

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

MATHEUS LEANDRO DE SOUZA BORGES

**AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE E DA MICRODUREZA DO
POLIURETANO TERMOPLÁSTICO (TPU) APÓS A
RETIFICAÇÃO PLANA TANGENCIAL**

Uberlândia - MG

2021

MATHEUS LEANDRO DE SOUZA BORGES

**AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE E DA MICRODUREZA DO
POLIURETANO TERMOPLÁSTICO (TPU) APÓS A
RETIFICAÇÃO PLANA TANGENCIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecânica**.

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Professor. Dr. Rosemar Batista da Silva

Uberlândia

2021

MATHEUS LEANDRO DE SOUZA BORGES

**AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE E DA MICRODUREZA DO
POLIURETANO TERMOPLÁSTICO (TPU) APÓS A
RETIFICAÇÃO PLANA TANGENCIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecânica**.

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Uberlândia, 15 de julho de 2021.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva – FEMEC-UFU – Orientador

Me. Bruno Souza Abrão (Doutorando) FEMEC-UFU

Prof. Dr. Rhander Viana – UnB Gama

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, pelo apoio incondicional prestado a mim durante toda a graduação.

Ao Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva pela orientação durante o desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) e ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) pela disponibilização de todas as máquinas e equipamentos utilizados para a execução deste trabalho.

Ao professor Dr. Rhander Viana, da Universidade de Brasília, Campus Gama, pela doação do material da peça.

Ao técnico do Laboratório de Usinagem Convencional, Dr. Alcione dos Reis, e ao Dr. Daniel Dominices Baía Gomes de Souza, técnico do Laboratório de Apoio à Fabricação, ambos da FEMEC, pelo apoio e orientação na realização dos ensaios de retificação e medição de microdureza, respectivamente.

Ao mestrando Alessandro Augusto Olímpio Ferreira Vittorino do Laboratório de Tribologia e Materiais, ao doutorando Paulo Lourenço Monteiro Junior e ao pós-doutorando Leonardo Rosa Ribeiro da Silva do LEPU, pelo suporte técnico e auxílio durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Engenheiro Rodolfo Fischer Moreira de Oliveira, funcionário da empresa Saint-Gobain do Brasil Produtos Industriais e para Construção Ltda, pela doação do rebolo.

Ao Sr. Marcelo Kuroda, funcionário da empresa Blaser Swissslube, pela doação do fluido de corte.

RESUMO

Devido à sua boa resistência ao impacto, seu baixo peso específico e suas ótimas resistências à corrosão e à abrasão, o Poliuretano Termoplástico (TPU) tem sido utilizado como material estrutural para várias aplicações de engenharia, das quais algumas requerem um ótimo acabamento e superfícies homogêneas. A retificação é um processo de usinagem por abrasão que permite a obtenção de combinação entre tolerâncias dimensionais e geométricas estreitas, com destaque para baixos valores de rugosidade. Desta forma, o emprego do processo de retificação é uma alternativa interessante para proporcionar o acabamento superior e baixos desvios dimensionais e geométricos em peças fabricadas em Poliuretano Termoplástico. Contudo, devido às peculiaridades do processo de retificação com rebolos abrasivos convencionais, grande parte do calor gerado é direcionado para a peça, o que pode levar a danos de origem térmica tais como queda de dureza, trincas, queima de retífica, dentre outros, que podem comprometer a funcionalidade do componente e levar a prejuízos. Assim, é importante selecionar parâmetros de corte adequados que permitam conciliar produtividade e manutenção da integridade da peça. Para o caso do Poliuretano, que pertence à classe de polímeros, a literatura ainda é escassa em termos da retificabilidade do material, até mesmo em relação ao rebolo mais adequado. Por esta razão, este trabalho foi proposto com o objetivo de avaliar a influência de parâmetros de corte típicos de retificação de aços, como a penetração de trabalho e velocidade da peça, nos parâmetros de rugosidade (R_a , R_t e R_z) e microdureza do Poliuretano Termoplástico após a retificação plana, analisando também as superfícies retificadas em microscópio óptico. Foram empregados o rebolo de óxido de alumínio branco e fluido de corte semissintético. Os resultados mostraram que, a uma velocidade da peça de 2,7 m/min, não houve variações na rugosidade aumentando a penetração de trabalho de 15 μm para 25 μm . Contudo, ao empregar uma maior velocidade da peça, igual a 7,5 m/min, o mesmo incremento gerou aumento nos valores de R_a , R_t e R_z de 8%, 63% e 30%, respectivamente. Quanto aos resultados de microdureza, observou-se endurecimento na camada localizada 20 μm abaixo da superfície retificada ao empregar velocidade da peça igual a 2,7 m/min, com resultados de microdureza entre 11 HV e 11,5 HV. Além disso, foi verificado nas imagens obtidas no microscópio óptico que houve um maior fluxo lateral de material nos ensaios com penetração de trabalho de 25 μm .

Palavras-chave: Retificação, Poliuretano, Rebolo de Óxido de Alumínio, Rugosidade, Microdureza.

ABSTRACT

Due to its high impact strength, low specific weight and great corrosion and abrasion resistance, the Thermoplastic Polyurethane (TPU) has been increasingly used as a structural material in many engineering applications, some of which require a superior finish and homogeneous surfaces. Grinding is an abrasive machining process that enables to achieve narrow dimensional and geometric tolerances, specially low roughness values. Thus, the use of grinding process is an interesting alternative to provide superior finishing and low geometric and dimensional deviations in components made from Thermoplastic Polyurethane. However, due to the peculiarities of the grinding process with conventional grinding wheel, most of the heat generated in the process is directed to the workpiece, what can lead to thermal damages such as hardness loss, cracks, grinding burn, among others, that can reduce the component's performance and lead to losses. Therefore, it is important the proper selection of the cutting parameters to conciliate productivity with maintenance of workpiece's integrity. Specifically for the Polyurethane, which belongs to the polymer class, the literature is still scarce in terms of the grindability of the material, even in relation to the most suitable grinding wheel. In this context, this study was proposed to evaluate the influence of cutting parameters typically of grinding of steels, such as radial depth of cut and workspeed, in the roughness parameters (R_a , R_t e R_z) and in the microhardness of TPU after peripheral surface grinding, also analyzing the rectified surfaces using an optical microscope. A White Aluminum Oxide grinding wheel and a semi-synthetic fluid were employed. The results showed that increasing the depth of cut from 15 μm to 25 μm with the lowest workspeed (V_w) of 2.7 m/min, there was no variation in roughness. However, when grinding with the highest workspeed of 7.5 m/min, the same increment in depth of cut generated an increase in the values of R_a , R_t e R_z of 8%, 63% e 30%, respectively. With regard to microhardness results, it was observed a hardening in regions 20 μm below the ground surface when using V_w equal to 2.7 m/min, with microhardness results between 11 HV and 11.5 HV. Furthermore, it was verified by the images obtained by optical microscope presence of intense side flow material on the surfaces machined with depth of cut of 25 μm .

Keywords: Grinding, Thermoplastic Polyurethane, Aluminum Oxide Grinding Wheel, Roughness, Microhardness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Macromolécula de polímeros em geral (KOLTZENBURG, 2017).	14
Figura 2 -	Aplicações do Poliuretano: A) Poliuretano Rígido para fabricação de parachoques; B) Espuma de Poliuretano aplicada a painéis para isolamento térmico; C) Poliuretano sob as formas Estrutural, Tinta e Revestimento aplicado a pás eólicas (POLIURETANO: TECNOLOGIA E APLICAÇÕES , 2013).	17
Figura 3 -	Curva Tensão-Deformação do Poliuretano Termoplástico (TPU) (Adaptado de CAI et al., 2018).	18
Figura 4 -	Opções comerciais de esteiras transportadoras fabricadas em Poliuretano para indústrias alimentícias (INTRALOX, 2017).	19
Figura 5	Etapas de remoção de material na retificação de materiais dúcteis (Adaptada de KLOCKE, 2009).	20
Figura 6	Principais tipos de dressadores estáticos (Adaptada de KLOCKE, 2009).	25
Figura 7	Principais tipos de dressadores rotativos (Adaptada de KLOCKE, 2009).	25
Figura 8	Esquema de dressagem de rebolo com dressador de ponta única (MALKIN; GUO, 2008).	26
Figura 9	Esquema da operação de dressagem com os seus principais parâmetros (JACKSON et al., 2011).	27
Figura 10	Representação esquemática do plano de trabalho no processo de retificação plana (Fonte: O Próprio Autor).	28
Figura 11	Grandezas físicas do processo de retificação plana (adaptada de MARINESCU et al., 2007).	28
Figura 12	Comprimento de amostragem e linha média (NETO, 2012).	35
Figura 13	Retificadora Plana Tangencial Mello, P-36.	39
Figura 14	Montagem da peça para execução do ensaio de retificação.	40
Figura 15	Montagem do dressador de ponta única para a dressagem do rebolo.	40
Figura 16	Amostra de Poliuretano Termoplástico utilizada nos ensaios.	42

Figura 17	Dimensões das amostras de Poliuretano Termoplástico em milímetros.	42
Figura 18	Medição de Dureza Shore A em superfície da amostra.	43
Figura 19	Arranjo experimental para medições de rugosidade das superfícies após o processo de retificação.	44
Figura 20	Microdurômetro Shimadzu HMV-G.	45
Figura 21	Distribuição das indentações para avaliação de microdureza abaixo da superfície retificada (dimensões em micrometros).	45
Figura 22	Microscópio Óptico Olympus modelo BX51M.	46
Figura 23	Rugosidade média aritmética (Ra) em função da penetração de trabalho (ae) e da velocidade da peça (Vw).	47
Figura 24	Altura total do perfil (Rt) em função da penetração de trabalho (ae) e da velocidade da peça (Vw).	48
Figura 25	Altura máxima do perfil (Rz) em função da penetração de trabalho (ae) e da velocidade da peça (Vw).	48
Figura 26	Microdureza (HV) de Poliuretano Termoplástico em função da penetração de trabalho para diferentes valores de velocidade da peça e em função da distância abaixo da superfície retificada (μm).	51
Figura 27	Microdureza (HV) em função da distância abaixo da superfície retificada (μm) com apresentação regressão linear para cada ensaio.	52
Figura 28	Imagens das superfícies retificadas obtidas a partir de microscopia óptica.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Propriedades mecânicas: Poliuretano Termoplástico (TPU), Poliacetal (POM) e Nylon 6 (adaptado de PANNEERSELVAM et al., 2013; HEPBURN, 1992; BEGUM et al., 2019, SZYCHER, 2013; LIU et al., 2013; HASSAN et al., 2006).	19
Tabela 2 -	Principais elementos de rebolos convencionais e exemplo de especificação (MACHADO et al., 2009).	22
Tabela 3 -	Algumas propriedades das principais classes dos abrasivos para rebolos de retificação (adaptado de MACHADO et al., 2009; ROWE, 2009).	23
Tabela 4 -	Relação entre R_a e comprimento de amostragem (NETO, 2012).	34
Tabela 5 -	Principais parâmetros de rugosidade (MACHADO et al., 2009).	35
Tabela 6 -	Características do Ensaio de Microdureza Vickers (Adaptada de CALLISTER JR e RETHWISCH, 2012).	37
Tabela 7 -	Parâmetros de corte para os ensaios de retificação.	40
Tabela 8 -	Valores médios com desvio padrão dos parâmetros R_a , R_t e R_z para cada condição de corte.	45
Tabela 9 -	Valores de espessura equivalente de corte (heq) para cada um dos ensaios de retificação.	47

LISTA DE ABREVIACOES E SÍMBOLOS

a_e	Penetração de Trabalho	(μm)
a_p	Profundidade de Corte	(μm)
CBN	Nitreto Cúbico de Boro	
d_s	Diâmetro Equivalente do Rebolo	(mm)
e_c	Energia Específica de Corte	(J/mm^3)
h_{eq}	Espessura Equivalente de Corte	(μm)
HV	Dureza Vickers	
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry	
POM	Poli-oxi-metileno (Poliacetal)	
R_a	Rugosidade Média Aritmética	(μm)
R_{ku}	Fator de achatamento do perfil	
R_q	Desvio Médio Quadrático	(μm)
R_{sk}	Skewness (Assimetria do perfil)	
R_t	Altura Total do Perfil de Rugosidade	(μm)
R_z	Altura Máxima do Perfil de Rugosidade	(μm)
TPU	Poliuretano Termoplástico	
u_d	Grau de Recobrimento do Rebolo	(μm)
V_s	Velocidade de corte ou Periférica do Rebolo	(m/s)
V_w	Velocidade da Peça	(m/min)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	POLÍMEROS.....	14
2.1.1	POLIURETANO	16
2.2	O PROCESSO DE RETIFICAÇÃO.....	19
2.2.1	REBOLOS PARA A RETIFICAÇÃO.....	21
2.2.1.1	DRESSAGEM DE REBOLOS	24
2.2.2	GRANDEZAS FÍSICAS DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	27
2.2.3	APLICAÇÃO DE FLUIDO DE CORTE.....	32
2.3	PARÂMETROS DE SAÍDA DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	33
2.3.1	RUGOSIDADE	33
2.3.2	ALTERAÇÕES SUBSUPERFICIAIS.....	36
3	METODOLOGIA.....	39
3.1	MÁQUINAS E PROCEDIMENTO PARA RETIFICAÇÃO	39
3.2	MATERIAL DA PEÇA.....	41
3.3	PARÂMETROS DE SAÍDA	43
3.3.1	RUGOSIDADE.....	43
3.3.2	MICRODUREZA (ENSAIO VICKERS)	44
3.3.3	ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES EM MICROSCÓPIO ÓPTICO	46
4	RESULTADOS	47
4.1	RUGOSIDADE	47
4.2	MICRODUREZA	50
4.3	ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES POR MICROSCOPIA ÓPTICA	52
5	CONCLUSÕES.....	55
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

1 INTRODUÇÃO

Plásticos de engenharia tem ganhado grande relevância nos últimos anos devido às suas vantagens sobre as ligas metálicas, como aços inoxidáveis e ferros fundidos, por exemplo, em várias aplicações. Dentre suas propriedades gerais atrativas para aplicações de engenharia, podem ser citadas a facilidade e os baixos custos para fabricação das peças, o reduzido peso específico, o baixo coeficiente de atrito e a boa resistência à corrosão, o que os tornam possíveis substitutos aos aços, por exemplo, em componentes aeronáuticos e automobilísticos, como peças de trens de pouso de aeronaves, paraquedas e paralamas de automóveis (TELLES, 2003; MARGOLIS, 2006).

Dentre os vários polímeros, o Poliuretano Termoplástico (TPU) é um material que tem ganhado relevância em aplicações estruturais, principalmente devido à sua termoplaticidade, que possibilita que ele seja reaproveitado por várias vezes. Além disso, a homogeneidade de sua estrutura, sua boa resistência ao impacto, à oxidação e à abrasão permitem que ele seja aplicado na fabricação de esteiras transportadoras, rolamentos, engrenagens, paraquedas e outras peças (HUANG et al., 2020; SZYCHER, 2013). Em várias aplicações, alguns componentes, como engrenagens e rolamentos, requerem a combinação entre bom acabamento e baixo desvio dimensional, com qualidade de trabalho na faixa entre IT06-IT03. Para que tais requisitos sejam alcançados, o processo de retificação surge como uma alternativa atrativa.

A retificação é um processo de usinagem por abrasão aplicado industrialmente e, na maior parte das vezes, é utilizado nas etapas finais de fabricação quando o projeto do componente especifica tolerâncias dimensionais e geométricas apertadas, com destaque para um nível de acabamento superficial, ou seja baixos valores de rugosidade R_a , que normalmente situa-se abaixo de $1,6 \mu\text{m}$. No entanto, a retificação possui algumas peculiaridades que exigem maior atenção do usuário de usinagem em comparação a outros processos de usinagem com ferramenta de geometria definida como, por exemplo, o fresamento. Na retificação, os grãos abrasivos convencionais apresentam geometria não definida, são pobres condutores térmicos e tem dimensões pequenas quando comparados às ferramentas de usinagem com geometria definida. Assim, são empregados valores de penetração de trabalho até duas ordens de grandeza menores. Além disso, as partículas abrasivas apresentam um ângulo de saída predominantemente negativo. Com isso, será exigida elevada energia específica de corte, o que elevará significativamente a temperatura da zona de corte. Ademais, devido às dimensões pequenas dos cavacos e à alta refratariedade do rebolo, grande parte do calor gerado no processo

será direcionado para a peça e, dependendo da intensidade, irá causar danos de origem térmica à peça retificada, podendo levar à sua inutilização, ou seja, a prejuízos (MARINESCU et al., 2007; MACHADO et al., 2009).

Para descrever a facilidade de se retificar um dado material, Marinescu et al. (2007) utilizam o termo retificabilidade. Os autores informam que é fundamental compreender a retificabilidade dos materiais para que os parâmetros de corte sejam definidos de forma eficiente e sejam obtidos os resultados esperados.

Dessa forma, este trabalho tem o intuito de fornecer contribuição científica para a compreensão da retificabilidade do Poliuretano Termoplástico, tema que ainda apresenta escassez de estudos. O processo utilizado foi a retificação plana tangencial com rebolo de óxido de alumínio branco. Como variáveis de entrada foram selecionadas a penetração de trabalho e a velocidade da peça. Para avaliar a qualidade das superfícies retificadas, foram selecionadas como variáveis de saída a rugosidade, a microdureza e imagens das superfícies retificada obtidas por meio microscópio óptico. A divisão do trabalho foi feita em cinco capítulos, com seus respectivos conteúdos listados a seguir:

CAPÍTULO 1 – tem a finalidade de introduzir o leitor ao tema, apresentando definições, propriedades e aplicações gerais do Poliuretano Termoplástico e do processo de retificação, além de definir o objetivo do trabalho e as variáveis de entrada e saída que serão avaliadas;

CAPÍTULO 2 - apresenta a revisão bibliográfica sobre os temas pertinentes ao trabalho, com abordagens detalhadas sobre polímeros, com ênfase no Poliuretano Termoplástico, o processo de retificação, materiais de rebolos e grandezas físicas relativas à retificação. Este capítulo também apresenta a exposição dos principais conceitos relativos aos parâmetros de saída avaliados no trabalho;

CAPÍTULO 3 – contém a descrição textual, esquemática e fotográfica de todo o aparato experimental utilizado nos ensaios de retificação, além dos parâmetros de corte, incluindo os parâmetros de dressagem, as características e dimensões das amostras de Poliuretano Termoplástico utilizadas. Por último são apresentadas as variáveis de saída e a metodologia empregada para seu monitoramento.

CAPÍTULO 4 – este capítulo é composto pela apresentação dos resultados obtidos e de sua análise com base na teoria de retificação.

CAPÍTULO 5 – apresenta as conclusões definidas com base na análise dos resultados seguidas de sugestões para trabalhos futuros relativos ao tema.

Ao fim dos cinco capítulos, são apresentadas todas as referências bibliográficas consultadas para este trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção será apresentada a revisão bibliográfica sobre polímeros, dando ênfase ao Poliuretano Termoplástico e suas aplicações, o processo de retificação e os parâmetros que foram utilizados neste estudo para avaliação de superfícies retificadas: rugosidade e microdureza.

2.1 POLÍMEROS

A palavra polímero é derivada do grego e tem origem na junção do prefixo *poly*, que significa “muitos”, e *meros* que, nesse caso, pode ser traduzido como “partes” (GEDDE e HEDENQVIST, 2019). Em termos químicos, um polímero é uma macromolécula formada pela união de moléculas menores que se repetem, como se fossem peças, para formar a cadeia polimérica. Tais blocos recebem o nome de monômeros. As ligações químicas que os mantêm unidos são chamadas ligações covalentes (KOLTZENBURG, 2017). A estrutura da macromolécula de polímeros pode ser observada na Figura 1.

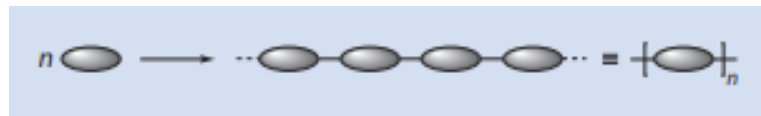


Figura 1 – Macromolécula de polímeros em geral (KOLTZENBURG, 2017).

De acordo com as normas internacionais publicadas pela IUPAC, entidade internacional responsável por normatizar a nomenclatura de elementos e compostos químicos, a regra geral para designar polímeros emprega o prefixo poli- seguido da unidade estrutural repetitiva que define ao polímero, escrita entre parênteses, citando como exemplo: poli cloropreno (Neopreno).

Quando os monômeros formadores da cadeia polimérica são iguais, o polímero recebe a classificação de homopolímero e, quando são diferentes, ele é classificado como copolímero (CALLISTER JR e RETHWISCH, 2012).

A estrutura da cadeia polimérica também possui uma classificação que é baseada na sua cristalinidade e é apresentada a seguir (EBEWELE, 2000; CALLISTER JR e RETHWISCH, 2012).

- Cristalinos: estruturas com elevada cristalinidade, ou seja, alto grau de ordenação tridimensional dos monômeros;
- Amorfos: baixa cristalinidade, caracterizada por estruturas desordenadas;
- Semicristalinos: materiais com cristalinidade mediana, compostos tanto por fases cristalinas quanto amorfas.

De acordo com Canevarolo Jr. (2002), abaixo da chamada temperatura de transição vítrea, característica de cada material e situada geralmente entre $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, as moléculas de materiais poliméricos apresentam posicionamentos rigidamente fixos em configuração amorfa, possuindo apenas vibrações de baixas amplitudes. À medida que a temperatura se eleva, as vibrações são amplificadas e os movimentos rotacionais e translacionais das moléculas passam a ter maiores amplitudes, o que torna o material flexível e cria mecanismos de absorção de energia a partir da deformação. A temperatura que a partir da qual o polímero deixa seu estado vítreo e se torna flexível é chamada temperatura de transição vítrea, sendo ela uma propriedade única de cada material (EBEWELE, 2000).

De acordo com seu comportamento mecânico quando submetidos a elevações de temperatura, os polímeros são divididos em dois tipos: termofixos e termoplásticos (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2012).

Os polímeros termofixos, antes de passarem pelo processo de endurecimento, assumem uma forma chamada de pré-polímero. A aplicação de calor e pressão gera, a partir do pré-polímero, um sólido formado por ligações químicas cruzadas (EBEWELE, 2000). O processo, no entanto, não pode ser revertido, ou seja, não é possível amolecer o termofixo para gerar novas formas. Exemplos desse tipo de polímero são as resinas fenol-formaldeído e epóxi (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2012).

Os termoplásticos apresentam amolecimento ao serem submetidos a uma fonte de calor, e, neste caso, o processo de endurecimento é reversível. Com isso eles podem passar por processos de conformação mecânica para formar novas peças repetidas vezes. Segundo Ebewele (1996), exemplos de termoplásticos de grande importância na engenharia são o Polietileno, o Nylon, o Poliacetal e o Poliuretano, sendo este último o material de estudo desta pesquisa.

Além das classes de polímeros termofixos e termoplásticos, uma outra classe de polímero também possui importância relevante para aplicações de engenharia, os elastômeros. Eles também são conhecidos como borrachas, se destacam pela sua elevada elasticidade, suportando deformações de até 700% sem entrar em regime de deformação plástica (TELLES, 2003).

Assim como os termofixos, a reciclagem de elastômeros não é possível através do processo de fusão (EBEWELE, 2000).

2.1.1 POLIURETANO

Sabe-se da literatura que o Poliuretano foi sintetizado pela primeira vez no ano de 1937, pelo químico alemão Otto Bayer, que buscava desenvolver polímeros para competir com o Nylon (MEIER-WESTHUES et al., 2019; SZYCHER, 2013). O Poliuretano é um polímero de estrutura amorfa, que pode se sintetizado como termofixo ou termoplástico e possuir estrutura física de bloco rígido, elastômero flexível ou espuma (SZYCHER, 2013). Nesta seção serão apresentadas as principais formas em que o Poliuretano é utilizado, com ênfase à sua forma de bloco rígido, conhecida como Poliuretano Termoplástico.

O Poliuretano pode ser usado em várias formas para aplicações de engenharia, por exemplo, como espuma para isolamento térmico e fabricação de assentos automotivos, em sua forma rígida para fabricação de rolamentos e parachoques, e como revestimento para pisos, tubulações e componentes estruturais (SOMARATHNA et al., 2018; HUANG et al., 2020; JIANG et al., 2019). Na Figura 2 são apresentadas algumas aplicações das principais formas do Poliuretano.

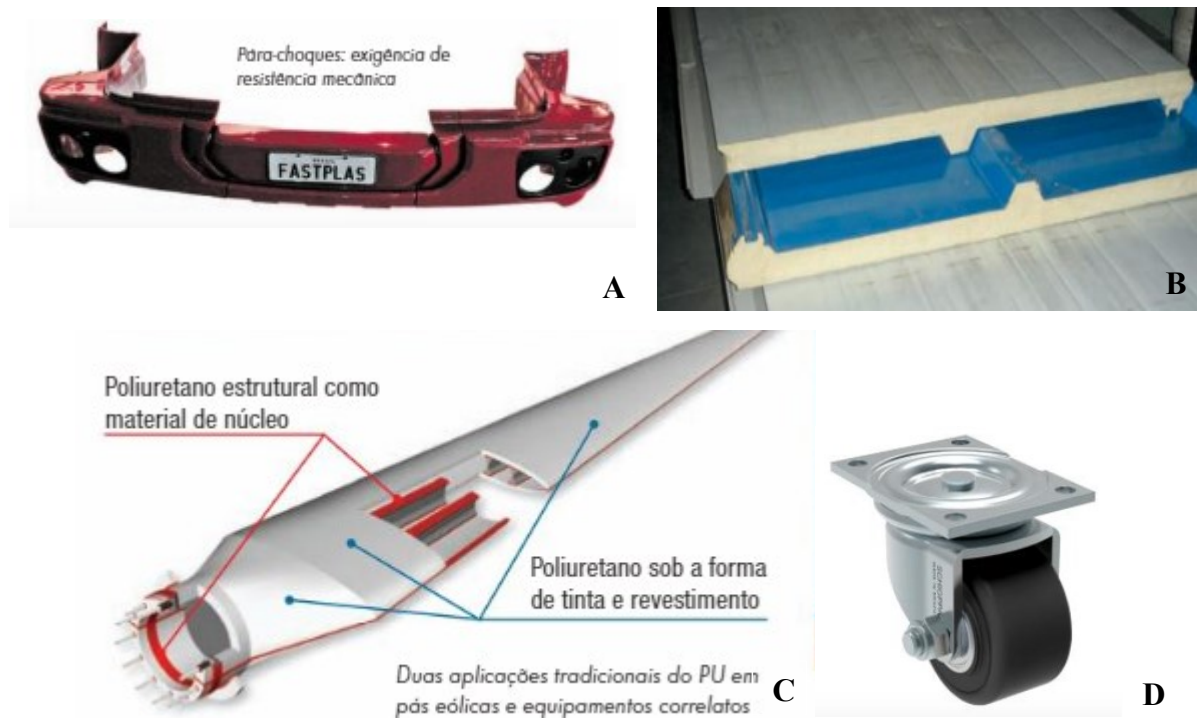


Figura 2 – Aplicações do Poliuretano: A) Poliuretano Rígido para fabricação de para-choques; B) Espuma de Poliuretano aplicada a painéis para isolamento térmico; C) Poliuretano sob as formas Estrutural, Tinta e Revestimento aplicado a pás eólicas; D) Roda para rodízio fabricada em Poliuretano Termoplástico (POLIURETANO: TECNOLOGIA E APLICAÇÕES , 2013; POLIURETANO: TECNOLOGIA E APLICAÇÕES , 2017).

O Poliuretano na forma de bloco rígido, também conhecido como Poliuretano Termoplástico (TPU), objeto de estudo deste trabalho, é um polímero amorfo, com estrutura termoplástica e cadeia copolimérica (KHALIFA et al., 2020). Como principais características, se destacam as boas resistências ao impacto, à abrasão e à propagação de trincas. Contudo, o TPU possui algumas limitações, como a suscetibilidade aos ataques de vapor de água, raios ultravioletas, ácidos e bases fortes, além de baixa estabilidade térmica, com temperatura mínima de operação recomendada em torno de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ e máxima de $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ (BOUBAKRI et al., 2010). Outra limitação do Poliuretano Termoplástico é sua baixa resistência mecânica, com limite de escoamento por volta de 8 MPa e limite de resistência à tração de aproximadamente 32,3 MPa (HASSAN et al., 2006; CAI et al., 2018). A curva tensão-deformação do Poliuretano Termoplástico puro é apresentada na Figura 3.

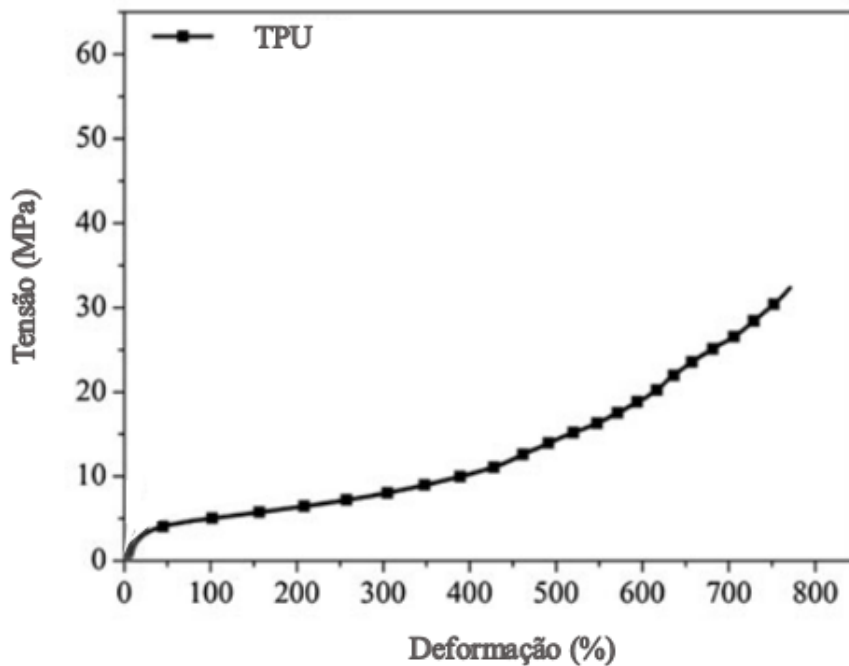


Figura 3 – Curva Tensão-Deformação do Poliuretano Termoplástico (TPU) (Adaptado de CAI et al., 2018).

Entre as principais aplicações do Poliuretano Termoplástico estão a utilização como material para a fabricação de parachoques automotivos, esteiras, engrenagens, rolamentos, calçados, tubos e componentes de equipamentos médicos (BEGUM et al., 2019; KHALIFA et al., 2020). Ele pode ser usado em sua forma pura e também como matriz de compósitos.

Como material para fabricação de esteiras transportadoras para indústrias alimentícias o Poliuretano Termoplástico possui lugar de destaque devido à facilidade de higienização e, conseqüentemente menor acúmulo de contaminantes (QIAO et al., 2017). O bom acabamento das esteiras de Poliuretano são de extrema importância para evitar a adesão de bactérias e proporcionar uma limpeza eficiente durante o processo de higienização. Rodrigues (2009) e Careli et al. (2009) identificaram que superfícies rugosas de esteiras de Poliuretano apresentaram adesão bacteriana após a higienização até 150 vezes maior que superfícies lisas do mesmo material. Também foi verificado por Rodrigues et al. (2009) que superfícies lisas de Poliuretano apresentam desempenho sanitário melhor do que materiais como o Nylon e o Polietileno em esteiras para frigoríficos de aves. Alguns modelos comerciais de esteiras transportadoras fabricadas em Poliuretano podem ser observados na Figura 4.

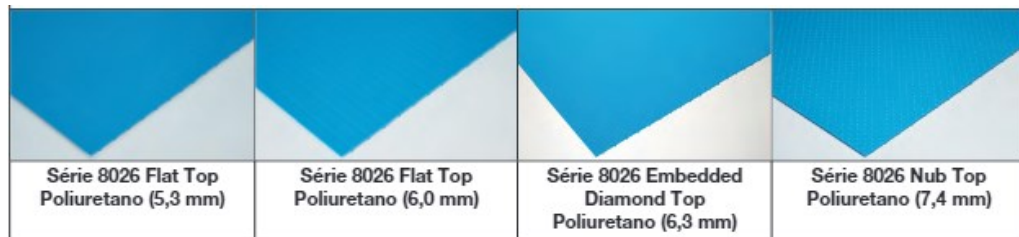


Figura 4 – Opções comerciais de esteiras transportadoras fabricadas em Poliuretano para indústrias alimentícias (INTRALOX, 2017).

O Poliacetal e o Nylon 6 também são polímeros termoplásticos com larga aplicação na engenharia, e concorrentes do Poliuretano Termoplástico em algumas aplicações, como a fabricação de rolamentos, engrenagens e tubos. Na Tabela 1 são apresentadas as principais propriedades destes três polímeros.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas: Poliuretano Termoplástico (TPU), Poliacetal (POM) e Nylon 6 (adaptado de PANNEERSELVAM et al., 2014; HEPBURN, 1992; BEGUM et al., 2019; SZYCHER, 2013; LIU et al., 2013; HASSAN et al., 2006).

Propriedade	TPU	POM	Nylon 6
Temperatura de fusão (°C)	170	166	217
Densidade (g/cm ³)	1,18	1,41	1,1
Limite de Resistência à Tração (MPa)	32,3	65	68,6
Módulo de Elasticidade (MPa)	32,9	860	2,76
Limite de Escoamento (MPa)	8	21	52
Dureza Shore D	55	80	70

2.2 O PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Por retificação entende-se como sendo o processo de usinagem que remove material da peça pela ação abrasiva de uma ferramenta de revolução chamada rebolo. Este é formado por partículas cerâmicas de pequenas dimensões, com geometria não definida, que são unidas por um ligante. Estas partículas possuem em geral maior dureza do que o material a ser usinado (MARINESCU et al., 2007).

Dentre as peculiaridades do processo de retificação o destaque é para o mecanismo de formação de cavaco para materiais dúcteis, que envolve as etapas ilustradas na Figura 5 e descritas a seguir, de acordo com Klocke (2009) e Marinescu et al. (2007).

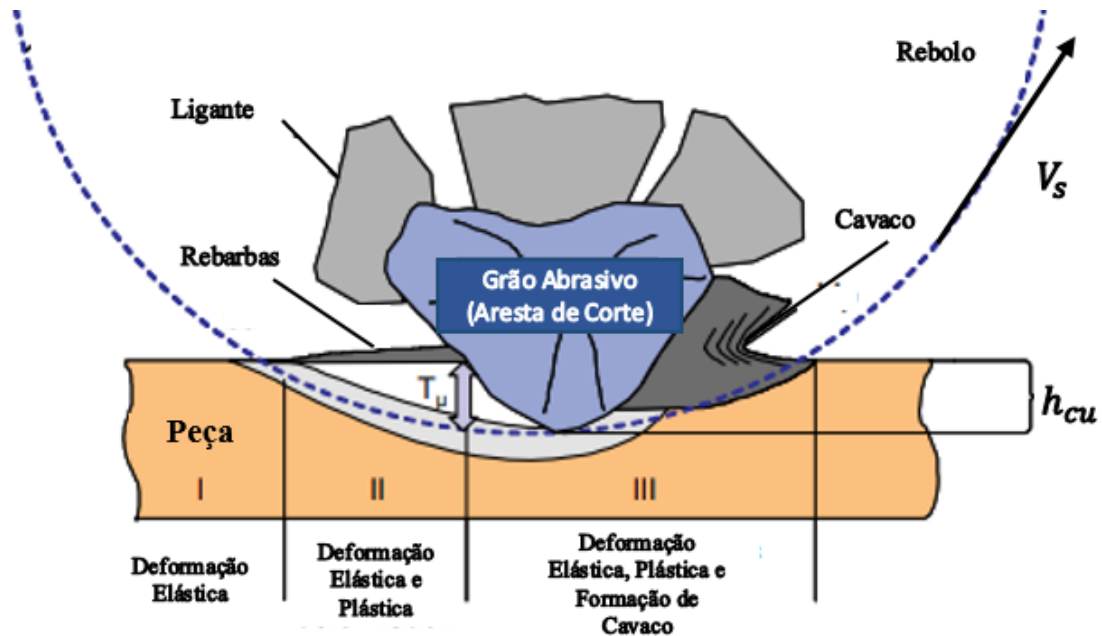


Figura 5 – Etapas de remoção de material na retificação de materiais dúcteis (Adaptada de KLOCKE, 2009).

- 1ª. etapa – Atrito e Deformação Elástica: devido ao pequeno ângulo formado entre as arestas de corte e a superfície da peça no início do contato entre os grãos abrasivos e a superfície, não há remoção efetiva de material, predominando atrito e deformações elásticas. Esta etapa é talvez a mais crítica, pois a maior parte da energia do processo é convertida em calor, elevando muito a temperatura da peça, o que pode gerar alterações das propriedades mecânicas, microestruturais, de microdureza, dentre outras;
- 2ª. Etapa – Deformação Elástica e Plástica: o aumento das tensões cisalhantes causado pela penetração de mais grãos abrasivos na peça dá início ao processo de deformação plástica e a passagem dos grãos abrasivos gera fluxo lateral de material deformado plasticamente. Nesta etapa também existe deformação elástica de material, mas ainda não há remoção efetiva de cavaco;
- 3ª. Etapa - Remoção efetiva de material: esta etapa se inicia quando as tensões cisalhantes alcançam seu valor crítico, o que acontece quando os grãos abrasivos atingem a chamada penetração crítica (T_{μ}) que, neste momento, é igual à espessura de

cavaco não deformada (h_{cu}). Nesta etapa, os grãos de fato estão em sua maior parte em contato com a peça e realizam o corte. Esta é a situação ideal, quando toda a energia é empregada na remoção de material.

Machado et al. (2009) classificam o processo de retificação conforme a geometria da peça a ser usinada: retificação plana, retificação cilíndrica externa, retificação cilíndrica interna. Dentre estes, um dos processos mais importantes e empregados na indústria metal-mecânica é a retificação plana, objeto deste estudo. Nele, a peça possui superfície plana e é fixada a uma placa ou mesa ferromagnética, dotada de movimentos longitudinais e transversais, enquanto o rebolo possui movimento rotativo e seu eixo ainda é passivo de translação para que se possa ajustar a penetração de trabalho radial na peça.

A retificação é normalmente aplicada como processo final na fabricação de componentes mecânicos cuja função exige uma combinação entre acabamento fino, em geral com valores de Ra na faixa entre 0,2 e 1,6 μm para a maioria dos abrasivos convencionais, e baixos valores de desvios geométricos e dimensionais (Qualidade de Trabalho IT06-IT03) (MACHADO et al., 2009).

2.2.1 REBOLOS PARA A RETIFICAÇÃO

Os elementos de um rebolo são o material, a granulometria mesh, a dureza, a estrutura e o ligante (Tabela 2) e que serão comentados na sequência (DINIZ et al., 2010). Assim, estes parâmetros podem definir, junto aos parâmetros de corte, a eficiência do processo de retificação.

Aspectos químicos também possuem grande importância no processo, pois é necessário que o abrasivo mantenha suas propriedades, principalmente a dureza, quando submetido a altas temperaturas, situação que ocorre com frequência, segundo Malkin et al. (2008), devido à alta demanda de energia por volume de material removido (energia específica de corte). Esta energia essa é convertida, em sua maior parte, em calor, que fica retido na zona de corte. Além disso, também é um requisito que os grãos não reajam quimicamente com o material da peça usinada (ROWE, 2009).

Tabela 2 – Principais elementos de rebolos convencionais e exemplo de especificação (MACHADO et al., 2009).

Abrasivo	Granulometria	Dureza	Estrutura	Ligante
38A	60	K	2	V
A: óxido de alumínio	8-14: muito grosseiro	A: macio Z: duro	0-3: denso 4-6: médio 7-9: poroso 10-16: altamente poroso	V: vitrificado B: resinoide R: elástico M: metálico
B: carboneto de silício	16-36: grosseiro			
B: CBN	46-80: médio			
D: diamante	90-220: fino 240-1200: muito fino			

O primeiro termo indica o material do qual os grãos abrasivos são constituídos, fator importante para análises químicas e mecânicas relativas à interação entre ferramenta e peça.

Os principais abrasivos convencionais empregados em retificação e que possuem utilização mais abrangente na indústria metal-mecânica, e também nos poucos trabalhos encontrados sobre retificação de polímeros e compósitos (ANDRADE et al., 2016; KIM e JANG, 2014), são à base de óxido de alumínio (Al_2O_3) e o carbeto de silício (SiC), que são considerados materiais cerâmicos convencionais. Quando o material da peça a ser usinada possui dureza muito elevada ou há requisitos para um acabamento superior àquele que pode ser proporcionado por abrasivos convencionais, normalmente são empregados os rebolos chamados de superabrasivos, que são à base de Nitreto Cúbico de Boro (*CBN*) e diamante sintético (MARINESCU et al., 2007). Algumas propriedades dos principais materiais empregados para rebolos de retificação são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Algumas propriedades das principais classes dos abrasivos para rebolos de retificação (adaptado de MACHADO et al., 2009; ROWE, 2009).

Abrasivo	Dureza	Condutividade	Aplicações
	Knoop (kgf/mm ²)	Térmica (W/ m K)	
Óxido de Alumínio (Al₂O₃)	2.100	35	Aços e ligas aeronáuticas.
Carbeto de Silício (SiC)	2.400	100	Não metálicos, vidro, ferros fundidos, carboneto de tungstênio.
Nitreto Cúbico de Boro (CBN)	4.700	240 - 1300	Aços e materiais ferrosos de alta dureza, ligas aeronáuticas.
Diamante	8.000	600 - 2000	Cerâmicas, não metálicos e metal duro brasado.

A granulometria mesh quantifica o tamanho médio das partículas abrasivas (MALKIN; GUO, 2008). Segundo Machado et al. (2009), esse fator influi diretamente na rugosidade final da peça, sendo que, quanto maior o valor da granulometria e, conseqüentemente, quanto menor o grão abrasivo, menor será o valor da rugosidade da superfície retificada. Porém, vale ressaltar que a qualidade superficial da peça também depende de parâmetros de processo, como velocidade de corte, velocidade da mesa ou peça, penetração de trabalho e profundidade de corte.

O terceiro indicador apresentado na Tabela 2 representa a dureza do rebolo. Esse parâmetro não está relacionado às propriedades do abrasivo em si, mas sim ao elemento ligante da ferramenta. O rebolo é considerado duro se o ligante for capaz de reter os grãos mesmo sob altas tensões mecânicas e condições severas de corte; ele é considerado macio se houver maior facilidade para o desprendimento das partículas abrasivas durante a operação. Rowe (2009) destaca que o termo usado para se referir a essa propriedade é a friabilidade, ou seja, a tendência do grão se fraturar durante o processo de retificação. A fratura gera novas arestas cortantes, se apresentando então como benéfica para a efetividade do rebolo na remoção de material. Para fins práticos, conforme citado por Machado et al. (2009), é recomendável, para a retificação de materiais com dureza elevada, a utilização de rebolo mais friável, ou seja, de menor dureza.

A estrutura de um rebolo refere-se à sua quantidade volumétrica de abrasivo, e varia de escala que vai de 1 a 16. Assim, quanto maior o número, maior será a distância entre partículas abrasivas e mais aberta e porosa será sua estrutura. A porosidade do rebolo é importante no transporte de cavaco e fluido de corte para fora da interface de corte, o que deve ser levado em conta na seleção do rebolo adequado para o processo (MARINESCU et al., 2008). Rowe (2009) destaca que rebolos de alta porosidade são indicados para processos de desbaste e para usinagem de materiais muito dúcteis, cuja retificação gera cavacos mais longos.

O ligante, também chamado de aglomerante, é o que mantém as partículas abrasivas unidas. Ele deve suportar altas cargas e temperaturas e também possibilitar a auto afiação do rebolo, com o desprendimento de grãos com reduzida capacidade de corte. Dentre os principais ligantes, apresentados na Tabela 2, destaca-se o vitrificado, utilizado na grande maioria dos rebolos convencionais e que atualmente permite o trabalho com velocidades de corte de até 120 m/s (MALKIN et al., 2008).

2.2.1.1 DRESSAGEM DE REBOLOS

Durante o processo de corte, são inevitáveis as perdas de afiação dos grãos abrasivos e de concentricidade do rebolo com seu eixo de rotação. Os principais reflexos dessa perdas são os aumentos no valor de rugosidade, forças de usinagem e temperatura na zona de corte (MACHADO et al, 2009). Para evitar este problema na indústria, é necessário que sejam determinados intervalos para que o rebolo passe pelo processo de dressagem. Em projetos de pesquisa, no entanto, o rebolo é sempre dressado antes de cada ensaio, para que todos os ensaios sejam realizados sob condições homogêneas e possuam repetibilidade, evitando, desta forma, a influência da condição do rebolo nos resultados obtidos. Assim, a operação de dressagem visa sobretudo a obtenção de concentricidade entre o rebolo e seu eixo de rotação, e a remoção de grãos desgastados de sua superfície de corte, bem como restauração da capacidade de corte por meio da reafiação das arestas de corte dos grãos abrasivos (OLIVEIRA, 1989). Ela é realizada por meio de ferramentas conhecidas como dressadores.

Segundo Klocke (2009), os dressadores podem ser classificados em estáticos (Figura 6) ou rotativos (Figura 7). Dressadores estáticos possuem apenas movimentos translacionais, enquanto dressadores rotativos são ferramentas na forma de rolos dotadas de movimento rotacional.



Figura 6 – Principais tipos de dressadores estáticos (Adaptada de KLOCKE, 2009)

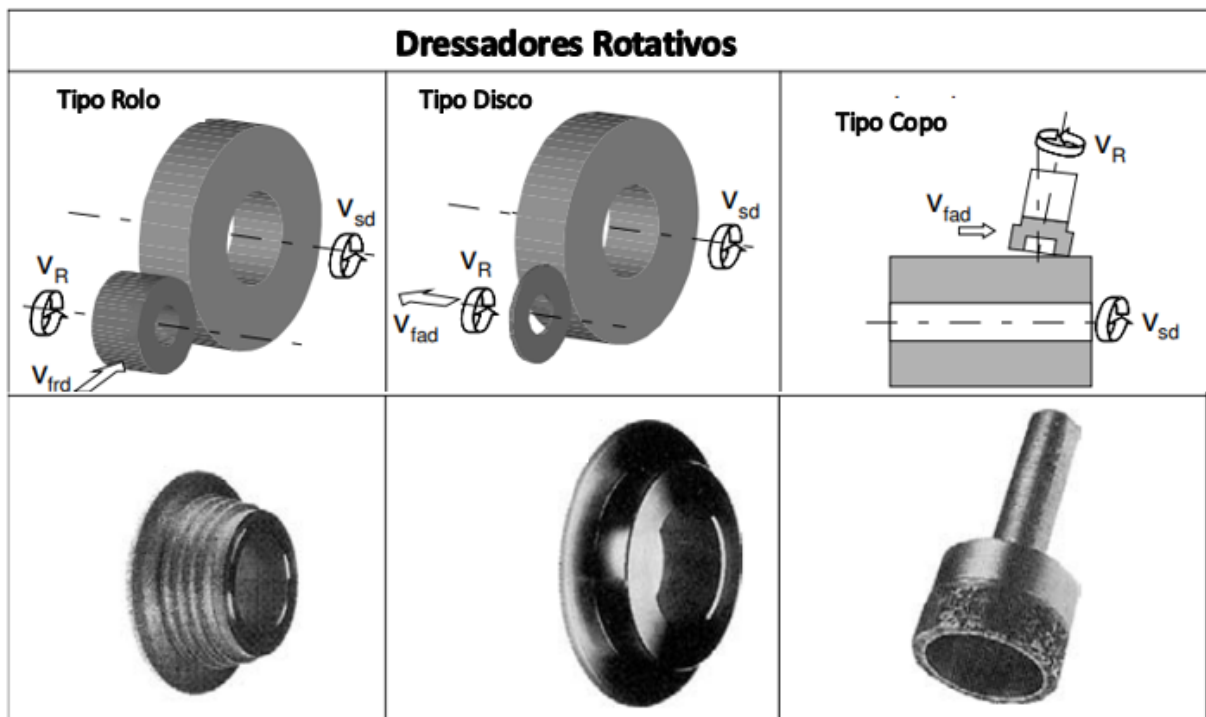


Figura 7 – Principais tipos de dressadores rotativos (Adaptada de KLOCKE, 2009).

Segundo Marinescu et al. (2007), no processo de retificação são utilizados principalmente os dressadores estáticos de diamante com ponta única ou aqueles com múltiplas pontas. O

dressador de ponta única é o mais comumente utilizado em operações de dressagem pelo seu menor valor e maior simplicidade de utilização, e por esta razão foi aquele utilizado neste estudo.

O processo de dressagem em retificação plana tangencial consiste na fixação do dressador de ponta única em suporte preso à mesa magnética, que fará movimentos transversais para remover material do rebolo sob rotação. A cada passe do dressador, será removido o que equivale à penetração de dressagem, a_d , no raio do rebolo, conforme esquema apresentado na Figura 8.

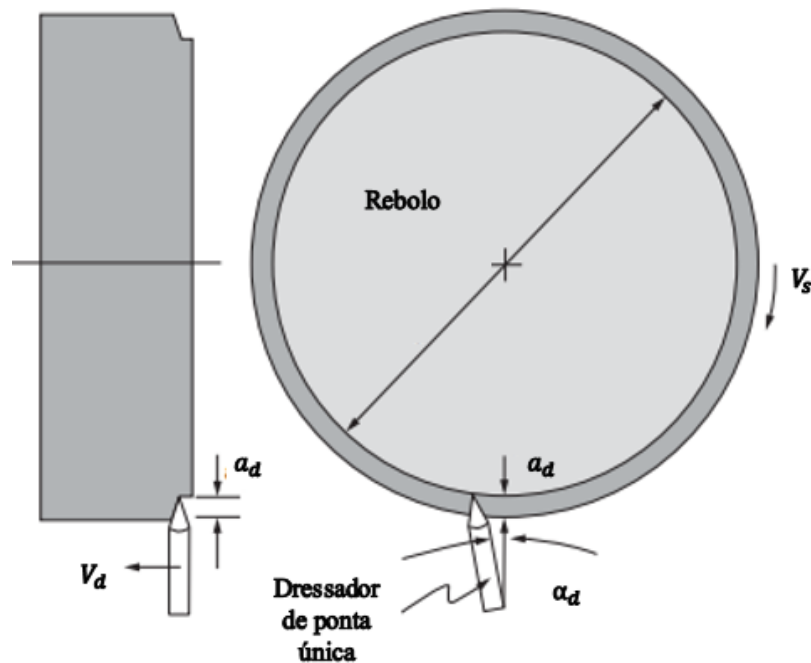


Figura 8 – Esquema de dressagem de rebolo com dressador de ponta única (MALKIN; GUO, 2008).

De acordo com Jackson et al. (2011), o parâmetro que caracteriza o processo de dressagem é o grau de recobrimento do rebolo, dado pela razão entre a largura do dressador (a_{pd}) e o passo de dressagem (f_{ad}). Esta relação está expressa na Equação (1) e as variáveis estão representadas na Figura 9.

$$u_d = \frac{a_{pd}}{f_{ad}} \quad (1)$$

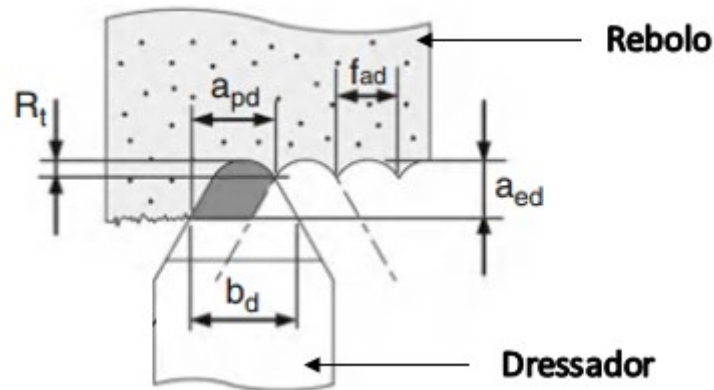


Figura 9 – Esquema da operação de dressagem com os seus principais parâmetros (JACKSON et al., 2011).

2.2.2 GRANDEZAS FÍSICAS DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Um conceito importante para a compreensão das grandezas físicas do processo de retificação é o plano de trabalho comum para todos os processos de usinagem. Este plano passa pelo ponto de referência, tomado na zona de corte, e contém as direções de corte e de avanço, conforme definição da norma NBR 6175: 2015 – Usinagem: Processos Mecânicos. Os conceitos das grandezas penetração de trabalho e profundidade de corte, que serão discutidos na sequência, são definidos com base no plano de trabalho. Nas Figuras 10 e 11 são apresentadas as ilustrações esquemáticas do plano de trabalho no processo de retificação plana e das principais grandezas físicas do processo de retificação plana, respectivamente.

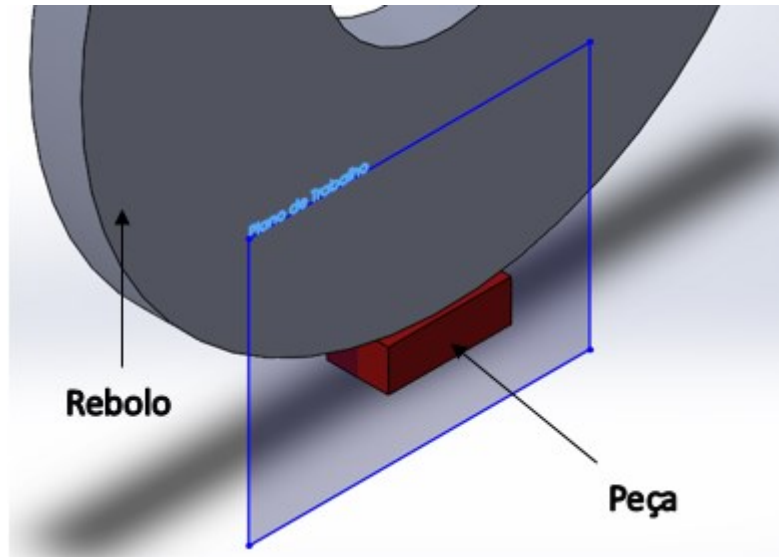


Figura 10 – Representação esquemática do plano de trabalho no processo de retificação plana (Fonte: O Próprio Autor).

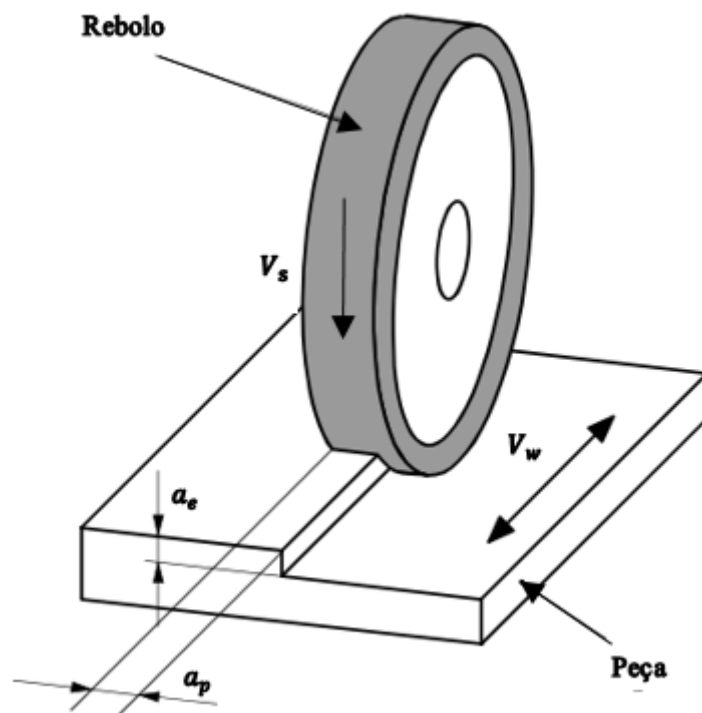


Figura 11 – Grandezas físicas do processo de retificação plana (adaptada de MARINESCU et al., 2007).

- Velocidade de corte (V_s)

A velocidade de corte pode ser definida como a distância que uma partícula abrasiva localizada na região periférica do rebolo se desloca num dado intervalo de tempo. Na retificação, essa grandeza é medida, em geral, em metros por segundo e pode ser calculada a partir da equação (2).

$$v_s = \frac{\pi d_s n_s}{60000} \quad (2)$$

Em que:

- d_s : diâmetro externo do rebolo (mm)
- n_s : rotação do rebolo (rpm)

Esse é um parâmetro que impacta de forma notável todas as variáveis de saída do processo, como desvios dimensionais e geométricos, acabamento superficial, vida útil do rebolo e temperatura da interface entre rebolo e peça. A elevação da velocidade de corte resulta numa maior frequência de contato entre ferramenta e peça, o que implica numa menor quantidade de material removida pelos grãos abrasivos em cada revolução, gerando cavacos com dimensões reduzidas e, conseqüentemente, redução das forças de usinagem (MALKIN; GUO, 2008). Apesar disso, o aumento da velocidade do rebolo aumenta sua dureza, fazendo com que grãos desgastados permaneçam mais tempo no rebolo, o que faz com que a temperatura na zona de corte se eleve, provocando efeitos indesejáveis no material usinado. Esses efeitos também são chamados de danos térmicos e podem comprometer o funcionamento da peça, gerando prejuízos financeiros (RUZZI et al., 2021).

- Velocidade periférica da peça (V_w)

Este parâmetro corresponde à velocidade transversal ou longitudinal de um ponto na periferia da peça durante o processo de usinagem (MALKIN; GUO; 2008). No processo de retificação plana tangencial, a velocidade da peça corresponde à velocidade da mesa onde a peça é fixada. A elevação da velocidade da peça gera o aumento da espessura de corte equivalente e, com isso, é elevada também a quantidade de grãos abrasivos em contato com a

peça, com conseqüente aumento das forças de corte e redução da vida útil do rebolo (PEREIRA, 2018; MALKIN e GUO, 2008; KLOCKE, 2009).

- Penetração de trabalho (a_e)

É a grandeza que representa o quanto o rebolo penetra na peça, medida no plano de trabalho e perpendicular à direção de avanço do rebolo, neste caso da velocidade da peça (DINIZ et al., 2010). Normalmente, trabalhar com baixos valores de penetração de trabalho permite alcançar tolerâncias dimensionais mais estreitas e menores valores de rugosidade, mas implica em menor produtividade. O aumento de a_e implica em aumento da espessura equivalente de corte (h_{eq}), o que significa que uma maior área dos grãos abrasivos estará em contato com a peça, com isso serão exigidas maiores forças de corte e, conseqüentemente, o desgaste do rebolo e a rugosidade final da peça se elevarão, como foi verificado por Weck et al. (2001). Esta grandeza está representada na Figura 11.

- Profundidade de corte (a_p)

Grandeza que corresponde ao comprimento de contato entre rebolo e peça, medido num plano perpendicular ao plano de trabalho e perpendicular à direção de avanço do rebolo (Segundo Machado et al (2009), como pode ser visto na Figura 11). Também segundo os mesmos autores, valores comuns para essa grandeza de corte se situam entre $1/4$ e $4/5$ da largura do rebolo.

- Espessura equivalente de corte (h_{eq})

Em termos de processo, a espessura equivalente de corte é correspondente à espessura aproximada do cavaco removido sob determinadas condições de corte. O aumento deste parâmetro resulta na remoção de maior quantidade de material a cada interação entre os grãos abrasivos e a peça, o que eleva as forças de corte e prejudica a rugosidade da peça retificada, além de causar maiores desvios dimensionais (ROWE, 2009).

A espessura equivalente de corte (h_{eq}) é representada matematicamente pela Equação (3) (MALKIN; GUO, 2008).

$$h_{eq} = a_e \cdot \frac{V_w}{60 \cdot V_s} \quad (3)$$

Em que:

- V_s : penetração de trabalho (μm);
- V_w : a velocidade da peça (m/min);
- V_s : velocidade de corte (m/s).

- Energia Específica de Corte (e_c)

Segundo Marinescu et al. (2007), a energia específica de corte é a energia necessária para remover uma unidade de volume de material da peça, e ela é expressa em J/mm^3 . Marinescu et al. (2007) também estabelecem a relação de proporcionalidade, relacionando a energia específica de corte e parâmetros de corte da retificação, por meio da equação (4).

$$e_c \propto \sqrt{\frac{V_s}{V_w} \cdot C \cdot r} \cdot \sqrt{\frac{d_s}{a_e}} \quad (4)$$

Em que:

- V_s : velocidade de corte;
- V_w : velocidade da peça;
- C : fator relacionado à densidade dos grãos abrasivos;
- r : fator relacionado à afiação dos grãos abrasivos;
- d_s : diâmetro equivalente do rebolo;
- a_e : penetração de trabalho.

Uma das principais características do processo de retificação é a alta energia específica de corte, ou seja, ele demanda maior energia para remoção de determinada quantidade de material, quando comparado a outros processos de usinagem convencionais com ferramenta de geometria definida, por exemplo, o fresamento. Como resultado, são desenvolvidas elevadas temperaturas na interface entre rebolo e peça. Além disso, rebolos de abrasivos cerâmicos convencionais, normalmente à base de óxido de alumínio ou carbetto de sílico, possuem propriedades refratárias, o que dificulta ainda mais a dissipação de calor gerado na zona de corte. Desta forma, é imprescindível que um fluido de corte com elevada capacidade de

refrigeração seja empregado no processo de retificação para garantir uma remoção eficiente de calor da zona de corte, pois o direcionamento de grande parte do calor para a peça retificada pode causar elevação excessiva da temperatura e, com isso, gerar danos de origem térmica à peça retificada e, conseqüentemente, prejuízos financeiros (MALKIN e GUO, 2008).

2.2.3 APLICAÇÃO DE FLUIDO DE CORTE

De acordo com Malkin e Guo (2008), o uso de fluidos de corte tem duas funções principais:

- redução do atrito entre rebolo e peça;
- redução da temperatura na zona de corte;
- capacidade de remoção de cavaco da zona de corte.

Como funções secundárias citadas por Machado et al. (2009), destacam-se a retirada de cavacos da interface e a proteção contra oxidação.

Na usinagem a seco, sem utilização de fluido de corte, cerca de 75% do calor gerado no processo de retificação vai para a peça, 5% para o cavaco, 10% para o rebolo e 10% para o meio (DINIZ et al., 2010). A grande parcela de calor recebida pela peça é um grande problema na retificação de polímeros, dado que o ponto de fusão desses materiais se situa geralmente entre 125 °C e 225 °C, valores estes muito baixos em comparação com aqueles de aços carbono, por exemplo, que apresentam ponto de fusão em torno de 1450 °C (MARGOLIS, 2006; KIM et al., 2009). Assim, verifica-se que maior atenção deve ser dada à correta seleção dos parâmetros de corte e operacionais do processo de retificação de materiais poliméricos, nos quais se incluem o tipo de fluido de corte, técnica de aplicação, vazão e bocal a fim de garantir uma eficiente remoção de calor da zona de corte e preservação da integridade da peça retificada. Sheikh-Ahmad (2009) afirma que a aplicação de fluidos de corte no processo de usinagem de polímeros e compósitos de matriz polimérica é de suma importância para manter a temperatura da zona de corte abaixo da temperatura máxima de operação do polímero em questão, para que não haja fusão ou alterações estruturais significativas na peça.

Assim, apesar do espaço que técnicas que utilizam menores quantidades de fluidos de corte têm ganhado nos últimos anos, neste trabalho optou-se por empregar a técnica convencional de aplicação de fluido de corte, por abundância, devido às limitações impostas pelo baixo ponto de fusão do Poliuretano em comparação com materiais metálicos. Em um

estudo que investigou a influência das técnicas de aplicação de fluido de corte na retificação plana tangencial de compósitos de matriz epóxi reforçada com fibras de carbono, com velocidade de corte constante de 33,5 m/s e penetração de trabalho entre 150 e 600 μm , Rodriguez et al. (2019) verificaram que vazões mais elevadas proporcionaram menores valores de rugosidade.

2.3 PARÂMETROS DE SAÍDA DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Fatores topográficos e aspectos subsuperficiais são importantes para avaliar a integridade de peças retificadas. A topografia, em geral, é avaliada em termos de desvios macro e microgeométricos (rugosidade). Já os aspectos subsuperficiais são qualificados com base na análise de alterações de origem mecânica e metalúrgica, esta última aplicada somente a materiais metálicos. Dentre as principais alterações subsuperficiais destacam-se variações de microdureza, danos térmicos e transformações de fase. Esta seção dará ênfase à discussão sobre rugosidade e microdureza, parâmetros selecionados para avaliar topografia e alterações de origem mecânica, respectivamente.

2.3.1 RUGOSIDADE

A retificação é largamente aplicada como processo final de fabricação de peças cujo projeto prevê acabamento superficial de elevada qualidade, ou seja, valores de rugosidade média aritmética (R_a) inferiores a 1,6 μm , além de desvios dimensionais que configuram uma qualidade de trabalho entre IT06 e IT03, que são baixos em comparação com os obtidos por processos convencionais de usinagem com ferramenta de geometria definida, como o fresamento, por exemplo (MARINESCU et al., 2013).

Machado et al (2009) definem a rugosidade como irregularidades ou erros microgeométricos decorrentes, por exemplo, de marcas de avanço e desgaste da ferramenta de corte. Ela é dependente dos parâmetros de corte utilizados no processo, do material da peça, do tipo de rebolo, dentre outras variáveis.

A fim de padronizar conceitos e métodos de medição de rugosidade, na norma NBR ISO 4287:2002 podem ser encontradas todas as definições referentes ao tema e também os parâmetros que podem ser utilizados para definir a textura de uma superfície.

Dentre os conceitos relevantes para a avaliação de perfis, destaca-se o comprimento de amostragem (*cut-off*), que é definido pela NBR ISO 4287:2002 como o comprimento na direção X que permite caracterizar o perfil sob avaliação. Malkin e Guo (2008) recomendam a seleção de um comprimento de amostragem longo o suficiente para apresentar um número representativo de perturbações microgeométricas (rugosidade), mas que seja mais curto que as ondulações, para que seja possível distingui-las. A norma brasileira também define o chamado comprimento de avaliação, e recomenda que ele inclua cinco comprimentos de amostragem para definir, de fato, o perfil avaliado.

O *cut-off* visa filtrar a ondulação, a fim de representar nos resultados apenas as irregularidades microgeométricas. Assim, sua seleção é de extrema importância para a execução de medições precisas. Na Tabela 4 é apresentada a relação entre a rugosidade média (R_a) e o comprimento de amostragem necessário para avaliá-la.

Tabela 4 – Relação entre R_a e comprimento de amostragem (NETO, 2012).

R_a (μm)	Comprimento de amostragem (<i>cut-off</i>) (mm)
De 0 a 0,1	0,25
Entre 0,1 e 2,0	0,80
Entre 2,0 e 10,0	2,50
Acima de 10,0	8,00

Além disso, avaliação de rugosidade necessita de um sistema de referência, sendo os mais utilizados o da linha média e o da evolvente. No Brasil, é largamente empregado o método da linha média, que deve ser traçada paralela à direção de avaliação do perfil, de forma que a soma das áreas localizadas acima dela sejam iguais às que se encontram abaixo. A partir dela, são definidos todos os parâmetros para medição de rugosidade (NETO, 2012). Na Figura 12 é apresentada de forma esquemática o traço da linha média. Ela deve ser traçada de forma que $A1 + A2 = A3$.

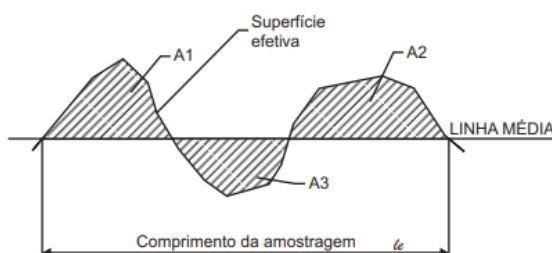


Figura 12 – Esquema de representação do comprimento de amostragem e linha média (NETO, 2012).

São necessários diversos indicadores para que seja possível quantificar e qualificar os perfis de forma efetiva, possibilitando a comparabilidade de diferentes superfícies. Os principais estão apresentados, de acordo com a norma brasileira NBR ISO 4287:2002, na Tabela 5, todos eles definidos com base na linha média.

Tabela 5 – Principais parâmetros de rugosidade (MACHADO et al., 2009).

Símbolo	Nomenclatura	Definição
R_a	Rugosidade Média Aritmética	Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento dos pontos do perfil com relação à linha média no comprimento de amostragem.
R_q	Desvio Médio Quadrático	Raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem.
R_t	Altura total do perfil	Soma do maior pico e do maior vale do perfil no comprimento de avaliação.
R_z	Altura máxima do perfil	Soma da altura do maior pico e da profundidade do maior vale no comprimento de amostragem.
R_{sk}	Skewness (Assimetria do perfil)	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas e R_q ao cubo, no comprimento de amostragem.
R_{ku}	Fator de achatamento do perfil	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas à quarta potência

e o valor de R_q à quarta potência no comprimento de amostragem.

A pesquisa acerca da avaliação de rugosidade após retificação de polímeros puros ainda é escassa. Em um dos poucos estudos relacionados, Rodriguez et al. (2019) investigaram a influência da vazão de fluido de corte e da espessura de corte equivalente na retificação de polímero reforçado com fibra de carbono. Dentre os principais resultados encontrados por eles, foi constatado que o aumento da espessura equivalente de corte leva ao aumento dos valores de rugosidade, neste caso do R_a , e também que baixas vazões de fluido na usinagem deste material não conseguem propiciar bons acabamentos em comparação com vazões mais elevadas.

2.3.2 ALTERAÇÕES SUBSUPERFICIAIS

Além da avaliação do acabamento superficial, é também importante verificar a ocorrência de alterações mecânicas ou metalúrgicas nas camadas logo abaixo da superfície retificada (MACHADO et al., 2009). Alterações metalúrgicas ocorrem apenas em materiais metálicos e, como o foco deste trabalho é estudar a retificação do Poliuretano, esta seção será voltada apenas às alterações de natureza mecânica que podem ocorrer após o processo de retificação.

Com relação à retificação de polímeros, a elevação da temperatura na zona de corte deve receber atenção especial para que a peça não apresente danos estruturais ou grandes alterações de propriedades mecânicas, pois quando estes materiais são comparados aos metais, eles apresentam baixo ponto de fusão. No caso do Poliuretano Termoplástico, essa temperatura é, em média, de 170 °C (HEPBURN, 1992). Para fins comparativos, o aço ABNT 4340, por exemplo, possui ponto de fusão em torno de 1427 °C (POLLY, 2019).

De acordo com Machado et al. (2009), as principais alterações subsuperficiais de natureza mecânica que podem ocorrer após processos de usinagem são: deformações plásticas, rebarbas, trincas, tensões residuais e alterações de microdureza.

Deformações plásticas, segundo Malkin e Guo (2008), podem surgir na superfície retificada e em camadas subsuperficiais devido a tensões de compressão geradas pela componente normal da força de retificação. As rebarbas também são formadas por material

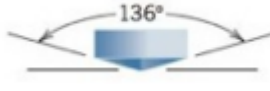

deformado plasticamente, sendo sua causa, geralmente, a falta de afiação da ferramenta de corte para transformar esse material deformado em cavaco (MACHADO et al., 2009).

O desenvolvimento de trincas devido ao processo de retificação ocorre, em geral, nos materiais frágeis. Uma das causas do surgimento de trincas são as tensões residuais decorrentes do usinagem. O processo de retificação, especificamente, induz tensões residuais de compressão na peça, o que pode ser benéfico por melhorar a resistência à fadiga, porém, tensões residuais elevadas podem ocasionar tanto o surgimento de trincas quanto alterações na estrutura do material (MARINESCU et al., 2007; MACHADO et al., 2009).

Avaliar o perfil de microdureza logo abaixo da superfície retificada também é importante para identificar alterações de natureza mecânica e poder entender como os parâmetros de corte podem ser ajustados a fim de garantir as mínimas alterações possíveis na peça durante o processo. Segundo Callister Jr. e Rethwisch (2012), a dureza de um material pode ser definida como a resistência que ele possui de se deformar plasticamente sob uma carga localizada, que pode ser uma indentação ou risco. A microdureza possui o mesmo conceito, porém sua medição envolve a aplicação de cargas muito menores do que testes de dureza, como Vickers ou Brinell, por exemplo (CALLEJA e FAKIROV, 2000). O ensaio consiste na avaliação da impressão residual deixada pela aplicação de determinada carga a partir de um indentedor.

Segundo Flores et al. (2008), o teste de microdureza mais utilizado para polímeros é o Vickers, que utiliza um indentedor de diamante com geometria piramidal. Neste teste, para a maioria dos materiais poliméricos, a carga aplicada se encontra entre 0,05 e 2 Newtons (0,005 e 0,2 kgf) e o tempo de aplicação indicado é de 30 segundos. Na Tabela 6 são apresentadas as principais características do ensaio de microdureza Vickers.

Tabela 6 – Características do Ensaio de Microdureza Vickers (Adaptada de CALLISTER JR e RETHWISCH, 2012).

Penetrador	Pirâmide de diamante
Vista Lateral do Penetrador	
Vista Superior do Penetrador	

O cálculo do valor de Microdureza Vickers é feito a partir da equação (5):

$$HV = 1,854 \frac{P}{d_1^2} \quad (5)$$

Em que:

- P: carga aplicada (kgf);
- d_1 : medida da diagonal da base da pirâmide de diamante (mm).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão descritos as máquinas, equipamentos e instrumentos utilizados no preparo das amostras e nos ensaios de retificação, as variáveis de entrada e os parâmetros de saída analisados. Também serão detalhados o material das peças usinadas, bem como a metodologia adotada para o desenvolvimento de toda parte experimental.

3.1 MÁQUINAS E PROCEDIMENTO PARA RETIFICAÇÃO

Os ensaios de retificação foram conduzidos na retificadora plana tangencial apresentada na Figura 13, do fabricante Mello, modelo P-36 que pertence ao Laboratório de Usinagem Convencional (LUC) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da UFU.



Figura 13 - Retificadora Plana Tangencial Mello, P-36.

A retificadora é dotada de uma mesa magnética com movimentação transversal e longitudinal, onde é fixada a peça a ser usinada. Para a execução dos ensaios, a peça de Poliuretano foi presa em uma morsa, que por sua vez foi fixada à mesa magnética, conforme Figura 14.



Figura 14 – Montagem da peça para execução do ensaio de retificação.

Em todos os ensaios foi utilizado um rebolo de óxido de alumínio branco (Al_2O_3), de especificação AA46K6V, com dimensões 264 mm x 25,4 mm x 127 mm (Diâmetro Externo x Largura x Diâmetro Interno). A dressagem do rebolo, realizada antes de cada ensaio a fim de manter homogêneas as condições de processo, foi feita com um dressador de ponta única de diamante, com uma penetração de dressagem (a_d), de 10 μ m. Na Figura 15 é apresentada a montagem para a dressagem do rebolo.



Figura 15 – Montagem do dressador de ponta única para a dressagem do rebolo.

A velocidade de corte (V_s) de 33 m/s e a profundidade de corte (a_p) de 15 mm foram mantidas constantes em todos os ensaios. Estes são valores típicos para a retificação de aços

endurecidos e por isso foram utilizados como referência para este trabalho. A preparação da peça antes do ensaio de retificação foi feita em condições mais brandas, com a_e igual a 5 μm e V_w igual a 7,5 m/min, com fluido de corte em abundância.

Neste trabalho, como variáveis de entrada, foram utilizadas a penetração de trabalho (a_e) e a velocidade da peça (V_w). Seus valores para cada ensaio são apresentados na Tabela 7. Para cada ensaio, foi realizada uma réplica.

Tabela 7 – Parâmetros de corte para os ensaios de retificação.

Ensaio	Penetração de trabalho (a_e) (μm)	Velocidade da peça (V_w) (metros/minuto)
1	15	2,7
2	25	2,7
3	15	7,5
4	25	7,5

3.2 MATERIAL DA PEÇA

O material de trabalho neste estudo foi o Poliuretano Termoplástico (TPU) de cadeia copolimérica (Figura 16). Para a realização dos ensaios de retificação, foram utilizadas duas amostras com dimensões 60 mm x 30 mm x 20 mm (Comprimento x Largura x Altura). Cada uma das faces de 60 mm por 30 mm foi subdividida em duas regiões com 15 mm x 60 mm, sendo que cada uma das subdivisões foi utilizada para um ensaio de retificação, totalizando 4 ensaios por amostra (Figura 17). Antes dos ensaios de retificação, foi medida a dureza Shore A das amostras de Poliuretano com um durômetro manual de marca Homis, modelo H304-009 (Figura 18). Após 4 medições em cada amostra, obteve-se a dureza média de 150 ± 3 Shore A.

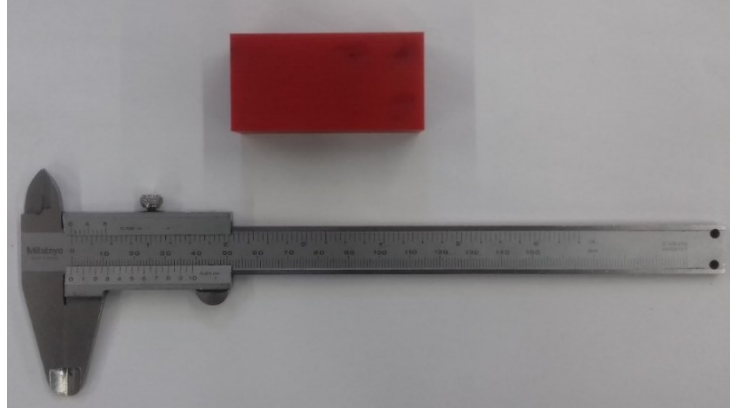


Figura 16 – Amostra de Poliuretano Termoplástico utilizada nos ensaios.

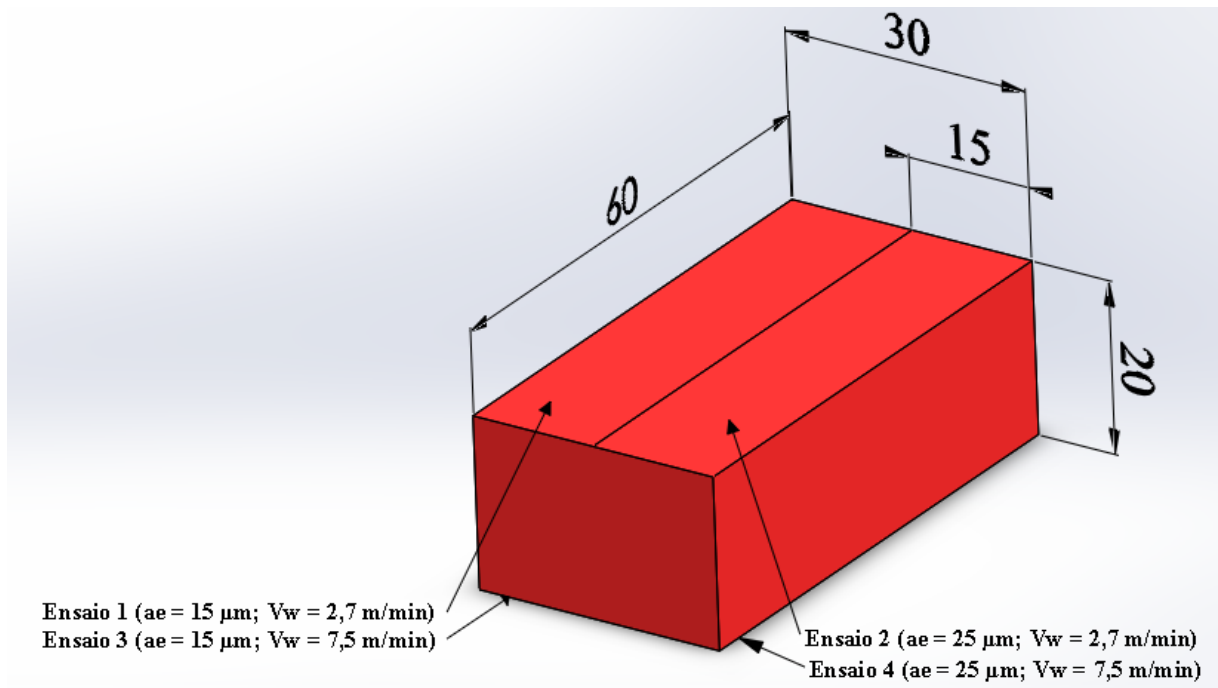


Figura 17 – Esquema de divisão da peça para os ensaios e dimensões das amostras de Poliuretano Termoplástico copolímero em mm.



Figura 18 - Medição de Dureza Shore A em superfície da amostra.

3.3 PARÂMETROS DE SAÍDA

Foram selecionados como parâmetros de saída para este estudo a rugosidade da superfície, quantificada a partir dos parâmetros R_a , R_t e R_z , a microdureza e a análise das superfícies em microscópio óptico.

3.3.1 RUGOSIDADE

Para as medições dos perfis de rugosidade foi utilizado um rugosímetro de contato Taylor Hobson, modelo Suntronic S-100. Todas as medições foram realizadas com um *cut-off* de 0,8mm, comprimento de avaliação de 5 vezes o *cut-off*, seguindo método da linha média. Além disso, as medições foram feitas sobre uma mesa de desempenho, em direção perpendicular à de avanço, tomando-se cinco pontos diferentes na superfície retificada (Figura 19). Elas foram realizadas no Laboratório de Ensino em Metrologia da FEMEC-UFU.

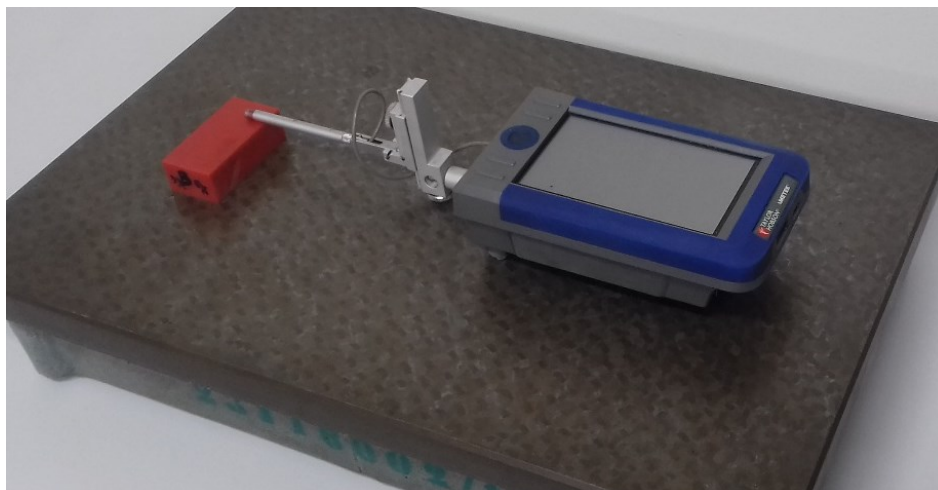


Figura 19 – Arranjo experimental para medições de rugosidade das superfícies após o processo de retificação.

3.3.2 MICRODUREZA (ENSAIO VICKERS)

Para as medições de microdureza, foi utilizado um microdurômetro da marca Shimadzu, modelo HMV-G (Figura 20), com penetrador Vickers que pertence ao Laboratório de Apoio à Fabricação da FEMEC-UFU. Para gerar cada indentação, foi aplicada uma carga de 0,01 kgf pelo tempo de 15 segundos. Foram feitas 10 indentações nas posições indicadas na Figura 21.

O indentador do ensaio de Microdureza Vickers é de diamante, possui geometria piramidal e as cargas aplicadas normalmente se encontram entre 1 e 1000 gramas. Para que a indentação seja de fácil observação, podem ser necessários processos de lixamento e o polimento da superfície antes dos testes de microdureza (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2012). Como o Poliuretano é um material de dureza reduzida em comparação com aços, por exemplo, foi utilizada apenas uma lixa, do fabricante 3M e granulometria mesh #120 para a preparação das superfícies.



Figura 20 – Microdurômetro Shimadzu HMV-G.

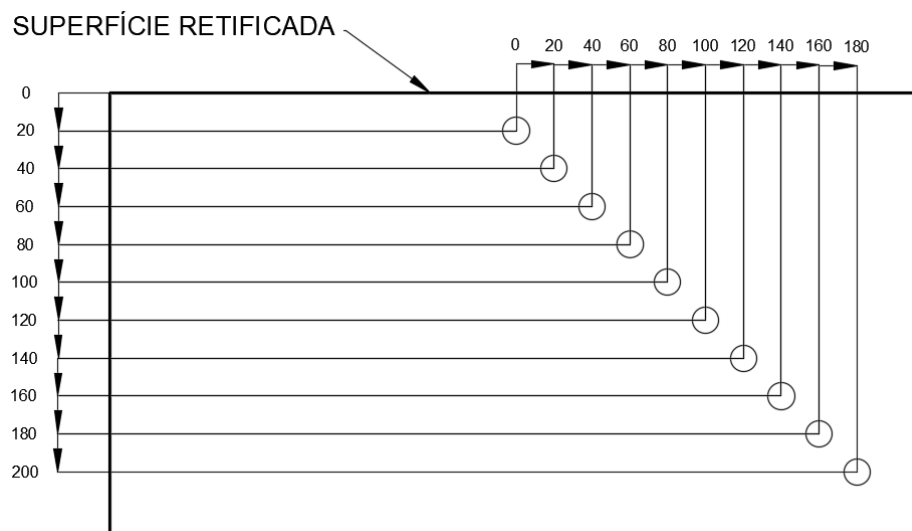


Figura 21 – Distribuição das indentações para avaliação de microdureza abaixo da superfície retificada (dimensões em micrometros).

3.3.3 ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES EM MICROSCÓPIO ÓPTICO

As superfícies retificadas, sem ataque químico, foram observadas ao microscópio óptico de marca Olympus e modelo BX51M (Figura 22), com ampliação de 45 vezes, pertencente ao Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) da FEMEC-UFU.



Figura 22 – Microscópio Óptico Olympus modelo BX51M.

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados de rugosidade e microdureza das amostras após o processo de retificação, bem como as imagens obtidas das superfícies usinadas.

4.1 RUGOSIDADE

Na Tabela 8 e nas Figuras 23, 24 e 25 são apresentados os resultados médios das medições de rugosidade para os parâmetros R_a (rugosidade média aritmética), R_t (altura total do perfil) e R_z (altura máxima do perfil), respectivamente. Para obtenção desses valores, foram realizadas 5 medições em cada superfície retificada e, então, calculada a média e o desvio padrão para cada parâmetro. Estes resultados estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Valores médios com desvio padrão dos parâmetros R_a , R_t e R_z para cada condição de corte.

Condição de Corte	R_a (μm)	R_t (μm)	R_z (μm)
$a_e = 15 \mu\text{m}$; $V_w = 2,7 \text{ m/min}$	$0,36 \pm 0,03$	$3,74 \pm 0,84$	$2,62 \pm 0,30$
$a_e = 25 \mu\text{m}$; $V_w = 2,7 \text{ m/min}$	$0,36 \pm 0,02$	$3,62 \pm 0,49$	$2,58 \pm 0,18$
$a_e = 15 \mu\text{m}$; $V_w = 7,5 \text{ m/min}$	$0,37 \pm 0,04$	$3,90 \pm 0,54$	$2,70 \pm 0,20$
$a_e = 25 \mu\text{m}$; $V_w = 7,5 \text{ m/min}$	$0,40 \pm 0,02$	$6,36 \pm 1,73$	$3,52 \pm 0,58$

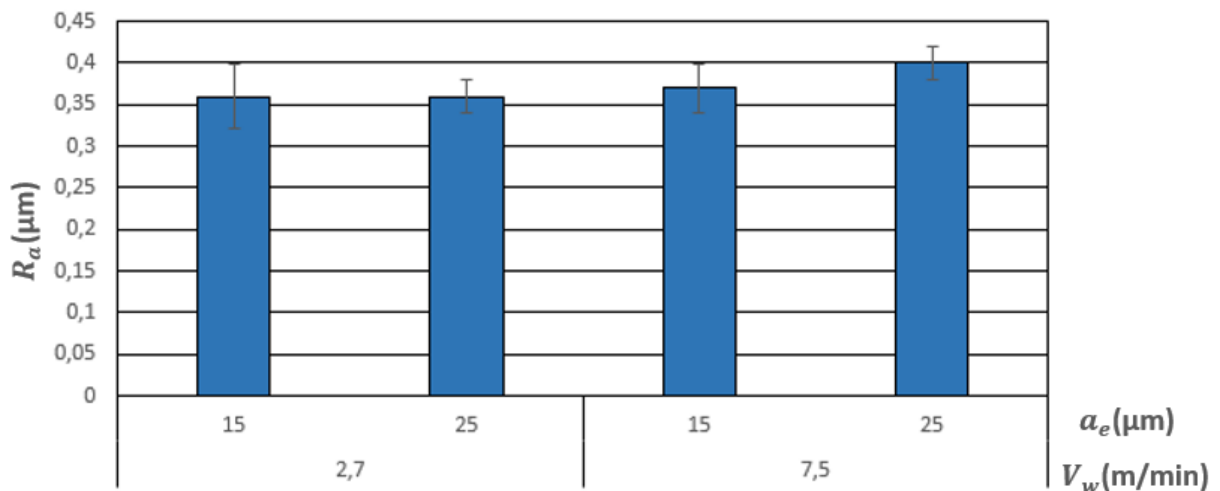


Figura 23– Rugosidade média aritmética (R_a) em função da penetração de trabalho (a_e) e da velocidade da peça (V_w).

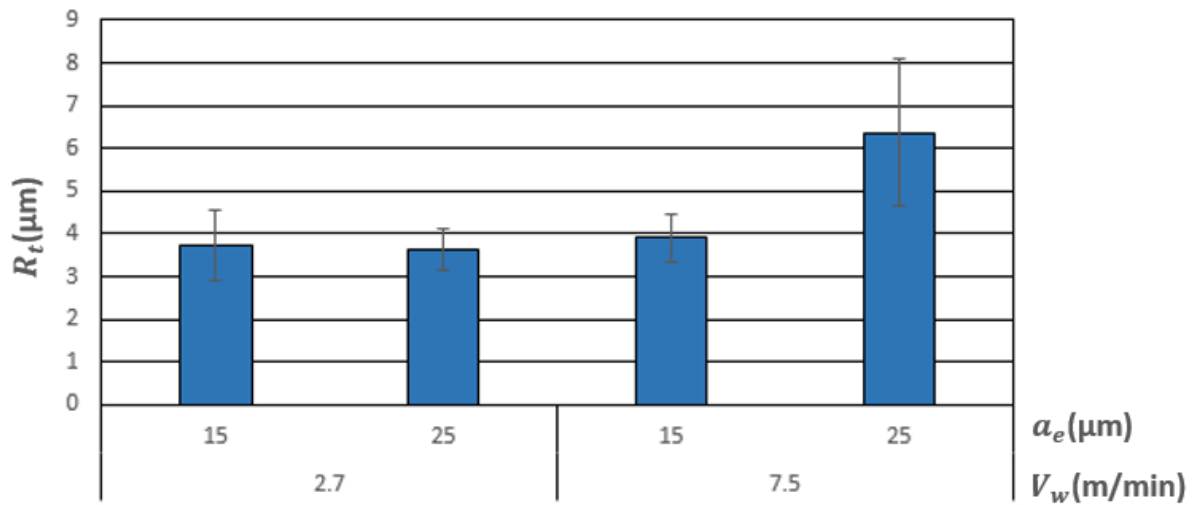


Figura 24 – Altura total do perfil (R_t) em função da penetração de trabalho (a_e) e da velocidade da peça (V_w).

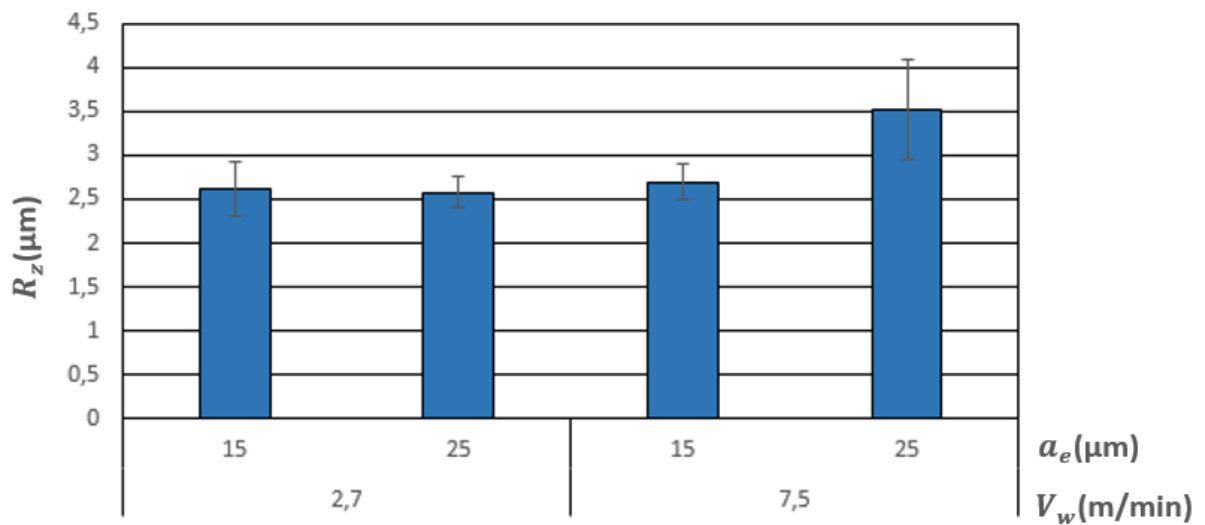


Figura 25 – Altura máxima do perfil (R_z) em função da penetração de trabalho (a_e) e da velocidade da peça (V_w).

Da Figura 23 observa-se que ao aumentar a penetração de trabalho de 15 para 25 μm , empregando a menor velocidade da peça, praticamente não houve alteração da rugosidade da peça (parâmetro R_a). Mas ao empregar a maior velocidade da peça (7,5 m/min), o mesmo aumento de 15 para 25 μm na penetração de trabalho resultou em aumento da rugosidade R_a em torno de 8%. Este comportamento também foi observado para os demais parâmetros, R_t e

R_z , mas com aumentos mais significativos que para o parâmetro R_a , de 63% e 30%, respectivamente.

Esta tendência, ao empregar a menor velocidade da peça, de não haver alteração da rugosidade (R_a) do Poliuretano com o incremento da penetração de trabalho na faixa testada, normalmente é diferente do que ocorre ao retificar aços endurecidos e ferros fundidos com rebolos abrasivos convencionais, como é o caso do rebole empregado neste trabalho (GUIMARÃES et al., 2019; LIMA, 2016).

Da Figura 23 observa-se ainda que o maior valor de rugosidade R_a foi 0,4 μm e este valor é bem abaixo do limite superior igual a 1,6 μm , valor de referência para os processos de retificação de semi-acabamento utilizado para designar superfícies de materiais metálicos e cerâmicos retificados (MALKIN e GUO, 2008).

De acordo com Malkin e Guo (2008), o aumento de a_e e V_w implicam no aumento da espessura de corte equivalente e , conseqüentemente, das forças de corte, da energia específica de corte e do desgaste do rebole, gerando piores perfis de rugosidade.

O conceito de espessura equivalente de corte (h_{eq}), descrito na seção 3.2.2 e que possui valor diretamente proporcional à penetração de trabalho e à velocidade da peça pode ser utilizado para explicar a influência das condições de corte nos perfis de rugosidade. A espessura equivalente de corte, segundo Marinescu et al. (2007), exerce influência direta nas forças de corte, na energia específica de corte e no desgaste do rebole, fatores cujo aumento influi negativamente nos valores de rugosidade média aritmética (R_a). Os valores de h_{eq} para cada ensaio estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores de espessura equivalente de corte (h_{eq}) para cada um dos ensaios de retificação.

Ensaio	a_e (μm)	V_w (m/min)	h_{eq} (μm)
1	15	2,7	0,02
2	25	2,7	0,03
3	15	7,5	0,06
4	25	7,5	0,09

A baixa variação dos valores de rugosidade da peça nos ensaios feitos com a menor velocidade da peça (Ensaio 1 e 2 da Tabela 9) pode ser atribuída aos baixos valores de espessura equivalente de corte para os dois ensaios. Devido à baixa resistência mecânica do

Poliuretano em comparação com materiais metálicos, a variação de 0,01 μm na espessura equivalente de corte nos Ensaios 1 e 2, gerada pelo aumento da penetração de trabalho, pode não ter sido suficiente para causar elevações nas forças de corte, na energia específica de corte e no desgaste do rebolo que fossem capazes de gerar grandes alterações no perfil de rugosidades. Spina e Cavalcante (2020) observaram comportamento semelhante na retificação do polímero Poliamida 6,6, pois a variação de penetração de trabalho entre 10 e 25 μm não gerou grandes variações dos valores de rugosidade nos ensaios com velocidade de corte de 30 m/s e velocidade da peça de 5 m/min.

A diferença de 8% entre os valores de R_a dos ensaios 3 e 4 da Figura 23, realizados à velocidade da peça de 7,5 m/min, pode ser justificada pela elevação de 0,03 μm no valor da espessura equivalente de corte com o aumento da penetração de trabalho de 15 μm para 25 μm . A variação da espessura equivalente de corte nos ensaios 3 e 4 foi 67% maior do que a observada nos ensaios 1 e 2. Pode-se inferir que esse maior incremento foi suficiente para produzir perturbações no processo que geraram uma elevação mais significativa nos valores de rugosidade, portanto pior acabamento, no ensaio com a_e igual a 25 μm e V_w de 7,5 m/min, o que pode ter sido ocasionado pelo aumento das forças de corte, da energia específica de corte e pelo desgaste do rebolo.

4.2 MICRODUREZA

Na Figura 26 é apresentado o perfil de microdureza para o Poliuretano Termoplástico após retificação sob diferentes condições de corte. As medições foram iniciadas 20 μm abaixo da superfície retificada, com incremento de 20 μm no afastamento da superfície a cada medição.

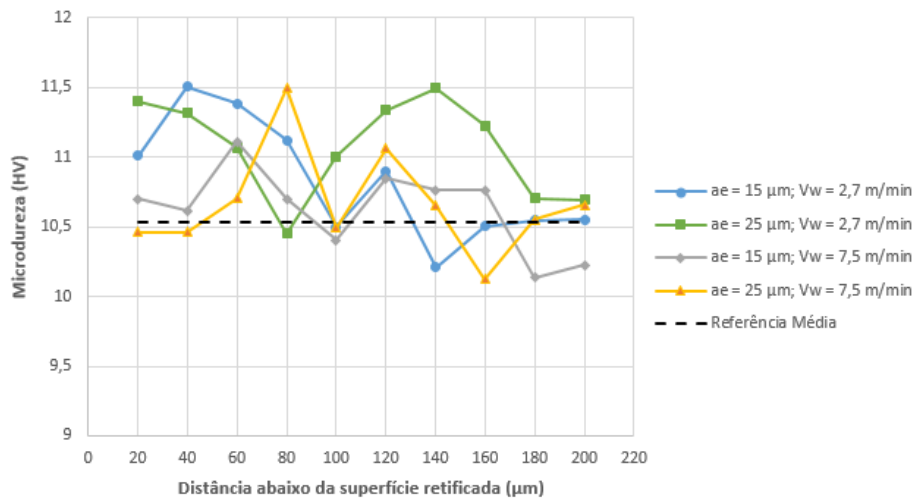


Figura 26 – Microdureza (HV) de Poliuretano Termoplástico em função da penetração de trabalho para diferentes valores de velocidade da peça e em função da distância abaixo da superfície retificada (μm).

Verifica-se pela Figura 25 que os dois ensaios realizados com a menor velocidade da peça de 2,7 m/min (curvas azul e verde) foram os que apresentaram maiores valores de microdureza na região 20 μm abaixo da superfície retificada. Esses valores decrescem até o ponto de estabilização, quando as duas curvas se aproximam da referência média de microdureza, o que acontece na região localizada 160 μm abaixo da superfície usinada para a curva azul ($a_e = 15 \mu\text{m}$; $V_w = 2,7 \text{ m/min}$) e 200 μm abaixo da superfície usinada para a curva verde ($a_e = 25 \mu\text{m}$; $V_w = 2,7 \text{ m/min}$). A curva cinza ($a_e = 15 \mu\text{m}$; $V_w = 7,5 \text{ m/min}$) foi a que apresentou maior estabilidade, com valores de microdureza variando próximos à referência média. Ela apresentou estabilidade maior que a curva laranja, cujo ensaio foi realizado à mesma velocidade de 7,5 m/min, mas com uma penetração de trabalho maior, de 25 μm .

Por meio do gráfico da Figura 27 é possível verificar que há uma forte tendência de queda dos valores de microdureza com o afastamento da superfície retificada para os ensaios com V_w igual a 2,7 m/min (retas azuis), e também a maior estabilidade dos valores de microdureza dos ensaios realizados V_w igual a 7,5 m/min (retas laranja). O parâmetro R^2 , indica a qualidade do ajuste dos pontos à reta de regressão, quanto maior for seu valor, mais distantes os pontos estão do modelo linear.

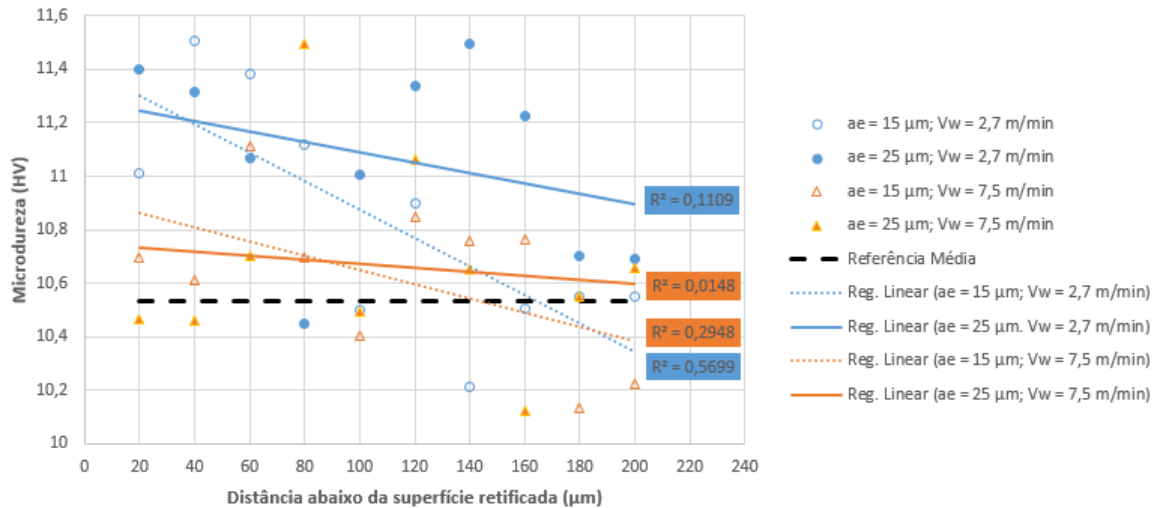


Figura 27 – Microdureza (HV) em função da distância abaixo da superfície retificada (μm) com apresentação regressão linear para cada ensaio.

As maiores alterações de microdureza observadas nos ensaios a menor velocidade da peça podem ser explicadas pelo maior tempo que a peça ficou em contato com o rebolo durante o processo de retificação, sujeita a solicitações mecânicas decorrente das forças de usinagem e ao calor gerado no processo. Segundo Malkin e Guo (2008), as tensões residuais de compressão geradas pela interação mecânica entre o grão abrasivo e a peça, associadas às tensões de origem térmica causadas pela dilatação da peça devido ao aquecimento e ao resfriamento sofridos antes e após a usinagem, podem gerar alterações das propriedades mecânicas próximo à superfície.

A maior estabilidade de microdureza da curva cinza ($a_e = 15 \mu\text{m}$; $V_w = 7,5 \text{ m/min}$) em relação à curva laranja ($a_e = 25 \mu\text{m}$; $V_w = 7,5 \text{ m/min}$) pode ser explicada pelo aumento da penetração de trabalho, que implica em maior geração de calor e, conseqüentemente, aumenta a possibilidade de ocorrerem alterações mecânicas nas camadas subsuperficiais.

4.3 ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES POR MICROSCOPIA ÓPTICA

Nas Figuras 25 a), b), c) e d) são mostradas as imagens das superfícies retificadas obtidas no microscópio óptico, com ampliação de 45 vezes, para as condições ($a_e = 15 \mu\text{m}$; $V_w = 2,7 \text{ m/min}$), ($a_e = 25 \mu\text{m}$; $V_w = 2,7 \text{ m/min}$), ($a_e = 15 \mu\text{m}$; $V_w = 7,5 \text{ m/min}$) e ($a_e = 25 \mu\text{m}$; $V_w = 7,5 \text{ m/min}$), respectivamente. Em todas estas figuras verifica-se a presença de marcas de avanço bem definidas e praticamente uniformes, que indicam o sentido da remoção de material. Percebe-se também que as marcas de avanço se tornam mais largas com o aumento de a_e e V_w , o que pode ser percebido nas regiões destacadas por quadrados brancos. Contudo, a textura é

praticamente regular em todas as superfícies usinadas. Esta é uma evidência de que os parâmetros de corte selecionados para este trabalho podem ser considerados adequados.

De acordo com Malkin e Guo (2008), marcas de avanço mais largas estão relacionadas a uma maior espessura equivalente de corte (h_{eq}), que se eleva com o aumento de a_e e V_w e promove aumento de deformações plásticas na remoção de cavaco. Além disso, quanto maior a penetração de trabalho, maior será o comprimento de contato do rebolo com a peça, o que implica em maior área sendo usinada, que reflete na largura das marcas deixadas pelos abrasivos.

Além disso, nota-se também a presença de fluxo lateral de material, indicado por setas brancas nas Figuras 28 a), b), c) e d). Ele é gerado pela passagem do grão abrasivo sem remoção efetiva de cavaco, apenas empurrando para fora do caminho o material deformado plasticamente.

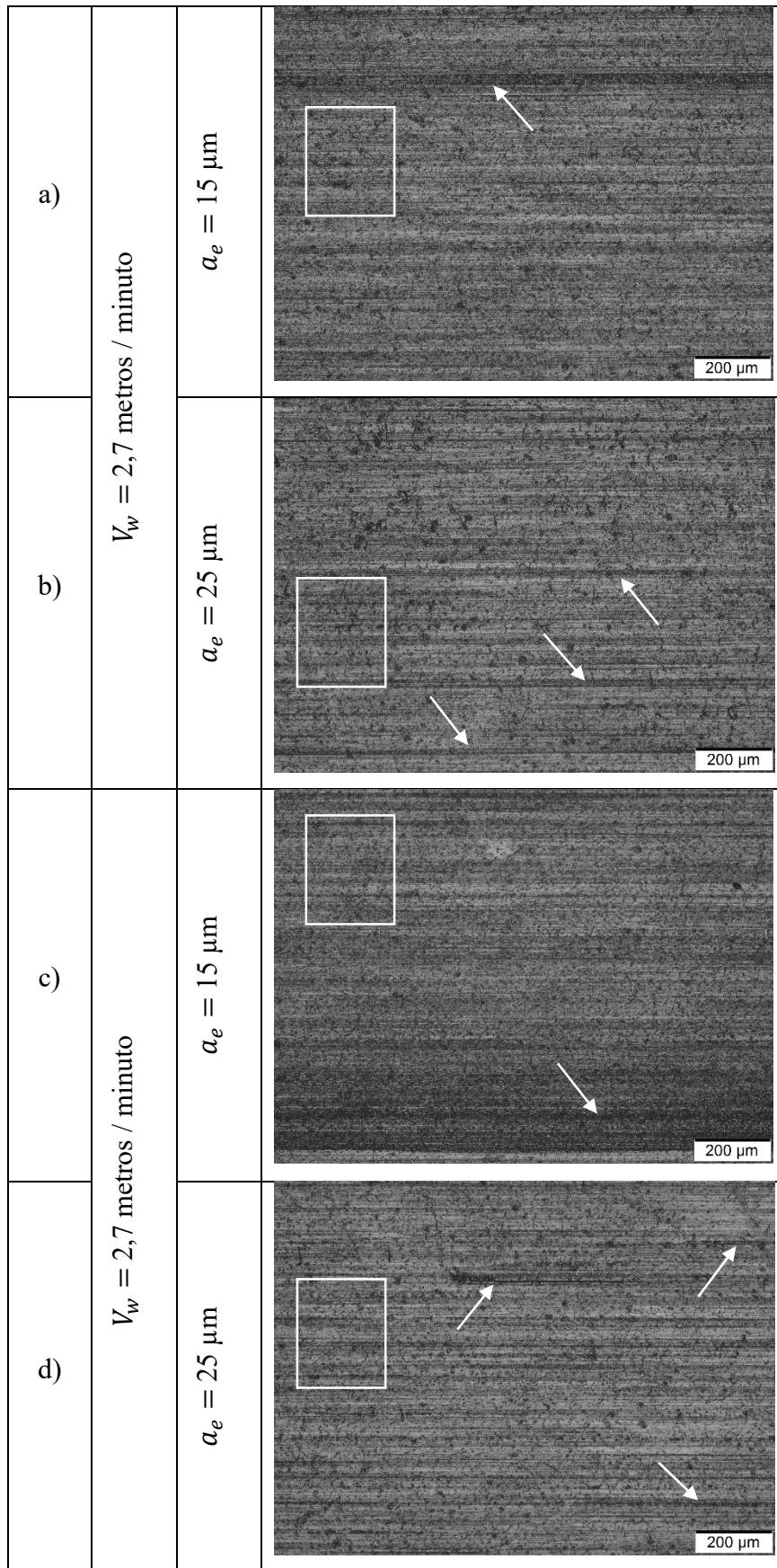


Figura 28 – Imagens das superfícies retificadas obtidas a partir de microscopia óptica.

5 CONCLUSÕES

A partir dos ensaios de retificação do Poliuretano e a avaliação dos parâmetros de saída, as seguintes conclusões podem ser estabelecidas:

- I. O parâmetro de rugosidade de R_a se situou entre 0,36 e 0,40 μm em todas as condições de corte;
- II. Há semelhança no comportamento dos parâmetros de rugosidade R_a , R_t e R_z . Verificou-se que a condição mais severa de usinagem analisada, proporcionada pela combinação entre V_w igual a 7,5 m/min com a_e igual a 25 μm , apresentou o pior perfil de rugosidades;
- III. Houve leve tendência de elevação dos valores de microdureza em camadas mais próximas à superfície retificada. Também verificou-se uma maior influência da velocidade da peça (V_w) na variação deste parâmetro. Ensaios com menor V_w (2,7 m/min) apresentaram maiores variações de microdureza em camadas mais próximas à superfície com relação ao valor utilizado como referência;
- IV. Ensaios com maior penetração de trabalho ($a_e = 25 \mu\text{m}$) apresentaram maior instabilidade dos valores de microdureza devido à maior geração de calor ocasionada pelo aumento da penetração de trabalho;
- V. A usinagem com penetração de trabalho mais elevada resultou em marcas de avanço mais largas e deformações plásticas mais intensas, caracterizadas pelo fluxo lateral de material, na observação da superfície por meio do microscópio óptico, dado o aumento da espessura equivalente de corte.

Sugestões para futuros trabalhos

- I. Avaliar a retificabilidade do Poliuretano Termoplástico com o uso das técnicas convencional de aplicação de fluido de corte e MQL;
- II. Testar outros materiais poliméricos, como o Nylon, ABS e Poliacetal, empregando uma faixa mais ampla de penetração de trabalho e velocidade da mesa, fazendo comparação com o Poliuretano e aço endurecido.
- III. Realizar ensaios do poliuretano com diferentes tipos de rebolos, incluindo o de carvão de silício, e de granulometrias mesh.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, T. F.; WIEBECK, H.; SINATORA, A. Effect of surface finishing on friction and wear of Poly-Ether-Ether-Ketone (PEEK) under oil lubrication. **Polímeros**, Brasil, v. 26, ed. 4, p. 336-342, 31 mar. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6175**: Usinagem - Processos mecânicos. São Paulo, 2015, 33 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287:2002**: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade. São Paulo, 2002, 18 p.

BEGUM, S.; AHMED, G. M. S.; BADRUDDIN, R. A.; TIRTH, V.; ALGAHTANI, A. Analysis of digital light synthesis based flexible and rigid polyurethane for applications in automobile bumpers. **Materials Express**, [s. l.], v. 9, 27 jul. 2020.

BOUBAKRI, A.; GUERMAZI, N.; ELLEUCH, K.; AYEDI, H. F. Study of UV-aging of thermoplastic polyurethane material. **Materials Science and Engineering A**, [s. l.], v. 527, p. 1649-1654, 25 abr. 2010.

CAI, W.; MU, X.; PAN, Y.; GUO, W.; WANG, J.; YUAN, B.; FENG, X.; TAI, Q.; HU, Y. Facile fabrication of organically modified boron nitride nanosheets and its effect on the thermal stability, flame retardant, and mechanical properties of thermoplastic polyurethane. **Polymer Advanced Technologies**, [s. l.], 23 maio 2018.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, David D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8. ed. Brasil: LTC, 2012. 845 p.

CANEVAROLO JR, S. V. **Ciência dos Polímeros**: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2. ed. Brasil: Artliber, 2002. 280 p.

CARELI, R. T.; ANDRADE, N. J.; SOARES, N. F.; JÚNIOR, J. I. R.; ROSADO, M. S.; BERNARDES, P. C. The adherence of *Pseudomonas fluorescens* to marble, granite, synthetic polymers, and stainless steel. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 29, ed. 1, p. 171-176, 1 jan. 2009.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 7ª ed. Campinas, SP: Artiliber Editora Ltda, 2010. 286p.

EBEWELE, R. O. **Polymer Science and Technology**. 1. ed. United States of America: CRC Press, 2000. 544 p.

FLORES, A.; ANIA, F.; BALTA-CALLEJA, F. J. From the glassy state to ordered polymer structures: A microhardness study. **Polymer**, [S. l.], ano 50, p. 729-746, 30 set. 2008.

GEDDE, U. W.; HEDENQVIST, M. S. **Fundamental Polymer Science**. 2. ed. Switzerland: Springer, 2019. 493 p.

GUIMARÃES, C.; DA SILVA, R. B.; RUZZI, R. S.; DE MELLO, A. V.; HÜBNER, H. B.; FIOCCHI, A. A.; FONSECA, M. C. Evaluation of surface and sub-surface integrities of a mold steel under different grinding conditions. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, [s. l.], v. 41, ed. 10, 18 set. 2019.

HASSAN, M. K.; MAURITZ, K. A.; STOREY, R. F.; WIGGINS, J. S. Biodegradable Aliphatic Thermoplastic Polyurethane Based on Poly(ϵ -caprolactone) and L-Lysine Diisocyanate. **Wiley InterScience**, [s. l.], p. 2290-3000, 6 fev. 2006.

HEPBURN, C. **Polyurethane Elastomers**. 2. ed. England: Elsevier, 1992. 441 p.

HUANG, Q.; GUO, Z.; WU, Z.; YUAN, C. Insight into the tribological performance of polyurethane composites under high temperature water lubrication. **Tribology International**, [s. l.], v. 155, 1 mar. 2021.

INTRALOX. **Manual de Engenharia da Tecnologia ThermoDrive**. [S. l.: s. n.], 2017. 116 p.

JACKSON, M. J.; DAVIM, J. P. **Machining with Abrasives**. 1. ed. United States of America: Springer, 2011. 432 p.

JARVIS , D. L. Polyacetals. *In: BRYDSON'S Plastics Materials*. 8. ed. United States of America: Butterworth-Heinemann, 2017. cap. 19, p. 526.

JIANG, S.; YUAN, C.; GUO, Z.; BAI, X. Effect of crosslink on tribological performance of polyurethane bearing material. **Tribology International**, [s. l.], v. 136, p. 276-284, 28 mar. 2019.

KHALIFA, M.; ANANDHAN, S.; WUZELLA, G.; LAMMER , H.; MAHENDRAN, A. R. Thermoplastic polyurethane composites reinforced with renewable and sustainable fillers – a review. **Polymer-Plastics Technology and Materials**, [s. l.], 4 jun. 2020.

KIM, J. W.; JANG, H. Friction and wear of monolithic and glass-fiber reinforced PA66 in humid conditions. **Wear**, [s. l.], p. 82-88, 2 jan. 2014.

KIM, K.; KIM, H.; EOM, T. Properties and Biodegradation of Polymer for Afforestation Seedling Mulching Mat. **Journal of Korea Technical Association of the Pulp and Paper Industry**, [s. l.], v. 41, Jan. 2009.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lapping**. 1. ed. atual. Germany: Springer, 2009. 433 p.

KOLTZENBURG, S.; MASKOS, M.; NUYKEN, O. **Polymer Chemistry**. 1. ed. Germany: Springer, 2017. 581 p.

LIMA, M. L. S. **Retificação plana tangencial dos ferros fundidos Nodular, Vermicular e Cinzento em várias condições de corte**. Orientador: Rosemar Batista da Silva. 2016. 119 f. Dissertação (Mestrado - Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, [S. l.], 2016.

LIU, M.; ZHANG, C.; TJIU, W. W.; YANG, Z.; WANG, W.; LIU, T. One-step hybridization of graphene nanoribbons with carbon nanotubes and its strong-yet-ductile thermoplastic polyurethane composites. **Polymer**, [s. l.], v. 54, p. 3124-3130, 1 maio 2013.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; SILVA, M. B.; COELHO, R. T. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Editora Blucher, 2009. 371 p.

MALKIN, S., GUO. C. **Grinding Technology: Theory and Applications of Machining With Abrasives**. 2ª ed. New York: Industrial Press, 2008. 372p.

MARGOLIS, J. M. **Engineering Plastics Handbook**. 1. ed. United States of America: McGraw-Hill, 2006. 463 p.

MARINESCU, I. D.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; ROWE, W.B.; INASAKI, I. **Handbook of machining with grinding wheels**. Nova Iorque : CRC Press, 2007. 596 p.

MARINESCU I. D., ROWE W. B., DIMITROV B., INASAKI I. **Tribology of abrasive machining processes**. 2ª ed. Norwich: William Andrew Inc, 2013.

MEIER-WESTHUES, U.; DANIELMEIER, K.; KRUPPA, P.; SQUILLER, E. P. **Polyurethane: Coatings, Adhesives and Sealants**. 2. ed. rev. Germany: Vincentz, 2019.

NETO, J. C. da S. **Metrologia e Controle Dimensional**. 1. ed. Brasil: Elsevier, 2012. 237 p.

OLIVEIRA, J. F. G. **Tópicos avançados do processo de retificação**. Apostila – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos.

PANNEERSELVAM, K.; LENIN, K. Joining of Nylon 6 plate by friction stir welding process using threaded pin profile. **Materials and Design**, [s. l.], ed. 53, p. 302-307, 2 jan. 2014.

PEREIRA , M. F. **Influência do Tipo de Abrasivo de Rebolo e do Fluido de Corte na Retificação Plana Tangencial do Aço Inoxidável Martensítico VP420**. Orientador: Rosemar Batista da Silva. 2018. 123 p. Dissertação (Doutorado - Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, [S. l.], 2018.

POLIURETANO: TECNOLOGIA E APLICAÇÕES . Brasil: Editora do Administrador, 2013.

POLIURETANO: TECNOLOGIA E APLICAÇÕES . Brasil: Editora do Administrador, 2017.

QIAO, M.; REN, T.; HUANG, T.; WEESE, J.; LIU, Y.; REN, X.; FARAG, R. N-Halamine modified thermoplastic polyurethane with rechargeable antimicrobial function for food contact surface. **Royal Society of Chemistry**, [s. l.], ed. 7, p. 1233-1240, 4 jan. 2017.

RODRIGUES, L. B. **Avaliação da Formação de Biofilmes e das Condições Higiênico Sanitárias em Superfícies de Contato com Alimentos em Sala de Cortes de Matadouro de Aves**. Orientador: Prof. Dr. Vladimir Pinheiro do Nascimento. 2009. Tese (Doutorado - Medicina Veterinária) - Faculdade de Veterinária, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [S. l.], 2009.

RODRIGUEZ, R. L.; LOPES, J. C.; MANCINI, S. D.; SANCHEZ, L. E. de Â.; VARASQUIM, F. M. F. de A.; VOLPATO, R. S.; DE MELLO, H. J.; AGUIAR, P. R. de; BIANCHI, E. C. Contribution for minimization the usage of cutting fluids in CFRP grinding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [S. l.], p. 1-11, 25 fev. 2019.

ROWE, W. B. **Principles of Modern Grinding Technology**. 1. ed. United States of America: William Andrew, 2009. 421 p.

RUZZI, R. S.; PAIVA, R. L.; SILVA, L. R. R.; ABRÃO, A. M.; BRANDÃO, L. C.; DA SILVA, R. B. Comprehensive study on Inconel 718 surface topography after grinding. **Tribology International**, [s. l.], v. 158, 1 jun. 2021.

SHEIKH-AHMAD, Jamal Y. **Machining of Polymer Composites**. 1. ed. United States of America: Springer, 2009. 315 p.

SOMARATHNA, H. M. C. C.; RAMAN, S. N.; MOHOTTI, D.; MUTALIB, A. A.; BADRI, K. H. The use of polyurethane for structural and infrastructural engineering applications: A state-of-the-art review. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 190, p. 995-1014, 30 nov. 2018.

SPINA, R.; CAVALCANTE, B. Preliminary analysis of grinding of PA66 thermoplastics. **AIP Conference Proceedings**, [s. l.], v. 2113, ed. 1, 2 jul. 2019.

SZYCHER, M. **Szycher's Handbook of Polyurethanes**. 2. ed. rev. United States of America: CRC Press, 2013. 1092 p.

TELLES, P. C. S. **Materiais para Equipamentos de Processo**. 6. ed. Brasil: Interciência, 2003. 280 p.