

JUNIO FERREIRA CAMARGO

MARCOS ROBERTO ANDRADE CUNHA FILHO

**AVALIAÇÃO DA RETIFICABILIDADE DE
POLIACETAL
COM RELAÇÃO AO FERRO FUNDIDO CINZENTO
UTILIZANDO REBOLO DE CARBETO DE SILÍCIO**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2025

JUNIO FERREIRA CAMARGO
MARCOS ROBERTO ANDRADE CUNHA FILHO

**CONTRIBUIÇÃO NA RETIFICAÇÃO DE POLIACETAL UTILIZANDO
REBOLO DE CARBETO DE SILÍCIO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecânica**.

Área de Concentração: Processos de Fabricação e Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva

Uberlândia – MG

2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

C972 Cunha Filho, Marcos Roberto Andrade, 1999;
2024 Camargo, Junio Ferreira, 1995
AVALIAÇÃO DA RETIFICABILIDADE DE POLIACETAL COM
RELAÇÃO AO FERRO FUNDIDO CINZENTO UTILIZANDO REBOLO DE
CARBETO DE SILÍCIO [recurso eletrônico] : CONTRIBUIÇÃO
NA RETIFICAÇÃO DE POLIACETAL UTILIZANDO REBOLO DE
CARBETO DE SILÍCIO / Marcos Roberto Andrade Cunha Filho; Junio
Ferreira Camargo.- 2024.

Orientador: Rosemar Batista da Silva.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em
Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Silva, Rosemar Batista da,
1974-, (Orient.). II. Universidade Federal de
Uberlândia. Graduação em Engenharia Mecânica. III.
Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

JUNIO FERREIRA CAMARGO
MARCOS ROBERTO ANDRADE CUNHA FILHO

CONTRIBUIÇÃO NA RETIFICAÇÃO DE POLIACETAL
UTILIZANDO REBOLO DE CARBETO DE SILÍCIO

Trabalho de conclusão de curso **APROVADO** pela
Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Uberlândia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação e
Materiais.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva – Orientador

Me. Josenilton Dos Santos Lopes – Pós-Graduando em nível de Doutorado –
FEMEC -UFU

Prof. Dr. Rhander Viana – Universidade de Brasília - UnB

UBERLÂNDIA, 2025

DEDICATÓRIA

Às nossas famílias, ao nosso professor Rosemar, aos nossos colegas, em especial a minha avó Rosa e todas pessoas que participaram de forma direta e indireta da nossa trilha em busca do conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus por guiar meus passos nesta jornada e proporcionar tantas bênçãos em nossas vidas.

Aos nossos pais Rosângela Luiza e Sebastião Ferreira & Eliana Maria e Marcos Roberto por todo apoio, dedicação e esforço. Por todos os ensinamentos e pelo exemplo de vida.

Ao nosso orientador Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva por todo ensinamento passado, auxílio, pela oportunidade e amizade construída.

Aos membros do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) e do Laboratório de Usinagem Convencional (LUC) da Faculdade de Engenharia Mecânica pela amizade, apoio e contribuição ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Aos meus colegas de turma, por todo apoio e amizade ao longo desta etapa.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este trabalho.

Ao professor Dr. Rhander Viana, da Universidade Nacional de Brasília (UnB), pela doação das amostras de polímeros utilizadas neste trabalho.

Ao Dr. Alcione dos Reis, técnico do LUC pelo auxílio na operação das máquinas-ferramentas e na realização dos experimentos de retificação, como também por compartilhar seu conhecimento.

FERREIRA, J.C. & ANDRADE, M. R. C. F. **Contribuição na retificação do poliacetal utilizando rebolo de carbeto de silício**. 2022, 52 f. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Uberlândia - MG.

Resumo

Os polímeros possuem vasta gama de aplicações, desde plásticos convencionais até materiais avançados em engenharia. Neste grupo destaca-se o poliacetal, cuja combinação entre durabilidade, boa resistência mecânica e produção mais rápida em relação aos aços, o coloca em posição de destaque para muitas aplicações industriais. Ele é amplamente utilizado na fabricação de peças de engenharia, como engrenagens, rolamentos, conectores, peças de máquinas, componentes automotivos, dentre outras. Dentre os processos de usinagem, a retificação é um processo que proporciona a combinação entre desvios dimensionais estreitos e rugosidade superficial inferior a $1,6\text{ }\mu\text{m}$, sendo uma alternativa para o processamento do poliacetal. Contudo, o processo de retificação envolve elevada energia específica quando são empregues rebolos abrasivos convencionais, fazendo com que grande parte do calor seja transferida a peça durante a usinagem e levando a geração de danos térmicos. Ao se usinar polímeros, este problema pode se agravar já que o ponto de fusão deles é bem inferior aqueles dos aços e a temperatura na superfície pode causar deformações e outros problemas relacionados ao calor. Isso exige mais atenção na seleção dos parâmetros de corte e evitar a inutilização da peça. Neste contexto, nesse trabalho foi realizada a retificação do poliacetal para determinar seus parâmetros de corte adequados. Foram testados três valores de penetração de trabalho (a_e): 10, 30 e $45\text{ }\mu\text{m}$ e duas velocidades da peça (V_w): $2,7\text{ m/min}$ e $7,5\text{ m/min}$. foram analisados os parâmetros de rugosidade (R_a e R_z) e textura superficial por meio de imagens das superfícies usinadas. Testes foram também realizados com o ferro fundido cinzento para permitir comparações. Os resultados mostraram que a rugosidade do poliacetal reduziu até 38% com o aumento da velocidade da peça, diferentemente do que ocorre com o ferro fundido, que teve aumento de até 27% na rugosidade.

Palavras-chaves: Retificação, polímero, poliacetal, ferro fundido cinzento, rugosidade, textura.

FERREIRA, J.C., ANDRADE, M. R. C. F. **Contribution on grinding of polyacetal using silicon carbide grinding wheel**. 2024, 52 p. Final Graduation Project (Bachelor of Mechanical Engineering) – Faculty of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlandia.

Abstract

Polymers have a wide range of applications, from conventional plastics to advanced engineering materials. Among this group, polyacetal stands out due to its combination of durability, good mechanical resistance and faster production compared to steels, making it prominent for many industrial applications. It is widely used in the manufacture of engineering components such as gears, bearings, connectors, machine parts, and automotive components, among others. Among the machining processes, grinding provides a combination of narrow dimensional deviations and surface roughness below 1.6 μm , making it an alternative for processing polyacetal. However, the grinding process involves high specific energy when using conventional abrasive wheels, leading to a significant amount of heat being transferred to the workpiece during machining and resulting in thermal damage. When machining polymers, this problem become worse since their melting point is much lower than that of steels, and surface temperatures can cause deformations and other heat-related issues. This requires more attention in selecting cutting parameters to avoid damaging the workpiece. In this context, this study grinding process of polyacetal was carried out to determine appropriate cutting parameters. Three values of depth of cut (a_e) were tested: 10, 30 and 45 μm , and two workspeed (V_w): 2.7 m/min and 7.5 m/min. Surface roughness parameters (R_a and R_z) and surface texture were analyzed through images of ground surfaces. Experimental trials were performed with cast iron for comparative purposes. The results showed that the roughness of polyacetal was reduced by up to 38% with as workspeed increased, unlike cast iron, which experienced an increase in roughness of up to 27%.

Keywords: Grinding, polymer, polyacetal, gray cast iron, roughness, texture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Retificação plana tangencial (adaptada de DINIZ, 1999).....	18
Figura 2 - Grandezas físicas na retificação (adaptada de MARINESCU et al., 2016).....	19
Figura 3 -Ilustração esquemática das etapas de formação do cavaco na retificação (Adaptado de KLOCKE, 2009).....	21
Figura 4 - Códigos de especificação drebolos (AZEVEDO,2017).....	24
Figura 5 - Códigos de especificação de rebolos (AZEVEDO, 2017).....	24
Figura 6 - Representação ilustrativa dos aspectos presentes em uma dada superfície (JACKSON; DAVIM, 2011).....	26
Figura 7 – Itens fabricados em poliacetal: (a) conexões, (b) vedações, (c) parafusos, (d) engrenagem (PLASTECNO,2023).....	34
Figura 8 - Fluxograma do procedimento experimental desenvolvido	35
Figura 9 - Foto de uma retificadora plana tangencial modelo P36	36
Figura 10 - Rebolo do tipo reto de carbeto de silício 36C46KVK.....	37
Figura 11- Amostras: (a) Desenho do poliacetal com dimensões, (b) desenho do ferro fundido cinzento e suas dimensões, (c) fotos reais das amostras. (Junio, 2024).....	37
Figura 12 – Set-up de Retificação : (a) poliacetal, (b) ferro fundido cinzento	38
Figura 13 – Montagem do sistema de dressagem. (FERREIRA, 2024).....	39
Figura 14 – Etapas com preparação da amostras de ferro fundido: (a) corte das amostras de ferro fundido cinzento, (b) Amostras cortadas na serra de fita (c) Medição de amostras, (d) medição de rugosidade.....	40
Figura 15 - Medição da rugosidade do ferro fundido cinzento.....	41
Figura 16 - Esteromicroscópio	42
Figura 17- Rugosidade média (Ra) do Ferro fundido cinzento em função da penetração de trabalho e do número de passes	43
Figura 18 - Rugosidade média (Rz) do Ferro fundido cinzento em função da penetração de trabalho e do número de passes	44
Figura 19 - Rugosidade média (Ra) Poliacetal em função da penetração de trabalho e do número de passes	44
Figura 20 - Rugosidade média (Rz) Poliacetal em função da penetração de trabalho e do número de passes	45

Figura 21 - Imagens de das superfícies de Ferro fundido cinzento retificadas em diferentes condições de corte	46
<i>Figura 22 - Imagens das superfícies de Poliacetal retificadas em diferentes condições de corte</i>	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades de alguns grades de poliacetal, com diferentes índices de fluidez (adaptada de RABELO; GUO, 2021).	14
Tabela 2 - Principais elementos de rebolos convencionais e exemplo de especificação (MACHADO et al., 2009).....	23
Tabela 3 - Propriedades mecânicas e físicas básicas dos poliacetais (SIQUEIRA & BEGALLI, 2013).....	33
Tabela 4 - Propriedades térmicas básicas dos poliacetais (SIQUEIRA & BEGALLI, 2013).....	33
Tabela 5 – Parâmetros de corte empregados no processo de retificação do POM e Ferro fundido Cinzento	39

LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS

a_e	Penetração de trabalho
Al_2O_3	Óxido de Alumínio
a_p	Profundidade de corte
cBN	Nitreto de boro cúbico
h_{cu}	Espessura de cavaco não deformado
h_{eq}	Espessura de corte equivalente
HRC	Dureza Rockwell C
HSS	Aço rápido
HV	Dureza Vickers
ISO	International Organization for Standardization (Organização Internacional para Padronização)
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificante
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NBR	Norma brasileira
R_a	Desvio aritmético médio de rugosidade
R_z	Altura máxima do perfil de rugosidade
SiC	Carbeto de Silício
Ud	Grau de recobrimento do rebolo
v_s	Velocidade de corte
v_w	Velocidade da peça
n_s	Rotação do rebolo
V_{fa}	Velocidade de avanço
d_s	Diâmetro do rebolo
Qw	Taxa de remoção de material
a_d	Profundidade de dressagem
b_d	Largura do dressador
S_d	Passo de dressagem
t_d	Tempo de dressagem
Q'_w	Taxa de remoção de material específica

CAPÍTULO I.....	13
1. INTRODUÇÃO	13
CAPÍTULO II.....	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. PROCESSO DE RETIFICAÇÃO.....	17
2.1.1. <i>Processo de retificação plana tangencial</i>	18
2.1.2. <i>Mecanismos de formação do cavaco</i>	21
2.1.3. <i>Rebolos Abrasivos</i>	22
2.2. INTEGRIDADE DE SUPERFÍCIES RETIFICADAS	24
2.2.1. <i>Acabamento superficial</i>	25
2.2.1 ALTERAÇÕES DE NATUREZA MECÂNICA.....	27
2.2.2 ALTERAÇÕES DE NATUREZA METALÚRGICA.....	28
2.3 . POLIACETAL E SUAS APLICAÇÕES.....	29
CAPÍTULO III.....	35
3. MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1. EQUIPAMENTOS E MATERIAIS UTILIZADOS	36
3.2. PARÂMETROS DE CORTE.....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
3.3. PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DOS ENSAIOS DE RETIFICAÇÃO	39
3.4. VARIÁVEIS DE SAÍDA.....	40
3.5. MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE	41
3.6. ANÁLISE DAS SUPERFÍCIES DAS PEÇAS USINADAS.....	41
CAPÍTULO IV	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
4.1. RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE	43
4.2. FERRO FUNDIDO CINZENTO	43
4.3. POLIACETAL	44
4.4. IMAGENS DAS SUPERFÍCIES RETIFICADAS	45
CAPÍTULO V	48
CONCLUSÕES	48

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	49
--	-----------

CAPÍTULO I

1. Introdução

A retificação é um processo de usinagem por abrasão que possui aplicações quando se deseja a combinação entre um bom acabamento superficial da peça possuindo valores de rugosidade, parâmetro R_a , entre $0,2 \mu\text{m}$ e $1,6 \mu\text{m}$, e uma elevada exatidão dimensional que equivale a tolerâncias estreitas da qualidade de trabalho (IT06 – IT03) (MARINESCU et al., 2016). Ele é um dos processos de usinagem mais antigos que se tem conhecimento e a história evidencia que ele foi utilizado nas primeiras ferramentas primitivas para se obter um melhor acabamento. O conhecimento adquirido nesta área possibilitou ao homem aprimorar de forma constante o uso dos abrasivos (NUSSBAUM, 1988) e nos dias atuais a retificação ocupa posição de destaque em várias indústrias, principalmente a automobilística. De forma especial, a retificação plana tangencial, que foi empregada neste trabalho, possui o rebolo feito de abrasivos de elevada dureza, unidos por ligantes aleatoriamente distribuídos e que possuem geometria não definida, e que tem seu eixo de rotação paralelo à mesa ferromagnética, na qual a peça é apoiada e fixada. (MACHADO et al., 2015).

A maioria dos trabalhos sobre retificação na literatura específica contempla estudos e investigações realizadas em materiais ferrosos tais como os aços e ferros fundidos, de forma que são poucos os trabalhos que apresentam resultados e análises em termos de acabamento superficial, microestrutura de peças e forças de corte de ensaios realizados de retificação realizados em em polímeros. (GUESSER, 2009)

Dentre os vários polímeros, o poliacetal merece destaque por ser particularmente recomendado para a fabricação de elementos que trabalham sob condições de carga, bem como peças mecânicas de precisão. Ele é feito principalmente de carbono, hidrogênio e oxigênio. É um material plástico que tem propriedades como baixo coeficiente de atrito e alta resistência à umidade e a produtos químicos (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). As propriedades mecânicas dos polímeros em geral são aquelas especificadas também por metais com destaque para o elevado módulo de elasticidade, bom limite de escoamento e limite de resistência a tração. Para muitos

materiais poliméricos, um simples ensaio tensão - deformação é empregado para caracterizar alguns desses parâmetros mecânicos. As características mecânicas dos polímeros, em sua maioria, são muito sensíveis à taxa de deformação, a temperatura e a natureza química do ambiente (presença de água, oxigênio, solventes orgânicos etc.) (NUSSBAUM, 1988). Na Tabela 1 são apresentados alguns valores referências para o poliacetal.

Tabela 1 - Propriedades de diferentes tipos de poliacetal (adaptada de RABELLO; GUO, 2023).

Resistência à Tração (Mpa)	68	68	69	70
Módulo de elasticidade (Mpa)	2900	3200	3500	3500
Fluidez (g/10 min)	1	6,6	11	16
Temperatura de fusão (°C)	177	177	177	177
Resistência ao Impacto (J/m)	107	75	69	59

Os plásticos têm demonstrado um alto índice de confiabilidade e muitas vantagens sobre os materiais tradicionais que vieram a substituir, tais como o aço, o alumínio e o vidro, por exemplo. Particularmente na indústria automobilística, além de permitir maior flexibilidade de projeto e economia na produção, a baixa densidade relativa destes materiais é um fator primordial para a redução do consumo de combustíveis (Hemais, 2003). Eles são usados desde materiais mais simples como utensílios domésticos (potes, copos, garfos e colheres) até elementos mais sofisticados de engenharia tais como engrenagens, buchas, flanges, guias, roscas sem fim, isoladores e roldana, dentre outras aplicações (SIQUEIRA & BEGALLI, 2013).

Os ferros fundidos também apresentam uma ampla faixa de valores de resistência mecânica e diferentes durezas, e na maioria dos casos são de fácil usinagem, em relação aos aços. Através da adição de elementos de liga é possível obter-se excelente resistência ao desgaste, à abrasão e à corrosão, porém em geral a resistência ao impacto e a ductilidade são relativamente baixas, limitando sua utilização em algumas aplicações (MACHADO et al., 2015). A alta capacidade de amortecimento dos ferros fundidos torna este material adequado para muitas aplicações (VAN VLACK, 1984). Os ferros cinzentos são altamente eficientes no amortecimento de energia vibracional, sendo muito indicados e utilizados para

aplicações expostas a vibrações, tais como as estruturas de base para máquinas e equipamentos pesados, além de exibir uma alta resistência ao desgaste. O custo para fabricar certos componentes, principalmente mais robustas e com geometria complexa é mais baixo em relação aos aços, por causa do menor número de estágios de fabricação.

Nesse cenário, visando a produção de materiais com custo de produção menor e com aplicações que podem ser compatíveis com aquelas que eram até então exclusivas dos aços, é importante realizar estudos em outros materiais, por exemplo, os polímeros. Como já mencionado, o poliacetal recebe posição de destaque pois vem substituindo peças em certas aplicações que até então eram exclusivas de aço, devido à sua baixa densidade e boa resistência mecânica, principalmente. Por este motivo, é importante analisar acabamento e textura de peças em poliacetal após o processo de retificação. Portanto, considerando que a literatura sobre retificação de polímeros é ainda escassa, este trabalho visa contribuir para a geração de resultados de desvios macro e micro geométricos do poliacetal após a retificação em diferentes condições de corte. Serão realizados ensaios em amostras de ferro fundido cinzento para fins de comparação, também retificada com rebolo de carbetto silício. Os principais parâmetros de saída a serem utilizados para acesso da retificabilidade do poliacetal serão a rugosidade da superfície, por diferentes parâmetros, a textura superficial por meio de imagens de estereomicroscópio.

CAPÍTULO II – Neste Capítulo é abordada uma breve revisão bibliográfica que contempla os tópicos relacionados ao processo de retificação, propriedades dos rebolos, principais parâmetros de corte envolvidos no processo, fluidos de corte para retificação, propriedades e aplicações dos principais poliacetais, como também aborda os principais aspectos para avaliação da qualidade de superfícies usinadas.

CAPÍTULO III – Este capítulo contém todo o procedimento experimental e lista de equipamentos e acessórios utilizados nos experimentos, bem como a metodologia para medição e análise das variáveis de saída: rugosidade da superfície e textura superficial.

CAPÍTULO IV – Capítulo em que são apresentados todos os resultados obtidos e as respectivas análises e discussões realizadas.

CAPÍTULO V – Capítulo que contempla todas as conclusões acerca dos resultados obtidos, como também sugestões para trabalhos futuros.

E finalmente são apresentadas as referências bibliográficas consultadas e que serviram para embasar este trabalho.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão da literatura sobre o processo de retificação, parâmetros operacionais, integridade das superfícies retificadas, rebolos abrasivos, especificações e a retificabilidade do poliacetal.

2.1. Processo de retificação

Retificação é o processo de usinagem mecânica em que a remoção do cavaco do material é estabelecida pelo contato entre a peça e o rebolo, o qual desenvolve elevadas velocidades de corte (≥ 30 m/s) em relação a outros processos convencionais de usinagem que utilizam ferramentas de geometria definida, por exemplo, o fresamento (MALKIN; GUO, 2008). Os processos de retificação podem ser classificados basicamente em dois tipos quanto a geometria da peça: plana ou cilíndrica. Contudo, há uma classificação mais ampla que contempla a retificação plana tangencial, a cilíndrica ou cônica (externa ou interna, circunferencial ou não, em vários avanços da ferramenta ou peça), ou ainda perfilada, por exemplo, para usinar roscas (SOUZA, 2007).

Um dos principais componentes do processo de retificação é o rebolo, a ferramenta de usinagem, que constituída de partículas abrasivas de elevada dureza e com várias arestas de corte de geometria não definida, que são unidas por aglomerantes (ligantes). Devido ao tamanho das partículas abrasivas, são empregados baixos valores de penetração de trabalho, que resultam em baixa taxa de remoção de material, por exemplo em relação ao fresamento. Basicamente, por este motivo e pela baixa espessura de equivalente de corte, é que baixos valores de rugosidade $R_a \leq 1,6 \mu\text{m}$ (melhor acabamento da peça) e desvios dimensionais com qualidade dimensional, classe IT06-IT03, são atingidos com o processo de retificação (MARINESCU et al. (2016) e MALKIN; GUO (2008)). Ela é recomendada também para usinagem de materiais de alta dureza ou quando limitações nos processos com o uso de ferramenta de geometria definida são encontrados. Este processo também visa conferir maior exatidão dimensional em peças que passaram por outros processos de usinagem e proporcionar obtenção de propriedades superficiais que outros processos convencionais não conseguem atender (SHAW, 1996).

São quatro grupos de variáveis envolvidos no processo de retificação da peça a ser retificada: desempenho da retificadora, características do rebolo, propriedades do material da peça e os parâmetros de retificação, incluindo o processo de dressagem do rebolo (JACKSON e DAVIM, 2011). No presente trabalho, será abordado o processo de retificação plana tangencial, por esta razão, a revisão bibliográfica e os parâmetros de corte serão baseados neste processo em específico.

2.1.1. Processo de retificação plana tangencial

Na retificação plana tangencial (Figura 1) o eixo do rebolo é paralelo à superfície retificada. A mesa da máquina-ferramenta executa um movimento de avanço alternativo e um movimento de avanço transversal, enquanto o rebolo executa o movimento em profundidade. Este tipo de retificação plana é mais lento e muito usado para a retificação de peças grandes de baixa produção. (SOUZA, 2007). Nos rebolos desse processo (tipo reto), utiliza-se sua superfície periférica, estes fatores garantem retificar peças de alta precisão (MARINESCU et al., 2016).

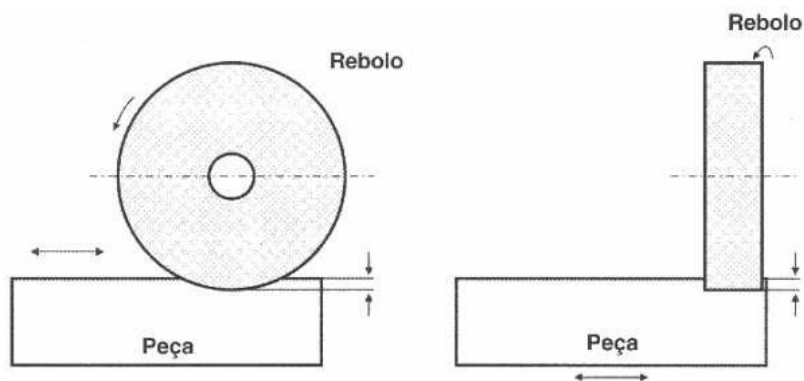


Figura 1 - Retificação plana tangencial (adaptada de DINIZ, 1999).

A cinemática utilizada na máquina-ferramenta para obter a superfície desejada envolve um movimento relativo apropriado entre a peça e a ferramenta (MACHADO et al., 2015). Na Figura 2 são mostradas as principais grandezas físicas do processo de retificação plana

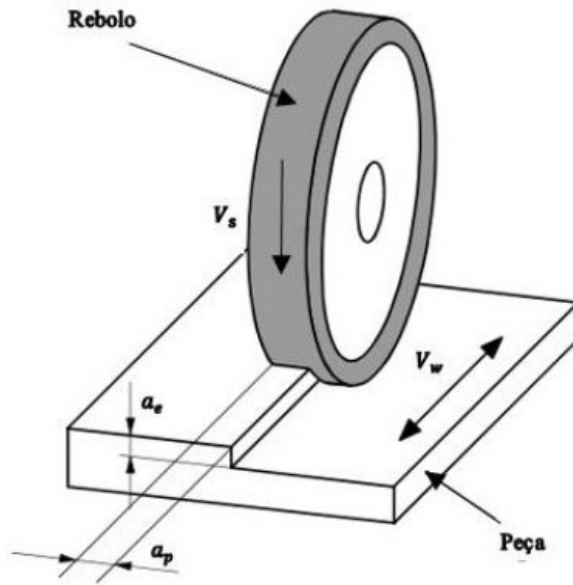


Figura 2 - Grandezas físicas na retificação (adaptada de MARINESCU et al., 2016).

A velocidade periférica (v_s) do rebolo, conhecida como velocidade de corte, normalmente, varia entre 10 m/s e 45 m/s para rebolos com abrasivos convencionais (a base de óxido de alumínio e de carbeto de silício), mas podem ultrapassar 200 m/s ao empregar rebolos superabrasivos (à base de diamante e de CBN), o que pode implicar valores de rotação do eixo-árvore superiores a 10.000 rpm, ela pode ser calculada pela Equação (1):

$$v_s = \frac{\pi d_s n_s}{60000} \quad (1)$$

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 rebolo-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). Contudo, a elevação da velocidade de corte torna o rebolo mais duro, portanto, os grãos desgastados terão maior dificuldade de se desprenderem do corpo do rebolo. Com o tempo, estas partículas desgastadas e sem corte irão configurar uma maior área de contato com a peça, podendo então gerar mais calor e prejudicar a peça. Isso é mais notório ao se empregar rebolos abrasivos convencionais.

Quanto à velocidade da peça (v_w), os valores são inferiores ao da velocidade de corte, e podem variar entre 2,5 e 25 m/min, a depender da limitação da máquina ferramenta (NUSSBAUM, 1988). Valores muito baixo implicam em maior tempo de contato com a peça, o que pode fazer com que mais calor seja transferido à peça e resultar em danos térmicos, que podem prejudicar a funcionalidade da peça.

Quanto à profundidade de usinagem (a_p), normalmente é selecionada em função da largura do rebolo, sendo recomendado que o valor dessa profundidade varie de 1/4 a 4/5 do valor da largura do rebolo. Quanto maior é a_p , maior é a área de contato e maior será a geração de calor e geração de danos térmicos.

A penetração de trabalho (a_e) é um dos principais parâmetros do processo e em geral situa-se abaixo de 0,1 mm. Esses baixos valores de penetração de trabalho contribuem para a obtenção de tolerâncias estreitas (qualidades de trabalho IT6 a IT3). Já em operações em que ferramentas de geometria definida são empregados valores de profundidade de usinagem e de penetração de trabalho mais elevados, por exemplo de 0,5 mm a 3 mm, o que configura elevação das forças de usinagem, alteração nos parâmetros tribológicos e, conseqüentemente, a obtenção de tolerâncias mais abertas (qualidades de trabalho $\geq$ IT7) (MACHADO et al., 2015). Por um outro lado, menor calor será transferido à peça, pois os cavacos, por exemplo, gerados de operação de fresamento, serão de maiores dimensões e irão absorver mais calor que na retificação.

Outra grandeza bastante empregada é a espessura de corte equivalente (h_{eq}), Equação (2), definida como a espessura aproximada do cavaco removido sob determinadas condições de corte. O aumento deste parâmetro resulta em grãos abrasivos removendo uma maior quantidade de material a cada interação, o que eleva as forças de corte e prejudica o acabamento da peça retificada, além de causar maiores desvios dimensionais (ROWE (2014) e MALKIN; GUO (2008)):

$$h_{eq} = v_{\text{peça}} \frac{ae}{v_s} \quad (2)$$

Em que:

- a_e : penetração de trabalho (μm);
- $v_{\text{peça}}$: a velocidade da peça (m/min)
- v_s : velocidade de corte (m/s).

2.1.2. Mecanismos de formação do cavaco em retificação

O processo de remoção do cavaco na retificação é realizado pelo conjunto das arestas de corte das centenas de partículas abrasivas na superfície de corte do rebolo. Destas centenas de partículas abrasivas, da literatura é conhecido que apenas entre 5 e 10% delas estão em contato direto com a superfície da peça, relacionadas ao processo de formação, e, portanto, aptas para retirar material (JACKSON; DAVIM, 2011).

Para auxiliar o entendimento acerca da formação do cavaco, (MARINESCU et al., 2016) dividiram a formação do cavaco, no processo de retificação, em três etapas conforme Figura 3.

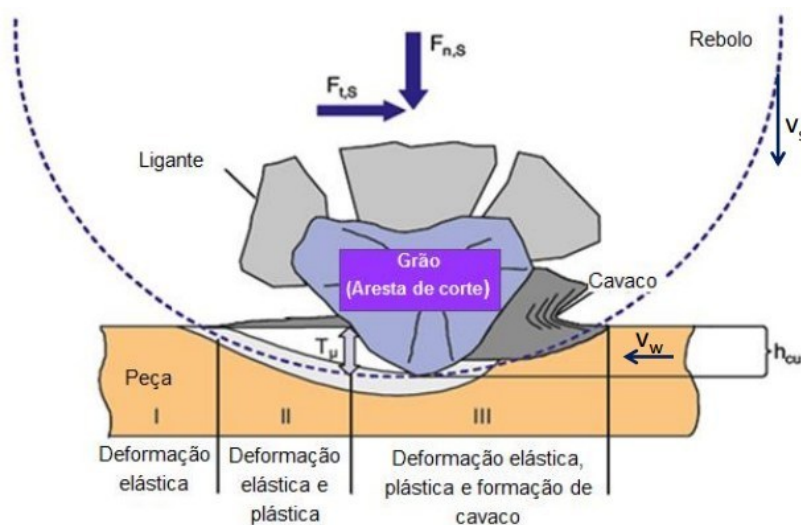


Figura 3 - Ilustração esquemática das etapas de formação do cavaco na retificação (Adaptado de KLOCKE, 2009).

Etapa I – Atrito: onde ocorre o primeiro contato do grão abrasivo com a superfície da peça e inicia a fase de deformação apenas no regime elástico do material;

Etapa II – Sulcamento ou riscamento: à medida que o grão abrasivo penetra mais na peça, a espessura do cavaco não deformado também aumenta, desta forma, as tensões compressivas se elevam. Em seguida, com início do cisalhamento, o material da peça é empurrado para frente e para as laterais do grão abrasivo (*material side flow*), essa deformação atinge o regime de deformação plástica de algumas partes da área de deformação. Sucessivamente, quanto maior a taxa de penetração dos grãos abrasivos, maior é o atrito e a área de contato. Com a elevação das forças de atrito, maiores serão as taxas de deformação.

Etapa III – Remoção de cavaco: fase em que a penetração da aresta de corte da partícula abrasiva alcança um valor crítico (quando a penetração necessária para obter a espessura do cavaco não deformado é igual à profundidade de corte) e a pressão de contato também alcança um valor crítico, definida como a pressão mínima para que ocorra ruptura do material. É neste momento que o cavaco tem sua formação iniciada e grande parte da energia do processo passa a ser consumida no cisalhamento do material (MARINESCU et al., 2016).

2.1.3. Rebolos

Os rebolos abrasivos são as ferramentas de corte da usinagem por abrasão, a seguir serão apresentados a definição e a nomenclatura do rebolo.

Segundo a padronização brasileira ABNT PB 26, denomina-se ferramenta abrasiva aquela que possui formas e dimensões definidas constituída de partículas abrasivos ligadas por aglutinante (ou aglomerante). Por outro lado, arestas cortantes dos abrasivos são geometricamente não-definidas. A ferramenta abrasiva com a forma de superfície de revolução, adaptável a um eixo é denominada rebolo abrasivo (MACHADO et al., 2015).

Na Tabela 2 são apresentadas as principais classes de abrasivos e superabrasivos sintéticos e suas características quantos aos elementos que compõem o rebolo utilizados na retificação (KLOCKE, 2009):

Tabela 2 - Principais elementos de rebolos convencionais e exemplo de especificação (MACHADO et al., 2015).

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

Na retificação, a remoção de material ocorre devido à interação entre o material abrasivo e a peça a ser usinada. Para o material abrasivo são exigidos: o material de constituição das partículas abrasivas, sendo importante para avaliar a interação química e mecânica entre a ferramenta e a peça. Os abrasivos convencionais mais comuns na retificação amplamente utilizados na indústria metal mecânica são a base de óxido de alumínio (Al_2O_3) e carbetto de silício (SiC). Embora existam recomendações de rebolos para usinar praticamente todos os tipos de metais, ainda não há muitos trabalhos que apresentam recomendações de rebolos e condições de corte para retificação de polímeros e compósitos. Contudo, pela teoria de Usinagem por Abrasão os rebolos recomendados para compósitos e polímeros são aqueles de SiC , por estes serem apropriados para a usinagem de materiais metálicos de baixa resistência à tração, tais como os ferros fundidos cinzento, nodular e vermicular.

E da Tabela 2, coluna 2, a granulometria mesh dos grãos é determinada pelo tamanho da "grana", quanto maior a "grana", menor é o tamanho do grão. Por exemplo, uma lixa de água de granulometria mesh 120 possui tamanho de grão maior que a granulometria mesh 180.

Na Tabela 2, coluna 3, refere-se a dureza em rebolos abrasivos e indica a capacidade que o ligante tem de reter o grão abrasivo durante o corte, em que A é mais mole; e próximo de Z mais duro. Os rebolos mais usualmente utilizados possuem dureza que variam entre j a m, pois podem ser utilizados tanto para situações que exigem semi-debaste e semi-acabamento.

Embora não esteja contemplada na Tabela 2, há ainda uma importante propriedade de abrasivos, que é friabilidade, ela representa a capacidade das

partículas abrasivas de se quebrarem ou fraturarem durante o processo de usinagem e terem suas arestas novamente afiadas. Isso pode ser positivo ou negativo, dependendo das condições de usinagem e dos requisitos de acabamento desejados. Em geral, grãos abrasivos frágeis são úteis em aplicações que requerem uma renovação constante da superfície de corte do rebolo, e onde a dressagem deve ocorrer com menor frequência. Quanto aos grãos abrasivos resistentes à fratura, menos friáveis, são úteis em aplicações que requerem um desgaste uniforme dos grãos (Figura 5) (AZEVEDO, 2017).

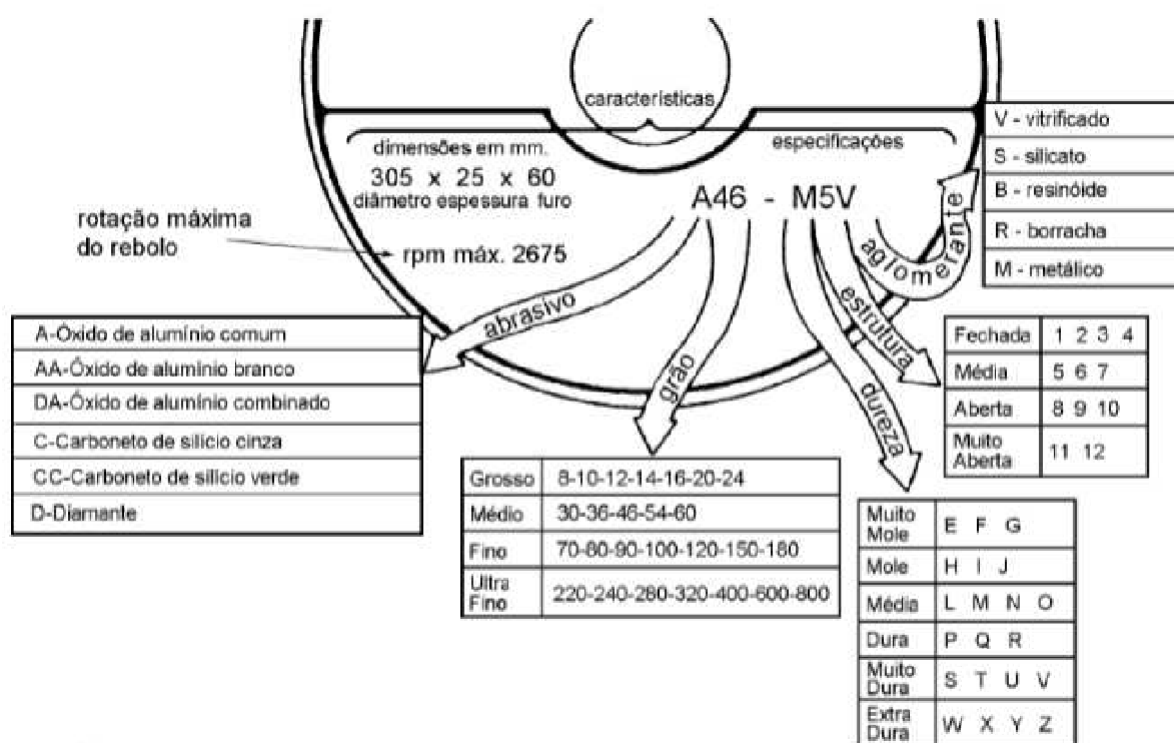


Figura 5 - Códigos de especificação de rebolos (AZEVEDO, 2017)

2.2. Integridade de Superfícies Retificadas

A integridade de superfícies retificadas refere-se à qualidade e condição da superfície de uma peça após o processo de retificação. Para garantir a manutenção adequada integridade de superfície em muitas aplicações e, portanto, possibilitar a funcionalidade e a vida útil das peças, é necessário conhecer os parâmetros que regem a integridade e também aqueles parâmetros do processo que a afetam. As alterações na integridade são classificadas em: alterações na superfície (acabamento)

e alterações em camadas internas da peça (alterações subsuperfícies) (MACHADO et al., 2015). O acabamento de uma superfície usinada é a combinação de vários fatores, que podem ser divididos em: rugosidade, ondulações e falhas (ABNT NBR 16314). Durante o processo de remoção de cavaco é criada uma superfície com uma camada bastante diferente da existente anteriormente ao corte e, que apresenta alterações tanto na superfície quanto abaixo dela. A observação e conhecimento dessas alterações é importante em componentes que trabalharão sujeitos a altas tensões, principalmente de tensões alternadas ou ainda sob altas temperaturas ou em ambientes corrosivos, já que a resistência à fluência, por exemplo, e outras propriedades mecânicas da peça podem ser afetadas. Uma outra abordagem classifica as alterações observadas em operações de usinagem de acordo com sua origem, podendo ser de natureza mecânica ou metalúrgica. (MALKIN; GUO, 2008).

2.2.1. Acabamento superficial

O acabamento de uma peça é representado por ondulações consistem de irregularidades superficiais ou de erros geométricos cujos espaçamentos são maiores que as irregularidades consideradas rugosidades. Elas podem ser causadas por vibrações e flexões da ferramenta e/ou peça devido à força de usinagem, temperatura de corte ou a erros de fixação da peça ou ferramenta (KLOCKE, 2009), como também por defeitos inerentes à peça, como também inclusões, trincas, bolhas, ou podem surgir durante o processo de corte (MACHADO et al., 2015)

Outros problemas nas superfícies após a usinagem são as falhas, constituídas por interrupções na topografia típica de uma superfície, que não são intencionais, podem inesperadas e são indesejáveis e que podem ser causadas por defeitos inerentes à peça, como também inclusões, trincas, bolhas, ou podem surgir durante o processo de corte (MACHADO et al., 2015).

Quanto à rugosidade, ela consiste nas variações microgeométricas da superfície, com pequenos comprimentos de onda (MACHADO et al., 2015). Ela é medida em escala muito pequena (em milésimos ou até micrometros) e afetam a funcionalidade, a aparência e a durabilidade de uma superfície (JACKSON; DAVIM, 2011). Tais características podem ser observadas na (Figura 6).

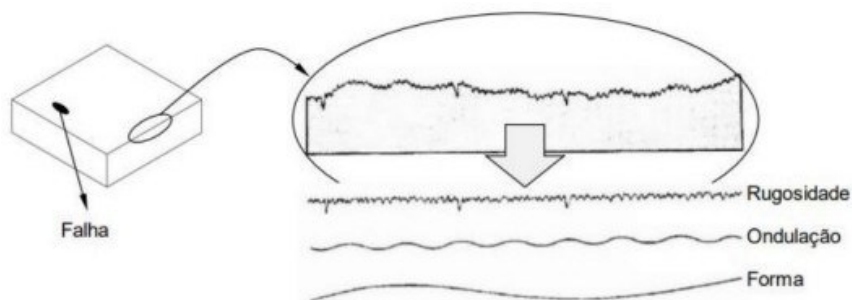


Figura 6 - Representação ilustrativa dos aspectos presentes em uma dada superfície (JACKSON; DAVIM, 2011).

A rugosidade é caracterizada também por pequenas saliências e reentrâncias em uma superfície que representa papel importante no desempenho de componentes mecânicos, dentre outros, influenciando fatores como qualidade de deslizamento, resistência ao desgaste, transferência de calor, qualidade de superfícies óticas, capacidade de ajuste de acoplamentos, resistência ao escoamento de fluidos e lubrificantes, aderência de camadas protetoras, resistência à corrosão e fadiga, vedação e aparência (MACHADO et al., 2015).

A determinação e análise do parâmetro de rugosidade no processo de retificação exige mais atenção do usuário de usinagem e metrologia do que em processos de usinagem com ferramentas de geometria definida, pois envolve um numero maior de características dos processo, iniciando pelo rebolo que possui distribuição aleatória das partículas abrasivas; aos aspectos tribológicos resultantes da combinação de diversos parâmetros operacionais que incluem a dureza do material da peça, cinemática do processo, entrada e saída do rebolo, condições de dressagem, presença da cortina de ar entre o fluido de corte e o rebolo, elevada velocidade de corte, pequenas dimensões dos cavacos, entre outros (MALKIN; GUO, 2008).

Os parâmetros de rugosidade podem ser classificados em três grupos: parâmetros de amplitude, parâmetros de espaço e os parâmetros híbridos (combinação entre amplitude e espaço) (MACHADO et al., 2015). Entre os parâmetros de amplitude, o mais utilizado é o R_t , amplamente empregado como parâmetro de controle de processo, uma vez que alterações no seu valor representam alterações no sistema, um indicativo de alteração na geometria da ferramenta, por exemplo, o desgaste. Embora o parâmetro R_a seja o mais popularmente empregado, isoladamente, ele não é suficiente para identificar algumas características importantes

da superfície, pois superfícies geometricamente diferentes podem apresentar Ra bem próximos, mas ondulações diferentes o que afeta o desempenho das peças em serviço.

- **Parâmetro Ra:** Este parâmetro é determinado por meio do desvio médio aritmético das alturas em relação à linha central média. Este é o parâmetro mais utilizado para controle da qualidade, no entanto se trata de um parâmetro médio, podendo assim camuflar o comportamento da superfície usinada (MACHADO et al., 2015).

- **Parâmetro Rz:** Este parâmetro resulta da diferença em altura entre a média dos cinco picos mais altos e os cinco vales mais profundos ao longo do comprimento de avaliação. Ele possui uma maior sensibilidade para eventuais picos elevados e/ou vales mais profundos (MACHADO et al., 2015).

2.2.2. Alterações de natureza mecânica

Alterações na natureza mecânica de um objeto" referem-se a mudanças ou modificações nas propriedades ou no comportamento mecânico de um determinado objeto. Essas alterações podem ocorrer por diversos motivos e processos, impactando as características mecânicas do objeto em questão. Isso pode envolver ajustes nas propriedades físicas, como resistência, elasticidade, dureza, entre outras, afetando diretamente como o objeto responde a forças externas ou movimentos (MACHADO et al., 2015). Aqui são alguns exemplos de alterações mecânicas:

- **Deformação plástica:** evento que consiste da deformação plástica na superfície do componente. Ela pode ser identificada pelas estruturas metalúrgicas alongadas na direção do fluxo de deformação do material (MACHADO et al., 2015).
- **Rebarbas:** podem ser fragmentos de aresta postiça de corte ou, ainda, na retificação de materiais dúcteis, as rebarbas que surgem pela incapacidade da partícula abrasiva de transformar em cavaco o material deformado plasticamente. Em geral, essas alterações influenciam não só a superfície usinada, mas também a rugosidade (MACHADO et al., 2015)
- **Alterações de microdureza:** a dureza da peça pode sofrer alterações importantes ao longo de sua seção transversal e também na própria superfície

usinada em função de alterações metalúrgicas. No caso de aços, por exemplo, a temperatura atingida na superfície durante a usinagem, associada à velocidade de resfriamento (severidade), podem levar à formação de martensita não revenida ou ao revenido dessa. No primeiro caso, tem-se a elevação da microdureza das camadas atingidas; no segundo, a redução da dureza em relação ao valor inicial (MACHADO et al., 2015)

- Trincas: micro ou macrotrincas podem surgir na peça durante a usinagem, principalmente se processos não convencionais forem usados. Entretanto, elas tendem a ser mais frequentes em materiais frágeis, como ferros fundidos por exemplo. As microtrincas são prejudiciais à resistência à fadiga e à corrosão sob tensão, portanto, devem ser evitadas (MACHADO et al., 2015)

A tensão de compressão é benéfica, pois ela aumenta a resistência à fadiga da peça. Normalmente, quanto maior o desgaste da ferramenta, mais intensa e profunda será a tensão residual de compressão (MACHADO et al., 2015)

2.2.3. Alterações de natureza metalúrgica

As "alterações de natureza metalúrgica" referem-se a mudanças ou transformações nas propriedades físicas e químicas dos metais ou ligas metálicas. Essas alterações geralmente ocorrem devido a processos metalúrgicos específicos, que envolvem manipulação das estruturas cristalinas, composições químicas e condições térmicas dos materiais metálicos (MALKIN; GUO, 2008).

- Recristalização: qualquer metal cujas superfícies são deformadas plasticamente durante a operação de usinagem pode sofrer recristalização quando aquecido a temperaturas superiores às temperaturas de recristalização (MALKIN; GUO, 2008).
- Transformação de fases: as altas temperaturas desenvolvidas durante a usinagem podem promover a transformação de fase na superfície dos componentes usinados, nos aços, pode ocorrer a formação de martensita frágil e não revenida (MALKIN; GUO, 2008).

2.3. Poliacetal e suas aplicações

O poliacetal é um material da classe de polímeros. A palavra polímero origina-se do grego poli (muitos) e mero (unidade de repetição). Assim, um polímero é uma macromolécula composta por muitas (dezenas de milhares) de unidades de repetição denominadas meros, ligadas por ligação covalente. A matéria-prima para a produção de um polímero é o monômero, isto é, uma molécula com uma mono (unidade de repetição). Dependendo do tipo do monômero (estrutura química), do número médio de meros por cadeia e do tipo de ligação covalente, poderemos dividir os polímeros em três grandes classes: Plásticos, Borrachas e Fibras (CANEVAROLO, 2006 página 21).

A resposta de um polímero a forças mecânicas em temperaturas elevadas está relacionada com sua estrutura molecular dominante. De fato, um esquema de classificação para esses materiais é feito de acordo com seu comportamento frente a uma elevação na temperatura. Os termoplásticos (ou polímeros termoplásticos) e os termorrígidos (ou polímeros termorrígidos) são as duas subdivisões. Os termoplásticos amolecem (e eventualmente se liquefazem) quando são aquecidos, e endurecem quando são resfriados 4 processos que são totalmente reversíveis e que podem ser repetidos. Em uma escala molecular, conforme a temperatura é elevada, as forças de ligação secundárias diminuem (pelo maior movimento das moléculas), de tal modo que o movimento relativo de cadeias adjacentes é facilitado quando uma tensão é aplicada. Uma degradação irreversível ocorre quando a temperatura de um polímero termoplástico fundido é aumentada excessivamente. Além disso, os termoplásticos são relativamente macios. A maioria dos polímeros lineares e aqueles que têm algumas estruturas ramificadas com cadeias flexíveis são termoplásticos. Exemplos de termoplásticos de grande importância na engenharia são o polietileno, o nylon, o poliacetal e o poliuretano (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Os polímeros termorrígidos são polímeros em rede. Eles tornam-se permanentemente rígidos durante a formação da rede e não amolecem sob aquecimento. Os polímeros em rede apresentam ligações cruzadas covalentes entre as cadeias moleculares adjacentes. Durante os tratamentos térmicos, essas ligações prendem as cadeias umas às outras para resistir aos movimentos de vibração e de rotação da cadeia em temperaturas elevadas. Dessa forma, os materiais não amolecem quando são aquecidos. A densidade de ligações cruzadas é geralmente

elevada, de modo que entre 10% e 50% das unidades repetidas na cadeia têm ligações cruzadas. Somente um aquecimento até temperaturas excessivas causará o rompimento dessas ligações cruzadas e a degradação do polímero. Os polímeros termorrígidos são, em geral, mais rígidos e mais resistentes do que os termoplásticos, e também possuem melhor estabilidade dimensional. A maioria dos polímeros com ligações cruzadas e em rede, incluindo as borrachas vulcanizadas, os epóxis, as resinas fenólicas e algumas resinas poliéster, são termorrígidos (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). 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. Assim como os termofixos, a reciclagem de elastômeros não é possível através do processo de fusão (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Desde que Butlerov sintetizou o formaldeído em 1859 e após a descoberta do nitrato de celulose pelo inglês Alexandre Parkes, são conhecidos polímeros deste material, já que se formam espontaneamente ao se manejar este aldeído. Porém, só no final dos anos 50 se obteve polímeros de formaldeído com estabilidade e tenacidade necessárias para aplicações comerciais. A primeira resina acetálica comercializada foi desenvolvida pela Dupont em 1960, como nome de Delrin. Em 1962 foi o surgimento do Celcon, um copolímero produzido pela empresa Celanese. No mesmo ano, a Hoechst uniu-se a Celanese para produzir na Alemanha as resinas acetálicas Hostaform que foi um avanço no mundo dos plásticos de alto desempenho para aplicações de engenharia que ainda é um importante produto hoje. Uma nova aliança surgiu em 1963, a Celanese com a Dainippon Celluloid Company e à ICI (Imperial Chemical Industries), para produzir o copolímero acetálico no Japão e na Inglaterra, com os nomes de Duracon e Alkon, porém, em 1972, a ICI perdeu o interesse pelo produto. Poliacetais ou polioximetilenos (POM) são polímeros derivados do formaldeído ou do trioxano. O poliacetal está desde 1960 no mercado e, graças à sua alta rigidez e excelente estabilidade dimensional, é usado na engenharia especialmente para peças de precisão (MANO, 1991).

O poliacetal, também conhecido como polioximetileno (POM), é um polímero de engenharia amplamente utilizado devido às suas propriedades excepcionais, como

alta resistência mecânica, rigidez, resistência química. Essas características tornam o POM adequado para uma variedade de aplicações em diversas indústrias (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). De acordo com estes autores os seguintes exemplos podem ser citados:

- Componentes Automotivos – para fabricação de peças automotivas devido à sua resistência ao desgaste, durabilidade e capacidade de suportar condições adversas, como variações de temperatura e exposição a produtos químicos. Exemplos incluem engrenagens, buchas, suportes de molas e componentes internos de sistemas de combustível.

- Componentes de Máquinas e Equipamentos: na fabricação de componentes mecânicos de máquinas e equipamentos, onde a resistência ao desgaste e o baixo atrito são essenciais. Exemplos de aplicações incluem polias, engrenagens, rolamentos, válvulas e peças de sistemas de transporte.

- Indústria Eletrônica: empregado nas aplicações em componentes eletrônicos, usado em invólucros de dispositivos eletrônicos, conectores, interruptores e peças de montagem devido à sua resistência dielétrica, estabilidade dimensional e resistência química.

- Indústria Alimentícia: há classes do POM empregadas para utilização em superfícies que estarão em contato com alimentos, por exemplo na fabricação de peças de equipamentos de processamento de alimentos, como correias transportadoras, engrenagens de máquinas de envase e componentes de sistemas de transporte de alimentos.

- Indústria Médica: aplicação em dispositivos médicos, como componentes de bombas de infusão, válvulas, conectores e peças que exigem resistência química e esterilização.

- Indústria de Semicondutores: O POM é usado em equipamentos de fabricação de semicondutores devido à sua capacidade de atender a requisitos rigorosos de pureza, resistência química e estabilidade dimensional.

- Têxteis e Indústria de Máquinas de Costura: O POM é utilizado em máquinas de costura e componentes relacionados devido a seu baixo coeficiente de atrito, o que facilita o deslizamento de fios e tecidos.

- Aplicações em elementos de máquinas: utilizado na fabricação de mancais de rolamento, buchas, perfis, peças usinadas e componentes de engrenagens, onde suas propriedades mecânicas e de baixo coeficiente de atrito são desejáveis.

- Indústria de Esportes e Lazer: O POM é usado para fabricar equipamentos esportivos, como trilhos de esquis, travessas de trenós e polias de equipamentos de ginástica.

- Indústria de Brinquedos: Devido à sua segurança, durabilidade e facilidade de processamento, o POM é usado na fabricação de peças de brinquedos, como engrenagens de brinquedos, peças de montagem e componentes móveis

É importante observar que, embora o POM tenha muitas aplicações vantajosas, é essencial considerar os requisitos específicos de cada aplicação, como temperatura, exposição a produtos químicos e carga mecânica, ao selecionar um material de engenharia adequado (CANEVALORO JR, 2006).

O Poliacetal é um plástico de engenharia obtido a partir do aldeído fórmico. É um material rígido e muito resistente, com excepcional estabilidade dimensional devido, principalmente, à baixa absorção da umidade, a excelente usinabilidade e um bom polimento. É um plástico altamente cristalino, que mantém suas propriedades mesmo quando imerso em água quente (SIQUEIRA & BEGALLI, 2013).

É através do processo de polimerização que o poliacetal é obtido. Pode ser homopolímero (polímero obtido apenas por um monômero) do formaldeído - aldeído fórmico ou copolímero (polímero obtido através de mais de um monômero). O homo e o copolímero acetal possuem propriedades muito semelhantes entre si e de bem parecido com o náilon. Os poliacetais são vantajosos quanto à resistência à fadiga, fluência, rigidez e resistência a água (SIQUEIRA & BEGALLI, 2013).

A resistência a abrasão dos poliacetais é excelente, principalmente devido à sua superfície bastante dura (Rockwell R = 120) e do seu baixo coeficiente de atrito (0,1 a 0,3), porém, estas propriedades são inferiores às dos poliésteres. As propriedades mecânicas dos poliacetais são apresentadas na Tabela 3 (SIQUEIRA & BEGALLI, 2013).

Tabela 3 - Propriedades mecânicas e físicas básicas dos poliacetais (SIQUEIRA & BEGALLI, 2013)

Propriedades	Norma	Unidade	Homopolímero	Copolímero
Resistência à tração na ruptura	ASTM D638	MPa	70	60
Alongamento na ruptura	ASTM D638	%	40	70
Resistencia a flexão	ASTM D790	MPa	100	90
Modulo de flexão	ASTM D790	GPa	2,8	2,6
Resistencia ao impacto Izod com entalhe: 23° -40°	ASTM D256	J/m	75-110 50-90	50-80 43-64
Resistencia a abrasão Taber	ASTM D1044	mg	14	14
Dureza Rockwell	ASTM D785	R	120	115
Densidade	ASTM D792	g/cm ³	1,42	1,41
Absorção de umidade	ASTM D570	%	0,25	0,22

A temperatura de fusão do acetal homopolímero não é das mais elevadas, e sua temperatura máxima de uso contínuo chega a 85°, para o copolímero, essa temperatura sobe para 105°C, enquanto sua T_m é de 163°C. Na Tabela 5 são apresentadas as principais propriedades térmicas dos acetais.

Tabela 4 - Propriedades térmicas básicas dos poliacetais (AMANDA, GABRIELA 2013)

Propriedades	Norma	Unidade	Homopolímero	Copolímero
Temperatura de amolecimento Vicat B/120	ASTM D1525	°C	160	
Temperatura de deflexão térmica: 1,82 MPa 0,45 MPa	ASTM D648	°C	115 167	110 158
Coeficiente de expansão térmica linear	ASTM D696	m/m/°C	12x10 ⁻⁵	9X10 ⁻⁵
Condutividades térmicas	ASTM C177	W/m°K	0,27	0,27
Inflamabilidade	UL94	-	HB	HB
Índice de oxigênio	ASTM D2863	%	22	23
Contração de moldagem	ASTM D1299	%	2-2,5	2,0

O POM tem sido bastante empregado na indústria de eletroeletrônicos, alimentícia, automobilística, construção de máquinas, eletrotécnica, tecnologia de precisão, aparelhos domésticos, tecnologia médica e têxtil. O poliacetal pode ser utilizado na fabricação de vários itens de automóveis (peças em contato como combustível), aviões (sensores) e em polos industriais (peças e equipamentos). Sua alta resistência e alta estabilidade dimensional são adequadas para engrenagens. Outras vantagens do poliacetal são a alta capacidade de deslizamento, pelo baixo coeficiente de atrito, o que permite contato como alimentos e torna o material uma melhor opção para aplicações em que o alumínio apresenta limitações, aço ou ferro em equipamentos para indústria alimentícia (SIQUEIRA & BEGALLI, 2013).

A seguir na Figura 7 são apresentados alguns exemplos de componentes fabricados em poliacetal.

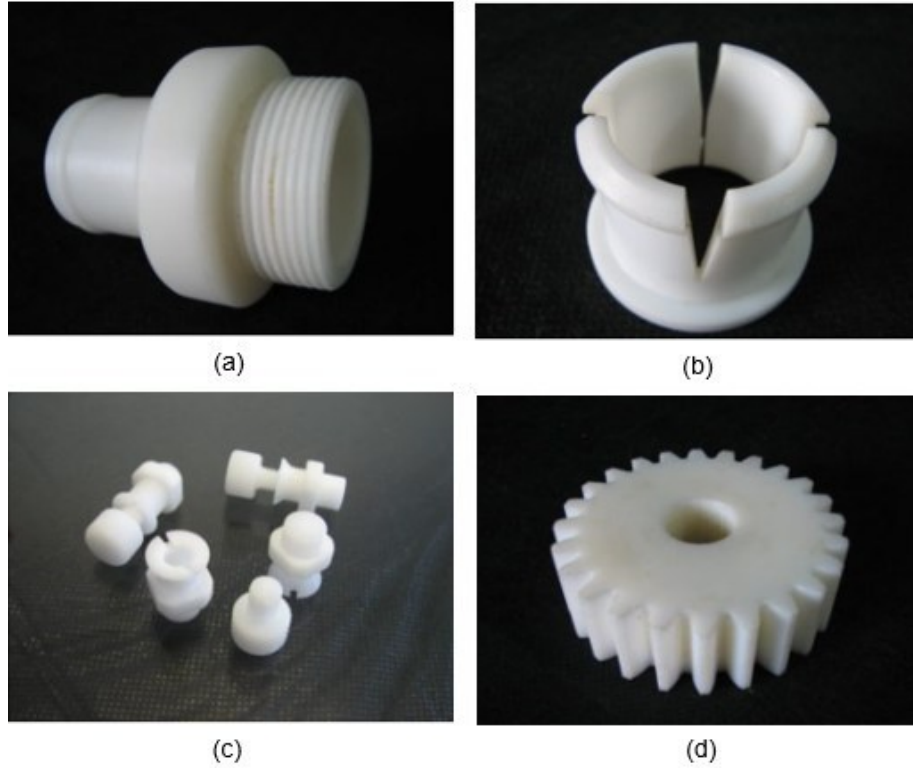


Figura 7 – Itens fabricados em poliacetal: (a) conexões, (b) vedações, (c) parafusos, (d) engrenagem (PLASTECNO, 2023)

CAPÍTULO III

3. Materiais e métodos

Neste capítulo são descritos os equipamentos (máquina-ferramenta, rebolo e o material da peça) utilizados nos ensaios de retificação, bem como as condições de corte e parâmetros de saída; os instrumentos de medição com a descrição de todo o procedimento experimental. Os ensaios foram realizados nos Laboratório de Usinagem Convencional (LUC) e Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU), ambos da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

As variáveis de saída para determinar a retificabilidade do poliacetal foram: a rugosidade superficial (parâmetros Ra e Rz) e imagens das superfícies retificadas. As medições de rugosidade foram realizadas no LEPU, bem como foram adquiridas imagens das superfícies retificadas via esteromicroscópio. O fluxograma contendo as etapas desenvolvidas neste trabalho está representado na Figura (8).

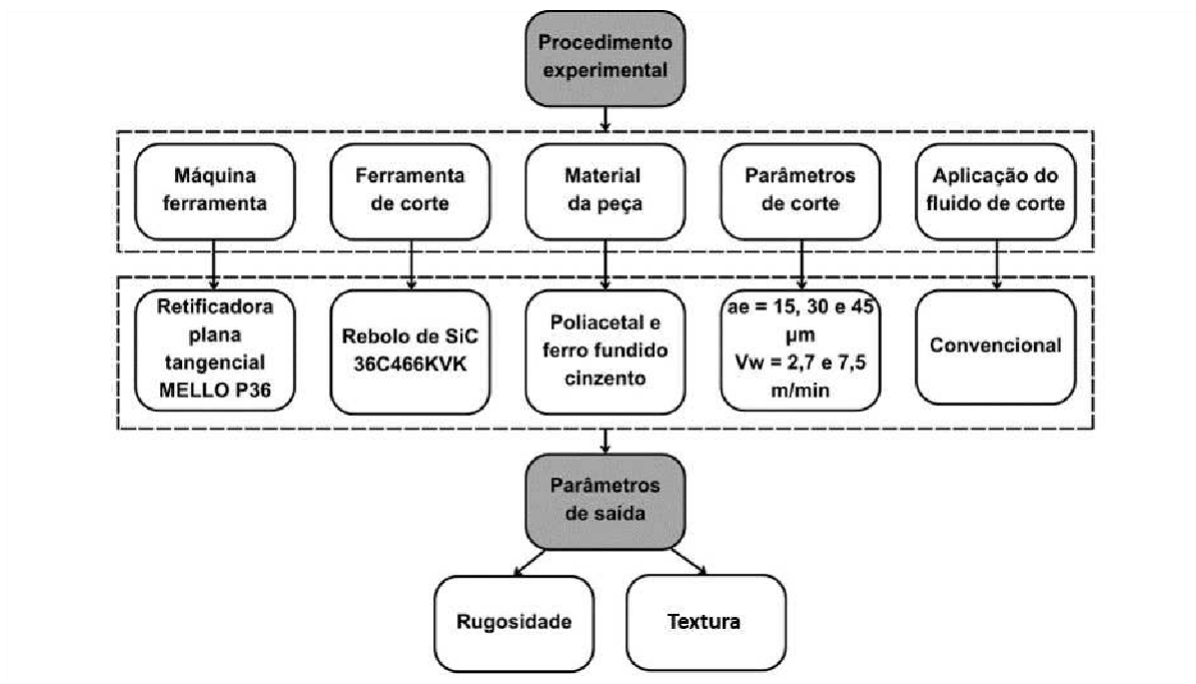


Figura 8 - Fluxograma do procedimento experimental desenvolvido

3.1. Equipamentos e materiais utilizados

Os ensaios de retificação foram realizados em uma retificadora plana tangencial modelo P36, com rotação constante de 2400 rpm e potência nominal de 2,24 kW, do fabricante Mello S. A Máquinas e Equipamentos, pertencente ao Laboratório de Usinagem Convencional (LUC) da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU. Ela é composta por uma mesa magnética que realiza movimentos horizontais e verticais e por um cabeçote no qual é acoplado o rebolo e onde se realiza a regulagem de penetração radial e profundidade de corte (Figura 9).



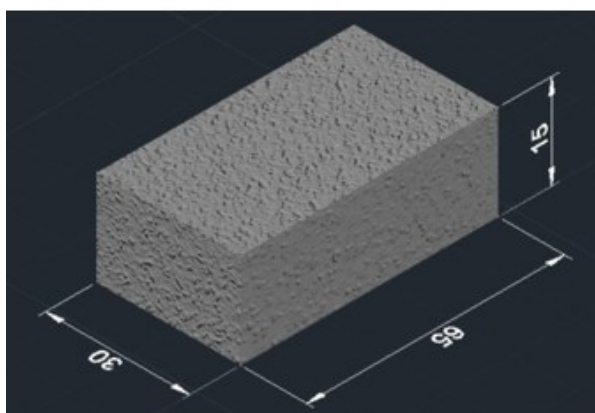
Figura 9 - Foto de uma retificadora plana tangencial modelo P36

O rebolo utilizado é do tipo reto de carbeto de silício (SiC) com ligante vitrificado e com granulometria mesh de 46 cuja especificação é 36C46KVK, da empresa fabricante Saint-Gobain Abrasivos da América do Sul (Figura 10). Ele tem dimensões: 254 mm de diâmetro externo x 25 mm de largura x 76 mm de diâmetro interno. Anteriormente à sua montagem na máquina, foi realizado o balanceamento do rebolo.

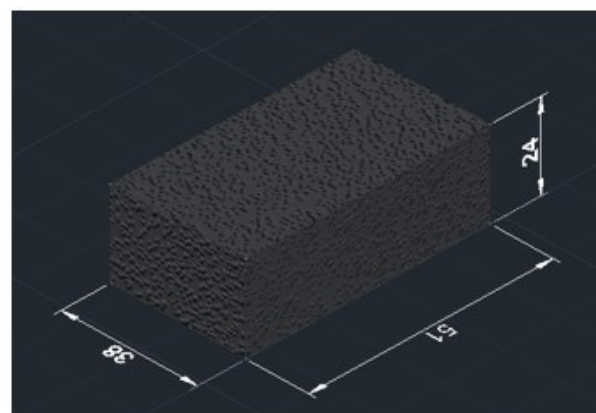


Figura 10 - Rebolo do tipo reto de carbeto de silício 36C46KVK

Foram utilizadas três amostras de Poliacetal (POM) e duas de ferro fundido cinzento nos ensaios de retificação cuja suas dimensões são apresentadas na figura 11, (a) e (b), respectivamente, as dimensões das peças de poliacetal e ferro fundido cinzento e em (c) a foto das amostras com medidas expressas em milímetros (mm).



(a)



(b)



(c)

Figura 11- Amostras: (a) Desenho do poliacetal com dimensões, (b) desenho do ferro fundido cinzento e suas dimensões, (c) fotos reais das amostras. (Junio, 2024)

Foi utilizado um fluido semissintético de base vegetal, Vasco 7000, do fabricante Blaser Swissslube, na proporção de diluição em água na proporção de 1:19 (equivalente ao Brix 3,5 %). Ele foi aplicado com um método convencional (abundância) com vazão de 8,5 L/min.

3.2. Parâmetros de corte

Os parâmetros de corte empregados nos ensaios experimentais de retificação do poliacetal e do ferro fundido estão apresentados na Tabela 5. Os dados de velocidade de corte, velocidade da peça e penetração de trabalho foram adotados com base em valores normalmente utilizados para retificação de aços com dureza semelhante ao ferro fundido e foi utilizado uma penetração maior no poliacetal, devido à sua menor dureza.



Figura 12 – Set-up de Retificação : (a) poliacetal, (b) ferro fundido cinzento

Antes de cada ensaio de retificação, o rebolo foi submetido à operação dressagem com o auxílio de um dressador de ponta única de diamante 0,5 ct, modelo PU-o.3-MK1-50, fornecido pela empresa Saint Gobain Abrasives. O dressador foi fixado a um suporte, como representado na Figura 10. A operação de dressagem consiste no movimento da mesa junto com o conjunto suporte-dressador por toda espessura do rebolo a uma profundidade constante de 15 μm em 3 passagens do dressador pelo rebolo, sempre na presença de fluido de corte.

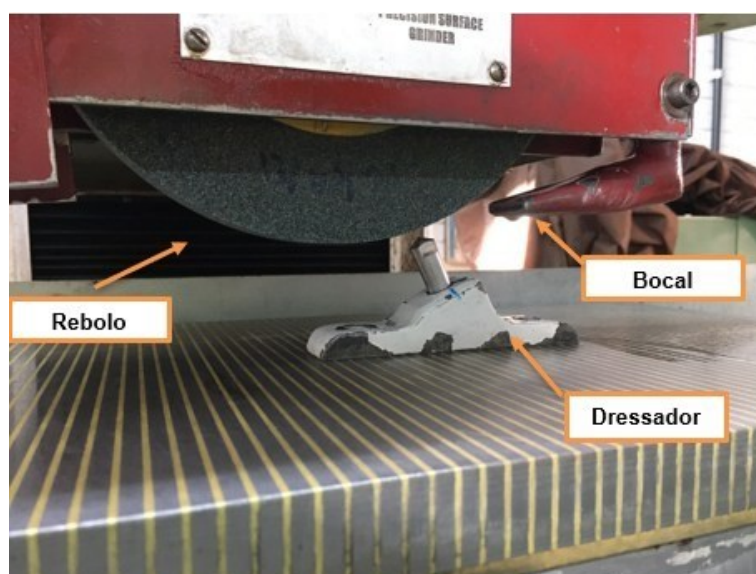


Figura 13 – Montagem do sistema de dressagem. (FERREIRA, 2024)

3.3. Planejamento experimental dos ensaios de retificação

Para a preparação das amostras, foram utilizados parâmetros de corte em condição mais branda, dois passes com penetração de trabalho $a_e = 10 \mu\text{m}$ velocidade da peça (V_w) = 7,5 m/min e mais três passes do rebolo com $a_e = 5 \mu\text{m}$. Para os ensaios de retificação definitivos das amostras de poliacetal foram variados 3 valores de penetração de trabalho (a_e): 15 μm ; 30 μm ; 45 μm e 2 valores de velocidade da peça $V_w = 2,7 \text{ m/min}$; 7,5 m/min (Tabela 5). Para a usinagem do ferro fundido cinzento foram utilizado dois valores de penetração (a_e): 15 μm ; 30 μm combinados com os mesmos valores de velocidade da peça empregados para a usinagem do poliacetal.

Tabela 5 – Parâmetros de corte empregados no processo de retificação do POM e Ferro fundido Cinzento

Parâmetros	Valor Adotado
Velocidade de corte (V_s)	33 m/s
Velocidade da peça (V_w)	2,7 m/min; 7,5 m/min
Penetração de trabalho (a_e)	15 μm ; 30 μm ; 45 μm
Fluido de corte	Semissintético de base vegetal – Vasco 7000
Vazão / tipo de aplicação	8,5 L/min / abundância
Diluição do fluido em água	1:19 (5 %)

O critério de parada de cada ensaio foi determinado por um passe do rebolo sobre a peça, para cada peça era definido um valor de penetração e em cada face dela um ensaio com cada uma das velocidades da peça. Vale ressaltar que um passe se

refere a passagem do rebolo sobre a peça (ida) e seu retorno (volta) sem incremento da penetração de trabalho (spark-out).

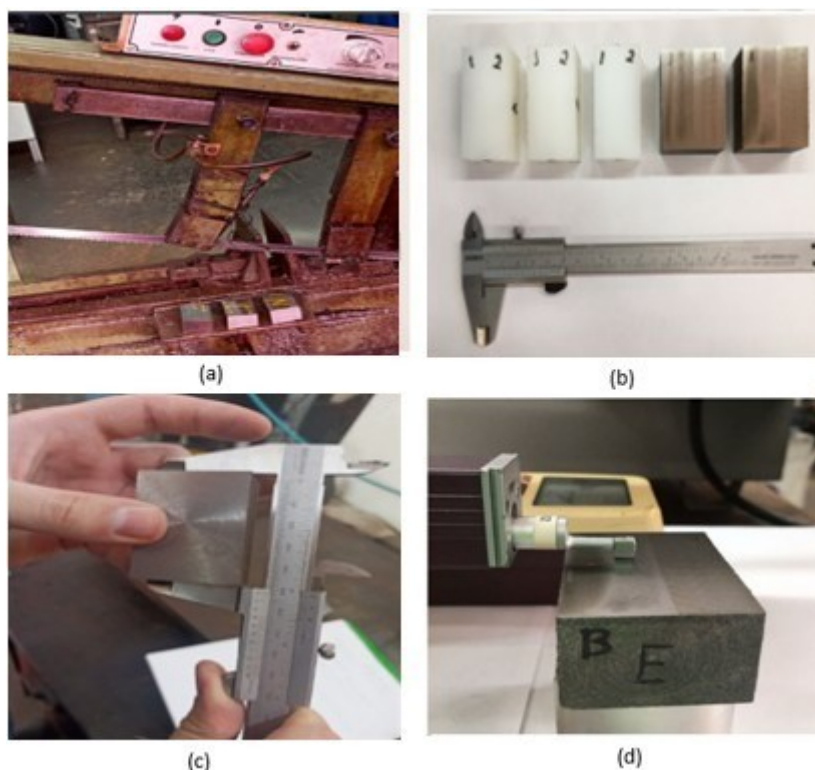


Figura 14 – Etapas com preparação da amostras de ferro fundido: (a) corte das amostras de ferro fundido cinzento, (b) Amostras cortadas na serra de fita (c) Medição de amostras, (d) medição de rugosidade

3.4. Variáveis de saída

Para avaliação do processo de retificação plana tangencial do poliacetal, comparado com o ferro fundido cinzento, este trabalho contou com as seguintes variáveis de saída: rugosidade da superfície retificada (parâmetros R_a e R_z) e imagens das superfícies retificadas via esteromicroscópio. Na sequência serão apresentados os equipamentos e os parâmetros utilizados, assim como a metodologia empregada.

3.5. Medição da rugosidade

A rugosidade da superfície foi definida pelos parâmetros de amplitude rugosidade média (R_a) e rugosidade total (R_z). A medição da rugosidade foi realizada com o auxílio de um rugosímetro portátil modelo SJ201P, do fabricante Mitutoyo, com resolução de $0,01 \mu\text{m}$ do LEPU. O comprimento de onda do filtro (cut-off) foi de $0,8 \text{ mm}$ e o comprimento de avaliação de $4,0 \text{ mm}$. Foram realizadas 3 medições, uma no começo, uma no centro e outra no fim da peça, sempre longitudinalmente à direção de avanço da peça a fim de obter os parâmetros na entrada, no centro e na saída, como ilustrado na Figura 12. O rugosímetro foi apoiado em uma superfície de apoio, na mesma altura dos corpos de prova, assim minimizando o desvio de paralelismo entre apalpador e peça. Os valores de rugosidade correspondem ao resultado das medições de entrada, a 5 mm do início, do centro e da saída, a 5 mm do final da peça.



Figura 15 - Medição da rugosidade do ferro fundido cinzento

3.6. Análise das superfícies das peças usinadas

A análise das superfícies usinadas das amostras foi realizada após o processo de retificação com o auxílio de um estereomicroscópio modelo Olympus SZ61 com ampliação máxima de $45\times$ usando oculares de $10\times$, com ampla relação de zoom de $6,7:1$, pertencendo ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da FEMEC – UFU, Figura 16.



Figura 16 - Esteromicroscópio

Por meio das imagens obtidas é possível observar a textura da superfície e identificar os mecanismos de corte e sulcos formados pela passagem das partículas abrasivos na superfície da peça em função das condições de corte utilizadas.

CAPÍTULO IV

4. Resultados e discussões

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos após a retificação tangencial plana do poliacetal em comparação ao ferro fundido cinzento com rebolo de carbeto de silício, para todas as variáveis de saída analisadas.

4.1. Rugosidade da superfície

Os resultados dos valores de rugosidade média dos parâmetros Ra e Rz tanto do ferro fundido, nas diferentes condições de corte são apresentados nas Figura 14 e 15 e nas Figuras 16 e 17 para o POM.

4.2. Ferro fundido cinzento

Quanto aos resultados de rugosidade do ferro fundido cinzento, parâmetros Ra e Rz nas Figuras 14 e 15, respectivamente, variando a penetração e velocidade da peça, observa-se que a rugosidade aumenta com a penetração de trabalho e que a velocidade da peça não exerceu tanta influência. Para o parâmetro Rz, apesar do aumento da penetração de trabalho, praticamente não houve alteração na rugosidade ao empregar a velocidade da peça de 2,7 m/min.

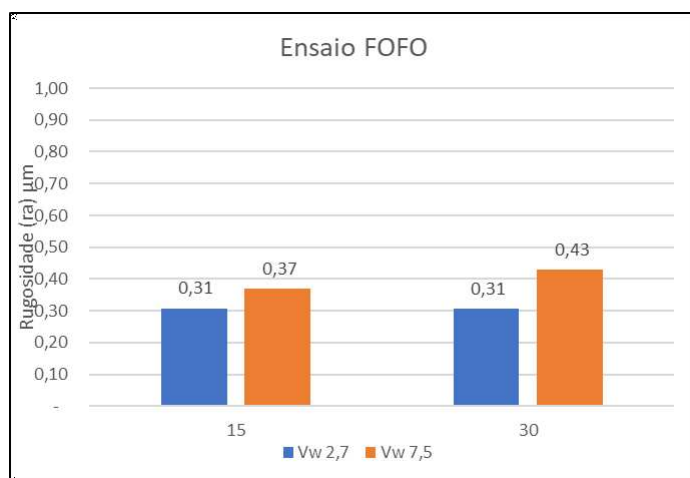


Figura 17- Rugosidade média (Ra) do Ferro fundido cinzento em função da penetração de trabalho e do número de passes

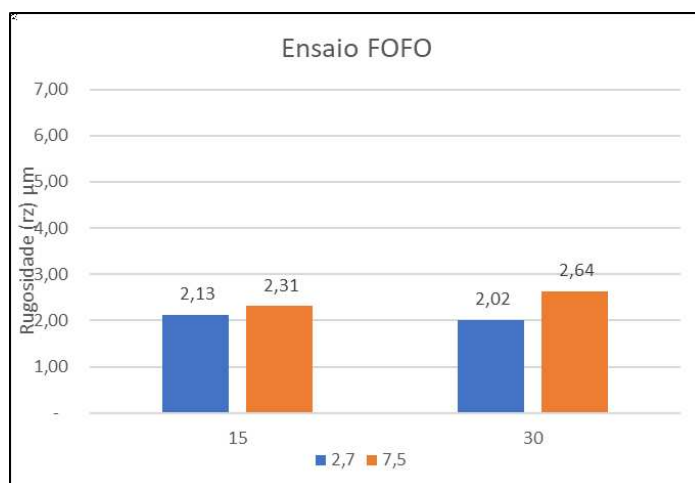


Figura 18 - Rugosidade média (Rz) do Ferro fundido cinzento em função da penetração de trabalho e do número de passes

De uma forma geral, observa-se que os valores de Ra para o ferro fundido cinzento encontram-se abaixo de $0,45 \mu\text{m}$, que é inferior ao limite máximo estabelecido em $0,63 \mu\text{m}$, frequentemente utilizado como padrão de referência para processos de retificação de semi-acabamento (KALPAKJIAN; SCHMID, 2009).

4.3. Poliacetal

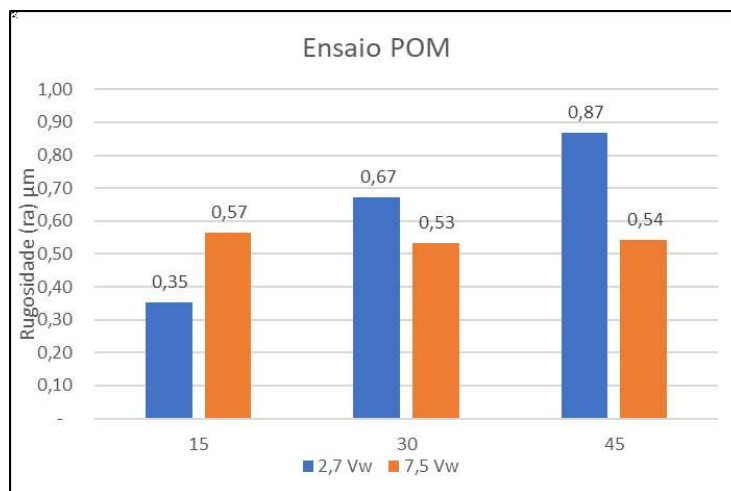


Figura 19 - Rugosidade média (Ra) Poliacetal em função da penetração de trabalho e do número de passes

Nas Figuras 19 e 20 são mostrados os resultados de rugosidade dos parâmetros de amplitude Ra e Rz, obtidos após retificação do poliacetal em distintas condições de corte, três valores de penetração de trabalho e dois valores de velocidade da peça.

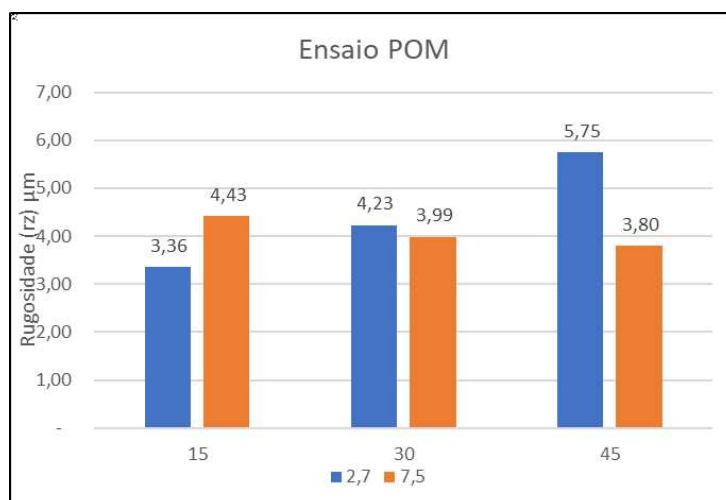


Figura 20 - Rugosidade média (Rz) Poliacetal em função da penetração de trabalho e do número de passes

Ao comparar os resultados obtidos para o poliacetal em comparação com o ferro fundido cinzento, evidencia-se um aumento na rugosidade com a penetração de trabalho, particularmente nas condições em que foi empregue uma menor velocidade da peça ($V_w = 2,7$ m/min). Contudo, com o aumento da penetração de trabalho, ao se empregar uma maior velocidade da peça ($V_w = 7,5$ m/min) os valores de rugosidade decrescem, diferentemente do ocorrido com as amostras de ferro fundido. A tendência de aumento de R_a e R_z do POM só foi observada ao empregar a menor penetração de trabalho. O acréscimo na penetração de trabalho implica em um maior contato das partículas abrasivas do rebolo com a peça, resultando em maior geração de calor no processo (MACHADO et al., 2015). Isso, por sua vez, alterar as condições tribológicas e, conseqüentemente, prejudica a textura da peça e reflete no acabamento da peça. Entretanto, nas condições em que a velocidade da peça foi $V_w = 7,5$ m/min, observou-se uma melhoria no acabamento superficial (menor R_a e R_z) com o aumento da penetração de trabalho (Figuras 19 e 20).

4.4. Imagens das superfícies retificadas

A fim de obter mais informação sobre a qualidade das superfícies retificadas, todas as amostras de ferro fundido cinzento e poliacetal foram conduzidas até o microscópio modelo Olympus SZ61 (com uma ampliação de 45 vezes) para observação e análises. Foram coletadas imagens de ambos os materiais após a usinagem em toda as condições de corte.

Na Figura 21 a) a d) são mostradas as imagens das amostras de ferro fundido cinzento após a retificação em quatro diferentes condições de corte.

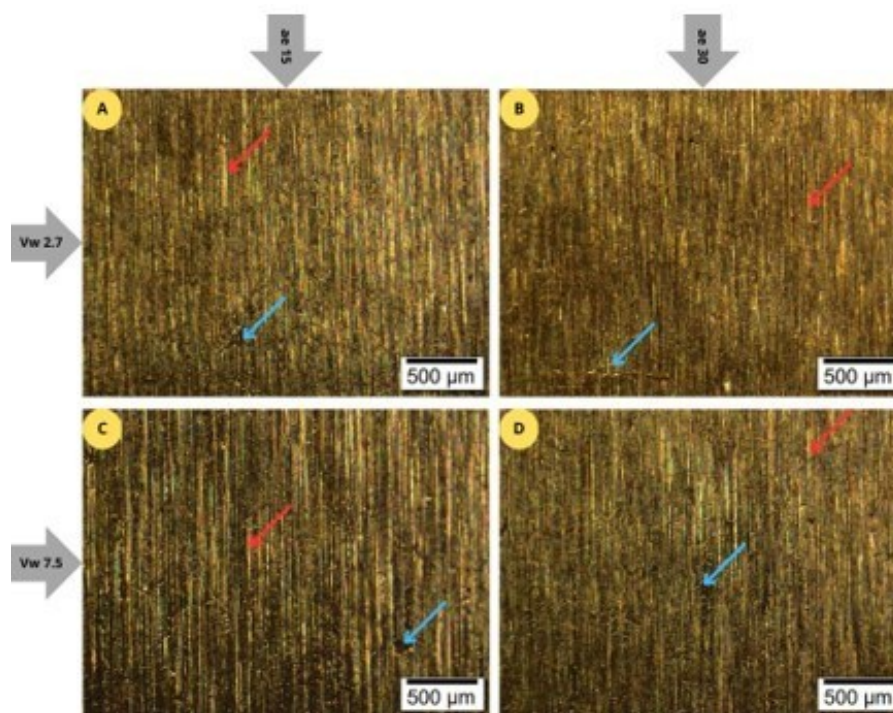


Figura 21 - Imagens de das superfícies de Ferro fundido cinzento retificadas em diferentes condições de corte

A partir das imagens na Figura 21 a) a f), de maneira geral, observa-se uma textura bem idêntica em todas as amostras. É possível identificar também as marcas deixadas pelos grãos abrasivos.

As imagens das superfícies de POM após a retificação estão apresentadas na Figura 22. Por estas imagens é possível identificar uma qualidade inferior nas superfícies das amostras na Figura 22 b e c, as quais correspondem àquelas usinadas com a menor velocidade da peça ($V_w = 2,7$ m/min), quando comparadas com a textura das demais amostras. Não é possível identificar nitidamente as marcas deixadas pelas partículas abrasivas do rebolo, como ocorreu para a amostras de ferros fundidos. Não evidência de destacamento de material da peça.

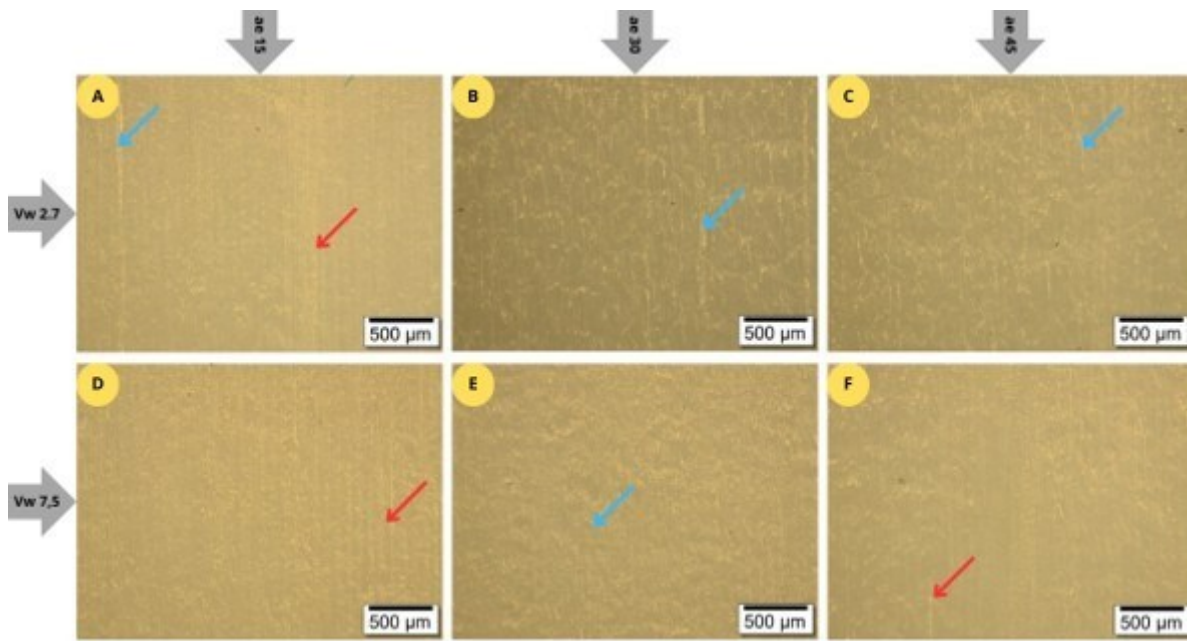


Figura 22 - Imagens das superfícies de Poliacetal retificadas em diferentes condições de corte

CAPÍTULO V

Conclusões

A partir dos resultados obtidos após a retificação plana tangencial do ferro fundido cinzento e poliacetal com rebolo do tipo reto de carbetto de silício 36C46KVK sob diferentes condições de corte, as seguintes conclusões podem ser retiradas:

- Os valores de rugosidade R_a para o poliacetal aumentaram com penetração de trabalho quando combinada com menor velocidade da peça 2,7 m/min, enquanto para velocidade maior e aumento da penetração de trabalho o R_a diminui, configurando, portanto, um comportamento inesperado em relação ao que ocorreu com o ferro fundido cinzento usinado nas mesmas condições de corte. Os valores de R_z seguiram a mesma tendência observada pelo R_a .

- Ao usinar o ferro fundido cinzento observou-se um aumento da rugosidade com a penetração de trabalho (a_e) e aumento da velocidade da peça (V_w), no entanto para velocidade da peça menor notou-se estabilidade no valor de R_a , mesmo com o aumento da penetração de trabalho.

- O parâmetro de rugosidade R_z apresentou comportamento semelhante ao R_a para o ferro fundido cinzento, em que notou-se aumento da rugosidade com a velocidade da peça e penetração de trabalho.

- Em geral todos valores de R_a e R_z das amostras de poliacetal situam-se abaixo de 0,87 μm e 5,75 μm respectivamente. Estes valores são superiores aqueles observados para as amostras de ferro fundido cinzento, o que permite inferir que a retificabilidade do poliacetal é inferior à do ferro fundido cinzento na faixa de parâmetros investigada.

- Quanto as superfícies usinadas, pelas imagens obtidas, observa-se que as marcas deixadas pelos abrasivos nas amostras de poliacetal são uniformes, sem evidência de destacamento de material.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Avaliar a influência de uma faixa maior de penetração de trabalho e também de condições de dressagem do rebolo na rugosidade, microdureza e textura da superfície de poliacetal.
- Testar outros tipos de polímeros nas mesmas condições investigadas neste trabalho, como também rebolo seeded gel e de óxido de alumínio branco.
- Realizar ensaios a seco e comparar com ensaios utilizando fluido de corte, inclusive testar fluido de base sintética nas mesmas condições testadas neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 4287 **Especificações geométricas dos produtos (GPS) – rugosidade: método do perfil – termos, definições e parâmetros da rugosidade**. Rio de Janeiro, 2002.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach**. 4th edition ed. [s.l.]: John Wiley & Sons, 2012.

CANEVAROLO JR., Sebastião. **Ciência dos polímeros**. 1. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2006.

CANEVAROLO, Sebastião V. Jr. **Ciência dos polímeros: um texto básico para engenheiros**. 2° ed. São Paulo: Artliber Editora, 2006. 280 p.

GUESSER, W. L. **Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos**. 1ª ed. São Paulo: Blüsher, 2009. 336p.

Hemais, C. A. (2003). **Polímeros e a indústria automobilística**. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282003000200008>

JACKSON, M. J.; DAVIM, J. P. **Machining with abrasives**. Nova York: Springer, 2011, 439p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7302-3>

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S.R. **Manufacturing Processes for Engineering Materials**. Pearson Education: 5th ed. PE; International Edition, 2009.

KLOCKE, F. **Manufacturing process 2: grinding, honing, lapping**. Ed Springer, 2009. 433p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-92259-9>

MACHADO, Álisson Rocha et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

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

MANO, Eloisa Biasotto. **Polímeros como materiais de engenharia**. São Paulo: Editora Blucher, 1991. Cap 3 p. 82-83

MARINESCU, I. D; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; ROWE, W. B.; INASAKI, I. **Handbook of machining with grinding wheels**. 2. ed. NY: CRC PRESS TAYLOR & FRANCIS GROUP, 2016. 724p. <https://doi.org/10.1201/b19462>

NUSSBAUM, G. C. **Rebolos e abrasivos: Tecnologia básica**. 1.ed. São Paulo: Ícone, 3 volumes, 1988.

Rabello, M.S. **Estrutura e Propriedades de Polímeros**, 2a edição, Ed. do autor, Campina Grande, 2023. ISBN 978-65-00-69331-7

ROWE, W. B. **Principles of Modern Grinding**. 2. ed. OX: ELSEVIER, 2014. 444p.

SHAW, M. C. **Principles of abrasives processing**. Oxford Science on Advanced Manufacturing. New York, USA, 1996. 565p.

SIQUEIRA, A. BEGALLI, G. **Poliacetal**. 2013. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/GabrielaBegalli/capa-27187332>. Acesso 21 de janeiro 2023 20:00.

SOUZA, A. J. **Fundamentos da usinagem de acabamento por abrasão mecânica**. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Santo Ângelo - RS, 2007. 46 p. Apostila.

VAN VLACK, Laurence. H. **Princípios de Ciências e Tecnologias dos Materiais**. 4º ed. Rio de Janeiro: Campus, 1984; p.495 e 567.