



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

ANDRÉ VITOR CORREA GROSS

LUBRIRREFRIGERAÇÃO POR TUBEIRA TIPO SAPATA NA RETIFICAÇÃO
CREEP FEED DE AÇO FERRAMENTA SINTERIZADO TEMPERADO E REVENIDO
COM REBOLO DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO

FLORIANÓPOLIS
2019

André Vitor Correa Gross

LUBRIRREFRIGERAÇÃO POR TUBEIRA TIPO SAPATA NA RETIFICAÇÃO
CREEP FEED DE AÇO FERRAMENTA SINTERIZADO TEMPERADO E
REVENIDO COM REBOLO DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação de 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

Coorientador: Prof. Dr. Eng. Fábio Antônio Xavier

Florianópolis
2019

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

Gross, André Vitor Correa
LUBRIRREFRIGERAÇÃO POR TUBEIRA TIPO SAPATA NA
RETIFICAÇÃO CREEP FEED DE AÇO FERRAMENTA SINTERIZADO
TEMPERADO E REVENIDO COM REBOLO DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO /
André Vitor Correa Gross ; orientador, Walter Lindolfo
Weingaertner, coorientador, Fábio Antônio Xavier, 2019.
104 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Retificação creep feed. 3.
Lubrificação com tubeira do tipo sapata. 4. Aço
ferramenta sinterizado temperado e revenido. 5.
Coeficiente de Kienzle. I. Weingaertner, Walter Lindolfo .
II. Xavier, Fábio Antônio . III. Universidade Federal de
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica. IV. Título.

André Vitor Correa Gross

**Lubrificação por Tubeira Tipo Sapata na Retificação *Creep Feed* de Aço
Ferramenta Sinterizado Temperado e Revenido com Rebolo de Óxido de
Alumínio**

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. Rolf Bertrand Schroeter
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr.-Ing. Joel Martins Crichigno Filho
Universidade do Estado de Santa Catarina

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

Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner
Orientador

Florianópolis, 29 de novembro de 2019.

À Monique Bione, amada esposa.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr.-Ing. Walter Lindolfo Weingaertner, por toda dedicação, incentivo e excelente orientação deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Eng. Antônio Xavier pela coorientação do trabalho.

Aos Professores do PosMEC da UFSC, pelo exemplo de profissionalismo e capacidade técnica que foram fundamentais para o meu desenvolvimento e realização do mestrado.

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (PosMEC), por permitirem a realização do mestrado, gratuito e de excelente qualidade.

Aos colegas da Embraco, pela oportunidade de realizar esta pesquisa nos departamentos de Ferramentaria, Metrologia e Laboratórios. Além do fundamental suporte técnico no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos meus familiares, em especial à minha esposa Monique Bione que sempre me apoiou e incentivou a realização deste mestrado.

“Anyone who has never made a mistake has never tried anything new.”

(Albert Einstein)

RESUMO

Na retificação profunda (*creep feed*) o limite da taxa de retificação é ditado pela temperatura de retificação e/ou pela potência instalada na retificadora. Na retificação *creep feed* de uma haste de inserção (denominação industrial: lamela) fabricadas em aço ferramenta sinterizado, temperado e revenido, a taxa de retificação limite empregando lubrificação por jato é atingida para uma velocidade de avanço de 70 mm/min, tanto para a limitante "temperatura", como também para a potência da retificadora. Com o objetivo de diminuir a temperatura de retificação, neste trabalho se emprega a lubrificação por tubeira do tipo sapata, temática amplamente estudada no LMP da UFSC em parceria com o IWF da ETH Zürich, na Suíça. Na retificação *creep feed* as espessuras de cavaco são muito pequenas em comparação com a retificação pendular. Embora a força de corte por gume seja menor que na retificação pendular, a pressão específica sobre os gumes é elevada, acarretando um aumento no consumo de energia elétrica por componente fabricado. Como o tempo de retificação na retificação pendular é muito maior, a retificação *creep feed* resulta em menor tempo de fabricação em relação ao processo pendular. Com o objetivo de explorar a diminuição da pressão específica de corte pelo aumento da espessura de usinagem na retificação *creep feed*, a diminuição da temperatura obtida pela lubrificação por sapata é explorada até o novo limite da taxa de retificação, pelo aumento da velocidade de avanço. Verifica-se que na retificação *creep feed* da lamela com lubrificação por jato, um aumento da velocidade de avanço de 70 para 80 mm/min leva a um aumento da temperatura acima da temperatura crítica e a peça apresenta a superfície fortemente oxidada (queima por retificação - *grinding burn*). As distorções geométricas da peça, devido ao aumento da temperatura, levam a um aumento local da taxa de retificação, atingindo o limite da potência instalada da retificadora. Baseados nos modelos de sapata de lubrificação projetados por Weingärtner e Macedo, foi desenvolvida uma tubeira do tipo sapata, com configuração geométrica adaptada à geometria da lamela. Na primeira configuração da tubeira do tipo sapata, denominada tubeira protótipo, verifica-se que a velocidade de avanço pode ser aumentada para 175 mm/min, sem que se verificassem quaisquer danos térmicos nos componentes retificados e sem que atingisse a potência limite instalada na retificadora. Para permitir uma troca rápida da tubeira tipo sapata na retificadora, esta foi reprojeta, num conceito modular, para atender os diversos modelos de lamela que são fabricados naquela ferramentaria. Com esta nova concepção da tubeira de lubrificação do tipo sapata os ensaios iniciais foram repetidos e aumentou-se a taxa de retificação até atingir os limites que ocorriam no emprego da lubrificação por jato livre. Verifica-se que um aumento da velocidade de avanço até 325 mm/min não gera danos térmicos por queima de retificação e a máquina-ferramenta opera dentro de seus limites de potência. O aumento da potência de retificação verificado é significativamente inferior que o aumento da velocidade de avanço, decorrente da diminuição do trabalho de corte com o aumento da espessura de usinagem, como também é verificado nos processos de usinagem com ferramentas de geometria definida (equação de Kienzle). Em decorrência, o consumo de energia por componente retificado nesta etapa é reduzido de 0,63 kWh/peça para 0,18 kWh/peça. Além disto, verifica-se que o aumento da velocidade de avanço de 70 para 325 mm/min não afeta significativamente o desgaste do rebolo, permanecendo este abaixo dos valores usualmente removidos no rebolo por dressamento no final de cada processo de retificação. A rugosidade ao longo do comprimento da peça se mostra uniforme, permitindo concluir que o mecanismo dominante de desgaste ao longo do ciclo de retificação de uma lamela é o microdesgaste, o que indica que os efeitos positivos obtidos pelo emprego da lubrificação com tubeira do tipo sapata poderiam ser mais explorados, caso a retificadora tivesse maior potência disponível.

Palavras chave: Retificação *creep feed*. Lubrificação com tubeira do tipo sapata. Aço ferramenta sinterizado temperado e revenido. Coeficiente de Kienzle.

ABSTRACT

In creep feed grinding the feed rate limit is determined by the grinding temperature and/or the power installed in the grinding machine. In creep feed grinding of insertion blades (industrial denomination: *lamella*) made of quenched and tempered sintered tool steel, the limit grinding rate employing jet nozzle lubri-refrigeration is achieved at a feed rate of 70 mm / min for both limiting temperature, as well as the power of the grinding machine. In order to decrease the grinding temperature, in this work is employed shoe nozzle lubri-refrigeration, a theme widely studied at LMP of UFSC in partnership with IWF of ETH in Zürich, Switzerland. In creep feed grinding the chip thicknesses are very small compared to the pendulum grinding. Although the cutting force per cutting edge is lower than in pendular grinding, the specific cutting edge pressure is higher, leading to an increase in power consumption per component manufactured. As the grinding time in pendulum grinding is much longer, creep feed grinding results in shorter manufacturing time compared to the pendulum process. In order to explore the decrease in specific cutting pressure by increasing the machining thickness in creep feed grinding, the decrease in temperature achieved by shoe nozzle lubri-refrigeration is explored to the new grinding rate limit by increasing the feed rate. It is verified that in creep feed grinding of the *lamella* with jet nozzle lubri-refrigeration, an increase in feed rate from 70 to 80 mm / min leads to a temperature rise above the critical temperature and the workpiece has a strongly oxidized surface (grinding burn). The geometric distortions of the workpiece due to the increase in temperature lead to a local increase of the grinding rate, reaching the limit of the grinding machine installed power. Based on the shoe nozzle lubri-refrigeration models designed by Weingärtner and Macedo, a shoe nozzle type was developed, with geometric configuration adapted to the geometry of the *lamella*. In the first configuration of the shoe nozzle lubri-refrigeration, called the prototype nozzle, it is verified that the feed rate can be increased to 175 mm / min, without any visible thermal damage to the ground components and without reaching the limiting power installed in the grinding machine. To allow a fast change of the shoe nozzle in the grinding machine, it has been redesigned, in a modular concept, to meet the various *lamellas* models that are manufactured in that tool shop. With this new conception of shoe nozzle lubri-refrigeration the initial tests were repeated and the grinding rate was increased until achieve the limits that occurred in the use of jet nozzle lubri-refrigeration. It is verified that an increase in feed rate up to 325 mm / min does not cause thermal damage by grinding burn and the grinding machine operates within its power limits. The increase in grinding power observed is significantly lower than the increase in feed rate, due to the decrease of cutting work with the machining thickness increase, as also seen in machining processes with defined geometry tools (Kienzle equation). As a result, the power consumption per ground component in this step is reduced from 0.63 kWh / ground part to 0.18 kWh / ground part. In addition, it is verified that the feed rate increase from 70 to 325 mm / min does not significantly affect grinding wheel wear, which remains below the values usually removed from the grinding wheel at the end of each grinding process. The roughness along the length of the workpiece has a uniform behavior, allowing concluding that the dominant mechanism of wear along the *lamella* grinding cycle is micro-wear, this indicates that the positive effects obtained through the use of shoe nozzle lubri-refrigeration could be further explored if the grinding machine had more power available.

Keywords: Creep feed grinding. Shoe nozzle lubri-refrigeration. Quenched and tempered sintered tool steel. Kienzle coefficient.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Relação entre os parâmetros variáveis de entrada, processos de retificação e resultados.	22
Figura 2.2 - Visão geral metodológica dos métodos típicos de retificação.	23
Figura 2.3 - Equações de cálculo para a taxa de remoção (Q_w) de material.	24
Figura 2.4 - Representação da retificação periférica de mergulho e periférica transversal.	25
Figura 2.5 - Comparação esquemática da retificação (a) alternante convencional e (b) <i>creep feed</i>	26
Figura 2.6 - O princípio da retificação <i>creep feed</i> e retificação pendular.	27
Figura 2.7 - Zonas de deformação elástica e plástica e formação de cavaco.	31
Figura 2.8 - Concepções de tubeiras com indicação dos volumes de fluido (Q_{fl}) na retificação.	33
Figura 2.9 - Representação esquemática de uma tubeira tipo sapata.	35
Figura 2.10 - Aspectos a serem considerados em relação à geometria da sapata.	36
Figura 2.11 - Redução de faíscas empregando tubeira tipo sapata.	37
Figura 2.12 - Redução desgaste radial do rebolo pelo uso de tubeira tipo sapata.	38
Figura 2.13 - Redução do desgaste radial do rebolo pelo aumento da velocidade de corte.	39
Figura 3.1 - Representação esquemática da retificação concordante (down grinding).	41
Figura 3.2 - Retificadora do fabricante Jung modelo C740D.	42
Figura 3.3 - Dressador de ponta única.	44
Figura 3.4 - Vista superior e lateral de uma chapa de lamelas - Corpo de prova.	47
Figura 3.5 - Chapas de lamela pré-usinadas e fixas sobre o dispositivo de fixação.	48
Figura 3.6 - Dimensões da tubeira tipo sapata.	49
Figura 3.7 - Modelo 3D da tubeira tipo sapata protótipo.	49
Figura 3.8 - Tubeira tipo sapata protótipo fabricada em aço SAE 1020.	50
Figura 3.9 - Sistema de fixação da tubeira tipo sapata protótipo.	51
Figura 3.10 - Sistema completo da tubeira tipo sapata protótipo instalado na retificadora.	52
Figura 3.11 - Corpos de provas.	52
Figura 3.12 - Aumento da velocidade de avanço com emprego da tubeira tipo sapata.	53
Figura 3.13 - Preparação das amostras metalográficas.	54
Figura 3.14 - Ensaio metalográfico dos corpos de prova retificados com velocidades de avanço de 70 (1), 100 (2), 125 (3), 150 (4) e 175 (5 e 6) mm/min.	54
Figura 3.15 - Corpo da tubeira tipo sapata.	57
Figura 3.16 - (a) Réguas de vedação superior e (b) conjunto corpo e réguas de vedação.	58
Figura 3.17 - Sistema funcional de lubrificação da tubeira tipo sapata.	59
Figura 3.18 - Sistema de fixação da tubeira tipo sapata para uso industrial.	61
Figura 3.19 - Concepção final e montagem do sistema de lubrificação da tubeira tipo sapata.	62
Figura 3.20 - Tubeira tipo sapata e interface de montagem.	63
Figura 3.21 - Tubeira tipo sapata instalada na retificadora.	64

Figura 4.1 - Fluxograma da sequência macro dos ensaios de retificação <i>creep feed</i>	66
Figura 4.2 - Parâmetros de entrada, monitorados durante a retificação e de saída dos ensaios.	67
Figura 4.3 - Vista frontal de uma lamela com a sequência de passes e remoção de material em cada passe para fabricação da peça.....	70
Figura 4.4 - Painel do comando da retificadora.	72
Figura 4.5 - Região de entrada e saída do rebolo na peça.	74
Figura 4.6 - Medição do raio da lamela.....	76
Figura 4.7 - Máquina de medição por coordenadas CNC.	77
Figura 4.8 - Exemplo do relatório de medição de raio.	77
Figura 4.9 - Medição da corrente nos cabos de alimentação do servomotor do acionamento do rebolo.....	79
Figura 4.10 - Medição de rugosidade no corpo de prova.	80
Figura 4.11 - Exemplo do relatório de rugosidade.....	80
Figura 4.12 - Lamela retificada em condição do primeiro desbaste com tubeira de jato livre para a velocidade de avanço planejada de 80 mm/min, danificada por queima por retificação.	82
Figura 5.1 - Comportamento da taxa de retificação específica média como função da velocidade de avanço real na retificação de lamelas com tubeiras do tipo sapata.	85
Figura 5.2 - Comportamento da taxa de retificação média como função da velocidade de avanço real na retificação de lamelas com tubeiras do tipo sapata.....	86
Figura 5.3 - Comportamento da corrente do motor principal em função da velocidade de avanço real na retificação de lamelas com tubeira tipo sapata.	87
Figura 5.4 - Resultados da potência consumida como função da velocidade de avanço real na retificação de lamelas com tubeira tipo sapata.....	88
Figura 5.5 - Comportamento da potência consumida por chapa de lamelas retificada como função da velocidade de avanço real na retificação de lamelas com tubeira tipo sapata.....	89
Figura 5.6 - Variação do raio devido ao desgaste do rebolo como função da velocidade de avanço real na retificação de lamelas com tubeira tipo sapata.	90
Figura 5.7 - Comportamento da taxa média de desgaste como função da velocidade de avanço real na retificação de lamelas com tubeira tipo sapata.....	91
Figura 5.8 - Resultados da rugosidade como função da velocidade de avanço real na retificação de lamelas com tubeira tipo sapata.	93
Figura 5.9 - Ganhos na produtividade na retificação de lamelas pela substituição da lubrificação de jato livre por tubeiras do tipo sapata.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Informações técnicas da retificadora Jung C740D.....	42
Tabela 3.2 - Características do rebolo de óxido de alumínio com ligante vitrificado.....	43
Tabela 3.3 - Características físico-químicas do fluido lubrificador.....	45
Tabela 3.4 - Composição química do material.....	45
Tabela 3.5 - Propriedades físicas e mecânicas do material.....	46
Tabela 3.6 - Resultados dos testes preliminares.....	55
Tabela 4.1 - Área retificada para cada passe.....	69
Tabela 4.2 - Ensaio de retificação com tubeira tipo sapata.....	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Letras Maiúsculas

C_{stat}	Densidade estática de gumes	$[\text{mm}^{-3}]$
F_c	Força de corte	$[\text{N}]$
F_{ns}	Força normal no gume	$[\text{N}]$
F_{tS}	Força tangencial no gume	$[\text{N}]$
G	Relação de desgaste G	$[\text{mm}^3/\text{mm}^3]$
G_{med}	Taxa média de desgaste G	$[\text{mm}^3/\text{mm}^3]$
I	Corrente medida	$[\text{Amper}]$
P_c	Potência de consumida	$[\text{kW}]$
P_{CL}	Pressão de fornecimento de fluido lubrificador	$[\text{bar}]$
Q_{CL}	Taxa de vazão do fluido lubrificador	$[\text{l}/\text{min}]$
Q_n	Vazão de fluido injetado	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
Q_w	Taxa de retificação	$[\text{mm}^3/\text{s}]$
Q'_w	Taxa de retificação específica	$[\text{mm}^3/(\text{mm}.\text{s})]$
$Q'_{w\ max}$	Taxa de retificação específica máxima	$[\text{mm}^3/(\text{mm}.\text{s})]$
$Q'_{w\ med}$	Taxa de retificação específica média	$[\text{mm}^3/(\text{mm}.\text{s})]$
$Q'_{w\ min}$	Taxa de retificação específica mínima	$[\text{mm}^3/(\text{mm}.\text{s})]$
R_a	Desvio médio aritmético da rugosidade	$[\mu\text{m}]$
T_μ	Profundidade de corte do gume	$[\mu\text{m}]$
V_s	Volume de material desgastado do rebolo	$[\text{mm}^3]$
V_w	Volume de material removido	$[\text{mm}^3]$

Letras Minúsculas

a_e	Profundidade de corte	[mm]
$a_{e, tot}$	Profundidade de corte total	[mm]
a_{ed}	Profundidade de corte na dressagem	[mm]
a_p	Largura de corte	[mm]
a_{ret}	Área retificada	[mm ²]
b	Largura de usinagem	[mm]
b_s	Largura do rebolo	[mm]
$b_{s\ eff}$	Largura efetiva de corte do rebolo	[mm]
b_w	Largura da peça	[mm]
d_r	Diâmetro do rolo de dressagem	[mm]
d_s	Diâmetro do rebolo	[mm]
d_w	Diâmetro da peça	[mm]
d_{wA}	Diâmetro inicial	[mm]
d_{wE}	Diâmetro após usinagem	[mm]
f_a	Avanço na direção axial	[mm]
f_{ad}	Velocidade de avanço de dressamento por revolução do rebolo	[mm]
f_r	Avanço na direção radial	[mm]
f_t	Avanço na direção tangencial	[mm]
h	Espessura da usinagem	[mm]
h_{cu}	Espessura do cavaco	[μ m]
$h_{cu, max}$	Espessura máxima do cavaco não deformado	[μ m]
k	Fator de proporcionalidade	-
k_{c11}	Pressão específica de corte (1x1 mm ²)	[N/mm ²]
m_c	Expoente de Kienzle	-
n_r	Número de revoluções do rolo de dressagem	[s ⁻¹]
n_s	Número de revoluções do rebolo	[s ⁻¹]
n_w	Número de revoluções da peça	[s ⁻¹]
v_c	Velocidade de corte	[m/s]
v_f	Taxa de avanço	[mm/s]
v_{fa}	Taxa de avanço axial	[mm/s]
v_{fr}	Taxa de avanço radial	[mm/s]

V_r	Controle da velocidade periférica do rebolo	[m/s]
V_R	Velocidade periférica do rolo de dressagem	[m/s]
V_s	Velocidade periférica do rebolo	[m/s]
V_{sd}	Velocidade periférica do rebolo na dressagem	[m/s]
V_w	Velocidade de avanço	[m/min]
V_w	Velocidade de avanço (<i>creep feed</i>)	[mm/min]
V_{wp}	Velocidade de avanço planejada (<i>creep feed</i>)	[mm/min]
V_{wr}	Velocidade de avanço real (<i>creep feed</i>)	[mm/min]

Letras Gregas

α	Controle do ângulo de inclinação do rebolo	[°]
α, β, γ	Expoentes da expressão para a espessura de usinagem, h_{cu}	-
Δr	Desgaste raio	[mm]
η	Ângulo de ação	[°]
π	Constante	-
$\cos \varphi$	Fator de potência	-

Abreviaturas e Símbolos Químicos

Al_2O_3	Óxido de alumínio
ASTMD	<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
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung e. V.</i>
ETH	<i>Eidgenössische Technische Hochschule</i>
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
HRC	Dureza Rockwell na escala B
IWF	<i>Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung</i>
LMP	Laboratório de Mecânica de Precisão
MR	<i>Methyl Red Test</i>
SAE	Sociedade de Engenheiros Automotivos
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
WEDM	<i>Wire Electric Discharge Machining</i>
WZL	<i>Werkzeugmaschinenlabor der RWTH AACHEN</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVO GERAL.....	19
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
1.3	CONTRIBUIÇÕES	20
2	REVISÃO BOBLIOGRÁFICA	21
2.1	RETIFICAÇÃO.....	21
2.1.1	Parâmetros para retificação	21
2.1.2	Tipos de retificação	23
2.1.3	Retificação plana	24
2.1.4	Retificação <i>creep feed</i>	25
2.2	REBOLOS PARA RETIFICAÇÃO <i>CREEP FEED</i>	29
2.3	SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO.....	30
2.4	RETIFICAÇÃO COM TUBEIRA TIPO SAPATA.....	36
2.5	REDUÇÃO DA PRESSÃO ESPECÍFICA	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
3.1	PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	41
3.2	MÁQUINA-FERRAMENTA	42
3.3	FERRAMENTA DE CORTE	43
3.4	FERRAMENTA DE DRESSAMENTO	43
3.5	FLUIDO LUBRIRREFRIGERANTE.....	44
3.6	MATERIAL DE ENSAIO	45
3.7	CORPO DE PROVA.....	46
3.8	SISTEMA DE FIXAÇÃO.....	47
3.9	TUBEIRA TIPO SAPATA	48
3.9.1	Tubeira tipo sapata protótipo	48
3.9.2	Tubeira tipo sapata para uso industrial	55
3.9.2.1	Sistema funcional de lubrirrefrigeração da tubeira tipo sapata para uso industrial....	56
3.9.2.2	Sistema de fixação da tubeira tipo sapata para uso industrial	60
3.9.2.3	Corpos de prova para ensaios com tubeira tipo sapata para uso industrial	64
4	PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO EXPERIMENTAL	65
4.1	PARÂMETROS DE ENTRADA.....	67
4.1.1	Velocidade de avanço	68

4.1.2	Velocidade de corte	68
4.1.3	Área retificada	69
4.1.4	Taxa de retificação	71
4.2	PARÂMETROS MONITORADOS NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO.....	71
4.2.1	Velocidade de avanço da peça	71
4.2.2	Corrente do motor principal	72
4.3	PARÂMETROS DE SAÍDA.....	73
4.3.1	Taxa de retificação específica.....	73
4.3.1.1	Cálculo de desgaste de entrada e saída do rebolo	75
4.3.2	Taxa média de desgaste.....	78
4.3.3	Potência consumida	78
4.3.4	Rugosidade.....	79
4.3.5	Zona termicamente afetada.....	81
4.4	EXECUÇÃO EXPERIMENTAL.....	81
5	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	84
5.1	TAXA DE RETIFICAÇÃO ESPECÍFICA MÉDIA.....	84
5.2	POTÊNCIA CONSUMIDA.....	87
5.3	TAXA MÉDIA DE DESGASTE.....	89
5.4	RUGOSIDADE.....	91
5.5	ZONA TERMICAMENTE AFETADA	93
5.6	GANHOS ECONÔMICOS.....	94
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	96
6.1	CONCLUSÕES.....	96
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	98
	REFERÊNCIAS	100
	BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR.....	104

1 INTRODUÇÃO

O futuro das empresas de manufatura depende fortemente da sua capacidade de adaptação às condições globais, que mudam continuamente. Segundo Klocke (2009), pode-se verificar nos últimos anos o aumento da competição internacional e, por esse motivo, a usinagem de precisão com ferramentas com gumes de geometria não definida representa uma tecnologia chave de engenharia de manufatura com alta eficiência, segurança e qualidade de usinagem, sendo este um grande diferencial competitivo.

A retificação, de acordo com Groover (2010), é um processo amplamente utilizado na indústria para obtenção de peças com geometrias precisas e, segundo Klocke (2009), os métodos de usinagem com gumes de geometria não definida são processos de precisão com os quais podem ser obtida uma qualidade de superfície muito alta e um alto grau de precisão.

Segundo Klocke (2009), esse processo era usado apenas na fase final de acabamento. Hoje, no entanto, altas taxas de retificação podem ser alcançadas com métodos de retificação de alta eficiência, onde maiores volumes de materiais retificados tornaram-se economicamente viáveis.

Dentre os diferentes tipos de processos de retificação, a retificação profunda, também denominada de retificação *creep feed*, tem a característica de permitir altas taxas de retificação, em grandes penetrações normais à superfície, com velocidade de deslocamento da peça baixa. As características deste processo são o comprimento de contato longo entre o rebolo e a peça, a pequena espessura de usinagem e a elevada geração de calor na zona de usinagem. Para boa qualidade da superfície, em termos de rugosidade, a influência térmica do calor gerado se opõe a uma integridade de superfície aproveitável para a maioria das aplicações, o que torna a aplicação do fluido lubrificador um elemento crítico.

A aplicação do lubrificador, por intermédio de uma tubeira tipo sapata, é uma solução indicada para diminuir a temperatura na região de retificação e melhorar a eficiência do fluxo de fluido lubrificador na zona de corte. Várias pesquisas têm sido desenvolvidas no LMP, em parceria com o instituto IWF na ETH (Zurique, Suíça), em processos de retificação utilizando este sistema de tubeira. Weingärtner (2005) comprovou que, com a utilização de tubeira tipo sapata em retificação cilíndrica de ferro fundido nodular com rebolos cBN, é possível aumentar em até 1000% a relação de desgaste G (*G-ratio*), se comparada esta com a usual, empregando tubeira de jato livre.

A proposta deste trabalho visa diminuir a temperatura na retificação pelo emprego de sapatas de lubrificação em um processo específico de retificação *creep feed*. Uma vez implementada a lubrificação com tubeira do tipo sapata, será aumentada a velocidade de avanço, com o objetivo de diminuir o consumo de energia por peça, até o limite de temperatura admissível na peça e/ou ao limite de potência disponível na máquina-ferramenta. O objeto de estudo escolhido é uma aplicação industrial de retificação profunda na ferramentaria de uma empresa fabricante de compressores herméticos, localizada em Santa Catarina, onde é utilizado um rebolo de óxido de alumínio (Al_2O_3) para retificar hastes de aço sinterizado, temperado e revenido. Este componente é denominado industrialmente de lamela. Um conjunto de lamelas é utilizado no processo de inserção de fio de cobre ou alumínio nos estatores dos motores elétricos de compressores herméticos.

O entendimento da lubrificação com tubeiras do tipo sapata se baseia em pesquisas bibliográficas que se estendem além dos trabalhos realizados no LMP e IWF, principalmente nos conhecimentos, soluções e resultados obtidos por Weingärtner (2005). Foi projetada e construída uma tubeira tipo sapata protótipo adaptada para o processo de retificação *creep feed* de uma lamela específica. Com este protótipo de tubeira tipo sapata são desenvolvidos ensaios preliminares. A partir dos resultados preliminares, é apresentado o projeto de tubeira modular, que obedece a princípios de troca rápida e permite o ajuste de folgas individualmente na parte superior e inferior da tubeira do tipo sapata, com o objetivo de otimizar o processo de fabricação de todas as lamelas fabricadas na citada ferramentaria e posterior aplicação em escala industrial.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é diminuir o consumo de energia por peça no processo industrial de retificação *creep feed* de lamelas de inserção, pelo aumento da espessura de usinagem, através da diminuição de temperatura obtida pela utilização de tubeira tipo sapata.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Diminuir o consumo de energia por peça pelo aumento da velocidade de avanço no processo de retificação *creep feed* com o uso de tubeira tipo sapata.

- b) Projetar e fabricar uma tubeira do tipo sapata para a aplicação específica (protótipo e definitiva).
- c) Determinar a taxa de retificação limite na retificação *creep feed* com tubeira de jato livre, mediante o aumento da velocidade de avanço tendo como critério o dano térmico visível (queima por retificação – *grinding burn*), a zona termicamente afetada e a potência disponível na máquina-ferramenta.
- d) Determinar a taxa de retificação limite na retificação *creep feed* com tubeira tipo sapata, mediante o aumento da velocidade de avanço, tendo como critério o dano térmico visível (queima por retificação – *grinding burn*), a zona termicamente afetada e a potência disponível na máquina-ferramenta;
- e) Avaliar o consumo de energia por peça.

1.3 CONTRIBUIÇÕES

A presente pesquisa visa fazer contribuições acadêmicas e industriais. Baseada nos vastos trabalhos realizados com tubeiras tipo sapata no LMP e em cooperação com o IWF da ETH Zurique, Suíça. Objetiva-se entender e explorar a melhor lubrificação, a diminuição de temperatura de retificação e o aumento da relação G verificada nestes trabalhos. Além disto, o aumento da taxa de retificação na retificação *creep feed* e assim, pelo aumento da secção retificada, garantir uma diminuição do consumo de energia por peça fabricada. As contribuições para a indústria estão relacionadas ao aumento de produtividade, possíveis pela diminuição da temperatura de retificação, propiciada por um conceito diferenciado de lubrificação com tubeira tipo sapata, que possibilita o aumento da taxa de retificação. Desta forma, obter uma redução dos custos de fabricação, aumento de competitividade e, através do menor consumo de energia por componente fabricado, tornar o processo menos agressivo ao ambiente. Além disto, uma das maiores contribuições do projeto consiste na aplicação de uma tecnologia de domínio público, já dominada no Laboratório de Mecânica de Precisão da Universidade Federal de Santa Catarina, em um ambiente industrial. Outra contribuição importante é a geração de *know-how* na equipe de engenheiros que poderá, futuramente, utilizar o conceito de lubrificação com tubeira tipo sapata em outros processos de retificação da empresa.

2 REVISÃO BOBLIOGRÁFICA

Para embasar o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa e buscar os conceitos e fenômenos pertinentes ao tema da dissertação, é apresentada uma revisão de literatura sobre processo de retificação, retificação *creep feed*, rebolos para retificação *creep feed*, sistemas de refrigeração, retificação com tubeira tipo sapata e redução da pressão específica.

2.1 RETIFICAÇÃO

De acordo a norma DIN 8589, a retificação é o processo de usinagem com gumes de corte geometricamente não definidos, onde também fazem parte os processos de afiação, lapidação, polimento, jateamento e tamboreamento. A retificação merece destaque pela sua importância para a indústria metalmeccânica, visto que o processo é capaz de assegurar a produção de componentes com tolerâncias dimensionais e geométricas superiores às obtidas em operações que utilizam ferramentas de corte com geometria definida (MACHADO *et al.*, 2009).

O processo de retificação é extensivamente utilizado na indústria metalmeccânica para obtenção de peças com geometrias precisas. Muitas peças usinadas têm a retificação como última operação de uma ou várias de suas superfícies. Suas principais características são: possibilidade de obtenção de tolerâncias apertadas, entre IT 4 e IT 6, e baixa rugosidade, entre R_a de 0,2 e 1,6 μm . Assim, em geral, é um processo de acabamento (DINIZ *et al.*, 1999).

Segundo Groover (2010), a retificação é um processo de usinagem de material, realizado por partículas abrasivas ligadas que estão contidas em um rebole com elevada velocidade periférica. O rebole é geralmente fabricado em forma de disco, montado sobre um flange de interface com a máquina-ferramenta e é precisamente balanceado para operar com elevadas velocidades de rotação. De acordo com Klocke (2009), a usinagem é realizada através de grãos mais ou menos formados irregularmente, compostos por substâncias duras e colocadas em contato com o material a ser usinado.

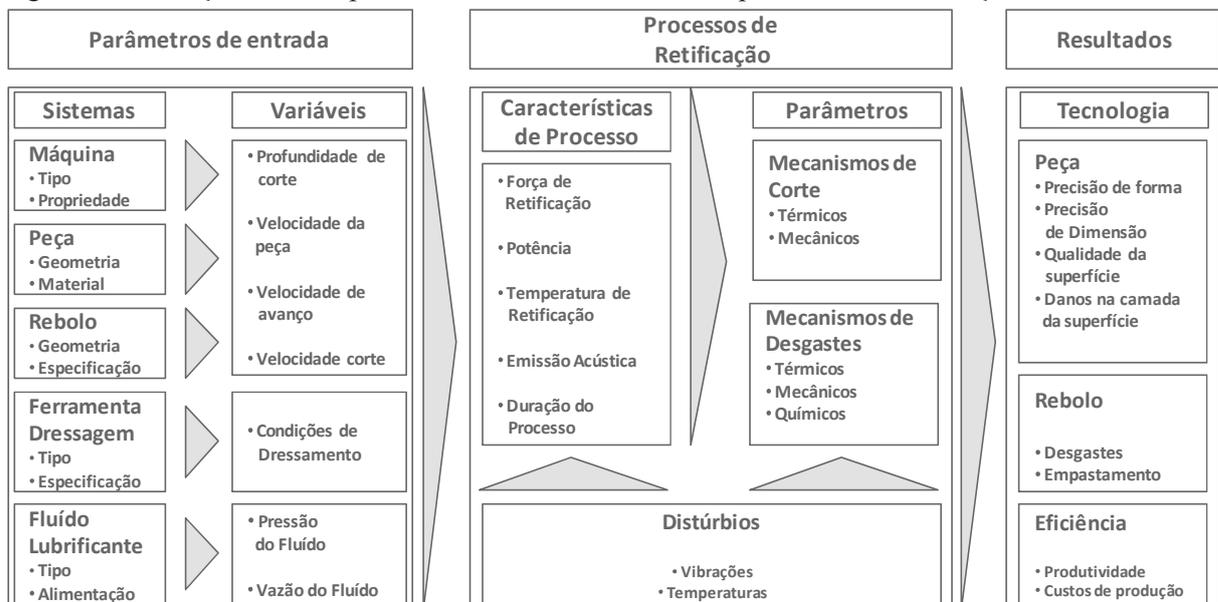
2.1.1 Parâmetros para retificação

De acordo com Klocke (2009), com os desenvolvimentos realizados ao longo dos últimos 100 anos no Laboratório de Máquinas-Ferramenta WZL de Aachen, Alemanha, os

processos de retificação são geralmente descritos com a ajuda de parâmetros ou características, independentemente do método de retificação utilizado. Para uma comparação metodologicamente abrangente de diversas estratégias de retificação, foram propostos vários parâmetros de entrada do processo, que serão descritos a seguir.

Os parâmetros variáveis de entrada do processo oferecem ao técnico de retificação a possibilidade de influenciar o processo. O mesmo é avaliado pelas grandezas características, e assim, permitir comparar os vários métodos de retificação e interpretar a saída para fazer mudanças nas variáveis em prol da otimização do processo. A introdução de máquinas-ferramenta com comando numérico (CN) também inspirou maior interesse na especificação dos parâmetros variáveis de entrada, visto que estes, normalmente, passam a ser especificados pela engenharia de processos e não mais pelo operador. Para que o processo possa transcorrer de forma autônoma, os sistemas de controle de processo requerem sensores que captem valores mensuráveis das grandezas características durante o processo de retificação, como por exemplo, a força de corte ou a potência. Para garantir a manutenção da qualidade dos componentes retificados, deve ser conhecida a sua influência sobre o resultado de trabalho, figura 2.1.

Figura 2.1 - Relação entre os parâmetros variáveis de entrada, processos de retificação e resultados.



Fonte: adaptado de KÖNIG, 1980 e KLOCKE, 2009.

2.1.2 Tipos de retificação

A operação de retificação é caracterizada por uma remoção descontínua de material, resultante da interferência geométrica dos múltiplos gumes de um rebolo e a peça, decorrente do movimento relativo entre os dois corpos. A velocidade periférica do rebolo (a velocidade de corte) não interfere na taxa de retificação. O movimento de avanço pode ser contínuo (retificação cilíndrica de mergulho), ser composto por vários movimentos acoplados cinematicamente (retificação cilíndrica longitudinal) ou ter a penetração passiva estabelecida a cada passe (retificação plana *creep feed*). A penetração passiva determina a espessura da camada a ser removida por passe. A figura 2.2 mostra esquematicamente a configuração dos principais processos de retificação e as grandezas principais de entrada no processo (velocidade de corte v_c , a velocidade de trabalho da peça v_w e as velocidades de avanço principais nas direções axial, radial e tangencial v_{fa} , v_{fr} e v_{ft}). Os avanços nestas três direções são rotulados de acordo com os índices f_a , f_r e f_t . O rebolo penetra na peça com a profundidade passiva a_e e a largura de trabalho ou corte a_p . A partir dos dados variáveis que levam à interferência geométrica é calculada a taxa de retificação Q_w , que é o volume de material removido por unidade de tempo (KLOCKE, 2009).

Figura 2.2 - Visão geral metodológica dos métodos típicos de retificação.

	cilíndrica		superfície	rotação	
	cilíndrica externa				interna
	entre centros	centerless			
retificação periférica mergulho					
retificação periférica transversal					
retificação lateral mergulho					

Fonte: Klocke (2009).

A figura 2.3 fornece uma visão geral das equações para o cálculo da taxa de retificação (Q_w) para os vários métodos de retificação.

Figura 2.3 - Equações de cálculo para a taxa de remoção (Q_w) de material.

$Q_w = a_e \cdot a_p \cdot v_w$ $Q'_w = \frac{Q_w}{b_{s\text{eff}}}$	cilíndrica			superfície	rotação
	cilíndrica externa		interna		
	entre centros	centerless			
retificação periférica mergulho	$Q_w = \pi \cdot d_w \cdot v_{fr} \cdot a_p$ $v_{fr} = a_e \cdot n_w$ $a_p = b_s = b_{s\text{eff}}$	$Q_w = 1/2 \pi \cdot d_w \cdot v_{fr} \cdot b_s$ $n_w = n_r \cdot \frac{d_r}{d_w}$ $v_{fr} = 2 \cdot a_e \cdot n_w$ $a_p = b_s = b_{s\text{eff}}$	$Q_w = \pi \cdot d_w \cdot v_{fr} \cdot a_p$ $v_{fr} = a_e \cdot n_w$ $a_p = b_s = b_{s\text{eff}}$	$Q_w = v_w \cdot a_p \cdot a_e$ $a_p = b_s = b_{s\text{eff}}$	$Q_w = v_w \cdot a_p \cdot a_e$ $v_w = \pi \cdot d_w \cdot n_w$ $v_{fr} = a_e \cdot n_w$ $a_p = \frac{d_{wa} - d_{wi}}{2} = b_{s\text{eff}}$
retificação periférica transversal	$Q_w = \pi \cdot d_w \cdot v_{fa} \cdot a_e$ $v_{fa} = a_p \cdot n_w$ $a_p = b_{s\text{eff}}$	$Q_w = \pi \cdot d_w \cdot v_{fa} \cdot a_e$ $v_{fa} = n_r \cdot \pi \cdot d_r \cdot \sin \alpha_r$ $a_p = b_{s\text{eff}}$	$Q_w = \pi \cdot d_w \cdot v_{fa} \cdot a_e$ $v_{fa} = a_p \cdot n_w$ $a_p = b_{s\text{eff}}$	$Q_w = v_w \cdot a_p \cdot a_e$ $a_p = b_{s\text{eff}}$	$Q_w = a_e \cdot a_p \cdot v_w$ $v_w = \pi \cdot d_w \cdot n_w$ $a_p = \frac{v_{fa}}{n_w} = b_{s\text{eff}}$
retificação lateral mergulho	$Q_w = \pi \cdot d_w \cdot v_{fr} \cdot a_p$ $v_{fr} = a_e \cdot n_w$ $a_e = b_{s\text{eff}}$			$Q_w = a_e \cdot b_w \cdot v_{fa}$ $b_{s\text{eff}} \text{ not defined}$	$Q_w = v_w \cdot a_p \cdot a_e$ $v_w = \pi \cdot d_w \cdot n_w$ $a_e = \frac{d_{wa} - d_{wi}}{2}$ $a_p = \frac{v_{fr}}{n_w} = b_{s\text{eff}}$

Fonte: Klocke (2009).

Para permitir a comparação entre dois processos de retificação é usual estabelecer a taxa de retificação específica Q'_w , que é o volume removido na unidade de tempo por unidade de largura do rebolo. Esta grandeza permite comparar processos de retificação distintos. A espessura máxima do cavaco não deformado $h_{cu,max}$ é dado pela equação 2.1, (KLOCKE, 2009).

$$h_{cu,max} \approx k \left[\frac{1}{C_{stat}} \right]^\alpha \left[\frac{v_w}{v_s} \right]^\beta \left[\frac{a_e}{d_s} \right]^\gamma \tag{2.1}$$

2.1.3 Retificação plana

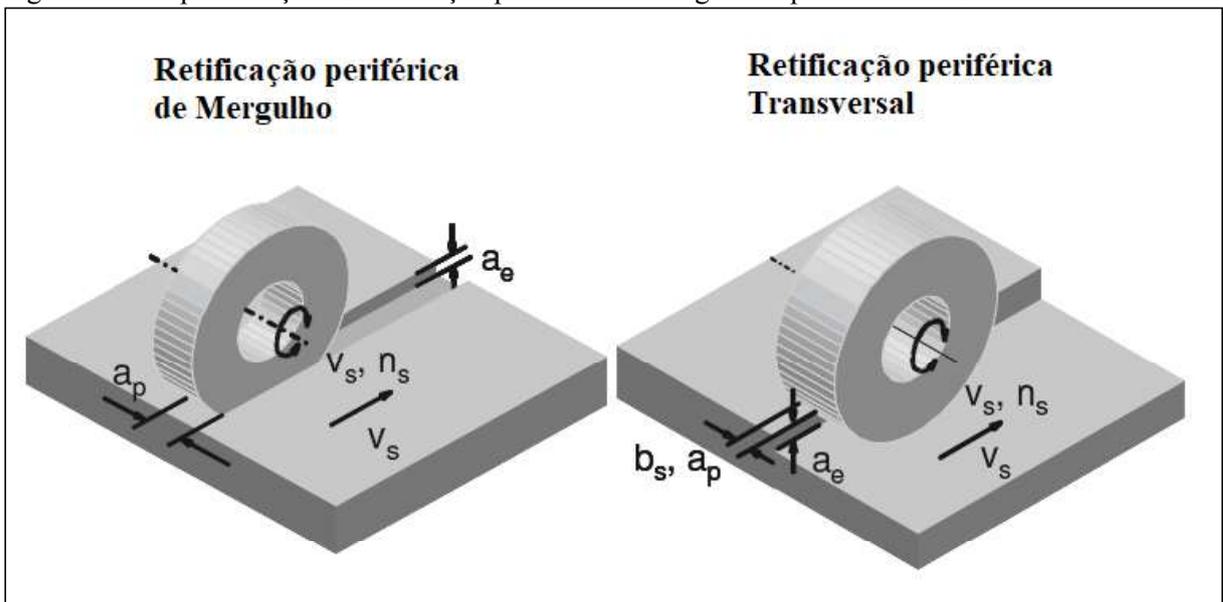
A retificação plana é utilizada para retificar superfícies planas, sendo realizada pela face lateral ou pela periferia do rebolo. Este tipo de retificação é normalmente mantido em uma orientação horizontal. A retificação periférica é realizada girando o rebolo em torno de

um eixo horizontal. Na retificação com a face lateral do rebolo, este gira em torno de um eixo vertical (GROOVER, 2010).

A retificação de superfícies planas, de acordo com Klocke (2009), serve para criar superfícies que são completamente niveladas ou que se estendem na direção de avanço principal da retificação em linha reta. Na prática industrial, conforme figura 2.4, os métodos mais utilizados são:

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

Figura 2.4 - Representação da retificação periférica de mergulho e periférica transversal.

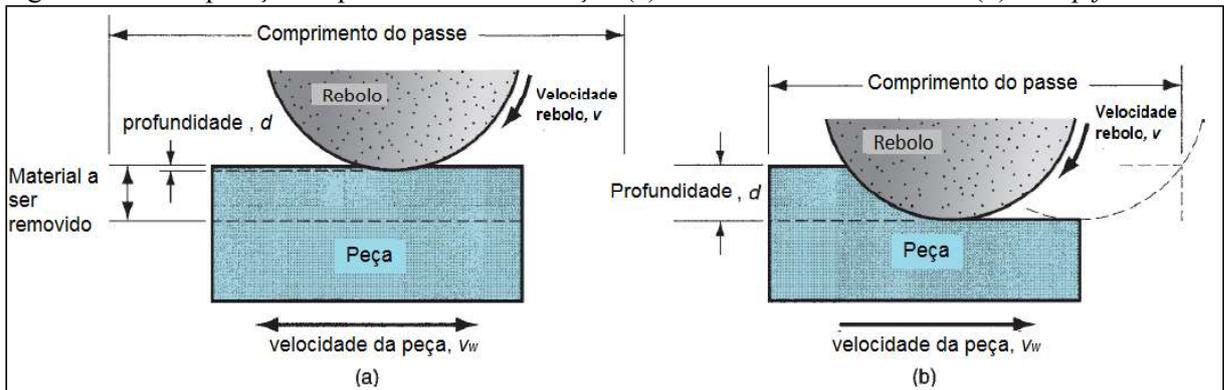


Fonte: Klocke (2009).

2.1.4 Retificação *creep feed*

A retificação *creep feed*, de acordo com Groover (2010), é um processo de retificação, desenvolvido por volta de 1958, onde uma determinada taxa de retificação é obtida pela conjugação de uma grande penetração passiva e velocidade de avanço baixa. A comparação com a retificação alternante convencional é ilustrada na figura 2.5.

Figura 2.5 - Comparação esquemática da retificação (a) alternante convencional e (b) *creep feed*.



Fonte: Groover (2010).

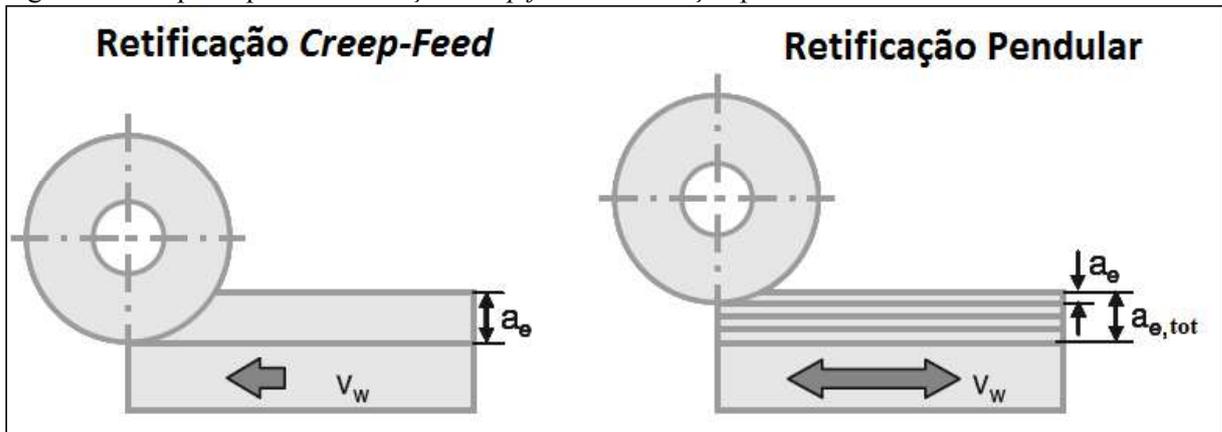
Para a mesma taxa de retificação a equação 2.2:

$$Q_w = v_w \cdot a_p \cdot a_e \quad (2.2)$$

deve ser satisfeita. Seja aumentando a penetração passiva, a velocidade de avanço deve diminuir na mesma proporção. Em decorrência, embora se verifique uma diminuição do número de gumes cinemáticos, a diminuição da espessura de usinagem tem por consequência um aumento da pressão específica de corte, conseqüentemente, um aumento da força de corte e, com isto, da potência de retificação requerida. Disto resulta um aumento significativo da temperatura.

Segundo Klocke (2009), as vantagens da retificação *creep feed* em relação à retificação alternante (tipo pêndulo), devido à diminuição da espessura dos cavacos, são a diminuição da rugosidade da superfície retificada da peça e, em decorrência da diminuição da força por gume, a diminuição do desgaste do rebolo. Para garantir uma boa integridade da superfície retificada deve-se dar especial atenção à lubrificação/refrigeração. A retificação *creep feed* é utilizada na indústria, especialmente na retificação de perfis, guias e perfis de múltipla cauda de andorinha de fixação de lâminas de turbinas, perfis de brocas e fresas de topo, entre outras. Além disto, como mostrado na figura 2.6, os tempos de retificação são mais curtos do que na retificação pendular, pois não há tempo gasto em movimento livre sem usinagem na inversão do sentido de movimento da mesa.

Figura 2.6 - O princípio da retificação *creep feed* e retificação pendular.



Fonte: Klocke (2009).

Segundo Lee *et al.* (1999), a retificação *creep feed* é limitada pela grande quantidade de calor gerada na região de formação de cavacos, o que pode resultar em dano térmico ou "queima de retificação".

Desta forma, a preocupação com a diminuição da temperatura de retificação é de fundamental importância. Para diminuir a temperatura na região de contato entre o reboleto e a peça podem ser buscados caminhos distintos: diminuir a velocidade de corte, melhorar a eficiência da lubrificação ou diminuir a quantidade de calor gerado na região de corte.

A diminuição da velocidade de corte, para uma determinada taxa de retificação, aumenta a espessura do cavaco e deixa supor que deverá ocorrer uma diminuição da pressão de corte. Porém, com a diminuição da velocidade de corte, a taxa de retificação limite diminui devido a maiores deformações plásticas na geração dos cavacos e, conseqüente, maior empastamento do reboleto (KLOCKE, 2009).

A retificação *creep feed* requer um suprimento abundante de fluido lubrificante, fornecido em alta pressão para a zona de retificação, para assim permitir que rapidamente se transporte o calor para fora da região de contato. Pelo emprego de aditivos de alta pressão o fluido lubrificante também é responsável pela diminuição do atrito, que resulta na diminuição do calor gerado no escorregamento do flanco dos gumes na região de contato (GUO, 1994).

Outro caminho para reduzir a pressão de corte é garantir que o reboleto permaneça sempre afiado com uma renovação de gumes eficiente. Este caminho é alcançado pela busca de um reboleto com uma dureza baixa, de forma que para um aumento da pressão de corte se tenha o lascamento dos gumes ou arranchamento dos grãos cegos da estrutura do reboleto. No entanto, a dureza não pode ser reduzida indefinidamente, pois desta forma a qualidade

geométrica do componente é prejudicada pela perda de forma do rebolo. Como consequência do aumento da porosidade do rebolo, para a retificação *creep feed*, se contempla também um segundo fator que leva a uma redução da quantidade de calor gerado.

Desde os primórdios das aplicações de retificação profunda, os fabricantes de rebolos fornecem rebolos específicos para a retificação profunda, com elevada porosidade e assim, maior afastamento entre os grãos abrasivos e, conseqüentemente, maiores distâncias entre os gumes cinemáticos. Com isto, a espessura dos cavacos é aumentada e, para a mesma taxa de retificação, se obtém temperaturas menores que na retificação profunda com rebolos adequados para a retificação pendular (KLOCKE, 2009). Outra forma de aumentar a espessura de cavacos, e assim usufruir da diminuição da pressão específica na geração dos cavacos, é aumentar a taxa de retificação. No entanto, este procedimento aumenta ainda mais a temperatura na região de corte, exigindo uma eficiência ainda maior da lubrificação.

De acordo com Irani (2005), um dos principais fatores limitantes nas taxas de retificação da retificação *creep feed* é o dano térmico. Este dano pode ser reduzido pela aplicação de um fluido de corte que reduza a quantidade de calor pela adição de aditivos de super-lubrificação, lubrificando as superfícies em contato com movimento relativo para diminuir a quantidade de calor gerado por atrito e reduzir o calor transferido para a peça.

De acordo com Lavine (1990), existem três regimes para um fluido em contato com uma superfície aquecida. Se a temperatura do objeto a ser refrigerado estiver abaixo do ponto de ebulição, o fluido permanece líquido. Quando a temperatura exceder o ponto de ebulição, o fluido passará por ebulição nucleada, no qual bolhas se formam na superfície quente e se afastam dela. A taxa de transferência de calor para a ebulição do nucleado é maior do que para a fase líquida, porque as bolhas agitam o fluido e aumentam a convecção. À medida que a temperatura aumenta ainda mais, o vapor forma uma película que cobre a superfície aquecida e suprime fortemente a transferência de calor. Segundo Lavine (1990), na região de geração de calor na retificação as temperaturas são tão elevadas que domina o terceiro regime.

O superaquecimento da região de contato é decorrente, principalmente, pelo calor gerado pela usinagem. Na presença de oxigênio do ambiente, a baixa eficiência da lubrificação e, conseqüente, temperatura excessiva, a peça sofre uma forte oxidação denominada de queima de retificação (*grinding burn*) ou, denominada simplesmente, de “queima”. A mudança de cor da região oxidada do componente retificado ocorre para temperaturas entre 300 °C, em aços de baixo teor de carbono, até temperaturas acima de 600 °C para aços ferramenta e aços rápidos. Segundo Lavine (1990), o aumento da temperatura está associado à ausência de refrigeração, ocasionada pela ebulição local do fluido de corte,

onde a superfície recém-retificada apresenta temperaturas nas quais ocorre a sua oxidação. Nesta condição, a energia na retificação flutua repentinamente, a temperatura da zona de retificação aumenta de 120 °C para 1000 °C ou mais e ocorre queima de peças. Lavine (1990) sugere que o fenômeno de queima esteja associado à transição entre a nucleação de bolhas de vapor para um filme de vapor do fluido lubrificante. Quando ocorre a ebulição, a taxa de transferência de calor para o fluido lubrificante diminui subitamente e, conseqüentemente, a temperatura da zona de retificação aumenta acentuadamente, excedendo a temperatura na qual a queima ocorre. Os resultados de Lavine (1990) são corroborados com resultados da retificação *creep feed* sem um fluido lubrificante na zona de retificação, quando também ocorre a queima da superfície da peça. A ocorrência de marcas de oxidação (queima) na superfície sempre indica a ocorrência de danos térmico-metalúrgicos na camada limite no componente.

2.2 REBOLOS PARA RETIFICAÇÃO *CREEP FEED*

A retificação *creep feed* requer uma lubrificação eficiente, obtida através de seu fornecimento correto e constante na zona de retificação, com o objetivo de reduzir a geração de calor e evitar danos térmicos na camada próxima à superfície da peça. Devido ao comprimento de contato longo, os rebolos para a retificação *creep feed* apresentam uma porosidade elevada, que garante tanto o armazenamento dos cavacos, como também o transporte adequado do fluido de corte para a região de formação de cavacos. Com o aumento da penetração passiva de retificação, o comprimento de contato entre a peça e o reboło aumenta, tornando mais difícil disponibilizar o fluido lubrificante ao longo de todo o comprimento de contato, conseqüentemente, a remoção de calor e transporte de cavacos são prejudicados. Por esta razão, a retificação *creep feed* utiliza rebolos de estrutura aberta de baixa dureza e, também, um fornecimento de fluido lubrificante efetivo com grande fluxo de volume a altas pressões.

De acordo com Engineer (1992), a porosidade do reboło é um dos principais fatores que garante a quantidade de fluido que passa pela zona de retificação. Reboło com maior porosidade e, portanto, maior quantidade de poros abertos na periferia do reboło, retém maior quantidade de fluido lubrificante que será transportado através da zona de retificação.

Segundo Grigoriev *et al.* (2014), o fluxo de fluido através da zona de retificação, melhorado pelo uso de rebolos porosos, permite que na retificação *creep feed*, com rebolos de

óxido de alumínio (Al_2O_3), a fração de calor que entra na peça seja diminuída. Mesmo assim, as quantidades de calor geradas na retificação *creep feed* com rebolos de óxido de alumínio podem ser comparadas às aplicações que empregam rebolos de cBN vitrificadas.

Além de permitir maior transporte de fluido lubrificante e garantir um volume de poros adequado para o transporte dos cavacos, a maior distância entre os gumes cinemáticos dos rebolos de elevada porosidade garante que, para uma determinada taxa de retificação, a pressão específica de corte seja menor que a verificada no emprego de um rebolo de baixa porosidade, adequado para a retificação pendular. Esta condição permite que a taxa de retificação de material seja aumentada, uma vez que um rebolo com elevada porosidade gera menos calor do que um rebolo fechado e, conseqüentemente, a quantidade de calor que entra na peça a ser retificada é reduzida. Por este motivo, os rebolos de óxido de alumínio (Al_2O_3), com elevada porosidade, têm uma grande importância para aplicações industriais de retificação *creep feed*. Estes rebolos possuem um custo relativamente mais baixo se comparados a rebolos cBN e, se corretamente aplicados, são mais econômicos.

Outro fator importante para os rebolos na retificação *creep feed*, segundo Cameron (2009), é que a eficácia do processo de retificação está relacionada ao grau de afiação do rebolo. Um rebolo com um microdesgaste mais acentuado promove a formação de topos platafórmicos dos grãos, o rebolo se torna menos agressivo e se formará um acabamento com menor rugosidade, porém mais propenso a causar danos térmicos à peça se não for devidamente resfriado. Em decorrência do aumento da temperatura de retificação, os cavacos com maior deformação plástica tendem a obstruir os poros que não podem ser transportados pelo fluido lubrificante e, por este motivo, permanecer aderido nos poros do rebolo. Esse fenômeno, chamado de carregamento (ou empastamento) do rebolo, pode obstruir os poros do rebolo de tal forma que os danos térmicos na peça sejam ainda mais acentuados.

2.3 SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

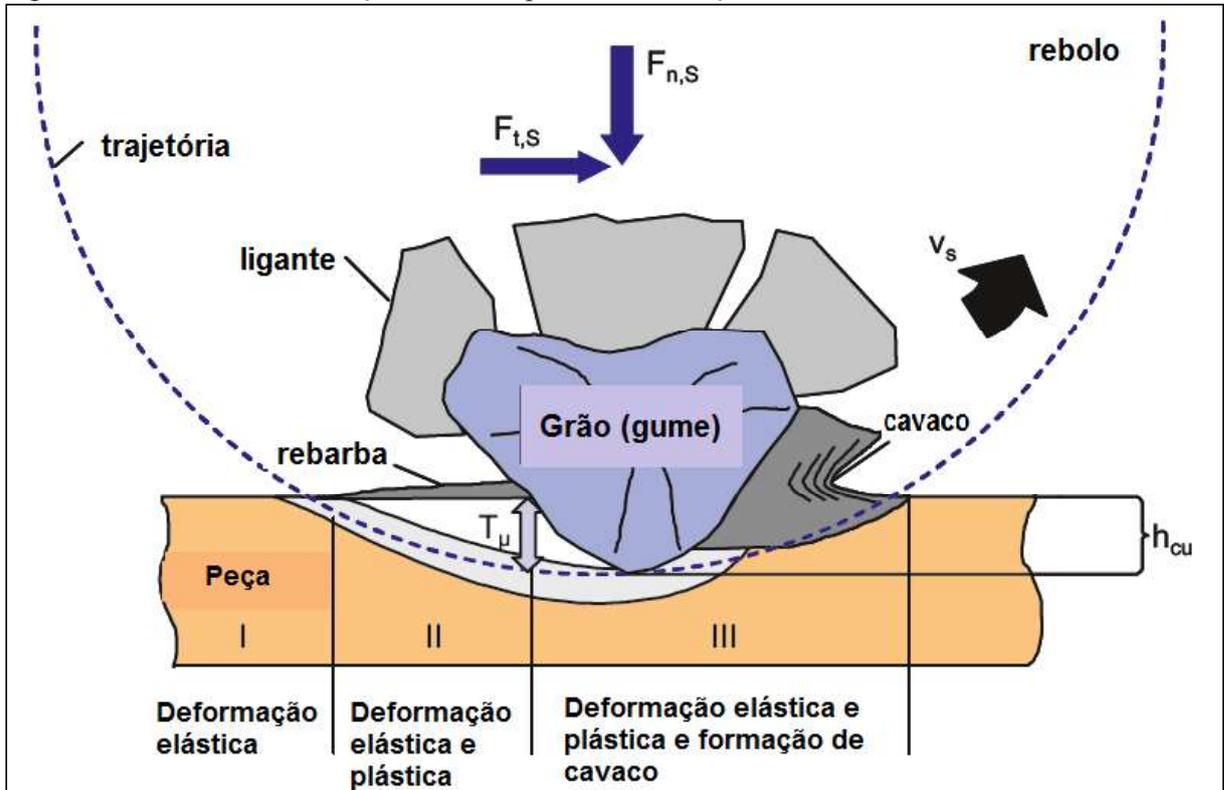
Segundo König (1980), no processo de retificação a geração de calor está intimamente relacionada ao mecanismo de formação do cavaco, onde se distinguem três fases:

- Fase I: atrito entre o grão abrasivo e a peça e apenas deformação elástica;
- Fase II: atrito entre o grão do rebolo e a peça e, devido às deformações plásticas no sentido transversal ao movimento de corte, atrito interno do material;

- Fase III: atrito entre grão do rebolo e peça, deformações elásticas e devido às deformações plásticas, o atrito interno do material e a separação do material, gerando o cavaco.

As três fases da zona de deformação podem ser observadas na figura 2.7.

Figura 2.7 - Zonas de deformação elástica e plástica e formação de cavaco.



Fonte: Klocke (2009).

Os processos de cisalhamento, corte e fricção envolvidos na retificação geram uma grande quantidade de calor. De forma distinta ao processo de usinagem com ferramenta de corte de geometria definida, onde mais de 60% do calor é removido pelo cavaco, na retificação apenas uma pequena parcela é removida pelos cavacos e, devido ao calor que permanece na peça, este eleva a temperatura da camada limite e pode levar à geração de consideráveis tensões térmicas na peça e rebolo (KLOCKE, 2009).

Por estes motivos, na retificação, a lubrificação deve cumprir tarefas primárias e secundárias. As duas funções primárias são:

1. Redução do atrito entre o grão abrasivo e a peça, formando uma película de lubrificação estável e;
2. Refrigeração da superfície da peça através da absorção e transporte de calor.

As funções secundárias específicas incluem:

- Limpeza do rebolo e da peça;
- Transporte dos cavacos para fora da área de usinagem e;
- Criação de resistência à corrosão tanto para a máquina quanto para a peça.

As principais diferenças das características geométricas da raiz de cavaco da retificação, em comparação com a raiz de cavaco dos processos de usinagem com ferramentas de geometria definida são: os raios de gume e área de contato entre os flancos da cunha de corte e a peça que são relativamente maiores, e em decorrência da pequena espessura de usinagem, os ângulos de saída são extremamente negativos. Estes aspectos favorecem uma alta fricção entre os topos dos grãos abrasivos (flancos) e a superfície da peça. Estas características microgeométricas de contato trazem dificuldades no fornecimento de lubrificante para a zona de retificação, resultando assim em um alto risco de danos térmicos na camada próxima à superfície da peça, bem como no carregamento e desgaste do rebolo. Os processos termomecânicos na zona de contato são definidos pelas relações tribológicas entre os gumes do grão, o ligante do rebolo, a peça e o cavaco à medida que se forma. Por estas razões, o fluido lubrificante desempenha um papel decisivo na geração e dissipação de calor durante a retificação (BRINKSMEIER *et al.*, 1999).

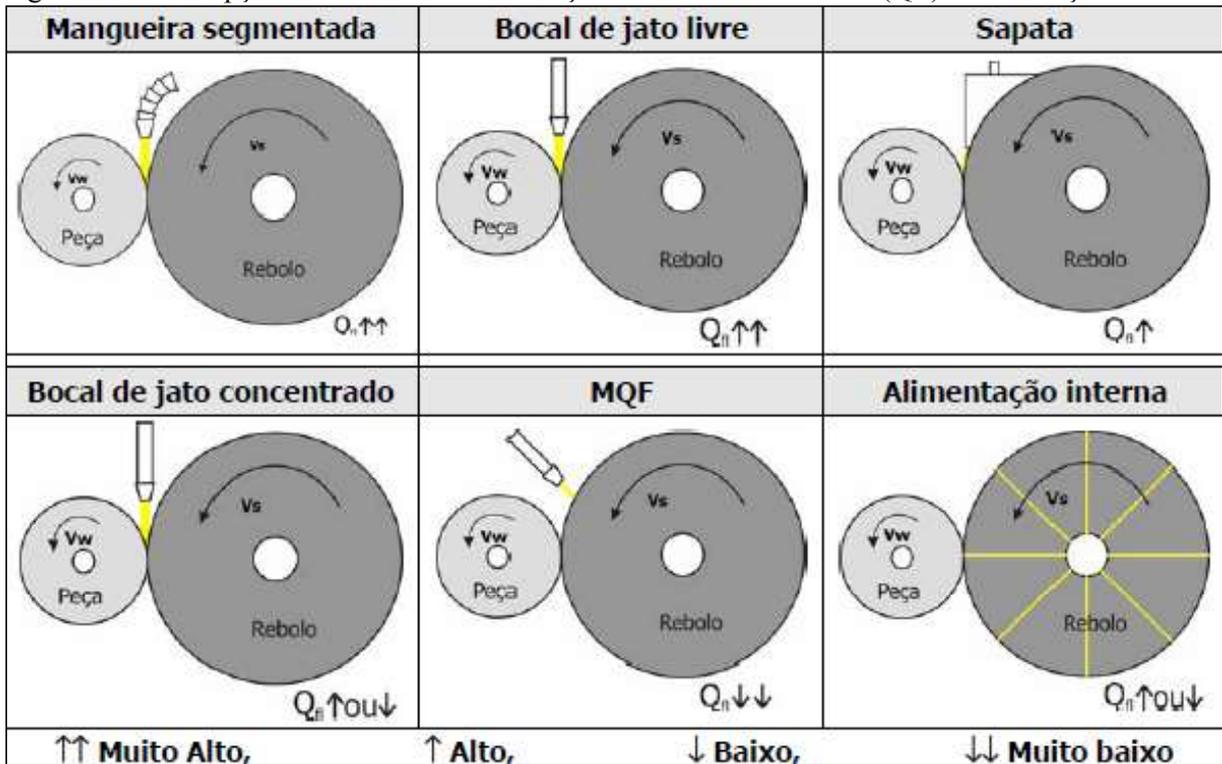
Segundo Webster *et al.* (2007), a aplicação de fluidos lubrificantes na retificação é crítica para a qualidade da superfície da peça e o tempo de vida do rebolo. Esta afirmação é especialmente verdadeira na retificação *creep feed*, em que o arco de contato entre o rebolo e a peça é longo, a geração de calor é alta e os cavacos produzidos são longos e, somados aos abrasivos desprendidos do rebolo, precisam ser removidos pelo volume de poros do rebolo. Esta condição de usinagem resulta na tentativa de manter a qualidade e a economia do processo e, geralmente, induz a aplicação de fluxos elevados de fluidos lubrificantes. Para Jin *et al.* (2003), o fluido lubrificante é especialmente importante para as condições de retificação *creep feed*, onde são usadas baixas velocidades de avanço e grandes penetrações passivas. Nestas condições mais de 90% do calor é retirado pelo fluido de lubrificante.

De acordo com Brinksmeier *et al.* (1999), os requisitos de refrigeração e lubrificação diferem em todas as aplicações e dependem principalmente das condições de retificação. Os lubrificantes devem, idealmente, ser compostos de acordo com cada caso específico. Cada lubrificante consiste em um fluido básico, ao qual são adicionados outros produtos, como agentes antidesgaste, anticorrosivos ou emulsionantes. A norma alemã DIN

subdivide os fluidos lubrificadorrefrigerantes de acordo com a DIN 51385. A subdivisão é realizada pelos tipos baseados em óleo e água.

A eficiência do fluido lubrificadorrefrigerante não é apenas determinada pelas propriedades físicas e químicas do fluido de corte, mas também pelo método de fornecimento do fluido à região de corte. Para um fornecimento suficiente de fluido de corte na área de contato com a peça, a vazão do fluido de corte, a velocidade de saída do fluido de corte, o formato e a posição do bocal do fluido de corte são importantes (KLOCKE, 2009). Para Morgan (2009), a geometria da tubeira influencia a velocidade de escoamento do fluido e o padrão do fluxo na saída do orifício do bocal. É importante para a eficiência do processo de retificação que o fluido lubrificadorrefrigerante seja fornecido de uma maneira que garanta que a velocidade de jato desejada tenha cobertura adequada da zona de contato. Conforme Brinksmeier *et al.* (1999) *apud* Macedo (2008), as principais concepções de tubeiras de adução de fluido lubrificadorrefrigerante são mostradas na figura 2.8, com a indicação das vazões do fluido.

Figura 2.8 - Concepções de tubeiras com indicação dos volumes de fluido (Q_f) na retificação.



Fonte: Brinksmeier (1999).

Irani (2007) apresenta o conceito de tubeira flutuante, sendo este um sistema de fornecimento de lubrificadorrefrigerante formado por um bocal com uma saída tangenciando o rebolo, um tubo de abastecimento e um mecanismo com mola para garantir o contato entre a face da tubeira e o rebolo.

A concepção mais aplicada de sistemas de fornecimento de lubrificador na indústria é a "tubeteira de jato livre". Neste caso, o lubrificador tem a direção ajustada para a zona de retificação através de um tubo, mangueira flexível ou outro condutor similar. Próximo à zona de contato, o fluido lubrificador deixa o bocal do tubo e, ao menos uma fração deste, atinge a zona de retificação. Com tubeteiras de jato livre geralmente são aplicadas altas vazões de fluido lubrificador (WEINGÄRTNER *et al.*, 2005). Segundo Ebbrell *et al.* (2000), nos métodos convencionais de lubrificação grandes volumes de fluido de corte são fornecidos, dos quais apenas uma pequena percentagem pode ser considerada de fluxo útil.

Na retificação, com o aumento da velocidade periférica do rebolo, o colchão de ar que se forma em torno do rebolo torna mais difícil o fluido lubrificador atingir o rebolo e a zona de retificação. O ar é acelerado pelas asperezas da superfície do rebolo, o que leva à formação do colchão de ar. O colchão de ar se opõe à entrada do fluido lubrificador para a região de corte e tornam a aplicação ineficiente (WEINGÄRTNER *et al.* 2005). Segundo Webster (2007), tem sido demonstrado por muitos pesquisadores, que o colchão de ar que envolve o rebolo apresenta a mesma velocidade que a periferia do rebolo e pode interromper o fluxo de fluido lubrificador na zona de retificação. A espessura da barreira de ar depende do tamanho do grão e da porosidade do rebolo e é difícil de estimar.

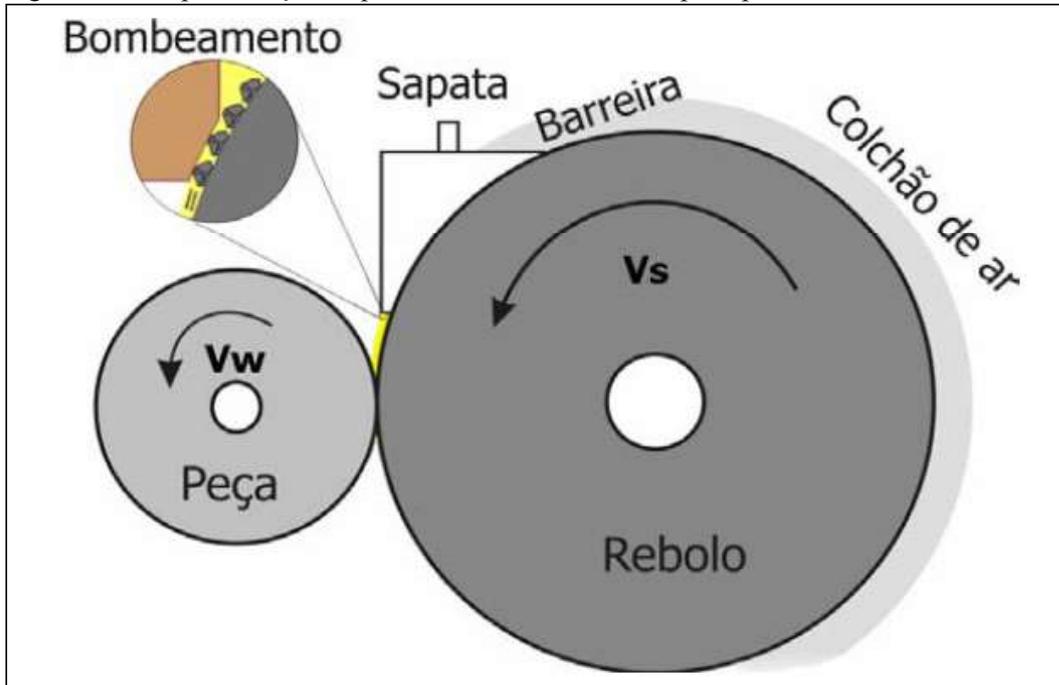
Para reduzir os efeitos deste colchão de ar, soluções como raspadores ou jatos adicionais de fluido já foram utilizadas, porém questiona-se sua eficiência. Os raspadores necessitam de constante ajuste de posição, enquanto que o jato adicional demanda maior volume de fluido e potência de acionamento que não são utilizados para refrigeração (BRINKSMEIER *et al.* 1999 *apud* SOUSA 2012).

A condição básica para uma boa eficiência de lubrificação é garantir que o fluxo de fluido atinja os grãos e poros do rebolo e, assim, seja transportado para a zona de corte. Os aditivos de alta pressão devem formar um filme lubrificante sobre os grãos e, desta forma, garantir condições de lubrificação favoráveis. Além disto, a peça deve ser refrigerada e ter sua temperatura estabilizada. Uma possibilidade comprovada de garantir que o fluxo de fluido lubrificador atinja a superfície periférica do rebolo na retificação, sem exigir fluxo elevado e pressão de alimentação elevada, é a adução do fluido lubrificador por tubeteiras configuradas na forma de sapatas que tangenciam a superfície periférica do rebolo (KLOCKE *et al.* 2000 *apud* LOPES 2007).

A tubeteira denominada de sapata reúne as funções de tubeteira de fornecimento de fluido lubrificador e elemento raspador, para minimizar o efeito do colchão de ar. O

perfil da tubeira tipo sapata deve ser o mais próximo possível do perfil do rebolo, com a menor folga possível (WEINGÄRTNER *et al.*, 2005). A figura 2.9 ilustra, de forma esquemática, a montagem da sapata sobre o rebolo nas imediações da região de trabalho.

Figura 2.9 - Representação esquemática de uma tubeira tipo sapata.



Fonte: Weingärtner (2005).

A geometria da tubeira tipo sapata garante a minimização do colchão de ar (função de raspador) e um contato do fluido lubrificante, que é bombeado para o interior da cavidade da sapata, com a superfície do rebolo. No percurso que a superfície do rebolo passa pela cavidade interior da sapata, o fluido lubrificante que se armazena nos poros, é arrastado pelo rebolo e acelerado para a velocidade periférica do mesmo. O resultado é a formação de um jato de lubrificante direcionado diretamente para a região de trabalho. Ao considerar estes pontos, o fluido de corte pode ser fornecido de forma mais direcionada ao local de usinagem, o que possibilita uma redução do fluxo de volume aplicado (KLOCKE, 2009).

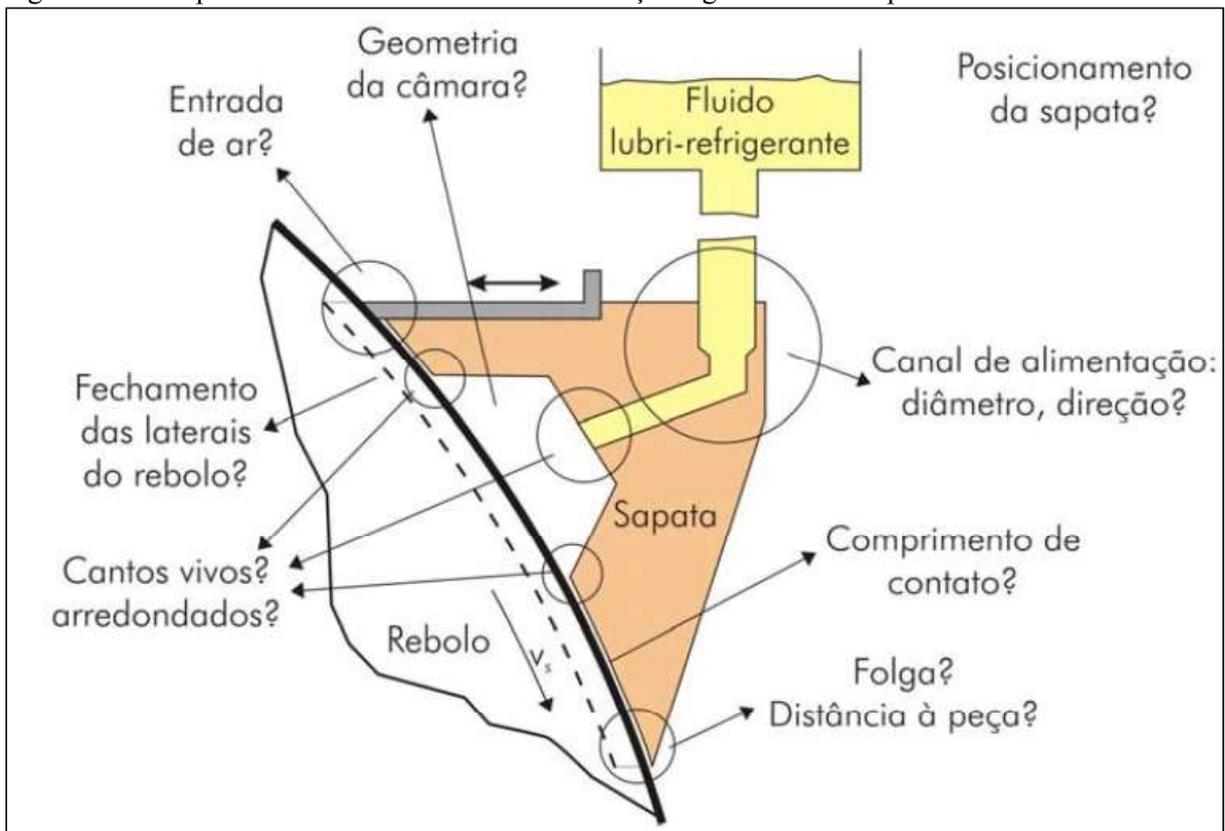
Segundo Brinksmeier *et al.* (2009), no uso de tubeiras tipo sapata a quantidade necessária de fluido lubrificante é reduzida significativamente. Klocke (2000) cita que este benefício é melhorado se a tubeira tipo sapata também encobrir as faces laterais do rebolo. Com estas abas laterais se evita que parte do fluido alimentado para o interior da cavidade da tubeira tipo sapata seja expulso para regiões sem interesse. As abas laterais eliminam quase que totalmente os fluxos de fluido lubrificante que passam pela folga do

rebolo sem serem utilizados. Segundo Klocke *et al.* (1998), os sistemas de alimentação do tipo sapata otimizados, que permitem o direcionamento seletivo de fluido lubrificador e reduzem a quantidade utilizada para o mínimo tecnicamente necessário, são abordagens para soluções de processos de retificação ecologicamente orientados.

A desvantagem da tubeira em forma de sapata é a sua inflexibilidade geométrica. Por esta razão, elas são menos adequadas para usar nas operações de retificação de ferramentaria, nas quais as dimensões e formas dos rebolos mudam de maneira relativamente rápida devido ao alto desgaste e às necessidades geométricas (KLOCKE, 2009).

Segundo Beck 2002 *apud* Macedo 2008, as dúvidas referentes a uma sapata mais eficiente se concentram em torno da sua geometria e posicionamento, como mostrado na figura 2.10.

Figura 2.10 - Aspectos a serem considerados em relação à geometria da sapata.



Fonte: Beck *apud* Macedo (2008).

2.4 RETIFICAÇÃO COM TUBEIRA TIPO SAPATA

Em 2005, no escopo do Projeto Fundo Verde Amarelo (FINEP), em parceria com a Fábrica de Motores de Curitiba da Renault do Brasil S.A., no Laboratório de Mecânica de

Precisão da UFSC, foi realizada uma pesquisa na área de retificação com aplicação de tubeira tipo sapata. Com o título “A influência do método de aplicação do fluido de corte no processo de retificação com rebolos cBN”, culminou com a dissertação de Weingärtner (2005). A mesma teve como objetivo comparar o uso da tubeira de jato livre com a tubeira tipo sapata sob certas variáveis, tais como: velocidade de corte, pressão do sistema de lubrificação-refrigeração, folga entre a tubeira e rebole, entre outras.

Segundo os resultados obtidos, quando utilizado rebole cBN de ligante resinoide, a primeira grande diferença notada na retificação de ferro fundido nodular, empregando uma tubeira tipo sapata em relação ao uso de tubeira de jato livre, foi a eliminação das faíscas. Mesmo que na aplicação de tubeira jato livre a quantidade de fluido lubrificante empregado tenha sido quatro vezes maior em relação à tubeira tipo sapata, respectivamente 60 l/min e 15 l/min. A figura 2.11 mostra a diferença de geração de faíscas, onde no lado esquerdo é mostrada a retificação com emprego de tubeira de jato livre e no lado direito com o emprego de tubeira tipo sapata. A taxa de retificação específica foi de $10 \text{ mm}^3 / (\text{mm} \cdot \text{s})$ para os dois casos. Na retificação de ferro fundido a formação de faíscas é fortemente influenciada pela oxidação dos cavacos na saída da região de corte. Nestes ensaios, foi possível evidenciar que as faíscas foram quase que na totalidade eliminadas. Uma explicação para este fenômeno é a ausência de oxigênio que gera a queima do cavaco.

Figura 2.11 - Redução de faíscas empregando tubeira tipo sapata.

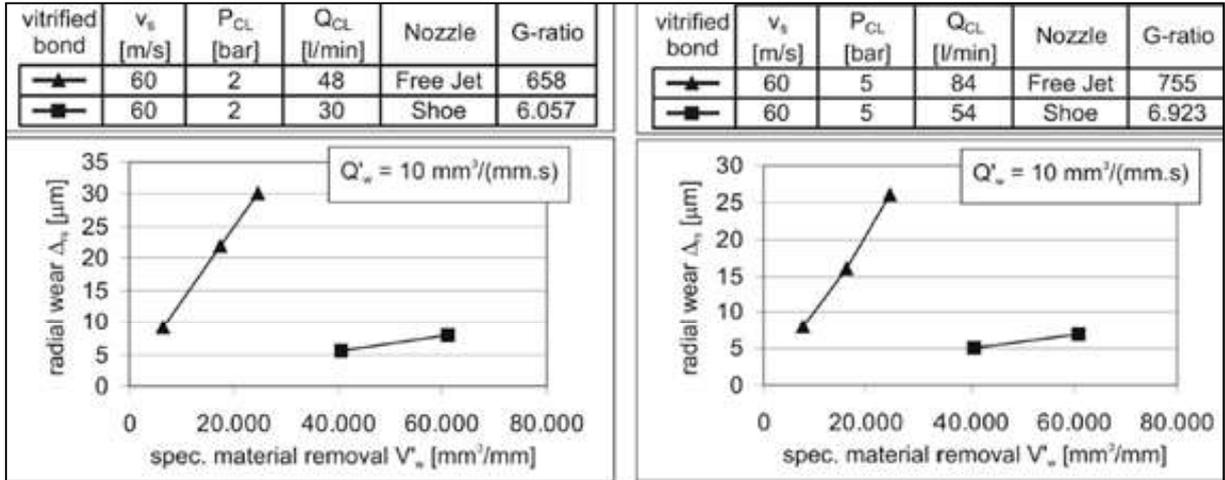


Fonte: Weingärtner (2005).

O estudo também mostrou que a tubeira tipo sapata tem grande influência no desgaste radial do rebole, tendo sido realizados testes comparando tubeira tipo jato livre e tubeira tipo sapata com pressões de 2 e 5 bar. Os gráficos da figura 2.12 mostram que para

ambos os casos a relação de desgaste G (G -ratio) aumentou em aproximadamente 10 vezes quando utilizada a tubeira tipo sapata.

Figura 2.12 - Redução desgaste radial do rebolo pelo uso de tubeira tipo sapata.

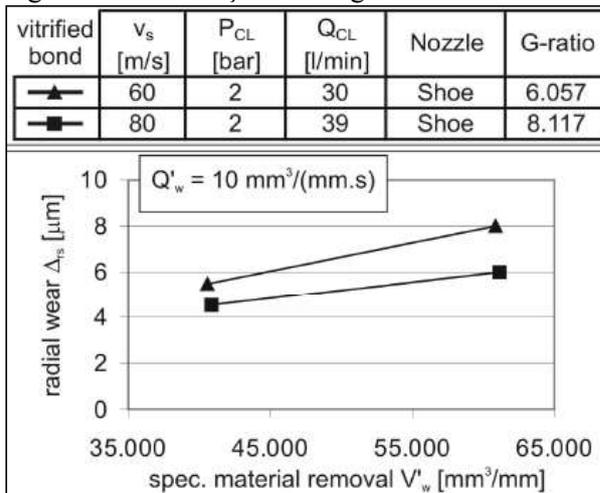


Fonte: Weingärtner (2005).

Quanto à influência do desgaste do rebolo na folga entre ele e a tubeira tipo sapata, verificou-se que quando a folga varia de 0,0 mm a 0,5 mm, os resultados de desgastes são similares, sendo a diferença apenas 5% maior na folga de 0,5 mm. Esta informação é importante, pois isto significa que não é necessário ajustar a folga a cada dressamento realizado. No caso do experimento em questão, onde a cada processo de dressagem o diâmetro do rebolo foi reduzido em 30 μm, poderiam ser realizados 17 procedimentos de dressamento antes de ser necessário o ajuste da folga entre a tubeira e o rebolo. Conforme citado por Weingärtner (2005), estes resultados estão de acordo e complementam as pesquisas realizadas por Beck (2002), onde foi observada certa turbulência e a formação de espuma de fluido lubrificante na saída da tubeira para folgas maiores de 0,5 mm.

O aumento da velocidade de corte gerou menor desgaste radial do rebolo com a aplicação de tubeira tipo sapata. Conforme mostrado na figura 2.13, com o aumento da velocidade de corte de 60 para 80 m/s, a relação de desgaste G (G -ratio) subiu de 6.057 para 8.117, ou seja, 34%. Deve-se mencionar ainda que também houve um aumento do fluxo de fluido lubrificante devido ao efeito de bombeamento exercido pelo rebolo.

Figura 2.13 - Redução do desgaste radial do rebolo pelo aumento da velocidade de corte.



Fonte: Weingärtner (2005).

Diante dos resultados apresentados por este estudo, ficou evidente que o uso de tubeira tipo sapata tem influência significativa no processo de retificação. Os benefícios do uso de tubeira tipo sapata estão relacionados com o aumento da taxa de retificação, melhora na relação de desgaste G (G -ratio), diminuição da quantidade de fluido lubrificante e redução das faíscas provenientes do contato entre a peça e o rebolo.

2.5 REDUÇÃO DA PRESSÃO ESPECÍFICA

De acordo com Wiengaertner (2019), em meados do século XX, Kienzle detectou que o comportamento da força de corte, da força de avanço e da força passiva no torneamento é descrita por uma equação exponencial, onde a espessura de usinagem apresenta um expoente menor que a unidade e a largura de usinagem um expoente igual à unidade. Exemplificando, a força de corte para largura de usinagem unitária, é mostrada na equação 2.3:

$$\frac{F_c}{b} = k_{c11} \cdot h^{(1-m_c)} \quad (2.3)$$

Onde F_c é a força de corte, b a largura de usinagem, k_{c11} a pressão específica de corte, h espessura de usinagem e $(1-m_c)$ o expoente de Kienzle. No torneamento o expoente de Kienzle está situado na faixa de 0,6 a 0,8.

Após a Segunda Guerra Mundial, durante a reestruturação da indústria alemã, este reconhecimento, juntamente com a disponibilidade de novos materiais de ferramenta (metal

duro) foi implantado nas novas máquinas-ferramenta, provendo-as de maior potência e sendo adequadas para maior velocidade de corte e maiores forças de corte, tornando o processo de torneamento mais eficiente quando se trabalha com elevados avanços.

A pressão específica de corte, k_{c11} , indica a pressão de corte para uma seção de usinagem quadrada com um lado de 1 mm. O coeficiente de Kienzle ($1-m_c$) indica a dependência do comportamento da pressão de corte como função da espessura de usinagem. Numa representação bi-logarítmica o comportamento da equação de Kienzle é uma reta com uma inclinação menor que 45° . Se calcularmos a pressão de corte aumentando a espessura de usinagem, verificamos que a pressão de corte diminui. Vale o raciocínio no sentido inverso. Se diminuirmos a espessura de usinagem a pressão de corte aumenta geometricamente. Na retificação, onde as espessuras de usinagem são significativamente menores que nos processos de usinagem com ferramentas de geometria definida, as pressões de corte são muito mais elevadas e pequenas alterações na espessura de usinagem representam alterações significativas na pressão de corte.

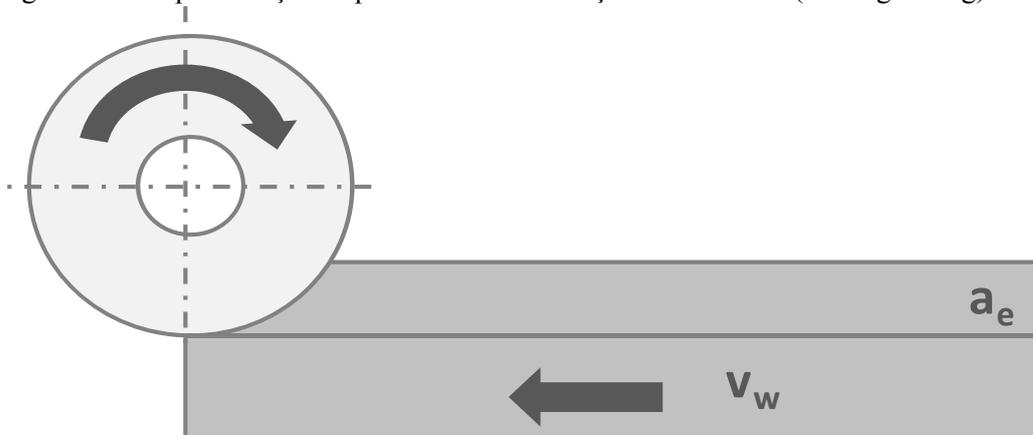
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para permitir a avaliação da eficiência da lubrificação com tubeira do tipo sapata na diminuição da temperatura no processo de retificação *creep feed* de lamelas, foi concebida uma tubeira tipo sapata baseado em projetos desenvolvidos no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC. Além da tubeira tipo sapata, foram utilizados equipamentos, ferramentas e dispositivos nos ensaios deste projeto disponíveis nas instalações da fábrica de compressores. Os materiais e métodos desta pesquisa serão descritos a seguir.

3.1 PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

O processo de retificação utilizado nos ensaios deste projeto é o processo *creep feed*, sendo classificado pela norma DIN 8589-11 como retificação plana externa periférica de perfil. O processo *creep feed* é caracterizado por uma taxa de retificação obtida com grande penetração passiva e baixa velocidade de avanço. Neste processo de retificação, o rebolo é dressado com o formato recíproco ao formato da peça a ser obtida. A cinemática empregada no processo de retificação nos ensaios foi concordante (*down grinding*), figura 3.1, mantendo o processo em uso com lubrificação com tubeira de jato livre.

Figura 3.1 - Representação esquemática da retificação concordante (*down grinding*).



Fonte: O Autor.

3.2 MÁQUINA-FERRAMENTA

A máquina-ferramenta utilizada nos ensaios de retificação *creep feed* foi uma retificadora CNC plana do fabricante Jung modelo C740D, figura 3.2. A retificadora possui comando numérico Siemens Sinumerick. Esta retificadora é dedicada à fabricação de lamelas através de processo de retificação *creep feed*. As principais informações técnicas da máquina estão descritas na tabela 3.1.

Figura 3.2 - Retificadora do fabricante Jung modelo C740D.



Fonte: O Autor.

Tabela 3.1 - Informações técnicas da retificadora Jung 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 de avanço máxima	1 m/min
Potência do Motor de acionamento do rebolo	15 kW

Fonte: Manual máquina Jung.

3.3 FERRAMENTA DE CORTE

Na fabricação das lamelas são empregados dois rebolos retos de óxido de alumínio (Al_2O_3). A diferença entre os rebolos é o tamanho do grão (granulometria), sendo que na operação de desbaste é utilizado o rebolo com granulometria de 90 MASH e, para a operação de acabamento, é utilizado rebolo com granulometria de 120 MASH. Os rebolos apresentam a característica de serem compostos por grãos abrasivos de pouca resistência mecânica e extremamente friáveis. Os ensaios foram limitados ao emprego de rebolos com a granulometria de 90 MASH, na operação de desbaste, onde as taxas de retificação são maiores e ocorrem as maiores limitações da taxa de retificação na aplicação com tubeira do tipo jato livre. As especificações técnicas do rebolo estão descritas na tabela 3.2 a seguir.

Tabela 3.2 - Características do rebolo de óxido de alumínio com ligante vitrificado.

Especificação completa do rebolo para desbaste	406,4 x 50,8 x 127 38A 90 D28 VSPCF
Diâmetro externo	406,4 mm
Largura	50,8 mm
Diâmetro do furo	127,0 mm
Tipo de grão	38A – Óxido de Alumínio
Tamanho grão (granulometria) desbaste	90 MASH – médio
Estrutura do rebolo	D28 – Estrutura aberta e poros grandes
Tipo de ligante	VSPCF – Vitrificado

Fonte: Catálogo técnico Saint-Gobain Abrasives.

Os rebolos são montados nos flanges que têm a finalidade de acoplar o rebolo no eixo-árvore da retificadora. Os rebolos foram balanceados estaticamente sobre um cavalete precisamente nivelado. Para compensar o desbalanceamento, foram ajustadas castanhas de contrapesos em uma ranhura circular na lateral dos flanges. Os contrapesos foram deslocados até garantir que o centro de massa estático coincidissem com o centro geométrico.

3.4 FERRAMENTA DE DRESSAMENTO

A ferramenta de dressamento utilizada nos ensaios foi um dressador de ponta única perfilada, fabricado pela empresa Dimas Ferramenta. O dressador era constituído por um

diamante natural perfilado, brasado em uma haste de aço SAE 1020, Figura 3.3. A haste do dressador é provida de duas facetas de referência, para encaixar e posicionar o dressador no cabeçote de dressamento da retificadora. A ponta da haste, onde está brasado o diamante, apresenta uma geometria aguda que permite o perfilamento e posterior dressagem do rebolo com a geometria recíproca da chapa de lamelas. Na figura 3.3 é mostrado o dressador utilizado nos ensaios.

Figura 3.3 - Dressador de ponta única.



Fonte: O Autor.

O rebolo, fornecido com perfil reto, é perfilado para o formato recíproco da peça. Antes de cada ensaio o rebolo é dressado. Nos ensaios foram mantidos os valores de penetração e avanço de dressamento estabelecidos no processo de dressamento industrial para obtenção de lamelas, sendo a profundidade de penetração $a_{ed} = 0,06$ mm, a velocidade de avanço de dressamento $f_{ad} = 999$ mm/min e a velocidade de corte do rebolo $v_{sd} = 14$ m/s.

3.5 FLUIDO LUBRIRREFRIGERANTE

Nos ensaios de retificação foi utilizado o fluido lubrificador refrigerante Ecocool SYN 7000 do fabricante Fuchs, fornecido a seis bar pressão pela bomba do sistema de refrigeração da máquina. O fluido apresenta uma formulação sem óleo mineral e com aditivos para melhorar a ação de lubrificidade e ação anticorrosiva. Uma característica do fluido empregado é a sua bioestabilidade frente à presença de micro-organismos que causam deterioração e corrosão, prolongando assim o tempo de vida da emulsão. A concentração utilizada foi, conforme especificações do fabricante, de 3% de óleo emulsionado em água. As principais características físico-químicas do fluido lubrificador refrigerante são demonstradas na tabela 3.3.

Devido à evaporação da água, processo de filtragem e limpeza ocorreram perdas de fluidos durante os ensaios de retificação. Não foi necessário fazer a reposição dos mesmos, pois durante a realização dos ensaios as características e a quantidade do fluido ficaram dentro

da faixa mínima exigida no reservatório da máquina. Durante os ensaios, o lubrificador é filtrado por um sistema de filtragem da própria retificadora, garantido que chegasse limpo para a região de trabalho.

Tabela 3.3 - Características físico-químicas do fluido lubrificante.

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 (min. 15 h)	MR 017	Estável
Fator de refração	MR 044	1,3

Fonte: Fornecedor do Fluido Lubrificante FUCHS.

3.6 MATERIAL DE ENSAIO

O material utilizado para o ensaio foi um aço ferramenta temperado e revenido obtido pelo processo de metalurgia do pó. De acordo com o fornecedor, no processo de fabricação deste material, é produzida uma microestrutura homogênea que garante a característica de alta resistência ao desgaste e máxima resistência à quebra. A dureza de 55 HRC é obtida por um tratamento térmico de têmpera com aquecimento até a temperatura de austenitização de 1025 °C, com resfriamento de 540 °C e temperatura de revenimento de 550 °C. Nas tabelas 3.4 e 3.5 são mostrados, respectivamente, os principais elementos da composição química e propriedades físicas e mecânicas do material.

Tabela 3.4 - Composição química do material.

Elemento	Quantidade (%)
C	0,8
Cr	7,5
V	2,8
Mo	1,3

Fonte: Fornecedor do Aço Sinterizado.

Tabela 3.5 - 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 (Ensaio Charpy)	113 (J)

Fonte: Fornecedor do Aço Sinterizado.

3.7 CORPO DE PROVA

Nos ensaios para a verificação da viabilidade de substituição do processo de lubrificação por jato livre, pela lubrificação por tubeira tipo sapata, foram utilizadas as peças brutas empregadas na fabricação de lamelas na produção industrial, denominadas na empresa de chapas de lamela. As chapas brutas são fornecidas em formato retangular, com sobremetal aproximado de três milímetros na largura, cinco milímetros no comprimento e um milímetro na espessura. As chapas brutas são pré-usinadas por fresamento e retificação *creep feed* de ranhuras no estado recozido, dando a pré-forma de quatro lamelas. Posteriormente ao processo de retificação *creep feed*, as chapas são submetidas aos tratamentos térmicos. Na etapa de pré-usinagem o processo de retificação *creep feed* não apresenta problemas, mesmo com lubrificação por jato, visto que um eventual dano térmico provocado pelo processo de retificação é corrigido pelo tratamento térmico posterior. Como a dureza do material recozido é consideravelmente menor que a dureza do material tratado termicamente, os esforços na retificação são menores, se comparados com a retificação *creep feed* após o tratamento térmico. Por este motivo, nesta pesquisa, os ensaios foram realizados na etapa de retificação após tratamento térmico. A figura 3.4 mostra uma representação da chapa de lamela, pré-usinada e tratada termicamente, utilizada como corpo de prova para os ensaios.

Figura 3.4 - Vista superior e lateral de uma chapa de lamelas - Corpo de prova.



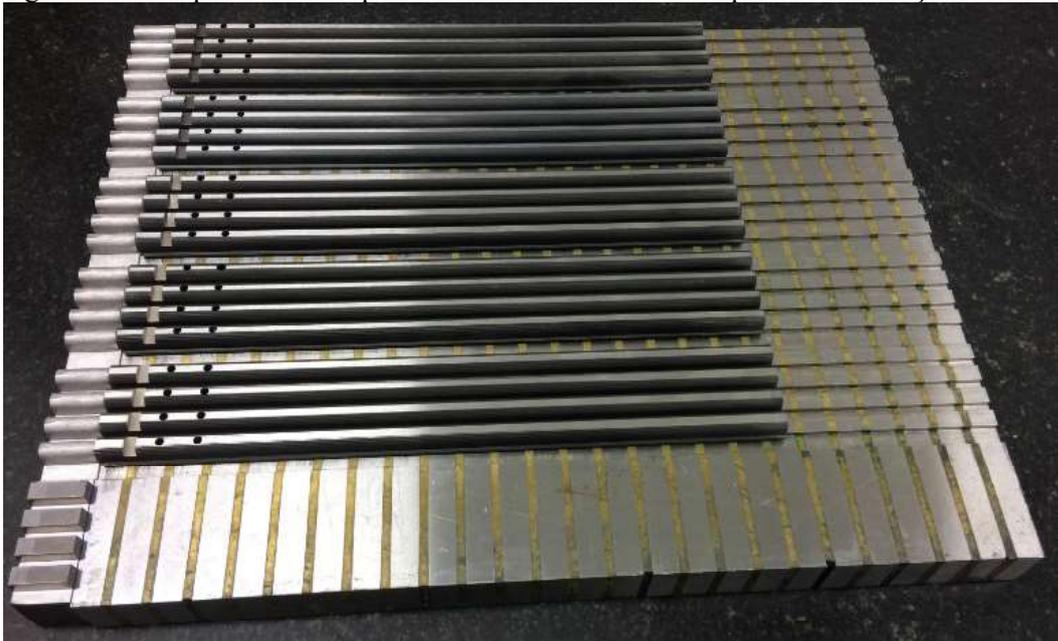
Fonte: O Autor.

3.8 SISTEMA DE FIXAÇÃO

Os corpos de prova são montadas na posição de referência sobre um dispositivo que é posicionado na mesa magnética da máquina. Para evitar que as peças possam se deslocar em decorrência da força resultante de retificação, as mesmas são encostadas em batentes de aço de baixa liga (magnetizáveis), existentes na extremidade esquerda do dispositivo de fixação. Os batentes têm o formato do perfil da face transversal das chapas de lamelas com uma altura um pouco inferior às medidas finais das peças. Na produção industrial, são montadas até cinco chapas de lamela sobre o dispositivo de fixação, permitindo a fabricação sequencial de 20 lamelas.

O movimento da mesa durante o processo de retificação é no sentido longitudinal, da direita para a esquerda (eixo X), com o rebolo girando no sentido horário. Esta conjuntura de movimentos de mesa e rebolo proporciona uma retificação concordante (*down grinding*). A figura 3.5 mostra cinco chapas de lamela pré-usinadas, com 250 mm de comprimento, posicionadas no dispositivo de fixação utilizado na mesa magnética.

Figura 3.5 - Chapas de lamela pré-usinadas e fixas sobre o dispositivo de fixação.



Fonte: O Autor.

3.9 TUBEIRA TIPO SAPATA

Visto que a experiência do LMP no emprego de tubeiras do tipo sapata se restringia à retificação cilíndrica de mergulho, com pequena penetração passiva por rotação da peça, se fez necessário averiguar a viabilidade do emprego de uma tubeira do tipo sapata na retificação *creep feed*.

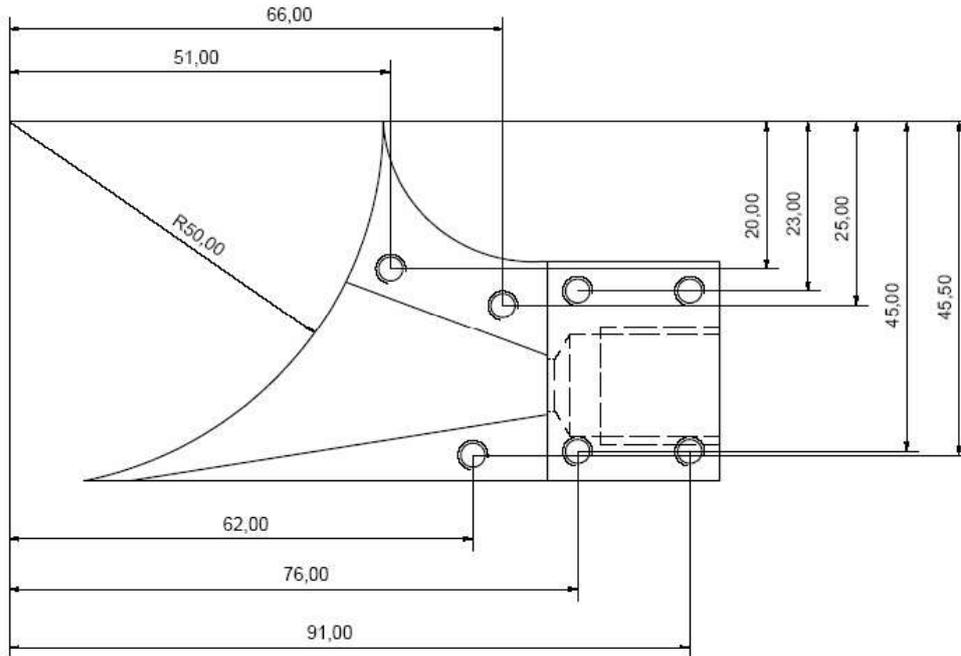
O desenvolvimento do conceito da tubeira tipo sapata para esta pesquisa foi dividido em duas etapas. Na primeira etapa, foi concebido um projeto mais simples, com o objetivo de verificar a viabilidade do uso deste sistema de tubeira tipo sapata para a retificação *creep feed* de lamelas. Esta tubeira foi denominada de “tubeira tipo sapata protótipo”. Na segunda etapa, foi desenvolvido um projeto mais robusto de tubeira tipo sapata para uso industrial, sendo esta tubeira denominada “tubeira tipo sapata para uso industrial”.

3.9.1 Tubeira tipo sapata protótipo

Com o objetivo de verificar a viabilidade da utilização de tubeira tipo sapata no processo de retificação *creep feed* de lamelas, foi fabricada uma tubeira protótipo para fazer testes preliminares. Neste tópico da dissertação, é descrito o desenvolvimento da tubeira protótipo e os resultados dos ensaios preliminares.

Na definição do conceito do projeto para a tubeira tipo sapata protótipo foi utilizado como referência o modelo desenvolvido por Macedo (2008), conforme figura 3.6. As dimensões foram adaptadas para a necessidade do processo de retificação *creep feed* de lamelas. Foram levadas em consideração, principalmente, o sentido do avanço da mesa da máquina e as características geométricas da peça a ser retificada.

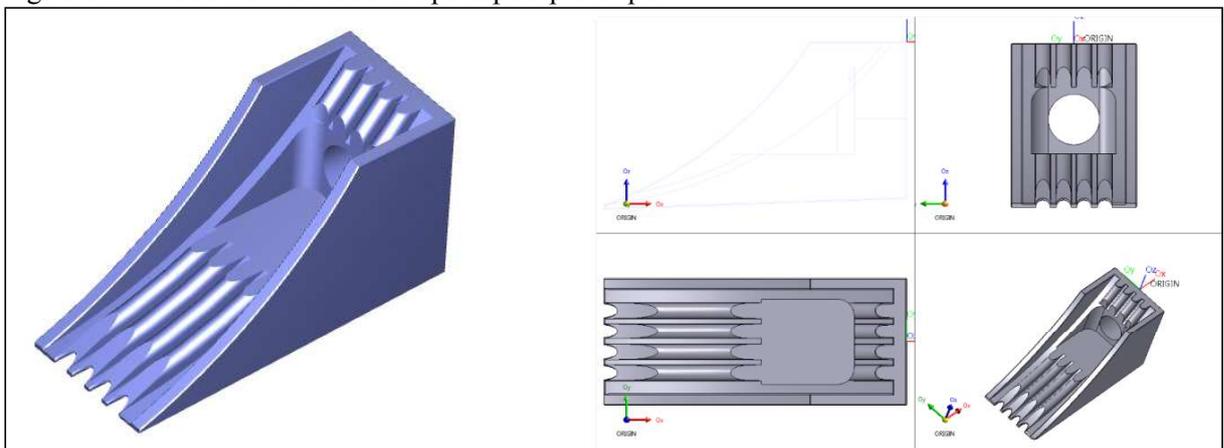
Figura 3.6 - Dimensões da tubeira tipo sapata.



Fonte: Macedo (2008).

Com o intuito de facilitar a usinagem através de sistema CAM e possíveis alterações futuras, a tubeira tipo sapata protótipo foi modelada no software CAD PTC Creo Parametric 3.0 M80, figura 3.7.

Figura 3.7 - Modelo 3D da tubeira tipo sapata protótipo.



Fonte: O Autor.

A tubeira sapata foi confeccionada em aço SAE 1020 pelos processos de fabricação de fresamento e remoção por descargas elétricas (WEDM). A tubeira foi ajustada ao perfil do rebolo por retificação na própria retificadora Jung. A figura 3.8 apresenta a tubeira tipo sapata protótipo.

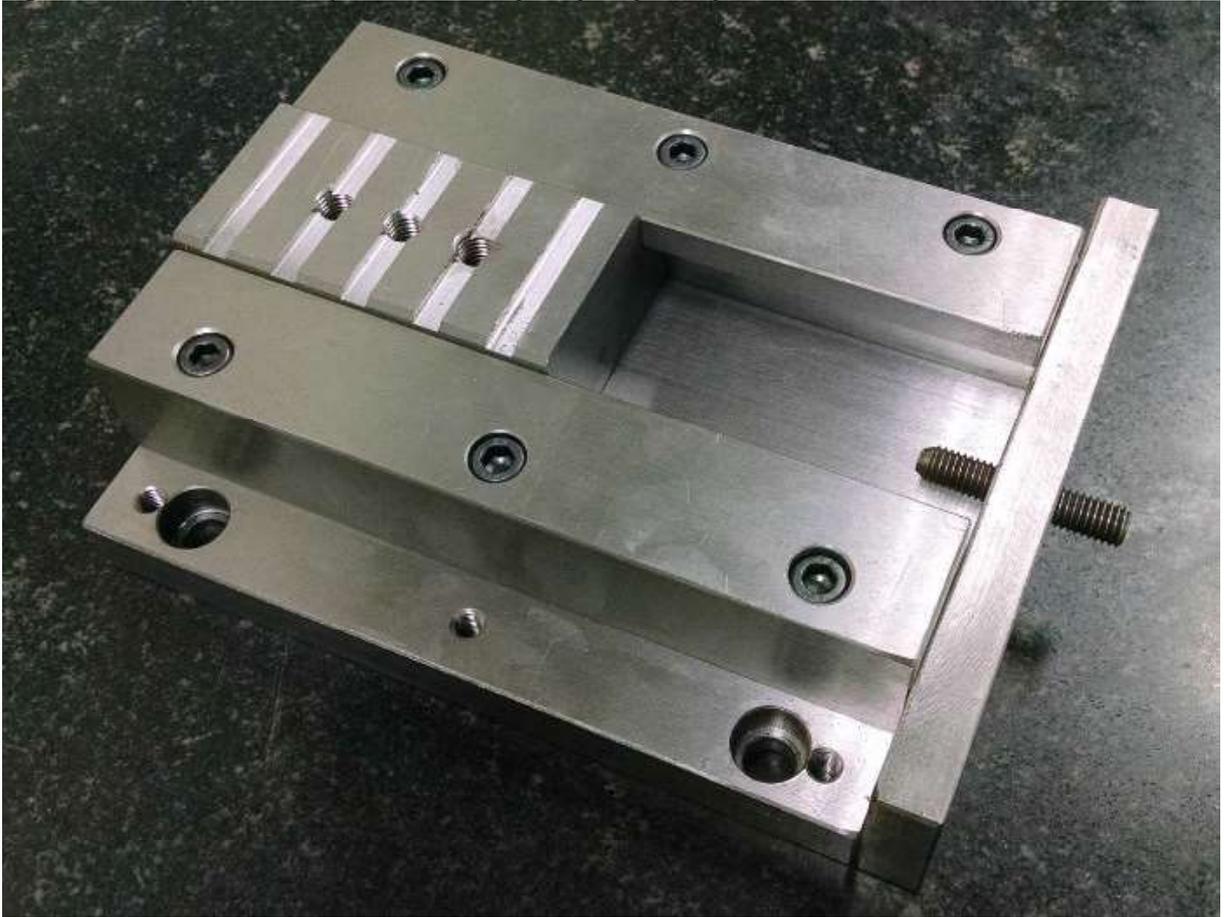
Figura 3.8 - Tubeira tipo sapata protótipo fabricada em aço SAE 1020.



Fonte: O Autor.

Para a fixação da tubeira tipo sapata na retificadora Jung, modelo C740D, foi necessário conceber, projetar e fabricar um sistema de fixação apropriado. Este sistema foi composto por cinco peças, oito parafusos de fixação e um parafuso de regulagem de altura. Todas as peças foram retificadas para garantir o paralelismo e perpendicularismo necessário ao processo. Com o objetivo de ampliar a faixa de regulagem de altura da tubeira, foram projetadas três roscas m6 e rebaxos transversais na peça central, onde foi encaixado o suporte da mangueira do sistema de lubrificação. A peça central foi desenvolvida com formato “T” com ajuste deslizante em relação às guias laterais com formato “L”. Desta forma, a peça central fica apoiada no parafuso de regulagem realizando o movimento vertical, eixo z, quando o parafuso é girado. O dispositivo de fixação é mostrado na figura 3.9.

Figura 3.9 - Sistema de fixação da tubeira tipo sapata protótipo.



Fonte: O Autor.

O sistema de fixação foi projetado para ser fixado na carenagem de proteção do rebolo da retificadora. A montagem do sistema de fixação protótipo foi realizada com quatro parafusos M8. Para garantir o paralelismo e ortogonalidades necessários ao bom funcionamento do dispositivo, na ajustagem e montagem do dispositivo de fixação e da tubeira tipo sapata protótipo na retificadora, foram utilizados instrumentos de medição adequados, como relógio comparador, esquadros padrão, entre outros. Após a montagem na retificadora, a mangueira do sistema de lubrificação foi acoplada a tubeira tipo sapata protótipo, figura 3.10.

Figura 3.10 - Sistema completo da tubeira tipo sapata protótipo instalado na retificadora.



Fonte: O Autor.

Para realizar os ensaios de retificação *creep feed* com a tubeira tipo sapata protótipo, foram empregados duas chapas de lamela pré-usinadas, com 250 mm de comprimento. Uma chapa de lamelas foi cortada em cinco pedaços por WEDM, figura 3.11. A outra foi mantida no comprimento original de 250 mm.

Figura 3.11 - Corpos de provas.



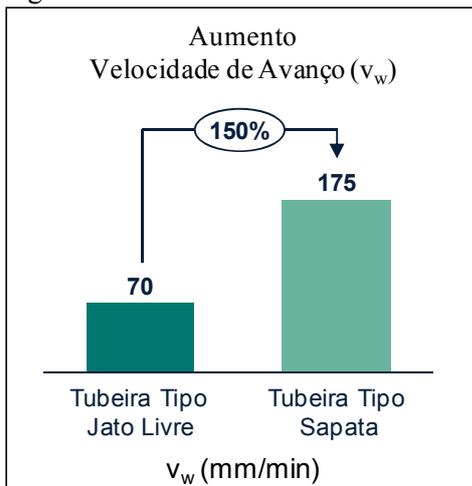
Fonte: O Autor.

Após a preparação do rebolo, montagem do sistema de fixação protótipo, montagem da tubeira tipo sapata, encaixe da mangueira do sistema de lubrificação e refrigeração e fixação dos cinco corpos de prova na mesa magnética da retificadora, foram realizados os ensaios. Para os mesmos foram mantidos os parâmetros utilizados no processo padrão com uso de tubeira de jato livre. O parâmetro variável foi a velocidade de avanço (v_w).

A velocidade de avanço referência para este trabalho é $v_w = 70$ mm/min, sendo esta a velocidade de avanço padrão empregada quando é utilizada a tubeira de jato livre. A retificação do primeiro corpo de prova foi realizada com a velocidade de avanço referência de 70 mm/min. Ao longo do percurso de avanço de 50 mm não houve nenhuma evidência de que tivesse ocorrido algum dano térmico, pois o corpo de prova não apresentou a cor “azulada”, típica de queima por retificação. A alteração na cor da superfície da chapa de lamela após a retificação é um parâmetro qualitativo, utilizado pelos operadores da retificadora, para verificar se a peça está boa ou não. Quando ocorre o “azulamento”, a chapa de lamela é sucateada, pois invariavelmente a dureza da peça diminui o que compromete sua funcionalidade nas linhas de produção.

Na sequência, foram retificados os demais quatro corpos de prova com comprimento de 50 mm, com as velocidades de avanço de 100 mm/min, 125 mm/min, 150 mm/min e 175 mm/min. Após cada ensaio foi verificado que em nenhum destes corpos ocorreu o “azulamento” da superfície. O corpo de prova com comprimento de 250 mm foi retificado com a velocidade de avanço de 175 mm/min, com o objetivo de verificar que no percurso nominal de 250 mm também não ocorrem danos térmicos no componente. Verificou-se também, neste percurso, que não houve o “azulamento” da superfície. Nesta fase dos ensaios preliminares foi constatado que o uso da tubeira tipo sapata pode ser empregado na retificação *creep feed* e permitiu um aumento de 150% na velocidade de avanço, figura 3.12.

Figura 3.12 - Aumento da velocidade de avanço com emprego da tubeira tipo sapata.



Fonte: O Autor.

Após os ensaios, foi feita a análise metalográfica dos corpos de prova retificados no laboratório de materiais da empresa. O objetivo de realizar análise metalográfica nos corpos de provas foi verificar se realmente não houve zona termicamente afetada, pois visualmente

as peças não apresentaram nenhuma região “azulada”. Para realizar os ensaios metalográficos, os corpos de prova foram cortados, na sequência embutidos em baquelite, lixados e polidos, figura 3.13.

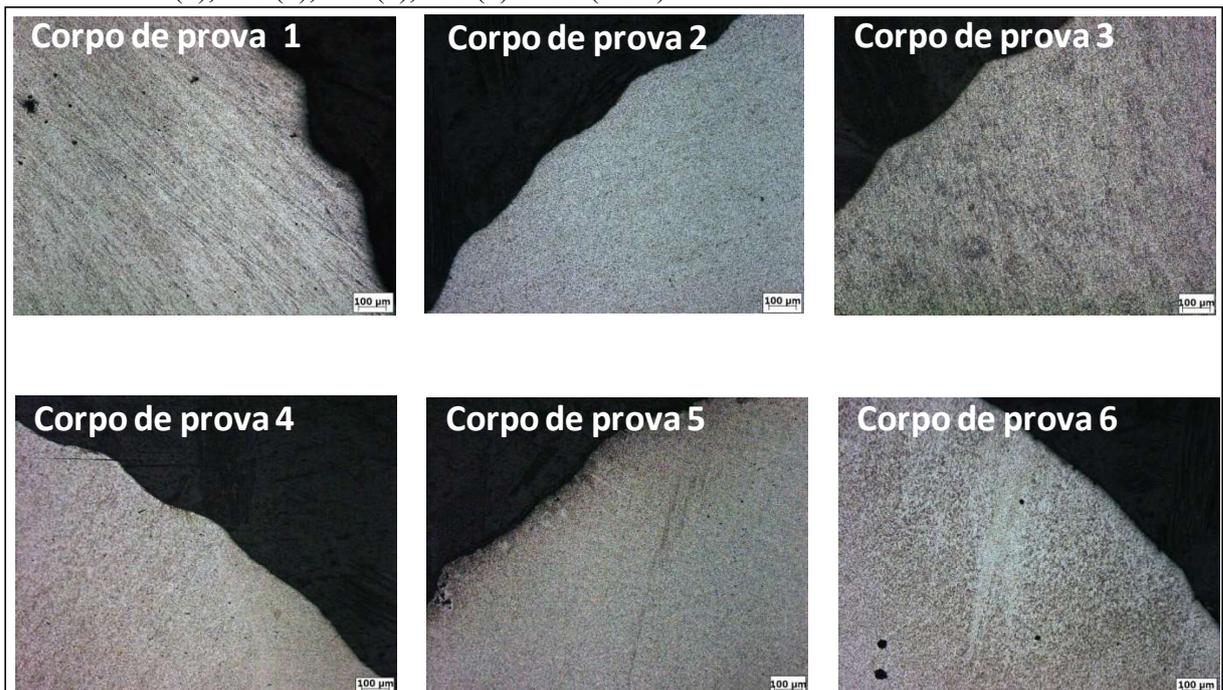
Figura 3.13 - Preparação das amostras metalográficas.



Fonte: O Autor.

Os ensaios metalográficos comprovaram que não houve zona termicamente afetada nos corpos de prova, pois não é possível observar deformações de estrutura de grãos, figura 3.14.

Figura 3.14 - Ensaio metalográfico dos corpos de prova retificados com velocidades de avanço de 70 (1), 100 (2), 125 (3), 150 (4) e 175 (5 e 6) mm/min.



Fonte: O Autor.

O resultado da análise metalográfica permitiu concluir que a tubeira tipo sapata é uma solução pertinente e eficaz para o aumento de produtividade no processo de retificação *creep feed* de chapas de lamela, pois permitiu um aumento significativo da taxa de retificação, mediante ao aumento velocidade de avanço, sem afetar termicamente a estrutura da peça.

A tabela 3.6 mostra de forma resumida as informações das variáveis dos ensaios preliminares realizados nos 6 corpos de prova, 5 de 50 mm de comprimento, nos quais as velocidades de avanço variaram de 70 a 175 mm/min e um corpo de prova, com 250 mm de comprimento, que foi retificado com velocidade de avanço de 175 mm/min. O corpo de prova de 250 mm apresenta o comprimento padrão do modelo da chapa de lamela utilizada na produção industrial. Nenhum corpo de prova teve região termicamente afetada.

Tabela 3.6 - Resultados dos testes preliminares.

Corpo de prova	Comprimento Corpo de Prova (mm)	Velocidade de Avanço v_w (mm/min)	Análise Metalográfica Região termicamente afetada
1	50	70	Sem danos visíveis
2	50	100	Sem danos visíveis
3	50	125	Sem danos visíveis
4	50	150	Sem danos visíveis
5	50	175	Sem danos visíveis
6	250	175	Sem danos visíveis

Fonte: O Autor.

3.9.2 Tubeira tipo sapata para uso industrial

Baseado nos resultados obtidos nos ensaios empregando a tubeira tipo sapata protótipo, foi desenvolvido o conceito de uma tubeira tipo sapata modular para ser utilizada nos ensaios principais e posterior uso em escala industrial no processo de retificação *creep feed* de lamelas. Neste tópico da dissertação, é descrito o desenvolvimento da tubeira tipo sapata modular.

O desenvolvimento do projeto da tubeira para uso nos ensaios principais e posterior uso industrial se baseia em um conceito modular, objetivando a intercambiabilidade dos componentes de formas específicas para cada modelo de lamela em um corpo base da tubeira tipo sapata. Foram realizadas adaptações estruturais, em relação à tubeira protótipo, para

facilitar a troca dos componentes intercambiáveis para a retificação dos diversos modelos de lamelas, aumentar a rigidez do sistema de fixação e facilitar o ajuste (*set-up*) das folgas superior e inferior no momento do uso. Uma vez estabelecido o conceito, o projeto foi desenvolvido empregando o software PTC Creo Parametric 3.0 M80, por meio da geração de modelos 3D. Além de facilitar o desenvolvimento do projeto, os modelos 3D também permitem a geração automática dos programas CNC para usinagem dos componentes.

O projeto da tubeira tipo sapata para uso industrial foi dividido em dois conjuntos principais. O primeiro conjunto compreende o sistema funcional de lubrificação, sendo as principais peças o corpo da tubeira e as réguas de vedação superior (raspador do colchão de ar) e inferior (direcionador do jato). O segundo conjunto compreende o sistema de fixação da tubeira na retificadora, onde os principais componentes são: a placa suporte, a base guia e o cursor com o parafuso de regulagem.

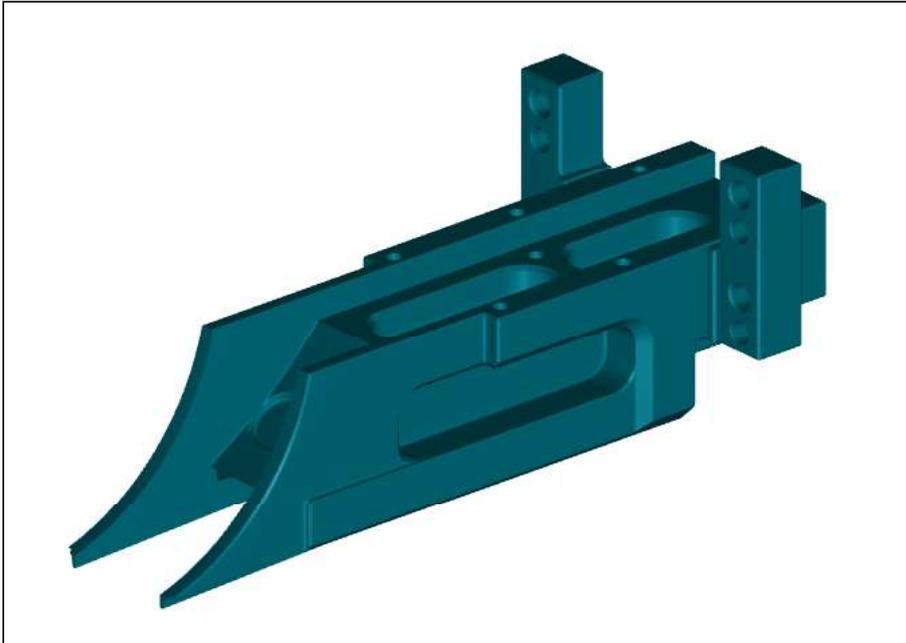
3.9.2.1 Sistema funcional de lubrificação da tubeira tipo sapata para uso industrial

O corpo da tubeira foi fabricado em aço SAE 1045, sendo seu principal objetivo armazenar e guiar o fluido lubrificante à saída da cavidade em direção à região de corte. No interior do corpo, uma câmara serve de reservatório para o qual o fluido lubrificante é fornecido pelo sistema de refrigeração da máquina. O fluido fica confinado até o momento que é arrastado pelo movimento do rebolo em direção à região de corte.

A vedação da câmara para as laterais do rebolo é efetuada por duas abas, que encobrem aproximadamente 20 mm da periferia, em direção ao centro do rebolo ao longo de todo o comprimento útil da tubeira tipo sapata. A vedação só é garantida com o rebolo em movimento de rotação, quando o fluido que vaza pela folga lateral com o rebolo parado é bombeado pelas asperezas de volta para a cavidade da câmara da tubeira tipo sapata. As abas têm um formato de segmento de círculo, de modo a garantir o recobrimento da lateral do rebolo para toda a faixa de diâmetro útil do rebolo, desde o maior diâmetro do rebolo novo até o diâmetro final, sem que haja contato das abas com os flanges de montagem do rebolo. Na extremidade oposta as abas de vedação da sapata, foi prevista a interface de fixação do corpo da tubeira tipo sapata na estrutura de suporte, realizando assim a interface com o sistema de fixação da tubeira na retificadora. Para garantir a precisão de posicionamento e garantia de remontagem, foram previstos furos de pinos guia em cada ressalto.

Para a alimentação do fluido lubrificador foi previsto um furo rosqueado para fixar a tubulação de fluido com um sistema de engate rápido comercial. Visando reduzir o peso da peça, foram incluídos dois rebaixos nas laterais da peça. O corpo da tubeira tipo sapata é mostrado na figura 3.15.

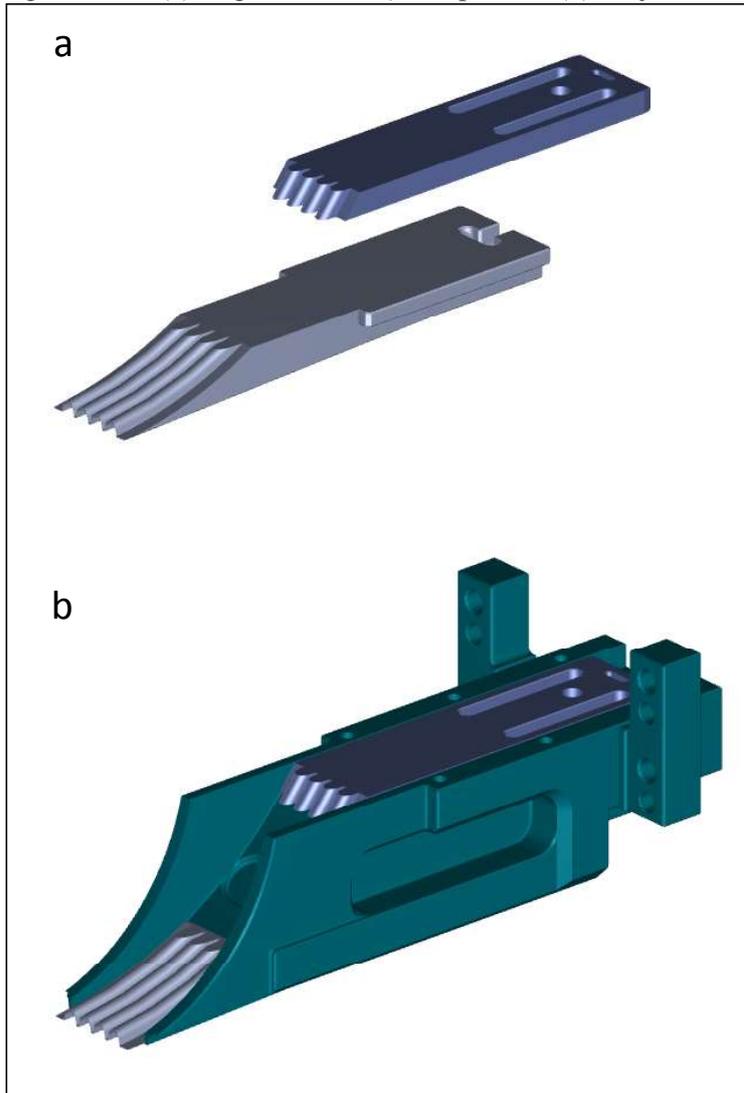
Figura 3.15 - Corpo da tubeira tipo sapata.



Fonte: O Autor.

Na região superior e inferior do corpo da tubeira tipo sapata são previstas guias para a régua raspadora (superior) e a régua direcionadora (inferior). A régua raspadora cumpre a função de desviar o ar que envolve o rebolo em movimento, ao mesmo tempo em que impede vazamento de fluido lubrificador para fora da câmara. Na parte inferior do corpo da tubeira tipo sapata a régua inferior cumpre a função de direcionar o fluido lubrificador para a região de corte. Ambas as réguas foram fabricadas em aço SAE 1045. Nas extremidades das réguas, na região onde elas tangenciam o rebolo, a geometria apresenta a forma recíproca à forma do rebolo após o dressamento, figura 3.16a. A régua superior permite um ajuste independente da fenda entre esta e o rebolo, realizado através de um sistema de parafuso - porca. O ajuste é necessário para impedir a entrada de ar na cavidade da tubeira tipo sapata, que acontece quando a fenda se torna demasiadamente grande. Com a otimização da abertura da fenda superior também é garantida uma minimização de vazamento de fluido lubrificador para fora da câmara. As réguas superior e inferior são montadas no corpo da tubeira tipo sapata, figura 3.16b.

Figura 3.16 - (a) Régua de vedação superior e (b) conjunto corpo e régua de vedação.



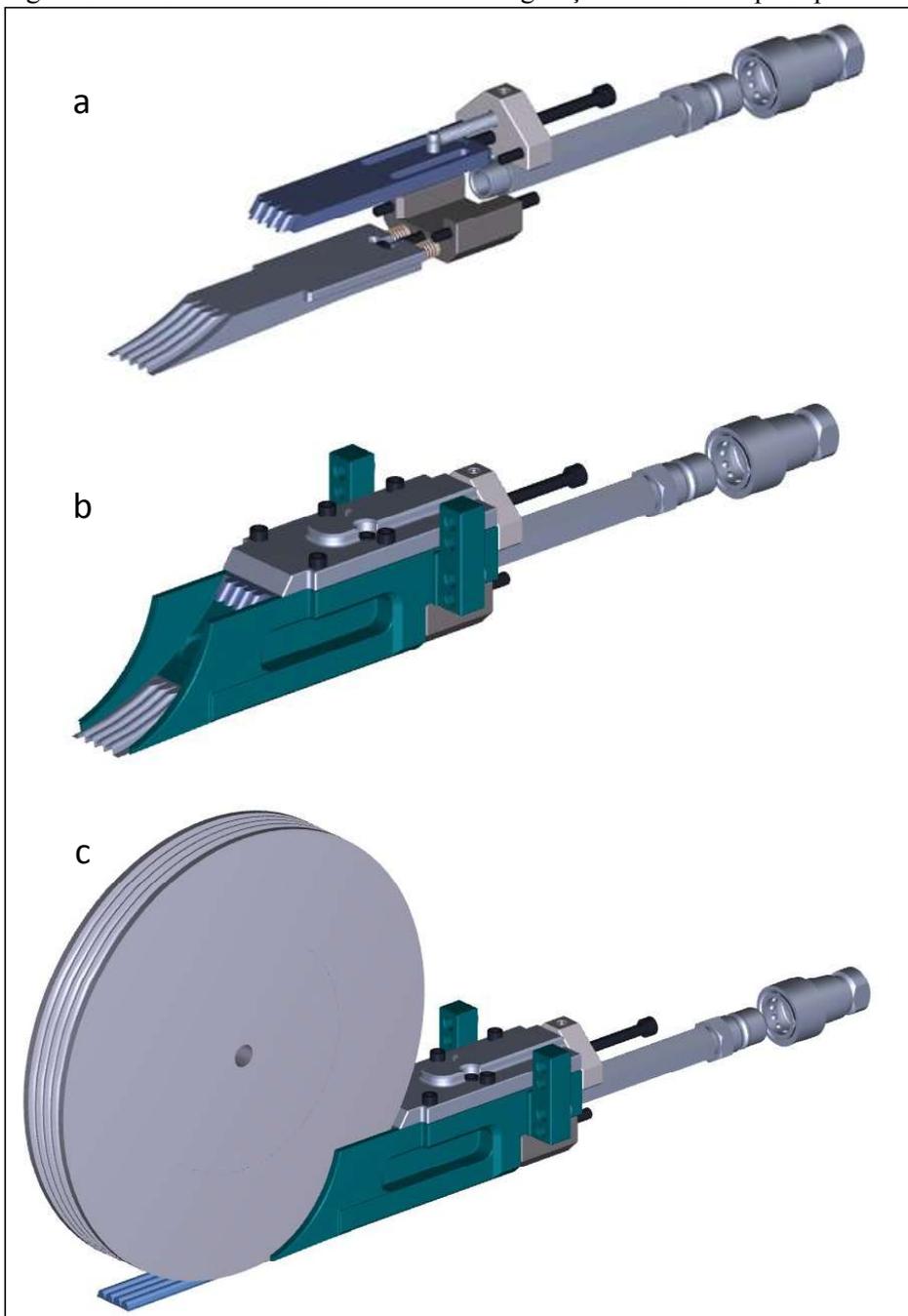
Fonte: O Autor.

Em decorrência da dressagem e desgastes inerentes ao processo de retificação, o diâmetro do rebolo diminui à medida que é utilizado. Como consequência da diminuição do diâmetro do rebolo, a folga (*gap*) entre o rebolo e as réguas de vedação aumenta. Para compensar a variação da folga, cada régua dispõe de um sistema de avanço independente formado por um flange, um parafuso e uma porca. Com o objetivo de evitar movimentos da régua contrários ao movimento imposto pelo parafuso e para prevenir possíveis trepidações durante o processo de retificação, foram incluídas molas de tração que mantêm as folgas no sistema de posicionamento sempre no mesmo flanco dos parafusos de ajuste. As réguas se deslocam nas guias correspondentes previstas no corpo da tubeira tipo sapata com ajuste deslizante em relação ao corpo da tubeira. A régua superior, com geometria mais simples, é mantida em posição por uma chapa fixa ao corpo da tubeira. Por falta de espaço, a régua inferior é munida de ressaltos laterais que deslizam em rasgos previstos no corpo da tubeira

do tipo sapata, figura 3.17a. Com a finalidade de facilitar o encaixe da mangueira fornecedora do fluido lubrificadorrefrigerante, foi incluído um prolongador com sistema de engate rápido situado na parte posterior do corpo da tubeira tipo sapata. Para explicitar as funções específicas, a figura 3.17 mostra a montagem de forma sequencial:

- a) As réguas de vedação superior e inferior com seus respectivos sistemas de avanço;
- b) O conjunto funcional da tubeira tipo sapata;
- c) O conjunto funcional com rebolo e lamela a ser retificada.

Figura 3.17 - Sistema funcional de lubrificadorrefrigeração da tubeira tipo sapata.



Fonte: O Autor.

As réguas de vedação sofrem desgaste devido ao contato esporádico com os gumes do rebolo. Para permitir a troca das réguas superior e inferior, o sistema de lubrificação dispõe de referências definidas de posição que permitem a substituição das réguas atuais por outras do mesmo modelo, ou de modelo diferente, sem que haja a necessidade de desmontar ou reajustar o corpo da tubeira tipo sapata na retificadora. Quando no processo industrial for necessário trocar de modelo de lamela a ser retificada, apenas as réguas serão substituídas. Por este motivo, as réguas de vedação foram consideradas como insertos intercambiáveis, que poderão ser substituídas com certa periodicidade, mediante a necessidade no processo. Com a finalidade de diminuir o tempo de troca das réguas, a tubeira tipo sapata foi concebida como um sistema de troca rápida com a menor quantidade possível de parafusos de montagem e fixação.

3.9.2.2 Sistema de fixação da tubeira tipo sapata para uso industrial

Para a fixação da tubeira tipo sapata na retificadora Jung, foi projetada uma interface entre a carenagem do rebolo da máquina-ferramenta e a tubeira tipo sapata. Esta interface de fixação também permite o ajuste de altura (eixo z) da tubeira em relação ao rebolo. O sistema de fixação foi fabricado de três componentes principais, sendo eles: a base guia, o cursor com o parafuso de regulagem de altura e a placa suporte, Figura 3.18.

O primeiro componente é a base guia que foi concebida com a finalidade de fixar a tubeira na retificadora, mais especificamente na carenagem de proteção do rebolo. Para garantir o reposicionamento correto da base guia na máquina, foram incluídas quatro furações de diâmetro 10 mm H7 para utilização de pinos guia. Na base guia na face oposta à montagem na retificadora, foi projetado um rebaixo de 14 mm para encaixar o cursor de movimentação vertical, rasgos passantes para o travamento do cursor na posição desejada, bem como o sistema de parafuso para a movimentação vertical.

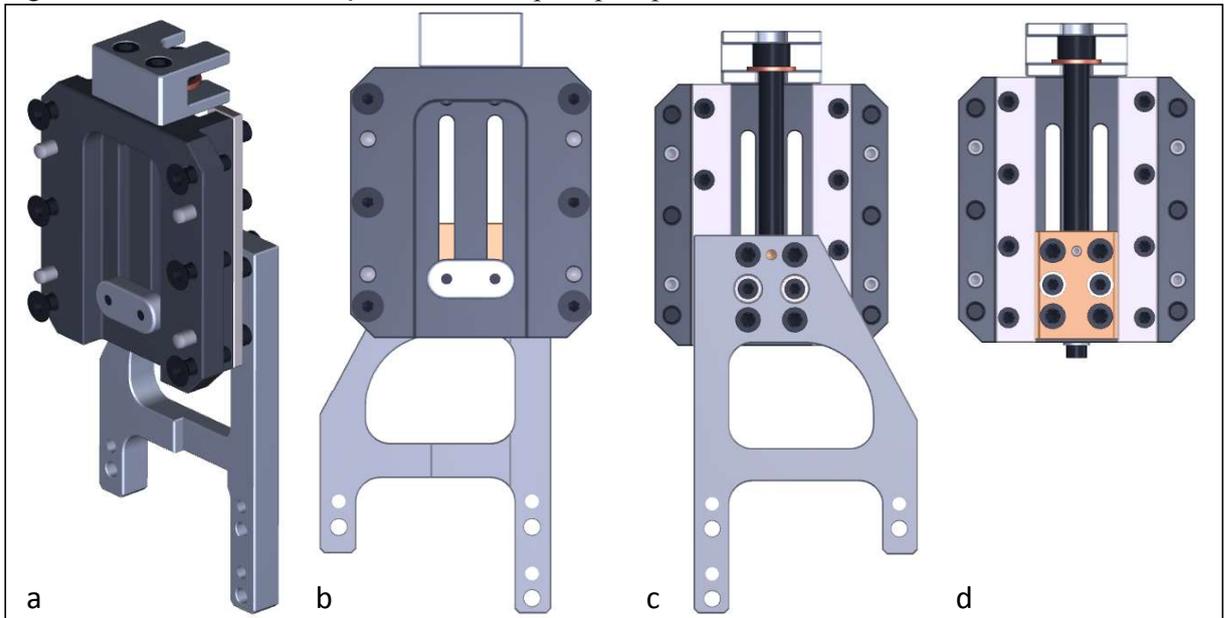
Com o objetivo de garantir o posicionamento correto entre a placa suporte e a base guia, o segundo componente, denominado cursor, corre dentro do rebaixo na base guia com mínima folga e com ajuste deslizante. O cursor, além de garantir a movimentação vertical do conjunto funcional, contempla um furo rosqueado ao longo de seu comprimento que permite o ajuste de sua posição por meio do parafuso de movimentação vertical (eixo Z). O terceiro componente, a placa suporte, tem a finalidade de estabelecer a interface do conjunto funcional da tubeira tipo sapata com a base guia. Esta é montada por meio de parafusos com o cursor da

base de apoio. Com o intuito de diminuir o peso, este componente foi fabricado na liga de alumínio AA 7075.

Para garantir o reposicionamento correto em relação ao corpo da tubeira, que é montada na parte inferior da placa suporte, foram previstas furações com o diâmetro 10 mm H7 para utilização de pinos guias. Na figura 3.18 é mostrado de forma sequencial, o sistema de fixação da tubeira tipo sapata para uso industrial:

- A vista isométrica com destaque para a base guia e placa suporte;
- A vista frontal com destaque para a base guia e placa suporte. Esta imagem mostra a face onde a base guia é apoiada e montada na carenagem do rebolo;
- A vista frontal com destaque para a base guia e placa suporte. Nesta imagem é mostrada a face que fica oposta à carenagem do rebolo. Também é mostrado o parafuso de regulagem de altura (eixo Z). Foi escolhida esta direção de projeção das figuras, pois esta é a perspectiva com a qual o técnico da retificadora vê o sistema quando for operar a retificadora;
- A vista frontal da base guia sem a placa suporte mostrando a face oposta à carenagem do rebolo. Nesta imagem é mostrado o parafuso de regulagem e cursor com coloração diferenciada.

Figura 3.18 - Sistema de fixação da tubeira tipo sapata para uso industrial



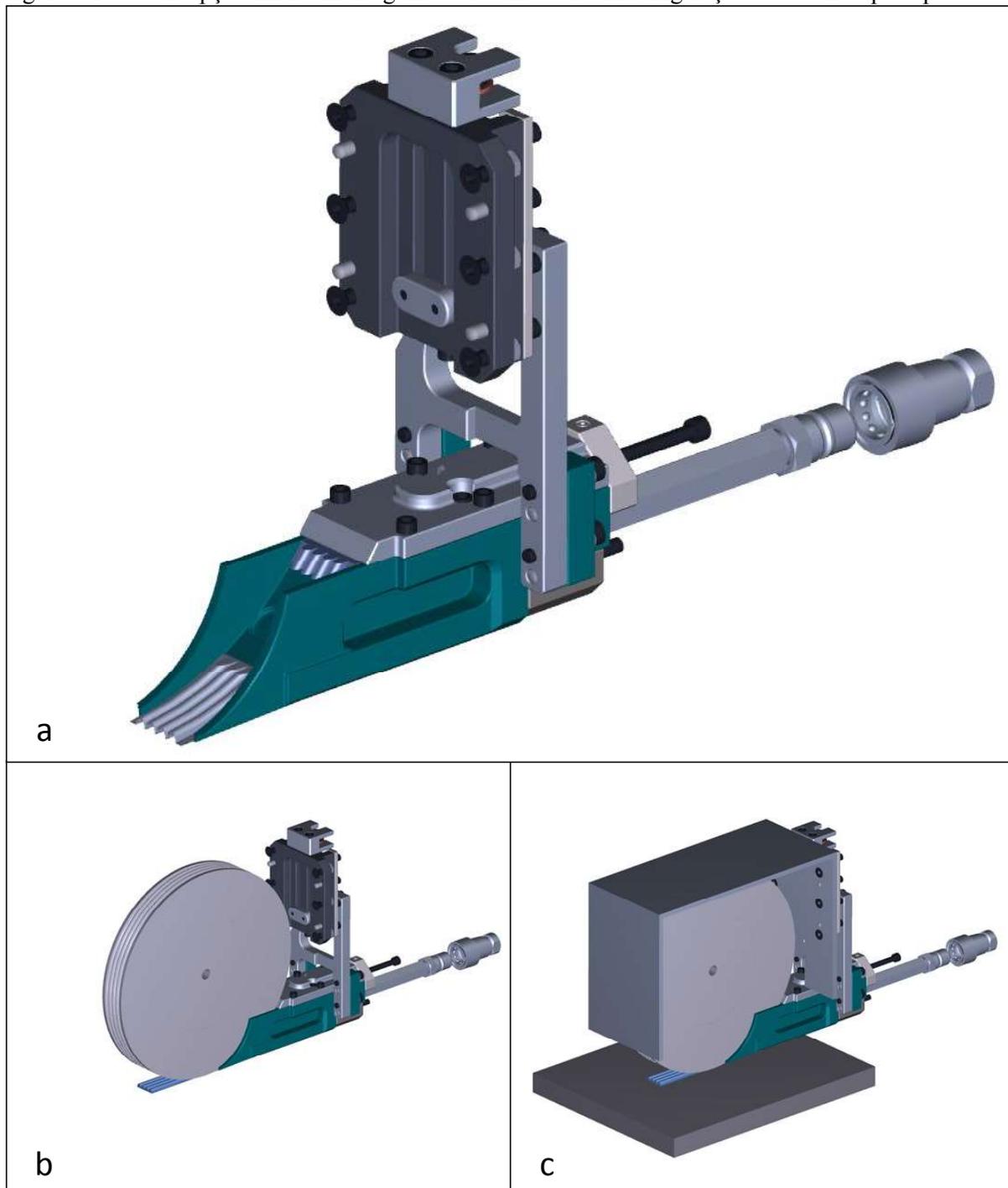
Fonte: O Autor.

O projeto do sistema foi desenvolvido em um sistema assistido por computador que permite visualizar a montagem final dos componentes e, assim, garantir que os componentes

durante a montagem física não apresentem interferências ou falta de material em regiões específicas. A figura 3.19 mostra o projeto final da tubeira tipo sapata e sua montagem na máquina-ferramenta, conforme sequência abaixo:

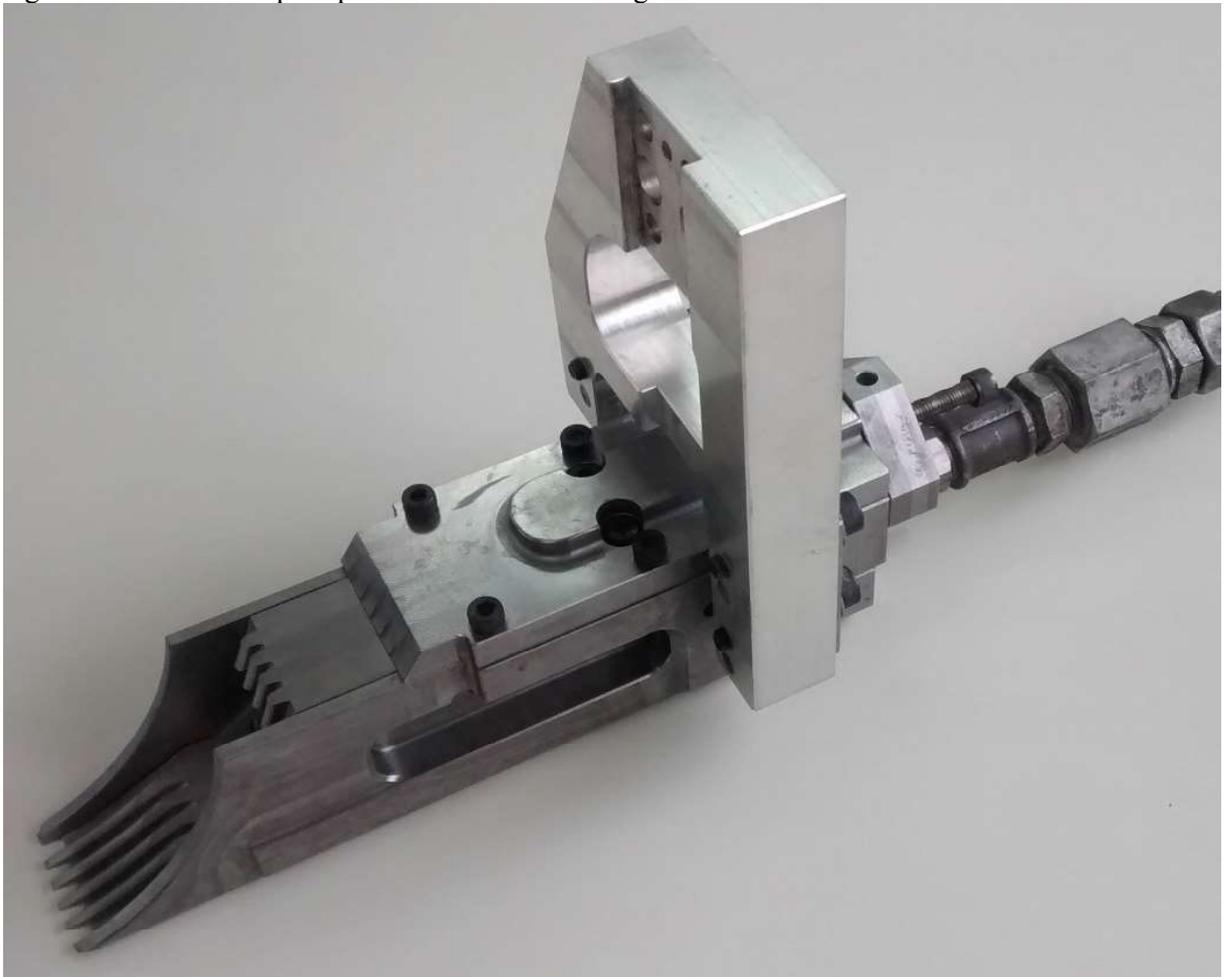
- a) Concepção final da tubeira tipo sapata acoplada no sistema de fixação;
- b) Montagem, destacando o rebolo e peça a ser retificada;
- c) Montagem integrando a mesa magnética e a carenagem do rebolo.

Figura 3.19 - Concepção final e montagem do sistema de lubrificação da tubeira tipo sapata.



Os componentes projetados foram fabricados na ferramentaria da empresa por técnicos qualificados e máquinas-ferramenta apropriadas, convencionais e comandadas numericamente. Em algumas peças, onde necessário, as superfícies de referência ou de deslizamento foram retificadas para obter a precisão desejada, além de garantir o paralelismo e perpendicularismo necessário à funcionalidade do sistema. Foram utilizados elementos de fixação padronizados, como parafusos e pinos guias. A figura 3.20, mostra o conjunto da tubeira tipo sapata montada e pronta para ser acoplada à retificadora.

Figura 3.20 - Tubeira tipo sapata e interface de montagem.



Fonte: O Autor.

Após a montagem do conjunto foi providenciado o acoplamento da tubeira tipo sapata na retificadora. Primeiramente foi montada a placa guia. Para esta montagem, foram realizadas as furações e rosqueamentos necessários na carenagem de proteção do rebolo e na sequência foi providenciada a fixação da placa guia através de parafusos e pinos guias.

Durante esta fase de montagem, foram utilizados os instrumentos de medição adequados para garantir o paralelismo e ortogonalidades necessários ao bom funcionamento do dispositivo.

Na sequência, foi realizada a montagem da tubeira tipo sapata ao cursor por parafusos e pinos guia. Por último foi encaixada a mangueira do sistema de lubrificação. Na figura 3.21 é mostrado todo o sistema instalado na retificadora.

Figura 3.21- Tubeira tipo sapata instalada na retificadora.



Fonte: O Autor.

3.9.2.3 Corpos de prova para ensaios com tubeira tipo sapata para uso industrial

Para realizar os ensaios de retificação *creep feed* com a tubeira tipo sapata para uso industrial, foram empregadas cem chapas de lamelas, pré-usinadas e tratadas termicamente com dureza de 55 HRC, com comprimento de 250 mm e espessura de 7,5 mm. Conforme mencionado anteriormente no item 3.7, estas chapas são as mesmas utilizadas no processo padrão de fabricação de lamelas. Desta forma, todas as chapas de lamela empregadas nos ensaios, realizados apenas em uma das operações de retificação de desbaste, quando não apresentassem queima por retificação, ficariam a disposição para serem concluídas nas etapas sequenciais de acabamento.

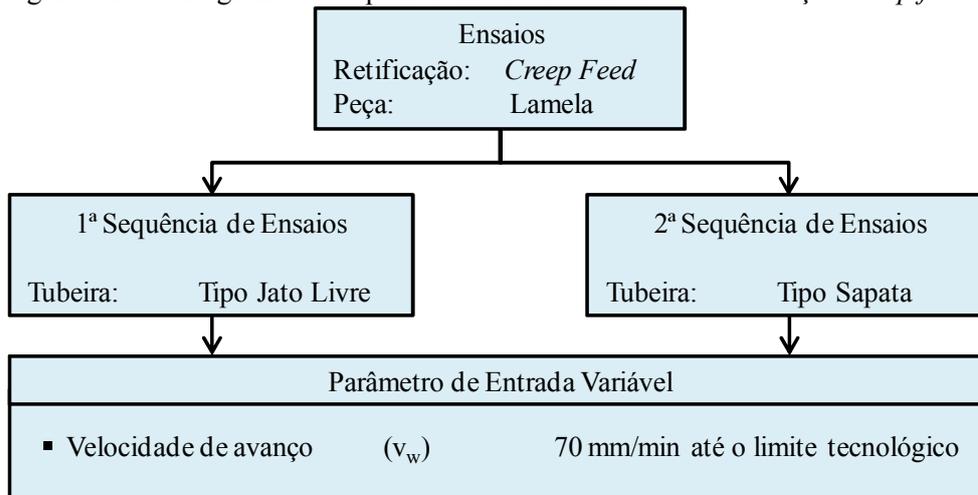
4 PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO EXPERIMENTAL

O principal objetivo desta pesquisa consiste em verificar se a aplicação de lubrificação por tubeira tipo sapata, no processo de retificação *creep feed* de lamelas de inserção, permite a diminuição do consumo de energia por peça pelo aumento da espessura de usinagem através do aumento da velocidade de avanço possível pela diminuição da temperatura de corte. Conforme mencionado anteriormente no item 3.9, foi fabricada uma tubeira tipo sapata protótipo. A finalidade deste protótipo foi verificar a viabilidade do uso da tubeira tipo sapata para a retificação *creep feed* de lamelas. Foram realizados ensaios preliminares que mostraram que para uma velocidade de avanço de até 175 mm/min os resultados eram positivos. Baseados nos resultados e na concepção da tubeira tipo sapata protótipo foi desenvolvida uma tubeira tipo sapata modular, que contempla recursos de ajustagem independentes da folga na parte superior e inferior, mais adequada para o uso nesta pesquisa e posterior uso industrial. Neste capítulo é descrito o planejamento e a execução experimental dos ensaios de retificação *creep feed* empregando a utilização da tubeira tipo sapata modular.

Para estabelecer uma base de dados de referência com as informações pertinentes ao processo industrial aplicado na ferramentaria empregando a tubeira jato livre, foi definida a primeira sequência de ensaios realizada com a tubeira jato livre e com os parâmetros de entrada de retificação usuais na retificação das chapas de lamela. O sistema original integrado na máquina-ferramenta pelo fabricante era a tubeira tipo jato livre. Este sistema era utilizado para o fornecimento de fluido lubrificante na retificação *creep feed* de lamelas.

Uma vez estabelecidas as características e o resultado de trabalho da retificação empregando a tubeira de jato livre, são definidas as variáveis de entrada para os ensaios empregando a tubeira tipo sapata. A figura 4.1 mostra um fluxograma com a sequência dos ensaios propostos para avaliar o potencial uso da tubeira tipo sapata na redução da potência específica na retificação *creep feed* de chapas de lamela.

Figura 4.1 - Fluxograma da sequência macro dos ensaios de retificação *creep feed*.



Fonte: O Autor.

Uma variável na retificação com tubreira tipo sapata é a fenda de trabalho, que é a distância entre a face da tubreira tipo sapata e o rebolo. A abertura desta fenda define a vazão do fluido na região de corte e, se for demasiadamente grande, permite a entrada de ar no lado superior da sapata. Weingärtner (2005), verificou que a abertura da fenda entre a tubreira tipo sapata e o rebolo, quando esta folga varia de 0,0 mm a 0,5 mm, os resultados de desgastes aumentam apenas 5% em relação à folga de 0,0 mm. Tendo em vista que a abertura da fenda entre a sapata e o rebolo tem pouca influência sobre o desgaste do rebolo, foi definido que a fenda devesse ser sempre menor que 0,5 mm e que este parâmetro não seria variado ou controlado nos ensaios.

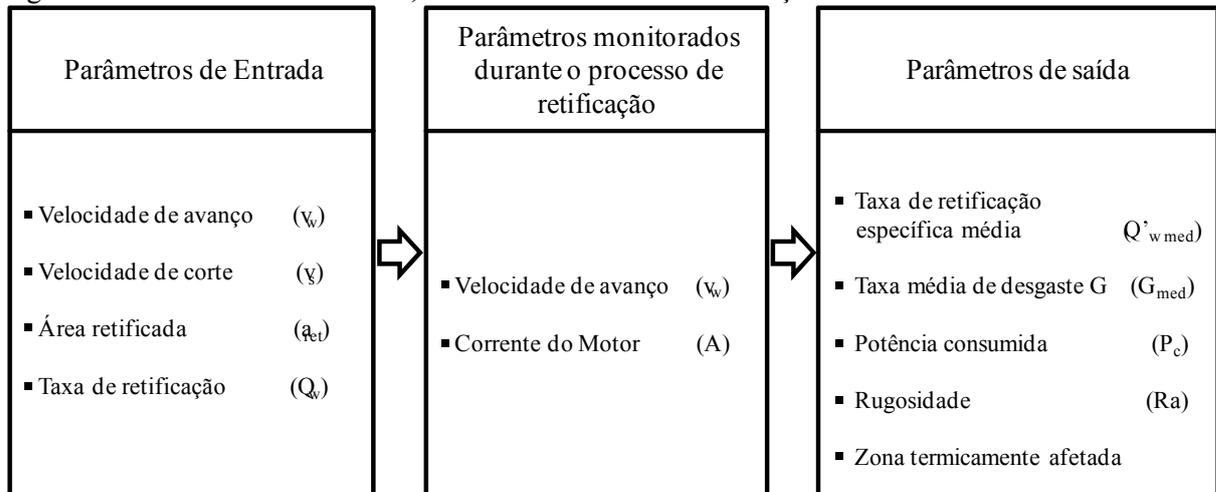
Os parâmetros variáveis de entrada se restringem aos parâmetros que alteram diretamente a taxa de retificação (Q_w), sejam a velocidade de avanço (v_w) e a penetração passiva (a_e), que estabelece a área retificada (a_{ret}). O parâmetro de entrada de velocidade de corte (v_s) é mantido constante durante todos os ensaios. A folga entre o rebolo e a tubreira tipo sapata é ajustada no início de cada bateria de ensaios, tangenciando o rebolo parado no raspador e na saída da tubreira tipo sapata. Antes de ligar o rebolo, a folga entre rebolo e tubreira é aumentada, recuando as régua, para um valor de aproximadamente 0,1 mm. Após a realização de 5 dressamentos a folga entre as régua é reajustada no mesmo procedimento.

As grandezas características do processo que são monitoradas durante a realização dos ensaios são a velocidade de avanço (v_w) e corrente do motor (A). O dano térmico ou “queima por retificação” (*grinding burn*) é visualmente verificada nos componentes retificados após cada ensaio. A velocidade de avanço planejada (v_{wp}), que é programada no comando da máquina, é igual à velocidade de avanço realizada pela máquina-ferramenta até o limite da corrente do motor principal. A partir deste limite de corrente o comando da máquina

autonomamente reduz a velocidade de avanço para manter a corrente do motor principal nos limites estabelecidos pelo fabricante. A velocidade de avanço real (v_{wr}) é mostrada no painel da interface homem-máquina.

A taxa de retificação real é estabelecida pela diferença geométrica do perfil retificado em relação ao perfil inicial, levando em consideração o desgaste sofrido pelo rebolo ao longo do percurso de avanço. Para obter este resultado é medido o perfil retificado no início e no final do comprimento retificado. A variação geométrica do perfil retificado permite estabelecer o volume desgastado no rebolo e a taxa média de desgaste (G_{med}). A rugosidade é acompanhada durante os ensaios com o objetivo de avaliar os mecanismos de desgaste ao longo do percurso de retificação. A rugosidade é medida no componente na região próxima a entrada e à saída do rebolo ao longo do comprimento retificado. O dano térmico é verificado apenas de forma visual indicando a queima por retificação, quando for o caso. Os parâmetros de entrada, os parâmetros monitorados durante o processo de retificação e os parâmetros de saída estão resumidos na figura 4.2 e serão descritos em detalhe na sequência.

Figura 4.2 - Parâmetros de entrada, monitorados durante a retificação e de saída dos ensaios.



Fonte: O Autor.

4.1 PARÂMETROS DE ENTRADA

Conforme figura 4.2, os principais parâmetros de entrada utilizados para os ensaios foram a velocidade de avanço (v_w) e a área retificada (a_{ret}). O produto da velocidade de avanço com a área retificada fornece a taxa de retificação (Q_w). O único parâmetro de entrada que foi variado nos ensaios é a velocidade de avanço (v_w), pois corpos de prova escolhidos para a realização dos ensaios são as chapas de lamelas pré-usinadas e tratadas termicamente,

onde a penetração passiva utilizada foi a mesma empregada na retificação com tubeira jato livre utilizada no processo padrão de fabricação de lamelas. A área retificada (a_{ret}) e a velocidade de corte (v_s) são mantidas constante em todos os ensaios. A seguir serão descritos cada um dos parâmetros de entrada mencionados.

4.1.1 Velocidade de avanço

A velocidade de avanço (v_w) referência, estabelecida como inicial, foi de $v_w = 70$ mm/min, que era a velocidade de avanço empregada na retificação das chapas de lamela empregando a tubeira de jato livre. Por se tratar de um experimento para o qual a única referência de valores de velocidade de avanço eram os estabelecidos nos pré-ensaios com a tubeira tipo sapata protótipo, realizados na faixa de 70 a 175 mm/min, não foi possível prever antecipadamente o limite superior da velocidade de avanço. Entretanto, foi pré-estabelecido no planejamento dos ensaios que o aumento de velocidade de avanço (v_w) seria realizado de forma linear, de 70 mm/min para 100 mm/min, sendo que o primeiro incremento seria de 30 mm/min e, para os demais ensaios a velocidade de avanço seria incrementada em 25 mm/min. Os incrementos na velocidade de avanço foram programados na máquina após cada ensaio para os quais não se verificasse um dano térmico ou uma diminuição autônoma da velocidade de avanço, ou seja, até atingir os limites tecnológicos do processo de retificação. A principal razão da variação da velocidade de avanço (v_w) na pesquisa foi o fato da sua variação estar diretamente associada à taxa de retificação e, consequentemente, ao tempo e a potência de retificação, sendo este um fator determinante na produtividade do processo.

4.1.2 Velocidade de corte

A velocidade de corte v_s , normalmente definida como sendo a velocidade de corte periférica do rebolo na retificação, neste estudo apresenta uma variação de aproximadamente 5% entre a velocidade no topo de uma crista e o vale do perfil do rebolo. Como a velocidade que mais afeta a temperatura de retificação é a maior velocidade, nesta pesquisa é considerada a velocidade na crista do perfil do rebolo como sendo a velocidade de corte. Nos ensaios a velocidade de corte não é variada e foi empregada a $v_s = 23$ m/s. Esta é a mesma velocidade de corte utilizada no processo de retificação *creep feed* de lamelas empregando a tubeira de

jato livre. A velocidade de corte (v_s) é um parâmetro relevante para o processo de retificação, porém no escopo desta pesquisa ela não é variada.

4.1.3 Área retificada

Conforme descrito no item 3.9.2.3, como corpos de provas foram utilizadas chapas de lamela pré-usinadas e tratadas termicamente por têmpera e revenimento para atingir a dureza de 55 HRC. Na fabricação da lamela com o emprego da tubeira de jato livre eram realizados quatro passes de retificação, sendo dois de desbaste e dois de acabamento. Nos dois primeiros passes de desbaste era empregado um rebolo de óxido de alumínio (Al_2O_3) de granulometria de 90 Mash, nos dois passes de acabamento era utilizado um rebolo de óxido de alumínio (Al_2O_3) com granulometria de 120 Mash. Esta é a sequência do processo de fabricação de lamelas com o emprego de tubeiras de jato livre, cuja taxa de retificação limite foi estabelecida para evitar queima por retificação na superfície da peça (*grinding burn*) na retificação de desbaste e garantir a rugosidade final da peça nos limites exigidos para a aplicação da mesma.

O produto da largura de corte (a_p) pela profundidade de corte (a_e) fornece a área retificada (a_{ret}). Neste estudo é realizada apenas a primeira operação de retificação de desbaste e considera a seção de usinagem removida nesta etapa. A tabela 4.1 mostra as áreas retificadas em cada etapa de retificação das chapas de lamela.

Tabela 4.1 - Área retificada para cada passe.

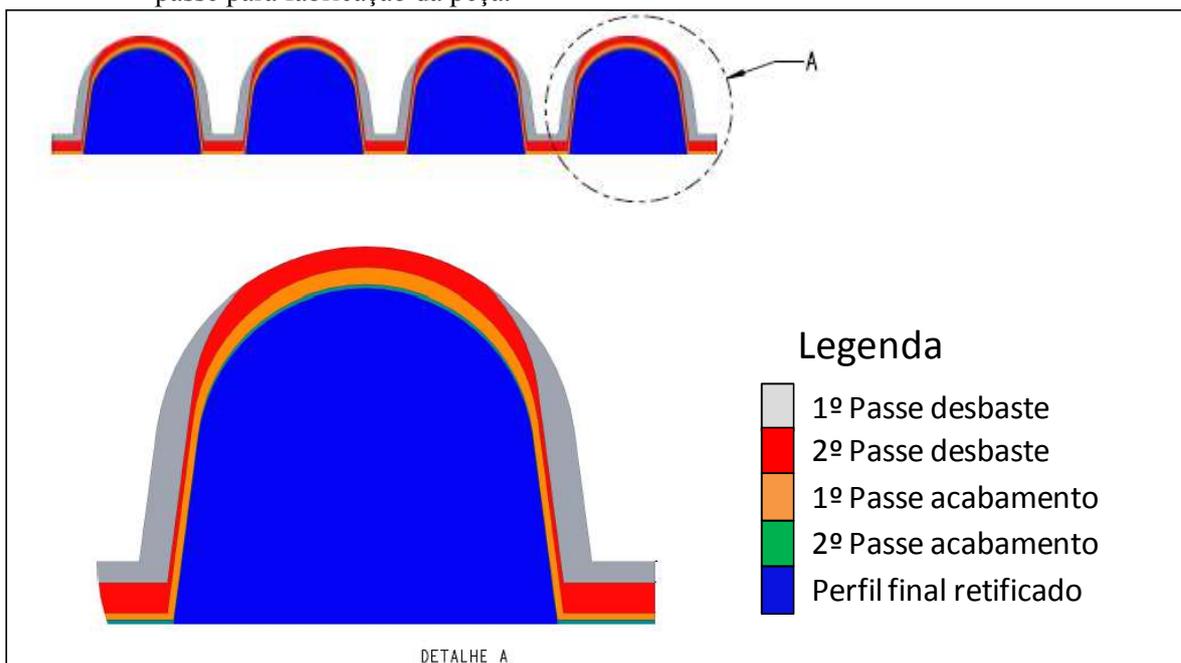
Operação	Passe	Área Retificada (mm^2)	Largura efetiva do rebolo (%)	Perfil da área retificada
Desbaste	1°	24,18	54	
Desbaste	2°	21,99	100	
Acabamento	1°	14,74	100	
Acabamento	2°	3,28	100	
Total		64,19		

Fonte: O Autor.

A área retificada nesta etapa não é uniforme sobre a largura da chapa de lamela. Embora a área total retificada na primeira operação de desbaste ser próxima à área retificada na segunda operação de desbaste ela é mais crítica que nas demais operações, por que apenas uma parcela de 54% do rebolo remove material, resultando em uma taxa de retificação efetiva aproximadamente duas vezes superior à taxa de retificação efetiva na segunda operação de desbaste.

A área retificada (a_{ret}) para cada etapa de retificação foi determinada pelo software PTC Creo parametric, tabela 4.1 e figura 4.3. Embora tenha sido considerado que a área retificada (a_{ret}) seja resultado do produto da largura da chapa de lamela pela penetração passiva do rebolo, a figura 4.3 mostra que a espessura efetiva em cada região do contorno retificado depende da inclinação da superfície de cada lamela. Ressalta-se que no primeiro passe nem todo o contorno da lamela é retificado. A retificação ocorre em aproximadamente 54% da largura da chapa de lamela com penetração passiva igual, se concentrando nas paredes laterais e no fundo das ranhuras retificadas, onde a velocidade periférica do rebolo é maior e são esperados os maiores danos térmicos. Desta forma, a taxa de retificação real na primeira operação de desbaste é maior em relação à taxa de retificação média sobre toda a largura do rebolo. Por este motivo, a verificação da eficiência da tubeira tipo sapata e a redução da potência específica com o aumento da velocidade de avanço é verificada apenas nesta primeira etapa de retificação de desbaste.

Figura 4.3 - Vista frontal de uma lamela com a sequência de passes e remoção de material em cada passe para fabricação da peça.



Fonte: O Autor.

4.1.4 Taxa de retificação

A taxa de retificação (Q_w) é o volume de material removido por unidade de tempo. Conforme mostrado na figura 2.3 da revisão bibliográfica que segundo Klocke (2009), é calculada pela equação 2.2 ($Q_w = v_w \cdot a_p \cdot a_e$) pelo produto da velocidade de avanço da peça (v_w) pela largura de corte (a_p) e pela profundidade de corte (a_e).

Devido à geometria específica das lamelas na retificação *creep feed*, para efeitos de cálculos, os termos largura de corte (a_p) e profundidade de corte (a_e) foram substituídos pelo termo de área retificada (a_{ret}), conforme mencionado no item 4.1.3. Desta forma, a equação 4.1 descrita abaixo foi utilizada para calcular a taxa de retificação.

$$Q_w = v_w \cdot a_{ret} \quad (4.1)$$

4.2 PARÂMETROS MONITORADOS NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Durante os ensaios foram monitorados a velocidade de avanço da peça (v_w) e a corrente do motor principal (A) no eixo árvore (*spindle*), ambos visualizados no painel (*display*) do comando CNC da retificadora.

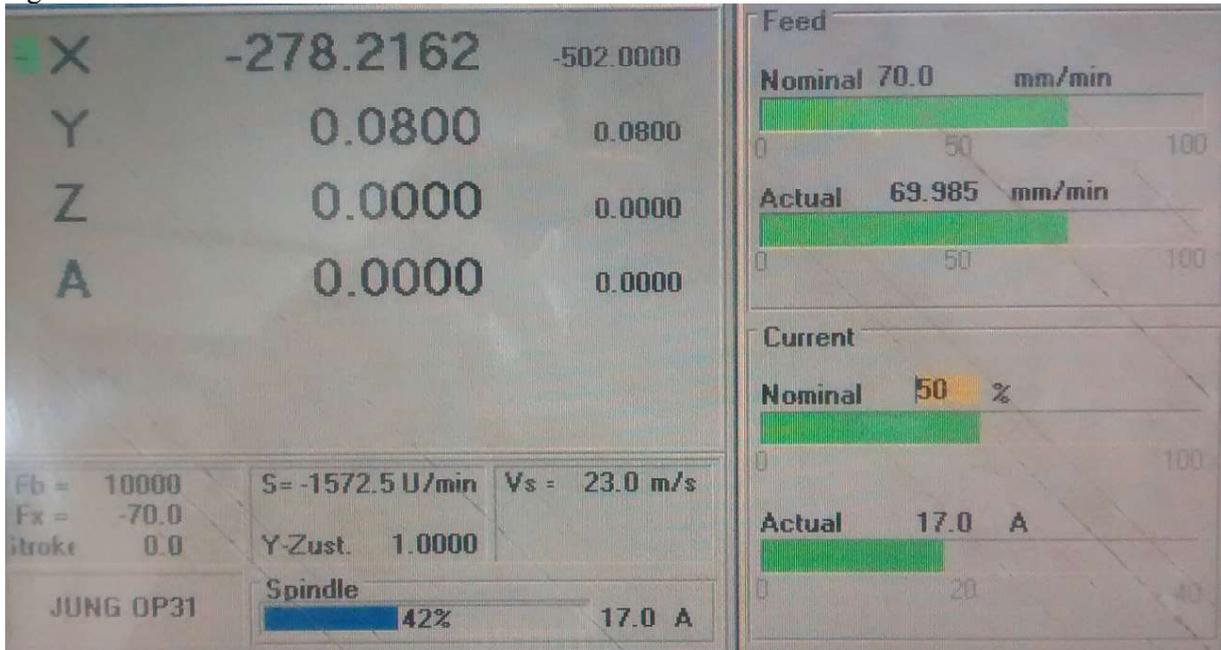
4.2.1 Velocidade de avanço da peça

Para atender o objetivo principal desta dissertação, o parâmetro variável de entrada considerado para aumentar a taxa de retificação foi a velocidade de avanço da peça (v_w). Como referência estabeleceu-se o valor de 70 mm/min, que era a velocidade de avanço empregada para o processo com a utilização de tubeira de jato livre. Durante a realização dos ensaios a velocidade de avanço foi aumentada até atingir um dos limites tecnológicos do processo de retificação: redução autônoma da velocidade de avanço pelo comando da máquina-ferramenta ou marcas de queima por retificação na superfície da lamela retificada. Quando a máquina excede o limite seguro da utilização da potência do motor estabelecido pelo fabricante do equipamento, a velocidade de avanço planejada para o ensaio, que é programada na máquina, não é executada pelo acionamento de avanço e, uma vez excedido o

limite de segurança, a máquina autonomamente diminui a velocidade de avanço para um valor seguro.

Durante os ensaios de retificação das peças, os valores da velocidade de avanço planejada (v_{wp}) e real (v_{wr}) são visualizados em *feed* no painel da retificadora com as denominações *nominal* e *actual*, respectivamente, figura 4.4.

Figura 4.4 - Painel do comando da retificadora.



Fonte: O Autor.

4.2.2 Corrente do motor principal

A corrente de alimentação do motor está diretamente relacionada com potência consumida. O valor da corrente é indicado no painel do comando da retificadora, com a denominação *Current*, na indicação *Actual*, figura 4.4.

A corrente do motor principal, conforme especificação da retificadora pode atingir o limite de 40A. Entretanto, quando a corrente excede 35A, o sistema de segurança do comando da retificadora diminui autonomamente a velocidade de avanço e, conseqüentemente, a corrente do motor principal. A corrente do motor principal era anotada para cada ensaio e serviu de indicação de limite tecnológico para todos os ensaios realizados. A velocidade de avanço foi aumentada gradativamente até a corrente do motor principal atingir 35A e ativar o sistema de proteção automático.

4.3 PARÂMETROS DE SAÍDA

Os parâmetros característicos de saída são todas as informações resultantes dos ensaios realizados, função dos parâmetros variáveis de entrada, e avaliados em conjunto com os parâmetros monitorados durante os ensaios. Foram verificados os seguintes parâmetros característicos de saída: para cada velocidade de avanço foram determinados a taxa de retificação específica média (Q'_w); a relação de desgaste média G (G_{med}), a potência de corte (P_c), a rugosidade (R_a) e, apenas quando ocorre a queima de retificação (*grinding burn*), a zona termicamente afetada. Os parâmetros de saída são descritos a seguir.

4.3.1 Taxa de retificação específica

A taxa de retificação específica (Q'_w), segundo Klocke (2009), é um parâmetro utilizado para comparar os resultados de retificação obtidos para larguras de rebolos distintas em diferentes aplicações de retificação, relacionando taxas de retificação de material (Q_w), com a largura efetiva de corte ($b_{s\ eff}$). É o quociente da taxa de retificação pela largura efetiva do rebole, conforme equação 4.2 abaixo.

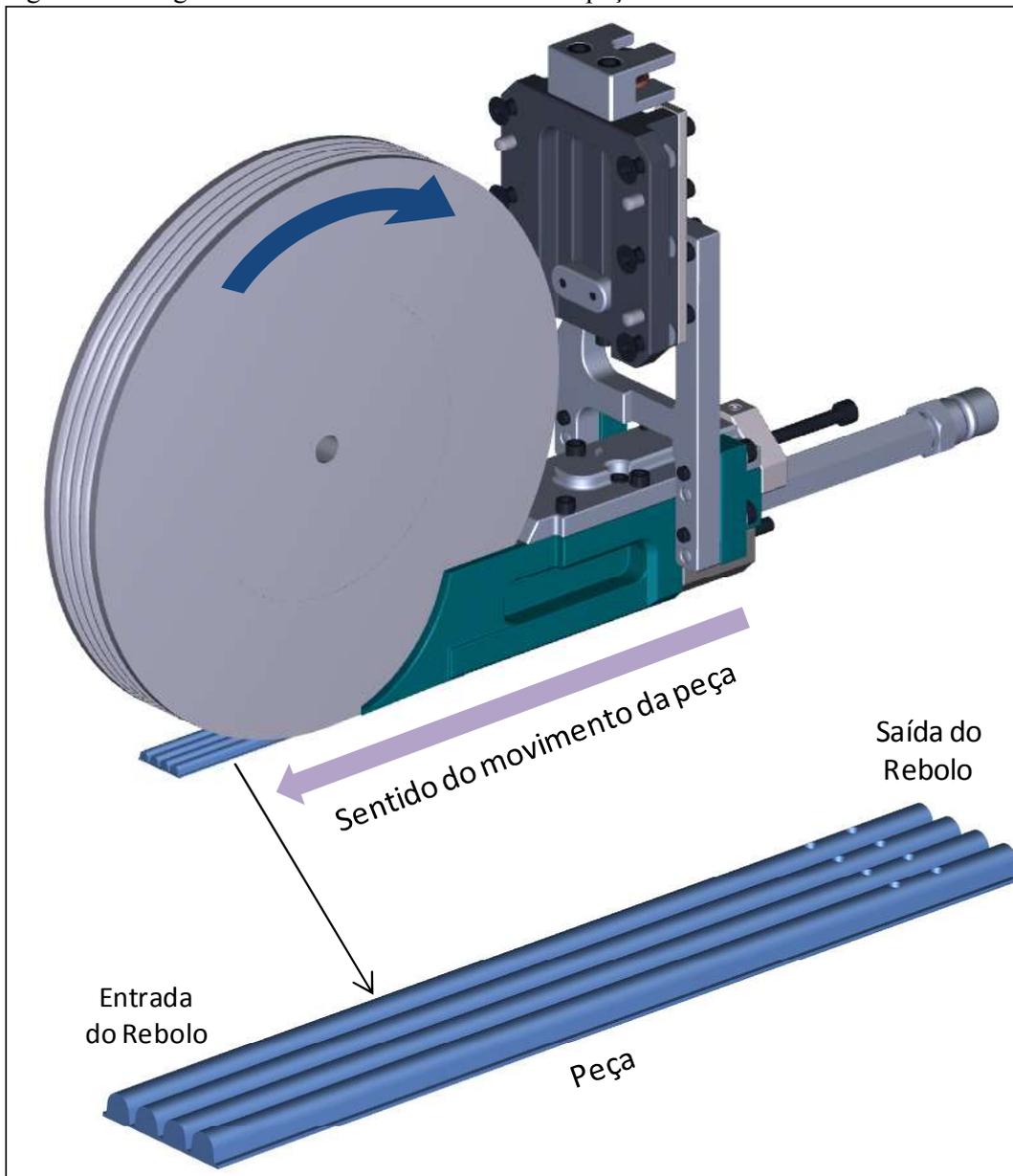
$$Q'_w = \frac{Q_w}{b_{s\ eff}} \quad (4.2)$$

Na retificação *creep feed* das chapas de lamela, a taxa de retificação efetiva varia ao longo do percurso de retificação, como consequência do desgaste do rebole. Para a avaliação da taxa de retificação efetiva média foi determinado o perfil geométrico das lamelas retificadas ao longo do comprimento retificado e, como função do perfil geométrico programado (de projeto), determinada a taxa de retificação específica média ($Q'_{w\ med}$) que fornece a ordem de grandeza da taxa de retificação atingida. Conforme equação 4.3, para obter o valor da taxa de retificação específica média, foi utilizada a média entre a taxa de retificação específica máxima ($Q'_{w\ max}$) no início do percurso de retificação e a taxa de retificação específica mínima ($Q'_{w\ min}$) no final do percurso de retificação. Desta forma, foi possível verificar as regiões nas quais a taxa de retificação específica de material foi máxima e mínima, consequência do desgaste máximo e mínimo do rebole.

$$Q'_{w med} = \frac{(Q'_{w máx} + Q'_{w mín})}{2} \quad (4.3)$$

A taxa de retificação varia devido ao desgaste que ocorre no rebolo durante o processo de retificação. No início do processo de retificação o rebolo é dressado com a geometria desejada final da peça. Entretanto, após percorrer 250 mm, o rebolo apresenta um desgaste e, conseqüentemente, remove menos material quando comparado ao início da retificação. A figura 4.5 mostra as regiões consideradas de entrada e de saída do rebolo na peça, respectivamente, onde as taxas de retificação são máximas e mínimas.

Figura 4.5 - Região de entrada e saída do rebolo na peça.



Fonte: O Autor.

Para a taxa de retificação específica máxima ($Q'_{w \text{ máx}}$) é considerada a taxa de retificação respectiva ao perfil da lamela no ponto de medição do perfil da lamela afastado 1,5 mm da borda de entrada do rebolo, onde o desgaste inicial é desprezado. Foi considerado que a taxa de retificação específica máxima é igual à taxa de retificação específica (Q'_w) programada, equação 4.4.

$$Q'_{w \text{ máx}} = Q'_w \quad (4.4)$$

Para o cálculo da taxa de retificação específica mínima ($Q'_{w \text{ mín}}$), foi considerada a variação da geometria do perfil da lamela no final do percurso de retificação decorrente do desgaste do rebolo. Para isto, foi diminuído da área de retificação o valor do desgaste da peça multiplicado pela largura efetiva de corte ($b_{s \text{ eff}}$), conforme equação 4.5.

$$Q'_{w \text{ mín}} = \frac{(v_w) \cdot [a_{ret} - (\Delta_r \cdot b_{s \text{ eff}})]}{b_{s \text{ eff}}} \quad (4.5)$$

onde o Δ_r , equação 4.6, é obtido através da diferença entre a medição do raio de saída da peça e do raio de entrada da peça.

$$\Delta_r = r_{saída} - r_{entrada} \quad (4.6)$$

4.3.1.1 Cálculo de desgaste de entrada e saída do rebolo

Para obter os valores do desgaste respectivo ao percurso retificado (entrada e saída do rebolo na peça) foram realizadas as medições do perfil geométrico das lamelas, avaliando os raios na parte superior dos perfis, figura 4.6. Para cada chapa de lamela retificada, o perfil considerado foi o perfil médio de cinco medições na região de entrada e cinco medições na região de saída do rebolo da peça. As distâncias das medições da borda da peça na entrada e na saída do rebolo foram de aproximadamente 1,5 mm.

Figura 4.6 - Medição do raio da lamela.



Fonte: O Autor.

As medições dos raios dos corpos de prova retificados foram realizadas em uma máquina de medição por coordenadas CNC portal, Prismo Navigator equipada com software Calypso, da fabricante Zeiss, figura 4.7. Os intervalos máximos de medições para os eixos X, Y e Z respectivamente eram, 900 mm, 1500 mm e 700 mm. A máquina de medir por coordenadas possui mancais aerostáticos em todos os eixos, nos eixo X e Y oito mancais e, no eixo Z, cinco mancais. A máquina estava montada sobre amortecedores de vibrações em elastômero, bem como proteções sobre as guias, por ser utilizada em um ambiente próximo à produção. O sensor de apalpação empregado foi o modelo Golden Vast da Zeiss e a medição foi realizada com esfera de medição de 2 mm por contato de ponto único. A força de apalpação foi de 100 mN. A figura 4.8 mostra um exemplo de relatório de medição do raio de uma lamela.

Figura 4.7 - Máquina de medição por coordenadas CNC.



Fonte: O Autor.

Figura 4.8 - Exemplo do relatório de medição de raio.

Messprotokoll ZEISS Calypso								
Nome Plano Raio_Lamela_Saida					Data 22 de Março de 2018			
Desenho Nº * drawingno *		Ordem 1		Hora 10:56:39 am				
Operador Master		N.º de Peça Incremental 70 mm min Sai 2P 2D Med 1		MMC C32Bit		Página de 1 1		
Name	ID	Actual	Nominal	pos Tol	neg Tol	Diff	<-- -->	
Raio a 1.5mm Entrada	R	3.309	3.196			0.113		

Fonte: O Autor.

4.3.2 Taxa média de desgaste

De acordo com Klocke (2009), a taxa média de desgaste (G_{med}) é um parâmetro popular para descrever o tempo de vida do rebolo. Para seu cálculo utiliza-se a equação 4.7, onde é dividido o volume de material removido, neste caso retificado (V_w), pelo volume de material desgastado do rebolo (V_s). Para os cálculos da taxa média de desgaste (G_{med}) foram utilizados os valores médios dos desgastes, calculados a partir das geometrias medidas nas peças na entrada e na saída do rebolo. Para os valores de desgastes na peça e rebolo, foram utilizadas as medições dos raios citados no item 4.3.1.1.

$$G = \frac{V_w}{V_s} \quad (4.7)$$

4.3.3 Potência consumida

Para o cálculo de potência consumida, foi utilizada a equação 4.8 descrita a seguir, segundo Alexander *et al.* (2012), para motores trifásicos é o produto da raiz quadrada de três pela tensão de trabalho do motor (V), pela corrente medida (I) e pelo fator de potência ($\cos \varphi$).

$$P_c = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (4.8)$$

As informações de tensão de trabalho (V) e o fator de potência ($\cos \varphi$) são indicados no manual da retificadora e contidos na etiqueta do servomotor, onde a tensão de trabalho é de 251 V e o fator de potência ($\cos \varphi$) é 0,82. Com objetivo de conferir se a corrente do motor principal, mostrada no painel do comando da retificadora, apresenta o mesmo valor na entrada do servomotor responsável pela rotação do rebolo, foram realizadas dez medições com amperímetro portátil do tipo alicate e comparado os valores lidos no painel, figura 4.9. Embora fosse verificado que o valor medido nos cabos de alimentação do servomotor fosse 15% maior que o valor lido no do painel de comando da retificadora, a tendência de comportamento foi o mesmo e foram considerados apenas os valores lidos no painel da máquina-ferramenta.

Figura 4.9 - Medição da corrente nos cabos de alimentação do servomotor do acionamento do rebolo.



Fonte: O Autor.

4.3.4 Rugosidade

A rugosidade em uma operação de desbaste tem apenas importância secundária para o componente acabado. Entretanto o comportamento dos valores dos parâmetros verticais do perfil de rugosidade transversal ao longo do comprimento retificado permite concluir sobre os mecanismos de desgaste que ocorrem no rebolo durante a retificação. Para as medições dos parâmetros verticais da rugosidade dos corpos de provas foi utilizado o rugosímetro do fabricante Taylor Hobson, modelo Form Talysurf I-series, equipado com software Ultra, versão 6.1.4.57, figura 4.10. Além de fornecer os valores da Rugosidade Média R_a , o software gera um gráfico que permite documentar e visualizar as características do comportamento da rugosidade.

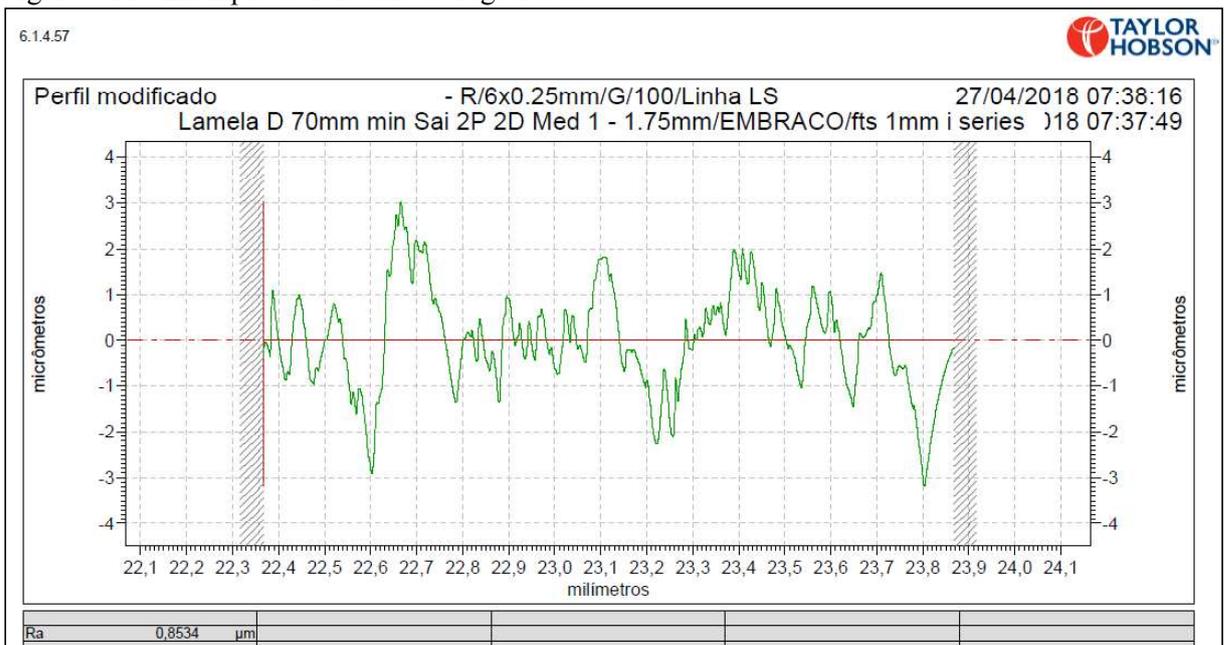
Para os ensaios foi utilizado um apalpador indutivo com ponta padrão cônica e raio de ponta de $2 \mu\text{m}$. O comprimento de amostragem adotado foi de $1,75 \text{ mm}$, com *cut off* de $0,25 \text{ mm}$. Em cada corpo de prova foram realizadas cinco medições na região de entrada do rebolo na peça e cinco medições na região de saída do rebolo da peça, permitindo determinar o valor médio da rugosidade na entrada e na saída do rebolo da peça. A figura 4.11 mostra um exemplo de relatório de medição de rugosidade.

Figura 4.10 - Medição de rugosidade no corpo de prova.



Fonte: O Autor.

Figura 4.11 - Exemplo do relatório de rugosidade.



Fonte: O Autor.

O objetivo de fazer medições de rugosidade nas regiões de entrada e saída do rebolo na peça foi, além de ter a dimensão da rugosidade da peça, analisar a sua variação e, a partir desta concluir sobre o mecanismo dos desgastes dos grãos do rebolo durante o processo de retificação. Salienta-se que na produção das lamelas na primeira etapa de desbaste o valor nominal da rugosidade não é controlado, pois a peça ainda será submetida a mais uma operação com rebolo de desbaste e duas etapas de retificação com rebolo de acabamento.

4.3.5 Zona termicamente afetada

O acompanhamento da zona termicamente afetada é efetuado através da verificação de danos térmicos pela inspeção visual, observando o surgimento de regiões com queima por retificação (*grinding burn*) nas peças após os ensaios. A alteração na cor da superfície da peça, decorrente da queima ou oxidação por retificação, é uma característica usualmente empregada pelos operadores da retificadora para verificar se a peça está boa ou não. Quando ocorre a queima por retificação, surge uma região com oxidação “azulamento” que significa que houve queima da superfície devido a temperaturas excessivamente elevadas na presença do oxigênio da atmosfera. A insuficiência ou falta de fluido lubrificante na região de corte podem ser causadores desta queima por retificação. Quando este fenômeno ocorre, surge um revenimento excessivo e uma diminuição da dureza da peça. Como consequência, a peça é descartada, pois apresenta um tempo de vida muito curto em utilização na inserção de fios nos estatores, perdendo sua funcionalidade nas linhas de produção.

4.4 EXECUÇÃO EXPERIMENTAL

Com o objetivo de avaliar a eficácia da tubeira tipo sapata, na retificação *creep feed* de lamelas, e de determinar o comportamento da potência específica em função do aumento da taxa de retificação, foram realizados os ensaios conforme a sequência descrita no fluxograma da figura 4.1. A primeira sequência de ensaios realizados foi com a tubeira de jato livre, sendo esta a tubeira original empregada na retificação das lamelas. No primeiro ensaio com a tubeira tipo jato livre a velocidade de avanço (v_w), que no processo padrão é de 70 mm/min, foi aumentada para 80 mm/min.

Verificou-se que com o aumento da velocidade de avanço de 70 para 80 mm/m, no emprego da tubeira de jato livre, o resultado mostrou uma forte queima por retificação ao longo do comprimento retificado, figura 4.12. Durante a realização deste ensaio, a corrente do motor principal da retificadora indicada no painel da máquina subiu para 38 A e a retificadora autonomamente reduziu a velocidade de avanço (v_w) para 70 mm/min.

Como no emprego da tubeira tipo jato livre para a velocidade de avanço da peça de 80 mm/min houve a danificação térmica das lamelas, foi constatado que a mesma ultrapassou a velocidade de avanço crítica e, por este motivo, não foram realizados outros ensaios com a

tubeira de jato livre. Um aumento para velocidades de avanço maiores iriam submeter à peça e a retificadora a condições mais severas de retificação.

Na figura 4.12, mostra uma lamela retificada com lubrificação com tubeira tipo jato livre com velocidade de avanço (v_w) de 80 mm/min. As três imagens mostram a queima por retificação (*grinding burn*):

- a) A vista superior da peça inteira;
- b) O detalhe da queima por retificação do lado esquerdo;
- c) O detalhe da queima por retificação do lado direito.

Figura 4.12 - Lamela retificada em condição do primeiro desbaste com tubeira de jato livre para a velocidade de avanço planejada de 80 mm/min, danificada por queima por retificação.



Fonte: O Autor.

Na sequência foram realizados os ensaios com tubeira tipo sapata. Para esta variante de alimentação do fluido lubrificante, as velocidades de avanço foram sendo incrementadas até atingir o limite tecnológico da máquina. Na tabela 4.2 são mostrados a velocidade de avanço planejada (v_{wp}) e os parâmetros característicos que foram monitorados durante o processo de retificação das lamelas, sendo eles: velocidade de avanço real (v_{wr}) e a corrente do motor principal (A) indicado no painel da máquina. Baseado nos dados obtidos nos ensaios prévios com a sapata protótipo, o planejamento previu o aumento da velocidade de avanço até 375 mm/min. A menor velocidade de avanço foi a de $v_{wp} = 70$ mm/min, o primeiro incremento de avanço foi de 30 mm/min e os demais de 25 mm/min. A tabela 4.2 mostra que os valores da velocidade de avanço, indicada no painel da retificadora, foram idênticos à velocidade planejada (v_{wp}) até a velocidade de avanço máxima a ser verificada durante a realização dos ensaios, limitado pela corrente do motor principal de 35 A. Uma vez

atingido o limite da potência da retificadora, não foram realizados ensaios com velocidades de avanço ainda mais elevadas.

Tabela 4.2 - Ensaio de retificação com tubeira tipo sapata.

Ensaio	Parâmetro de Entrada	Parâmetros Monitorados durante o processo	
	Velocidade de Avanço Planejada (v_{wp}) (mm/min)	Velocidade de Avanço Real (v_{wr}) (mm/min)	Corrente do motor Pannel da Máquina (A)
1	70	70	26
2	100	100	27
3	125	125	30
4	150	150	29
5	175	175	30
6	200	200	29
7	225	225	32
8	250	250	34
9	275	275	33
10	300	300	33
11	325	325	34
12	350	340	37
13	375	Não realizado	-

Fonte: O Autor.

5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios realizados. Conforme parâmetros de saída dos ensaios, figura 4.2, são apresentados os resultados da taxa de retificação específica média, da taxa média de desgaste, da potência consumida, da rugosidade média e da zona termicamente afetada. Além destes resultados, para enriquecer as análises, serão apresentados a taxa de retificação média, o comportamento do desgaste do rebolo e a potência consumida por peça. Também será apresentada uma análise dos ganhos econômicos e ambientais obtidos para a retificação das lamelas, empregando a lubrificação por tubearias do tipo sapata, em dois cenários. No primeiro cenário, foi considerada uma condição mais conservadora de retificação com utilização da velocidade de avanço de 200 mm/min. No segundo cenário, foi utilizada a velocidade de avanço de 325 mm/min, sendo esta a máxima velocidade de avanço realizada sem que houvesse uma redução autônoma da velocidade de avanço e sem exceder o limite de segurança da retificadora.

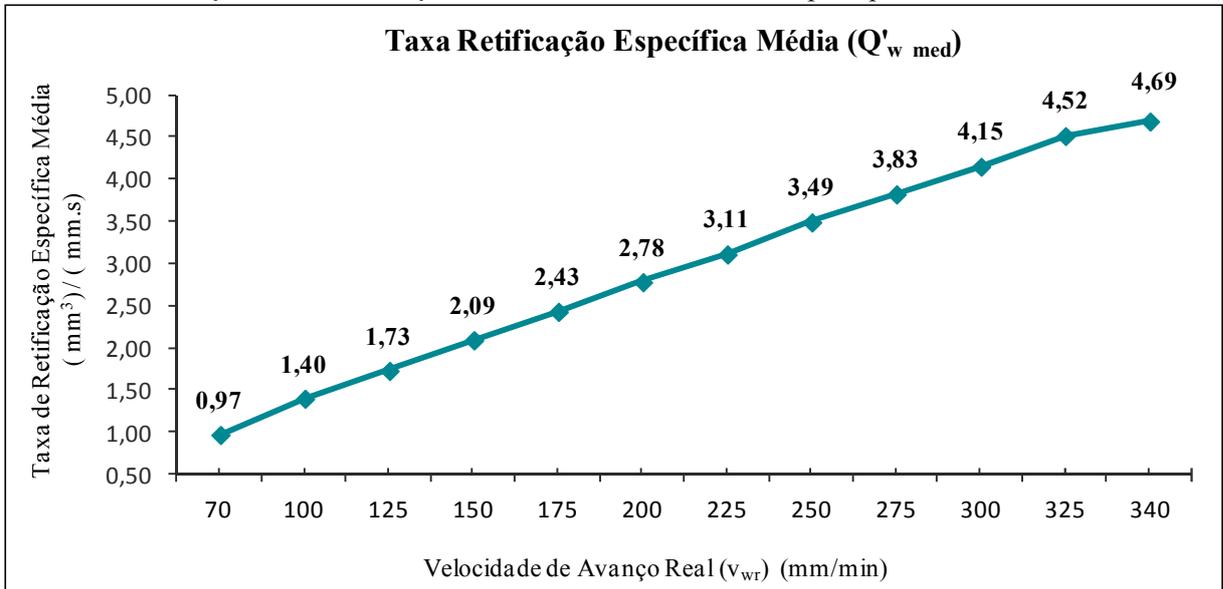
Conforme citado no item 4.4, quando foi programada a velocidade de avanço planejada (v_{wp}) de 350 mm/min a corrente excedeu 35 A e a máquina reduziu a velocidade de avanço real (v_{wr}) para 340 mm/min. Na análise dos resultados, os valores obtidos com a velocidade de avanço real (v_{wr}) de 340 mm/min foram considerados excessivos e não seguros para a operação industrial e a máxima velocidade de avanço real (v_{wr}) foi limitada para 325 mm/min, sendo este o valor máximo de referência para os resultados obtidos. Entretanto, para poder analisar o comportamento tendencial, os resultados com velocidade de avanço real (v_{wr}) de 340 mm/min foram mantidos nos gráficos que serão apresentados neste capítulo.

5.1 TAXA DE RETIFICAÇÃO ESPECÍFICA MÉDIA

Com a utilização da tubeira tipo sapata a velocidade de avanço real (v_{wr}) de 70 mm/min foi aumentada até o limite de 325 mm/min. A taxa de retificação específica média inicial de $Q'_{w \text{ med}} = 0,97 \text{ mm}^3/(\text{mm.s})$ foi aumentada para $(Q'_{w \text{ med}}) = 4,52 \text{ mm}^3/(\text{mm.s})$, representando um aumento de 366% quando comparado o valor inicial praticado com tubeiras de jato livre. O gráfico da figura 5.1 mostra o comportamento da taxa de retificação específica média ($Q'_{w \text{ med}}$) em relação ao avanço real (v_{wr}). O comportamento quase linear é apenas

perturbado no último ensaio em decorrência da redução autônoma da velocidade de avanço planejada (v_{wp}) de 350 mm/min para a velocidade de avanço real (v_{wr}) de 340 mm/min.

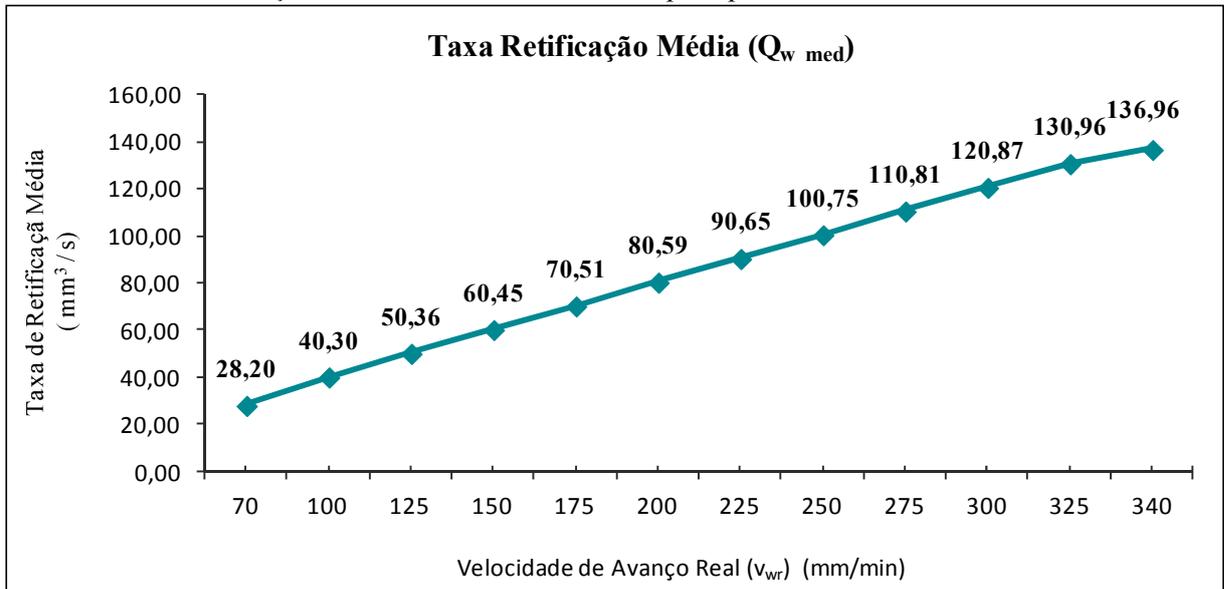
Figura 5.1 - Comportamento da taxa de retificação específica média como função da velocidade de avanço real na retificação de lamelas com tubeiras do tipo sapata.



Fonte: O Autor.

Em relação à taxa de retificação média ($Q_{w \text{ med}}$), mostra um comportamento semelhante à taxa de retificação específica média, pois está baseada nos mesmos parâmetros de entrada. Houve um aumento de 364% quando comparado o valor inicial de 28,20 mm^3/s com valor máximo de 130,96 mm^3/s . Na figura 5.2 são apresentadas as taxas de retificação médias com suas respectivas velocidades de avanço.

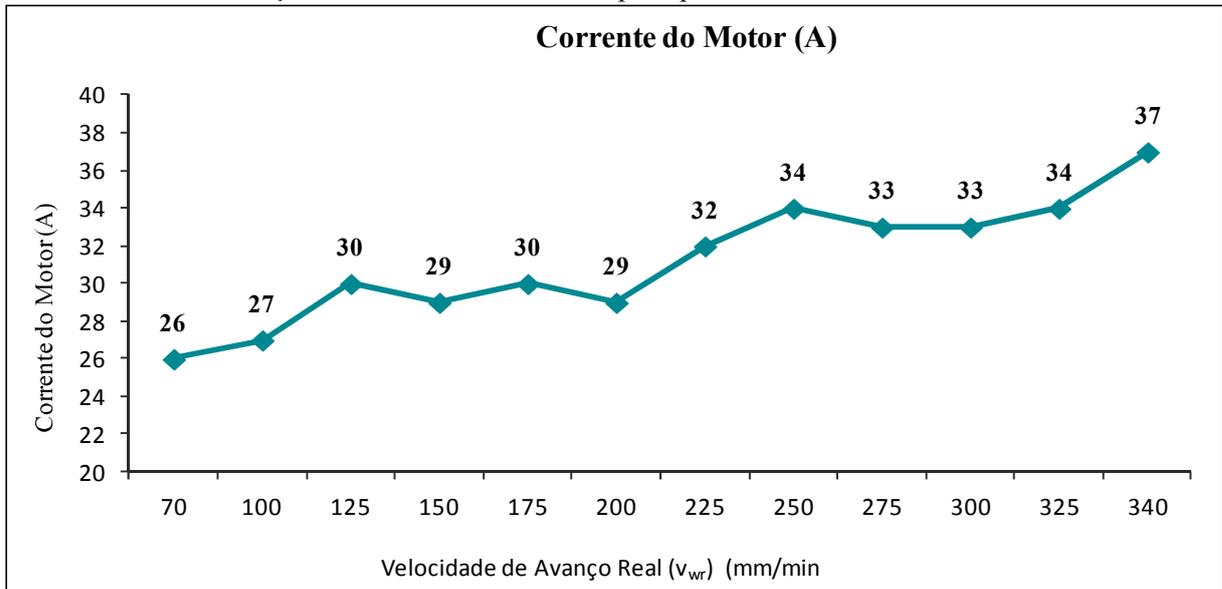
Figura 5.2 - Comportamento da taxa de retificação média como função da velocidade de avanço real na retificação de lamelas com tubeiras do tipo sapata.



Fonte: O Autor.

A corrente do motor principal, monitorada durante os ensaios, mostra um aumento gradual com o aumento da velocidade de avanço. O comportamento não é linear e as oscilações mostradas na figura 5.3 são correlacionadas às diferenças na dureza das chapas de lamela obtida pelo tratamento térmico. A corrente do motor aumenta numa proporção menor que a velocidade de avanço. Para um aumento da velocidade de avanço de 70 para 325 mm/min, a corrente teve um aumento de apenas 31%, aumentando de 26 A para 34 A. Isto significa que, embora a potência nominal de retificação tenha aumentado à medida que foi aumentada a velocidade de avanço, o aumento da taxa de retificação representa um consumo decrescente significativo de energia por volume retificado. Este comportamento é explicado pelo aumento da espessura de usinagem com o aumento da velocidade de avanço. Segundo Kienzle, o expoente que rege a desproporcionalidade geométrica entre a espessura de usinagem no torneamento e a pressão de corte é menor que a unidade. Verificou-se que na retificação *creep feed*, onde as espessuras de usinagem são consideravelmente mais finas que na retificação pendular e muito mais finas que na usinagem com ferramentas de corte de geometria definida, um aumento da velocidade de avanço de 70 para 325 mm/min leva a um aumento significativo da espessura de usinagem.

Figura 5.3 - Comportamento da corrente do motor principal em função da velocidade de avanço real na retificação de lamelas com tubeira tipo sapata.

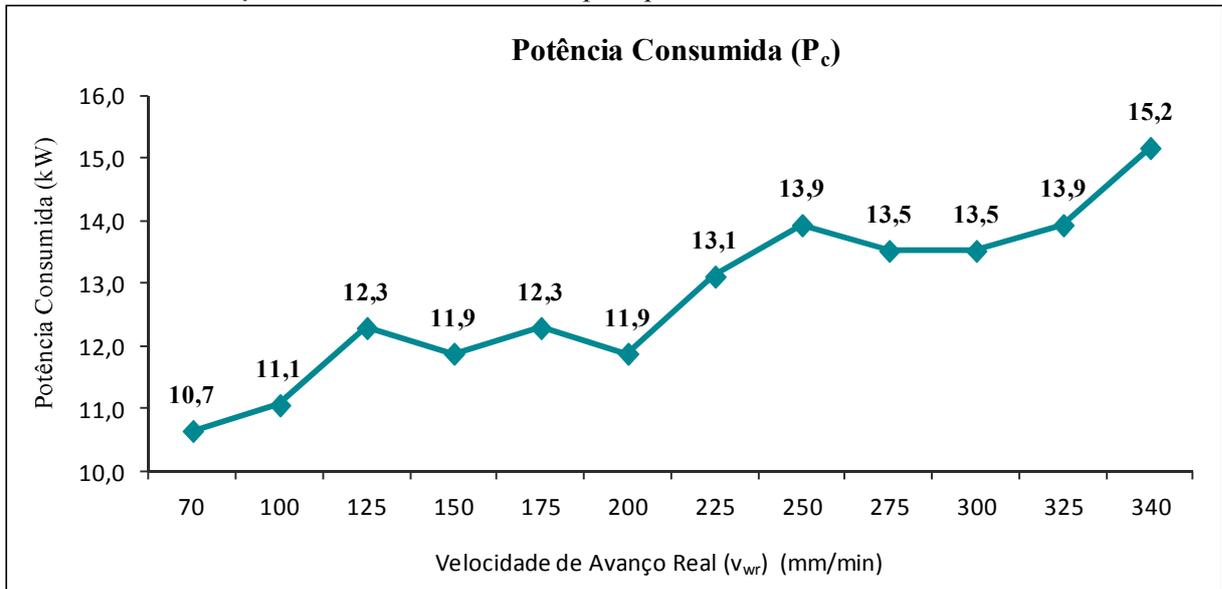


Fonte: O Autor.

5.2 POTÊNCIA CONSUMIDA

A potência consumida na retificação das chapas de lamela, empregando a lubrificação por tubeiras do tipo sapata, apresenta o mesmo comportamento da corrente do motor principal. O aumento da potência consumida, como função do aumento da velocidade de avanço real (v_{wr}), é mostrado na figura 5.4. Na mesma é demonstrada que a potência consumida aumentou de 10,7 kW para 13,9 kW, utilizando respectivamente, as velocidades de avanço de 70 mm/min e 325 mm/min. Esta variação representa um aumento de 30% para um aumento da taxa de retificação média de 364%.

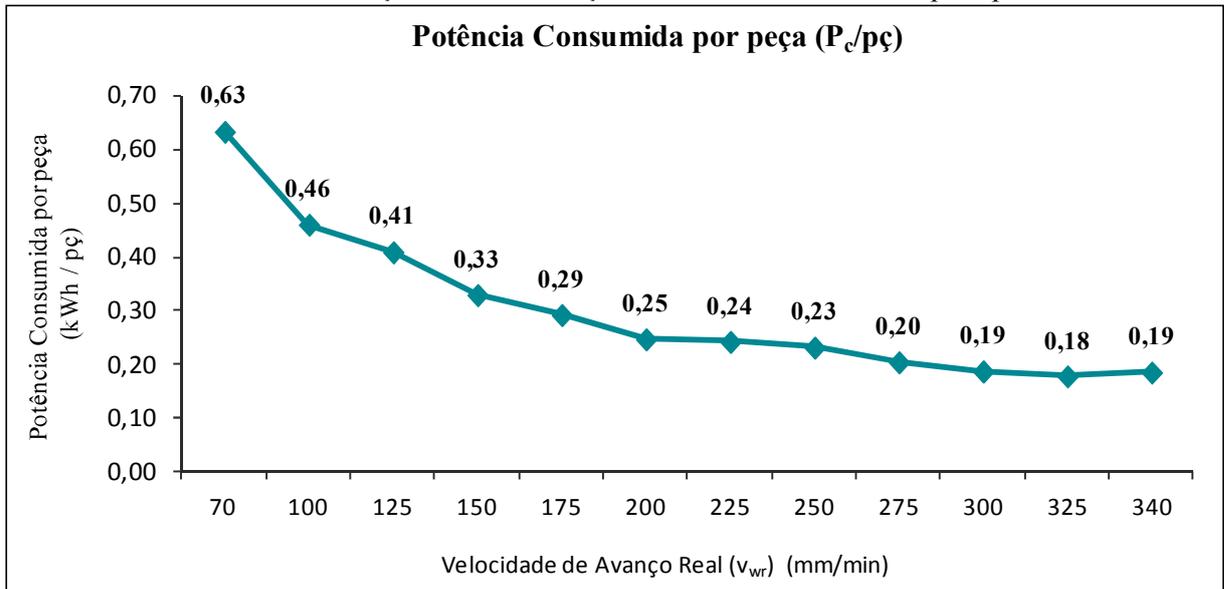
Figura 5.4 - Resultados da potência consumida como função da velocidade de avanço real na retificação de lamelas com tubeira tipo sapata.



Fonte: O Autor.

Ao avaliar a energia consumida por chapa de lamela retificada, observou-se uma redução de 0,63 kWh/pç para 0,18 kWh/pç à medida que foi aumentada a velocidade de avanço real (v_{wr}) de 70 para 325 mm/min, figura 5.5. Esta diferença representou uma redução de 71% da energia consumida por peça para a velocidade de avanço máxima empregada. A diminuição da energia necessária para retificar cada lamela é decorrente do melhor aproveitamento da energia para formar o cavaco, à medida que a velocidade de avanço aumenta. O aumento da velocidade de avanço leva a um aumento da espessura dos cavacos não deformados (antes de serem usinados) e menos energia é gasta para as deformações plásticas não associadas à formação de cavaco. Conforme a equação de Kienzle *apud* König *et al.* (1997), este comportamento é explicado pela diminuição do trabalho de corte devido ao aumento da espessura do cavaco. Quanto maior a espessura de cavaco na usinagem, menor é o trabalho para gerar o volume de cavaco e, conseqüentemente, a pressão específica de corte diminui. Este resultado mostra que além de se obter um aumento significativo na produção de lamelas no emprego da tubeira do tipo sapata, a diminuição do consumo de energia vai ao encontro da preservação ambiental, tornando o processo menos agressivo ao meio ambiente.

Figura 5.5 - Comportamento da potência consumida por chapa de lamelas retificada como função da velocidade de avanço real na retificação de lamelas com tubeira tipo sapata.

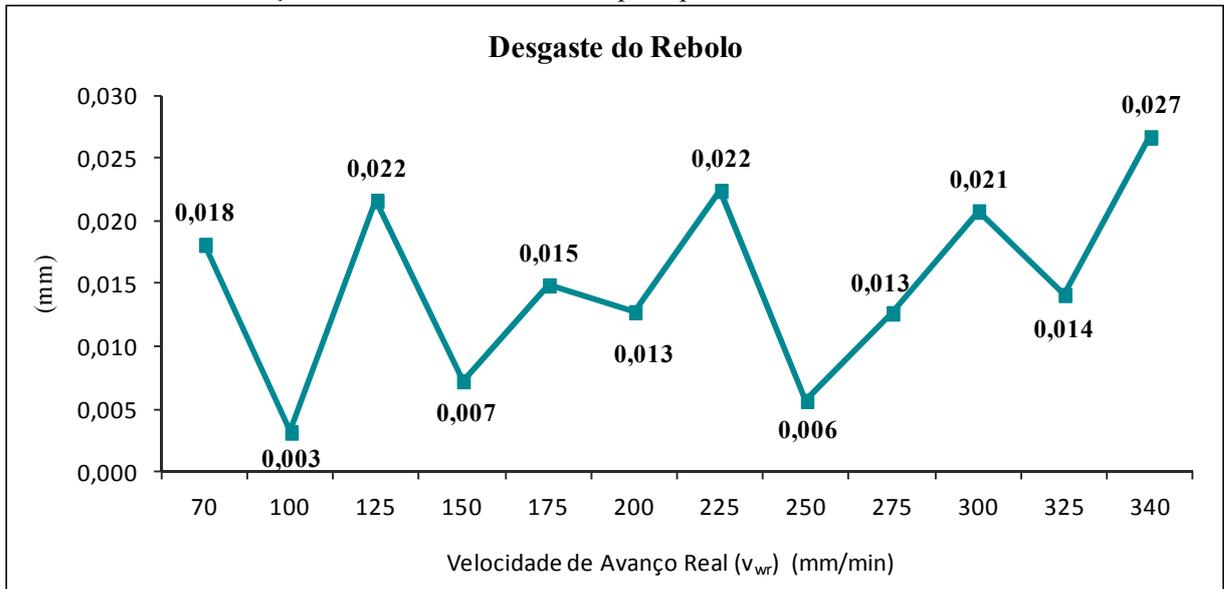


Fonte: O Autor.

5.3 TAXA MÉDIA DE DESGASTE

O desgaste do rebolo na retificação tem influência direta sobre a variação da geometria do perfil retificado e determina o número de dressamentos necessários para garantir a qualidade geométrica do produto retificado. Para a determinação da taxa de desgaste média (G_{med}), foram utilizados os valores de desgaste obtidos através das medições dos raios da parte superior da lamela, conforme citados no item 4.3.1.1. A figura 5.6 mostra os desgastes do rebolo para cada velocidade de avanço aplicada. Os desgastes variaram entre 0,003 mm e 0,022 mm. O aumento da taxa de retificação não mostrou uma alteração significativa do desgaste do rebolo para cada lamela retificada e se manteve em uma banda bastante uniforme, não apresentando uma tendência clara em sua modificação. O comportamento do desgaste não mostrou uma tendência de aumento ou diminuição com o aumento da velocidade de avanço. Este comportamento é relacionado ao fato de mesmo que se tenha aumentado a velocidade de avanço, e com isto a espessura de usinagem, a diminuição da pressão específica sobre os gumes resultou na manutenção dos valores de desgaste. A flutuação do desgaste pode estar relacionada com a pequena variação de dureza das chapas de lamela.

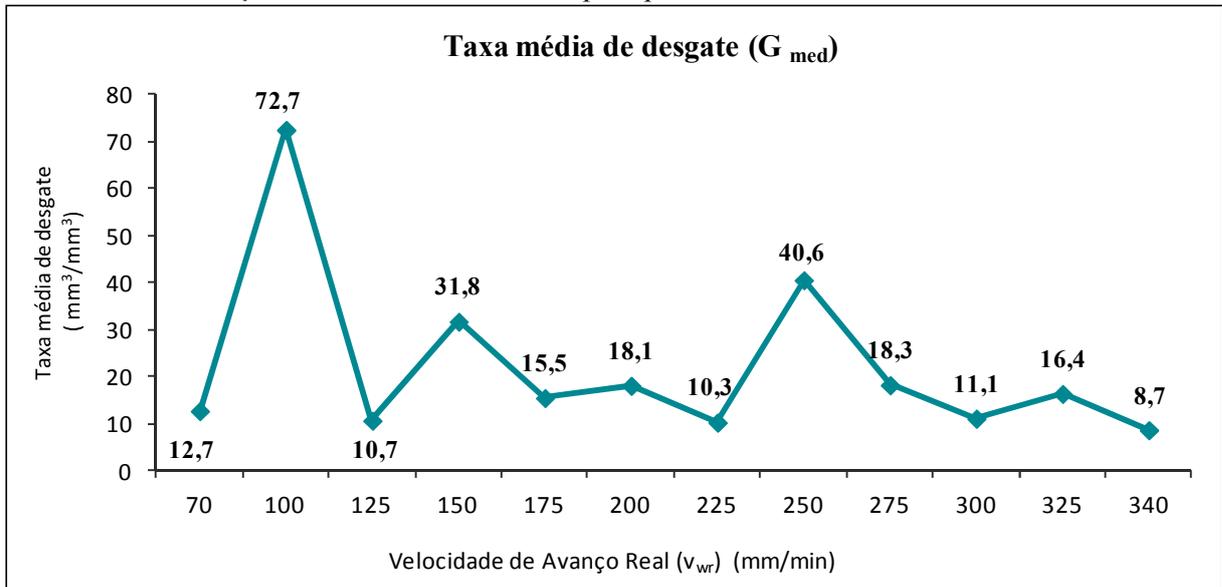
Figura 5.6 - Variação do raio devido ao desgaste do rebolo como função da velocidade de avanço real na retificação de lamelas com tubeira tipo sapata.



Fonte: O Autor.

A taxa média de desgaste (relação de desgaste) (G_{med}), obtida como função do quociente entre o volume retificado e o volume de desgaste do rebolo, apresentou uma grande oscilação no seu comportamento para a variação da velocidade de avanço de 70 para 325 mm/min. Pelos resultados atualmente disponíveis, não é ainda possível afirmar sobre um comportamento tendencial da relação de desgaste verificado com o aumento da velocidade de avanço na retificação profunda empregando uma tubeira do tipo sapata. O valor pequeno da relação de desgaste, verificado para a velocidade de avanço de 70 mm/min, pode estar relacionado com a pressão específica elevada que atua sobre os gumes nesta condição de trabalho. O valor pequeno da relação de desgaste para a velocidade de avanço de 325 mm/min pode estar relacionado com as forças mais elevadas que atuam individualmente sobre cada grão para a maior velocidade de avanço, mesmo que tenha ocorrido uma diminuição da pressão específica. O comportamento na faixa de velocidades de avanço entre o menor e o maior valor ensaiado pode ser decorrente de não se dispor de dados suficientes para estabelecer um comportamento estatisticamente correto, ou relacionado com outros fatores, como a alteração do número de gumes cinemáticos decorrente do aumento da espessura de usinagem ou a flutuação da dureza das chapas de lamela retificadas. Os comportamento das taxas médias de desgaste (G_{med}) como função da velocidade de avanço na retificação de lamelas empregando a lubrificação com tubeiras do tipo sapata estão mostrados na figura 5.7.

Figura 5.7 - Comportamento da taxa média de desgaste como função da velocidade de avanço real na retificação de lamelas com tubeira tipo sapata.



Fonte: O Autor.

5.4 RUGOSIDADE

Na retificação o comportamento da rugosidade como função do volume retificado em uma operação de desbaste permite concluir sobre os mecanismos de desgaste que ocorrem nos gumes do rebolo durante a retificação. No emprego de um determinado rebolo, para uma determinada taxa de retificação e um determinado grau de recobrimento estabelecido no dressamento do rebolo, as rugosidades podem apresentar três comportamentos distintos (KÖNIG, 1980):

- A rugosidade permanece constante desde o início até o final do ciclo de retificação;
- A rugosidade aumenta ao longo do percurso retificado;
- A rugosidade diminui com o percurso retificado.

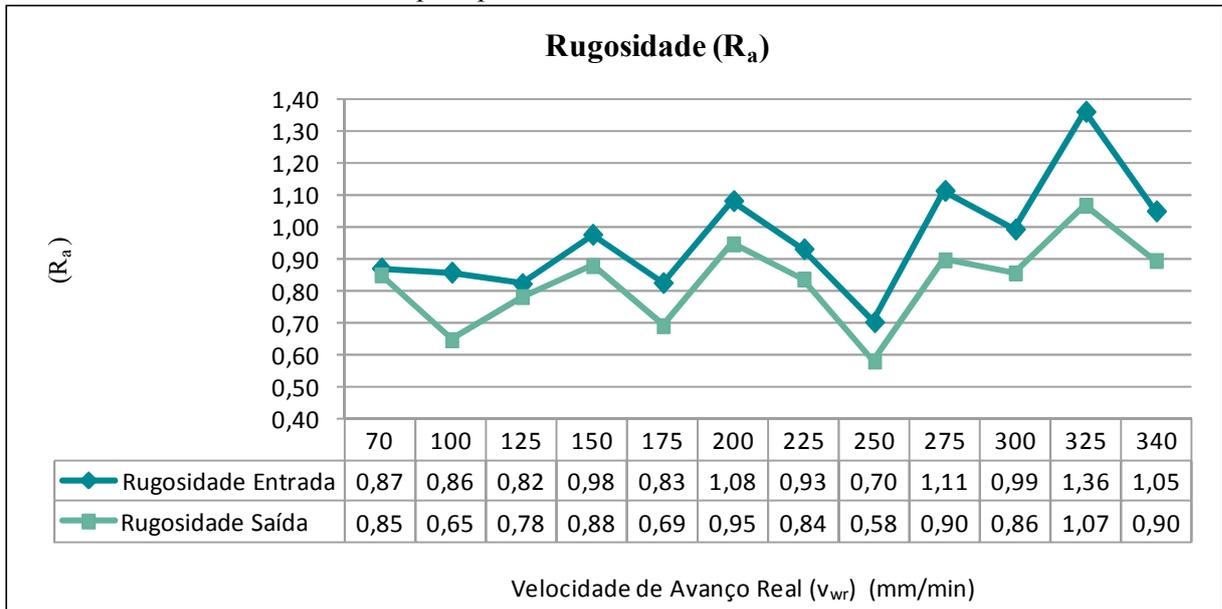
Para a primeira situação temos o comportamento ideal, explicitando uma escolha adequada do rebolo, grau de recobrimento no dressamento e taxa de retificação. A segunda indica que o mecanismo de desgaste é dominado por um mecanismo de macrodesgaste, pois em decorrência do arranchamento de grãos da estrutura do rebolo, o número de gumes cinemáticos diminui e os sulcos gerados pela retificação se tornam mais profundos, aumentando a rugosidade. A terceira situação ocorre quando o desgaste dos grãos é dominado por mecanismos de microdesgaste, os grãos se tornam platafórmicos e ocorre um aumento do

número de gumes cinemáticos, diminuindo a profundidade dos sulcos e com isto também da rugosidade.

A rugosidade das lamelas retificadas nos ensaios era medida na posição de entrada e na posição de saída do rebolo da chapa de lamelas. Para todos os ensaios realizados, a rugosidade na posição de saída do rebolo apresentou valores menores que na entrada do rebolo na chapa de lamelas. Este comportamento é mostrado na figura 5.8, onde a curva superior representa o comportamento da rugosidade na região da entrada do rebolo (recém dressado) e a curva inferior para a região de saída do rebolo. Todos os resultados mostraram o mesmo comportamento, sendo o valor da rugosidade de entrada sempre maior que o valor da rugosidade na saída. Isto significa que ao longo do percurso de retificação de 250 mm, os grãos do rebolo foram achatados e o número de gumes cinemáticos aumentou à medida que o processo de retificação estava sendo realizado.

Este comportamento da rugosidade é típico para o mecanismo de desgaste predominante dos grãos do rebolo por microdesgaste, Klocke (2009). Mesmo nas condições mais severas de retificação com velocidade de avanço real (v_{wr}) de 340 mm/min, onde foi atingido o limite tecnológico para o processo, não foi verificado um aumento da rugosidade entre a entrada e a saída do rebolo, ou seja, o mecanismo de desgaste dominante ainda era o microdesgaste. Não houve evidências que permitissem concluir sobre a ocorrência de mecanismos de macrodesgaste, ou seja, não houve um mecanismo dominante de quebra ou arrancamento de grãos.

Figura 5.8 - Resultados da rugosidade como função da velocidade de avanço real na retificação de lamelas com tubeira tipo sapata.



Fonte: O Autor.

5.5 ZONA TERMICAMENTE AFETADA

Nos ensaios de retificação realizados com a tubeira de jato livre empregando a velocidade de avanço (v_{wp}) = 80 mm/min, foi verificada a queima por retificação quando a corrente do motor principal atingiu o limite especificado pelo fabricante. Não foi possível aumentar a velocidade de avanço, pois ocorreu dano térmico com a queima da superfície da peça (*grinding burn*) já no primeiro incremento da velocidade de avanço, conforme citado no item 4.4. A queima ocorreu pela ineficiência da tubeira jato livre em prover a quantidade necessária de fluido lubrificante na zona de contato do rebolo com a peça.

Em todos os ensaios realizados com a tubeira tipo sapata, nos quais a velocidade de avanço real (v_{wr}) foi aumentada de 70 mm/min até 325 mm/min, não foram verificados danos térmicos com queima da superfície da peça. Mesmo no ensaio com velocidade de avanço planejada (v_{wp}) de 350 mm/min, não foi verificado este dano térmico nas lamelas retificadas. Isto significa que, para esta aplicação do processo de retificação *creep feed* com tubeira tipo sapata, o processo foi limitado pelo mecanismo de segurança da máquina e não dano térmico na lamela retificada ou pelo desgaste do rebolo.

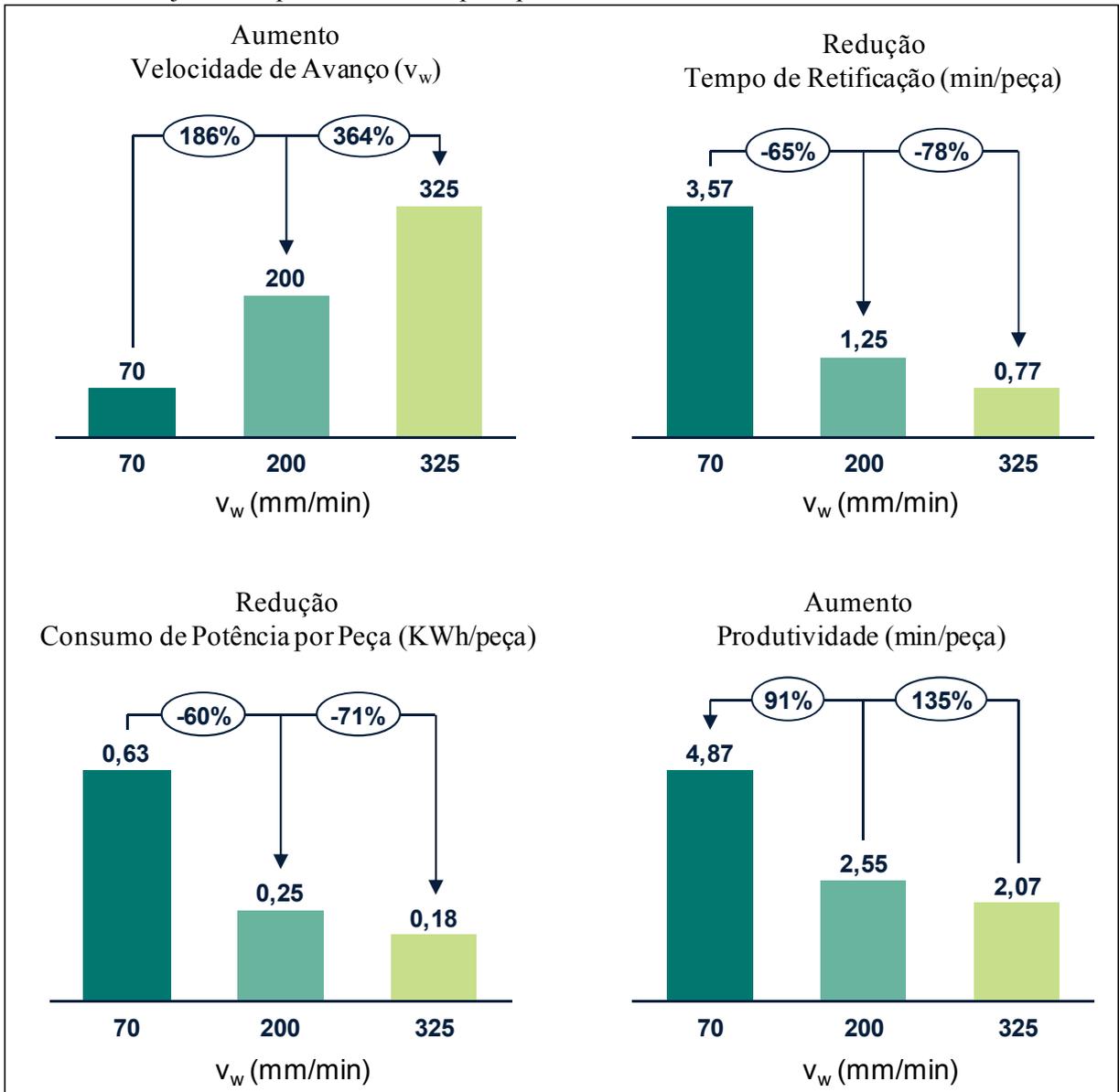
5.6 GANHOS ECONÔMICOS

Os resultados obtidos nesta pesquisa mostram que é possível alcançar ganhos econômicos significativos na retificação de lamelas empregando um sistema de lubrificação com tubeira do tipo sapata em escala industrial. Os principais ganhos obtidos estão diretamente relacionados ao aumento da velocidade de avanço, sendo eles: redução do tempo de retificação, redução de consumo de potência por peça e aumento da produtividade. Os ganhos apresentados na figura 5.9 foram baseados nos valores obtidos na condição padrão utilizada no processo de retificação com tubeira jato livre, no qual a velocidade de avanço estabelecida era de 70 mm/min. Foram considerados dois cenários. No primeiro, foi considerada uma condição mais conservadora com utilização da velocidade de avanço de 200 mm/min. No segundo cenário, foi considerada a velocidade de 325 mm/min, sendo esta a máxima velocidade de avanço possível sem exceder o limite de segurança da máquina. Para facilitar a comparação entre os dois cenários, os valores foram expressos em percentual e estão mostrados por meio de gráficos de coluna na figura 5.9.

Para o primeiro cenário, o aumento da velocidade de avanço representou 186%, a redução no tempo de retificação foi de 65% e a redução do consumo de potência por peça foi de 60%. Para o segundo cenário, o aumento da velocidade de avanço representou 364%, a redução no tempo de retificação foi de 78% e a redução do consumo de potência por peça foi de 71%.

O tempo de retificação, no qual o rebolo remove material da peça, representa uma parte do tempo da operação de retificação. Existem outros tempos, como exemplo dressagens e troca de peças na mesa magnética, que são necessários, mas não transformam a peça. Para fazer uma análise de aumento de produtividade foi necessário levar em consideração estes tempos. O valor da soma da dressagem e troca de peça na mesa magnética da retificadora considerados nos cálculos foi de 1,3 minutos por peça. Desta forma, foi constatado que a utilização da tubeira tipo sapata, foi possível aumentar a produtividade de lamelas em 91 % no primeiro cenário e 135% no segundo cenário 2.

Figura 5.9 - Ganhos na produtividade na retificação de lamelas pela substituição da lubrificação por jato livre por tubearas do tipo sapata.



Fonte: O Autor.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

A utilização de tubeira tipo sapata é uma solução eficaz na retificação convencional. Vários trabalhos foram relatados na literatura comprovando a possibilidade de aumentar as taxas de retificação, velocidades de corte, taxa de desgaste G , entre outros ganhos.

O objetivo desta pesquisa foi aplicar o conceito de tubeira tipo sapata na retificação profunda (*creep feed*) e verificar o quanto um aumento da taxa de retificação diminui a pressão de corte e com isto o consumo de potência por peça retificada e, conseqüentemente, aumentar a produtividade em um processo industrial de retificação *creep feed*. Neste processo industrial, eram fabricadas hastes de aço ferramenta de alta liga sinterizado, chamadas lamelas, que eram retificadas com uma velocidade de avanço de 70 mm/min com lubrificação por tubeira de jato livre. A variável de entrada para esta pesquisa foi a velocidade de avanço.

Foi desenvolvida uma tubeira tipo sapata modular para uso em escala industrial. Para atender a demanda de todos os modelos de lamelas atualmente produzidas, o sistema modular de posições intercambiáveis construído permite trocar rapidamente o raspador na entrada da tubeira e o ejetor na saída da tubeira. Estas peças com geometrias distintas também são peças que apresentam desgaste, visto que esporadicamente entram em contato com o rebolo. Foram desenvolvidos pares distintos de réguas de vedação superior e inferior que abrangeram todos os modelos de lamelas que necessitam ser retificadas. Além disto, foram empregados conceitos de modularidade que facilitam a troca das peças. Outro ponto relevante no projeto do sistema de lubrificação foi o sistema de fixação da tubeira na máquina retificadora, onde no seu desenvolvimento foi dado ênfase na rigidez e versatilidade de ajustes que possibilitam a compensação do desgaste na fenda entre o rebolo e a sapata de lubrificação.

Os resultados dos ensaios apresentaram ganhos significativos em relação ao processo anteriormente empregado com lubrificação por jato livre. Com a melhora na lubrificação da zona de corte, foi possível aumentar a velocidade de avanço de 70 para 325 mm/min, representando um aumento de 364%. Com o aumento da velocidade de avanço foram, conseqüentemente, também incrementadas as taxas de retificação média e taxas de retificação específica média. A taxa de retificação média foi aumentada de 28,20 mm³/s para

130,96 mm³/s e a taxa de retificação específica média foi incrementada de 0,97 mm³/mm.s para 4,52 mm³/mm.s, respectivamente 364% e 366%.

Devido ao aumento de corrente do motor principal, monitorada durante os ensaios, foi verificado um aumento de apenas 30% na potência consumida. Para a menor taxa de retificação, com a velocidade de avanço de 70 mm/min, a potência consumida foi de 10,7 kW e para a velocidade de avanço de 325 mm/min a potência consumida foi de 13,9 kW. Quando calculado o consumo de energia por peça, houve uma redução de 71%, diminuindo o consumo de 0,63 kW/peça para 0,18 kW/peça, respectivamente para 70 mm/min e 325 mm/min de velocidade de avanço. Esta redução ocorreu devido à menor energia específica necessária para produzir os cavacos mais espessos e ao menor tempo necessário para retificar a peça mesmo com o consumo nominal de potência maior. Conforme a equação de Kienzle *apud* König *et al.* (1997), este fato pode ser explicado pela diminuição do trabalho de corte devido ao aumento da espessura do cavaco. Quanto maior a espessura de cavaco na usinagem, menor é o trabalho para gerar o volume de cavaco e, conseqüentemente, a pressão específica de corte diminui.

A taxa média de desgaste (G_{med}) apresentou uma grande oscilação no seu comportamento, não sendo possível verificar uma tendência de comportamento na faixa de velocidades de avanço ensaiadas.

A rugosidade, em todos os ensaios, mostrou uma diminuição de seu valor ao longo do percurso retificado (na comparação do início e fim do processo de retificação, respectivamente, região de entrada e região de saída do rebolo da peça). Isto significa que ao longo dos 250 mm de percurso de retificação, os grãos do rebolo apresentam predominantemente um desgaste abrasivo, com aumento no número de gumes cinemáticos à medida que o processo de retificação estava sendo realizado. Com este comportamento observado, é possível concluir que o mecanismo de desgaste predominante nos grãos do rebolo foi de microdesgaste.

O dano térmico nos componentes retificados apenas foi verificado para a retificação com jato livre para a condição de retificação com um a velocidade de avanço de 80 mm/min. Ocorreu a total danificação da peça com queima da superfície (*grinding burn*) ao longo de praticamente todo o comprimento retificado. A queima ocorreu devido à ineficiência de lubrificação desta tubeira em prover a quantidade necessária de fluido lubrificante na zona de corte. Em todos os ensaios realizados com tubeira tipo sapata, não houve queima da superfície da peça. Mesmo quando, no último ensaio, quando a retificadora autonomamente diminuiu a velocidade de avanço, o limite tecnológico não foi definido por

dano térmico ao componente e sim pela limitação da potência disponível na retificadora. Isto significa que, para este processo de retificação *creep feed* com tubeira tipo sapata, o processo foi limitado pelo mecanismo de segurança da máquina e não por dano térmico da peça, pelo rebolo ou sistema de lubrificação.

Os resultados obtidos permitem concluir que a aplicação de uma tubeira tipo sapata é uma solução viável para o processo *creep feed* de lamelas. Além de ser viável tecnicamente, a utilização de tubeira tipo sapata trouxe ganhos econômicos para o processo. Quando utilizada a velocidade de avanço de 325 mm/min é possível reduzir o tempo de retificação em 78 %, reduzir o consumo de energia por peça em 71% e obter o aumento de produtividade total de 135%, quando considerado os tempos de troca de peças e a dressagem do rebolo.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos nesta pesquisa possibilitam algumas sugestões para trabalhos futuros. As sugestões estão relacionadas ao emprego de tubeira tipo sapata para processo retificação *creep feed* de lamelas, entre elas:

- a) Avaliar se o aumento da velocidade de corte na operação de retificação profunda de acabamento, empregando tubeiras do tipo sapata, até o limite da velocidade periférica de 34 m/s estabelecido pelo fabricante do rebolo, leva a uma lubrificação eficiente. Verificar se, além da diminuição da rugosidade, traz os benefícios de redução da energia específica verificada na retificação cilíndrica. Na operação de desbaste foi empregada a velocidade de corte de 23 m/s. Com o aumento da velocidade de corte por 50%, obtém-se um aumento do número de gumes cinemáticos e, conseqüentemente, uma diminuição da rugosidade. Se esta diminuição da rugosidade for equivalente à diminuição da rugosidade obtida para o rebolo de 120 Mash em relação ao rebolo de 90 Mash, a retificação de um conjunto de lamelas poderá ser executada em uma operação sequencial dos passes de desbaste e de acabamento, não necessitando mais a troca de rebolos atualmente necessária. O aumento da velocidade de corte também se reflete em uma diminuição dos esforços específicos sobre os gumes, permitindo uma diminuição da penetração passiva de dressamento, reduzindo assim o consumo de rebolos.
- b) Avaliar a possibilidade da redução do número de passes de desbaste e de acabamento, otimizando a taxa de retificação em cada uma das etapas.

- c) Avaliar os resultados de retificação com outros tipos de rebolo, como diferentes classes de abrasivos e diferentes granulometrias.
- d) Analisar o efeito da fenda de trabalho entre a tubeira tipo sapata e o rebolo, com o objetivo da otimização da lubrificação por sapata.
- e) Aplicar o processo de lubrificação por sapata em outras aplicações de retificação na produção.

REFERÊNCIAS

ALEXANDER, C. K; SADIKU, M. N. O. **Fundamentals of Electric Circuits**. New York: Connect Learn Succeed, 2012.

BECK, T. **Kühlschmierstoffeinsatz beim Schleifen mit CBN**, PhD Thesis at Aachen University of Technology, 2002.

BRINKSMEIER, E; HEINZEL, C; WITTMANN, M. **Friction, Cooling and Lubrication in Grinding**. Annals of the CIRP, v. 48, n.2, p. 581-597, 1999.

BRINKSMEIER, E *et al.* **Current Approaches in Design and Supply of Metal Working fluids**. Tribology Transactions, V. 52, n.5, p. 591-601, 2009.

CAMERON, A; BAUER, R; WARKENTIN, A. **An investigation of the effects of wheel-cleaning parameters in creep-feed grinding**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 50 (2010) 126–130, 2009.

DINIZ, A. E; MARCONDES, F. C; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: MM Editora, 1999.

EBBRELL, S. *et al.* **The 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.

ENGINEER, F; GUO, C; MALKIN, S. **Experimental Measurement of Fluid Flow Through the Grinding Zone**. Journal of Engineering for Industry, V. 114, p. 61-66, 1992.

GUO, C; MALKIN, S. **Analytical and Experimental Investigation of Burnout in Creep-Feed grinding**. CIRP Annals, V. 43, n. 1, p. 243-286, 1994.

GRIGORIEV, S. N. *et al.* **Creep-Feed Grinding: An Overview of Kinematics, Parameters and Effects on Process Efficiency**. Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering 60

(2014)4, 213-220. Moscow State University of Technology “Stankin”, Russian Federation, 2014.

GROOVER, P.G. **Fundamentals of Modern Manufacturing – Materials, Processes and Systems**. John Wiley & Sons, 2010.

IRANI, R. A; BAUER, R.J; WARKENTIN, A. **A review of cutting fluid application in the grinding process**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, V. 45, n. 15, p. 1696-1705, 2005.

IRANI, R. A; BAUER, R.J; WARKENTIN, A. **Development of a new cutting fluid delivery system for creepfeed grinding**. Int. J. Manufacturing Technology and Management, V. 12, n. 1/2/3, p. 108-126, 2007.

JIN, T. **Investigation of the heat partitioning in high efficiency deep grinding**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, V. 43, n. 11, p. 1129-1134, 2003.

KLOCKE, F. *et al.* **Clean Manufacturing Technologies - The Competitive Edge of Tomorrow?** Institute for Machine Tools and Production Engineering (WZL), V.1, n. 2, p. 77-86, 1998, Aachen University of Technology, Steinbachstraße , Aachen, Germany, 1998.

KLOCKE, F; BAUS, A; BECK, T. **Coolant Induced Forces in CBN High Speed Grinding with Shoe Nozzles**. Annals of the CIRP, V. 49, n. 1, p. 241-244, 2000.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 2: grinding, honing, lapping**. Berlin: Springer, 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.

KÖNIG, W; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren Drehen, Fräsen, Bohren**. Berlin – Heidelberg, 1997.

LAVINE, ADRIENNE S; MALKIN, STEPHEN. **The role of cooling in creep feed grinding**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, p. 97-111, Los Angeles, 1990.

LEE, J. *et al.* **Modern Manufacturing - Mechanical Engineering Handbook**, Ed. Frank Kreith Boca Raton: CRC Press LLC, 1999.

LOPES, Jânio Rodrigues. **Otimização do sistema de refrigeração na retificação de alta velocidade usando rebolos superabrasivos**. Orientado por Dr. -Ing. Walter Lindolfo Weingaertner. Florianópolis, 2007. 169f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa, Florianópolis, 2007.

MORGAN, M. N; JONES, Baines. **On the Coherent Length of Fluid Nozzles in Grinding**. Key Engineering Materials, V. 404, p. 61-67, Switzerland, 2009.

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

MACHADO, A. R. *et al.* **Teoria da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

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

WEBSTER, J. A. **Improving surface integrity and economics of grinding by optimum coolant application, with consideration of abrasive tool and process regime**. Journal of Engineering Manufacture, V. 221, n. 12, 2007.

WEINGAERTNER, W.; WEINGÄRTNER, E; WUNDER, S. **Influência do Sistema de alimentação de Fluido de Corte no Processo de Retificação com Rebolos de CBN.** Laboratório de Mecânica de Precisão – LMP - Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

WEINGÄRTNER, Eduardo. **Influência do Sistema de alimentação de Fluido de Corte no Processo de Retificação com Rebolos de CBN.** Orientado por Dr. -Ing. Walter Lindolfo Weingaertner. Florianópolis, 2005. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa, Florianópolis, 2005.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

GAO, Y; TSE, S; MAK, H. **An active coolant cooling system for applications in surface grinding**. Applied Thermal Engineering, V. 23, p.523-537, 2003.

JIN, T. *et al.* **Investigation on cooling efficiency of grinding fluids in deep grinding**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, V.60, p. 343-346, 2011.

KLOCKE, F. *et al.* **High-Speed Grinding – Fundamentals and State of the Art in Europe, Japan and the USA**, Annals of the CIRP, 46/2:715-724, 1997.

KLOCKE, F. *et al.* **Minimal quantity of lubrication (MQL) – Motivation, fundamentals, vistas**. Proceedings of the 12th International Colloquium Tribology – Plus, s. 929 – 942, Technische Akademie Esslingen, Esslingen, p. 11 – 12, January, 2000.

OLIVEIRA, J. F.G; SILVA, E. J; HASHIMOTO, F. **Industrial challenges in grinding**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, V. 58, p. 663-680, 2009.

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

ROWE, W.B. *et al.* **The effects on cutting fluid application methods on the grinding process**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 40, p. 209-223, 2000.

ROWE, W.B. **Thermal analysis of high efficiency deep grinding**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, V. 41, p. 1-19, 2001.

WEBSTER, J.A. *et al.* **Grinding Fluid Application System Design**. Annals of the CIRP, V.44, n.1, p.333-338, 1995..

WITTMANN, M. *et al.* **Approaches to Improve Grinding Fluid Application**. Grinding and Abrasives Magazine, p.16-22, 2002.