



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORANÓPOLIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

VINÍCIUS FERNANDES BOLZAN

A INFLUÊNCIA DAS VELOCIDADES DE CORTE E DE AVANÇO SOBRE O
COMPORTAMENTO DA RUGOSIDADE E O DESGASTE DOS REBOLOS NA
RETIFICAÇÃO *CREEP FEED* COM REBOLOS DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO E COM
LUBRIRREFRIGERAÇÃO POR TUBEIRA DO TIPO SAPATA

FLORIANÓPOLIS

2021

Vinícius Fernandes Bolzan

A INFLUÊNCIA DAS VELOCIDADES DE CORTE E DE AVANÇO SOBRE O
COMPORTAMENTO DA RUGOSIDADE E O DESGASTE DOS REBOLOS NA
RETIFICAÇÃO *CREEP FEED* COM REBOLOS DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO E COM
LUBRIRREFRIGERAÇÃO POR TUBEIRA DO TIPO SAPATA

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica
Orientador: Prof. Dr. -Ing. Walter Lindolfo
Weingaertner

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Bolzan, Vinícius Fernandes

A INFLUÊNCIA DAS VELOCIDADES DE CORTE E DE AVANÇO SOBRE O COMPORTAMENTO DA RUGOSIDADE E O DESGASTE DOS REBOLOS NA RETIFICAÇÃO CREEP FEED COM REBOLOS DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO E COM LUBRIRREFRIGERAÇÃO POR TUBEIRA DO TIPO SAPATA / Vinícius Fernandes Bolzan ; orientador, Walter Lindolfo Weingaertner, 2021.

104 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Retificação creep feed. 3. Rebolos de óxido de alumínio e Lubrificação com tubeira do tipo sapata. 4. Velocidades de corte e de avanço. 5. Rugosidade e Desgaste dos rebolos. I. Weingaertner, Walter Lindolfo . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Vinícius Fernandes Bolzan

A INFLUÊNCIA DAS VELOCIDADES DE CORTE E DE AVANÇO SOBRE O
COMPORTAMENTO DA RUGOSIDADE E O DESGASTE DOS REBOLOS NA
RETIFICAÇÃO *CREEP FEED* COM REBOLOS DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO E COM
LUBRIRREFRIGERAÇÃO POR TUBEIRA DO TIPO SAPATA

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca
examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. – Ing. Walter Lindolfo Weingaertner
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Eng. Fábio Antônio Xavier
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Sc. ETH Zurich Eduardo Weingärtner
Gerente de Customer Success e Data Science na PackIOT

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi
julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof. Dr.-Ing Walter Lindolfo Weingaertner
Orientador

Florianópolis, 02 de julho de 2021.

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais José Sérgio Bolzan e Neiva Maria Fernandes Bolzan, as minhas madrinhas Eneida Fernandes e Loiva Fernandes e ao meu padrinho Cesar Kieling.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner, pela orientação, incentivo, paciência, contribuição neste trabalho e ensinamentos que servem para vida pessoal e profissional.

Ao Mestre Eng. Mec. André Gross pela oportunidade em realizar os ensaios e pela colaboração efetuada durante a realização dos ensaios e apoio em sanar as dúvidas que surgiram ao longo do trabalho.

Ao Dr. Eng. Fernando Bordin pelo auxílio desde a realização do PDM e até o fim deste trabalho.

Ao Professor Dr. Eng. Rolf Bertrand Schroeter pela carta de indicação na volta ao mestrado e pelos conselhos durante a realização das disciplinas.

Ao Me. Eng. Mat. William Lemos Bevilaqua pelo apoio e incentivo para realização do mestrado.

Aos Professores do POSMEC da UFSC, pelo conhecimento proporcionado durante a realização das disciplinas e no decorrer deste trabalho.

Aos membros da banca Dr. Sc. ETH Zurich Eduardo Weingärtner e ao Prof. Dr. Eng. Fábio Antônio Xavier, por aceitarem participar da defesa, pelas discussões e sugestões que enriqueceram o trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (POSMEC), por permitirem a realização do mestrado, de forma gratuita e com excelente qualidade no ensino.

A Empresa do ramo de compressor herméticos que disponibilizou infraestrutura para a realização dos ensaios e das análises necessárias.

Ao Instituto Federal Catarinenses (IFC) pela concessão do afastamento em 50% durante a realização deste trabalho, em especial a chefia imediata Joana Fontanela e ao diretor Patric Griseli pela compressão na mudança constante dos horários de trabalho.

Aos amigos, amigas e demais colegas que de alguma forma contribuíram para este trabalho.

Aos meus Pais José Sérgio Bolzan e Neiva Maria Fernandes Bolzan, as minhas madrinhas Eneida Fernandes e Loiva Fernandes e ao meu padrinho Cesar Kieling. Que sempre me deram apoio e suporte para às minhas realizações pessoais e profissionais.

RESUMO

A retificação profunda, também denominada *creep feed grinding*, é utilizada quando se fazem necessário grandes profundidades de corte e/ou altas taxas de retificação de material com elevada qualidade da superfície produzida, normalmente, em uma única passagem da ferramenta sobre o componente. Neste estudo é apresentada a retificação profunda de acabamento das lamelas de inserção, fabricadas em aço ferramenta (sinterizado, temperado e revenido), que passam por quatro etapas de retificação, duas de desbaste, empregando um rebolo de granulometria 90 *mesh* e outras duas etapas de acabamento, onde é utilizado o rebolo de granulometria 120 *mesh*. Os rebolos utilizados têm em sua estrutura grãos compostos por óxido de alumínio eletro-fundido. Nas operações de desbaste, a geometria inicial e as distorções decorrentes do tratamento térmico são uniformizadas, de forma que nas operações de acabamento, uma quantidade mínima de material é retificada para garantir a forma e rugosidade final desejada. Tanto nas operações de desbaste, como também nas operações de acabamento o calor da retificação não deve afetar as características metalúrgicas dos componentes. Gross, em seu trabalho de mestrado, aplicou a lubrificação por sapata para aumentar a taxa de retificação no desbaste, quando logrou o sucesso de uma ampliação desta em 5 vezes não verificando nenhum dano térmico nos componentes. Neste trabalho foi avaliado se é possível obter as qualidades macro e microgeométricas necessárias para cumprir a funcionalidade das lamelas de inserção através do aumento da velocidade de corte empregando um rebolo com granulometria de 90 *mesh*. Esta avaliação é feita em operações de fabricação industrial na ferramentaria de um parceiro que hoje precisa trocar o rebolo para fazer a operação de acabamento de um lote de lamelas de inserção. Para garantir que os componentes retificados nas operações de acabamento com rebolo de 90 *mesh* pudessem ser aprovadas para a aplicação a que se destinam, foi escolhida a primeira etapa de acabamento; caso o resultado fosse negativo, os componentes ainda poderiam ser corrigidos empregando o rebolo de 120 *mesh* na segunda etapa de acabamento. Foram realizados ensaios para verificar a influência da velocidade de corte e da velocidade de avanço sobre a qualidade macro e microgeométrica da superfície retificada e sobre o desgaste de rebolo. As velocidades de corte empregadas foram de 23, 25 e 30 m/s e as velocidades de avanço aplicadas foram de 160 e 250 mm/min. Foi utilizado um sistema de lubrificação com tubeira do tipo sapata. As medições de rugosidade e do perfil geométrico das lamelas de inserção foram realizadas ao longo do comprimento retificado numa posição afastada 1,5 mm das extremidades das lamelas. O desgaste do rebolo foi obtido como função da variação dos raios no topo das lamelas de inserção nas referidas posições. Os resultados mostram que o aumento da velocidade de corte causa uma diminuição no desgaste do rebolo de 90 *mesh* como consequência da diminuição do número de gumes ativos que participam na retificação do material. Foi verificado o aumento da rugosidade ao longo do percurso retificado, tanto no emprego do rebolo de 90 *mesh*, como também com o rebolo de 120 *mesh*, característica típica do domínio do macrodesgaste. É possível concluir a partir dos resultados experimentais que o rebolo de 90 *mesh* pode substituir o rebolo de 120 *mesh* nas operações de acabamento das lamelas, visto que as qualidades obtidas atendem as exigências dos componentes para a aplicação de inserção dos fios de cobre ou alumínio nos extratores de motores elétricos.

Palavras-chave: Retificação *creep feed*. Rebolos de óxido de alumínio. Lubrificação por tubeira do tipo sapata. Rugosidade. Desgaste dos rebolos. Velocidade de corte. Velocidade de avanço.

ABSTRACT

Deep grinding, also called creep feed grinding, is used when large passive penetrations and/or high material grinding rates with high quality of the produced surface are required, usually in a single tool through the component. In this study presents the finishing deep grinding of the insertion lamellas, made of tool steel (sintered, tempered and tempering), which go through four grinding stages, two for roughing, using a grinding wheel of 90 mesh granulometry and two other finishing steps, where the 120 mesh grinding wheel is used. The grinding wheels used have in their structure grains composed of electrocast aluminum oxide. In roughing operations, the initial geometry and distortions resulting from heat treatment are standardized, so that in finishing operations, a minimum amount of material is grinding to ensure the desired shape and final roughness. In both roughing and finishing operations, the heat from grinding must not affect the metallurgical characteristics of the components. Gross, in his thesis work, applied shoe nozzle lubri-refrigeration to increase the grinding rate in the roughing, when he succeeded in an extension of this by 5 times verifying no thermal damage to the components. In this work, it was evaluated whether it is possible to obtain the macro and microgeometric qualities necessary to fulfill the functionality of the insertion lamellas by increasing the cutting speed using a grinding wheel with a 90 mesh granulometry. This assessment is made in industrial manufacturing operations in the tooling of a partner who today needs to change the wheel to perform the finishing operation of a batch of insertion lamellas. In order to ensure that the grinding components in the finishing operations with a 90 mesh grinding wheel could be approved for the application for which they were intended, the first finishing step was chosen and thus, if the result was negative, the components could still be corrected using a grinding wheel of 120 mesh in the second finishing step. Tests were carried out to verify the influence of the cutting speed and the feed rate on the macro and microgeometric quality of the ground surface and on the grinding wheel wear. The cutting speeds employed were 23, 25 and 30 m/s and the feed rates applied were 160 and 250 mm/min. A shoe nozzle lubri-refrigeration system was used. Measurements of roughness and geometric profile of the insertion lamellas were carried out along the grinding length at a position 1.5 mm away from the lamella ends. The grinding wheel wear was obtained as a function of the variation of the radius at the top of the insertion lamellas in the referred positions. The results show that the increase in the cutting speed causes a decrease in the grinding wheel wear of the grinding wheel of 90 mesh as a consequence of the decrease in the number of cutting edge that participate in the grinding of the material. An increase in roughness was observed along the grinding path in both grinding wheels showing, a typical characteristic of the macro-wear dominant. It is possible to conclude from the experimental results that the 90 mesh grinding wheel can replace the 120 mesh grinding wheel in the lamellas finishing operations, since the qualities obtained meet the requirements of the components for the application of insertion of copper or aluminum wires in the extractors electric motor.

Keywords: Creep feed grinding. Aluminum oxide wheels. Shoe nozzle lubri-refrigeration. Roughness. Grinding wheel wear. Cutting speed. Feed rate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Número de artigos publicados em inglês com o tema de retificação <i>creep feed</i> desde 1990 até 2020.....	19
Figura 2.2 - Classificação dos processos de fabricação conforme norma alemã DIN.....	20
Figura 2.3 - A relação entre parâmetros de entrada, as características do processo e o resultado de trabalho no processo de retificação.....	21
Figura 2.4 - Classificação das variantes do processo de retificação plana segundo a norma DIN.....	22
Figura 2.5 – Retificação periférica de mergulho e retificação periférica transversal.....	23
Figura 2.6 – Representação esquemática da retificação <i>creep feed</i>	24
Figura 2.7 - Componente obtido na retificação <i>creep feed</i> com “queima de retificação”.....	25
Figura 2.8 - Representação esquemática das regiões de deformação elástica e plástica na formação de cavaco.....	26
Figura 2.9 - Relação entre espessura de usinagem com as variáveis de entrada.....	27
Figura 2.10 - Diâmetro equivalente do rebolo e condições de contato nas variantes do processo de retificação.....	29
Figura 2.11 – Ferramentas rotativas com grão abrasivos de geometria não definida.....	30
Figura 2.12 – Rebolos convencional (a) e superabrasivos (b).....	33
Figura 2.13 – Influência da taxa de retificação específica de material sobre a taxa de desgaste radial.....	35
Figura 2.14 – Cinemática do processo de dressamento com ferramentas estáticas.....	37
Figura 2.15 – Dressador de ponta única lapidada.....	38
Figura 2.16 – A influência da profundidade de corte nos parâmetros do processo e no resultado do trabalho.....	39
Figura 2.17 – Influência da velocidade de corte nas características do processo e no resultado do trabalho.....	40
Figura 2.18 – Influência da profundidade de corte e da velocidade de avanço sobre as características do processo e o resultado de trabalho.....	42

Figura 2.19 – Qualidade da superfície retificada em função da profundidade de corte e velocidade de avanço na retificação com o emprego dos rebolos A100 PB e A100M7V.....	43
Figura 2.20 – Desvio médio aritmético da rugosidade.....	44
Figura 2.21 – Concepções de alimentação e indicativo da vazão do fluido empregada na retificação.....	50
Figura 2.22 – Formação do colchão de ar que impede a entrada de fluido lubrificador na zona de contato.....	51
Figura 2.23 – Sistema com placa defletora.....	52
Figura 2.24 – Emprego da sapata na alimentação de fluido lubrificador.....	53
Figura 2.25 – Perguntas frequentes relacionadas a geometria da sapata.....	54
Figura 2.26 – Redução da quantidade de faíscas empregando diferentes sistemas de alimentação de fluido.....	55
Figura 2.27 – Tipos de tubeiras do tipo sapata com diferentes formatos de canais.....	57
Figura 2.28 – Protótipo da tubeira do tipo sapata para retificar lamelas de inserção.....	60
Figura 2.29 – Tubeira do tipo sapata e interface de montagem.....	61
Figura 3.1 – Máquina-ferramenta.....	63
Figura 3.2 – Sequência de realização dos ensaios.....	67
Figura 3.3 – Corpo de prova – Vista lateral (a) e superior (b) da chapa de lamelas.....	69
Figura 3.4 – Dispositivo de fixação com chapas de lamelas.....	70
Figura 3.5 – Sistema funcional da tubeira com o rebole e a chapa de lamelas	71
Figura 3.6 – Tubeira do tipo sapata instalada na máquina-ferramenta.....	72
Figura 3.7 – Sequência de passes e remoção de material em cada passe para obtenção das lamelas.....	74
Figura 3.8 – Medição do raio do topo da lamela.....	77
Figura 3.9 – Medição de rugosidade na lamela.....	79
Figura 4.1 – Desgaste do rebole de 90 <i>mesh</i> em função da variação da velocidade de corte.....	81
Figura 4.2 – Desgaste do rebole de 120 <i>mesh</i> em função da velocidade de corte.....	82
Figura 4.3 – Influência da velocidade de avanço no desgaste dos rebolos de 90 e 120 <i>mesh</i>	83

Figura 4.4 – Influência da velocidade de corte da rugosidade na entrada e saída do componente com a utilização do rebolo 90 <i>mesh</i>	85
Figura 4.5 – Influência da velocidade de corte na rugosidade do componente, com a utilização do rebolo 120 <i>mesh</i>	86
Figura 4.6 – Rugosidade obtida na entrada e saída do componente retificado na retificação com rebolos de 90 e 120 <i>mesh</i>	90
Figura 4.7 –Influência da velocidade de avanço na rugosidade de entrada e saída do componente retificado.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Informações técnicas na retificadora Jung modelo C740D.....	66
Tabela 2 – Especificações técnicas dos rebolos.....	67
Tabela 3 - Parâmetros utilizados nos respectivos ensaios.....	68
Tabela 4 – Parâmetros de dressamento aplicados.....	70
Tabela 5 – Composição química do material.....	70
Tabela 6 – Propriedades físicas e mecânicas do material.....	70
Tabela 7 – Principais características físico-químicas do fluido lubrificador.....	72
Tabela 8 – Área retificada para cada passe.....	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Letras Maiúsculas

A_g	Área do retângulo (definição de R_a)	[mm ²]
A_{pi}	Área dos picos	[mm ²]
A_{sk}	Superfície de desgaste de quina do rebolo	[mm ²]
A_{vi}	Área dos vales	[mm ²]
C_{stat}	Distribuição estática dos gumes	[mm ⁻³]
F_c	Força de corte	[N]
F_{ns}	Força normal no gume	[N]
F_{ts}	Força tangencial no gume	[N]
G	Relação de desgaste G	[mm ³ /mm ³]
G_{med}	Taxa média de desgaste G	[mm ³ /mm ³]
P_c	Potência de usinagem	[kW]
P_{cl}	Pressão de fornecimento de fluido lubrificador	[bar]
Q_{cl}	Taxa de vazão de fluido lubrificador	[l/min]
Q_n	Vazão de fluido injetado	[kg/m ³]
Q_w	Taxa de retificação	[mm ³ /s]
Q'_w	Taxa de retificação específica	[mm ³ /(mm.s)]
$Q'_{w\ max}$	Taxa de retificação específica máxima	[mm ³ /(mm.s)]
$Q'_{w\ med}$	Taxa de retificação específica média	[mm ³ /(mm.s)]
$Q'_{w\ min}$	Taxa de retificação específica mínima	[mm ³ /(mm.s)]
R_a	Desvio médio aritmético da rugosidade	[μm]
$R_{a_{entrada\ L}}$	Medição de rugosidade na entrada da lamela	[μm]
$R_{a_{saída\ L}}$	Medição de rugosidade na saída da lamela	[μm]
R_{max}	Profundidade máxima individual de rugosidade	[μm]
R_q	Profundidade média da rugosidade	[μm]
R_y	Altura máxima do perfil	[μm]
R_z	Profundidade média da rugosidade	[μm]
T_μ	Profundidade de início corte	[μm]
V_s	Volume de material desgastado do rebolo	[mm ³]
V_w	Volume de material removido	[mm ³]

Z₀

Zona termicamente afetada

-

Letras Minúsculas

a_e	Profundidade de corte	[mm]
a_{ed}	Profundidade de corte na dressagem	[mm]
a_p	Largura de corte	[mm]
a_{ret}	Área retificada	[mm ²]
b_d	Largura de usinagem	[mm]
b_s	Largura do rebolo	[mm]
$b_{s\ eff}$	Largura efetiva de corte do rebolo	[mm]
d_s	Diâmetro do rebolo	[mm]
d_{se}	Diâmetro equivalente do rebolo	[mm]
d_w	Diâmetro da peça	[mm]
f_a	Avanço na direção axial	[mm]
f_k	Erro de forma (erro de medida)	[μ m]
h	Espessura de usinagem	[mm]
h_{cu}	Espessura do cavaco não deformado	[μ m]
$h_{cu\ eff}$	Espessura de usinagem efetiva	[μ m]
$h_{cu,max}$	Espessura máxima do cavaco não deformado	[μ m]
k	Fator de proporcionalidade	-
l_{cu}	Comprimento de cavaco	[μ m]
l_g	Comprimento de contato geométrico	[mm]
l_m	Percurso de medição	[mm]
n_r	Número de revoluções do rebolo de dressagem	[s ⁻¹]
n_s	Número de revoluções do rebolo	[s ⁻¹]
n_w	Número de revoluções da peça	[s ⁻¹]
t_c	Tempo de corte	[s]

v_e	Velocidade de ação	[m/s]
v_c	Velocidade de corte	[m/s]
v_f	Taxa de avanço	[mm/s]
v_{fa}	Taxa de avanço axial	[mm/s]
v_{fad}	Velocidade de avanço de dressamento por revolução do rebolo	[mm/min]
v_{fr}	Taxa de avanço radial	[mm/s]
v_s	Velocidade periférica do rebolo	[m/s]
v_w	Velocidade de avanço	[m/min]
v_w	Velocidade de avanço (<i>creep feed</i>)	[mm/min]

Letras Gregas

α_r	Controle do ângulo de inclinação do rebolo	[°]
α, β, γ	Expoentes da expressão para a equação da espessura de usinagem, h_{cu}	-
Δr	Desgaste do raio	[mm]
$\Delta r L$	Varição do desgaste da lamela	[mm]
$\Delta \dot{r}_s$	Taxa de desgaste radial	[μm]
η	Ângulo de ação do gume	[°]
π	Constante	-

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS QUÍMICOS

Al_2O_3	Óxido de alumínio
ASTM D	<i>Standard test Method for density</i>
CAD	<i>Computer Aided design</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
cBN	Nitreto de boro cúbico
CN	Comando numérico
CNC	Comando numérico computadorizado
Cr_2O_3	Óxido de cromo
DDD 6	Superliga metálica à base de níquel
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung e. V.</i>
HRC	Dureza <i>Rockwell</i> na Escala B
LMP	Laboratório de Mecânica de Precisão
MR	<i>Methyl Red Test</i>
SAE	Sociedade de Engenheiros Automotivos
SC	Santa Catarina
TiO_3	Óxido de titânio.
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
VSPCF	Tipo de ligante empregado.
WEDM	<i>Wire Electric Discharge Machining</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS.....	17
1.1.1	Objetivo Geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	O PROCESSO DE RETIFICAÇÃO.....	20
2.1.1	Retificação plana.....	23
2.1.2	Retificação <i>creep feed</i>.....	24
2.2	MECANISMO DE PENETRAÇÃO DO GUME E FORMAÇÃO DE CAVACO.....	26
2.3	EMBASAMENTO CINEMÁTICO	28
2.4	FERRAMENTAS PARA RETIFICAÇÃO	30
2.4.1	Grãos abrasivos.....	31
2.4.2	Grãos abrasivos de óxido de alumínio.....	32
2.4.3	Ligantes	32
2.4.4	Composição volumétrica	33
2.4.5	Rebolos convencionais e superabrasivos.....	33
2.4.6	Características necessárias as ferramentas empregadas na retificação <i>creep feed</i>	34
2.5	DESGASTE DO REBOLO.....	35
2.6	CONDICIONAMENTO DO REBOLO	37
2.6.1	Ferramentas de dressamento.....	37
2.7	INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA NAS CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO E NO RESULTADO DO TRABALHO.....	39
2.7.1	A influência da profundidade de corte.....	39
2.7.2	Influência da velocidade de corte	40

2.7.3	Influência da profundidade de corte e velocidade de avanço na retificação plana.....	42
2.8	QUALIDADE DA SUPERFÍCIE USINADA	44
2.8.1	Influência das Velocidades de corte e de avanço na qualidade da superfície retificada no processo de retificação <i>creep feed</i>	46
2.9	SISTEMAS DE LUBRIRREFRIGERAÇÃO	49
2.10	EEMPREGO DO SISTEMA DE LUBRIRREFRIGERAÇÃO COM TUBEIRAS DO TIPO SAPATA NA REIFICAÇÃO. do tipo sapata na	56
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	65
3.1	MÁQUINA-FERRAMENTA	65
3.2	FERRAMENTA DE CORTE	66
3.3	FERRAMENTA DE DRESSAMENTO.....	67
3.4	DESENVOLVIMENTO DOS ENSAIOS	67
3.4.1	Determinação das variáveis de entrada alteradas nos ensaios de retificação.	67
3.4.2	Parâmetros de dressamento	68
3.4.3	Material dos corpos de prova	69
3.4.4	Geometria dos corpos de prova	69
3.4.5	Fluido lubrificador.....	70
3.4.6	Sistema de fixação dos corpos de prova na máquina-ferramenta.....	71
3.4.7	Tubeira do tipo sapata empregada nos ensaios	72
3.4.8	Determinação da fenda de trabalho	73
3.4.9	Área retificada	74
3.4.10	Taxa de retificação.....	75
3.4.11	Taxa média de desgaste	75
3.4.12	Taxa de retificação específica	76
3.4.13	Cálculo do desgaste do rebolo	77
3.4.14	Medições de rugosidade.....	78

4	RESULTADOS	80
4.1	INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE NO DESGASTE DOS REBOLOS	81
4.2	INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE AVANÇO NO DESGASTE DOS REBOLOS	83
4.3	INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE NA RUGOSIDADE.....	85
4.4	INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE AVANÇO NA RUGOSIDADE.....	89
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	92
5.1	CONCLUSÕES.....	92
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	94
	REFERÊNCIAS.....	96

1 INTRODUÇÃO

A indústria necessita de maior produtividade para atender a demanda do mercado ao mesmo tempo que precisa garantir a competitividade com um menor custo de produção. Os processos de fabricação que empregam ferramentas de corte de geometria não definida vêm substituindo os processos de fabricação com ferramentas de geometria definida em muitas áreas. Isto é possível com a introdução de novas matérias primas, ferramentas e máquinas-ferramentas. Os processos de fabricação que utilizam ferramentas de corte com geometria não definida, como por exemplo a retificação, entregam componentes com uma elevada qualidade da superfície trabalhada e uma elevada precisão dimensional. Inicialmente a retificação era usada apenas na fase de acabamento. Com advento de novas tecnologias nas últimas décadas, é possível alcançar altas taxas de retificação, possibilitando a utilização do processo em etapas de desbaste e acabamento (KLOCKE, 2009).

O processo de retificação plana é classificado em variantes, sendo umas delas a retificação profunda (*creep feed*) que apresenta como característica principal elevadas profundidades de corte e baixas velocidades de avanço, o processo muitas vezes é realizado em um único passe da ferramenta. Além disto, a retificação profunda permite elevadas taxas de retificação, tornando o processo competitivo frente a outros processos de usinagem com ferramentas de corte de geometria definida. Outra característica da retificação profunda é a elevada qualidade da superfície retificada (KLOCKE, 2009).

Entretanto, na retificação profunda deve ser dada especial atenção à remoção dos cavacos e à temperatura na zona de corte. Em decorrência do comprimento de corte elevado ao longo do percurso de corte de cada gume, o volume dos cavacos é grande e os poros para acumular estes cavacos devem ser adequadamente dimensionados. O trabalho de corte é aumentado que, devido à pequena espessura de cavaco, aumenta a temperatura na região de trabalho e eleva a possibilidade de causar danos metalúrgicos ao componente retificado, além de empastar o rebolo e dificultar a remoção dos cavacos. A diminuição da temperatura na região de corte é atingida por uma lubrificação eficiente (KLOCKE, 2009).

A motivação para este estudo surgiu da necessidade de complementar a pesquisa realizada por Gross (2019), que investigou a influência da velocidade de avanço sobre o desgaste do rebolo e da qualidade da superfície retificada, empregando sistemas de lubrificação com as tuberias de jato livre e do tipo sapata. O processo de retificação utilizado foi a retificação profunda (*creep feed*). O componente retificado é denominado

lamela de inserção, a retificação do componente era realizada em quatro etapas, dois passes de retificação de desbaste e dois passes de retificação de acabamento. Os rebolos utilizados nas etapas de desbaste e acabamento eram constituídos por grãos de óxido de alumínio fundido e apresentavam uma granulometria média de 90 (desbaste) e 120 (acabamento) *mesh*, respectivamente. O produto da largura do rebolo e da profundidade de corte gera os valores da área retificada, a primeira etapa de desbaste apresenta o maior valor de área retificada em comparação com as outras áreas a serem retificadas. O trabalho de Gross (2019), realizou as respectivas medições e análises após o primeiro passe de retificação de desbaste e empregou apenas o rebolo com tamanho médio dos grãos de 90 *mesh*.

De acordo com Gross (2019), o sistema de lubrificação que emprega a tubeira de jato livre permite utilizar uma velocidade de avanço máxima de 70 mm/min, em velocidades acima desta o componente retificado apresentava danos térmicos visíveis, este dano geralmente é denominado de “queima de retificação”. Aplicando o sistema de lubrificação por tubeira do tipo sapata foi possível empregar velocidades de avanço de até 325 mm/min sem danificar termicamente o componente retificado, isto foi comprovado por análises metalográficas.

Conforme Gross (2019), o comportamento do desgaste do rebolo não demonstrou uma tendência de aumento ou diminuição com o aumento da velocidade de avanço. A variação do desgaste pode estar relacionada com a pequena variação de dureza das chapas de lamelas retificadas. O comportamento da rugosidade obtido é típico para mecanismo de microdesgaste. Para trabalhos futuros, sugeriu o aumento da velocidade de corte com o intuito de aumentar número de gumes cinemáticos, conseqüentemente, a diminuição da rugosidade. Propôs a aplicação do rebolo de tamanho médio dos grãos de 90 *mesh* também nas operações de acabamento. Caso a rugosidade obtida com o rebolo de 90 *mesh* com o aumento da velocidade de retificação seja de mesmo valor ou inferior a rugosidade obtida com o rebolo com granulometria de 120 *mesh*, será possível empregar apenas o rebolo de 90 *mesh* em ambas as operações.

Nesta pesquisa o foco do trabalho é empregar apenas o rebolo de 90 *mesh* para as operações de desbaste e acabamento das lamelas de inserção. Antes da realização deste trabalho o processo de retificação das lamelas de inserção empregava dois rebolos de diferentes granulometrias e quatro passes de retificação. A quantidade de lamelas montadas na máquina-ferramenta e retificadas em ambos os passes de desbaste era de 20 unidades. A troca dos rebolos a cada 20 lamelas retificadas elevaria ainda mais o custo de fabricação do

componente. Justamente para evitar que a troca dos rebolos ocorresse com muita frequência, eram retificados todo o lote de lamelas apenas nas duas operações de desbaste com rebolo de 90 *mesh*, pois normalmente um lote de lamelas contém mais de 20 unidades.

Quando retificado todo o lote de lamelas nas operações de desbaste é realizada a troca do rebolo e inicia-se os passes de acabamento. Um dos motivos da área retificada no primeiro passe de acabamento ser quase cinco vezes maior em relação ao último passe de acabamento é porque as peças são retiradas da máquina-ferramenta. Quando as peças são reposicionadas na máquina-ferramenta, existe a possibilidade de um pequeno desalinhamento. Caso ocorra o desalinhamento das peças é possível corrigir no primeiro passe de acabamento e garantir as características macro geométricas do componente.

Devido ao alto custo de fabricação dos componentes a serem retificados, foi escolhido o primeiro passe de acabamento para a realização dos ensaios, pois caso os componentes fossem danificados ou não atingissem as especificações necessárias, seria possível corrigir eventuais danos no último passe de acabamento. Quando empregado apenas o rebolo de 90 *mesh* para as operações de desbaste e acabamento é possível considerar uma redução de 25 % no tempo de fabricação da peça, considerado o ganho de tempo em relação a reposicionamento dos componentes e a troca dos rebolos.

1.1 OBJETIVOS

O principal intuito deste trabalho é avaliar o emprego do rebolo de 90 *mesh* nas operações de retificação de acabamento das lamelas de inserção na retificação profunda (*creep feed*) com lubrificação por sapata. Serão avaliadas a influência da velocidade de corte, a influência da velocidade de avanço e as condições de dressamento do rebolo sobre o comportamento da rugosidade e desgaste dos rebolos.

O processo de retificação empregado na fabricação das lamelas de inserção, objeto de estudo deste trabalho, é dividido em quatro etapas, sendo duas etapas de retificação de desbaste e duas etapas de retificação de acabamento. Os rebolos utilizados têm em sua estrutura grãos compostos por óxido de alumínio eletro-fundido. O rebolo adotado nas operações de desbaste tem uma granulometria média de 90 *mesh* e o rebolo usado nas operações de acabamento apresenta uma granulometria média de 120 *mesh*.

A variação da geometria da lamela de inserção ao longo do comprimento retificado, será analisada em função do desgaste dos rebolos e do comportamento da rugosidade

(Rugosidade média (Ra)) estes serão os principais resultados analisados no estudo e determinarão se é possível substituir o rebolo de 120 *mesh* pelo rebolo de 90 *mesh* nas operações de acabamento. Os ensaios serão realizados em aplicação industrial tendo como corpos de prova as lamelas de inserção industrialmente aplicadas, as análises das medições de comportamento da rugosidade e do desgaste do rebolo ocorreram após o primeiro passe de acabamento, esta etapa foi escolhida com o objetivo de poder corrigir eventuais desvios de qualidade na operação de acabamento fino em uma operação (segundo passe de acabamento) com rebolo de 120 *mesh*, caso se faça necessário (visto que o custo e valor agregado em cada lamela já é elevado).

A alimentação de fluido lubrificador utilizada será do tipo tubeira por sapata, cujo sistema foi integrado à máquina-ferramenta nos ensaios realizados por Gross (2019). A utilização desta concepção de lubrificação possibilita o aumento das velocidades de corte e de avanço nos ensaios sem danificar o componente retificado (seja termicamente ou visualmente), esta afirmação é reforçada por (GROSS, 2019; SOUZA, 2012; WEINGÄRTNER, E., 2005).

Os corpos de prova empregados nos ensaios de retificação profunda são lamelas de inserção fabricados em aço ferramenta temperado e revenido obtido pelo processo de metalurgia do pó. No ciclo de fabricação de uma lamela individual parte-se de uma chapa de lamelas recozida, nas quais são fresados a pré-forma de quatro lamelas de inserção. As chapas de lamela com pré-forma são tratadas termicamente e as operações finais ocorrem por retificação. Inicialmente uma chapa de lamelas é composta por quatro lamelas unidas e tem a base retificada, servindo esta de superfície de referência no dispositivo de fixação para a retificação das demais operações de retificação no lado oposto. O trabalho foi realizado em parceria com uma empresa fabricante de compressores herméticos, localizada em Joinville - Santa Catarina (SC).

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar se o aumento da velocidade de corte na retificação profunda de lamelas de inserção, empregando lubrificação por sapata, permite substituir o rebolo de 120 *mesh* empregado nas operações de retificação de acabamento por um rebolo de 90 *mesh* empregado atualmente apenas nas operações de desbaste.

1.1.2 Objetivos Específicos

O objetivo geral será avaliado em etapas, sendo necessário conhecer a influência das variáveis de entrada sobre os resultados de trabalho com o emprego de um rebolo de granulometria 90 *mesh* na retificação profunda de lamelas de inserção. Para tanto foi necessário:

- Avaliar a influência da velocidade de corte sobre o comportamento da rugosidade do componente retificado;
- Avaliar a influência das condições de dressamento sobre a rugosidade da superfície retificada;
- Avaliar a influência da velocidade de corte no comportamento de desgaste dos rebolos;
- Avaliar a influência da velocidade de avanço no comportamento da rugosidade do componente retificado; e
- Avaliar a influência da velocidade de avanço no comportamento de desgaste dos rebolos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

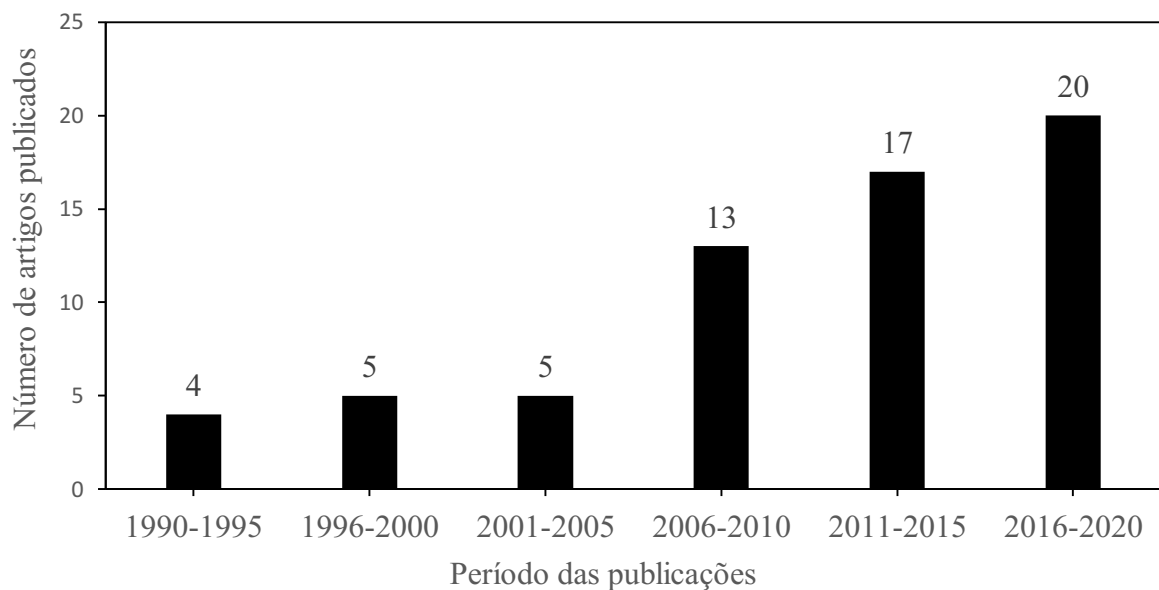
Neste capítulo será apresentada a revisão de literatura, abordando o processo de retificação, sendo este refinado para as características do processo de retificação profunda (*creep feed*), ferramentas para retificação *creep feed*, sistemas de lubrificação, retificação com sistemas de lubrificação por tubeira do tipo sapata.

A qualidade da superfície retificada demonstra uma tendência de melhora com o aumento da velocidade de corte. Uma possível explicação para este fenômeno baseia-se no menor número de gumes ativos e na redução na espessura de cavaco (KÖNIG, 1980; MARINESCU *et al.*, 2016). Na literatura correspondente ao processo *creep feed*, alguns trabalhos demonstram que o aumento da velocidade de corte favorece a diminuição nos valores de rugosidade para uma certa faixa de velocidades de corte (LI *et al.*, 2017; GU *et al.*, 2018; LI *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2020; ZHU *et al.*, 2020).

Com o intuito de mostrar a importância do tema estudado, será exposto o número de artigos relacionados com o estudo da retificação profunda (*creep feed grinding*). A pesquisa

dos artigos aconteceu por meio da base de dados da *Springer Link* e *Science Direct*. Foi realizado um levantamento bibliográfico das publicações em inglês nos últimos 30 anos. Os resultados são apresentados na Figura 2.1. Para efetuar a busca dos artigos foram utilizados os termos retificação profunda “*creep feed grinding*” e rugosidade na retificação profunda “*roughness in creep feed grinding*”.

Figura 2.1 – Número de artigos publicados em inglês com o tema de retificação *creep feed* desde 1990 até 2020.

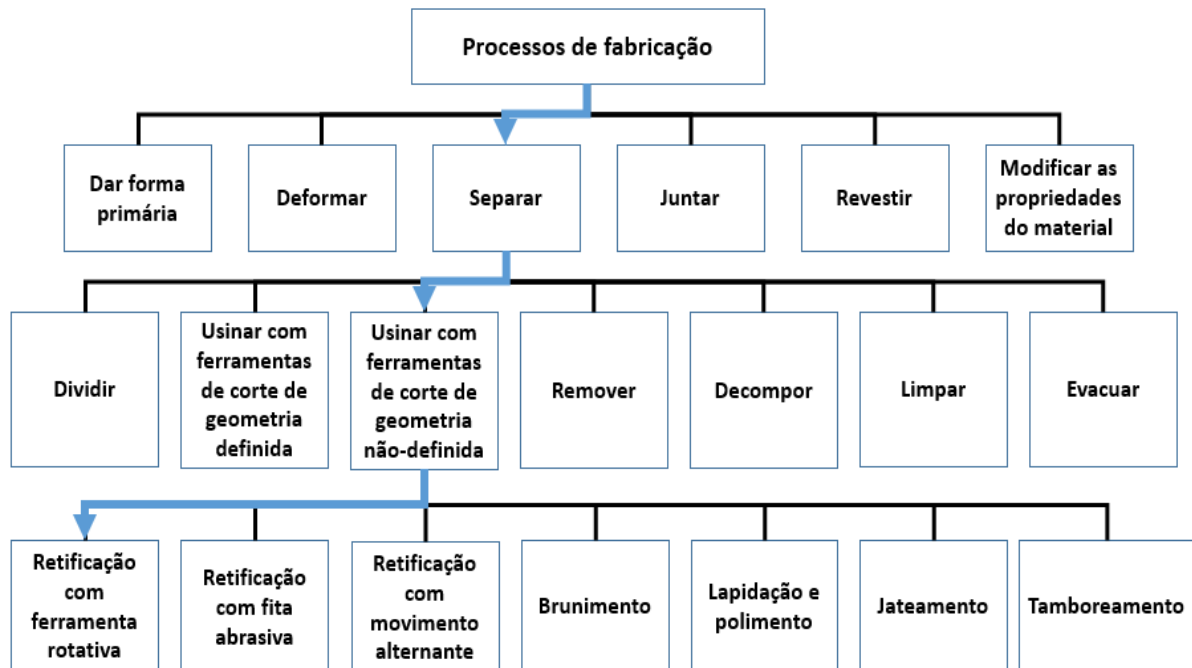


Fonte: Autor.

2.1 O PROCESSO DE RETIFICAÇÃO.

Os processos de fabricação, segundo a norma alemã DIN 8985, são divididos em grupo principal, grupos e subgrupos, conforme ilustra a Figura 2.2. No grupo principal desta divisão estão os processos de “usinagem com ferramentas de corte de geometria não-definida (DIN 8985)”, onde estão classificadas as variantes do processo de retificação (KLEIN, 2008).

Figura 2.2- Classificação dos processos de fabricação conforme norma alemã DIN 8985.

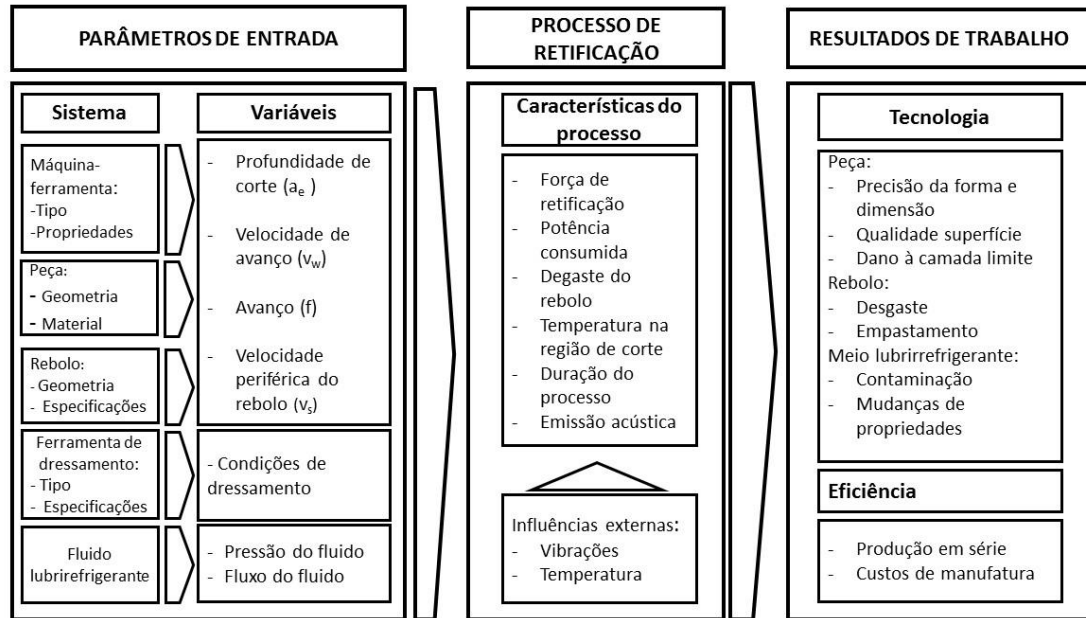


Fonte: Adaptado de Klein (2008) e Macedo (2008).

Os processos de retificação que utilizam ferramentas com gumes de geometria não-definida, normalmente apresentam os grãos abrasivos estão dispostos de uma maneira não ordenada sobre a superfície da ferramenta. O processo de retificação permite fabricar componentes precisos, com alta qualidade das superfícies usinadas e tolerâncias dimensionais estreitas. Nas últimas décadas, estes processos evoluíram tanto que em algumas situações substituem processos de usinagem com ferramentas de geometria definida, propiciando altas taxas de retificação de material comparáveis às obtidas no fresamento. Isto foi possível principalmente pelo desenvolvimento de novos tipos de grãos de abrasivos, rebolos e máquinas-ferramentas (KLOCKE, 2009).

A necessidade crescente pelo aumento da produtividade fez com que a utilização de máquinas-ferramentas com comando numérico crescesse. O domínio e o controle dos parâmetros das variáveis de entrada tornaram-se de extrema importância para permitir a otimização do processo. Os parâmetros do processo de retificação são divididos em parâmetros de entrada, processo de retificação e resultados de trabalho, conforme a Figura 2.3 (KLOCKE, 2009; KÖNIG, 1980).

Figura 2.3- A relação entre parâmetros de entrada, as características do processo e o resultado de trabalho no processo de retificação.



Fonte: Adaptado de König (1980) e Klocke (2009).

Os parâmetros de entrada são divididos em parâmetros de sistema e variáveis. Os parâmetros do sistema são a máquina-ferramenta, a peça, o rebolo, a ferramenta de dressamento e o fluido lubrificante. Já as variáveis de entrada são os parâmetros de corte, as condições de dressamento e os métodos de aplicações do fluido lubrificante.

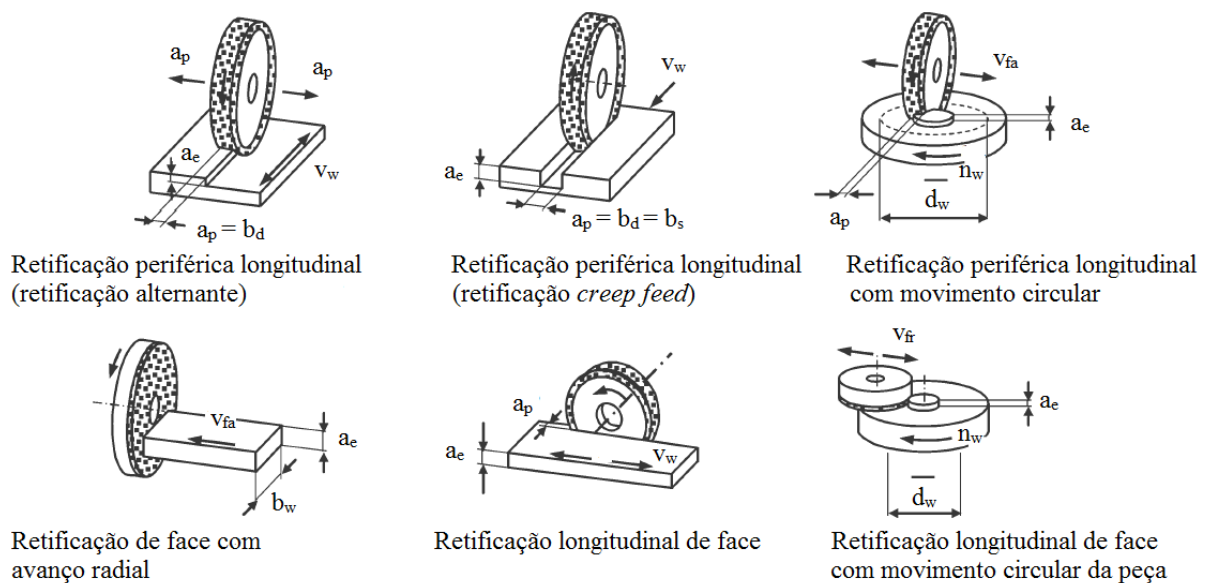
As características do processo têm suas intensidades analisadas por meio das grandezas de: força de retificação, potência consumida pela máquina-ferramenta, degaste do rebolo, duração do processo, temperatura na região de corte e a emissão acústica. Algumas influências externas, como vibrações e variações de temperatura podem interferir nas grandezas analisadas.

Os resultados do processo são avaliados na peça através de medições dimensionais e de integridade da superfície retificada. No rebolo por meio de medições de degaste e perda da capacidade de remoção de cavaco. No meio lubrificante são avaliadas as condições de contaminação e modificações de propriedades, avaliando indicadores de custos e produtividade do processo (KLOCKE, 2009).

2.1.1 Retificação plana

O processo de retificação plana é classificado de acordo com a norma alemã DIN 8589-11, a Figura 2.4 ilustra as variantes do processo de retificação plana. A norma leva em consideração a posição predominante da superfície do rebolo e o movimento do componente retificado (movimento da mesa de trabalho) (MARINESCU *et al.* 2016).

Figura 2.4- Classificação das variantes do processo de retificação plana segundo a norma DIN.

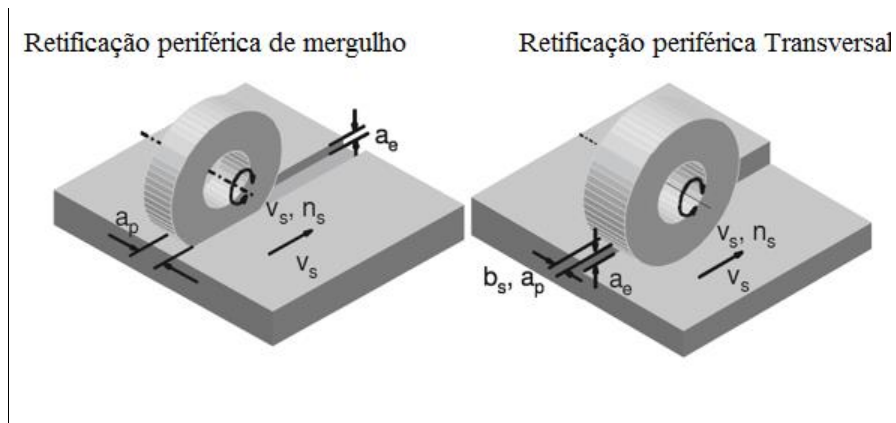


Fonte: Adaptado de Marinescu *et al.* (2016).

Na retificação plana ou de superfície o componente retificado tem suas superfícies niveladas (planas) ou que se estendem na direção de avanço principal em linha reta. Na prática industrial é mais comum a aplicação de duas variantes, conforme a Figura 2.5 (KLOCKE, 2009):

- Retificação periférica de mergulho ou retificação *creep feed* (retificação de ranhura ou retificação de perfil); e
- Retificação periférica transversal (retificação de superfícies planas com movimento alternantes da mesa de trabalho).

Figura 2.5 – Retificação periférica de mergulho e retificação periférica transversal.

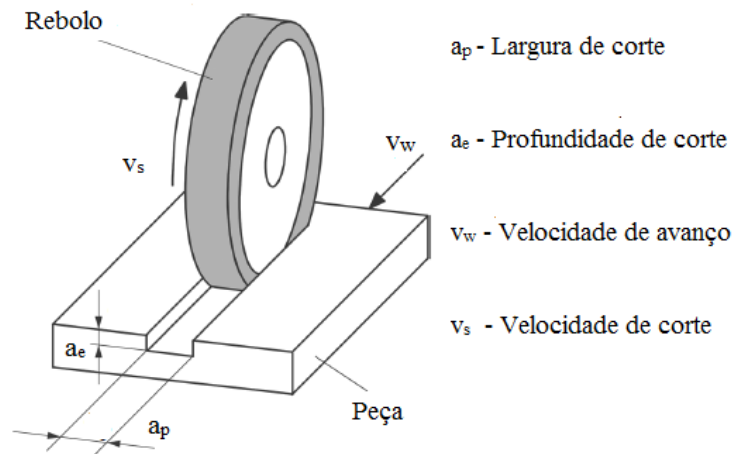


Fonte: Adaptado de Klocke (2009).

2.1.2 Retificação *creep feed*

A retificação profunda, também conhecida pelo termo em inglês “*creep feed grinding*” é utilizada quando se fazem necessário grandes profundidades de corte e/ou altas taxas de retificação de material com uma elevada qualidade da superfície produzida. O processo passou a ser empregado a partir do início da década de 1950. Uma das suas características é a elevada taxa de retificação com reduzidos valores de rugosidade, obtidas normalmente em uma única passagem da ferramenta sobre o componente retificado. A Figura 2.6 ilustra uma representação esquemática do processo de retificação *creep feed* (MARINESCU *et al.* 2016).

Figura 2.6 – Representação esquemática da retificação *creep feed*.



Fonte: Adaptado de Marinescu *et al.* (2016).

A retificação *creep feed* é caracterizada por elevadas profundidades de corte e baixas velocidades de avanço, definindo a taxa de retificação. A combinação destas variáveis de entrada leva a formação de cavacos longos e finos. Como consequência o volume de cavacos que devem ser acumulados nos poros é maior que na retificação alternante para uma mesma taxa de retificação. O longo percurso de contato dificulta a passagem de fluido lubrificador até a zona de corte e propicia o aumento da temperatura. O resultado de uma lubrificação insuficiente são as elevadas temperaturas na zona de corte que podem danificar o componente retificado (KLOCKE, 2009).

Por esse motivo na retificação *creep feed* utiliza rebolos de estrutura aberta, elevada porosidade e de menor dureza, pois o aumento da porosidade cria espaço para absorver os cavacos e facilitar o transporte do fluido lubrificador pelos poros do rebolo até a zona de corte propiciando uma redução da temperatura e favorecendo a retirada dos cavacos. A diminuição da dureza do rebolo propicia o macrodesgaste, expondo grãos novos com elevada capacidade de corte, contribuindo também para a diminuição da temperatura (CHATTI *et al.*, 2019; KLOCKE, 2009).

Na usinagem de peças longas o desgaste do rebolo, ao longo do percurso, além de influenciar a geometria do componente, também pode resultar em o dano térmico (KING; HAHN, 1986), tornando as exigências sobre o desgaste do rebolo e à lubrificação de extrema importância no processo.

A retificação *creep feed* é limitada pela elevação da temperatura na zona de corte, podendo resultar em danos térmicos visíveis conhecidos como “queima de retificação”. A

aplicação de fluido lubrificador de forma correta é crítica nesse processo (LEE *et al.*, 1999). A Figura 2.7 mostra um componente com o comprimento é de 250 mm obtido por retificação *creep feed*, empregando lubrificação com uma tubeira de jato livre (GROSS, 2019). A imagem mostra regiões escuras na superfície do componente, que caracterizam a “queima de retificação”.

Figura 2.7 - Componente obtido na retificação *creep feed* com “queima de retificação”.



Fonte: Gross (2019).

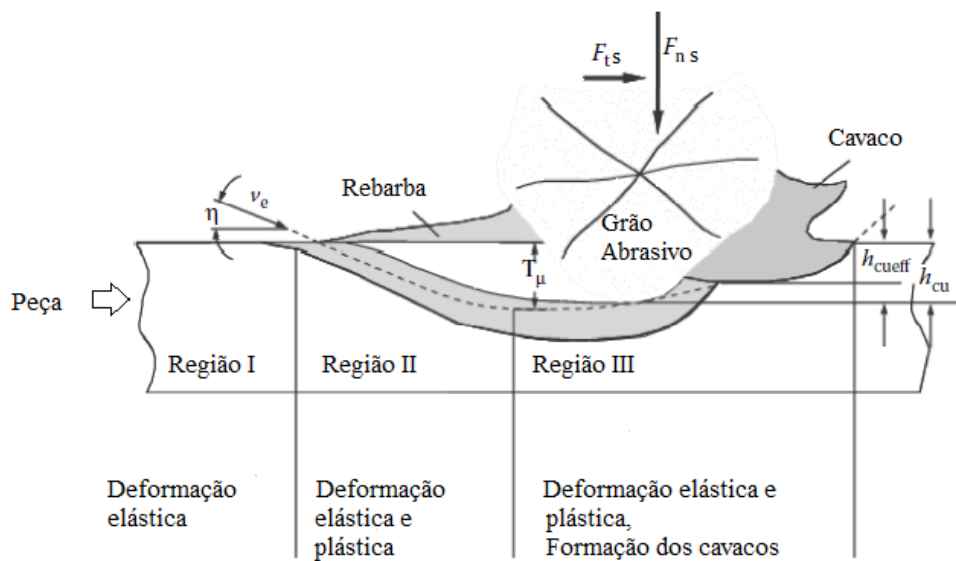
A indústria metal mecânica emprega a retificação *creep feed* para a fabricação de componentes com perfis precisos, tais como: guias, perfis de múltipla cauda de andorinha de fixação de palhetas de turbinas, canais de brocas e fresa de topo, entre outros (CHATTI *et al.*, 2019; KLOCKE, 2009).

2.2 MECANISMO DE PENETRAÇÃO DO GUME E FORMAÇÃO DE CAVACO.

No processo de retificação o gume penetra na superfície da peça com ângulo de penetração quase plano. A formação do cavaco é dividida em três regiões distintas, ilustrada na Figura 2.8. A primeira região é caracterizada apenas pelas deformações elásticas. A penetração do gume é tão pequena que ocorrem apenas deformações elásticas. Não há a formação de cavaco nesta região. A segunda região é caracterizada por deformações elásticas e plásticas. A penetração do gume é maior que na primeira região. O material da peça escoava da região do flanco para as laterais e/ou volta a aflorar na saída do flanco após a passagem do

grão, ocasionando a formação de um sulco com rebarbas laterais, ainda sem a formação de cavaco. A terceira região inicia quando as deformações elásticas e plásticas dão início à formação de cavaco. Quando a penetração do gume alcança a espessura de cavaco não deformado (h_{cu}) e atinge a profundidade de início de corte (T_μ), inicia-se a formação do cavaco de maneira efetiva. Como o processo ocorre de forma contínua os mecanismos de escoamento e formação de cavaco ocorrem simultaneamente (KÖNIG, 1980).

Figura 2.8 – Representação esquemática das regiões de deformação elástica e plástica na formação de cavaco.



Fonte: Adaptado de König (1980) e Marinescu *et al.* (2016).

Para descobrir a ordem de grandeza da espessura de usinagem efetiva ($h_{cu\text{eff}}$) e determinar a eficácia da remoção de material é importante conhecer os valores da penetração de trabalho ou da espessura de corte (h_{cu}). Pesquisas mostram que a profundidade de início de corte (T_μ) e a espessura de usinagem efetiva ($h_{cu\text{eff}}$) são dependentes da geometria do gume, do ângulo de ação do gume (η) (ângulo sob o qual o gume penetra da peça) e da velocidade de ação (v_e) (velocidade com a qual o gume desloca-se). Além disto, ($h_{cu\text{eff}}$) e (T_μ) dependem das relações de atrito no gume e das condições de escoamento do material da peça. Há uma tendência de que os gumes cegos com um pequeno grau de afiação e com um pequeno ângulo de ação (η) causem o escoamento do material, conseqüentemente, levando a maiores (T_μ) e menores espessuras efetivas de corte ($h_{cu\text{eff}}$). Também um aumento da tensão de escoamento do material tem efeito semelhante. O atrito entre o grão abrasivo e o material da peça tem efeito contrário. O aumento do atrito provoca um estado de tensão mais intenso abaixo do

gume em ação e propicia a formação de cavacos. Algo semelhante também é válido para a velocidade de ação (v_c), um aumento da velocidade de ação também provoca uma diminuição na profundidade de início de corte (KÖNIG, 1980).

2.3 EMBASAMENTO CINEMÁTICO

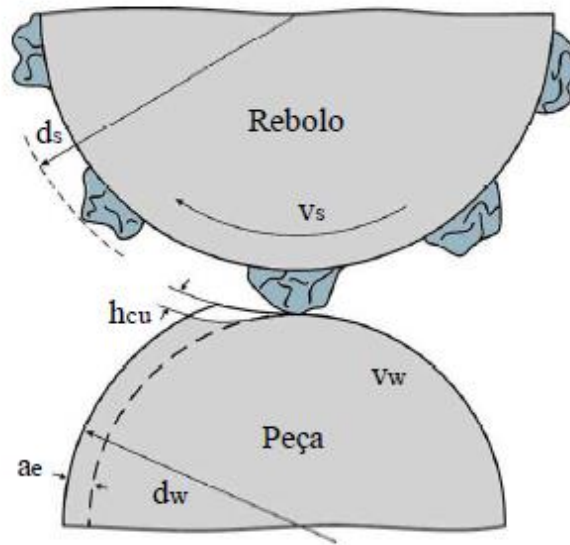
Nas variantes do processo de retificação existem alguns parâmetros do processo que permitem realizar uma comparação entre eles, que são o comprimento de contato geométrico (l_g), o comprimento de cavaco (l_{cu}) e a espessura de cavaco não deformada (h_{cu}) (MARINESCU *et al.*, 2016; KÖNIG, 1980).

A espessura de cavaco não deformada (h_{cu}) é descrita pela Equação 1, depende das variáveis de entrada do processo que são a velocidade periférica do rebolo (v_s), a velocidade de avanço (v_w), a profundidade de corte (a_e), o diâmetro equivalente do rebolo (d_{se}) e da distribuição de gumes estáticos no rebolo (C_{stat}), a Figura 2.9 ilustra a relação entre espessura de usinagem com as variáveis de entrada (KÖNIG, 1980).

$$h_{cu} \approx K \left[\frac{1}{C_{est}} \right]^\alpha \left[\frac{v_w}{v_s} \right]^\beta \left[\frac{a_e}{d_{se}} \right]^\gamma \quad (1)$$

O fator de proporcionalidade K e os expoentes α , β e γ são constantes determinadas experimentalmente, com valores menores que a unidade.

Figura 2.9 - Relação entre espessura de usinagem com as variáveis de entrada.



Fonte: Adaptado de König (1980).

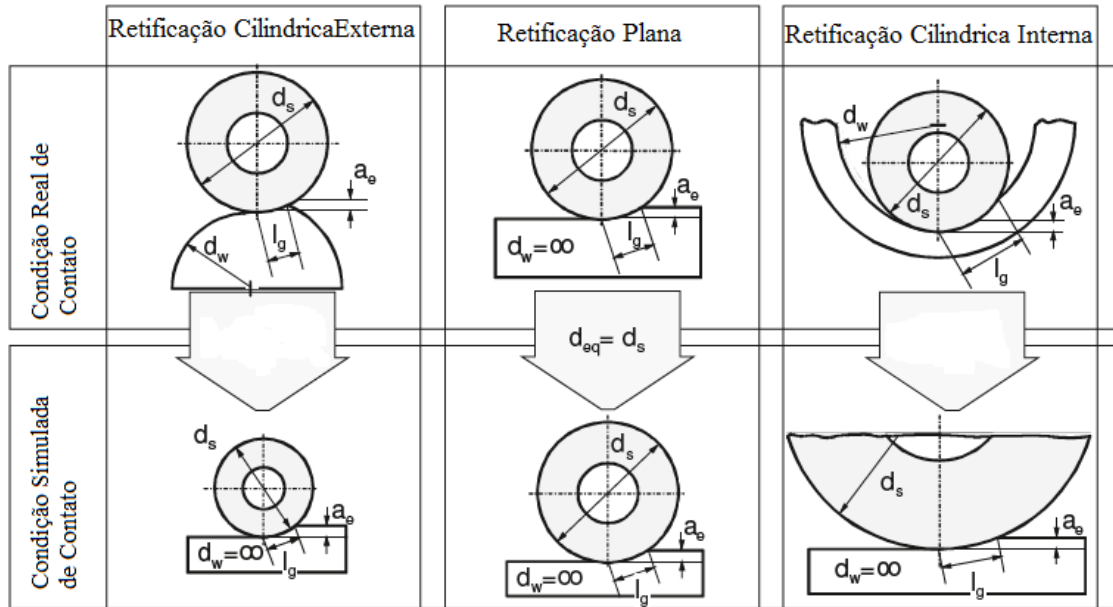
O diâmetro equivalente do rebolo (d_{se}) é o parâmetro que permite relacionar às condições de contato entre a ferramenta de corte e a peça nos diferentes processos de retificação, conforme mostra a Figura 2.10. Na retificação plana o diâmetro equivalente do rebolo (d_{se}) possui o mesmo valor do diâmetro do rebolo (d_s). A Equação 2 determina como calcular os valores do diâmetro equivalente (d_{se}) nos processos de retificação cilíndrica externa e interna. O sinal positivo no denominador é utilizado para calcular o (d_{se}) no processo de retificação cilíndrica externa, em contrapartida o sinal negativo é aplicado para a retificação cilíndrica interna (KLOCKE, 2009).

$$d_{se} = \frac{d_w \cdot d_s}{d_w \pm d_s} \quad (2)$$

O comprimento de contato (l_k) entre ferramenta de corte e a peça é determinado pela Equação 3, dependendo do processo de retificação, para uma mesma profundidade de corte (a_e) obtém-se comprimentos de contato distintos (KLOCKE, 2009; KÖNIG, 1980).

$$l_k = \sqrt{a_e \cdot d_{se}} \quad (3)$$

Figura 2.10 – Diâmetro equivalente do rebolo e condições de contato nas variantes do processo de retificação.



Fonte: Adaptado de Klocke (2009).

A velocidade de corte não tem influência sobre a taxa de retificação de material, que é influenciada apenas pela velocidade de avanço (v_w) e pela profundidade de corte (a_e). Contudo, com o aumento da profundidade de corte, devido ao aumento do comprimento de cavaco, o volume removido distribui-se entre um maior número de gumes e é importante saber quantos cavacos isolados são removidos neste volume. O aumento do número de gumes não é linear com o aumento do comprimento de contato, pois com a diminuição da espessura de corte grãos menos protusos deixam de ser ativos, de forma que a diminuição da espessura de cavaco isolado é menor que a proporção teórica (todos os gumes na mesma protusão). O aumento da velocidade de corte (v_s), mantendo-se a taxa de retificação constante, aumenta o número de gumes que atuam na unidade de tempo, levando também a uma diminuição da espessura de usinagem para cada gume isolado, diminuindo o número de gumes ativos (KÖNIG, 1980).

2.4 FERRAMENTAS PARA RETIFICAÇÃO

As ferramentas utilizadas nos processos de retificação, denominados de rebolo, segundo a norma DIN 69111, são ferramentas rotativas compostas de grãos abrasivos fixos entre si por um ligante, podendo ou não apresentar uma porosidade. Os rebolos são fabricados

nas mais variadas formas e dimensões, podendo ser: rebolos retos, cônicos e reduzidos; discos de corte abrasivos; rebolos fixos a discos de suporte; rebolo copo; rebolo de segmentos, a Figura 2.11 ilustra alguns tipos de rebolos.

Figura 2.11 – Ferramentas rotativas com grãos abrasivos de geometria não definida.



Fonte: Klocke (2009).

2.4.1 Grãos abrasivos

Na fabricação dos rebolos os materiais dos grãos abrasivos podem ser naturais ou sintéticos. Os naturais disponíveis são o quartzo, a granada, o diamante, o coríndon e o esmeril. O diamante é o único material abrasivo natural que ainda é empregado na fabricação de rebolos aplicados industrialmente. Os materiais abrasivos sintéticos substituem os demais abrasivos naturais por apresentarem melhores características e homogeneidade. São utilizados o óxido de alumínio (coríndon), o carboneto de silício, o nitreto de boro cúbico (cBN) e o diamante sintético. Os materiais dos grãos abrasivos devem apresentar as seguintes características (KLOCKE, 2009; KÖNIG, 1980):

- Serem extremantes duros, propiciando elevadas taxas de remoção de material da peça e mantendo os gumes afiados pelo maior tempo possível;
- Ter estabilidade térmica, para que os grãos suportem as alterações de temperaturas que ocorrem durante o processo de retificação; e
- Elevada estabilidade química, evitando que os grãos sejam enfraquecidos por possíveis reações com o material da peça e/ou meio lubrificante, em decorrência das elevadas condições de pressões e temperaturas durante o processo.

2.4.2 Grãos abrasivos de óxido de alumínio

Os rebolos de coríndon tem em sua composição básica grãos de óxido de alumínio (Al_2O_3), existem vários tipos de coríndon que são empregados como abrasivos e a principal maneira de distinguir estes é através do seu métodos de fabricação por eletro-fusão ou sinterização (KLOCKE, 2009).

O coríndon é subdividido segundo seu grau de pureza em comum, seminobre e nobre. Esta subdivisão vai depender do percentual de outros óxidos em sua composição, sendo os principais: óxido de titânio (TiO_2) e óxido de cromo (Cr_2O_3). Além disto, comercialmente existem outros tipos de coríndon, tais como: coríndon nobre rosa, nobre vermelho, entre outros. (BENINI, 2011; KLOCKE, 2009; KÖNIG, 1980).

As exigências que se destacam são a dureza e a tenacidade. Ambas propriedades são definidas já no processo de fabricação do grão abrasivo (eletro-fundição em bloco ou em molde), pela quantidade de óxidos estranhos, bem como pelo tamanho dos grãos isolados e o seu tratamento posterior (KÖNIG, 1980).

2.4.3 Ligantes

Segundo a norma DIN 69111 todas as ferramentas abrasivas, exceto aquelas com grãos abrasivos soltos, têm seus grãos unidos por um material ligante. Os Ligantes têm como função manter os grãos fixados a estrutura da ferramenta abrasiva, até o momento em que o grão abrasivo perca sua capacidade de corte por causa do processo de usinagem. Posteriormente à perda de capacidade de corte do gume o ligante deve soltar o grão abrasivo e

dar lugar a um novo grão abrasivo posicionado em uma camada mais profunda da estrutura da ferramenta. Os ligantes devem apresentar três características principais (KÖNIG, 1980):

- O material do ligante deve ser resistente para suportar as forças atuantes sobre o grão no momento do corte;
- O ligante deve formar pontes entre os grãos com secção transversal suficientemente grande; e
- Entre o grão abrasivo e o ligante deve existir energia de ligação suficientemente elevada para garantir a fixação do grão.

Os materiais utilizados como ligantes pela indústria de ferramentas abrasivas são de origem orgânica ou inorgânica. Os ligantes baseados em gomas, laca e resinas sintéticas são classificados como orgânicos. Os Ligantes cerâmicos vitrificados e metálicos são classificados como inorgânicos (KÖNIG, 1980).

2.4.4 Composição volumétrica

A composição volumétrica de um rebolo é definida pelos volumes de grãos (V_G), de ligante (V_B) e de poros (V_P) da ferramenta abrasiva. A ferramenta pode ter estrutura aberta ou fechada e assim definir propriedades como a dureza e porosidade. Quanto mais fechada a estrutura, maior a dureza e menor a porosidade, conseqüentemente, menor capacidade de absorção dos cavacos. A composição volumétrica é descrita pela Equação 4 (KLOCKE, 2009).

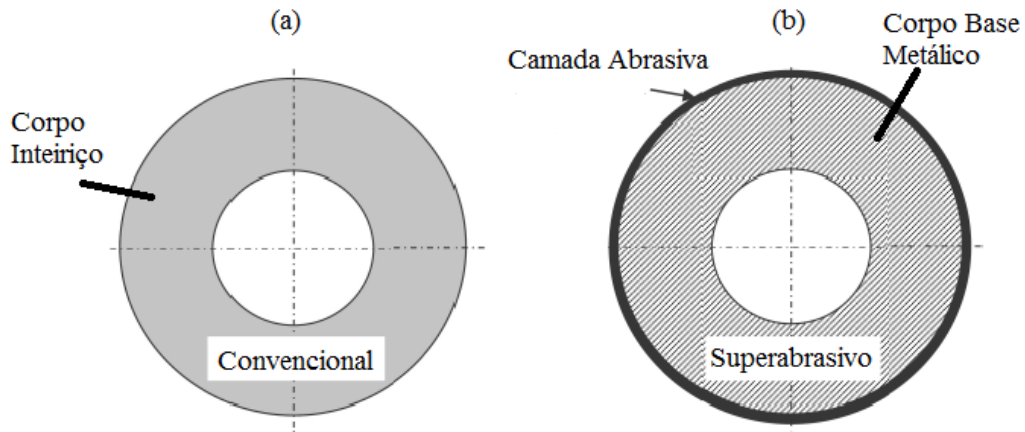
$$V = V_G + V_B + V_P \quad (4)$$

2.4.5 Rebolos convencionais e superabrasivos

Os Rebolos convencionais são compostos basicamente por grãos abrasivos de óxido de alumínio e carboneto de silício, enquanto que os rebolos superabrasivos têm em sua composição grãos abrasivos de cBN e diamante. Os superabrasivos permitem empregar velocidades de corte muito mais altas que os convencionais e isso afeta no design dos rebolos. Esses têm um corpo base metálico ou de resina reforçada com fibras e uma camada abrasiva (constituída por grãos, ligantes e poros) que é fixa em sua superfície de trabalho. Já os rebolos convencionais tem um corpo inteiriço constituído de grãos, ligante e poros, a Figura 2.12

ilustra o rebolo convencional e rebolo superabrasivo (KLOCKE, 2009; MARINESCU *et al.*, 2016).

Figura 2.12 – Rebolos convencional (a) e superabrasivos (b).



Fonte: Adaptado de Marinescu *et al.* (2016).

2.4.6 Características necessárias as ferramentas empregadas na retificação *creep feed*

Na retificação *creep feed* empregam-se rebolos de estrutura aberta, com menor dureza e maior porosidade, para garantir uma característica de macrodesgaste, para facilitar o transporte do fluido lubrificante até a zona de corte e a retirada dos cavacos (KLOCKE, 2009).

Na retificação *creep feed* uma eficiente lubrificação é necessária para evitar que as altas temperaturas do processo causem danos térmicos ao componente. O transporte do fluido até a zona de corte de cada gume é facilitado pela utilização de rebolos com estrutura aberta e alta porosidade. Estudos mostram que o uso de rebolos de óxido de alumínio poroso, reduzem a quantidade de calor que entra na peça. A quantidade de calor que entra na peça pode ser comparada às aplicações que empregam rebolos de cBN vitrificadas (STARKOV, 2012 *apud* GRIGORIEV *et al.*, 2014).

O uso de rebolos com estrutura aberta e alta porosidade permite aumento das taxas de retificação de material e gera menores temperaturas em comparação a um rebolo de menor porosidade e estrutura fechada, conseqüentemente, menor quantidade de calor é dissipado até a peça. A utilização de rebolos convencionais de óxido de alumínio com estrutura aberta e altamente porosos, são aplicados com eficiência em processos de retificação *creep feed*. Em um rebolo com uma estrutura aberta e elevada porosidade as pontes de ligante que unem os

grãos são mais longas e mais finas, diminuindo significativamente a dureza do rebolo, favorecendo o macrodesgaste do rebolo. Em muitas aplicações, em termos de custos do processo, a utilização de rebolos de óxido de alumínio é mais eficiente em comparação às aplicações com rebolos de cBN (STARKOV, 2007 *apud* GRIGORIEV *et al.*, 2014).

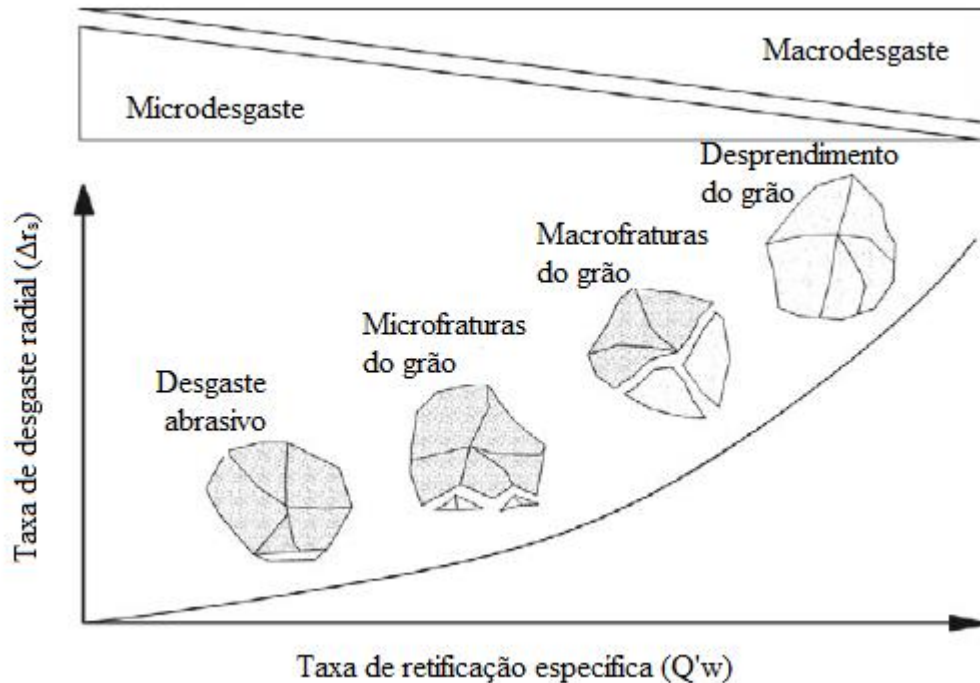
Outra característica necessária as ferramentas utilizadas na retificação *creep feed* diz respeito ao grau de afiação do rebolo. O grau de afiação de um rebolo é a propriedade que define a manutenção de sua capacidade de corte durante a retificação. Quando em uma operação de retificação um rebolo apresenta um microdesgaste mais acentuado, a formação de topos platafórmicos dos grãos torna o rebolo menos agressivo. Ocorre um aumento do número de gumes cinemáticos, o que resultará num acabamento com menor rugosidade ao longo do percurso retificado, porém, em decorrência do aumento do atrito entre os flancos platafórmicos e pelo aumento do trabalho de corte devido a diminuição da espessura de corte de cada grão, a temperatura de corte aumenta e o resultado tende a um maior dano térmico na peça. Isto exige uma melhor ação da lubrificação da região de corte. Em decorrência do aumento da temperatura na retificação profunda com rebolos de maior dureza, os cavacos com maior deformação plástica tendem a obstruir os poros e não podem ser removidos das cavidades dos poros pelo fluido lubrificante, permanecendo aderidos nos poros do rebolo. Esta obstrução dos poros é chamada de carregamento (ou empastamento) do rebolo. Como não existe mais espaço para absorver novos cavacos nos poros obstruídos, aumenta o atrito e os consequentes danos térmicos na peça (CAMERON; BAUER; WARKENTIN, 2009).

2.5 DESGASTE DO REBOLO

O desgaste dos rebolos ocorre devido as pressões de contato na zona de corte durante o processo de retificação e pela influência da temperatura. Estas grandezas ativam fenômenos mecânicos, térmicos, químicos e termoquímicos. Os principais mecanismos de desgaste dos gumes de um rebolo são a adesão, a abrasão mecânica, a corrosão, a difusão, a fadiga mecânica e térmica (KLOCKE, 2009).

Com o intuito de avaliar o comportamento de desgaste do rebolo, foi convencionado uma relação entre a taxa de desgaste radial ($\Delta r'_s$) e a taxa de retificação específica de material (Q'_w). A Figura 2.13 mostra a influência da taxa de retificação específica em função da taxa de desgaste radial, assim como os mecanismos de desgaste.

Figura 2.13 – Influência da taxa de retificação específica de material sobre a taxa de desgaste radial.



Fonte: Adaptado de Klocke (2009).

Os mecanismos de microdesgaste e macrodesgaste ocorrem de forma simultânea e são influenciados diretamente pela taxa de retificação específica. Empregando pequenas taxas de retificação específica ocorre o predomínio de microdesgaste. Com o aumento da taxa de retificação específica o mecanismo predominante passa a ser o macrodesgaste. Dependendo do mecanismo de desgaste predominante as forças de corte, a rugosidade e a influência térmica apresentam resultados diferentes (KLOCKE, 2009).

Cada rebolo apresenta uma característica específica de desgaste, que é influenciada pela taxa de retificação, pela velocidade de corte e pelo grau de recobrimento no dressamento. Um rebolo dressado com um determinado grau de recobrimento para uma determinada taxa de retificação, quando apresentar o domínio do microdesgaste, a rugosidade do componente retificado vai diminuir ao longo do tempo de retificação ou, caso domine o macrodesgaste, a rugosidade vai aumentar. Para uma determinada taxa de retificação a rugosidade estabiliza na rugosidade característica do rebolo. Aumentando a velocidade de retificação, a rugosidade de estabilização diminui em relação à rugosidade de estabilização obtida para uma velocidade de corte menor (KLOCKE, 2009).

O mecanismo de macrodesgaste é caracterizado pela perda dos grãos da estrutura do rebolo, o número de gumes cinemáticos diminui e os sulcos provenientes da retificação ficam mais profundos, conseqüentemente, a rugosidade aumenta. No entanto, no mecanismo de microdesgaste os grãos do rebolo tornam-se platafórmicos, resultando no aumento do número de gumes cinemáticos e a diminuição da profundidade dos sulcos e, conseqüentemente, a diminuição da rugosidade ao longo do percurso retificado (KÖNIG, 1980).

2.6 CONDICIONAMENTO DO REBOLO

As ferramentas de retificação não se encontram em condições de uso quando entregue pelo fabricante e/ou após um longo período de trabalho, sendo necessárias operações de condicionamento que permitem o uso desta. O condicionamento do rebolo é dividido em limpeza, perfilamento e afiação. O dressamento é definido como sendo a operação em que o perfilamento e afiação ocorrem simultaneamente. O perfilamento é responsável pela geração do perfil do rebolo. A afiação é o processo de aumento da capacidade de corte que se faz necessário em rebolos resinoides de superabrasivos, pois em sua fabricação não apresentam porosidade intrínseca e após o perfilamento não apresentam volume de poros. A afiação é o processo de remoção de parte do ligante entre os grãos e é a causadora da protusão dos gumes novos e afiados no rebolo (KLOCKE, 2009; KÖNIG, 1980).

A limpeza faz-se necessário quando ocorre o empastamento dos poros da periferia do rebolo por cavacos, bem como a retirada dos restos dos grãos abrasivos e ligante provenientes do dressamento realizado anteriormente. Este processo é importante, pois caso os poros permaneçam entupidos a formação e retirada dos cavacos, assim como o suprimento de fluido lubrificante até a zona de corte serão prejudicados (KLOCKE, 2009; WEGENER *et al.*, 2011).

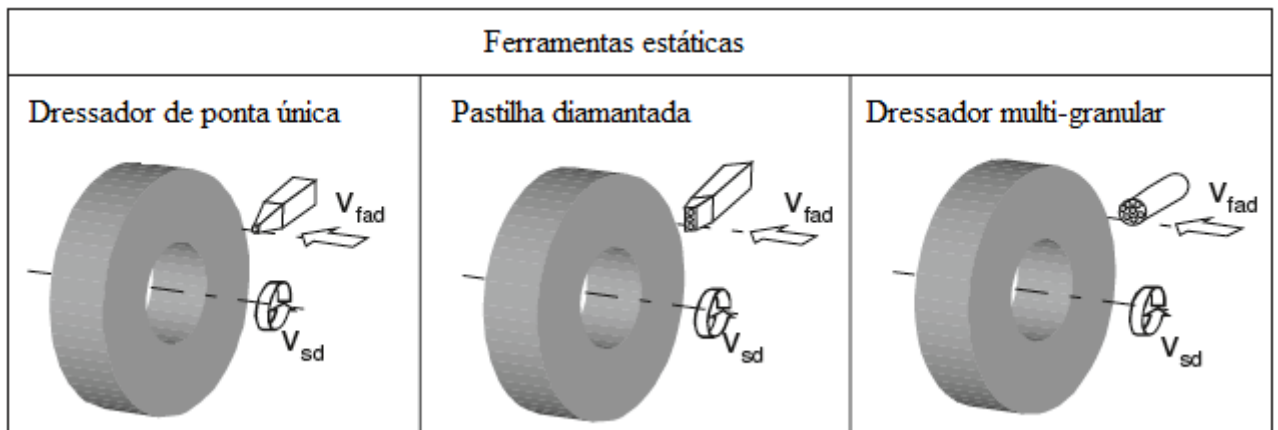
2.6.1 Ferramentas de dressamento

As ferramentas de dressamento empregadas no condicionamento dos rebolos convencionais são classificadas de acordo com a sua cinemática em: dressadores estáticos (não rotativos) e dressadores rotativos. Para um dressamento eficiente, as ferramentas devem apresentar uma dureza superior em relação ao material do grão abrasivo do rebolo. O

principal material utilizado nas ferramentas de dressamento é o diamante monocristalino natural e sintético. Outros materiais de menor são raramente empregados (KLOCKE, 2009).

As ferramentas de dressamentos estáticas exercem apenas movimentos de translação em relação ao rebolo. As ferramentas são de ponta única, de ponta múltipla ou em forma de bloco. No emprego de ferramentas de ponta única, o perfil do rebolo é gerado pelo movimento axial e radial ao longo do contorno do rebolo, análogo a um processo de torneamento, a Figura 2.14 ilustra o processo de dressamento. (KLOCKE, 2009; WEGENER *et al.*, 2011).

Figura 2.14 – Cinemática do processo de dressamento com ferramentas estáticas.



Fonte: Adaptado de Klocke (2009).

Em dressadores de ponta única, normalmente, são empregados diamantes monocristalino, são escolhidos diamantes octaédricos inteiros que são brasados em um suporte de aço. O diamante desgasta após um longo período de uso, há a possibilidade de retirar o diamante do suporte e soldar outro no lugar. Mesmo quando esta ferramenta apresentar um desgaste acentuado o dressamento ainda será realizado de uma maneira efetiva. Isto não acontece com as ferramentas de dressamento de ponta única lapidada (perfilada), estas ferramentas permitem gerar uma geometria mais precisa do rebolo, quando se desgastam é necessário lapidar novamente o diamante e não é possível substituir o diamante usado. A Figura 2.15 ilustra um dressador de ponta única lapidada (perfilada) (KLOCKE, 2009; KÖNIG, 1980).

Figura 2.15 – Dressador de ponta única lapidada.



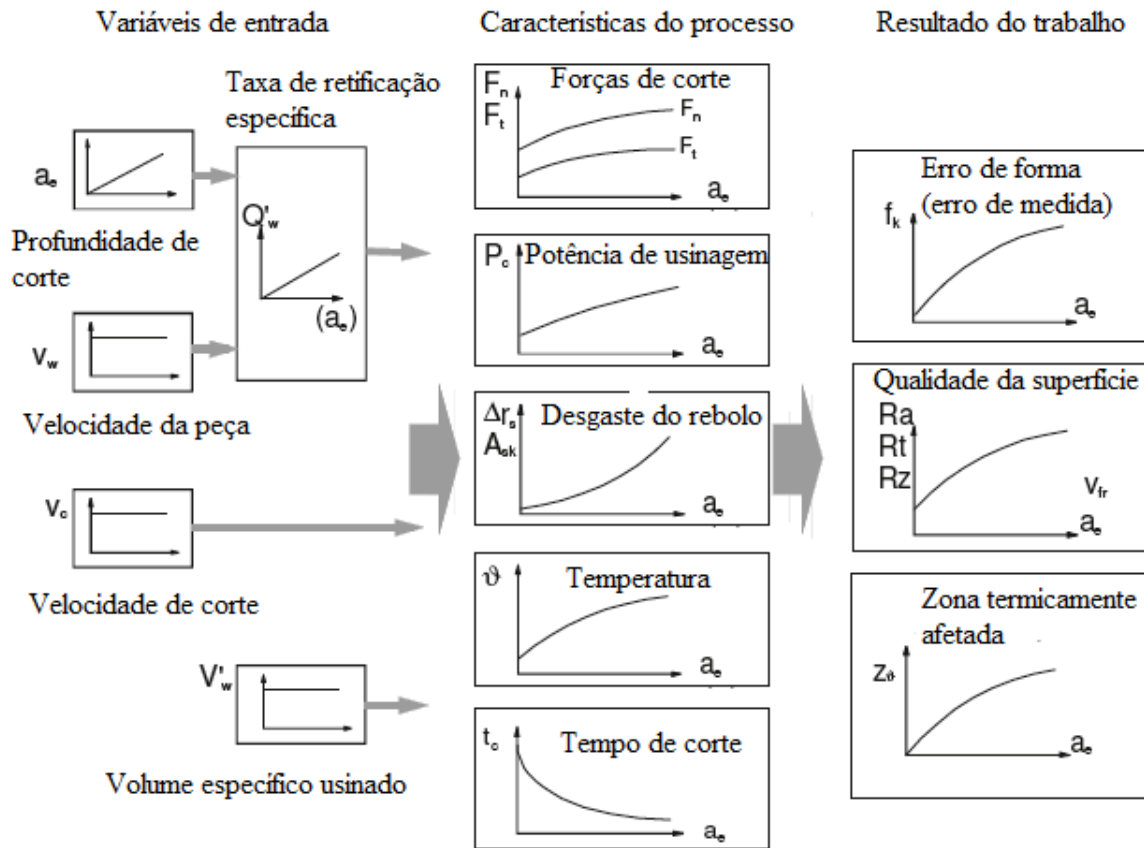
Fonte: Adaptado de Gross (2019).

2.7 INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA NAS CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO E NO RESULTADO DO TRABALHO

2.7.1 A influência da profundidade de corte

O aumento da profundidade de corte (a_e) no processo de retificação, mantendo constante a velocidade de avanço leva a um aumento da taxa de retificação específica. Como aumento da profundidade de corte ocasiona um aumento da espessura do cavaco e conseqüentemente também do número de gumes cinemáticos, ocorre um aumento das componentes da força de corte e da rugosidade do componente que por sua vez se refletem na piora da qualidade dimensional e rugosidade da superfície retificada. A influência da alteração da profundidade de corte nas características do processo e resultado do trabalho são mostrados tendencialmente na Figura 2.16 (KLOCKE, 2009). Nesta representação a velocidade de corte não foi alterada e, para permitir uma comparação de resultados, a avaliação é procedida sempre após a usinagem de um mesmo volume específico.

Figura 2.16 – A influência da profundidade de corte nos parâmetros do processo e no resultado do trabalho.



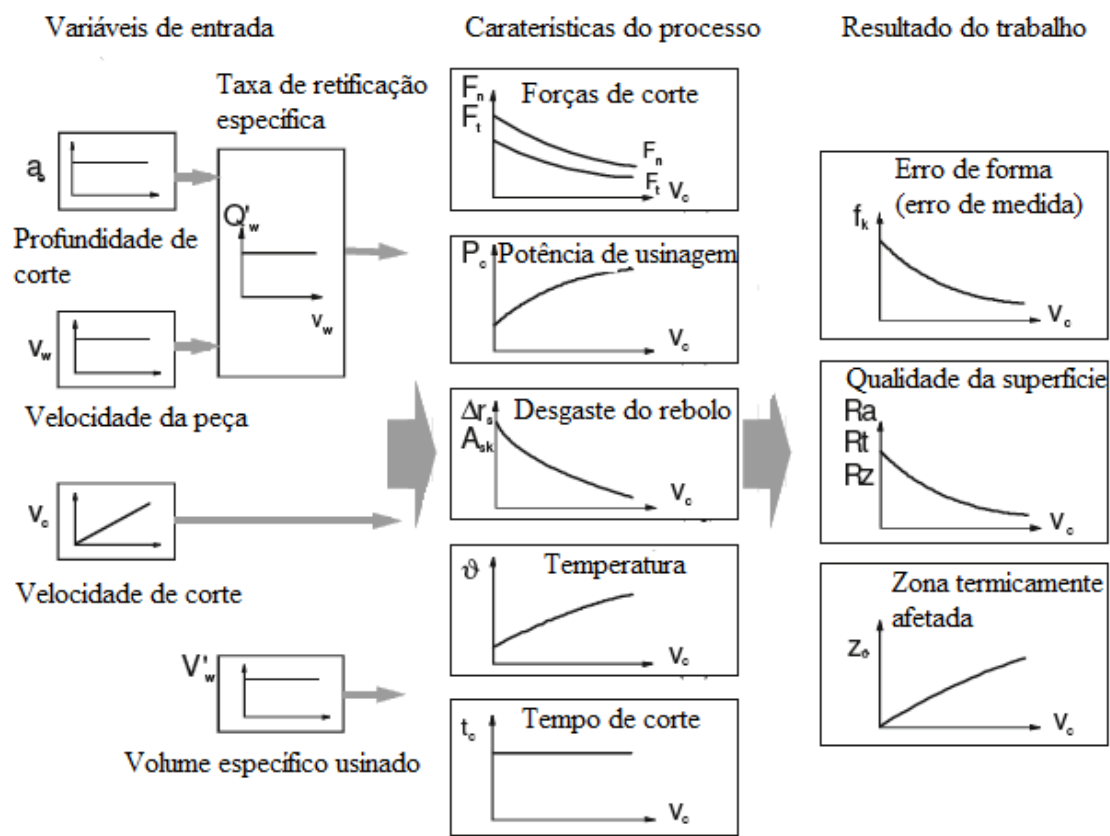
Fonte: Adaptado de Klocke (2009).

2.7.2 Influência da velocidade de corte

A influência da variação velocidade de corte (v_s) nas características do processo e no resultado do trabalho são ilustrados tendencialmente na Figura 2.17. A velocidade de corte não altera a taxa específica de retificação de material, porém leva à diminuição das componentes da força de corte, do desgaste do rebolo e da rugosidade. A diminuição das componentes da força de corte com o aumento da velocidade de corte é decorrente da diminuição da espessura momentânea de usinagem, uma vez que um maior número de gumes retifica o mesmo volume de material. A diminuição do número de gumes cinemáticos com a diminuição da espessura de usinagem, diminui a rugosidade, acompanhando o comportamento da força de corte. Em decorrência da diminuição da força que atua sobre cada gume isoladamente, o desgaste diminui por causa do deslocamento dos mecanismos de

macrodesgaste para microdesgaste. A velocidade de corte crescente eleva a frequência de utilização do gume, fato que é supercompensado por uma menor pressão de contato e um menor tempo de ação. Porém o aumento da velocidade de corte leva a um aumento da temperatura de retificação e conseqüentemente a um aumento do dano térmico ao componente retificado (KLOCKE, 2009; KÖNIG, 1980).

Figura 2.17 – Influência da velocidade de corte nas características do processo e no resultado do trabalho.



Fonte: Adaptado de Klocke (2009).

2.7.3 Influência da profundidade de corte e velocidade de avanço na retificação plana

Na retificação *creep feed* e na retificação alternante (pendular) a taxa de retificação (Q_w) é obtida pelo produto da seção de usinagem pela velocidade de avanço, é descrita na Equação 5 e a taxa de retificação específica (Q'_w) é obtida pela Equação 6 (KÖNIG, 1980).

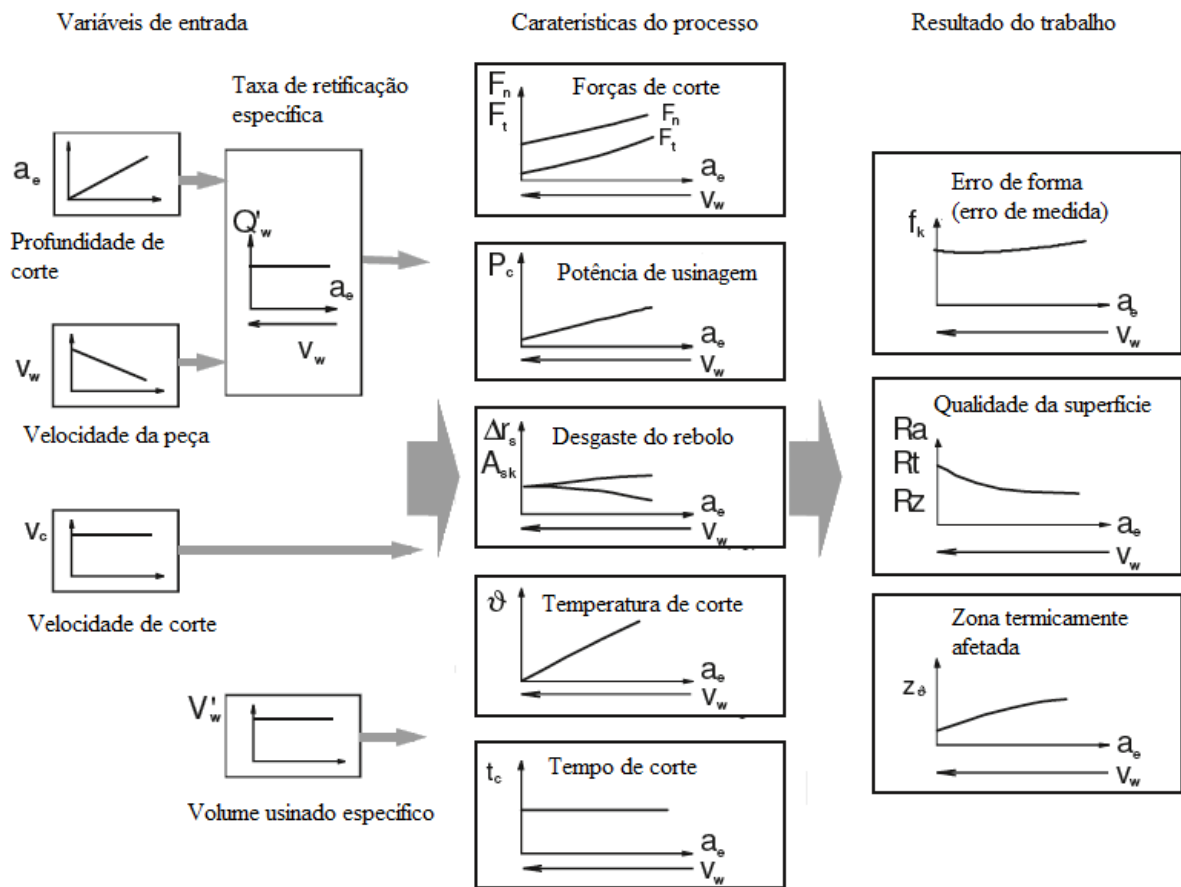
$$Q_w = a_e * v_w * a_p \quad (5)$$

$$Q'_w = a_e * v_w \quad (6)$$

Na retificação *creep feed* e pendular podemos ter uma mesma taxa de retificação específica (Q'_w), porém com distintas variáveis de entrada. Na retificação *creep feed*, a taxa de retificação específica é obtida com uma grande profundidade de corte (a_e) e uma pequena velocidade de avanço (v_w). Na retificação pendular, a taxa de retificação específica é obtida pela pequena profundidade de corte (a_e) e uma grande velocidade de avanço (v_w). Para a situação particular, em que temos a mesma taxa de retificação específica, o aumento da profundidade de corte (a_e) exige uma diminuição proporcional da velocidade de avanço (v_w). A Figura 2.18 mostra tendencialmente como a variação dos parâmetros de entrada afetam as características do processo e o resultado de trabalho (KLOCKE, 2009; KÖNIG, 1980).

Na retificação *creep feed* a elevada profundidade de corte aliada com a baixa velocidade de avanço, propicia um grande arco de contato e favorece a formação de cavacos longos e finos. O volume de cavaco removido por gume empacotado no poro é maior que na retificação alternante e o fornecimento de fluido lubrificante é prejudicado. Devido a isto, o rebolo utilizado na retificação *creep feed* deve ter como características uma elevada porosidade e estrutura aberta para facilitar o transporte dos cavacos e do fluido lubrificante (KLOCKE, 2009).

Figura 2.18 – Influência da profundidade de corte e da velocidade de avanço sobre as características do processo e o resultado de trabalho.



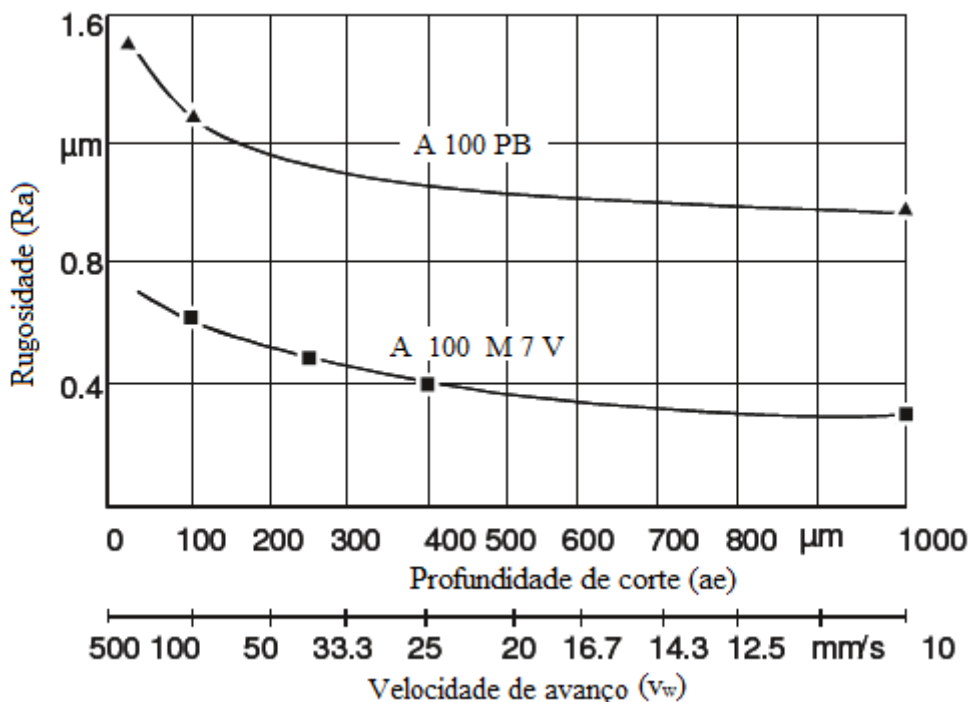
Fonte: Adaptado de Klocke (2009).

Para uma taxa de retificação específica constante, o aumento da profundidade de corte combinado com uma diminuição proporcional da velocidade de avanço leva a um aumento das componentes da força de corte, sendo assim, explicado pelos seguintes mecanismos. Com a maior profundidade de corte e menor velocidade de avanço a espessura do cavaco (área seção transversal) é diminuída e ao mesmo tempo o número de gumes ao longo do maior comprimento de contato é maior. Embora o número de gumes cinemáticos seja reduzido em função da menor espessura do cavaco não deformado, a espessura de cavaco diminui. A redução da espessura do cavaco é sobrecompensada pelo aumento dos gumes cinemáticos, fazendo com que a força de corte aumente. O aumento da força de retificação com a diminuição da espessura de cavaco tem um comportamento idêntico ao verificado por Kienzle para a usinagem com ferramentas de corte de geometria definida (KLOCKE, 2009).

Para uma taxa de remoção específica constante, a rugosidade média da superfície (R_a) diminui com o aumento da profundidade de corte, a Figura 2.19 ilustra a qualidade da

superfície retificada em função da profundidade de corte e da velocidade de avanço. A diminuição da rugosidade é decorrente da diminuição da espessura de cavaco para maiores profundidades de corte. A retificação *creep feed* produz uma melhor qualidade da superfície retificada em comparação a retificação pendular (KLOCKE, 2009).

Figura 2.19 – Qualidade da superfície retificada em função da profundidade de corte e velocidade de avanço na retificação com o emprego dos rebolos A100 PB e A100M7V.



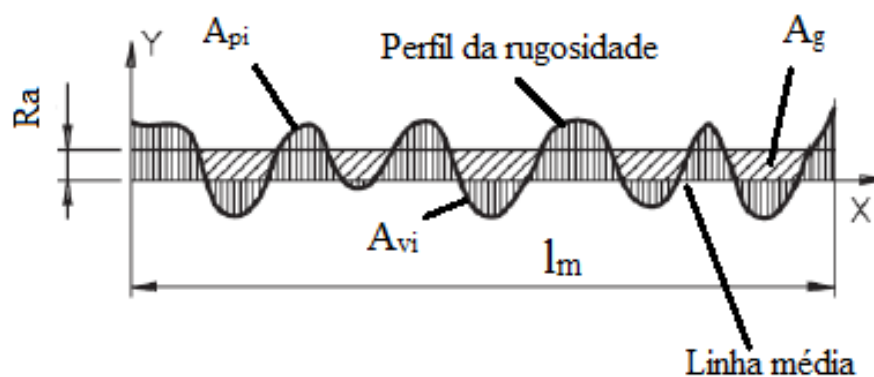
Fonte: Adaptado de Klocke (2009).

2.8 QUALIDADE DA SUPERFÍCIE USINADA

Um componente usinado, quando observado em um microscópio, apresenta irregularidades na superfície usinada que de acordo com a norma DIN abrange as ondulações, a rugosidade até defeitos na estrutura atômica. A apalpação da superfície em uma linha ou a varredura da superfície permite extrair parâmetros verticais das características da superfície, onde os parâmetros mais comuns dizem respeito à rugosidade do componente. As características mais comuns na verificação da qualidade de uma superfície são os valores do perfil vertical, muitas vezes representadas pelos parâmetros Ra, Rq, Ry, Rz, Rmax (BET, 1999).

O desvio médio aritmético da rugosidade (R_a), é definido como a média dos valores absolutos das distâncias “y” da linha média ao perfil de rugosidade dentro do trecho de medição. Podendo ser considerado como se fosse a altura do retângulo no qual o comprimento total da medição é representado por “ l_m ” e sua área “ A_g ” é igual a soma das áreas limitadas pela linha média e o perfil de rugosidade, conforme a Figura 2.20. Embora o valor R_a não permita uma interpretação isoladamente, ainda é o parâmetro mais avaliado como indicativo da qualidade de um componente na produção seriada.

Figura 2.20 – Desvio médio aritmético da rugosidade.



Fonte: Bet (1999).

O comportamento da rugosidade depende do processo de fabricação empregado e varia ao longo de um ciclo de vida da ferramenta empregada. No caso da retificação o desgaste da ferramenta tem influência sobre o comportamento da rugosidade ao longo do percurso retificado entre dois ciclos de dressamento. Para o rebolo recém dressado a rugosidade do componente retificado apresenta as características dependentes dos parâmetros de dressamento (grau de recobrimento). Para um dressamento com grau de recobrimento baixo, os gumes estão afiados e a topografia do rebolo é irregular. Para uma taxa de retificação pequena, com o aumento do volume retificado os grãos mais protusos são desgastados plataformicamente e a topografia do rebolo torna-se mais nivelada e a rugosidade do componente retificado diminui, isto é típico do mecanismo de microdesgaste. Para taxas de retificação maiores, quando houver predominância de quebra ou arranchamento dos grãos do rebolo, o mecanismo dominante é o macrodesgaste, a rugosidade mantém-se ou pode até aumentar ao longo percurso retificado (KLOCKE, 2009; KÖNIG, 1980).

2.8.1 Influência das velocidades de corte e de avanço na qualidade da superfície retificada no processo de retificação *creep feed*

Estudos realizados por Li *et al.* (2017); Gu *et al.* (2018); Li *et al.* (2020); Zhang *et al.* (2020) e Zhu *et al.* (2020), demonstram que as variáveis de entrada, tais como, as velocidades de corte e de avanço influenciam na qualidade da superfície retificada. Todos os trabalhos citados a seguir empregam o processo de retificação *creep feed*.

O artigo publicado por Zhu *et al.* (2020), analisou a influência das velocidades de corte e de avanço sobre a qualidade da superfície retificada. A matéria prima utilizada nos corpos de prova foi uma superliga metálica denominada IC 10. O rebolo empregado era constituído de uma mistura de óxido de alumínio marrom e branco com tamanho médio dos grãos de 80 *mesh*, o rebolo era dressado antes de cada ensaio. O fluido lubrificante aplicado era constituído a base de água.

Os ensaios empregaram velocidades de corte entre 12 e 32 m/s, uma velocidade de avanço de 150 mm/min e uma profundidade de corte de 0,5 mm. Segundo Zhu *et al.* (2020), os resultados ilustraram que o aumento da velocidade de corte de 12 para 22 m/s causa uma diminuição nos valores de rugosidade. A hipótese levantada por Zhu *et al.* (2020), é de que o aumento da velocidade de corte causa as reduções nos valores da rugosidade e das componentes de força de retificação. No entanto, em velocidades de corte acima de 22 m/s os valores de rugosidade tendem a aumentar se comparados aos valores obtidos com a v_s de 22 m/s. Segundo Zhu *et al.* (2020), isto pode ser explicado pelo aumento da quantidade de calor na zona de retificação, conseqüentemente, os valores da rugosidade aumentam e qualidade da superfície retificada piora.

Nos ensaios onde verificou a influência da velocidade de avanço aplicou v_w entre 50 e 250 mm/min, uma velocidade de corte de 22 m/s e uma profundidade de corte de 0,5 mm. Segundo Zhu *et al.* (2020), o aumento da velocidade de avanço de 50 para 150 mm/min os valores da rugosidade mantém-se praticamente estáveis, acima de 200 mm/min os valores de rugosidade crescem rapidamente.

Estudos realizados por Zhang *et al.* (2020), analisou a influência das v_s e v_w sobre a rugosidade. O corpo de prova empregado foi uma superliga metálica denominada IC 10. O rebolo empregado era constituído de uma mistura de óxido de alumínio branco e rosa em uma proporção de 1:1, com ligante resinoide e tamanho médio dos grãos de 80 *mesh*, o rebolo foi

dressado antes de cada ensaio. O fluido lubrificador aplicado era constituído de uma emulsão de óleo em água, a concentração empregada foi de 20% de óleo.

Os ensaios empregaram velocidades de corte entre 10 e 30 m/s, a v_w de 200 mm/min e uma profundidade de corte de 0,5 mm. Em conformidade com Zhang *et al.* (2020), considerando a grandeza de v_s de até 20 m/s, os valores de rugosidade tendem a diminuir. O mecanismo que explica este comportamento da rugosidade é a diminuição da espessura do cavaco não deformado. No entanto, em velocidades de corte acima de 20 m/s levaram a um aumento da rugosidade. Segundo Zhang *et al.* (2020), uma possível explicação para o fenômeno é o aumento da temperatura na zona de corte, conseqüentemente, o rebolo tem seu desgaste acentuado.

Os ensaios nos quais avaliaram a influência da velocidade de avanço sobre a rugosidade, empregaram v_w entre 50 e 300 mm/min, uma v_s de 20 m/s e uma profundidade de corte de 0,5 mm. Segundo Zhang *et al.* (2020), os valores de rugosidade são estáveis para velocidades de avanço de até 200 mm/min. Nas condições de v_w superiores a 200 mm/min, os valores de rugosidade aumentam consideravelmente.

Nos artigos publicados por Zhu *et al.* (2020) e Zhang *et al.* (2020), a principal diferença nas pesquisas foram o tipo de grão empregado nos rebolos e o tipo de fluido lubrificador.

O artigo publicado por Gu *et al.* (2018), investigou a influência das velocidades de corte e de avanço sobre a rugosidade. O corpo de prova empregado era uma superliga à base de níquel denominada DDD 6. Os rebolos empregados eram constituídos de óxido de alumínio marrom e óxido de alumínio microcristalino, com tamanhos de médio dos grãos de 80 e 100 *mesh*, respectivamente. O rebolo foi dressado antes dos testes. O fluido lubrificador aplicado era constituído de uma emulsão de óleo em água, a concentração empregada foi de 5% de óleo.

Os ensaios que avaliaram a influência da velocidade de corte, foram realizados com v_s de 25 a 35 m/s, v_w de 150 mm/min e uma profundidade de corte de 0,5 mm. De acordo com Gu *et al.* (2018), com o aumento da velocidade de corte os valores de rugosidade diminuem para ambos os rebolos empregados.

Nos ensaios de retificação que investigaram a influência da velocidade de avanço, empregaram velocidades de avanço de 150 a 210 mm/min, uma v_s de 25 m/s e uma profundidade de corte 0,5 mm. De acordo com Gu *et al.* (2018), o aumento da velocidade de avanço causa um aumento nos valores da rugosidade para ambos os rebolos empregados. Os

autores Gu *et al.* (2018), não mencionam possíveis explicações para os resultados encontrados.

O estudo realizado por Li *et al.* (2017), avaliou a influência da velocidade de corte e da velocidade de avanço sobre a qualidade da superfície retificada. O corpo de prova empregado era composto por uma liga de titânio Ti – 6Al – 4V e partículas de TiC. Os rebolos empregados eram constituídos de grãos óxido de alumínio branco, óxido de alumínio rosa fundido e óxido de alumínio microcristalino, com tamanho médio dos grãos de 80 *mesh*. Os rebolos foram dressados antes dos ensaios. O fluido lubrificante empregado era constituído de uma emulsão de óleo em água, a concentração empregada foi de 5% de óleo.

Os ensaios aplicaram velocidades de corte de 15 a 35 m/s, uma v_w de 300 mm/min e um a_p de 0,3 mm. De acordo com os resultados obtidos por Li *et al.* (2017), o aumento da velocidade de corte causa a diminuição nos valores da rugosidade, em todas as velocidades empregadas, com o emprego do rebole de óxido de alumínio microcristalino. As condições que empregaram o rebole de óxido de alumínio branco e o rebole de óxido de alumínio rosa, o aumento da velocidade de corte causou um decréscimo nos valores da rugosidade para v_s de até 25 m/s. Porém, em valores superiores de velocidade corte, foi observado um aumento nos valores da rugosidade que, segundo Li *et al.* (2017), isto pode ser explicado pelo aumento da temperatura de retificação.

Os testes de retificação aplicaram velocidades de avanço de 200 a 600 mm/min, uma v_s de 20 m/s e uma profundidade de corte de 0,3 mm. Em conformidade com Li *et al.* (2017), o aumento da velocidade de avanço causa um acréscimo nos valores da qualidade da superfície retificada, para os todos os rebolos utilizados. Segundo Li *et al.* (2017), isto pode ser atribuído ao fato de mais deformações plásticas acontecerem na superfície da peça por causa do aumento das forças de retificação.

O trabalho realizado por Li *et al.* (2020), investigou a influência das velocidades de corte e de avanço na qualidade da superfície retificada. O material do corpo de prova empregado foi uma superliga metálica denominada FGH 96. As ferramentas de corte utilizadas foram os rebolos de óxido de alumínio marrom e óxido de alumínio microcristalino, ambas com tamanho médio de grão de 80 *mesh*. O fluido lubrificante aplicado era constituído de uma emulsão de óleo em água, a concentração empregada foi de 5% de óleo.

Os testes de retificação utilizaram v_s de 20 a 35 m/s, uma v_w de 100 mm/min e um a_p de 0,5 mm. Segundo Li *et al.* (2020), o aumento da velocidade de corte do rebole causou a diminuição nos valores de rugosidade para ambos os rebolos empregados. Os ensaios de

retificação empregaram v_w de 80 a 250 mm/min, uma v_s de 25 m/s e um a_p de 0,5 mm. Segundo os autores, o aumento da velocidade de avanço causa um aumento nos valores da rugosidade.

Em nenhum dos trabalhos acima referenciados foi dada uma maior ênfase para a melhoria da lubrificação na região de corte. Mesmo empregando emulsões com maior concentração de óleo que a usual neste trabalho, não se logrou êxito em obter uma melhora da qualidade com o aumento da velocidade de corte acima de determinado limite. A piora da rugosidade com o aumento da velocidade de corte tem a explicação comum de estar relacionada com o aumento da temperatura na região de contato.

2.9 SISTEMAS DE LUBRIRREFRIGERAÇÃO

O processo de retificação gera grandes quantidades de calor, devido à grandes parcelas de deformação plástica não associada a formação de cavacos. Além disto, devido ao atrito entre o grão abrasivo e o material da peça e a elevada velocidade de corte, a temperatura na interface de contato entre o rebolo e a peça é elevada. O calor gerado e as elevadas temperaturas na região de corte levam a consideráveis solicitações térmicas à peça e na ferramenta. Na retificação, o fluido lubrificador tem funções primárias e secundárias (KLOCKE, 2009).

São duas funções primárias que tem como objetivos:

- Redução do atrito entre o grão abrasivo e a peça, com a formação de uma película de lubrificação estável; e
- Resfriar a zona de contato e a superfície da peça através da absorção e transporte do calor.

Indiretamente estas funções primárias causam a diminuição do desgaste da ferramenta e o melhor acabamento da peça.

Como funções secundárias o fluido lubrificador têm os objetivos de (KLOCKE, 2009):

- Limpeza do rebolo e da peça;
- Transporte dos cavacos;
- Estabilização da temperatura da máquina-ferramenta; e
- Proteção contra à corrosão, tanto na máquina-ferramenta quanto na peça.

Uma eficiente lubrificação não depende somente do tipo de fluido lubrificante utilizado, mas também de como o fluido é aplicado no processo de retificação. Diferentes sistemas de aplicação de fluido lubrificante foram desenvolvidos com o objetivo de melhorar o desempenho lubrificante no processo de retificação como um todo (BRINKSMEIER; HEINZEL; WITTMANN, 1999; KLOCKE, 2009).

Os sistemas de alimentação de fluidos lubrificantes são divididos em (MARINESCU *et al.*, 2016):

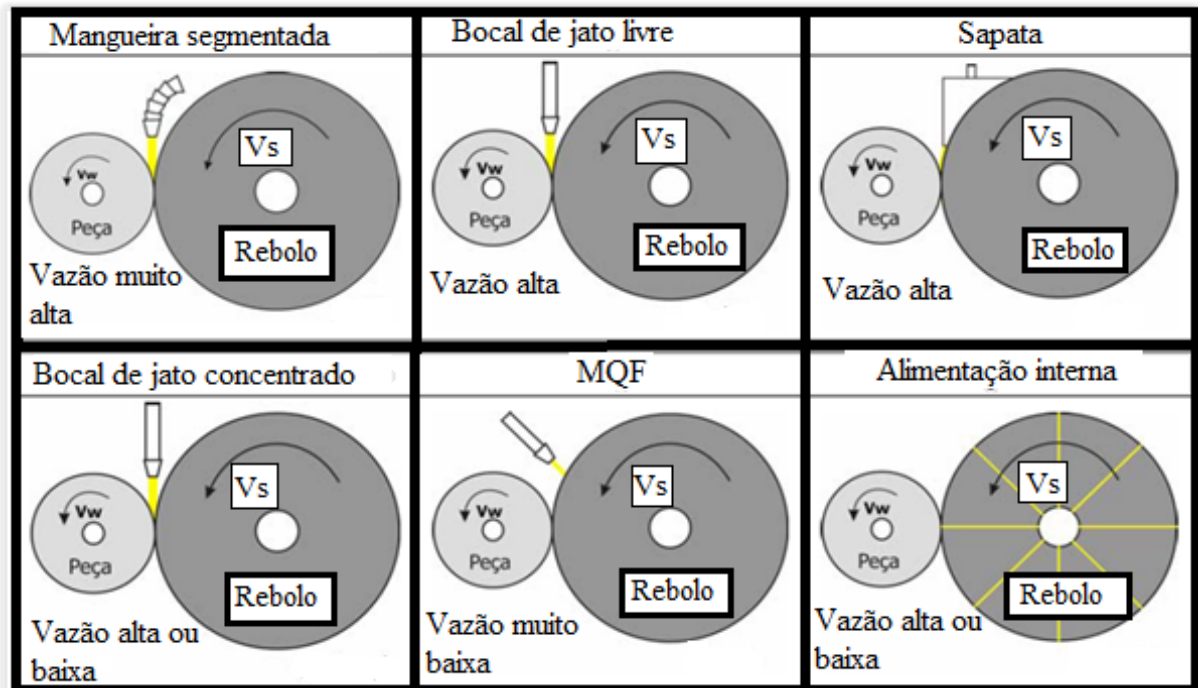
- Inundados e não inundados na região de corte;
- Convergência do jato de fluido lubrificante; e
- Geometria do bico (tubeira).

Os sistemas inundados e não inundados referem-se à quantidade de fluido lubrificante despejado na região de corte, inundando a região de corte ou não. No sistema de convergência do jato de fluido lubrificante, as concepções de alimentações de fluido recebem o nome de tuberias de jato livre, pontuais, atomizadoras, entre outras. A concepção mais comum é a tubeira de jato livre, seu formato independe da dimensão e perfil do rebolo, podendo utilizar uma mangueira segmentada (MARINESCU *et al.*, 2016).

No sistema de alimentação denominado geometria do bico, as concepções de alimentações de fluido são denominadas de tubeira em forma de agulha, tubeira do tipo sapata e tubo esmagado. Neste sistema as tuberias são projetadas não apenas para despejar o fluido na zona de corte, também servem como elemento para desviar o colchão de ar que é criado pela velocidade periférica do rebolo. Seu formato se encaixa no perfil do rebolo (MARINESCU *et al.*, 2016). Alguns estudos comprovam que esse sistema de alimentação é capaz de reduzir o desgaste do rebolo, permitir o aumento das taxas de retificação de material e reduzir dano térmico à peça (BRINKSMEIER; HEINZEL; WITTMANN, 1999; GROSS, 2019; SOUZA, 2012; WEINGÄRTNER, E., 2005).

Algumas concepções de alimentadores de fluido são denominadas de mangueira segmentada, bocal de jato livre, tubeira do tipo sapata, bocal de jato concentrado, alimentação interna e mínima quantidade de quantidade de fluido lubrificante são ilustradas na Figura 2.21. Em cada concepção existe uma respectiva vazão de fluido durante o processo de retificação, para um melhor entendimento serão citadas em ordem decrescente da vazão do fluido. (BRINKSMEIER; HEINZEL; WITTMANN, 1999).

Figura 2.21 – Concepções de alimentação e indicativo da vazão do fluido empregada na retificação.



Fonte: Adaptado de (BRINKSMEIER; HEINZEL; WITTMANN, 1999).

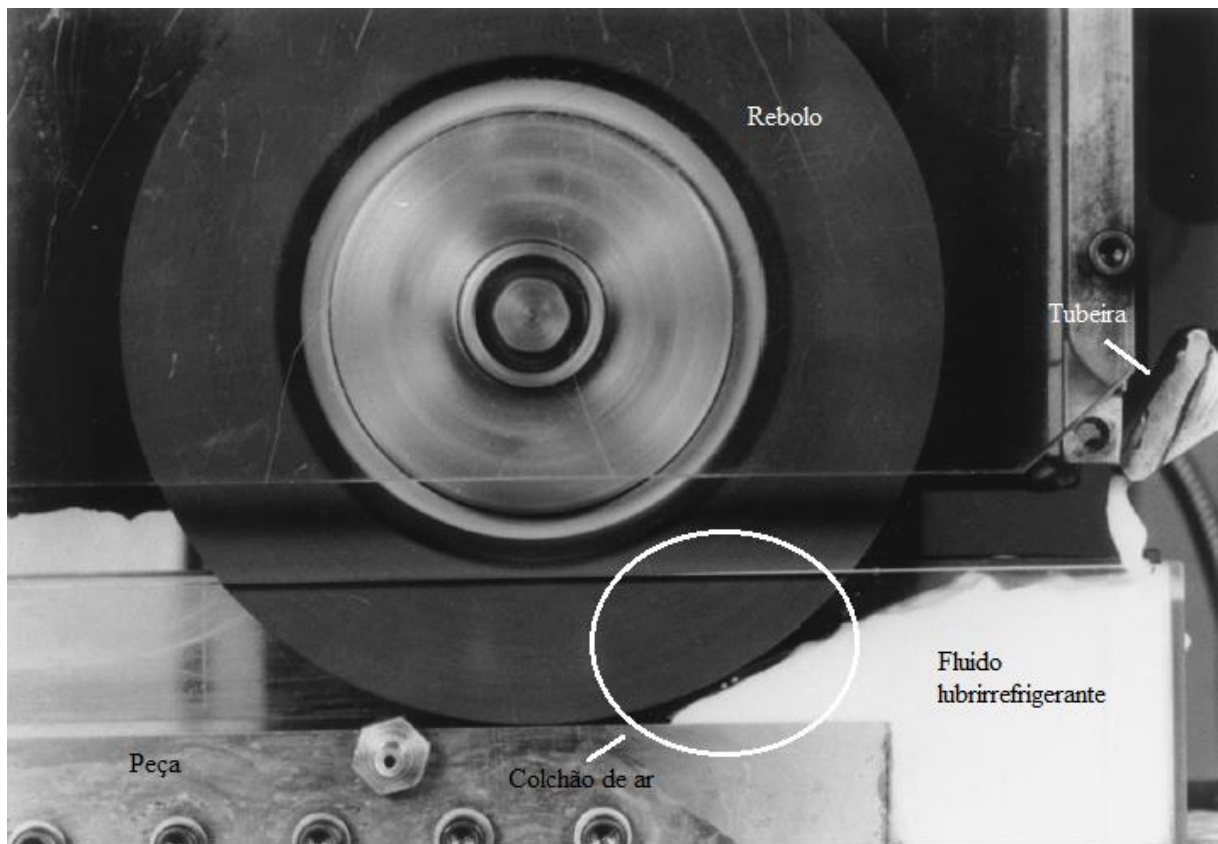
A tubeira de jato livre é a concepção de alimentação do fluido lubrificador mais empregada. Esta tubeira despeja o fluido lubrificador o mais próximo possível da zona de corte. O fluido lubrificador é direcionado para a zona de corte por um tubo, mangueira segmentada ou algo similar. Essa concepção pertence ao sistema de alimentação com inundação da região de corte (WITTMANN, 2002 *apud* WEINGÄRTNER, E., 2005; MARINESCU *et al.*, 2016).

Apesar da tubeira de jato livre ser a forma de alimentação mais utilizada, a quantidade de fluido que efetivamente atinge a região de corte é pequena. Um dos motivos desta ineficiência é a formação de um colchão de ar que se forma em torno do rebolo, devido a sua velocidade periférica, dificultando a penetração do fluido lubrificador até a região de corte. Essa condição de formação de colchão de ar é mais crítica em altas velocidades periféricas do rebolo. Em baixas velocidades de corte o colchão de ar é pouco relevante (BRINKSMEIER; HEINZEL; WITTMANN, 1999; EBBRELL *et al.*, 2000; WEBSTER *et al.*, 1995). Uma das alternativas para contornar os problemas causados pelo colchão de ar é aumentar a velocidade de saída do fluido da tubeira (mangueira e/ou bocal) para velocidades de escoamento próximas à velocidade periférica do rebolo. Para que o aumento da velocidade

de escoamento do fluido seja efetivo é necessária uma elevada vazão de fluido lubrificador e conseqüentemente ocorre um aumento da pressão de alimentação. No entanto, os altos custos e a formação de névoa nem sempre possibilitam utilização dessa alternativa (BRINKSMEIER; HEINZEL; WITTMANN, 1999). Em seus estudos Bertalan (1997), empregou uma vazão de fluido lubrificador de 21,5 l/min que combinados com a geometria da tubeira atingiu velocidades de escoamento do fluido na ordem de 34,5 m/s e uma pressão de estagnação de 7,7 bar.

Estudos realizados por Ebbrell *et al.* (2000), mostram a influência do colchão de ar que se forma em torno do rebolo na alimentação de fluido lubrificador. Foi utilizado um tanque de fluido lubrificador com “alimentação estática”, como mostra a Figura 2.22. Os ensaios foram realizados para o processo de retificação plana, empregou um rebolo de 178 mm de diâmetro externo, com 25 mm de largura de rebolo e uma velocidade de corte de 33,5 m/s. O fluido foi injetado pela primeira vez quando havia contato entre a peça e o rebolo, o rebolo estava em funcionamento. Em seguida, o rebolo foi afastado da peça com um incremento de 20 μm e foi realizada a medição de vazão do fluido que passava pela fenda formada. Resultados mostram que para distâncias de até 80 μm a vazão de fluido na fenda era nula. Isso ocorre devido ao grande fluxo de ar que envolve o rebolo e impede a entrada de fluido lubrificador na região de interesse.

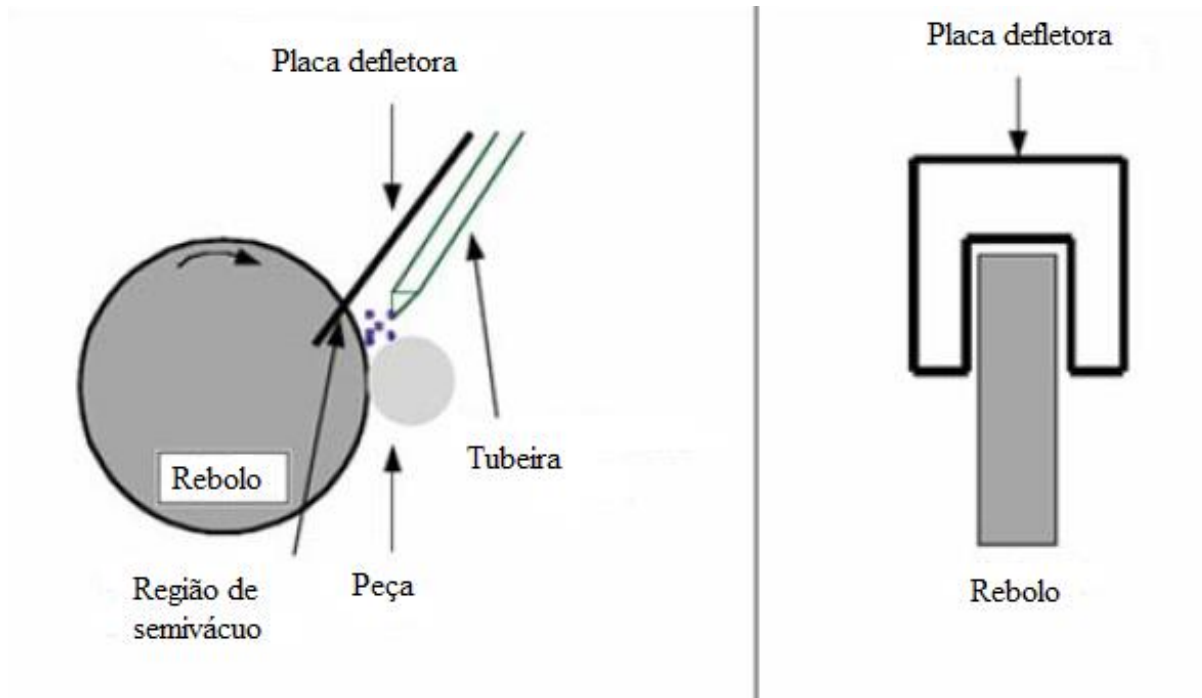
Figura 2.22 – Formação do colchão de ar que impede a entrada de fluido lubrificador na zona de contato.



Fonte: Adaptado de Ebbrell et al. (2000).

Um método simples para reduzir os efeitos do colchão de ar é com o emprego de um “elemento raspador”, que pode ser uma chapa metálica (HEUR, 1992 *apud* BRINKSMEIER; HEINZEL; WITTMANN, 1999). Esta chapa metálica deve ser aproximada do rebolo e ajustadas por retificação, assim reduzindo o efeito do colchão de ar. Devido ao seu ajuste constante em função do desgaste do rebolo, o uso deste sistema mostra-se ineficiente para a produção seriada com rebolos convencionais (BRINKSMEIER; HEINZEL; WITTMANN, 1999). A Figura 2.23 ilustra a aplicação do método que utiliza a placa defletora (BIANCHI *et al.*, 2003 *apud* MACEDO, 2008).

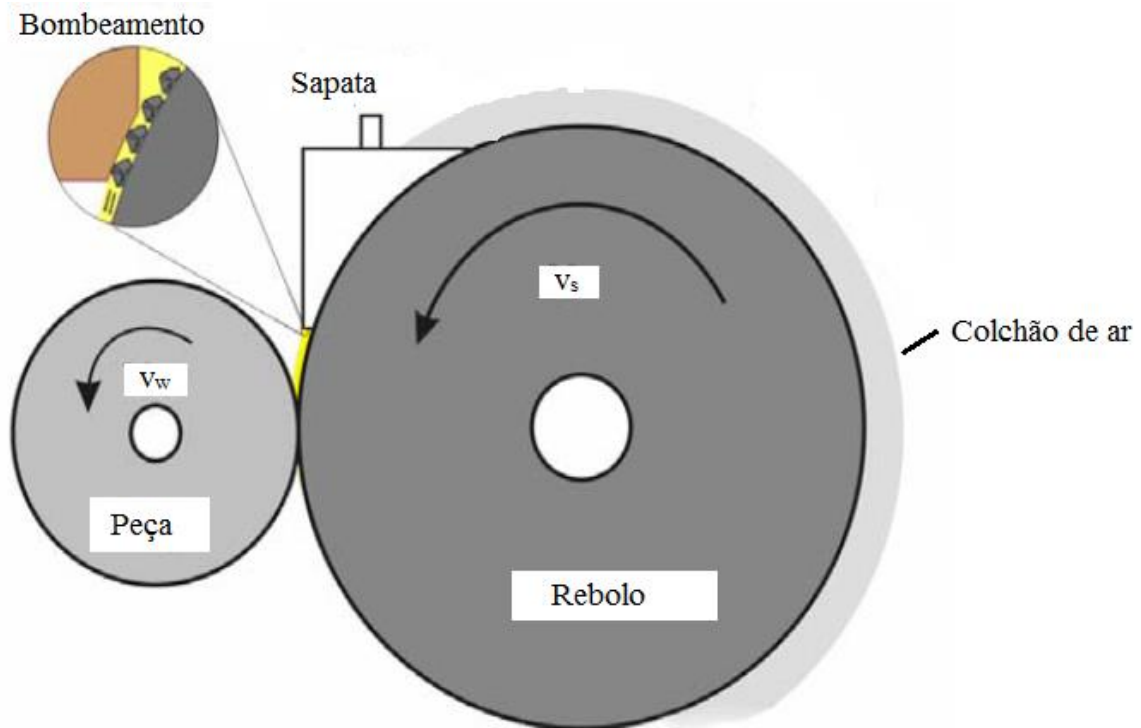
Figura 2.23 – Sistema com placa defletora.



Fonte: Adaptado de Bianchi *et al.* (2003) *apud* Macedo (2008).

A combinação de um “elemento raspador” e uma alimentação efetiva de fluido lubrificante levou ao desenvolvimento das tubeiras do tipo sapata, estas têm como funções servir como barreira ao colchão de ar e também direcionar o fluido lubrificante até a região de corte de uma maneira mais efetiva (BRINKSMEIER; HEINZEL; WITTMANN, 1999; KLOCKE, 2009; WEBSTER *et al.*, 1995). A tubeira do tipo sapata deve ter o perfil mais próximo possível do raio de curvatura do reboleto. O posicionamento da tubeira em relação ao reboleto deve ser feito com a menor folga possível a fim de minimizar a perda de fluido pelas laterais do reboleto e garantir o desvio do colchão de ar. A Figura 2.24 ilustra esquematicamente o princípio de atuação da tubeira do tipo sapata no processo de alimentação de fluido lubrificante e a montagem entre o reboleto, a sapata e a peça (LOPES, 2007; SOUZA, 2012; WEINGÄRTNER, E., 2005).

Figura 2.24 – Emprego da sapata na alimentação de fluido lubrificador.

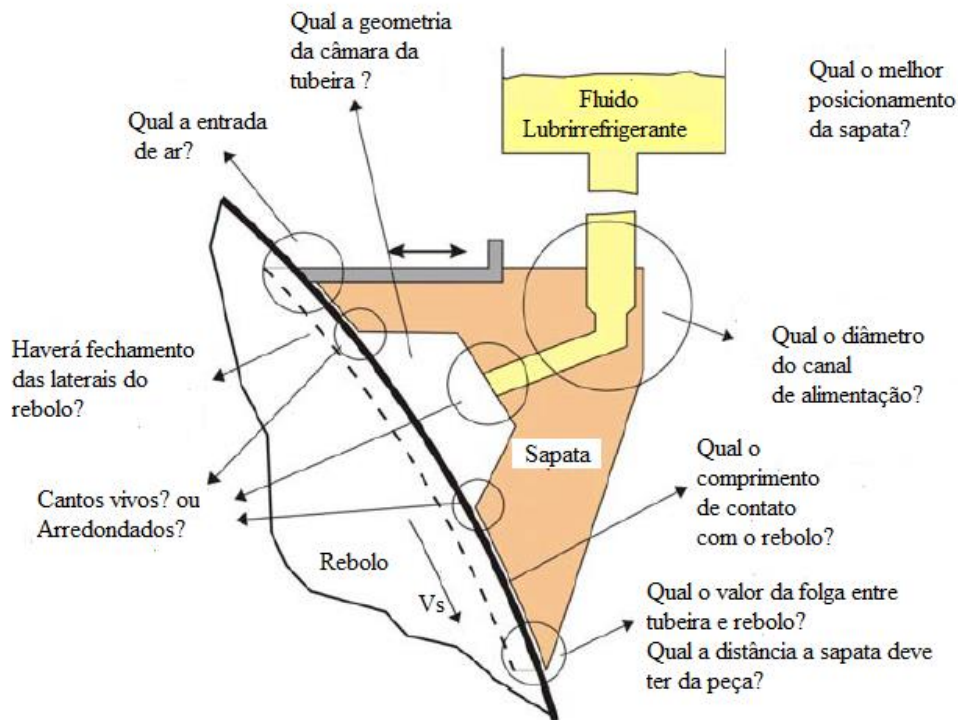


Fonte: Adaptado de Weingärtner, E. (2005).

A desvantagem da utilização de tubeira do tipo sapata é sua inflexibilidade geométrica. Por este motivo, elas são menos recomendáveis para o uso em operações de retificação, onde as dimensões e a forma do rebole mudam de maneira relativamente rápida devido ao alto desgaste. É recomendado o uso da tubeira do tipo sapata em operações de retificação cilíndrica externa com rebolos superabrasivos e/ou em altas velocidade de corte (KLOCKE, 2009).

A literatura mostra que inúmeras pesquisas foram e continuam sendo realizadas quanto ao uso de tubeiras do tipo sapata. Segundo Beck (2002) *apud* Weingärtner, E. (2005), ainda surgem algumas dúvidas relacionadas principalmente com o posicionamento e geometria da sapata, como mostrado na Figura 2.25.

Figura 2.25 – Perguntas frequentes relacionadas a geometria da sapata.



Fonte: Adaptado de Beck (2002) *apud* Weingärtner, E. (2005).

2.10 EMPREGO DO SISTEMA DE LUBRIRREFRIGERAÇÃO COM TUBEIRAS DO TIPO SAPATA NA RETIFICAÇÃO

O emprego de tubeiras do tipo sapata traz uma série de benefícios aos processos de retificação em comparação com o uso de tubeiras de jato livre (LOPES, 2007; SOUZA, 2012; WEINGÄRTNER, E., 2005; GROSS, 2019). Neste sentido, desde 2005 o Laboratório de Mecânica de Precisão da Universidade Federal de Santa Catarina (LMP – UFSC) vem realizando estudos com a finalidade de desenvolver e aplicar industrialmente as tubeiras do tipo sapata nos processos de retificação.

O estudo realizado por Weingärtner, E. (2005), utilizou os seguintes parâmetros de entrada: processo de retificação cilíndrica externa, material da peça de ferro fundido nodular, rebolos de cBN com ligante resinoide e vitrificado e dois sistemas de alimentação de fluido lubrificante por tubeiras de jato livre e do tipo sapata. Como variáveis do processo utilizou: velocidade de corte, pressão e vazão do fluido lubrificante, folga entre tubeira e rebolo, entre outros. Como resultado do processo avaliou a rugosidade, o desgaste dos rebolos e a relação de remoção G .

Nos ensaios realizados com o emprego do rebolo de cBN com ligante resinoide e diferentes sistemas de alimentação de fluido lubrificador. A primeira diferença observada entre os sistemas de alimentação de fluido com a tubeira de jato livre e a tubeira do tipo sapata é a diminuição da quantidade de faíscas geradas durante o processo, como mostra a Figura 2.26. No ensaio com a tubeira de jato livre a vazão de fluido lubrificador foi quatro vezes maior que no ensaio da sapata, 60 l/min e 15 l/min, respectivamente. Para ambos os ensaios a taxa de retificação específica foi de $10 \text{ mm}^3 / (\text{mm} \cdot \text{s})$, o uso da tubeira do tipo sapata causa uma diminuição quase por completo na formação das faíscas. Isto reforça a afirmação de que a função da sapata é de reduzir os efeitos do colchão de ar que se forma em torno do rebolo e também de direcionar efetivamente o fluido até a região de trabalho. Os cavacos de ferro fundido ao entrarem em contato com o ar do colchão de ar na retificação com jato livre entram em combustão, caracterizado pelo forte faiscamento. Já no emprego da tubeira do tipo sapata, o colchão de ar é evitado e o fluido lubrificador chega à região de formação de cavacos e os cavacos formados são eficientemente refrigerados pela ação do fluido lubrificador (WEINGÄRTNER, E., 2005).

Figura 2.26 – Redução da quantidade de faíscas empregando diferentes sistemas de alimentação de fluido.



Fonte: Weingärtner, E. (2005).

Os ensaios que avaliaram a influência da folga entre a sapata e o rebolo sobre o desgaste radial do rebolo. Empregaram rebolo de cBN com ligante resinoide, uma taxa de retificação de material de $10 \text{ mm}^3/(\text{mm} \cdot \text{s})$ e uma alimentação de fluido lubrificador com

tubeira do tipo sapata. No ensaio de número quatro a tubeira ficou afastada à distância de 0,5 mm do rebolo e a vazão de fluido empregada foi de 37 l/min. No ensaio de número cinco a tubeira ficou encostada no rebolo e a vazão de fluido empregada foi de 30 l/min. A pressão de alimentação do fluido lubrificante foi de 2 bar para ambos os ensaios citados (WEINGÄRTNER, E., 2005).

De acordo com Weingärtner, E. (2005), para um volume retificado específico de 60.900 mm³/mm, o desgaste radial do rebolo foi de 8,5 µm no ensaio quatro e 8 µm no ensaio cinco. O que corresponde a valores de relação de remoção G de 5.702 e 6.057. O resultado mostrou que o ajuste constante da sapata pode até tornar-se desnecessário. Por exemplo, para cada intervalo de perfilamento o raio do rebolo é reduzido em 30 µm (desgaste e perfilamento), para que a folga alcance um valor de 0,5 mm seriam necessários 17 ciclos de perfilamento. Se a principal preocupação fosse o ajuste constante da sapata, os ensaios realizados mostraram que o total de ciclos correspondem a um volume específico retificado de aproximadamente 1 milhão de mm³/mm de material removido da peça, assim mostrando que é possível sua aplicação em uma linha de produção.

Os testes que avaliaram a influência da velocidade de corte sobre o desgaste radial do rebolo, empregou um rebolo de cBN com ligante resinoide. No ensaio de número seis a v_s empregada foi de 60 m/s e a vazão de fluido empregada foi de 30 l/min. No ensaio de número sete a v_s empregada foi de 80 m/s e a vazão de fluido empregada foi de 39 l/min. Em ambos os ensaios mencionados a tubeira ficou encostada no rebolo e a pressão de alimentação do fluido lubrificante foi de 2 bar.

Em conformidade com Weingärtner, E. (2005), para um volume retificado específico de 60.900 mm³/mm, o desgaste radial do rebolo foi de 8 µm no ensaio seis e 6 µm no ensaio sete. O que corresponde a valores de relação de remoção G de 6.057 e 8.117 respectivamente. O resultado mostrou que o aumento da velocidade de corte tem como consequências a diminuição do desgaste radial do rebolo e o aumento na vazão de fluido lubrificante. Para uma mesma taxa de retificação, o aumento da velocidade de corte causa uma diminuição da espessura de cavaco não deformado, conseqüentemente, tem efeito positivo sobre as componentes de força de corte. Um menor desgaste radial do rebolo é explicado pelo aumento da velocidade de atrito, um mesmo gume atua com maior frequência, que é compensado pela diminuição do tempo de atuação de um gume e por uma menor força de corte.

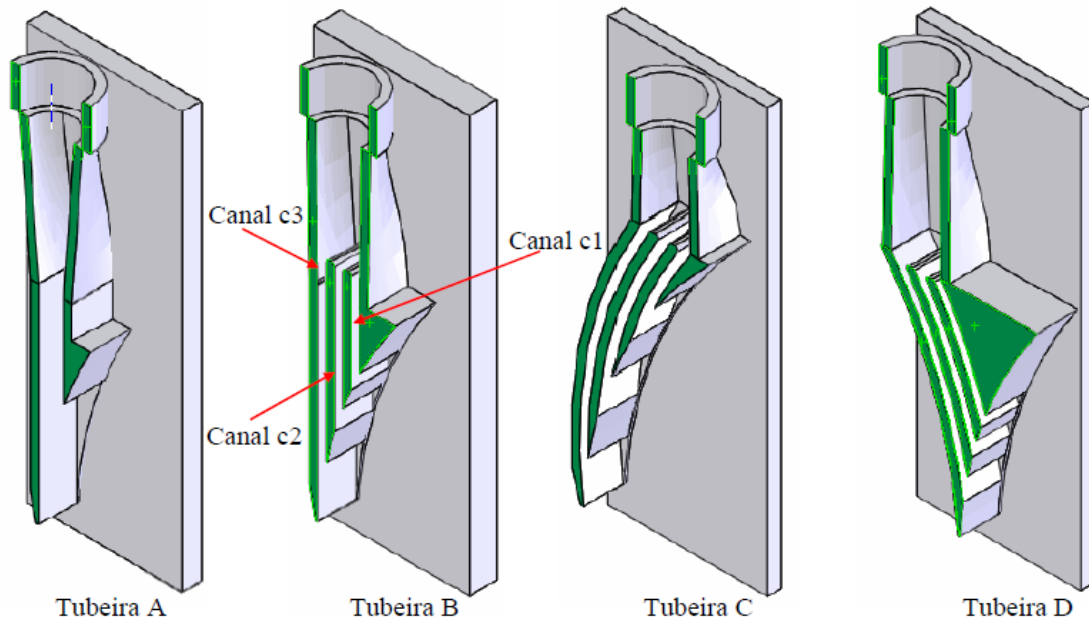
O estudo que avaliou a influência do tipo de tubeira de alimentação de fluido lubrificante na qualidade da superfície retificada. Os ensaios foram realizados com as

tubeira de jato livre e tubeira do tipo sapata, a sapata ficou encosta no rebolo. A pressão de alimentação do fluido foi utilizada como um indicador para cada ensaio. Utilizou como parâmetros de entrada para ambos os tipos de tubeira uma velocidade de corte de 60 m/s e uma taxa específica de remoção de material de 15 mm³/ (mm.s). Conforme Weingärtner, E. (2005), os resultados mostraram que os valores da rugosidade em Ra e Rz foram menores com o emprego da tubeira do tipo sapata e que a pressão de alimentação não tem influência significativa sobre a rugosidade medida.

O Estudo realizado por Lopes (2007), denominado “ Análise do comportamento do fluxo de fluido lubrificador em tubeiras do tipo sapata para a retificação de alta velocidade”, avaliou a influência dos parâmetros de entrada: velocidade periférica do rebolo, topografia do rebolo, abertura da fenda entre tubeira e rebolo e da vazão do fluido sobre o escoamento do fluido no interior da tubeira sobre a entrada de ar na fenda entre rebolo e tubeira.

Nos ensaios realizados foram empregados quatro tipos de tubeira do tipo sapata, conforme mostra a Figura 2.27. As sapatas apresentam diferentes formatos de canais e diferentes áreas de contato efetiva com o rebolo. As sapatas devem possuir uma curvatura semelhante à do rebolo. A principal função da sapata é desviar o colchão de ar criado pela velocidade periférica do rebolo e garantir que o fluido lubrificador chegue à zona de corte, sem a presença de ar. E também é desejado que o fluxo do fluido no interior da sapata seja de forma laminar, para que não ocorram os fenômenos de turbulências e bolhas de cavitação.

Figura 2.27 – Tipos de tubeiras do tipo sapata com diferentes formatos de canais.



Fonte: Lopes (2007).

As tubeiras foram fabricadas em acrílico translúcido, possibilitando o estudo do escoamento que foi realizado utilizando uma ferramenta da simulação numérica e da filmagem do escoamento do fluido acrescido de purpurina no interior da tubeira

Segundo Lopes (2007), o aumento da fenda entre rebolo e tubeira diminui a eficiência do bombeamento de fluido até à zona de corte e diminui a velocidade média do escoamento. Dependendo do tamanho da abertura da fenda a sapata não elimina o colchão de ar e o fluido chega à zona de corte de maneira ineficiente.

Foram realizados ensaios de consumo de energia no eixo do rebolo, pois é necessário determinar a potência consumida pelo rebolo para impulsionar o fluido da região em que o fluido entra em contato com o rebolo até a saída da tubeira. Os resultados dos ensaios mostram que a energia consumida sempre manteve-se abaixo de 2 kW (LOPES, 2007). Considerando que a máquina-ferramenta empregada nos ensaios deste trabalho tem uma potência instalada de 15 kW, o consumo de até 2 kW da energia do eixo do rebolo representa 15 % da potência total instalada.

A variação da abertura da fenda exerce influência sobre o escoamento do fluido e a entrada de ar na fenda entre rebolo e tubeira. Segundo Lopes (2007), a tubeira B com três canais retos ([Figura 2.27](#)) apresentou os melhores resultados em relação aos parâmetros avaliados.

O Estudo realizado por Souza (2012), denominado “Desgaste radial de rebolos de cBN com aplicação de lubrificador por tubeira tipo sapata”. Analisou a influência da fenda entre rebolo e tubeira e a influência da vazão do fluido lubrificante sobre o desgaste radial do rebolo, a relação de remoção G e a qualidade da superfície retificada.

Os ensaios de número dois e três utilizaram vazões de fluido lubrificante de 10 e 20 l/min, respectivamente em ambos os ensaios a abertura de fenda foi de 0,5 mm. Segundo Souza (2012), para uma mesma abertura de fenda o aumento da vazão resultou no aumento do desgaste radial do rebolo e no aumento nos valores de rugosidade.

Os ensaios de número um e dois empregaram as aberturas de fenda de 0,3 e 0,5 mm, respectivamente e ambos os experimentos a vazão de fluido lubrificante foi de 10 l/min. Segundo Souza (2012), para uma mesma vazão de fluido o aumento da abertura de fenda resultou no aumento do desgaste radial do rebolo, na estabilização na rugosidade em R_a e no aumento da rugosidade R_z . Com base nos resultados de desgaste radial do rebolo e da rugosidade, observou-se que o valor de abertura da fenda deve ser feito em conjunto com a vazão do fluido.

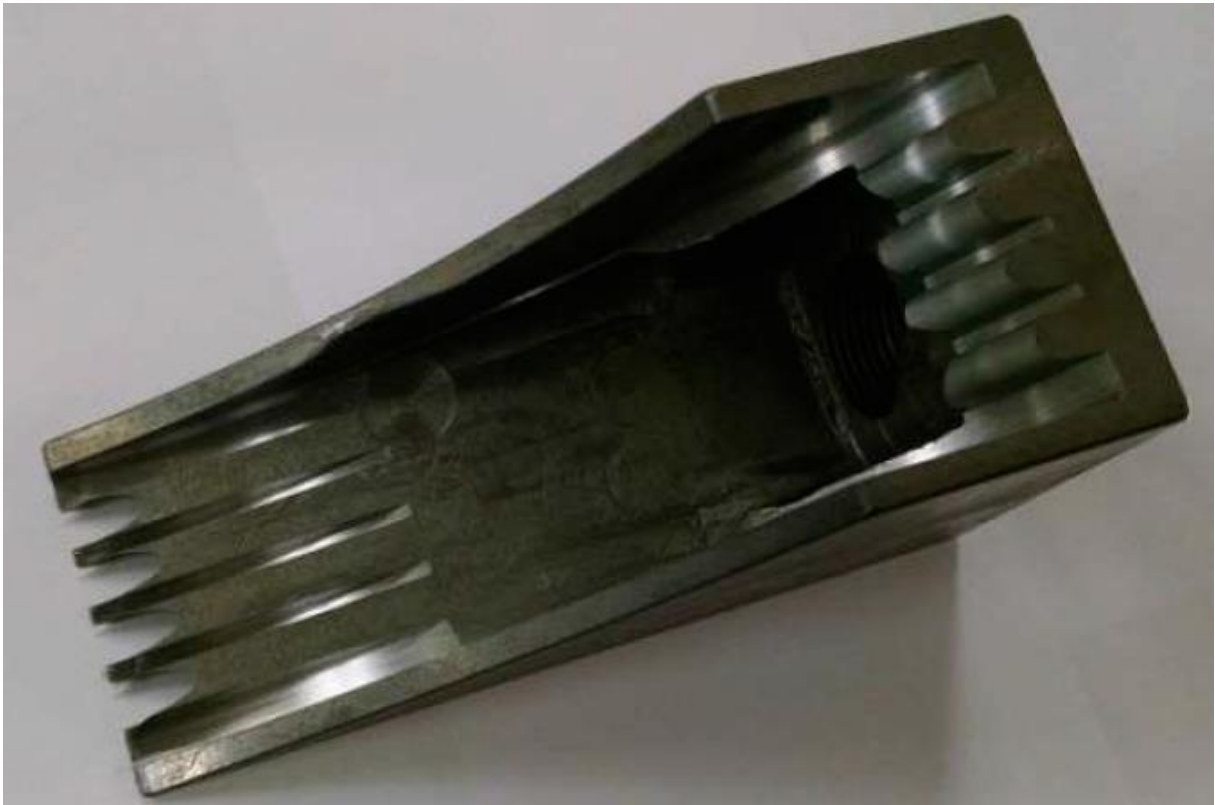
O Estudo realizado por Gross (2019), denominado “Lubrificação por tubeira do tipo sapata na retificação *creep feed* de um aço ferramenta sinterizado temperado e revenido com um rebolo de óxido de alumínio”. O trabalho avaliou a influência da alimentação de fluido lubrificante com tubeiras de jato livre e do tipo sapata e da velocidade de avanço na retificação *creep feed* sobre a zona termicamente afetada e a rugosidade do componente retificado.

Segundo Gross (2019), o processo de retificação das lamelas era executado com uma velocidade de avanço de 70 mm/min com o sistema de lubrificação de jato livre. A [Figura 2.7](#) ilustra um componente retificado com uma v_w de 80 mm/min com o sistema de lubrificação de jato livre que evidencia a “queima” por retificação do componente (*grinding burn*), dano térmico é visível a olho nu.

A necessidade do aumento da produção dos componentes no fabricante seria possível pela aquisição de uma nova retificadora, uma vez que o aumento da velocidade de avanço de 70 para 80 mm/min causou danos ao componente retificado. O estudo de Gross (2019), buscou por alternativas de aumento de produtividade sem a necessidade de comprar outro equipamento. A lubrificação por tubeira do tipo sapata foi levada em consideração e foi desenvolvido um protótipo de tubeira do tipo sapata para ser empregado na retificação das lamelas de inserção. O protótipo foi fabricado em aço 1020 empregando os processos de

fabricação de fresamento, remoção por descargas elétricas e retificação, a Figura 2.28 ilustra a tubeira protótipo empregada. A geometria da tubeira adjacente à peça pré-usinada foi cortada por WEDM. A geometria da tubeira do lado do rebolo foi obtida aproximando a tubeira ao rebolo (GROSS, 2019).

Figura 2.28 – Protótipo da tubeira do tipo sapata para retificar lamelas de inserção.

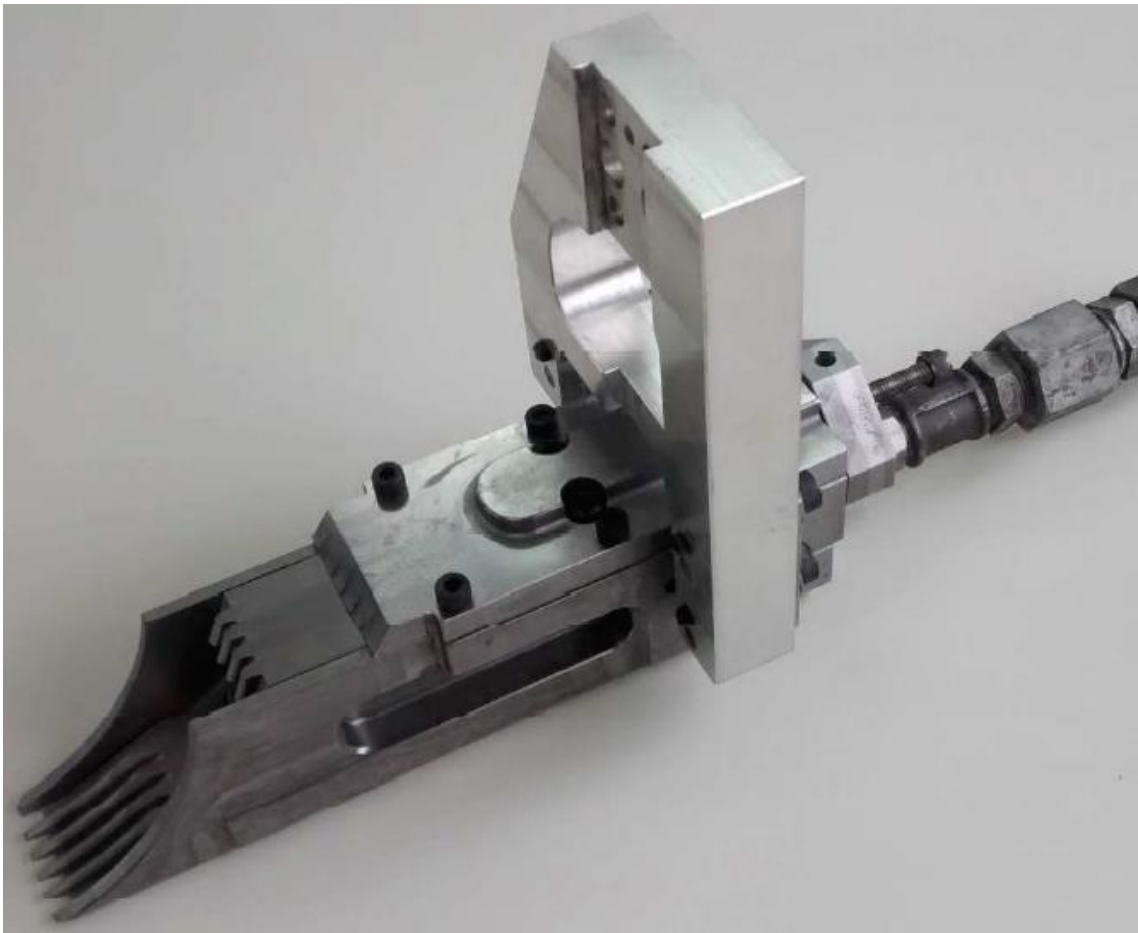


Fonte: Gross (2019).

Os ensaios realizados com a tubeira protótipo utilizou velocidade de corte de 23 m/s e velocidades de avanço entre 70 a 175 mm/min, sendo que a velocidade de avanço foi limitada pelo pequeno número de amostras preparadas para os ensaios iniciais. Quando a lubrificação não é eficiente o componente retificado sofre danos metalúrgicos e térmicos, em alguns casos este dano térmico pode ser visível a olho nu e normalmente apresenta uma cor “azulada” no componente retificado, quando ocorre o “azulamento” o componente é sucateado. Utilizando a tubeira protótipo não houve evidências do “azulamento” nas peças, em nenhuma das velocidades de avanço empregadas. As amostras retificadas nestes ensaios foram analisadas metalograficamente e comprovaram que não ocorreram danos térmicos nos componentes (GROSS, 2019).

Como a retificação com tubeira do tipo sapata protótipo permitiu um grande aumento na velocidade de avanço, demonstrou ser uma alternativa para o aumento da produção à um custo relativamente baixo, foi projetada uma outra concepção de tubeira do tipo sapata para uso industrial, com recursos de ajuste da fenda de trabalho e intercambiabilidade de componentes de desgaste e para atender as diferentes geometrias de lamelas de inserção, a Figura 2.29 ilustra a tubeira do tipo sapata e sua interface de montagem.

Figura 2.29 – Tubeira do tipo sapata e interface de montagem.



Fonte: Gross (2019).

Após a montagem da tubeira do tipo sapata para uso industrial foram definidos novos parâmetros de ensaios. Em todos os ensaios o valor da abertura da fenda entre rebolo e sapata foi mantida em valores menores que 0,5 mm. Os parâmetros de entrada variados foram a taxa de retificação (Q_w), pela variação da velocidade de avanço (v_w) e a profundidade de corte (a_e), que determina a área retificada (a_{ret}). A velocidade de corte do rebolo foi mantida constante em 23 m/s em todos os ensaios. Os parâmetros de saída avaliados foram a taxa de retificação

específica média ($Q'_{w\ med}$), a taxa de desgaste média G (G_{med}), a potência consumida (P_c), rugosidade (R_a) e a zona termicamente afetada (GROSS, 2019).

Com o emprego do sistema de alimentação de fluido lubrificador com tubeira do tipo sapata foi possível aumentar a velocidade de avanço (v_w) de 70 mm/min para até 325 mm/min. A taxa de retificação específica média ($Q'_{w\ med}$) que era de 0,97 mm³/(mm.s) pode ser aumentada para 4,52 mm³/(mm.s), representando um aumento de 366 %. A taxa de retificação média ($Q_{w\ med}$) mostra um comportamento semelhante a taxa de retificação específica média, pois é calculada com base nos mesmos parâmetros entrada. A taxa de retificação média mostrou um valor inicial foi de 28,20 mm³/s e um valor final de 130,96 mm³/s (GROSS, 2019).

A taxa média de desgaste do rebolo é influenciada diretamente pela variação da geometria do perfil retificado e determina o número de dressamentos necessários para garantir a qualidade geométrica do componente retificado. O aumento da taxa de retificação não demonstrou variações significativas no desgaste do rebolo para cada lamela de inserção retificada. O desgaste do rebolo não demonstrou uma tendência de aumento ou diminuição com o aumento da velocidade de avanço. O comportamento do desgaste do rebolo nas diferentes velocidades de avanço pode ser explicado pela variação de dureza (não controlada) das lamelas retificadas.

A rugosidade foi medida nas lamelas retificadas ao longo do percurso retificado, na posição de entrada e saída do rebolo. Em todos os ensaios, os valores de rugosidade medidos na posição final foram menores que na posição inicial. Isto demonstra que ao longo do percurso de 250 mm, os grãos do rebolo foram achatados e o número de gumes cinemáticos aumentou ao longo do percurso (GROSS, 2019). Este comportamento da rugosidade é predominante para o mecanismo de microdesgaste dos grãos do rebolo (KLOCKE, 2009).

Para trabalhos futuros Gross (2019), sugeriu o aumento da velocidade de corte com o intuito de aumentar número de gumes cinemáticos e, conseqüentemente, a diminuição da rugosidade. Propôs a aplicação do rebolo com tamanho médio de grãos de 90 *mesh*, também nas operações de acabamento. Caso a rugosidade obtida com o rebolo de 90 seja de mesmo valor ou inferior a rugosidade obtida para o rebolo de 120 *mesh*, é possível concluir que pode ser empregado apenas o rebolo de 90 *mesh* em ambas as operações.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O capítulo apresenta os equipamentos, os materiais e os métodos empregados para a realização dos ensaios de retificação *creep feed* e as respectivas medições de rugosidade e de desgaste do rebolo. A metodologia apresentada neste estudo tem como base as pesquisas realizadas pelo Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC. A execução experimental e as medições aconteceram nas dependências de uma empresa metal-mecânica do setor de compressores herméticos, localizada em Joinville – SC.

3.1 MÁQUINA-FERRAMENTA

Os ensaios de retificação *creep feed* foram realizados em uma retificadora plana CNC, do fabricante Jung modelo C740D, Ilustrada na Figura 3.1. As principais informações técnicas da máquina-ferramenta estão disponíveis na Tabela 1.

Figura 3.1 – Máquina-ferramenta.



Fonte: Gross (2019).

Tabela 1 – Informações técnicas na retificadora Jung modelo C740D.

Comprimento da mesa	800 mm
Largura da mesa	430 mm
Máxima distância da mesa ao centro do eixo	735 mm
Peso máximo sobre a mesa	800 kg
Velocidade máxima periférica do rebolo	35 m/s
Velocidade máxima de avanço da mesa	1 m/min
Potência do motor de acionamento do rebolo	15 kW
Comando numérico	Siemens Sinumerick

Fonte: Manual da máquina-ferramenta Jung.

Para condicionar o rebolo, a máquina-ferramenta dispõe um sistema de dressamento que é acionado através do CNC da própria máquina. O suporte no qual está fixado o dressador é munido de um eixo de rotação e os demais deslocamentos são realizados segundo os eixos de movimentação do cabeçote porta rebolo. Os parâmetros de dressamento são programados especificamente para cada operação e podem ser alteradas pelo técnico operador da máquina-ferramenta.

3.2 FERRAMENTA DE CORTE

As ferramentas avaliadas no decorrer dos ensaios serão as mesmas empregadas na aplicação industrial de retificação das lamelas de inserção, sendo dois rebolos retos de óxido de alumínio (Al_2O_3). A principal diferença entre os rebolos empregados nesta pesquisa é a sua granulometria (tamanho médio do grão) que foram de 90 e 120 *mesh*. A Tabela 2 mostra as especificações técnicas dos rebolos.

Tabela 2 – Especificações técnicas dos rebolos.

	Rebolo de 90 mesh	Rebolo de 120 mesh
Especificação técnica completa do rebolo	406,4 x 50,8 x 127 38A 90 D28 VSPCF	406,4 x 50,8 x 127 38A 120 D28 VSPCF
Diâmetro externo		406,4 mm
Largura		50,8 mm
Diâmetro do furo		127,0 mm
Tipo de grão		38 A – Óxido de alumínio
Tamanho do grão (granulometria)	90 <i>mesh</i> - médio	120 <i>mesh</i> - médio
Estrutura do rebolo	D28 – Estrutura aberta e poros grandes	D28 – Estrutura aberta e poros grandes
Tipo de ligante	VSPCF - Vitrificado	VSPCF - Vitrificado

Fonte: Catálogo técnico da Saint-Gobain Abrasives.

3.3 FERRAMENTA DE DRESSAMENTO

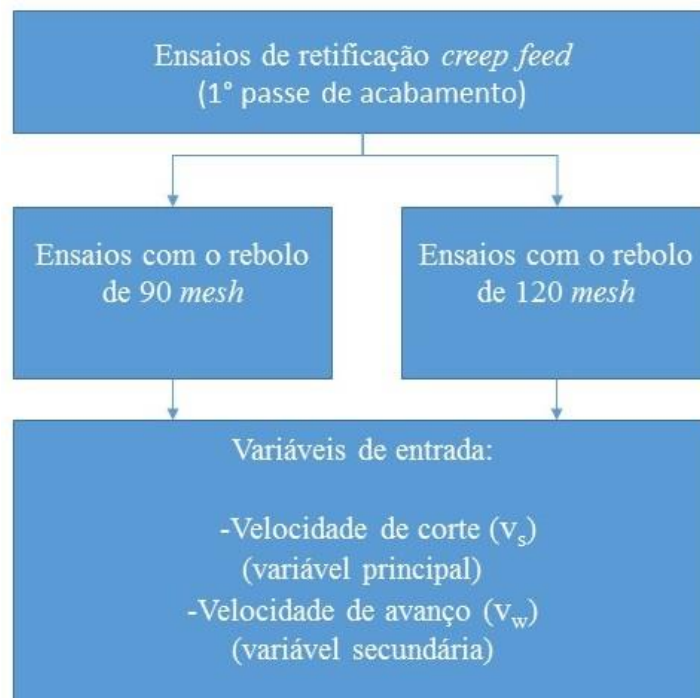
O dressador empregado para o perfilamento e o dressamento dos rebolos foi um diamante de ponta única perfilado, fabricado pela empresa Dimas ferramentas. É constituído por um diamante natural, perfilado e brasado a uma haste de aço SAE 1020, ilustrado na [Figura 2.15](#). A haste do dressador tem duas facetas de referência que servem para encaixar e posicionar o dressador no cabeçote da máquina-ferramenta. Para permitir o perfilamento e dressagem do rebolo, a ponta da haste apresenta uma geometria mais aguda que a normalmente empregada em ferramentas perfiladas (GROSS, 2019).

3.4 DESENVOLVIMENTO DOS ENSAIOS

3.4.1 Determinação das variáveis de entrada alteradas nos ensaios de retificação

As velocidades de corte e de avanço são as variáveis de entrada que serão avaliadas no escopo deste trabalho. O fluxograma dos ensaios é mostrado na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Sequência de realização dos ensaios.



Fonte: Autor.

Este trabalho tem como base dados coletados por ocasião do trabalho de mestrado de Gross (2019) e complementados em ensaios específicos para ampliar o entendimento do processo, conforme sugestão do autor supracitado em sua dissertação. Enquanto Gross (2019), em seu trabalho de mestrado ocupou-se apenas com as características do processo e resultado de trabalho na operação de desbaste das lamelas de inserção (operação com a maior taxa de retificação e mais crítica em termos de danos térmicos no componente), efetuada com o rebolo de 90 *mesh*, este estudo busca abranger a etapa de acabamento.

Na primeira etapa deste estudo foram realizados ensaios predominantemente com o rebolo de 90 *mesh*. A segunda parte dos ensaios é realizada predominantemente com rebolos de 120 *mesh*, para fins comparativos, com os resultados obtidos com o rebolo de 90 *mesh*. Todos os ensaios foram realizados no primeiro passe de acabamento das lamelas de inserção. O intuito de realizar estes ensaios nesta etapa visa poder aproveitar os corpos de prova na aplicação industrial, efetuando o segundo passe de acabamento nas condições de retificação ora empregadas na produção com o rebolo de granulometria de 120 *mesh*. A Tabela 3 mostra os parâmetros de entrada aplicados nos ensaios.

Tabela 3 - Parâmetros utilizados nos respectivos ensaios.

		v_s (m/s)	v_w (mm/min)	Granulometria do rebolo (mesh)	Q_w (mm ³ /min)	Área retificada (mm ²)
Primeira parte	Ensaio 1	23	250		3625	
	Ensaio 2	25	250		3625	
	Ensaio 3	30	250	90	3625	14,74
	Ensaio 4	30	160		2358,4	
Segunda parte	Ensaio 5	23	250		3625	
	Ensaio 6	30	250	120	3625	14,74
	Ensaio 7	30	160		2358,4	

Fonte: Autor.

3.4.2 Parâmetros de dressamento

Os parâmetros de dressamento empregados nos rebolos de 90 e 120 *mesh*, na devida ordem, estão descritos na Tabela 4. Estes parâmetros empregados seguem as especificações da empresa onde ocorreram os ensaios. O rebolo era dressado antes de cada ensaio realizado.

Tabela 4 – Parâmetros de dressamento aplicados.

	Profundidade de corte (a_{ed})	Velocidade de avanço axial (v_{fad})	Velocidade periférica do rebolo (v_s)
Rebolo de 90 <i>mesh</i>	0,06 mm	500 mm/min	20 m/s
Rebolo de 120 <i>mesh</i>	0,06 mm	300 mm/min	23 m/s

Fonte: Autor.

3.4.3 Material dos corpos de prova

A matéria prima empregada na fabricação das chapas de lamelas, foi um aço ferramenta temperado e revenido obtido pelo processo de metalurgia do pó. O material apresenta uma dureza (média) de 55 HRC obtida através do tratamento térmico de tempera com aquecimento até uma temperatura de 1025° C e posterior resfriamento até 540° C. O tratamento de revenimento posterior ocorreu a uma temperatura de 550° C. A composição química, as propriedades físicas e mecânicas do material são apresentados nas Tabelas 5 e 6, respectivamente (GROSS, 2019).

Tabela 5 – Composição química do material.

Elemento	C	Cr	V	Mo
Concentração wt. %	0,8	7,5	2,8	1,3

Fonte: Fornecedor do aço sinterizado.

Tabela 6 – Propriedades físicas e mecânicas do material.

Módulo de elasticidade	207.000 MPa
Densidade	7,8 g/cm ³
Condutividade térmica	24,2 W/m.k
Tenacidade ao Impacto	113 (J)

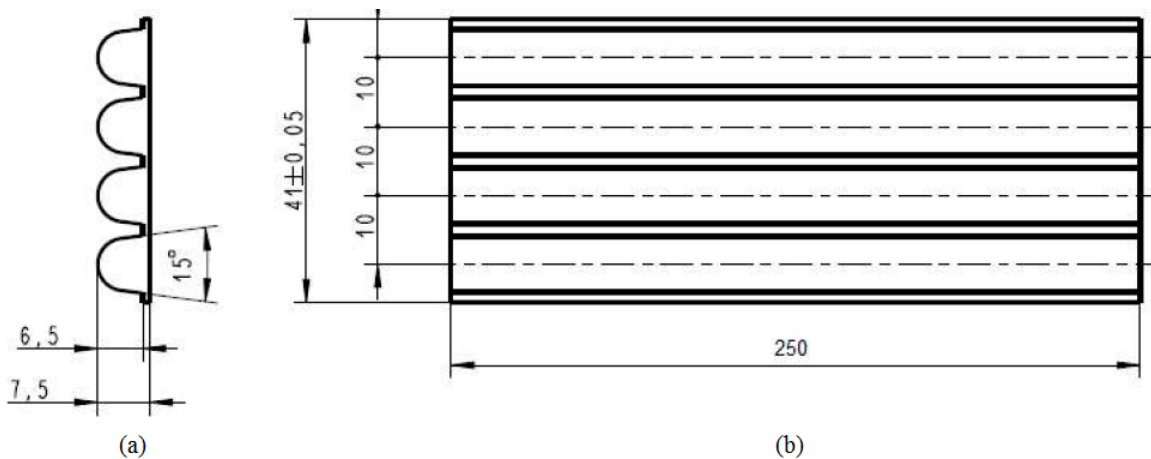
Fonte: Fornecedor do aço sinterizado.

3.4.4 Geometria dos corpos de prova

Os corpos de prova são as próprias chapas de lamelas empregadas na fabricação industrial de lamelas de inserção. O formato inicial das chapas de lamelas, foi obtido pelos processos de fabricação de fresamento e retificação *creep feed*. Após estes processos, os

corpos de prova passam por tratamentos térmicos para adequar as características das lamelas de inserção à aplicação industrial a que se destinam. A Figura 3.3 mostra as dimensões e o formato inicial das chapas de lamelas. A partir desta geometria são aplicados dois passes de desbaste e dois de acabamento para atingir as características macro e micro geométricas requeridas no final do processo.

Figura 3.3 – Corpo de prova – Vista lateral (a) e superior (b) da chapa de lamelas.



Fonte: Adaptado de Gross (2019).

3.4.5 Fluido lubrificadorrefrigerante

Como fluido lubrificadorrefrigerante foi empregado o óleo emulsionável em água, Ecocol SYN 7000, do fabricante Fuchs. O fluido apresenta uma formulação sem óleo mineral e com aditivos para melhorar as ações anticorrosivas e de lubricidade. A concentração aplicada foi de 3% de óleo, emulsionado em água, conforme as especificações do fabricante. Uma característica do óleo usado é a sua bioestabilidade em relação à presença de microorganismos que causam deterioração e corrosão, assim aumentando o tempo de vida da emulsão. O abastecimento de fluido foi efetuado por uma bomba integrada na máquina-ferramenta. A Tabela 7 apresenta as principais características físico-químicas do fluido lubrificadorrefrigerante.

Tabela 7 – Principais características físico-químicas do fluido lubrificadorrefrigerante.

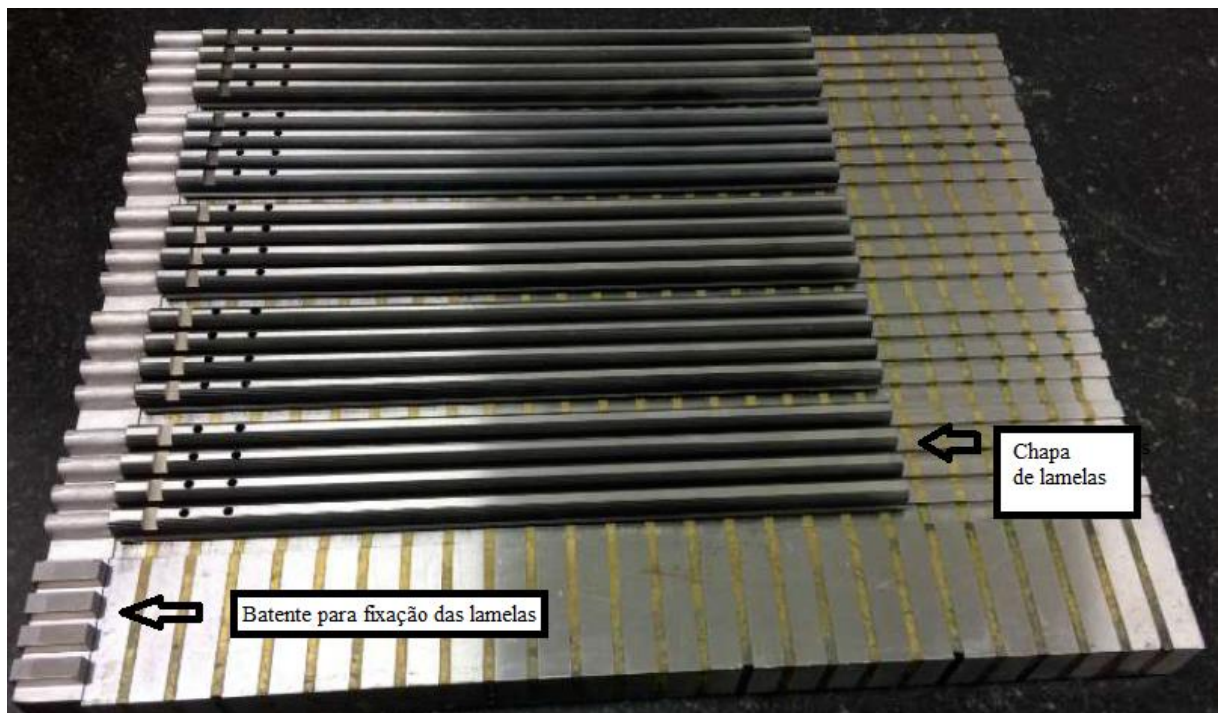
Ensaio	Procedimento	Resultado
Densidade a 20° C, g/cm ³	ASTM D 1298	1,04
PH da emulsão a 2 % em água	MR 125	9,2
Aspecto da emulsão a 2% em água	MR 079	Límpido, amarelado
Teste Bosch, GG 25, emulsão a 2% em água	DIN 51 360-2	0
Estabilidade da emulsão 2% em água (mín. 15 h)	MR 015	Estável
Estabilidade do produto a 40/4° C (mín. 15 h)	MR 017	Estável
Fator de refração	MR 044	1,3

Fonte: FUCHS, fornecedor do fluido lubrificadorrefrigerante.

3.4.6 Sistema de fixação dos corpos de prova na máquina-ferramenta

Os corpos de prova foram montados sobre um dispositivo que é posicionado na mesa magnética da máquina-ferramenta. O dispositivo apresenta batentes posicionados na extremidade esquerda, com o intuito de evitar que as lamelas sejam deslocadas durante o processo de retificação. A Figura 3.4 mostra os corpos de prova sobre o dispositivo de fixação. O dispositivo permite a fixação de até cinco chapas de lamelas, permitindo a fabricação de 20 lamelas em sequência.

Figura 3.4 – Dispositivo de fixação com chapas de lamelas.



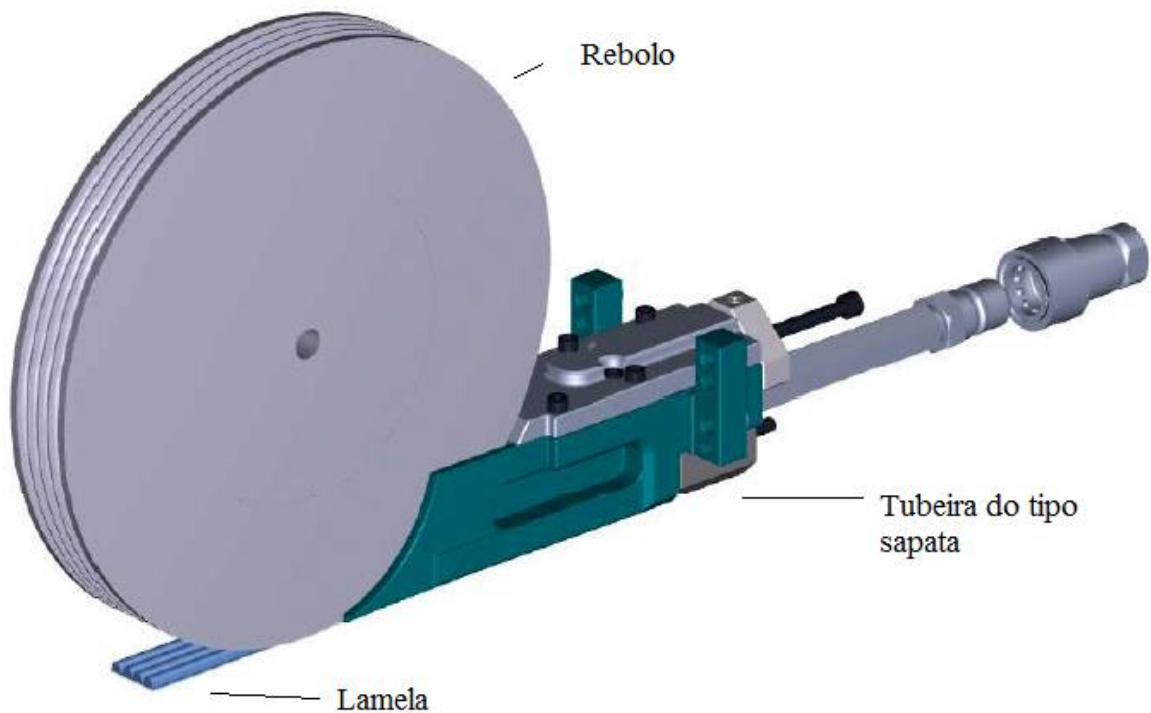
Fonte: Adaptado de Gross (2019).

3.4.7 Tubeira do tipo sapata empregada nos ensaios

A tubeira do tipo sapata utilizada nos ensaios foi a mesma tubeira aplicada nos ensaios de Gross (2019). O projeto de construção da tubeira levou em consideração diferentes modelos (comprimento e diâmetro) de lamelas a serem retificadas.

Segundo Gross (2019), o projeto construtivo foi dividido em sistema funcional de lubrificação e sistema de fixação da tubeira. O sistema funcional de lubrificação é composto pelo corpo da tubeira, régua de vedação superior (raspador do colchão de ar) e régua de vedação inferior (direcionador do jato de fluido lubrificante). A Figura 3.5 ilustra o sistema funcional da tubeira com o rebolo e a chapa de lamelas. Os principais componentes do sistema de fixação da tubeira são a placa suporte, a base guia e o cursor com parafuso de regulagem. A Figura 3.6 ilustra a tubeira montada na máquina-ferramenta.

Figura 3.5 – Sistema funcional da tubeira com o rebolo e a chapa de lamelas.



Fonte: Adaptado de Gross (2019).

A Figura 3.6 ilustra a tubeira montada na máquina-ferramenta.



Fonte: Gross (2019).

3.4.8 Determinação da fenda de trabalho

Na retificação empregando uma tubeira do tipo sapata, um importante parâmetro é a folga entre sapata e rebolo, a folga também pode receber o nome de fenda de trabalho. A partir de uma abertura de 0,5 mm, a fenda permite que o colchão ar criado em torno do rebolo não seja separado e penetre na cavidade de fluido da tubeira (LOPES, 2007; SOUZA, 2012; WEINGÄRTNER, E., 2005). Para uma variação da abertura da fenda de 0 a 0,5 mm, os resultados mostram que o desgaste de rebolo aumenta em torno de 5 %, ou seja, tem pouca influência sobre o desgaste do rebolo (WEINGÄRTNER, E., 2005).

Neste trabalho a duração de cada ensaio é de poucos minutos de retificação e em cada componente retificado são removidos poucos centésimos de milímetros do raio do rebolo, de forma que durante uma bateria de ensaios a abertura da fenda permaneceu abaixo dos 0,5 mm. A abertura da fenda foi controlada visualmente, pois quando se torna demasiadamente grande as faíscas provenientes do processo de retificação tornam-se visíveis e alertam o operador da máquina para proceder uma aproximação da tubeira ao rebolo.

3.4.9 Área retificada

Na obtenção industrial das lamelas de inserção, as chapas de lamelas são retificadas em quatro passes de retificação, sendo dois passes de desbaste e dois passes de acabamento. O desbaste e o acabamento são realizados com os rebolos de tamanho médio de grão de 90 e 120 *mesh*, respectivamente. A fabricação das lamelas utiliza estes quatro passes com o intuito de evitar que o componente retificado seja danificado termicamente e para garantir a rugosidade final dentro das exigências necessárias.

Para determinar a área retificada (a_{ret}) é necessário conhecer a largura de corte (a_p) e a profundidade de corte (a_e), conforme a Equação 7.

$$a_{ret} = a_p * a_e \quad (7)$$

Neste estudo, as respectivas medições de desgaste do rebole e da qualidade da superfície retificada (rugosidade) ocorrem após a primeira operação de acabamento. Em conformidade com Gross (2019), a área retificada para cada etapa de retificação foi determinada pelo *software* PTC Creo parametric, conforme a Tabela 8.

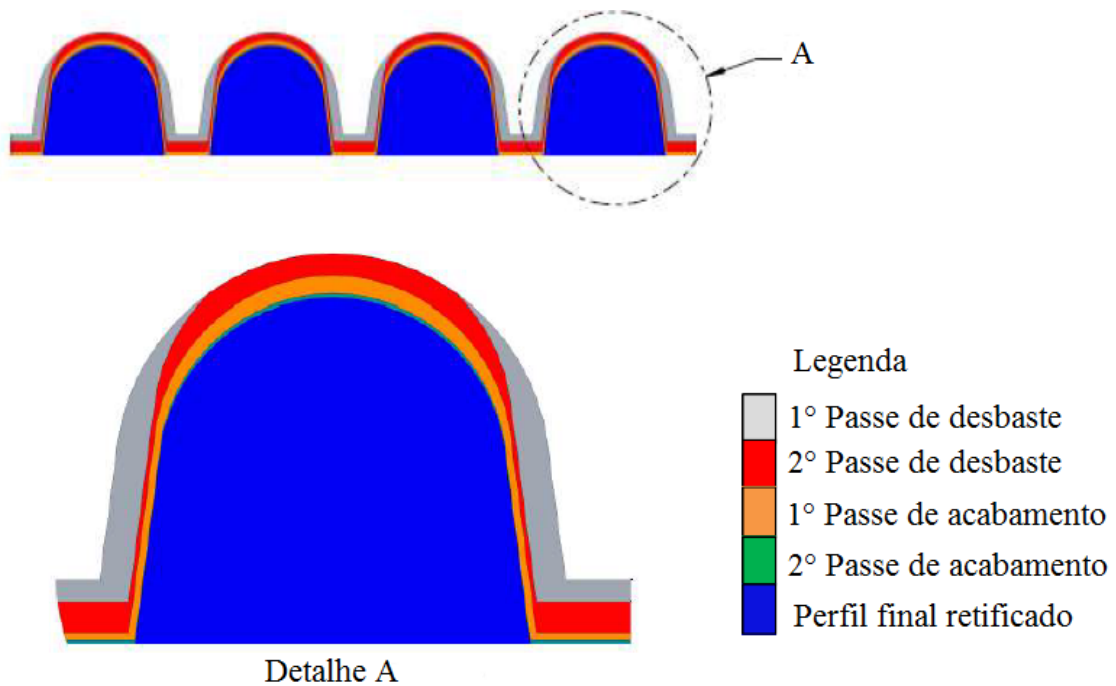
Tabela 8 – Área retificada para cada passe.

Operação	Passe	Área retificada (mm ²)	Largura efetiva do rebole (%)
Desbaste	1°	24,18	54
Desbaste	2°	21,99	100
Acabamento	1°	14,74	100
Acabamento	2°	3,28	100
Total		64,19	

Fonte: Adaptado de Gross (2019).

Nas duas etapas de desbaste, onde a seção de retificação são de 24,18 e 21,99 mm², não ocorre o dano térmico no componente. Nas etapas de acabamento, o objetivo é obter a forma final com características geométricas e de qualidade de superfície, sem, no entanto, se preocupar com o dano térmico, pois as áreas retificadas são sensivelmente inferiores às das operações de desbaste. A seção de retificação da primeira etapa de acabamento é uniformemente distribuída sobre a largura da chapa de lamelas, conforme a Figura 3.7 ilustra.

Figura 3.7 – Sequência de passes e remoção de material em cada passe para obtenção das lamelas.



Fonte: Gross (2019).

3.4.10 Taxa de retificação

Segundo Klocke (2009), a taxa de retificação (Q_w) é o parâmetro que permite analisar o volume de material removido por uma unidade de tempo, [Equação 5](#).

Neste estudo, o produto da largura de corte (a_p) e profundidade de corte (a_c) é substituído pela área retificada (a_{ret}), Equação 8.

$$Q_w = v_w * a_{ret} \quad (8)$$

3.4.11 Taxa média de desgaste

A taxa média de desgaste (G_{med}), é o parâmetro utilizado para calcular o tempo de vida do rebolo, é a razão do volume de material removido (V_w) pelo volume de material desgastado do rebolo (V_s). A Equação 9 descreve a taxa média de desgaste (KLOCKE, 2009).

$$G = \frac{V_w}{V_s} \quad (9)$$

O volume perdido no diâmetro do rebolo é obtido pela variação da forma do perfil ao longo do comprimento retificado. Para isto o perfil de entrada e de saída são medidos. A diferença de altura do perfil na região central de cada lamela permite concluir sobre a diminuição do diâmetro do rebolo.

3.4.12 Taxa de retificação específica

A taxa de retificação específica (Q'_w), é o parâmetro empregado para comparar os resultados de retificação obtidos para diferentes larguras dos rebolos em diferentes aplicações de retificação. A Equação 10 apresenta o cálculo da taxa de retificação específica como sendo a razão da taxa de retificação (Q_w) pela largura efetiva de corte ($b_{s\text{ eff}}$) (KLOCKE, 2009).

$$Q'_w = \frac{Q_w}{b_{s\text{ eff}}} \quad (10)$$

Para calcular a taxa de retificação específica média ($Q'_{w\text{ med}}$), na retificação *creep feed* das chapas de lamelas, é necessário considerar o desgaste do rebolo ao longo percurso retificado, conseqüentemente, a taxa de retificação varia devido a este desgaste. A Equação 11 apresenta como calcular a taxa de retificação específica média, foi utilizada a média entre a taxa de retificação específica máxima ($Q'_{w\text{ max}}$), no início do percurso retificado e a taxa de retificação específica mínima ($Q'_{w\text{ min}}$), no final do percurso retificado. Através deste cálculo foi possível determinar as regiões onde a taxa de retificação específica de material tinha seus valores mínimo e máximo, como consequência o desgaste mínimo e máximo do rebolo (GROSS, 2019).

$$Q'_{w\text{ med}} = \frac{Q'_{w\text{ max}} + Q'_{w\text{ min}}}{2} \quad (11)$$

Foi considerado que a taxa de retificação específica máxima ($Q'_{w\text{ max}}$) é igual a taxa de retificação específica (Q'_w). A Equação 12 apresenta o cálculo da taxa de retificação específica mínima ($Q'_{w\text{ min}}$), foi considerada a variação da geometria do perfil da lamela no ponto final do percurso retificado em decorrência do desgaste do rebolo. Para isto, foi diminuído da área de retificação o valor do desgaste da peça e multiplicado pela largura efetiva de corte ($b_{s\text{ eff}}$) (GROSS, 2019). Como calcular o valor de Δ_r é mostrado na [Equação 13](#).

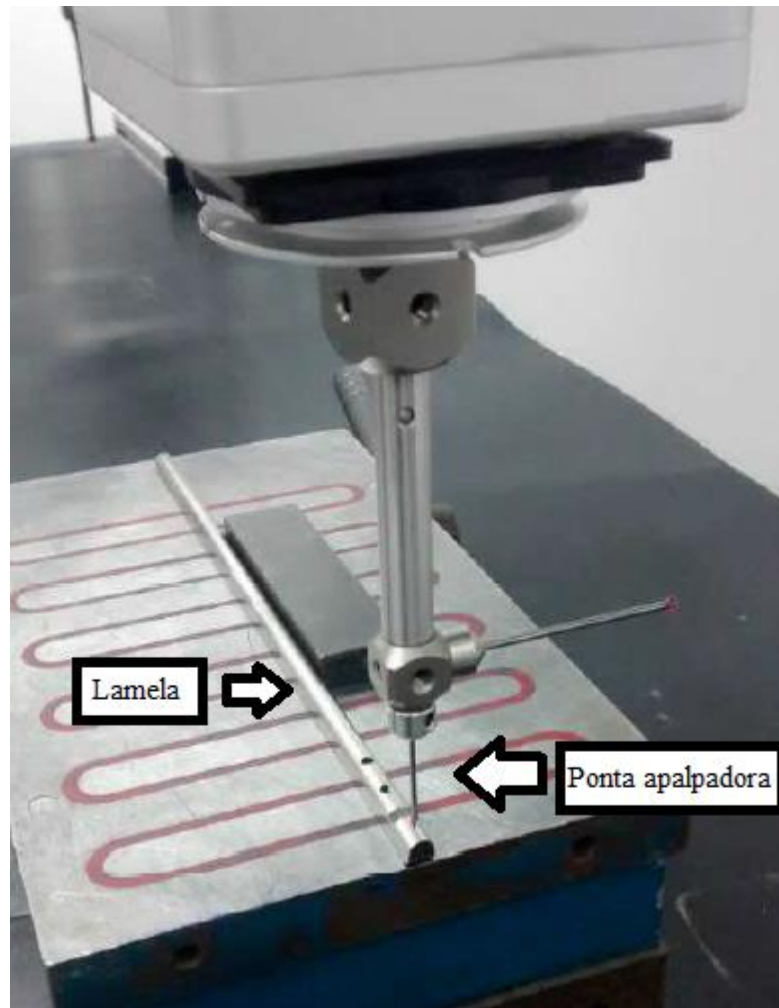
$$Q'_{w\text{ min}} = \frac{(V_w) * [a_{ret} - (\Delta_r * b_{s\text{ eff}})]}{b_{s\text{ eff}}} \quad (12)$$

3.4.13 Cálculo do desgaste do rebolo

O desgaste do rebolo foi obtido através das medições dos raios no topo das lamelas de inserção no início e no final da retificação de cada conjunto de lamelas, após o primeiro passe de acabamento. A diferença dos raios nos fornece a variação de diâmetro do rebolo, é calculada através da Equação 13. As medições do perfil geométrico das lamelas foram realizadas a uma distância de aproximadamente 1,5 mm da extremidade de entrada e saída do rebolo na lamela em uma máquina de medir por coordenadas. A Figura 3.8 mostra a medição de uma lamela de inserção.

$$\Delta r = r_{saída} - r_{entrada} \quad (13)$$

Figura 3.8 – Medição do raio do topo da lamela.



Fonte: Adaptado de Gross (2019).

Cada chapa de lamela resulta em 4 lamelas separadas. Considerando que estas foram retificadas com as mesmas variáveis de entrada, é possível obter o desgaste ao longo da largura do rebolo. A partir destas quatro medições foi obtida a média do desgaste, sendo descrita na Equação 14. A variação do desgaste do rebolo recebeu a denominação de $\Delta_r L1$ para a primeira lamela retificada e assim sucessivamente até a $\Delta_r L4$.

$$\text{Média } \Delta r = \frac{\Delta r L1 + \Delta r L2 + \Delta r L3 + \Delta r L4}{4} \quad (14)$$

As medições dos raios das lamelas foram efetuadas numa máquina de medição por coordenadas CNC portal, Prismo Navigator, do fabricante Zeiss equipada com *software* Calypso, a Figura 3.8 ilustra a máquina de medição por coordenadas. A máquina de medição tem curso máximo nos eixos X de 900 mm, Y de 1500 mm e Z de 700 mm. A máquina de medição por coordenadas possui mancais aerostáticos em todos os eixos, montada sobre amortecedores de vibração em elastômero. O sensor de apalpação empregado nas medições foi o modelo Golden Vast da Zeiss e a medição foi realizada com uma esfera de medição de 2 mm por contato de ponto único. A força de apalpação utilizada foi de 100 mN (GROSS, 2019).

Para calcular o intervalo de confiança das médias do desgaste dos rebolos, foi empregada a Equação 15 e utilizado uma confiabilidade de 95 % ($\alpha=0,5$), os valores do coeficiente de Student (t_α) foram obtidos em Montgomery (2014).

$$\bar{x} - t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} * \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} * \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (15)$$

3.4.14 Medições de rugosidade

As medições de rugosidade das lamelas de inserção ocorreram em um rugosímetro do fabricante Taylor Hobson, modelo Form Talysurf I-Series, equipado com *software* Ultra versão 6.1.4.57, como ilustra a Figura 3.9. O dispositivo de medição utilizava um apalpador indutivo com ponta padrão cônica e raio de 2 μm . O comprimento de amostragem foi de 1,75 mm, com um *cut-off* de 0,25 mm. O equipamento fornece os valores de Rugosidade média (Ra), enquanto o *software* gera um gráfico que permite documentar e visualizar os eixos X e Y do perfil de rugosidade da lamela.

Figura 3.9 – Medição de rugosidade na lamela.



Fonte: Adaptado de Gross (2019).

As medições de rugosidade foram realizadas após o primeiro passe de acabamento, em cada lamela retificada, uma medição na região de entrada e outra na região de saída do rebolo a uma distância de aproximadamente 1,5 mm da borda de entrada e saída da lamela. Como a retificação das chapas das lamelas resulta em quatro lamelas individuais, estas foram retificadas com as mesmas variáveis de entrada, as médias das medições da rugosidade de entrada e saída foram efetuadas conforme as Equações 16 e 17. A rugosidade medida na entrada/saída recebeu a denominação de $Ra_{\text{entrada L1}}$ / $Ra_{\text{saída L1}}$ para a primeira lamela retificada e assim sucessivamente até a $Ra_{\text{entrada L4}}$ / $Ra_{\text{saída L4}}$.

$$MédiaRa_{\text{entrada}} = \frac{Ra_{\text{entrada L1}} + Ra_{\text{entrada L2}} + Ra_{\text{entrada L3}} + Ra_{\text{entrada L4}}}{4} \quad (16)$$

$$MédiaRa_{\text{saída}} = \frac{Ra_{\text{saída L1}} + Ra_{\text{saída L2}} + Ra_{\text{saída L3}} + Ra_{\text{saída L4}}}{4} \quad (17)$$

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos através dos ensaios de retificação *creep feed* realizados, os quais empregaram um sistema de lubrificação por tubeira do tipo sapata e rebolos de óxido de alumínio com diferentes tamanhos de grão médio. Para atender à demanda requerida de substituição do rebole de 120 *mesh* pelo rebole de 90 *mesh*, nas operações de acabamento, exige que vários resultados de trabalho sejam adequadamente satisfeitos. Entre estes requisitos estão a precisão geométrica e a qualidade da superfície, a não danificação metalúrgica da camada limite.

Serão apresentados os resultados de desgaste do rebole ao longo do percurso retificado e a rugosidade média (R_a), ambas as análises foram realizadas em função da alteração da velocidade de corte (variável principal) e da velocidade de avanço (variável secundária).

Os ensaios são divididos em duas partes. Na primeira parte, foi empregado um rebole de óxido de alumínio com uma granulometria média de 90 *mesh*, utilizando as seguintes combinações de variáveis primária e secundária:

- Velocidades de corte de 23, 25 e 30 m/s combinadas com uma velocidade de avanço de 250 mm/min;
- Velocidade de corte de 30 m/s combinada com uma velocidade de avanço de 160 mm/min.

Na segunda parte, estes ensaios servem para efeito de comparação com os resultados obtidos com o rebole de 90 *mesh*, foi empregado um rebole de óxido de alumínio com um tamanho médio de grão de 120 *mesh*, usando as seguintes combinações de variáveis primária e secundária:

- Velocidades de corte 23 e 30 m/s combinadas com uma velocidade de avanço de 250 mm/min;
- Velocidade de corte de 30 m/s combinada com uma velocidade de avanço de 160 mm/min.

Neste trabalho não foram realizadas análises metalográficas, basicamente porque não aparecem marcas de queima de retificação no componente. No trabalho realizado por Gross (2019), sua área retificada foi de 24,18 mm² e não apresentou queima de retificação, em suas análises metalográficas não apresentaram nenhum indicativo de dano. Neste presente trabalho a área retificada foi de 14,74 mm². Sendo assim, não foram realizadas análises de consumo de

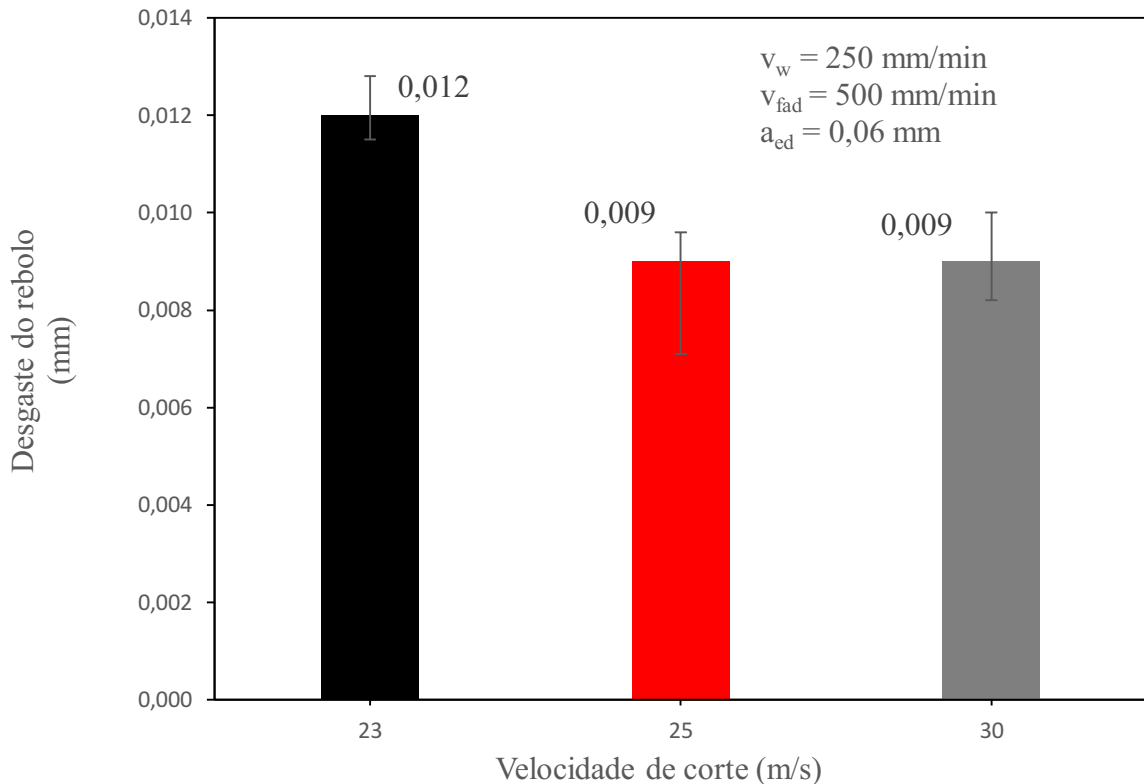
potência, pois a taxa de retificação é menor que nas operações de desbaste e o principal objetivo deste trabalho era garantir a precisão geométrica e a qualidade superficial do componente retificado.

4.1 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE NO DESGASTE DOS REBOLOS

Os resultados das medições de desgaste dos rebolos de 90 e 120 *mesh* são apresentados nas Figuras 4.1 e 4.2, respectivamente. A Figura 4.1, mostra os resultados do desgaste radial do rebolo de 90 *mesh*, para a variação da velocidade de corte de 23 para 30 m/s e uma velocidade de avanço de 250 mm/min. Verifica-se uma diminuição do desgaste com o aumento da velocidade de corte de 23 para 25 m/s, permanecendo o desgaste constante a partir desta velocidade. Esta pequena tendência de redução do desgaste do rebolo ao longo do percurso retificado com o aumento da velocidade de corte era esperada e é condizente com a literatura correspondente.

Segundo König (1980), a explicação para a diminuição do desgaste do rebolo está relacionada a espessura de cavaco não deformado, pois esta é inversamente proporcional à velocidade de corte, [Equação 1](#). Para uma mesma taxa de retificação, o aumento da velocidade de corte leva a uma diminuição da espessura do cavaco não deformado. O aumento da velocidade de corte eleva a frequência de utilização do gume e a uma diminuição do tempo de ação do gume, conseqüentemente, de forma que estas ações contrárias se compensam e não permitem uma afirmação clara sobre a sua influência no desgaste do rebolo. Segundo Marinescu *et al.* (2016), o aumento da velocidade de corte, produz cavacos com menores espessuras e um número menor de gumes ativos. Normalmente o aumento da velocidade de corte resulta em uma redução do desgaste do rebolo.

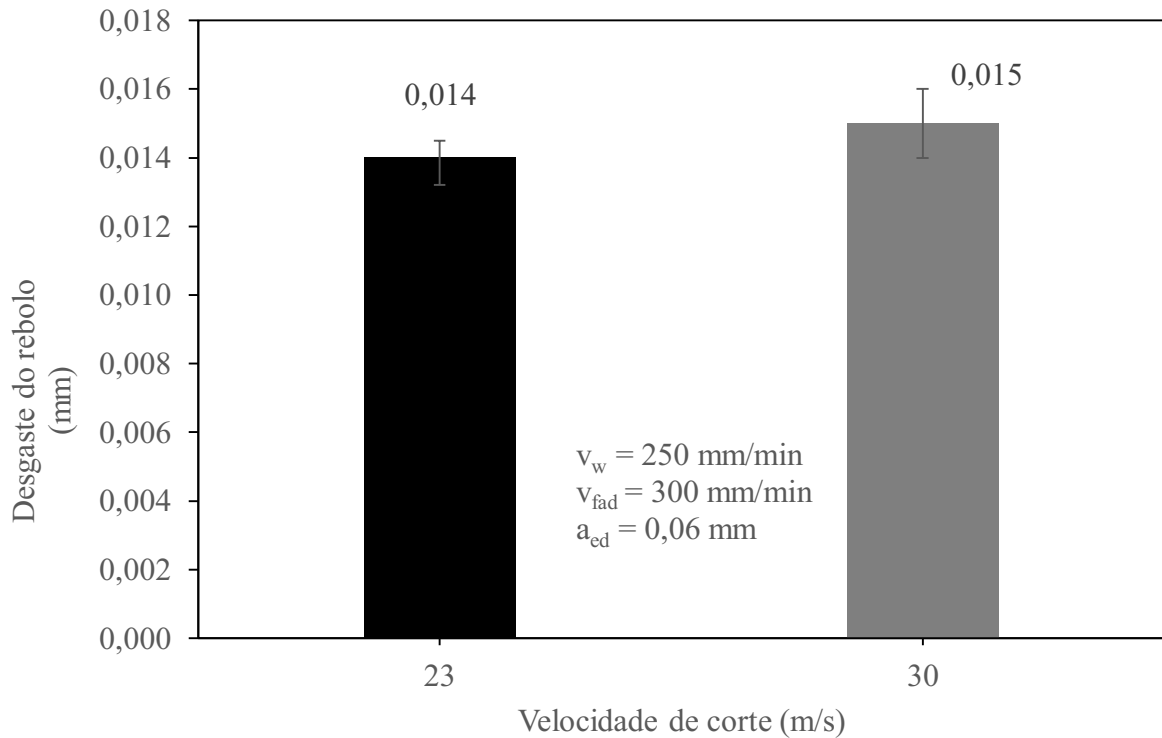
Foram calculados os intervalos de confiança da média do desgaste dos rebolos, os valores obtidos nas medições do desgaste do rebolo em cada amostra mantiveram-se dentro dos intervalos de confiança para cada ensaio realizado.

Figura 4.1 – Desgaste do rebolo de 90 *mesh* em função da variação da velocidade de corte.

Fonte: Autor.

A Figura 4.2, apresenta os resultados do desgaste radial do rebolo de 120 *mesh* com as velocidades de corte de 23 e 30 m/s e uma v_w de 250 mm/min. O aumento da velocidade de corte demonstra um aumento da dispersão dos resultados e não é possível afirmar que tenha ocorrido uma pequena tendência de aumento do desgaste do rebolo. A variação do desgaste pode estar relacionada com a flutuação da dureza dos componentes retificados e terá que ser avaliada em novas séries de ensaios.

Figura 4.2 – Desgaste do rebolo de 120 *mesh* em função da velocidade de corte.



Fonte: Autor.

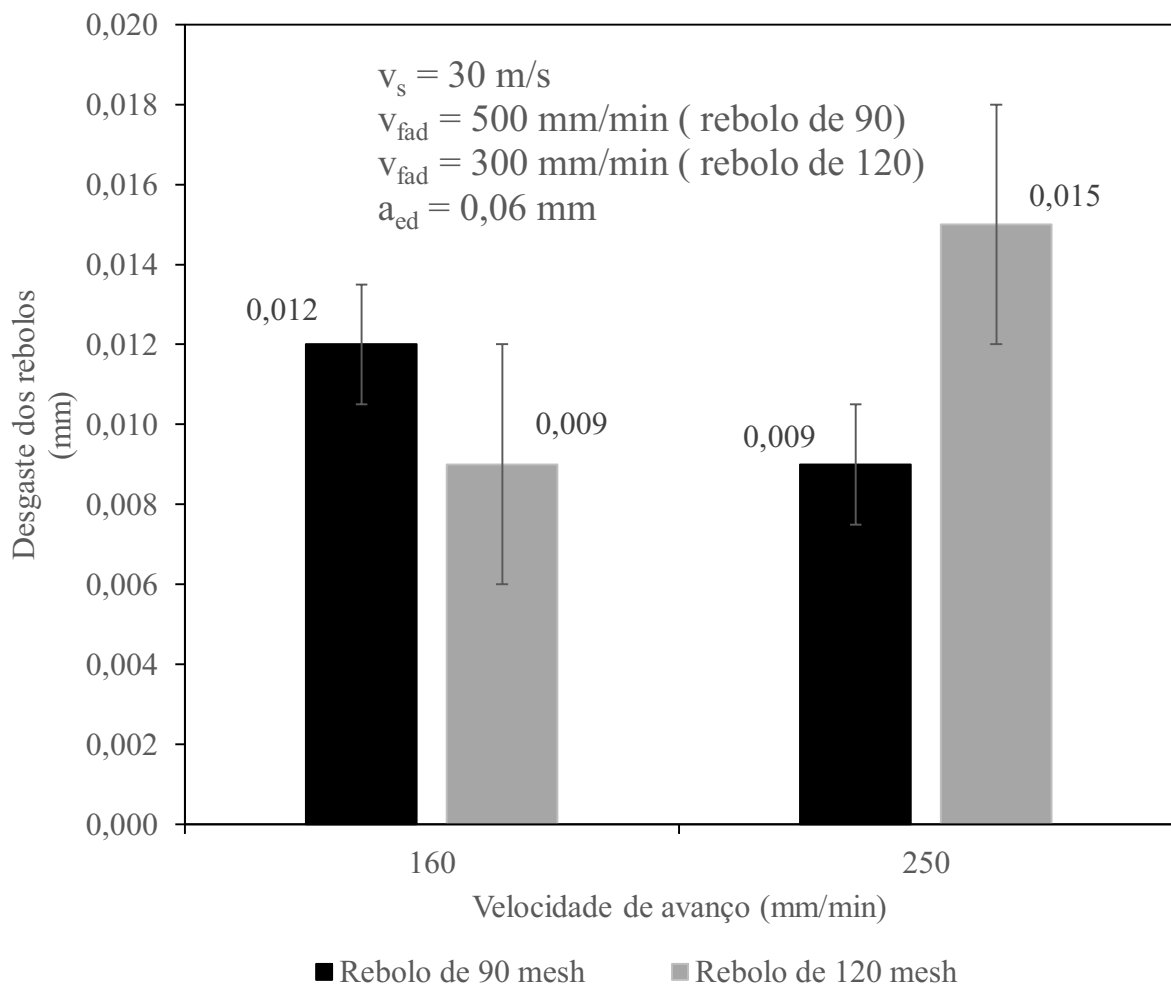
4.2 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE AVANÇO NO DESGASTE DOS REBOLOS

Na Figura 4.3, são apresentados os valores de desgaste do rebolo de 90 e 120 *mesh* em função da velocidade de avanço. Os ensaios foram conduzidos com as velocidades de avanço de 160 e 250 mm/min e uma velocidade de corte de 30 m/s. Os resultados obtidos com o emprego do rebolo de 90 *mesh* permitem identificar que o aumento da velocidade de avanço causou uma leve diminuição no desgaste do rebolo (no limite das dispersões dos ensaios). Segundo a literatura está quase ausência de influência sobre o desgaste apresentado não está de acordo com a literatura correspondente. Uma possível explicação para este resultado pode estar relacionada com a flutuação da dureza dos componentes retificados e terá que ser avaliada em novas séries de ensaios. No entanto, os resultados obtidos com a utilização do rebolo de 120 *mesh* mostram que o aumento da velocidade de avanço causa o aumento significativo no desgaste do rebolo, o resultado encontrado está em concordância com a literatura.

Os resultados expostos na Figura 4.3, podem ser explicados com base nas considerações de König (1980), o qual explica que o aumento da velocidade de avanço ou da profundidade de corte, leva a um aumento da taxa de retificação. Se o número de cavacos produzidos na unidade de tempo não aumenta, considerando uma velocidade de corte constante, resulta em maiores espessuras de usinagem.

O aumento da taxa de retificação é consequência do aumento da profundidade de corte e/ou velocidade de avanço. Mantendo constante a profundidade de corte e aumentando a velocidade de avanço ocorre um acréscimo da espessura de usinagem e do comprimento médio do cavaco, como resultado, aumentam as forças de retificação e o dano térmico. Estes fatores podem levar a um aumento do desgaste do rebolo (MARINESCU *et al.*, 2016).

Figura 4.3 – Influência da velocidade de avanço no desgaste dos rebolos de 90 e 120 *mesh*.



Fonte: Autor.

4.3 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE NA RUGOSIDADE

Os resultados das medições de rugosidade do componente obtidos com a variação da velocidade de corte para os rebolos de 90 e 120 *mesh* são apresentados nas Figuras 4.4 e 4.5, respectivamente. Em cada lamela retificada, a rugosidade foi medida na posição de entrada e saída do rebole. Em todos os ensaios, para ambos os rebolos utilizados, a rugosidade aumenta ao longo do percurso retificado. Segundo Klocke (2009), esse é o mecanismo de desgaste predominante dos grãos do rebole para o macrodesgaste. Nos resultados do trabalho de mestrado de Gross (2019) o mecanismo encontrado foi o de microdesgaste, porém deve-se levar em consideração que os parâmetros de dressamento e a profundidade de corte empregadas foram diferentes das utilizadas neste trabalho.

O mecanismo de macrodesgaste é baseado na quebra e/ou arranchamento dos grãos durante o percurso usinado, conseqüentemente, causando uma diminuição no número de grãos ativos, levando ao aumento da rugosidade ao longo do percurso usinado (KÖNIG, 1980).

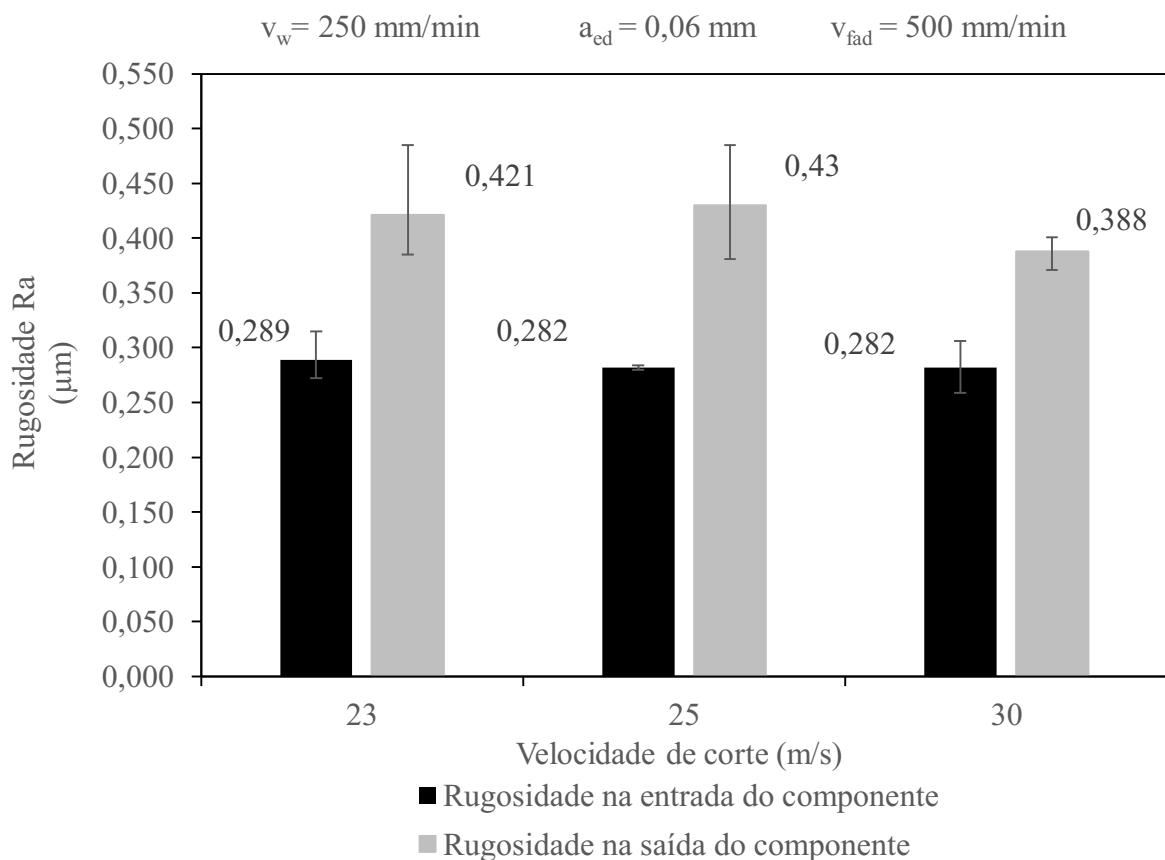
Na Figura 4.4, são apresentados os valores de rugosidade na posição de entrada e saída do componente retificado, com a utilização do rebole de 90 *mesh*, sobre a influência de diferentes velocidades de corte. Os resultados das medições de rugosidade na entrada do componente com o aumento da v_s demonstram uma tendência de diminuição da rugosidade. Estes resultados estão concordantes com as informações encontradas na literatura. Deve-se levar em consideração que a medição de rugosidade é realizada a cerca de 1,5 mm do início do percurso retificado, o percurso retificado é demasiadamente curto, portanto, não suficiente para exprimir o mecanismo de desgaste do rebole e predominantemente reflete as condições de dressamento dos rebolos. Para as medições de rugosidade na saída do componente o aumento da velocidade de corte de 23 para 25 m/s exprime um pequeno aumento da dispersão dos resultados e não é possível afirmar que tenha ocorrido uma pequena tendência de aumento de rugosidade. Porém com a utilização da v_s de 30 m/s, o valor da rugosidade na saída do componente é menor que os valores de rugosidade de saída obtidos com as outras velocidades de corte. Este resultado demonstra uma tendência de queda na rugosidade com o aumento da v_s e está harmônico com a literatura.

É importante ressaltar que existe uma tendência a diminuição da rugosidade com o aumento da velocidade de corte. Segundo König (1980), a explicação para esta tendência são

as menores espessuras de usinagem, que ocorrem apesar de haver uma redução do número de gumes cinemáticos no processo.

De acordo com Marinescu *et al.* (2016), o aumento da velocidade de corte envolve um número menor de gumes ativos e gera cavacos com menores espessuras. Normalmente o aumento da velocidade de corte resulta na diminuição da rugosidade da superfície.

Figura 4.4 – Influência da velocidade de corte da rugosidade na entrada e saída do componente com a utilização do rebolo 90 *mesh*.

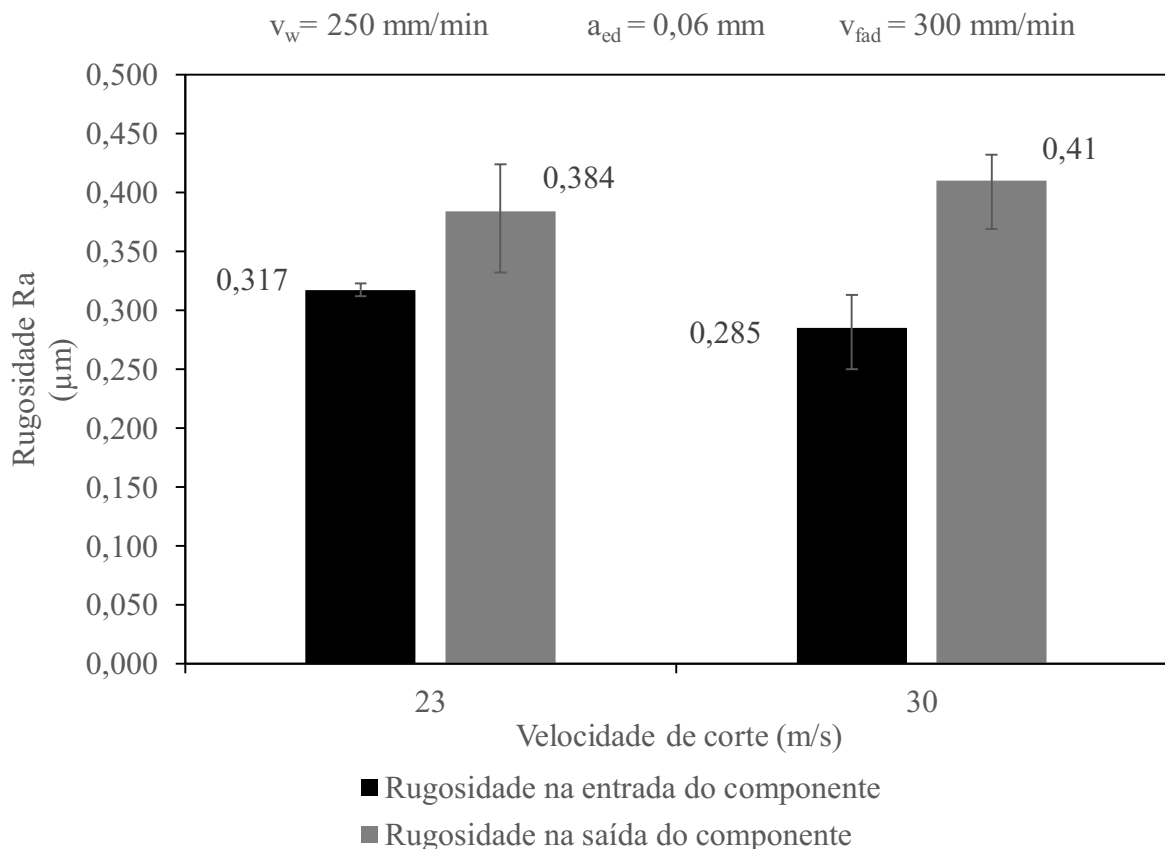


Fonte: Autor.

A Figura 4.5, apresenta os valores da rugosidade nas lamelas na retificação com o rebolo de 120 *mesh*. Os resultados mostram uma tendência de diminuição no valor da rugosidade na entrada do componente com o aumento da velocidade de corte, este resultado está condizente com a literatura correspondente. Levando em consideração que a medição de rugosidade é realizada a cerca de 1,5 mm do início do percurso retificado, o percurso retificado é muito curto, todavia, ainda não deve exprimir o mecanismo de desgaste do rebolo. Para os valores da rugosidade na saída do componente, é observado um acréscimo no valor da

rugosidade com o aumento da velocidade de corte. Sendo assim, uma possível explicação para esta tendência pode ser explicada pelo aumento da temperatura da zona de corte, em consequência, do aumento da velocidade de corte e terá que ser avaliada em novas séries de ensaios.

Figura 4.5 – Influência da velocidade de corte na rugosidade do componente, com a utilização do rebolo 120 *mesh*.

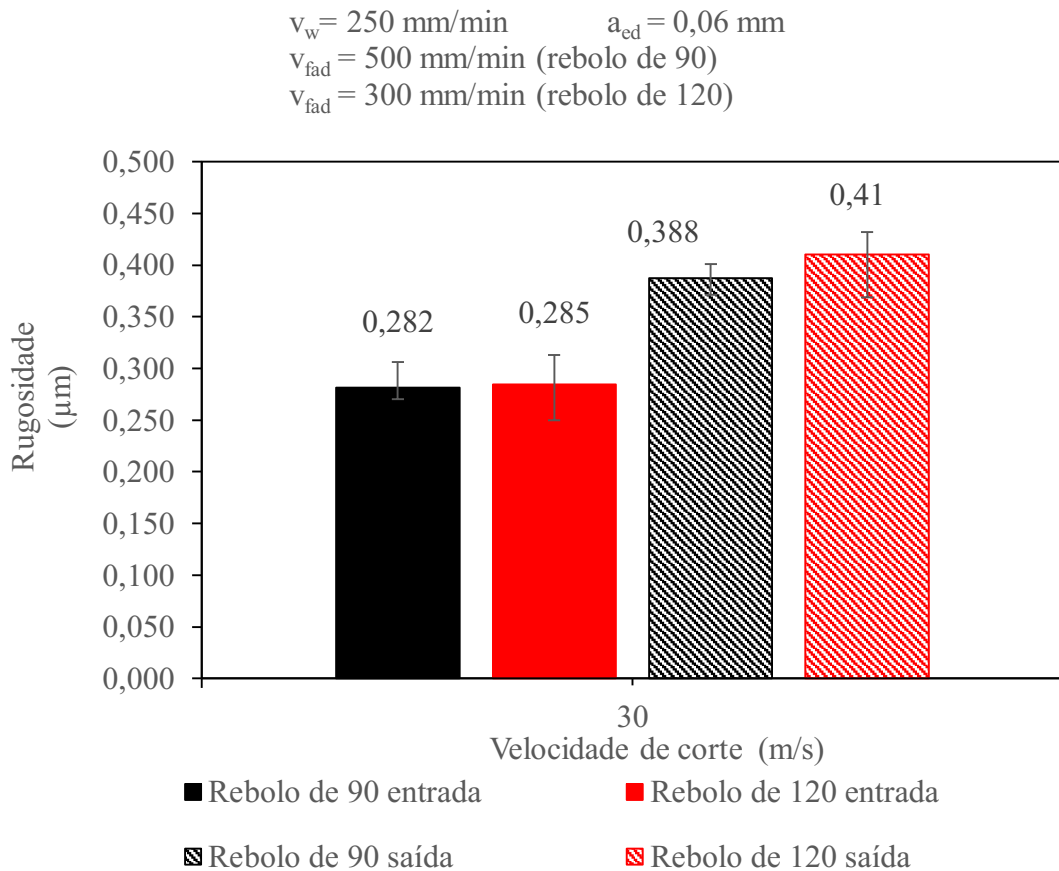


Fonte: Autor.

A Figura 4.6, apresenta um comparativo dos resultados das medições de rugosidade obtidos na entrada e saída do componente para os rebolos de 90 e 120 *mesh*. Os ensaios empregaram uma velocidade de corte de 30 m/s e uma velocidade de avanço de 250 mm/min. Os valores de rugosidade na entrada do componente para o rebolo de 120 *mesh* apresentam um maior valor que para o rebolo de 90 *mesh*, este resultado não está em conformidade com a literatura correspondente. Uma possível explicação é que a medição de rugosidade é realizada a cerca de 1,5 mm do início do percurso retificado, o percurso retificado é muito curto,

contudo, ainda não deve exprimir o mecanismo de desgaste do rebolo. Os valores de rugosidade na saída do componente para o rebolo de 120 *mesh* apresentam um maior valor que para o rebolo de 90 *mesh*, este resultado não está harmônico com a literatura correspondente. Uma possível explicação pode estar relacionada ao volume de grãos disponíveis na estrutura de cada rebolo. Para um mesmo volume de grão nos dois rebolos é necessário que a quantidade de grão no rebolo de 120 *mesh* seja maior, pois o rebolo de 120 *mesh* apresenta um menor tamanho de grão. Caso a quantidade de grãos disponível seja maior para o rebolo de 120 *mesh* é possível considerar que as pontes de ligante que unem os grãos sejam mais finas, conseqüentemente, em maiores velocidades de corte os grãos vão sofrer maiores solicitações e podem vir a desprender-se da estrutura do rebolo com maior facilidade, ocasionando o aumento da rugosidade. O fabricante informa que os rebolos têm o mesmo tipo de grão, igual estrutura do rebolo (estrutura aberta e poros grandes) e o mesmo ligante, mas não informa o volume de grãos que efetivamente está disponível na estrutura de cada rebolo.

Figura 4.6 – Rugosidade obtida na entrada e saída do componente retificado na retificação com rebolos de 90 e 120 *mesh*.



Fonte: Autor.

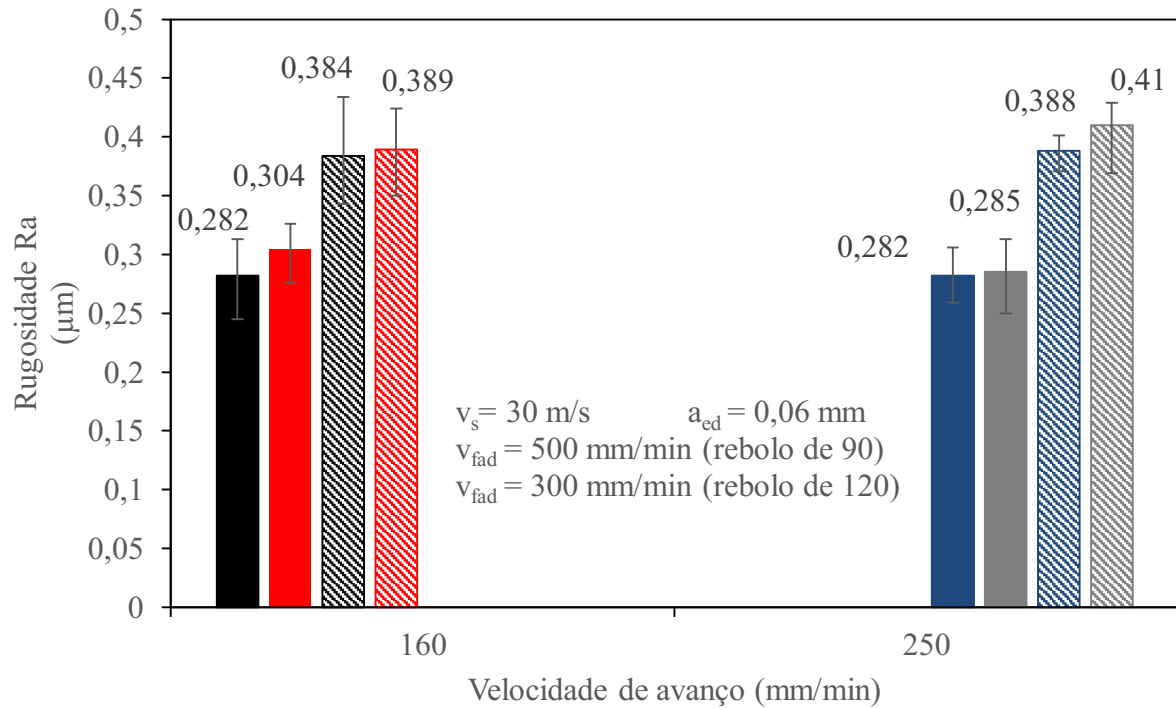
4.4 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE AVANÇO NA RUGOSIDADE

Na Figura 4.7, são apresentados os valores da rugosidade na posição de entrada e saída do componente retificado, para ambos os rebolos empregados, sobre a influência de diferentes velocidades de avanço. Os valores de rugosidade mostram uma tendência de diminuição no valor na entrada do percurso de retificação com o aumento da velocidade de avanço. Este comportamento não está condizente com a literatura correspondente. Uma possível explicação para este resultado é que a medição de rugosidade é realizada a cerca de 1,5 mm do início do percurso retificado, este é um trecho muito curto e não permitiu ainda uma estabilização da ação dos gumes dos rebolos. Já os valores da rugosidade medidos na posição de saída do componente retificado mostram uma tendência de aumento da rugosidade

com o aumento da velocidade de avanço, o resultado está harmônico com a literatura correspondente.

Para um aumento da taxa de retificação é necessário aumentar a velocidade de avanço e/ou profundidade de corte. Mantendo constante a profundidade de corte, o aumento da velocidade de avanço gera um aumento da espessura de usinagem e do comprimento médio do cavaco, como resultado, aumentam as forças de retificação e o dano térmico. Com base nesta explicação a rugosidade da superfície da peça tende a crescer (MARINESCU *et al.*, 2016).

Figura 4.7 – Influência da velocidade de avanço na rugosidade de entrada e saída do componente retificado.



- Rugosidade de entrada, $v_w = 160 \text{ mm/min}$, rebolo de 90
- Rugosidade de entrada, $v_w = 160 \text{ mm/min}$, rebolo de 120
- ▨ Rugosidade de saída, $v_w = 160 \text{ mm/min}$, rebolo de 90
- ▨ Rugosidade de saída, $v_w = 160 \text{ mm/min}$, rebolo de 120
- Rugosidade de entrada, $v_w = 250 \text{ mm/min}$, rebolo de 90
- Rugosidade de entrada, $v_w = 250 \text{ mm/min}$, rebolo de 120
- ▨ Rugosidade de saída, $v_w = 250 \text{ mm/min}$, rebolo de 90
- ▨ Rugosidade de saída, $v_w = 250 \text{ mm/min}$, rebolo de 120

Fonte: Autor.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões obtidas através das análises de desgaste dos rebolos e do comportamento de rugosidade, assim como as sugestões para trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

O aumento da velocidade de corte no processo de retificação é uma alternativa eficiente para melhorar a rugosidade e reduzir o desgaste do reboło. A literatura traz informações sobre estes benefícios. Um cuidado necessário é com a lubrificação, o aumento da velocidade de corte aumenta a temperatura na zona de corte, por este motivo foi empregado um sistema de lubrificação com tubeira do tipo sapata.

O principal intuito desta pesquisa era de empregar o reboło de 90 *mesh*, aplicado nas operações de desbaste, nas operações de acabamento das lamelas de inserção na retificação *creep feed* com um sistema de lubrificação com tubeira do tipo sapata, é importante ressaltar que as operações de acabamento eram realizadas com o reboło de 120 *mesh*.

É possível concluir que o aumento da velocidade de corte ocasiona:

- A diminuição no desgaste do reboło de 90 *mesh*, este resultado está harmônico com a literatura correspondente.
- Um pequeno aumento no desgaste do reboło de 120 *mesh*, este resultado não está em concordância com a literatura e serão necessários realizar novos ensaios para verificar mais profundamente a influência da velocidade de corte no seu desgaste. Como o principal objetivo era avaliar a substituição do reboło de 120 *mesh* pelo reboło de 90 *mesh*, os resultados obtidos foram satisfatórios para o emprego do reboło de 90 *mesh* na operação de acabamento.
- A diminuição nos valores da rugosidade medidos na entrada do componente para ambos os rebolos empregados, estes resultados estão condizentes com a literatura correspondente. No entanto, deve-se levar em consideração que a medição de rugosidade é realizada a cerca de 1,5 mm do início do percurso retificado, o percurso retificado é demasiadamente curto, portanto, não é suficiente para exprimir o mecanismo de desgaste do reboło e predominantemente reflete as condições de dressamento dos rebolos.

- A diminuição da rugosidade para o rebolo de 90 *mesh*, caso seja avaliada a variação da velocidade de corte de 23 para 30 m/s, este resultado está de acordo com a literatura correspondente. O aumento da velocidade de corte de 23 para 25 m/s ocorre um pequeno aumento no valor da rugosidade e não se pode afirmar se o resultado está relacionado a dispersão dos resultados encontrados.
- O aumento da rugosidade quando é empregado o rebolo de 120 *mesh*, este resultado não está de acordo com a literatura correspondente. Uma possível explicação para esta tendência pode ser explicada pelo aumento da temperatura da zona de corte, em consequência, do aumento da velocidade de corte.

É possível concluir que o aumento da velocidade de avanço causa:

- A diminuição no desgaste do rebolo de 90 *mesh*, este resultado não está em concordância com a literatura correspondente. Uma possível explicação para este resultado pode estar relacionada com a flutuação da dureza dos componentes retificados e terá que ser avaliada em novas séries de ensaios.
- O aumento no desgaste do rebolo de 120 *mesh*, este resultado está harmônico com a literatura correspondente.
- O aumento nos valores da rugosidade, tanto nas medições de rugosidade na entrada, quanto nas medições de saída do componente retificado, para ambos os rebolos utilizados.

A qualidade da superfície retificada (rugosidade (R_a)), era medida na região de entrada e outra na região de saída do rebolo a uma distância de aproximadamente 1,5 mm da extremidade de entrada e saída da lamela. Sendo assim, é possível concluir que em todos os ensaios, para ambos os rebolos empregados, ocorreu o aumento da rugosidade ao longo do percurso retificado. Isto significa que houve predominância de quebra ou arranchamento dos grãos do rebolo, o mecanismo dominante é o macrodesgaste.

É possível concluir que o valor de rugosidade medido na saída componente com emprego do 120 *mesh* foi de maior que o valor de rugosidade obtido com o rebolo de 90 *mesh*, este resultado não está condizente com literatura correspondente. Uma possível explicação pode estar relacionada ao volume de grãos disponíveis na estrutura de cada rebolo. Para um mesmo volume de grão nos dois rebolos é necessário que a quantidade de grão no rebolo de 120 *mesh* seja maior, pois este rebolo apresenta um menor tamanho médio dos grãos. Caso a quantidade de grãos disponível seja maior para o rebolo de 120 *mesh* é possível

considerar que as pontes de ligante que unem os grãos sejam mais finas, conseqüentemente, em maiores velocidades de corte os grãos vão sofrer maiores solicitações e podem vir a desprender-se da estrutura do rebolo com maior facilidade, ocasionando o aumento da rugosidade. O fabricante informa que os rebolos têm o mesmo tipo de grão, igual estrutura do rebolo (estrutura aberta e poros grandes) e o mesmo ligante, mas não informa o volume de grãos que efetivamente está disponível na estrutura de cada rebolo.

Os resultados mostram que é possível atingir as exigências de rugosidade do componente com a utilização de apenas do rebolo de 90 *mesh* nas operações de acabamento das lamelas de inserção. Com isto é possível obter um ganho de produtividade, pois não será necessária a substituição dos rebolos entre as operações de desbaste e acabamento.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As análises e os resultados obtidos neste trabalho possibilitam algumas sugestões para trabalhos futuros.

- Aplicar o rebolo de 90 *mesh* na segunda etapa de acabamento, visando a obtenção de valores de rugosidade iguais ou inferiores aos obtidos com rebolo de 120 *mesh*.
- Avaliar o emprego de novos parâmetros de dressamento para o rebolo de 90 *mesh*, com intuito de diminuir os valores de rugosidade do componente na fase de acabamento.
- Verificar em novos ensaios a influência do aumento da velocidade de avanço sobre o desgaste do rebolo de 90 *mesh*.
- Avaliar o emprego de um rebolo de uma granulometria de 100 *mesh* nas operações de desbaste e acabamento, buscando uma maior produtividade.
- Analisar o efeito da abertura da fenda de trabalho entre rebolo e tubeira. E como esta abertura influencia sobre o desgaste do rebolo.
- Avaliar o emprego de rebolos compostos por grãos de óxido de alumínio microcristalinos. Visto que a literatura apresenta alguns trabalhos nos quais os autores empregam estes rebolos e obtém-se uma melhora da qualidade da superfície do componente retificado.

- Avaliar o emprego de rebolos com diferentes estruturas, hoje aplica-se rebolo com uma estrutura D28, pois na retificação *creep feed* faz-se necessário rebolos com estrutura aberta e elevada porosidade.

REFERÊNCIAS

- BENINI, Lucas. **Características das Grandezas de Processo e Resultado de Trabalho de Retificação como Função da Composição de Rebolo de Al_2O_3** . Orientado por Dr. -Ing. Walter Lindolfo Weingaertner. Florinópolis, 2011. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florinópolis, 2011.
- BERTALAN, Cláudio. **Retificação com rebolos de nitreto de boro cúbico em máquinas-ferramentas convencionais**. Orientado por Dr. -Ing. Walter Lindolfo Weingaertner. Florinópolis, 1997. 238 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florinópolis, 1997.
- BET, Luciano. **Estudo da medição da textura de superfícies com sondas mecânicas e sondas ópticas tipo seguidor**. Florinópolis, 1999. 243 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- BIANCHI, E. C. *et al.* (2003) **Estudo dos métodos otimizados de aplicação de fluidos de corte no processo de retificação**. Revista de Ciência e Tecnologia, n. 22, v. 11 p. 7 – 18.
- BRINKSMEIER, E.; HEINZEL, C.; WITTMANN, M. **Friction, cooling and lubrication in grinding**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 48, n. 2, p. 581–598, 1999.
- CAMERON, A.; BAUER, R.; WARKENTIN, A. **An investigation of the effects of wheel-cleaning parameters in creep-feed grinding**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 50, n. 1, p. 126–130, 2009.
- CHATTI, S. *et al.* **CIRP Encyclopedia of Production Engineering**. Second edition. Springer, 2019, Second Edition, 1892 p, ISBN: 978-3-662-53119-8.
- EBBRELL, S. *et al.* **Effects of cutting fluid application methods on the grinding process**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 40, n. 2, p. 209–223, 2000.
- GRIGORIEV, S. N. *et al.* **Creep-feed grinding: An overview of kinematics, parameters and effects on process efficiency**. Strojnicki Vestnik/Journal of Mechanical Engineering, v. 60, n. 4, p. 213–220, 2014.
- GROSS, André. **Lubrificrefrigeração por tubeira do tipo sapata na retificação creep feed de aço ferramenta sinterizado temperado e revenido com rebolo de óxido de alumínio**. Orientado por Dr. -Ing. Walter Lindolfo Weingaertner. Florinópolis, 2019. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florinópolis, 2019.
- GU, Y. *et al.* **Towards the understanding of creep-feed deep grinding of DD6 nickel-based single-crystal superalloy**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 100, n. 1–4, p. 445–455, 2018.

KING, R. I.; HAHN, R. S. **Handbook of MODERN GRINDING TECHNOLOGY**. FIRST ed. Chapman and Hall Ltd, 1986.

KLEIN, M. **Einführung in die DIN-Normen**. Berlin: Teubner, 2008.

KLOCKE, F. **Manufacturing processes 2: Grinding, Honing, Lapping**. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

KÖNIG, W. **Retificação, brunimento e lapidação**. Tradução de Walter Weingaertner. Florianópolis: UFSC, 1980. 342 p. Título original: Fertigungsverfahren Band 2: Schleifen, Honen, Läppen, 1980.

LEE, J. *et al.* **Modern manufacturing - Mechanical engineering handbook**. Ed. Frank Kreith Boca raton: CRC Press LLC, 1999. v. 1p. 2466.

LI, B. K. *et al.* **An investigation on machined surface quality and tool wear during creep feed grinding of powder metallurgy nickel-based superalloy FGH96 with alumina abrasive wheels**. *Advances in Manufacturing*, v. 8, n. 2, p. 160–176, 2020.

LI, Z. *et al.* **Grinding performance and surface integrity of particulate-reinforced titanium matrix composites in creep-feed grinding**. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 94, n. 9–12, p. 3917–3928, 2017.

LOPES, Jânio Rodrigues. **Análise do comportamento do fluxo de fluido lubrificante em tubeiras do tipo sapata para a retificação em alta velocidade**. Orientado por Dr. -Ing. Walter Lindolfo Weingaertner. Florianópolis, 2007. 169 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

MACEDO, Felipe. T. Barata de. **Simulação da adução de meio lubrificante na retificação com rebolos estruturados**. Orientado por Dr. -Ing. Walter Lindolfo Weingaertner. Florianópolis, 2008. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

MARINESCU, I. D. *et al.* **Handbook of Machining with Grinding Wheels**. CRC Press, 2016, Second edition, 723 p. ISBN: 978-1-4822-0670-8.

MONTGOMERY, Douglas C., 1943 - **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. Douglas C. Montgomery, George C. Runger; Tradução e revisão técnica Verônica Calado. - Rio de Janeiro: LTC, 2014.

SOUZA, Gabriel Costa. **Desgaste radial de rebolos de CBN com aplicação de lubrificante por tubeira tipo sapata**. Orientado por Dr. -Ing. Walter Lindolfo Weingaertner. Florianópolis, 2012. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

STARKOV, V. K. (2007). **Shlifovanie vysokoporistymi krugami [Grinding with highly porous grinding wheels]**. Mashinostroenie, Moscow. (in Russian).

STARKOV, V. K.; RYABTSEV, S. A.; GORIN, N. A. (2012) **Povyshenie effektivnosti protsessov glubinnogo (Efficiency improvement in deep grinding processes)**. Moscow State University of Technology “Stankin”, Moscow. (in Russian).

WEBSTER, J. A. *et al.* **Grinding Fluid Application System Design**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 44, n. 1, p. 333–338, 1995.

WEGENER, K. *et al.* **CIRP Annals - Manufacturing Technology Conditioning and monitoring of grinding wheels**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2011.

WEINGÄRTNER, EDUARDO. **Influência do sistema de alimentação de fluido lubrificante na retificação com rebolos de CBN**. Orientado por Dr. -Ing. Walter Lindolfo Weingaertner. Florianópolis, 2005. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

ZHANG, S. *et al.* **Effect of creep feed grinding on surface integrity and fatigue life of Ni3Al based superalloy IC10**. Chinese Journal of Aeronautics, 2020.

ZHU, X. *et al.* **Performances of Ni3Al-based intermetallic IC10 in creep-feed grinding**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 108, n. 3, p. 809–820, 2020.