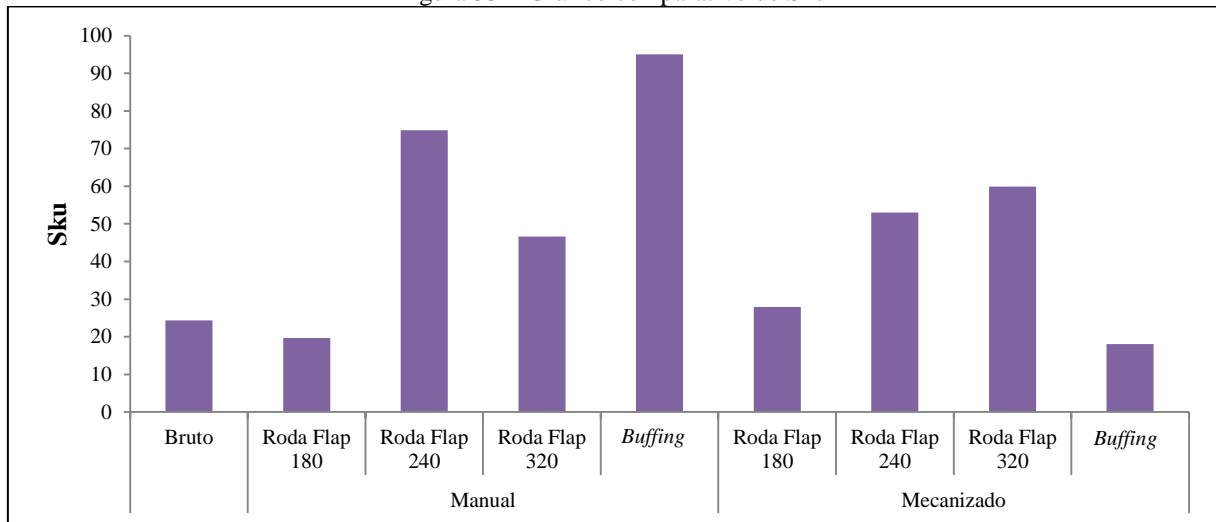
Figura 52 – Gráfico comparativo de Sz



Fonte: O autor.

A Figura 53 apresenta os valores obtidos para Sku. Todos os valores obtidos são positivos e superiores a três, e indicam uma superfície cuja característica é a presença de picos agudos e vales rasos (SEDLAČEK et al., 2011).

Figura 53 – Gráfico comparativo de Sku

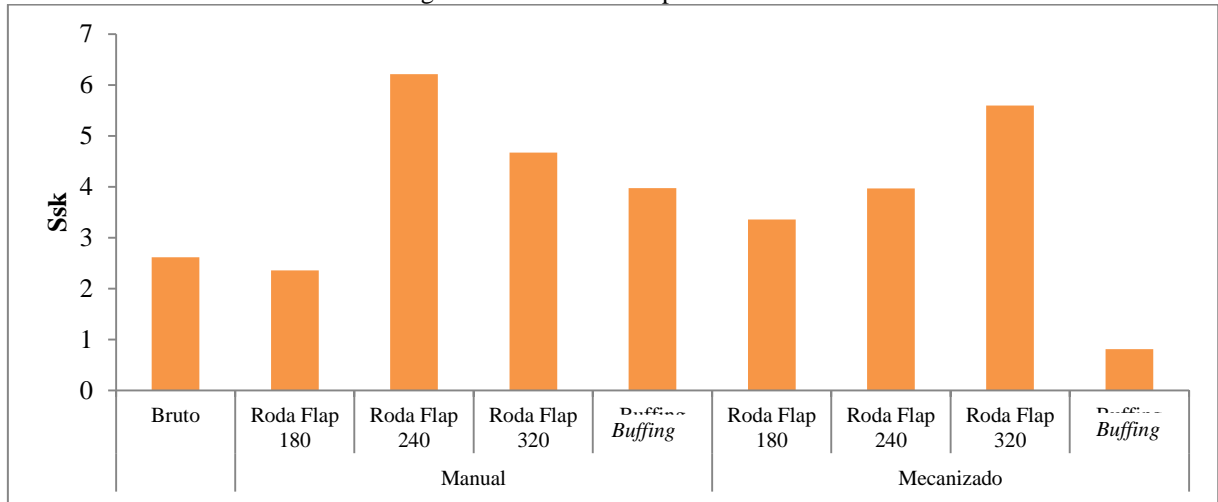


Fonte: O autor.

No entanto, as superfícies geradas pelos processos manual e mecanizado divergem entre si. No processo manual, Sku diminui após a etapa com roda flap 180, aumenta após o polimento com a roda 240, decai novamente após o uso da roda flap 320 e cresce significativamente para o processo de *buffing*. No processo mecanizado ocorre um aumento gradual de Sku para as etapas de polimento com roda flap, caindo para a etapa de *buffing*. Esse comportamento desigual pode ser causado pelos eventos verticais isolados de grande dimensão, representados pelos picos na Figura 46 anterior. De acordo com Dong et al. (1994), Sku é um parâmetro que sofre grande influência de picos e vales isolados. Como mostrado através da análise de Sq e Sp, a superfície apresenta alguns picos com dimensões muito superiores às médias, chegando a quase 55 vezes para o processo de *buffing* manual. As superfícies em que os valores de Sp apresentam menor diferença em relação à média, como a superfície bruta, a gerada por roda flap 180 no processo manual, e a gerada pelo processo de *buffing* mecanizado, são as que apresentam os menores valores de Sku.

O gráfico da Figura 54 contém os valores mensurados de Ssk. Os valores positivos indicam que a superfície apresenta picos elevados e vales preenchidos (SEDLAČEK et al. 2011).

Figura 54 – Gráfico comparativo de Ssk



Fonte: O autor.

O comportamento desse parâmetro, assim com Sku , também diverge de um processo para o outro. No processo manual, Ssk aumenta ao passar pela etapa de roda flap 240 e decai com as etapas posteriores. No processo mecanizado, por sua vez, verifica-se aumento de Ssk nas etapas de polimento com rodas flap, decaindo para o processo de *buffing*. De maneira análoga a Sku , Ssk também sofre influência de eventos isolados com dimensões muito superiores à média da superfície (DONG et al., 1994; SEDLAČEK et al., 2011).

De acordo com Leach et al. (2013), pelo fato de Sku e Ssk terem seu valor bastante sensível a picos e vales isolados que se afastem muito da média da superfície, a representatividade desses parâmetros deve ser analisada com cautela. No caso deste trabalho, Ssk e Sku não são representativos da superfície. Conforme apresentado no capítulo 2, os processos utilizados tendem a atuar no alisamento da superfície. Apesar da redução de Sa e Sq ao longo do processo, Sku e Ssk indicam a existência de uma superfície com perfil mais irregular, com picos cada vez mais agudos em relação aos vales. Isso não é observado nas imagens de MEV-EC, não é o indicativo dos parâmetros bidimensionais (apesar de todas as ressalvas feitas a seu uso), e do perfil durante a medição dos parâmetros superficiais. Nguyen e Butler (2005) estudaram o processo de retificação em aço-carbono e D2 e encontraram valores para Sku inferiores a cinco e valores para Ssk negativos entre zero e menos um, tanto nos valores simulados como nos valores experimentais. No início deste capítulo, quando foram apresentadas as imagens obtidas por MEV-EC, foram constatadas várias características em comum entre a superfície gerada por rodas flap e aquela gerada pelo processo de retificação. Dessa forma, não seria esperado que ambas apresentassem valores tão discrepantes.

Com base nos dados apresentados, é possível constatar que as medições dos parâmetros espaciais foram influenciadas por picos que não são representativos da superfície. Esses eventos verticais de grande dimensão podem não ser eventos físicos, mas erros provenientes do processo de medição. Uma possibilidade é a de que os mesmos sejam consequência do efeito de reflexões parasitas, conforme efeito descrito por Wyant (2002), mencionado na sessão 2.6.6. As franjas parasitas podem ser consequência da curvatura da superfície, apesar de não haver restrições para a utilização, e a área de análise ser muito pequena. Além disso, as medições podem ter sido influenciadas pela reflexividade da superfície, ou por algum outro problema técnico ocorrido durante a medição.

5 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi caracterizar superfícies geradas pelo polimento com o uso de rodas flap e *buffing*, assim como comparar as superfícies geradas nas diferentes etapas dos processos de polimento mecânico e manual. Com base nos resultados obtidos, é possível destacar os seguintes achados:

- Foram identificados nas superfícies geradas por rodas flap, através das análises por MEV-EC: endentações, material aderido, material deformado plasticamente e sulcos profundos;
- A análise por MEV-EC mostrou, na análise das superfícies geradas por *buffing*, uma suavização dos eventos presentes na superfície. No entanto, marcas residuais das etapas de polimento por roda flap são visíveis.
- Os gráficos de rugosidade, obtidos para Ra, Rq, Rz, Rdq mostram o alisamento da superfície após o processo de polimento, tanto para o processo manual como para o processo mecânico.
- Rsk sugere que a cada etapa do processo a superfície passou a apresentar picos mais agudos e vales menos profundos. Por sua vez, Rku indica que a superfície gerada é composta por picos e vales que seguem uma distribuição gaussiana.
- Não existe diferença significativa entre a superfície gerada pela roda flap 320 e *buffing*, para o processo mecanizado. Os gráficos e ANOVAS realizados sobre parâmetros bidimensionais apontam a igualdade das superfícies;
- A superfície gerada após o processo de *buffing* é equivalente para o processo manual e mecânico.
- A medição dos parâmetros espaciais por luz branca não apresentou resultados condizentes com a realidade da superfície.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho abre caminho para inúmeras possibilidades de pesquisa sobre os processos de *buffing* e rodas flap. Entre as principais necessidades observadas para a compreensão e aplicação desses processos, destacam-se:

- o estudo da influência dos parâmetros sobre a superfície gerada, uma vez que este trabalho fornece informações básicas para a avaliação dos eventos presentes na superfície;
- a quantificação, através de parâmetros de rugosidade e espaciais, de superfícies planas geradas por esses processos, a fim de definir valores de quantitativos mais precisos e capazes de comparar com superfícies geradas por outros métodos de fabricação;
- a utilização de outros métodos de avaliação de superfície para estudar a superfície gerada pelo processo de *buffing*, uma vez que os parâmetros de rugosidade não foram capazes de explicar as diferenças encontradas entre a superfície gerada por *buffing* e rodas flap;
- a utilização de ferramental com forma geométrica adequada, com a finalidade de polir uma maior área da peça trabalhada. Isto, vinculado a um estudo das possíveis diferenças de acabamento presentes na mesma superfície em virtude da forma da ferramenta, tornaria possível escolher a melhor configuração de processo para a obtenção de uma superfície com um acabamento homogêneo.

REFERÊNCIAS

- AKHIANI, H.; SZPUNAR, J. A. Effect of surface roughness on the texture and oxidation behavior of Zircaloy-4 cladding tube. **Applied Surface Science**, v. 285, p. 832-839, 2013.
- ARUNACHALAM, A. P. S.; IDAPALAPATI, S.; SUBBIAH, S. Multi-criteria decision making techniques for compliant polishing tool selection. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 79, n. 1-4, p. 519-530, 2015.
- ASM INTERNATIONAL. HANDBOOK COMMITTEE (Ed.). **ASM handbook: Surface engineering**. ASM International, 1994.
- BARYSHEV, S. V. et al. Characterization of surface modifications by white light interferometry: applications in ion sputtering, laser ablation, and tribology experiments. **Journal of visualized experiments: JoVE**, n. 72, 2013.
- BET, L. **Estudo da medição da textura de superfícies com sondas mecânicas e com sondas ópticas tipo seguidor**. Florianópolis: UFSC, 1999, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.
- BLUNT, L.; JIANG, X.. **Advanced techniques for assessment surface topography: development of a basis for 3D surface texture standards" surfstand"**. Elsevier, 2003.
- BRALLA, J. **Handbook of manufacturing processes**. Industrial Press, 2007.
- BRUNE, D. et al. (Ed.). **Surface characterization: a user's sourcebook**. John Wiley & Sons, 1997.
- CARNEIRO, K. et al. Roughness parameters of surfaces by atomic force microscopy. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 44, n. 1, p. 517-522, 1995.
- CASWELL PLATING. An introduction to buffing and polishing. Caswell Plating. Disponível em: <http://www.caswellplating.com/buffman.htm>. Acesso em: 08 fev. 2016.
- CHADWICK, A. C.; KENTRIDGE, R. W. The perception of gloss: a review. **Vision research**, v. 109, p. 221-235, 2015.
- CUTCHIN, J. H.; HAMMOND-GREEN, R. R. Electropolishing Applications and Techniques. **Palmetto Plating Company**, p 14. Disponível em [http:](http://)

//palmettoplating.com/wp-content/uploads/2012/02/SME-Paper.pdf . Data de acesso: 08/02/2016

CZICHOS, H.; SAITO, T.; SMITH, L. E. (Ed.). **Springer handbook of metrology and testing**. Springer Science & Business Media, 2011.

DAVIM, J. P. et al. (Ed.). **Surface integrity in machining**. London: Springer, 2010.

DAVIS, J. R. et. al. **Metals Handbook Ninth Edition Volume 16: Machining**. ASM International. 1989.

DE GARMO, E. P.; BLACK, J. T.; KOHSER, R. A. **DeGarmo's materials and processes in manufacturing**. John Wiley & Sons, 2011.

DICKMAN JR., A. Polishing and Buffing: Theory and practice, **Metal Finishing**, v. 93, n.12, p. 34-36, 1995.

DICKMAN JR., A. The science of scratches – Polishing and buffing mechanical surface preparation, **Metal finishing**, v.105, n.10, p.13-29, 2007.

DICKMAN, A.; MILLMAN, B. Polishing and buffing. **Metal Finishing**, v. 93, n. 1, p. 16, 18-23, 26-28, 30, 32-33, 1995.

DIESTE, J. A. et al. Automatic grinding and polishing using spherical robot. **Procedia Engineering**, v. 63, p. 938-946, 2013.

DONG, W. P.; SULLIVAN, P. J.; STOUT, K. J. Comprehensive study of parameters for characterising three-dimensional surface topography: III: Parameters for characterising amplitude and some functional properties. **Wear**, v. 178, n. 1, p. 29-43, 1994.

DOWSON, D. Wear oh where?. **Wear**, v. 103, n. 3, p. 189-203, 1985.

EL-HOFY, H. A. G. **Fundamentals of machining processes: conventional and nonconventional processes**. CRC press, 2014.

FRANCO, L. A.; SINATORA, A. 3D surface parameters (ISO 25178-2): Actual meaning of Spk and its relationship to Vmp. **Precision Engineering**, v. 40, p. 106-111, 2015.

GADELMAWLA, E. S. et al. Roughness parameters. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 123, n. 1, p. 133-145, 2002.

GAO, F. et al. Surface measurement errors using commercial scanning white light interferometers. **Measurement Science and Technology**, v. 19, n. 1, p. 015303, 2007.

GNANAMOORTHY, P.; KARTHIKEYAN, V.; PRABU, V. Ashok. Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM) characterisation of the porous silica nanoparticulate structure of marine diatoms. **Journal of Porous Materials**, v. 21, n. 2, p. 225-233, 2014.

GOLDSTEIN, J. et al. Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis. 2003.

GRIFFITHS, B. **Manufacturing surface technology: surface integrity and functional performance**. Elsevier, 2001.

HILLMANN, W.; KRANZ, O.; ECKOLT, K. Reliability of roughness measurements using contact stylus instruments with particular reference to results of recent research at the Physikalisch-Technische Bundesanstalt. **Wear**, v. 97, n. 1, p. 27-43, 1984.

ISO.; ISO, B. S. 4287/1997. Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters, 1997.

ISO, ISO. FDIS 25178-2. **Geometrical product specifications (GPS)—Surface texture: Areal—Part**, v. 2, 2010. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:25178:-2:ed-1:v1:en> (Preview).

ISO, NBR. 4287, (2002). Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade.

JING, Y. et al. The evolution of surface morphologies and microstructures during cold rolling after hydrogen reduction. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 219, p. 303-313, 2015.

KALPAKJIAN, S. et al. **Manufacturing, Engineering and Technology SI 6th Edition**. Pearson Canada, 2009

KING, R. I.; HAHN, R. S. Handbook of modern grinding technology. **Chapman and Hall**, 1986.

KLOCKE, F. Manufacturing Processes 2—Grinding. **Honing, Lapping**, Springer, 2009.

KOMANDURI, R.; LUCCA, D. A.; TANI, Y. Technological advances in fine abrasive processes. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 46, n. 2, p. 545-596, 1997.

KUO, R.-J. A robotic die polishing system through fuzzy neural networks. **Computers in Industry**, v. 32, n. 3, p. 273-280, 1997.

KUTZ, M (Ed) **Mechanical Engineers Handbook', Volume 3: Manufacturing and Management**. Third Edition. John Wiley & Sons, Inc., 2006.

KUZINOVSKI, M.; STAMBOLISKA, Z.; CICHOSZ, P. Engineering of surface layer in material removal machining. **Journal of materials processing technology**, v. 155, p. 1451-1458, 2004.

LEACH, R. K. (Ed.). **Optical measurement of surface topography**. Berlin: Springer, 2011.

LEACH, R. K. **Characterisation of areal surface texture**. Berlin: Springer, 2013.

MARINESCU, I. D. et al. **Handbook of machining with grinding wheels**. CRC Press, 2007.

MARINESCU, I. D. et al. **Tribology of abrasive machining processes**. William Andrew, 2012.

MARINESCU, I. D.; UHLMANN, E.; DOI, T. (Ed.). **Handbook of lapping and polishing**. CrC Press, 2006.

NELSON, B. Selecting proper buff construction for improved finishes and lower cost. **Metal Finishing**. v. 94, n.7, p. 28-31, 1996.

NGUYEN, T. A.; BUTLER, D. L. Simulation of surface grinding process, part 2: interaction of the abrasive grain with the workpiece. **International journal of Machine tools and manufacture**, v. 45, n. 11, p. 1329-1336, 2005.

OBERG, E. **Section 11. Machine Elements–Machinery's Handbook 29**. Industrial Press, 2012.

PILNÝ, L.; BISSACCO, G. Development of on the machine process monitoring and control strategy in Robot Assisted Polishing. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 64, n. 1, p. 313-316, 2015.

PUSAVEC, F.; KENDA, J. The transition to a clean, dry, and energy efficient polishing process: an innovative upgrade of abrasive flow machining for simultaneous generation of micro-geometry and polishing in the tooling industry. **Journal of cleaner production**, v. 76, p. 180-189, 2014.

RASIM, M.; MATTFELD, P.; KLOCKE, F. Analysis of the grain shape influence on the chip formation in grinding. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 226, p. 60-68, 2015.

ROSWELL, A.; XI, F. J.; LIU, G. Modelling and analysis of contact stress for automated polishing. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 3, p. 424-435, 2006.

SAX, D. J. Buffing wheels and equipment. **Metal Finishing**, v. 105, n. 10, p. 30-43, 2007.

SEDLAČEK, M.; PODGORNIK, B.; VIŽINTIN, J. Correlation between standard roughness parameters skewness and kurtosis and tribological behaviour of contact surfaces. **Tribology International**, v. 48, p. 102-112, 2012.

SEGRETO, T. et al. Feature extraction and pattern recognition in acoustic emission monitoring of robot assisted polishing. **Procedia CIRP**, v. 28, p. 22-27, 2015.

SLĂTINEANU, L. et al. Some considerations regarding finishing by abrasive flap wheels. *International Journal of Material Forming*, v. 3, n. 2, p. 123-134, 2010.

SMITH, G. T. *Industrial metrology: surfaces and roundness*. Springer Science & Business Media, 2013.

STOUT, K. J.; BLUNT, L. **Three dimensional surface topography**. Elsevier, 2000.

TAILOR, P. B.; AGRAWAL, A.; JOSHI, S. S. Evolution of electrochemical finishing processes through cross innovations and modeling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 66, p. 15-36, 2013.

TARNOFF, N.; JACOFF, A.; LUMIA, R. Graphical simulation for sensor based robot programming. **Journal of Intelligent and Robotic Systems**, v. 5, n. 1, p. 49-62, 1992.

WHITEHOUSE, D. J. **Surfaces and Their Measurement**. CRC Press, 2002.

WYANT, J. C. White light interferometry. In: **AeroSense 2002**. International Society for Optics and Photonics, 2002. p. 98-107.

ZEILMANN, R. P. et al. Estudo da força normal de interferência no polimento abrasivo com o uso de rodas flap através do uso de uma célula de carga. **Int. Rev. Cie. FACOL/ISEOL**, v. 3, p. 40-50, 2015.

ZHOU, N.; PENG, R. L.; PETTERSSON, R. Surface integrity of 2304 duplex stainless steel after different grinding operations. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 229, p. 294-304, 2016.

ANEXO A – INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES À REVISÃO

Neste anexo serão acrescentadas informações adicionais à revisão a título de complementação. O Quadro 6, a seguir, apresenta algumas das principais técnicas empregadas na avaliação de superfícies. As siglas e o nome das técnicas estão em inglês.

Quadro 6 – Técnicas utilizadas na avaliação de superfícies

(continua)

Técnica	Sigla
<i>Auger Electron Spectroscopy</i>	AES
Microscopia de força Atômica	AFM
Atom Probe Field Ion Microscopy	APFIM
Charged Particle Activation Analysis	CPAA
Energy Dispersive X-ray Fluorescence Analysis	EDXRF
Electrochemical Impedance Spectroscopy	EIS
Emanation Thermal Analysis	ETA
Fourier Transform Infrared Spectroscopy	FTIR
Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy	GD-OES
Grazing-Emission X-ray Fluorescence	GEXRF
Grazing-Incidence X-ray Fluorescence	GI-XRF
High Resolution Electron Energy Loss Spectroscopy	HREELS
Ion Scattering Spectroscopy	ISS
Low Energy Electron Diffraction	LEED
Low Energy Electron Microscopy	LEEM
Laser Microprobe Mass Spectroscopy	LMMS
Mossbauer Spectroscopy	ME
Nuclear Corrosion Monitoring	NCM
Nuclear Reaction Analysis	NRA
Nuclear Microscopy	NUMI
Photoacoustic Spectroscopy	PAS
Particle Induced Gamma-ray Emission	PIGE
Particle Induced X-ray Emission	PIXE
Photothermal Spectroscopy	PTS
Radionuclide Induced X-ray Fluorescence	R-XRF
Surface Raman Spectroscopy	RAS
Rutherford Backscattering Spectrometry	RBS
Reflection High Energy Electron Diffraction	WEED
Recoil Spectrometry	RS
Scanning Electron Microscopy with X-ray Spectrometer	SEM
Optical Sum Frequency Generation	SFG
Optical Second Harmonic Generation	SHG
Dynamic Mode Secondary Ion Mass Spectrometry	Dynamic-SIMS
Confocal Scanning Optical Microscopy	SOM

	(conclusão)
Synchrotron Radiation	SR
Static Mode Secondary Ion Mass Spectrometry	Static-SIMS
Scanning Tunnelling Microscopy	STM
Scanning Vibrating Electrode Technique	SVET
Transmission Electron Microscopy/Diffraction	TEM
Thin Layer Activation	TLA
Temperature Programmed Desorption	TPD
Total-Reflection X-ray Fluorescence Spectrometry for Chemical Analysis	TXRF
X-ray Photoelectron Spectroscopy	XPS
X-ray Diffraction and Reflectometry	XRD
X-ray Fluorescence	XRF
X-ray Reflectometry	XRR

Fonte: Adaptado de Brune et al. (1997).

Na sequência, são apresentados os valores dos parâmetros bidimensionais complementares à norma. Não serão apresentados os valores relacionados a curvas.

- *Altura média dos elementos do perfil (Rc)*: distância média entre picos e vales adjacentes. Este parâmetro deve possuir um valor de espaçamento e altura definido. A distância pico a vale deve ser superior a 10% de Rz, o espaçamento entre as amostras deve ser igual ou superior a 1% do comprimento amostral. O parâmetro é calculado de acordo com a Eq.11:

$$Rc = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n Zt_i \quad (11)$$

Nesse caso, m e n são iguais e representam o número de amostras obtidas dentro do comprimento de amostragem, e Zt é a distância entre pico e vale adjacentes.

- *Altura total do perfil (Rt)*: soma do maior Rp e do maior Rv dentro do comprimento de avaliação. Rt sempre será maior que Rz, exceto na condição onde há um único comprimento amostral. Neste caso Rt será igual a Rz.
- *Largura média dos elementos do perfil (Rsm)*: valor médio da largura dos elementos do perfil, Xs, no comprimento de amostragem. Na Eq. 12, m é o número de eventos medidos e Xs o comprimento entre pico e vale adjacente.

$$Rsm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Xs_i \quad (12)$$

Bet (1999) e Gadelmawla (2002) apresentam um parâmetro com a mesma definição, porém com nomenclatura diferente, Sm. Bet (1999) e Whitehouse (2002) descrevem esse parâmetro como o comprimento que abrange um pico e um vale medido sobre a linha média. A norma ABNT ISO 4287/2002 ressalta que devem ser utilizados alturas e espaçamentos definidos. Quando nenhuma ressalva especial é feita, deve ser adotado para a definição de alturas superiores a 10% de Rz e espaçamento equivalente a 1% do comprimento amostral. Dessa forma, para Davim (2010), Rsm fornece a informação entre a distância entre dois picos sucessivos.

Finalizando o conteúdo adicional, são apresentados alguns parâmetros tridimensionais complementares. Os parâmetros descritos a seguir são chamados de parâmetros espaciais, e são descritos na norma ISO 25178-2. Esses se utilizam do conceito de função de autocorrelação (ACF), calculado conforme a Eq. 13. Segundo Leach (2013), a ACF correlaciona uma fração da imagem com a imagem inteira e é definido como a convolução da superfície com a própria, alterada para (t_x, t_y) .

$$ACF(t_x, t_y) = \frac{\iint z(x,y)z(x-t_x,y-t_y)dxdy}{\iint z(x,y)^2dxdy} \quad (13)$$

A ACF produz valores entre -1 e +1 para cada ponto na superfície. Um valor +1 significa uma perfeita correlação, e zero significa nenhuma correlação. É utilizada para estudar a periodicidade de uma superfície ou para verificar a isotropia de uma superfície.

- *Comprimento de Autocorrelação* (Sal): definido como a distância horizontal de $ACF(t_x, t)$ que apresenta o decaimento mais rápido a um dado valor de s, sendo que $0 \leq s \leq 1$. Calculado conforme Eq. 14:

$$Sal = \min_{t_x, t_y \in R} \sqrt{t_x^2 + t_y^2} \text{ sendo } R = \{(t_x, t_y) : f_{ACF}(t_x, t_y) \leq s\} \quad (14)$$

De acordo com a norma ISO 75178-3, pode-se adotar s igual a 0,2 para superfícies relativamente lisas. Outros valores recomendados para s estão presentes

na mesma norma. Segundo Leach (2013), o contorno do pico central é medido do centro, e o menor raio obtido é utilizado para calcular Sal. Um grande valor de Sal indica que a superfície é dominada por componentes espaciais de baixa frequência, enquanto um valor pequeno indica o oposto. Dessa forma, Sal é o parâmetro utilizado para quantificar a distância ao longo da superfície, através da qual a textura é estatisticamente diferente da observada no local de referência.

- *Razão de textura de uma superfície* (Str): taxa da distância horizontal de $ACF(t_x, t_y)$, que apresenta o mais rápido decaimento para um valor específico s pelo valor da distância horizontal de $ACF(t_x, t_y)$, que apresenta o decaimento mais lento, sendo $0 \leq s \leq 1$. Os valores utilizados para s seguem as mesmas indicações das utilizadas em Sal. O mesmo é calculado de acordo com as Eqs. 15 e 16.

$$Str = \frac{\min_{t_x, t_y \in R} \sqrt{t_x^2 + t_y^2}}{\max_{t_x, t_y \in Q} \sqrt{t_x^2 + t_y^2}} \quad (15)$$

$$\text{Onde: } R = \{(t_x, t_y) : f_{ACF}(t_x, t_y) \leq s\} \text{ e } Q = \{(t_x, t_y) : f_{ACF}(t_x, t_y) \geq s\} \quad (16)$$

Para Leach (2013), Str é um dos parâmetros espaciais mais importantes para caracterizar a isotropia ou anisotropia da superfície. Esse é adimensional e pode apresentar um valor entre 0 e 1. Se Str for próximo à unidade, a superfície é isotrópica. Caso contrário, a superfície é anisotrópica, apresentando uma direção dominante da textura. Para Blunt e Jiang (2003), valores inferiores a 0,3 indicam uma superfície fortemente anisotrópica, enquanto valores superiores a 0,5 tendem a indicar uma superfície isotrópica. Uma vez que a área da amostra é finita, pode ocorrer que o decaimento mais lento de $ACF(t_x, t_y)$ nunca alcance o valor de s na área amostral. Nesse caso Str é inválido.

Os parâmetros híbridos são apresentados a seguir. Blunt e Jiang (2003) os apresentam como sendo parâmetros que se baseiam em informações verticais e horizontais. Dessa forma, qualquer alteração que ocorra na amplitude ou no espaçamento dos eventos presentes na superfície pode causar alterações nos valores dos parâmetros. São eficientes para

relatar propriedades elétricas e térmicas, capacidade de vedação, desgaste e refletância da superfície.

- *Gradiente médio quadrático do declive da superfície amostral (Sdq)*: gradiente de um ponto da superfície é definido para cada eixo x e y, através de $\partial z/\partial x$ e $\partial z/\partial y$. É calculado na superfície de amostragem de acordo com a Eq.17:

$$S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A \left[\left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy} \quad (17)$$

É adimensional, mas pode ser expresso na forma $[\mu m/\mu m]$ ou $[\mu m/mm]$. Útil para caracterizar superfícies de vedação e controlar superfícies cuja aparência é uma das principais características (LEACH, 2013).

- *Razão de área superficial (Sdr)*: Determinado a partir da Eq. 18:

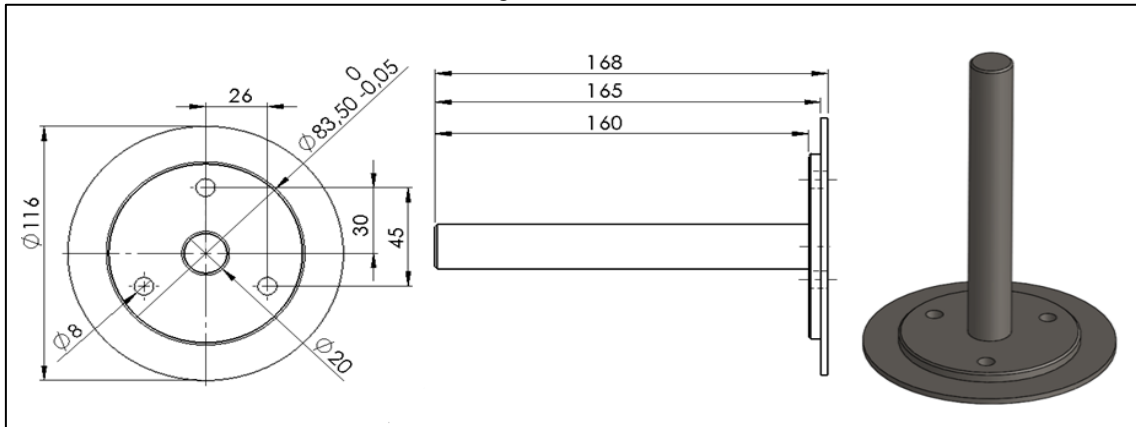
$$S_{dr} = \frac{1}{A} \left[\iint_A \left(\sqrt{\left[\left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \right)^2 \right]} - 1 \right) dx dy \right] \quad (18)$$

Pode ser apresentado como um valor adimensional ou em forma de porcentagem. Segundo Leach (2013), seu valor pode variar entre zero a dez por cento. Uma superfície lisa ideal apresenta um valor de *Sdr* igual a zero. É utilizado para medir a complexidade da superfície, especialmente em comparações entre etapas de processamento. Também pode indicar correlação com aplicações que necessitem de uma determinada adesão.

ANEXO B – ADAPTADOR

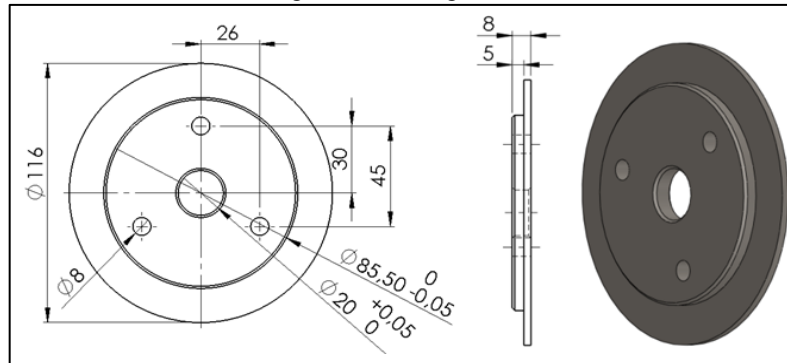
Neste anexo são ilustradas as dimensões dos elementos que compõem o adaptador utilizado para realizar o polimento na central de usinagem (Figuras 55 a 59). O mesmo foi projetado utilizando material reaproveitado. Para a fixação do dispositivo no centro de usinagem, foi utilizado um cone Weldon número 20.

Figura 55 – Pino de base



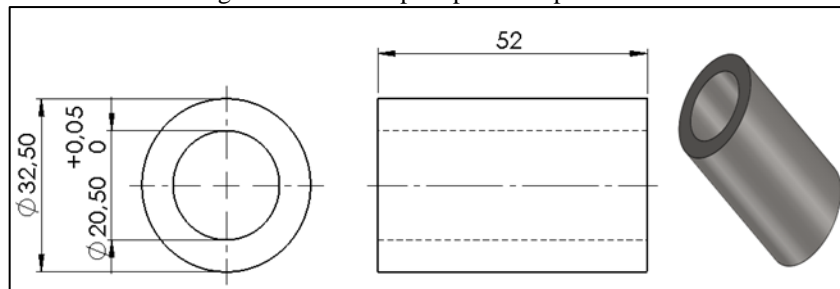
Fonte: O autor.

Figura 56 – Flange maior



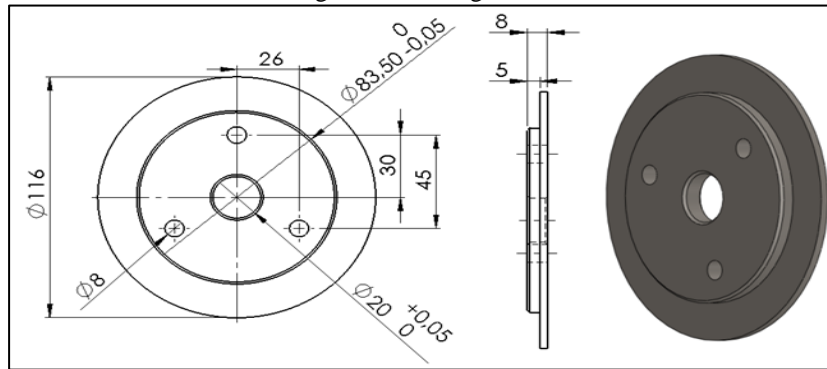
Fonte: O autor.

Figura 57 – Bucha para panos de polimento



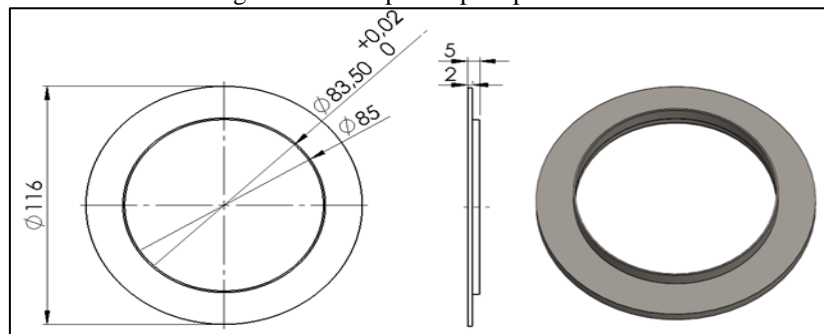
Fonte: O autor.

Figura 58 – Flange menor



Fonte: O autor.

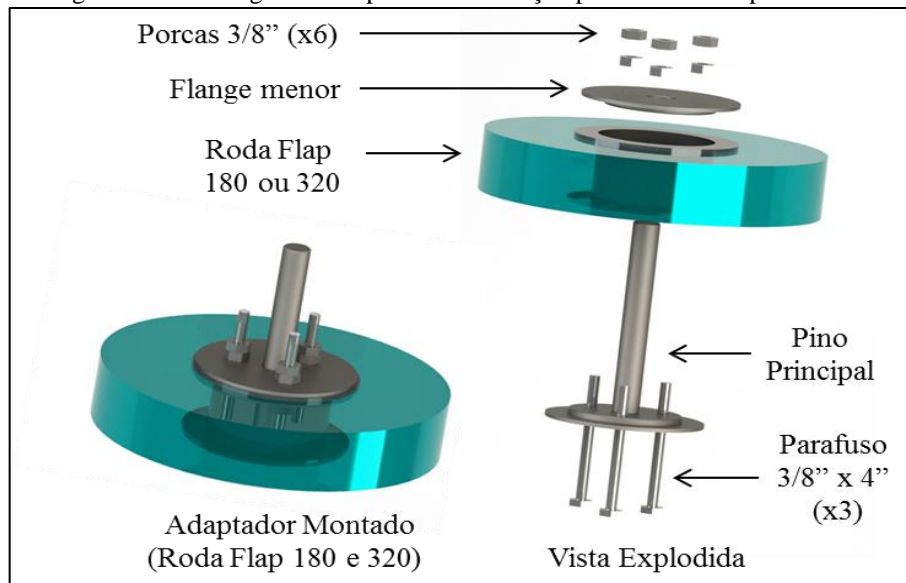
Figura 59 – Adaptador para pino de base



Fonte: O autor.

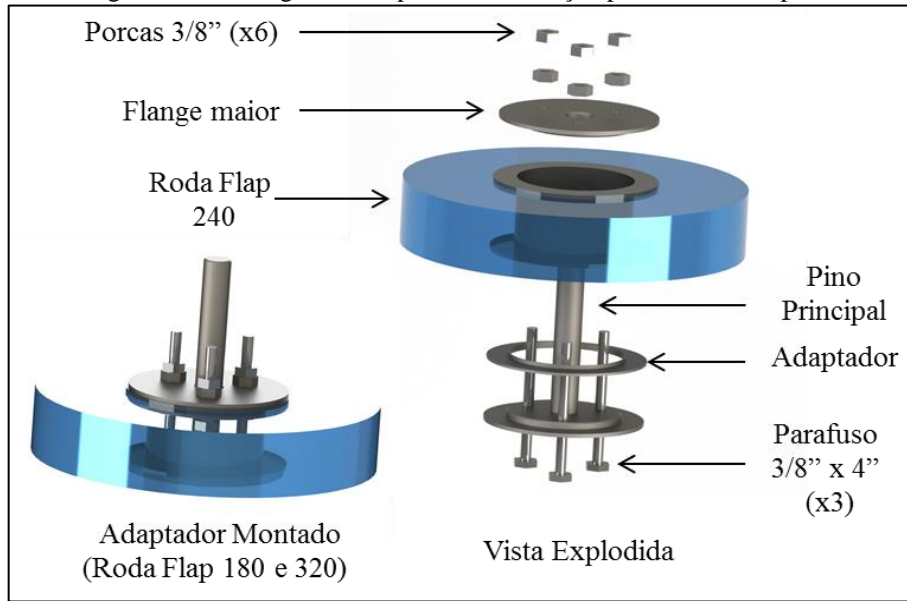
As Figuras 60 a 62 apresentam a montagem das peças mostradas anteriormente. As diferentes configurações foram necessárias em virtude de variações dimensionais observadas entre as rodas flap, das características diferentes dos panos ventilados.

Figura 60 – Montagem do dispositivo de fixação para as rodas flap 180 e 320



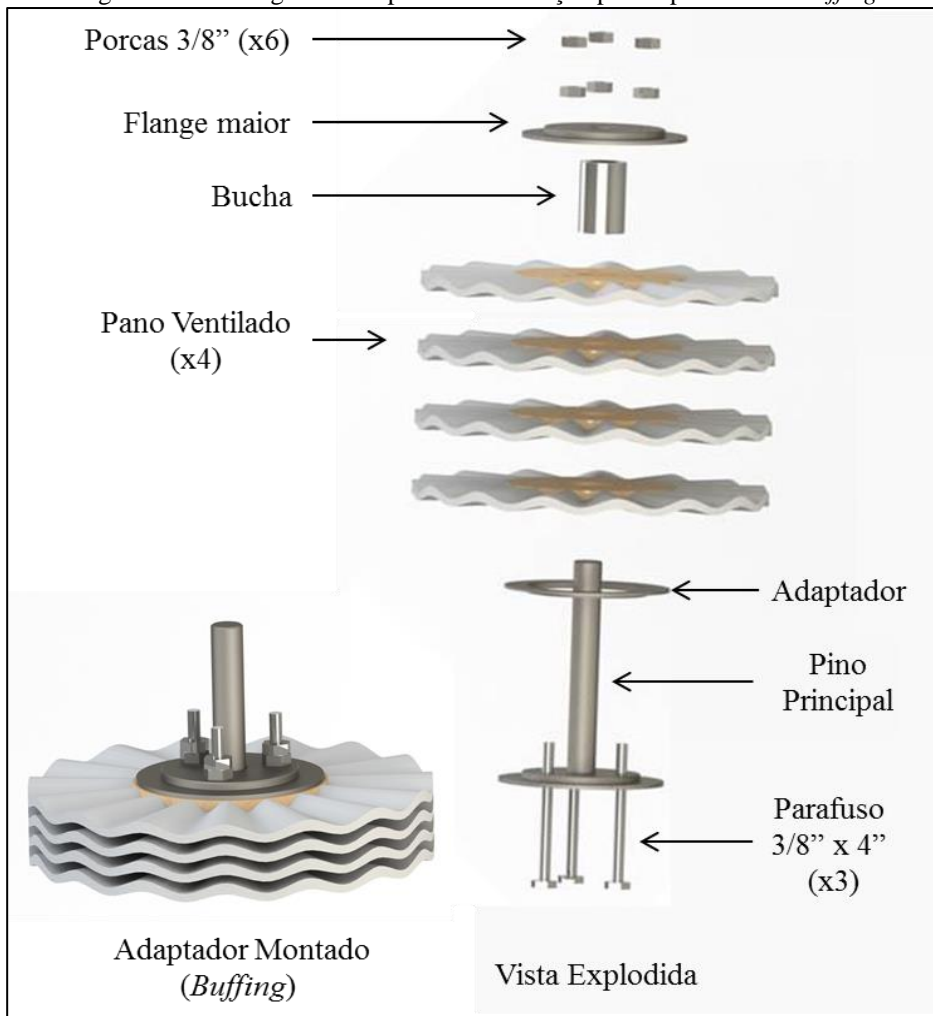
Fonte: O autor.

Figura 61 - Montagem do dispositivo de fixação para as rodas flap 240



Fonte: O autor.

Figura 62 - Montagem do dispositivo de fixação para o processo de *buffing*



Fonte: O autor.

Para utilizar os panos para polir no centro de usinagem (configuração apresentada na Figura 62), foi necessário usinar três furos para poder passar os parafusos. Os furos, de oito milímetros de diâmetro, foram realizados na mesma posição observada nas Figuras 55, 56, e 58.

ANEXO C – CATÁLOGOS

O resultado obtido durante o polimento está intrinsicamente relacionado ao equipamento utilizado. Existe grande variação nas características das ferramentas conforme o fabricante utilizado, mesmo para ferramentas com mesma descrição. As Figuras 60 a 65, a seguir, apresentam os catálogos utilizados para a compra do equipamento, visando facilitar uma possível reprodução do experimento e trabalhos futuros relacionados ao mesmo.

Figura 63 – Catálogos Roda Flap 1

Acreroda

Descrição do produto

Características:

- São rodas de lixa produzidas por flaps de lixas rígidas ou flexíveis.
- Disponíveis com separador entre os flaps de lixa, que aumenta o poder de corte.
- Disponíveis em vários tamanhos e grãos.

Aplicações:

- Indicadas para o lixamento e acabamento de superfícies planas, contornos e paredes internas.
- Aplicadas em tanques de inox, materiais ferrosos, fibras plásticas, alumínio, etc...
- Também utilizadas nos acabamentos de soldas, limpeza de peças, fazendo a remoção junto com acabamento final.
- O sistema de lixamento pode ser realizado através de máquina de bancada, politriz e sistema robótico de lixamento.

Vantagens:

- Produto de grande eficiência nos processos de acabamentos.

Observações:

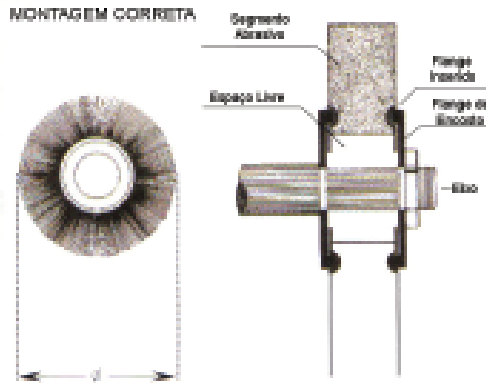
- Consultar tabela de RPM máximo:

Diâmetro	Velocidade
150mm	5.500 RPM
200mm	4.300 RPM
250mm	3.200 RPM
300mm	2.800 RPM
350mm	2.200 RPM
400mm	2.200 RPM

Fonte: <http://www.acrecaxias.com.br>

Figura 64 – Catálogo Rodas Flap 2

Siarodas e Minirodas



As mini rodas de lixas e Acrerodas são indicadas para o lixamento e acabamento de superfícies planas, de contornos e paredes internas.

São utilizadas para lixamento e acabamento de tanques de inox, materiais ferrosos, fibras plásticas, alumínio, etc.

Também utilizadas nos acabamentos de solda, limpeza de peças, fazendo a remoção junto com o acabamento final pondo fim as rebarbas de tubos, etc, com a finalidade de reduzir tempo e melhorar a eficiência nas áreas de fabricação e acabamento.

Velocidade de corte para lixamento de primeira classe.

A escolha da velocidade correta é uma condição prévia muito importante para obtermos resultados satisfatórios.

Quanto maior a velocidade de corte, maior a eliminação inicial de material e conseqüentemente mais fina a superfície.

Todavia, uma velocidade demasiadamente alta reduzirá a duração dos abrasivos, podendo também estourar a roda.

Diâmetro	Velocidade
25 a 40 mm	18.000 RPM
50 a 75 mm	12.000 RPM
150 mm	5.500 RPM
200 mm	4.300 RPM
250 mm	3.200 RPM
300 mm	2.800 RPM
325 mm	2.900 RPM
350 mm	2.200 RPM
400 mm	2.200 RPM

Grãos disponíveis:

P024	P030	P036	P040	P050	P060	P080	P100	P120	P150
●		●	●	●	●	●	●	●	●
P180	P220	P240	P280	P320	P360	P400	P500	P600	P800
●	●	●	●	●		●			



Figura 65 – Catálogo composto abrasivo Massa 2

Massa 2

Descrição do produto

Descrição:

- A Massa nº 2 possui uma abrasividade baixa.

Aplicação:

- É utilizada para polimento de metais ferrosos e não ferrosos. Como não agride a peça polida, devido a baixa abrasividade, é indicada para realçar o brilho da superfície polida, eliminando os riscos.
- As massas sólidas são utilizadas com discos de tecido de pano, para que sejam pressionados contra a peça a ser trabalhada com uma força adequada.

Vantagens:

- Proporciona um acabamento brilhante.

ACRE CAXIAS | Abrasivos e Ferramentas Industriais | Copyright © 2013 - Acre Caxias. Todos os Direitos Reservados.

Fonte: <http://www.acrecaxias.com.br>

Figura 66 – Catálogo pano Ventilado

Pano Ventilado Branco

Descrição do produto

Características:

- São fabricados em tecido de algodão cru resinado, cuja dureza é intermediária (entre panos ventilados amarelo e vermelho).
- Possuem ondulações em sua estrutura para permitir uma boa ventilação.
- Disponíveis em diversos diâmetros.

Aplicações:

- Aplica-se normalmente para polimento juntamente com massas sólidas e líquidas para polir e podem ser aplicados também para lustração.
- Utilizados para metais, inox, alumínio, plástico, etc...
- O sistema de operação pode ser realizado com máquinas manuais e de bancada.

Vantagens:

- Pode-se usar panos em série, aumentando a área que será trabalhada.
- Adaptam-se bem a formas variadas, desde que não sejam muito complexas.
- Proporcionam ventilação, evitando o aquecimento excessivo que pode prejudicar o acabamento da peça que está em operação.

ACRE CAXIAS | Abrasivos e Ferramentas Industriais | Copyright © 2013 - Acre Caxias. Todos os Direitos Reservados.

Fonte: <http://www.acrecaxias.com.br>

Figura 67 – Recomendação de velocidades para o pano ventilado

Velocidade em m/s de acordo com o diâmetro do disco e a velocidade em RPM do maquinário												
RPM	Diâmetro do Pano											
	100	125	150	200	250	300	350	400	450	500	600	970
600	-	-	-	-	-	-	11.0	12.6	14.1	15.7	18.8	31.4
800	-	-	-	-	10.5	12.6	14.6	16.7	18.8	20.9	25.1	41.9
1400	-	-	11.0	14.7	18.4	22.0	25.6	29.2	33.0	36.6	44.0	-
1600	-	-	12.6	16.8	20.9	25.1	29.3	33.4	37.6	41.9	50.2	-
1800	-	12.0	14.2	18.9	23.5	28.2	33.0	37.6	42.4	47.1	56.4	-
2000	10.0	13.0	15.7	21.0	26.1	31.4	36.4	41.8	47.1	52.4	-	-
2200	12.0	14.0	17.2	23.0	28.8	34.5	40.3	46.0	51.8	57.6	-	-
2400	13.0	15.0	19.0	25.1	31.4	37.6	44.0	50.0	56.5	-	-	-
2600	14.0	17.0	20.4	27.2	34.0	40.8	47.6	53.2	-	-	-	-
2800	15.0	18.0	22.0	29.3	36.6	43.9	51.3	58.4	-	-	-	-
3000	16.0	20.0	23.8	31.4	39.2	47.0	55.0	-	-	-	-	-

Fonte: <http://www.acrecaxias.com.br>

Figura 68 – Catálogo Sebo Composto

Sebo Composto
Descrição do produto
Características:
<ul style="list-style-type: none"> • São fabricados a base de sebo animal e seus derivados. • Possui abrasividade.
Aplicações:
<ul style="list-style-type: none"> • Utiliza-se para aumentar a capacidade de corte e lubrificação nas operações. • Aplicados em Rodas de Lixa, Pano ventilados, Cretones e Cintas Estreitas.
Vantagens:
<ul style="list-style-type: none"> • Proporcionam maior polimento e a aderência da massa a Roda de Lixa.
ACRE CAXIAS Abrasivos e Ferramentas Industriais Copyright © 2013 - Acre Caxias. Todos os Direitos Reservados.

Fonte: <http://www.acrecaxias.com.br>

ANEXO D – ANOVAS

Neste anexo são apresentadas as ANOVAS cujo resultado não apresentaram relevância para a linha de discussão abordada no presente trabalho. As anovas das Tabelas 13 a 54 comparam os processos de polimento manual e mecânico, através da análise estatística de cada etapa que compõe esses processos. As primeiras comparações apresentadas são referentes aos valores de Ra, apresentados nas Tabelas 13 a 18.

Tabela 13 – ANOVA – Roda Flap 180 – Manual x Mecanizado – [Ra] – Longitudinal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 180	0,00	1	0,00	0,08	4,10	0,77	Não significativa
Erro	0,49	38	0,01				
Total	0,50	39					

Fonte: O autor.

Tabela 14 – ANOVA – Roda Flap 240 – Manual x Mecanizado – [Ra] – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 240	0,15	1	0,15	4,64	4,10	0,04	Significante
Erro	1,21	38	0,03				
Total	1,36	39					

Fonte: O autor.

Tabela 15 – ANOVA – Roda Flap 240 – Manual x Mecanizado – [Ra] – Longitudinal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 240	0,17	1	0,17	126,50	4,10	0,00	Significante
Erro	0,05	38	0,00				
Total	0,22	39					

Fonte: O autor.

Tabela 16 – ANOVA – Roda Flap 320 – Manual x Mecanizado – [Ra] – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 320	0,02	1	0,02	3,98	4,10	0,05	Não significativa
Erro	0,21	38	0,01				
Total	0,23	39					

Fonte: O autor.

Tabela 17 – ANOVA – Roda Flap 320 – Manual x Mecanizado – [Ra] – Longitudinal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 320	0,16	1	0,16	233,33	4,10	0,00	Significante
Erro	0,03	38	0,00				
Total	0,19	39					

Fonte: O autor.

Tabela 18 – ANOVA – *Buffing* – Manual x Mecanizado – [Ra] – Longitudinal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
<i>Buffing</i>	0,05	1	0,05	179,21	4,10	0,00	Significante
Erro	0,01	38	0,00				
Total	0,06	39					

Fonte: O autor.

Abaixo estão apresentados, nas Tabelas 19 a 25, os resultados das ANOVAS para Rq não utilizados na discussão dos resultados.

Tabela 19 – ANOVA – Roda Flap 180 – Manual x Mecanizado – [Rq] – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 180	0,12	1	0,12	1,17	4,10	0,29	Não significativa
Erro	3,88	38	0,10				
Total	4,00	39					

Fonte: O autor.

Tabela 20 – ANOVA – Roda Flap 180 – Manual x Mecanizado – [Rq] – Longitudinal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 180	0,00	1	0,00	0,15	4,10	0,70	Não significativa
Erro	0,78	38	0,02				
Total	0,79	39					

Fonte: O autor.

Tabela 21 – ANOVA – Roda Flap 240 – Manual x Mecanizado – [Rq] – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 240	0,22	1	0,22	4,59	4,10	0,04	Significante
Erro	1,85	38	0,05				
Total	2,07	39					

Fonte: O autor.

Tabela 22 – ANOVA – Roda Flap 240 – Manual x Mecanizado – [Rq] – Longitudinal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 240	0,27	1	0,27	124,66	4,10	0,00	Significante
Erro	0,08	38	0,00				
Total	0,36	39					

Fonte: O autor.

Tabela 23 – ANOVA – Roda Flap 320 – Manual x Mecanizado – [Rq] – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 320	0,03	1	0,03	2,76	4,10	0,10	Não significativa
Erro	0,36	38	0,01				
Total	0,38	39					

Fonte: O autor.

Tabela 24 – ANOVA – Roda Flap 320 – Manual x Mecanizado – [Rq] – Longitudinal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 320	0,26	1	0,26	249,75	4,10	0,00	Significante
Erro	0,04	38	0,00				
Total	0,30	39					

Fonte: O autor.

Tabela 25 – ANOVA – *Buffing* – Manual x Mecanizado – [Rq] – Longitudinal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
<i>Buffing</i>	0,09	1	0,09	195,93	4,10	0,00	Significante
Erro	0,02	38	0,00				
Total	0,10	39					

Fonte: O autor.

As Tabelas 26 a 33 apresentam os resultados da ANOVA não discutidos de Rz. As tabelas comparam os valores de Rz para o processo manual e mecanizado.

Tabela 26 – ANOVA – Roda Flap 180 – Manual x Mecanizado – [Rz] – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 180	8,04	1	8,04	1,54	4,10	0,22	Não significativa
Erro	198,11	38	5,21				
Total	206,15	39					

Fonte: O autor.

Tabela 27 – ANOVA – Roda Flap 180 – Manual x Mecanizado – [Rz] – Longitudinal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 180	2,21	1	2,21	2,97	4,10	0,09	Não significativa
Erro	28,35	38	0,75				
Total	30,56	39					

Fonte: O autor.

Tabela 28 – ANOVA – Roda Flap 240 – Manual x Mecanizado – [Rz] – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 240	24,45	1	24,45	6,60	4,10	0,01	Significante
Erro	140,85	38	3,71				
Total	165,29	39					

Fonte: O autor.

Tabela 29 – ANOVA – Roda Flap 240 – Manual x Mecanizado – [Rz] – Longitudinal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 240	16,36	1	16,36	68,64	4,10	0,00	Significante
Erro	9,06	38	0,24				
Total	25,42	39					

Fonte: O autor.

Tabela 30 – ANOVA – Roda Flap 320 – Manual x Mecanizado – [Rz] – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 320	2,12	1	2,12	1,68	4,10	0,20	Não significativa
Erro	47,86	38	1,26				
Total	49,99	39					

Fonte: O autor.

Tabela 31 – ANOVA – Roda Flap 320 – Manual x Mecanizado – [Rz] – Longitudinal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 320	12,19	1	12,19	121,71	4,10	0,00	Significante
Erro	3,81	38	0,10				
Total	15,99	39					

Fonte: O autor.

Tabela 32 – ANOVA – *Buffing* – Manual x Mecanizado – [Rz] – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
<i>Buffing</i>	0,50	1	0,50	1,51	4,10	0,23	Não significativa
Erro	12,71	38	0,33				
Total	13,22	39					

Fonte: O autor.

Tabela 33 – ANOVA – *Buffing* – Manual x Mecanizado – [Rz] – Longitudinal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
<i>Buffing</i>	4,31	1	4,31	247,60	4,10	0,00	Significante
Erro	0,66	38	0,02				
Total	4,97	39					

Fonte: O autor.

Na sequência, as Tabelas 34 a 41 apresentam os valores de ANOVA obtidos através da análise dos valores mensurados para de Rku.

Tabela 34 – ANOVA – Roda Flap 180 – Manual x Mecanizado – [Rku] – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 180	0,12	1	0,12	0,33	4,10	0,57	Não significativa
Erro	14,30	38	0,38				
Total	14,43	39					

Fonte: O autor.

Tabela 35 – ANOVA – Roda Flap 180 – Manual x Mecanizado – [Rku] – Longitudinal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 180	0,27	1	0,27	0,32	4,10	0,57	Não significativa
Erro	31,71	38	0,83				
Total	31,98	39					

Fonte: O autor.

Tabela 36 – ANOVA – Roda Flap 240 – Manual x Mecanizado – [Rku] – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 240	0,00	1	0,00	0,00	4,10	0,95	Não significativa
Erro	11,01	38	0,29				
Total	11,01	39					

Fonte: O autor.

Tabela 37 – ANOVA – Roda Flap 240 – Manual x Mecanizado – [Rku] – Longitudinal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 240	0,63	1	0,63	0,35	4,10	0,56	Não significativa
Erro	68,27	38	1,80				
Total	68,90	39					

Fonte: O autor.

Tabela 38 – ANOVA – Roda Flap 320 – Manual x Mecanizado – [Rku] – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 320	0,25	1	0,25	1,89	4,10	0,18	Não significativa
Erro	4,97	38	0,13				
Total	5,21	39					

Fonte: O autor.

Tabela 39 – ANOVA – Roda Flap 320 – Manual x Mecanizado – [Rku] – Longitudinal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 320	0,00	1	0,00	0,01	4,10	0,92	Não significativa
Erro	13,97	38	0,37				
Total	13,97	39					

Fonte: O autor.

Tabela 40 – ANOVA – *Buffing* – Manual x Mecanizado – [Rku] – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
<i>Buffing</i>	0,03	1	0,03	0,10	4,10	0,76	Não significativa
Erro	12,98	38	0,34				
Total	13,01	39					

Fonte: O autor.

Tabela 41 – ANOVA – *Buffing* – Manual x Mecanizado – [Rku] – Longitudinal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
<i>Buffing</i>	0,46	1	0,46	1,47	4,10	0,23	Não significativa
Erro	11,98	38	0,32				
Total	12,44	39					

Fonte: O autor.

As Tabelas 42 a 49 apresentam os valores das ANOVAS calculadas para Rsk cujo conteúdo não foi relevante para a linha de discussão apresentada.

Tabela 42 ANOVA – Roda Flap 180 – Manual x Mecanizado – [Rsk] – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 180	0,13	1	0,13	1,80	4,10	0,19	Não significativa
Erro	2,82	38	0,07				
Total	2,95	39					

Fonte: O autor.

Tabela 43 – Roda Flap 180 – Manual x Mecanizado – [Rsk] – Longitudinal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 180	0,24	1	0,24	3,08	4,10	0,09	Não significativa
Erro	3,02	38	0,08				
Total	3,27	39					

Fonte: O autor.

Tabela 44 – Roda Flap 240 – Manual x Mecanizado – [Rsk] – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 240	0,06	1	0,06	0,63	4,10	0,43	Não significativa
Erro	3,68	38	0,10				
Total	3,74	39					

Fonte: O autor.

Tabela 45 – Roda Flap 240 – Manual x Mecanizado – [Rsk] – Longitudinal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 240	0,40	1	0,40	2,30	4,10	0,14	Não significativa
Erro	6,58	38	0,17				
Total	6,98	39					

Fonte: O autor.

Tabela 46 – Roda Flap 320 – Manual x Mecanizado – [Rsk] – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 320	0,15	1	0,15	1,22	4,10	0,28	Não significativa
Erro	4,67	38	0,12				
Total	4,82	39					

Fonte: O autor.

Tabela 47 – Roda Flap 320 – Manual x Mecanizado – [Rsk] – Longitudinal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 320	0,00	1	0,00	0,00	4,10	0,95	Não significativa
Erro	5,48	38	0,14				
Total	5,48	39					

Fonte: O autor.

Tabela 48 – *Buffing* – Manual x Mecanizado – [Rsk] – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
<i>Buffing</i>	0,14	1	0,14	1,49	4,10	0,23	Não significativa
Erro	3,51	38	0,09				
Total	3,65	39					

Fonte: O autor.

Tabela 49 – *Buffing* – Manual x Mecanizado – [Rsk] – Longitudinal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
<i>Buffing</i>	0,76	1	0,76	7,48	4,10	0,01	Significante
Erro	3,84	38	0,10				
Total	4,60	39					

Fonte: O autor.

As Tabelas 50 a 54 mostram as ANOVAS referentes à Rdq não apresentadas durante a discussão dos resultados.

Tabela 50 – Roda Flap 180 – Manual x Mecanizado – [Rdq] – Longitudinal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 180	0,00	1	0,00	12,11	4,10	0,00	Significante
Erro	0,01	38	0,00				
Total	0,01	39					

Fonte: O autor.

Tabela 51 – Roda Flap 240 – Manual x Mecanizado – [Rdq] – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 240	0,00	1	0,00	2,82	4,10	0,10	Não significativa
Erro	0,02	38	0,00				
Total	0,02	39					

Fonte: O autor.

Tabela 52 – Roda Flap 240 – Manual x Mecanizado – [Rdq] – Longitudinal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 240	0,00	1	0,00	38,26	4,10	0,00	Significante
Erro	0,00	38	0,00				
Total	0,00	39					

Fonte: O autor.

Tabela 53 – Roda Flap 320 – Manual x Mecanizado – [Rdq] – Longitudinal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 320	0,00	1	0,00	109,34	4,10	0,00	Significante
Erro	0,00	38	0,00				
Total	0,00	39					

Fonte: O autor.

Tabela 54 – *Buffing* – Manual x Mecanizado – [Rdq] – Longitudinal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
<i>Buffing</i>	0,00	1	0,00	28,50	4,10	0,00	Significante
Erro	0,00	38	0,00				
Total	0,00	39					

Fonte: O autor.

As ANOVAS apresentadas nas tabelas 55 a 64 são referentes às comparações entre a etapa de polimento com Roda Flap 320 e a etapa de *Buffing*. As mesmas não apresentadas no corpo do trabalho. Essas comparações foram realizadas para o processo manual e para o processo mecanizado, abrangendo todos os parâmetros de rugosidade bidimensional.

Tabela 55– ANOVA – Roda 320 x *Buffing* – [Rq] – Processo Manual – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 320 x <i>Buffing</i>	0,08	1	0,08	9,12	4,10	0,00	Significante
Erro	0,32	38	0,01				
Total	0,39	39					

Fonte: O autor.

Tabela 56– ANOVA – Roda 320 x *Buffing* – [Rq] – Processo Mecanizado – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 320 x <i>Buffing</i>	0,00	1	0,00	0,03	4,10	0,87	Não significante
Erro	0,17	38	0,00				
Total	0,17	39					

Fonte: O autor.

Tabela 57 – ANOVA – Roda 320 x *Buffing* – [Rz] – Processo Manual – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 320 x <i>Buffing</i>	8,82	1	8,82	10,27	4,10	0,00	Significante
Erro	32,63	38	0,86				
Total	41,45	39					

Fonte: O autor.

Tabela 58 – ANOVA – Roda 320 x *Buffing* – [Rz] – Processo Mecanizado – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 320 x <i>Buffing</i>	0,65	1	0,65	0,88	4,10	0,35	Não significante
Erro	27,94	38	0,74				
Total	28,59	39					

Fonte: O autor.

Tabela 59 – ANOVA – Roda 320 x *Buffing* – [Rku] – Processo Manual – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 320 x <i>Buffing</i>	0,00	1	0,00	0,01	4,10	0,92	Não significativa
Erro	9,04	38	0,24				
Total	9,04	39					

Fonte: O autor.

Tabela 60 – ANOVA – Roda 320 x *Buffing* – [Rku] – Processo Mecanizado – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 320 x <i>Buffing</i>	0,13	1	0,13	0,57	4,10	0,46	Não significativa
Erro	8,91	38	0,23				
Total	9,04	39					

Fonte: O autor.

Tabela 61 – ANOVA – Roda 320 x *Buffing* – [Rsk] – Processo Manual – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 320 x <i>Buffing</i>	0,60	1	0,60	6,69	4,10	0,01	Significante
Erro	3,38	38	0,09				
Total	3,97	39					

Fonte: O autor.

Tabela 62 – ANOVA – Roda 320 x *Buffing* – [Rsk] – Processo Mecanizado – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 320 x <i>Buffing</i>	0,00	1	0,00	0,00	4,10	0,97	Não significativa
Erro	4,81	38	0,13				
Total	4,81	39					

Fonte: O autor.

Tabela 63 – ANOVA – Roda 320 x *Buffing* – [Rdq] – Processo Manual – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 320 x <i>Buffing</i>	0,00	1	0,00	4,36	4,10	0,04	Significante
Erro	0,04	38	0,00				
Total	0,05	39					

Fonte: O autor.

Tabela 64 – ANOVA – Roda 320 x *Buffing* – [Rdq] – Processo Mecanizado – Transversal

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F-teste (F0)	F-Crítico (Fc)	P - Value	Influência
Roda Flap 320 x <i>Buffing</i>	0,00	1	0,00	0,11	4,10	0,74	Não significativa
Erro	0,09	38	0,00				
Total	0,09	39					

Fonte: O autor.