

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
FACULDADE DE ENGENHARIA ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**AVALIAÇÃO DA TÉCNICA DE LIMPEZA DA SUPERFÍCIE DE
CORTE DE REBOLOS NA QUALIDADE E PRODUTIVIDADE DE
UMA CÉLULA DE RETIFICAÇÃO: UM ESTUDO DE CASO EM UM
AMBIENTE DE PRODUÇÃO SERIADA**

RICARDO ROZO VAZ PEREZ

ORIENTADORA: PROF. DRA. MARIA CÉLIA DE OLIVEIRA

SANTA BÁRBARA D'OESTE / SP

2015

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA

FACULDADE DE ENGENHARIA ARQUITETURA E URBANISMO

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO SISTEMA DE LIMPEZA DE
REBOLOS NA PRODUTIVIDADE DE UMA CÉLULA DE
RETIFICAÇÃO: UM ESTUDO DE CASO EM UM AMBIENTE DE
PRODUÇÃO SERIADA**

RICARDO ROZO VAZ PEREZ

ORIENTADOR: PROF. DRA. MARIA CÉLIA DE OLIVEIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção.

SANTA BÁRBARA D'OESTE / SP

2015

Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UNIMEP
Bibliotecária: Marjory Harumi Barbosa Hito CRB-8/9128

S587a	<p>Perez, Ricardo Rozo Vaz</p> <p>Avaliação da técnica de limpeza da superfície de corte de rebolos na qualidade e produtividade de uma célula de retificação: um estudo de caso em ambiente de produção seriada / Ricardo Rozo Vaz Perez. – 2015. 100 f. : il. ; 30 cm</p> <p>Orientadora: Profa. Dra. Maria Célia de Oliveira Dissertação (mestrado) – Universidade Metodista de Piracicaba, Engenharia de Produção, Santa Bárbara d'Oeste, 2015.</p> <p>1. Rebolos. 2. Qualidade dos Produtos. I. Perez, Ricardo Rozo Vaz. II. Título.</p> <p>CDU – 621.921</p>
-------	--

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos colegas Luiz Mauricio Gonçalves Neto, Rogério Passuelo Silva, Michael Werner Bulcke e Enéias Gomes Pereira, e todos aqueles que de forma direta ou indireta colaboraram com a realização deste trabalho.

Agradeço aos colegas da Schaeffler Alemanha Andre Kuckuk e Grigory Antsupov pelas orientações e pelo material acadêmico fornecido para definição do tema deste trabalho e no apoio técnico através de discussões e transferência de conhecimento.

Agradeço a UNIMEP na pessoa do Professor Doutor André Luis Helleno pelo apoio, incentivo, orientações e amizade compartilhadas.

Agradeço a Ivã Tibano Chiorato, amigo e exemplo de profissional que esteve ao meu lado em todos os momentos desta jornada compartilhando seu tempo, sua preocupação e sua dedicação.

Agradeço a CAPES por financiar este trabalho através da bolsa de estudos.

Por fim, agradeço a minha orientadora Professora Doutora Maria Célia de Oliveira pelos ensinamentos transmitidos ao longo do curso de mestrado, pela revisão geral do trabalho e suas contribuições. Meus sinceros agradecimentos em retribuição a atenção dada a este trabalho.

PEREZ, Ricardo Rozo Vaz. **Avaliação Da Técnica De Limpeza Da Superfície de Corte De Rebolos Na Produtividade De Uma Célula De Retificação: Um estudo De Caso Em Um Ambiente De Produção Seriada.** 2016. 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste (SP).

RESUMO

Entre os processos de manufatura que agregam alto valor ao produto final destaca-se a retificação, contudo realizá-la com baixa produtividade, desperdícios de insumos e altos custos de manufatura criam um cenário negativo capaz de inviabilizar economicamente sua execução. O trabalho aqui desenvolvido buscou em fontes acadêmicas propostas que incrementassem a produtividade deste processo, a qualidade final do produto e redução de custos de produção. Entre as diversas pesquisas acadêmicas analisadas sobre o tema retificação foram identificados trabalhos sobre o desenvolvimento da técnica de limpeza da superfície de corte de rebolo. A partir de uma revisão bibliográfica detalhada foram mapeadas as potenciais vantagens desta técnica quando aplicada em ambiente de altos volumes de produção. Tendo como base os modelos e parâmetros de processo desenvolvidos por pesquisadores foi construído um protótipo de equipamento de limpeza de superfície de corte de rebolos e executados experimentos controlados em uma retificadora de mergulho, gargalo de produção pertencente a uma célula de manufatura. Através do tratamento estatístico dos dados coletados foi verificado que a técnica de limpeza de rebolos gerou melhor qualidade da peça usinada, maior produtividade do processo de retificação e redução dos custos de manufatura.

PALAVRAS-CHAVE: Retificação; Rebolo; Sistema de limpeza de rebolos; DOE.

PEREZ, Ricardo Rozo Vaz. **Avaliação Do Impacto Da Implementação do Sistema De Limpeza De Rebolos Na Produtividade De Uma Célula De Retificação: Um estudo De Caso Em Um Ambiente De Produção Seriada.** 2016. 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste (SP).

ABSTRACT

Lower productivity and higher manufacturing costs mainly related to those manufacturing processes that have high added value can create a negative scenario capable to turn a machining process in a not economically feasible process to be performed. Among the high added value machining processes existing in industry the plunge grinding is largely adopted. This work researched on the academic world for some technical proposals to increase process productivity, reduce manufacturing cost and improve piece quality that could be applicable to a high volume production floor environment. The result from this research pointed out that grinding wheel cleaning technique is a potential solution to achieve all targets. By collecting the academic knowledge it was possible to develop a prototype grinding wheel cleaning equipment specially adapted to industrial environment. Adopting cleaning process parameters developed by researches and applied them to controlled experiments and using statistical analysis tools on the collected data, was possible to confirm the real benefits of this technique on production floor in terms of better piece quality, cost reduction and higher productivity as well mapping the deviations from academic theory to the real application in production creating a bridge between academic research and application in production.

KEYWORDS: grinding; grinding wheel; wheel cleaning system; DOE.

SUMÁRIO

RESUMO	3
ABSTRACT	4
LISTA DE FIGURAS	I
LISTA DE GRÁFICOS	III
LISTA DE TABELAS	IV
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	V
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVO GERAL	5
1.1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO	6
2. REFERENCIAL TEÓRICO	8
2.1. O PROCESSO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DE Mergulho.....	8
2.2. PARÂMETROS DO PROCESSO	10
2.2.1. TEMPO DE CICLO	10
2.2.2. ROTAÇÃO DA PEÇA	14
2.2.3. VELOCIDADE DE CORTE	14
2.2.4. PROFUNDIDADE DE CORTE	15
2.2.5. TAXA DE REMOÇÃO DE MATERIAL	15
2.2.6. TAXA DE REMOÇÃO ESPECÍFICA DE MATERIAL	15
2.2.7. ESPESSURA EQUIVALENTE DE CORTE	16
2.2.8. ENERGIA ESPECÍFICA DE RETIFICAÇÃO	16
2.2.9. FORÇAS DE RETIFICAÇÃO	18
2.2.10. FATOR DE REMOÇÃO.....	18
2.2.11. TEMPO DE DRESSAGEM.....	28
2.2.12. NÚMERO DE PEÇAS RETIFICADAS POR REBOLO	28
2.2.13. PROFUNDIDADE DE DRESSAGEM	29
2.3. INFLUÊNCIA DA DRESSAGEM NA REDUÇÃO DO CUSTO DA RETIFICAÇÃO.....	29
2.4. SISTEMAS ADICIONAIS DE LIMPEZA DA SUPERFÍCIE DE CORTE DE REBOLO	30
2.5. VISÃO SISTÊMICA DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO	47
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	52
4. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	57
4.1. DESENVOLVIMENTO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	57
4.2. DEFINIÇÃO DOS OBJETOS DE ESTUDO E AS VARIÁVEIS ENVOLVIDAS	59
4.3. PROJETO E CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE LIMPEZA DE REBOLOS.....	60
4.4. PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO	74
4.5. REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	77
4.6. RESULTADOS – EMPASTAMENTO	79
4.7. RESULTADOS – ANÁLISE DO DESVIO DE CIRCULARIDADE	84
4.8. RESULTADOS – ANÁLISE DOS VALORES DE RUGOSIDADE	89
4.9. RESULTADOS – ANÁLISE DOS VALORES DE DISPERSÃO DO DIÂMETRO EXTERNO	92
4.10. RESULTADOS – VAZÃO APLICADA NOS EXPERIMENTOS.....	94
4.11. RESULTADOS – ANÁLISE DA FORMA DA PEÇA RETIFICADA.....	95
4.12. RESULTADOS – ANÁLISE DE QUEIMA DE RETÍFICA	95

4.13. RESULTADOS – ANÁLISE DO IMPACTO NA PRODUTIVIDADE.....	96
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS.....	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	98

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: PROCESSO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DE MERGULHO.	9
FIGURA 2: ELEMENTOS DA RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DE MERGULHO.	
 FONTE: MARINESCU ET AL. (2007).	10
FIGURA 3: CICLO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA – AVANÇO.	11
FIGURA 4: CICLO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA – DESBASTE.	12
FIGURA 5: CICLO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA – ACABAMENTO.	12
FIGURA 6: CICLO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA – FAISCAMENTO.	13
FIGURA 7: CICLO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA - RECUO E DRESSAGEM	14
FIGURA 8: POTÊNCIA APLICADA NA RETIFICAÇÃO.	17
FIGURA 9: MECANISMO DE REMOÇÃO DO MATERIAL.	20
FIGURA 10: DISTRIBUIÇÃO DO CALOR GERADO NA RETIFICAÇÃO.	21
FIGURA 11: TIPOS DE FRATURA DO GRÃO ABRASIVO.	22
FIGURA 12: APLICAÇÃO DE FLUIDO DE REFRIGERAÇÃO.	23
FIGURA 13: ACUMULAÇÃO DE CAVACO NOS POROS DO REBOLO.	24
FIGURA 14: ASPECTO DE UMA SUPERFÍCIE DE CORTE DO REBOLO EMPASTADA.	25
FIGURA 15: FORMAÇÃO DO EMPASTAMENTO NO REBOLO.	26
FIGURA 16: TIPOS BÁSICOS DE DRESSADORES DE REBOLO.	27
FIGURA 17: INFLUÊNCIA DA DRESSAGEM NA RETIFICAÇÃO.	30
FIGURA 18: CONCEITO GERAL DE UM BOCAL ADICIONAL DE LIMPEZA.	32
FIGURA 19: ESTRUTURA DE DO JATO DE LIMPEZA.	35
FIGURA 20: MECANISMO DE LIMPEZA REALIZADO PELAS GOTAS DO JATO.	36
FIGURA 21: DEFLEXÃO DO JATO DE LIMPEZA CAUSADO PELA BARREIRA PNEUMÁTICA.	37
FIGURA 22: POSIÇÃO DOS BOCAIS DE LIMPEZA.	39
FIGURA 23: MODELOS DE BOCAIS APLICADOS EM EXPERIMENTOS.	40
FIGURA 24: ARRANJO DO EXPERIMENTO.	41
FIGURA 25: APLICAÇÃO DE AR COMPRIMIDO EM UMA SUPERFÍCIE DE CORTE.	43
FIGURA 26: CONCEITO DE APLICAÇÃO DE AR COMPRIMIDO.	44
FIGURA 27: ELEMENTOS DE UM SISTEMA DE RETIFICAÇÃO.	48
FIGURA 28: RETIFICADORA EXTERNA DE MERGULHO AUTOMÁTICA CNC.	49
FIGURA 29: ADIÇÃO DE UM SISTEMA DE LIMPEZA DE SUPERFÍCIE DE CORTE.	49
FIGURA 30: ENTRADAS, SAÍDAS PRODUTIVAS E NÃO PRODUTIVAS.	51
FIGURA 31: CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.	52
FIGURA 32: O MÉTODO DE PESQUISA.	54
FIGURA 33: SISTEMA DE BOMBEAMENTO E FILTRAGEM.	63
FIGURA 34: VISTA LATERAL E VISTA FRONTAL DO EQUIPAMENTO.	64
FIGURA 35: POSICIONAMENTO DO BOCAL DE LIMPEZA NA RETIFICADORA.	65
FIGURA 36: VISÃO FRONTAL (A) E VISÃO LATERAL (B) DO EQUIPAMENTO.	66
FIGURA 37: MEDIDOR DE VAZÃO INSTALADO NA SAÍDA DO EQUIPAMENTO.	67
FIGURA 38: SISTEMA DE LIMPEZA DE REBOLOS INSTALADO NA RETIFICADORA.	67
FIGURA 39: AMOSTRAS PARA EXPERIMENTOS.	68
FIGURA 40: EQUIPAMENTOS DE CONTROLE E MEDIÇÃO.	71
FIGURA 41: FLUXOGRAMA VALIDAÇÃO DO INTERVALO DE DRESSAGEM.	73

FIGURA 42: MATRIZ DE EXPERIMENTOS.....	74
FIGURA 43: REGISTRO VISUAL ATRAVÉS DE MICROSCÓPIO PORTÁTIL.	76
FIGURA 44: PREPARAÇÃO DAS CORRIDAS APÓS EXPERIMENTOS.....	77
FIGURA 45: FLUXOGRAMA EXPERIMENTO SEM APLICAÇÃO DE LIMPEZA DE REBOLO.....	78
FIGURA 46: FLUXOGRAMA EXPERIMENTOS COM LIMPEZA DE REBOLO.....	78
FIGURA 47: SUPERFÍCIE DO REBOLO (0MPa).	79
FIGURA 48: SUPERFÍCIE DO REBOLO (1,0 MPa E 0°).....	80
FIGURA 49: SUPERFÍCIE DO REBOLO (1,0 MPa E 30°).....	80
FIGURA 50: SUPERFÍCIE DO REBOLO (1,5 MPa E 0°).....	81
FIGURA 51: SUPERFÍCIE DO REBOLO (1,5 MPa E 30°).....	81
FIGURA 52: SUPERFÍCIE DO REBOLO (2,0 MPa E 0°).....	82
FIGURA 53: SUPERFÍCIE DO REBOLO (2,0 MPa E 30 °).....	82
FIGURA 54: SUPERFÍCIE DO REBOLO (2,5 MPa E 0 °).....	83
FIGURA 55: SUPERFÍCIE DO REBOLO (2,5 MPa E 30 °).....	83
FIGURA 56: ESTRUTURA DAS AMOSTRAS.	95

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: TESTE DE COMPARAÇÃO MÚLTIPLA DOS VALORES DE CIRCULARIDADE.	84
GRÁFICO 2: VALORES DOS DESVIOS DE CIRCULARIDADE EM FUNÇÃO DA PRESSÃO.	85
GRÁFICO 3: DESVIO DE CIRCULARIDADE - INCLINAÇÃO DO BOCAL = 0 °.....	86
GRÁFICO 4: DESVIO DE CIRCULARIDADE - INCLINAÇÃO DO BOCAL = 30 °.....	86
GRÁFICO 5: INTERAÇÃO ENTRE PRESSÃO E ÂNGULO DO JATO.....	87
GRÁFICO 6: EFEITO DA PRESSÃO E DO ÂNGULO NA CIRCULARIDADE.....	88
GRÁFICO 7: DESVIO DE CIRCULARIDADE EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DO JATO.	88
GRÁFICO 8: TESTE DE COMPARAÇÃO MÚLTIPLA DOS VALORES DE RUGOSIDADE.....	89
GRÁFICO 9: VALORES DE RUGOSIDADE EM FUNÇÃO DA PRESSÃO.	90
GRÁFICO 10: VALORES DE RUGOSIDADE EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DO JATO.	90
GRÁFICO 11: VALORES DE RUGOSIDADE COM INCLINAÇÃO DO JATO EM 0°.....	91
GRÁFICO 12: VALORES DE RUGOSIDADE COM INCLINAÇÃO DO JATO EM 30 °.....	91
GRÁFICO 14: VARIAÇÃO DE DIÂMETRO COM INCLINAÇÃO DO JATO EM 0°.....	93
GRÁFICO 15: VARIAÇÃO DE DIÂMETRO COM INCLINAÇÃO DO JATO EM 30°.	93
GRÁFICO 16: RELAÇÃO ENTRE VARIAÇÃO DO DIÂMETRO, PRESSÃO E ÂNGULO.....	94

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: PROPRIEDADE DOS ÓLEOS REFRIGERANTES.....	42
TABELA 2: BASE PARA DEFINIÇÃO TÉCNICA DO EQUIPAMENTO DE LIMPEZA.....	61
TABELA 3: DADOS BOCAL DE LIMPEZA UTILIZADO NOS EXPERIMENTOS.....	65
TABELA 4: PARÂMETROS DE RETIFICAÇÃO DOS EXPERIMENTOS COM LIMPEZA.	72
TABELA 5: QUADRO RESUMO DOS EXPERIMENTOS.....	75
TABELA 6: VAZÕES E PRESSÕES APLICADAS NOS EXPERIMENTOS.....	95
TABELA 7: RESULTADOS DA ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA.	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a	Profundidade de corte gerada pelo rebolo de corte.
ad	Profundidade de dressagem
AISI	American Iron and Steel Institute
ANOVA	Análise de variância
b	Largura de contato do rebolo com a peça.
bs	Largura do rebolo
cf	Velocidade da onda de choque gerada pelo jato de limpeza
CNC	Comando Numérico Computadorizado
d _{max}	Diâmetro máximo do rebolo
d _{min}	Diâmetro Mínimo do rebolo
D _s	Diâmetro do rebolo de corte.
dw	Diâmetro da peça retificada.
D1	Posição de avanço do Rebolo 1 (primeira etapa da retificação)
D2	Posição de avanço do Rebolo 2 (segunda etapa da retificação).
D3	Posição de avanço do Rebolo 3 (terceira etapa da retificação).
E _c	Energia específica de retificação.
Fr	Força de Retificação.
F _n	Componente normal da força de retificação
F _t	Componente tangencial da força de retificação
G	Fator de remoção de material.
he _q	Espessura equivalente de corte.
ld	Quantidade de dressagens.

l_p	Lote de peças retificadas
L_z	Largura da superfície atingida pelo jato de fluido
n_d	Numero de passes de dressagem.
N_p	Número de peças retificadas.
n_s	velocidade de corte do rebolo
n_w	rotação da peça retificada
P	Potência de retificação.
P_{cl}	Grau de eficiência de limpeza.
P_{nl}	Potência livre do rebolo.
P_f	Potência requerida para retificação.
p_g	Pressão de limpeza gerado pela onda de choque do fluido.
p_r	Carga exercida na superfície do rebolo pelo jato de limpeza.
p_s	Pressão de estagnação do jato de limpeza.
q_{fr}	Calor transportado pelo fluido de refrigeração.
q_{pu}	Calor gerado pela peça usinada.
q_{rc}	Calor gerado pela ruptura do cavaco.
q_{rp}	Calor gerado entre o rebolo e a peça.
q_t	Calor total gerado pelo processo de retificação
Q_w	Taxa de remoção de material.
Q_w'	Taxa específica de remoção de material.
r_s	Desgaste radial do rebolo por peça.
SOD do rebolo.	Stand Off Distance distância entre o bocal e a superfície de corte
t_c	Tempo de ciclo de retificação.
t_d	Tempo de dressagem.

t_p	Intervalo de tempo utilizado para retificar um lote de peças.
T_1	Tempo de avanço de retificação (primeira etapa da retificação).
T_2	Tempo de avanço de retificação (segunda etapa da retificação).
T_3	Tempo de acabamento de retificação (terceira etapa da retificação).
T_4	Tempo de faiscamento de retificação (quarta etapa da retificação).
T_5	Tempo de retorno e dressagem (quinta etapa da retificação).
v_c	Velocidade de corte do rebolo
V_d	Avanço de dressagem.
V_f	Avanço de retificação do rebolo de corte.
V_{f1}	Avanço de retificação do rebolo de corte (primeira etapa da retificação).
V_{f2}	Avanço de retificação do rebolo de corte (segunda etapa da retificação).
V_{f3}	Avanço de retificação de acabamento (terceira etapa da retificação).
v_j	Velocidade do jato de limpeza.
V_{mr}	Volume de material removido na retificação.
V_{rr}	Volume de rebolo gasto por peça retificada.
d	Fator de retificação.
df	Densidade do fluido de limpeza.

1. INTRODUÇÃO

A competitividade de um produto está diretamente associada a sua capacidade de concorrer com similares em custo e qualidade sendo ambos determinados pelo processo produtivo adotado, contudo baixa produtividade, desperdícios na produção e ausência da qualidade desejada influenciam negativamente este poder de competição. Eliminar desperdícios e aumentar a produtividade tem sido foco dos gestores de produção, os quais buscam incessantemente ações de racionalização e otimização capazes de identificar e suprimir todo ato ou procedimento de fabricação que não agrega valor ao produto final. Dentre os processos de manufatura mais relevantes para as empresas de transformação, a retificação é um dos mais importantes quanto a adição de valor ao produto, pois sua relevância reside no fato de definir a qualidade e o custo da peça, (Tawakoli, Hadad e Sadeghi 2010).

Marinescu *et al.* (2007), definem retificação como a usinagem de materiais que utiliza uma ou mais ferramentas abrasivas fabricadas a partir de grãos minerais ou sintéticos cuja forma é caracterizada por possuir arestas de corte que colocadas em contato com superfície da peça a altas velocidades rotacionais e submetidas a aplicação de uma força externa produzem a remoção do material gerando a forma e textura superficial da peça desejadas.

Uma das características do processo de retificação é o apresentar um maior custo de manufatura quando comparado a outros processos de usinagem, porém trata-se de um processo vital para muitos de componentes de precisão que exigem superfícies com restritas tolerâncias dimensionais e de forma. (Nguyen e Zang, 2003).

Koether *et al.* (2012), esclarecem que para atingir o grau desejado de qualidade, o processo de retificação é necessário a utilização de máquinas caras e altamente produtivas, ferramentais específicos e dispositivos especiais. Estes requisitos impactam diretamente na formação do custo total de

manufatura pois afetam negativamente o custo fixo, o qual é composto pelo investimento em máquina, ferramental, dispositivos, infraestrutura e mão de obra indireta.

Ainda segundo Koether *et al.* (2012), para que um processo de retificação seja tecnicamente e economicamente viável devem ser atendidas as seguintes condições: (i) atingir a qualidade dimensional, a precisão de forma especificada e a textura superficial desejadas para a peça, (ii) sua execução deve ser economicamente justificável quando analisados os custos fixo e variável, (iii) ser possível valorizar corretamente estes custos de maneira a auxiliar na tomada de decisão pela empresa se este processo deve ser feito internamente ou ser comprado como serviço externo.

As empresas continuamente buscam ações de redução de custo e aumento da produtividade, significando produzir o volume requerido no menor tempo possível, com o melhor uso do capital investido e otimizando tempos de usinagens. Contudo apenas otimizar tempos de usinagem para produzir peças mais rapidamente não é condição suficiente para tornar um processo de retificação economicamente viável, deve-se também minimizar as perdas do processo representadas pelos denominados desperdícios existentes na produção. Desperdício é todo ato ou procedimento que não possa ser aproveitável e que impacta negativamente na agregação de valor final da peça, pois uma vez que os custos associados a estes desperdícios são adicionados ao custo final do produto torna maior seu preço de venda e menor a margem de lucro, tornando este produto menos atrativo aos olhos do mercado consumidor e sua fabricação economicamente não viável. Exemplos de desperdícios são encontrados nos tempos não produtivos existentes no processo, gerados por paradas de máquina devido a quebras ou para ajustes do ferramental provocando uma baixa utilização do capital investido em máquinas e equipamentos. Gastos além do planejado com consumo de rebolos e outros insumos são também exemplos de desperdício num processo de retificação na produção. Aumentar a capacidade tecnológica e a competitividade tem impulsionado os pesquisadores a estudar os fenômenos

que regem os mecanismos existentes no processo de retificação. Inúmeros são os trabalhos que apresentam propostas de soluções inovadoras para indústria. Alguns exemplos desta contribuição são apresentados a seguir.

Kopac e Krajnik, (2006), organizaram uma revisão teórica sobre os mecanismos presentes no processo de retificação cilíndrica externa contribuindo para o aumento da produtividade e da atual demanda por qualidade da indústria automobilística. A revisão literária mostrou que maiores valores de velocidade de corte são fundamentais para obter uma melhor qualidade da peça usinada, maior vida útil do rebolo e maior produtividade do processo, porém sob o ponto de vista econômico a rigidez da retificadora é o fator de maior impacto para a qualidade da peça sendo portanto mandatário o investimento em máquinas sofisticadas de maior custo de compra.

Com relação aos insumos, Morgan *et al.* (2008), desenvolveram um experimento para determinar a quantidade ideal de fluido de refrigeração para a remoção adequada do calor durante o processo de remoção de metal gerado pelo contato do rebolo contra a superfície retificada da peça. A determinação da correta quantidade de fluido representa tanto uma redução do desperdício deste insumo como uma ação benéfica ao meio ambiente.

Wegener *et al.* (2011), mapearam as várias técnicas de dressagem de rebolo utilizados na indústria determinando a melhor performance econômica. O resultado final apresentado numa matriz de penetração de uso pelas indústrias das diferentes tecnologias existentes permitindo aos autores propor futuros temas de pesquisa com alto potencial de impacto benéfico para produção.

Uma linha de pesquisa analisada com maior interesse nos últimos dez anos tem se dedicado ao estudo do desenvolvimento de processos adicionais de limpeza da superfície de corte do rebolo através da aplicação de fluido ou gases pressurizados que aplicados em forma jato possuem o poder de remover micro partículas metálicas oriundas da peça usinada que se alojam nos poros existentes entre os grãos abrasivos do rebolo provocando uma perda prematura do poder de corte do rebolo, gerando peças com dimensional

incorreto, obrigando a uma redução dos parâmetros de retificação causando perda da produtividade e a necessidade de efetuar com maior frequência a limpeza da superfície de corte do rebolo através da execução de dressagens, que diminuem a vida útil do rebolo e aumentam gastos com compras não programadas de rebolo para reposições . A revisão da literatura, dos últimos dez anos apresentou trabalhos que avaliaram os diferentes mecanismos atuantes no processo de limpeza da superfície de corte do rebolo gerando assim um maior entendimento do tema bem, como dos benefícios gerados para o processo de retificação. Contudo não foram localizados trabalhos que tivessem como foco a análise da performance deste processo quando aplicado em um processo de retificação cilíndrica de mergulho com velocidade de corte de 80 m/s, empregada para retificação de peças em ambiente de alto volume de produção.

A proposta deste trabalho, foi de desenvolver um equipamento protótipo de limpeza de superfície de corte de rebolos cuja concepção técnica fosse baseada nas configurações dos trabalhos publicados em *Journals* representativos adaptando o conhecimento acadêmico existente para as condições reais de um ambiente de produção seriada de alto volume determinando o impacto na qualidade da peça produzida, na produtividade do processo de retificação e nos custos de manufatura

A próxima seção apresenta o objetivo deste estudo no contexto ora considerado.

1.1. OBJETIVO GERAL

Aplicar a técnica de limpeza da superfície de corte de rebolo através do emprego de jatos de emulsão pressurizados em um processo de retificação cilíndrica externa de mergulho com velocidade periférica de 80 m/s, pertencente a uma célula de manufatura de alto volume de produção de anéis de rolamento utilizados pela indústria automobilística, determinando deste modo o impacto na produtividade do processo, na qualidade da peça produzida e nos custos de fabricação. A realização deste objetivo foi baseada na revisão da literatura sobre o tema permitindo a criação de um conceito de equipamento protótipo de limpeza aplicável a um ambiente de alto volume de produção com especificação de suas principais características técnicas como campo de aplicação, capacidade de filtragem, bocais de limpeza, campo de regulagem pressão do jato, ângulo e distância dos bocais de limpeza até a superfície de corte do rebolo e parâmetros do processo de limpeza. O equipamento foi submetido a testes prévios de validação para comprovar sua funcionalidade. A revisão da literatura auxiliou na definição das variáveis de entrada, os fatores de resposta dos experimentos, na definição da matriz de experimentos na criação de uma metodologia para execução dos experimentos, coleta de dados e análise de resultados.

1.1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Criar o conceito e construir um equipamento protótipo de limpeza de superfície de corte de rebolo com a aplicação de jatos pressurizados de emulsão filtrada aplicado a uma retífica cilíndrica externa de mergulho com velocidade de corte de 80 m/s. O conceito será de definido a partir das propostas apresentadas nos trabalhos acadêmicos adaptando-as para as condições existentes na produção. Ao final do trabalho foi avaliada a performance do equipamento quanto sua capacidade de limpar a superfície do rebolo.

2. Determinar a eficiência da técnica de remoção de partículas sólidas e contaminantes alojados entre os grãos abrasivos da superfície de corte de rebolo de maneira a manter a superfície de corte do rebolo com alto poder de remoção de material para uma quantidade maior que de peças retificadas hoje tradicionalmente adotado pela indústria.
3. Através da execução de experimentos controlados, a partir de uma matriz de experimentos, determinar o efeito da aplicação desta técnica nos parâmetros de qualidade da peça e na produtividade do processo de retificação do diâmetro externo de anel externo de rolamento utilizado na indústria automobilística. Utilizando parâmetros de processo mais agressivos do que os utilizados pela produção serão verificadas as seguintes características da peça usinada: (i) variação do diâmetro externo; (ii) circularidade e forma; (iii) rugosidade superficial; (iv) estrutura da peça. Para produtividade e custos serão analisados (a) tempo de ciclo; (b) intervalo de dressagem; (c) redução de tempos mortos; (d) custo/hora do operador (e) custos relacionados ao rebolo utilizado.
4. Uma vez comprovados os impactos na qualidade e na produtividade do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho será determinado o resultado econômico final quantificando ganhos obtidos com o a aplicação de limpeza adicional de superfície de corte de rebolo.

1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em seis capítulos, conforme detalhado a seguir.

Capítulo 1 – Introdução – Este Capítulo apresenta a contextualização do estudo aqui desenvolvido, com os respectivos objetivos geral e específicos. Além disso, este Capítulo apresenta a justificativa para o desenvolvimento do estudo.

Capítulo 2 – Referencial Teórico – O referencial teórico é um Capítulo que apresenta as questões teóricas sobre a teoria de retificação cilíndrica externa de mergulho, o conceito de sistema de retificação e a teoria e trabalhos sobre limpeza da superfície de corte de rebolos. Este referencial teórico foi a base para o desenvolvimento do estudo.

Capítulo 3 – Procedimentos Metodológicos – Este Capítulo apresenta a caracterização da pesquisa e os procedimentos que foram desenvolvidos para que o objetivo deste estudo seja alcançado.

Capítulo 4 – Desenvolvimento – Neste Capítulo estão descritos e apresentados os resultados de cada uma das etapas propostas no Capítulo 3 como método da pesquisa.

Capítulo 5 – Conclusão – Aqui estão apresentadas as conclusões que respondem aos objetivos geral e específicos definidos para o estudo. Além das conclusões, este Capítulo apresenta as sugestões para os trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este Capítulo apresenta o referencial teórico necessário para o desenvolvimento deste trabalho. Para a construção deste referencial teórico foram realizadas pesquisas em artigos científicos e livros relevantes sobre o tema. Dividido em três partes sendo a primeira parte dedicada a apresentação dos conceitos teóricos dos fundamentais existentes na retificação externa cilíndrica de mergulho e a descrição dos mecanismos que geram o empastamento da superfície de corte do rebolo. Este conteúdo é necessário para o entendimento dos resultados dos experimentos executados neste trabalho. A segunda parte apresenta um resumo dos trabalhos acadêmicos permitindo a compreensão do estado da arte da tecnologia aplicada viabilizando configurar o equipamento de limpeza bem como definir os fatores e variáveis dos experimentos. A terceira parte apresenta o conceito de retificação sob o ponto de vista de um sistema produtivo apresentando uma visão geral, possibilitando uma melhor compreensão do impacto da tecnologia na produtividade da célula de manufatura.

2.1. O PROCESSO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DE MERGULHO

A retificação é o processo de usinagem abrasiva caracterizado pela remoção de material da peça, feita por meio da ação conjunta de grãos abrasivos, que possuem arestas de corte afiadas, que mantidos unidos através de um material adesivo chamado liga compõe a ferramenta de retificação denominada rebolo (Kopac e Krajnk, 2006)

Diniz, Marcondes e Coppini (2008), explicam que a retificação cilíndrica externa de mergulho é uma modalidade de retificação na qual um ou mais rebolos avançam perpendicularmente em direção da superfície ou diferentes superfícies da peça a serem retificadas. Esta operação é caracterizada pelo fato de não haver movimento de translação do rebolo em relação a superfície da peça.

Marinescu *et al.* (2007), definem o termo retificação cilíndrica externa como o processo de retificação de uma superfície externa na qual a peça gira em torno do seu centro. Este processo é aplicável a peças cuja superfície retificada possui um diâmetro externo reto ou angular ou em degraus, possuidoras de rosca, ou de um perfil complexo. A Figura 1 apresenta visão geral deste processo.



FIGURA 1: PROCESSO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DE MERGULHO.

FONTE: PRÓPRIO AUTOR (2015).

A Figura 2 apresenta esquematicamente a retificação cilíndrica externa de mergulho e seus principais elementos onde são apresentados o rebolo que é a ferramenta abrasiva constituída de grãos minerais ou sintéticos, a peça cuja superfície será retificada, as velocidades do rebolo e da peça, o avanço de retificação que determina a velocidade na qual o rebolo penetrará na peça, a profundidade de corte que define a quantidade de material que será retirada da peça pelo processo e as forças normal e tangencial que promovem a remoção do material da peça.

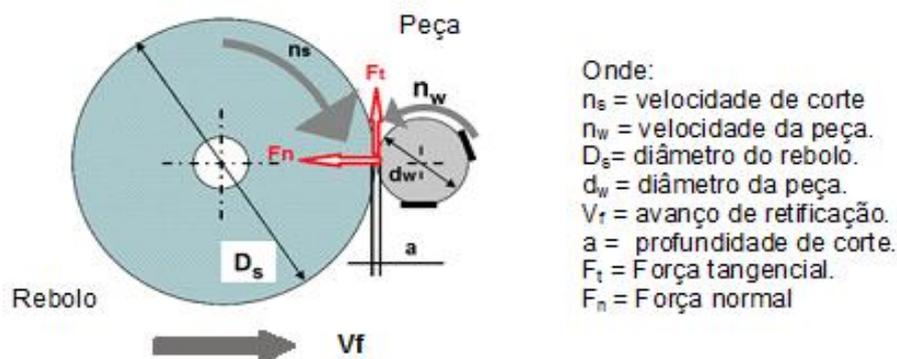


FIGURA 2: ELEMENTOS DA RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA DE MERGULHO.

FONTE: MARINESCU ET AL. (2007).

2.2. PARÂMETROS DO PROCESSO

De acordo com Marinescu *et al.* (2007), a importância da compreensão dos parâmetros do processo de retificação externa de mergulho, reside no fato destes influenciarem a produtividade e a qualidade da peça retificada. Sob esta ótica os principais parâmetros de um processo são.

2.2.1. TEMPO DE CICLO

Tempo de ciclo é definido como o tempo total para retificar uma única peça. Quando um lote de peças (l_p), é retificado num intervalo de tempo (t_p), então o tempo de ciclo é definido pela Equação (1):

Equação (1)

$$t_c = \frac{t_p}{l_p} (s)$$

O tempo de ciclo de retificação cilíndrica de mergulho para uma peça é resultado da soma dos tempos de diferentes etapas que ocorrem durante o processo. O conjunto destas etapas é o principal fator que define a estratégia de retificação e com isto o tempo de ciclo total de retificação. O processo de retificação têm início com o rebolo, girando livremente sem tocar a peça

posicionado no ponto origem do processo quando então é iniciado um movimento de aproximação até a peça denominado avanço rápido de aproximação até a posição D1, com num intervalo de tempo (T_1). O valor do avanço rápido adotado (V_{f1}), deve ser o maior possível pois esta etapa não agrega valor a peça devido a não ocorrer remoção de material. A Figura 3 apresenta esquematicamente esta etapa. Nesta etapa o tempo de ciclo é igual ao tempo de avanço T_1 .

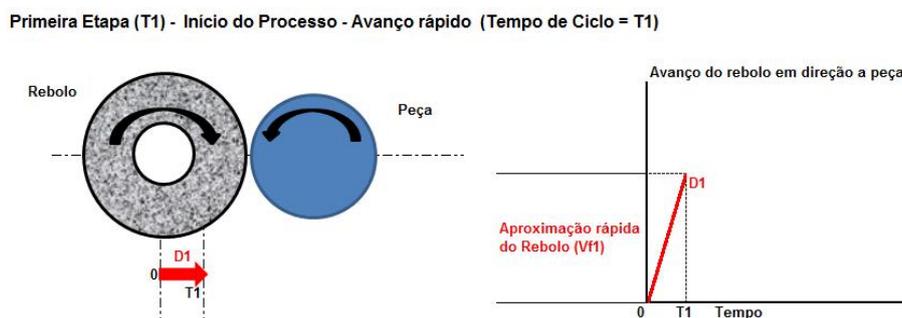


FIGURA 3: CICLO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA – AVANÇO.

FONTE: PRÓPRIO AUTOR (2015).

Na segunda etapa, a superfície de corte do rebolo avança em direção a peça com avanço denominado de desbaste (V_{f2}) até uma distância muito próxima do rebolo (D_2). Usualmente é adotado nesta etapa um valor menor para o avanço de modo a garantir que não ocorram deformações na superfície do rebolo. Surgem as forças retificação normal (F_n) e tangencial (F_t), iniciando o processo de remoção de material através da elástica e plástica do material da peça. Inicia-se a formação do cavaco. O tempo de ciclo até esta etapa é a soma dos tempos T_1 e T_2 , conforme apresentado na Figura 4.

Segunda Etapa (T2) - Remoção de Material Desbaste (Tempo de Ciclo = T1+T2)

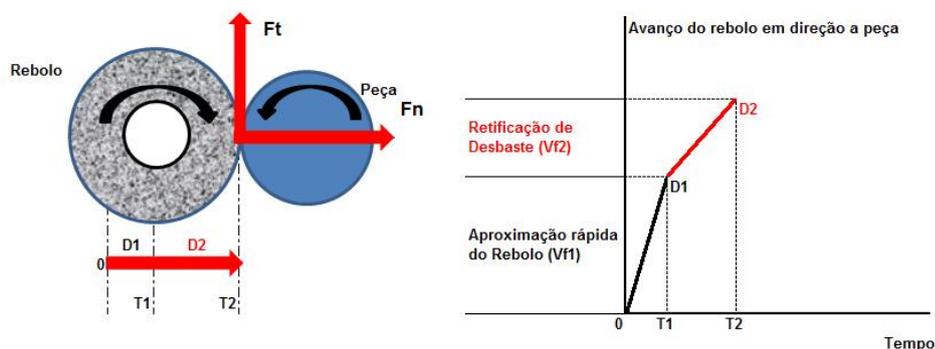


FIGURA 4: CICLO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA – DESBASTE.

FONTA: PRÓPRIO AUTOR (2015).

Na terceira etapa boa parte da profundidade de corte (a) já foi gerada, através da ação dos grãos da superfície de corte do rebolo que estão em contato com a peça é iniciado a fase de retificação de acabamento da superfície retificada. A intensidade das forças tangencial e normal é reduzida, o avanço adotado é denominado avanço de acabamento ($Vf3$), é nesta etapa que a forma final e a textura superficial da peça são definidas. O tempo de ciclo passa a ser a soma de $T1$, $T2$ e $T3$. A Figura 5 ilustra esta etapa.

Terceira Etapa (T3) - Remoção de Material Acabamento (Tempo de Ciclo = T1+T2+T3)

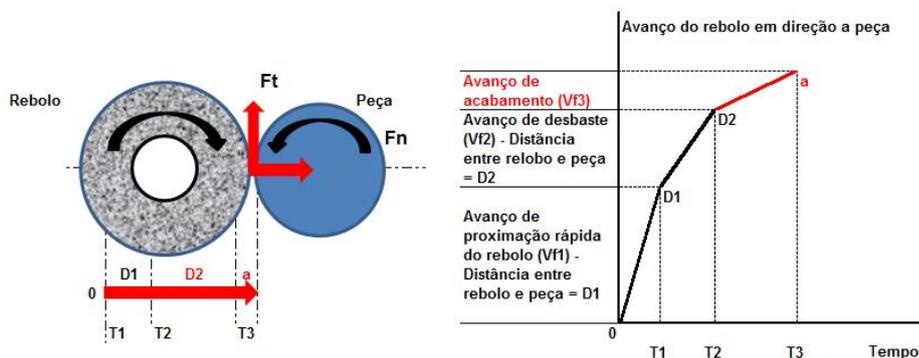


FIGURA 5: CICLO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA – ACABAMENTO.

FONTA: PRÓPRIO AUTOR (2015).

Na quarta etapa após a profundidade de corte (a) ter sido atingida o movimento de avanço do rebolo em direção a peça ($Vf3$) é zerado iniciando assim uma fase denominada faiscamento da superfície da peça retificada definindo sua qualidade cuja duração ($T4$), é maior que as das etapas anteriores devido a necessidade de corrigir deformações na peça geradas durante a segunda e terceira etapas do ciclo. O tempo de ciclo passa a ser a soma dos tempos $T1$, $T2$, $T3$ e $T4$. A Figura 6 apresenta esta etapa. A distância percorrida pelo rebolo é a soma das distâncias $D1$, $D2$ e a profundidade de corte (a). Neste ponto a geração de calor é reduzida, não havendo presença das forças normal e tangencial o cavaco formado e despreendido é retirado da zona de retificação pela ação do fluido de refrigeração.

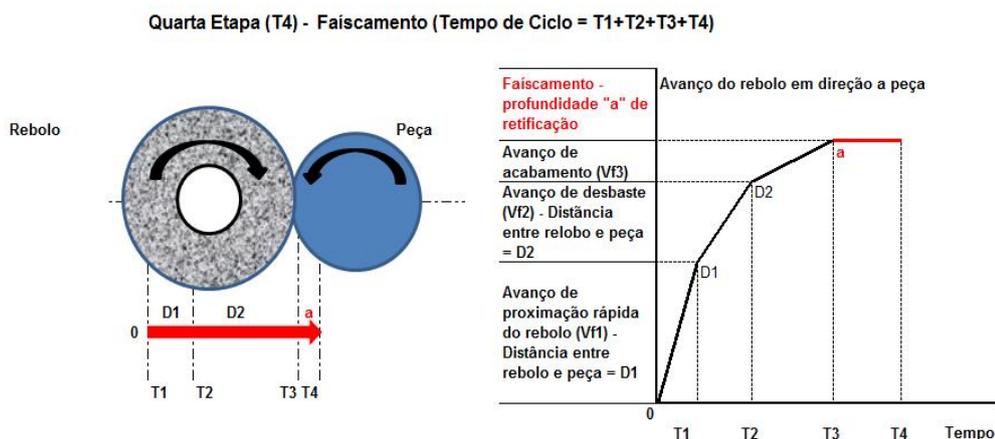


FIGURA 6: CICLO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA – FAISCAMENTO.

FORTE: PRÓPRIO AUTOR (2015).

Na quinta etapa é realizado o retorno do rebolo a uma nova posição original zero que considera uma compensação na posição devido ao desgaste radial do rebolo. Este retorno é executado com o tempo ($T5$). Após o recuo é iniciado o processo de limpeza e reafiação da superfície de corte do rebolo. Esta operação recebe a denominação de dressagem do rebolo. O tempo de dressagem não é considerado na cálculo do tempo de ciclo pois não é produtivo. O tempo ciclo (t_c) é determinado pela soma dos tempos $T1$, $T2$, $T3$,

T4 e T5. Após realizada esta etapa o processo é reiniciado com a retificação de uma nova peça. A Figura 7 apresenta a configuração final de um ciclo de retificação completo de uma peça para o processo de cilíndrico de mergulho.

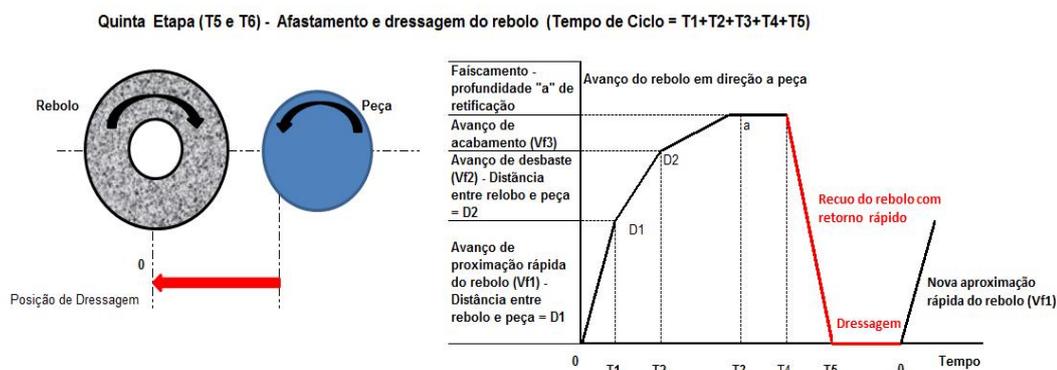


FIGURA 7: CICLO DE RETIFICAÇÃO CILÍNDRICA EXTERNA - RECUO E DRESSAGEM

FONTE: PRÓPRIO AUTOR (2015).

2.2.2. ROTAÇÃO DA PEÇA

Rotação da peça é o termo aplicado na retificação cilíndrica que informa a velocidade da peça que está sendo retificada em rpm, sendo calculada pela Equação (2).

Equação (2)

$$n_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \text{ (rpm)}$$

2.2.3. VELOCIDADE DE CORTE

É medida em metros por segundo (m/s) e indica a velocidade na qual o rebolo gira. De acordo com Jackson e Robinson, (2007), maiores a velocidades de rotação periférica do rebolo geram menor desgaste da superfície de corte resultando em melhor a qualidade final da peça.

2.2.4. PROFUNDIDADE DE CORTE

De acordo com Rowe (2009), é a profundidade de material removido da peça em função do avanço por rotação do rebolo (V_f) expressa em (mm/min), sem considerar variações dimensionais devido o aquecimento da peça nem o feito do desgaste do rebolo. Para a retificação cilíndrica a profundidade de corte é pela Equação (3). Para a retificação em mergulho considera-se o valor da profundidade de corte o valor do avanço do rebolo por rotação da peça.

Equação (3)

$$a = \frac{\pi \cdot d_w \cdot V_f}{n_w} \text{ (mm/min)}$$

2.2.5. TAXA DE REMOÇÃO DE MATERIAL

Marinescu *et al.* (2007), explicam que este parâmetro informa a taxa de remoção de material da peça considerando a largura de contato do rebolo (b) multiplicada pelo avanço (V_f) e diâmetro da peça (d_w), sendo sua unidade expressa em volume de material removido por tempo (mm^3/min), representada pela Equação (4).

Equação (4)

$$Q_w = \pi \cdot d_w \cdot V_f \cdot b \text{ (mm}^3/\text{min)}$$

2.2.6. TAXA DE REMOÇÃO ESPECÍFICA DE MATERIAL

De acordo com Marinescu *et al.* (2007), a taxa específica de remoção de material permite determinar a eficiência da remoção de material desconsiderando a largura da superfície efetiva de trabalho do rebolo (b), criando um cálculo mais prático para avaliação da produtividade do processo

de retificação. A Equação 5 apresenta este cálculo expresso em ($\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{min}$).

Equação (5)

$$Q_w' = \pi \cdot d_w \cdot V_f \text{ (mm}^3 \text{ /mm}\cdot\text{min)}$$

2.2.7. ESPESSURA EQUIVALENTE DE CORTE

Este parâmetro define a espessura do material removido pelo rebolo. Conforme Rowe (2009), a profundidade do material removido da peça possui um valor maior que do que a espessura do cavaco gerado. Porém se fosse possível remover este material em forma de uma lâmina este apresentaria uma espessura denominada de espessura equivalente h_{eq} , apresentada pela equação 6 e definida pela relação da taxa de remoção específica Q_w' pela velocidade de corte (n_s), expressa em (mm).

Equação (6)

$$h_{eq} = \frac{Q_w'}{n_s} \text{ (mm)}$$

2.2.8. ENERGIA ESPECÍFICA DE RETIFICAÇÃO

Este parâmetro segundo Rowe (2009), fornece uma medida do poder de corte do rebolo já que a energia necessária para retificar uma peça depende diretamente do rebolo possuir uma superfície de corte afiada e da usinabilidade do material. Este valor é obtido pela razão entre a potência de retificação (P) e a taxa de remoção do material Q_w expressa em J/mm^3 , indicada na equação (7).

Equação (7)

$$E_c = \frac{P}{Q_w} \text{ (J/mm}^3\text{)}$$

O valor da potência de retificação (P), pode ser obtido através da leitura direta da potência aplicada pelo fuso principal durante o ciclo de retificação. A Figura 8 apresenta graficamente este processo.

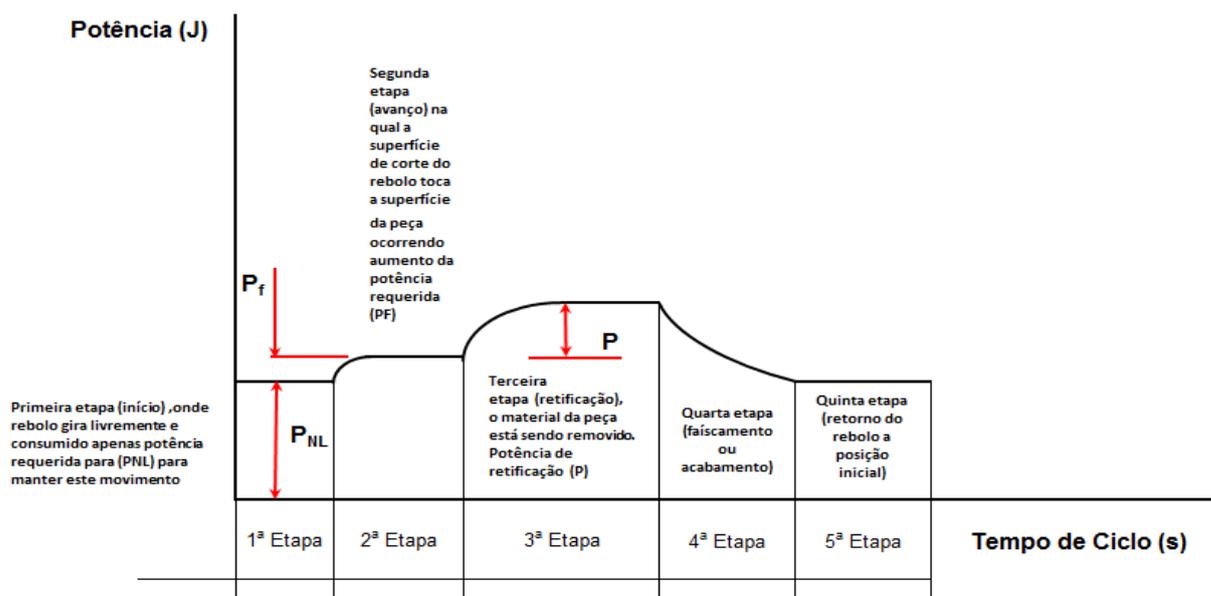


FIGURA 8: POTÊNCIA APLICADA NA RETIFICAÇÃO.

FONTE: ROWE (2009).

De acordo com Rowe (2009), na primeira etapa do processo de retificação o rebolo gira livremente sem tocar a superfície da peça gerando uma potência livre do rebolo (P_{nl}). Na segunda etapa ocorre o avanço do rebolo e a aproximação da superfície de corte do rebolo até a superfície da peça ocorrendo nesse momento um aumento na dissipação de energia atingindo valor (P_f), denominado potência requerida e ao iniciar-se a terceira etapa ocorre o processo de remoção de material da peça, atingindo a potência de retificação (P). A etapa quatro ocorre o final do processo com a execução do acabamento superficial há queda acentuada da potência requerida. A quinta etapa é destinada ao retorno do rebolo a sua posição inicial.

2.2.9. FORÇAS DE RETIFICAÇÃO

Conforme Rowe (2009), a força de retificação é a responsável pela remoção de material da peça. Na retificação externa cilíndrica a força de retificação (F_r), pode ser decomposta em duas componentes denominadas tangencial (F_t) e normal (F_n). O cálculo da força tangencial é função da potência de retificação (P) e da velocidade de corte do rebolo (ns), a Equação 8 apresenta o cálculo sendo a unidade utilizada para esta grandeza Newton (N).

Equação (8) (8)

$$F_t = \frac{P \cdot 1000}{ns} (N)$$

O cálculo da força tangencial (F_t), é apresentado pela Equação 9, onde ∂ é o fator de retificação.

Equação (9)

$$F_n = \frac{P \cdot 1000}{ns \cdot \partial} (N)$$

2.2.10. FATOR DE REMOÇÃO

Rowe (2009), o fator de remoção (G), mede a capacidade do rebolo em remover o material da peça. Um rebolo com alta capacidade de remoção de material é aquele capaz de manter seu poder de remover material da peça por um maior tempo e simultaneamente apresentar um pequeno desgaste radial. A Equação 10 mostra que o fator é obtido pela relação entre o volume de material removido da peça (V_{mr}), pelo volume de rebolo gasto (V_{rr}). Valores de G baixos, próximos indicam que o rebolo não possui dureza suficiente para remover o material da peça. Altos valores de G indicam que o rebolo possui uma dureza acima do ideal não sendo indicado para o material que está sendo retificado.

(Equação 10)

$$G = \frac{Vmr}{Vrr}$$

O conhecimento destes parâmetros permite apresentar os mecanismos presentes num típico processo de retificação.

De acordo com Kopac e Krajnik, (2006), os mecanismos de remoção de material gerados por um rebolo e que atuam na peça são o resultado de uma ação conjunta dos grãos abrasivos, possuidores de extremidades pontiagudas denominadas arestas de corte que ao entrarem em contato com o material a ser removido e submetidos a um determinado avanço (v_t) e velocidade de corte (v_c), antecipadamente definidos pelo operador da retificadora, geram uma força de retificação (F_r), capaz de promover o desprendimento de material da peça criando o denominado de cavaco o qual é removido da zona de retificação pela ação do fluido refrigerante. Este processo é baseado no fenômeno da abrasão devido ao fato dos grãos do rebolo possuem uma dureza maior que a dureza superficial da peça usinada. Os grãos abrasivos do rebolo devem ser termicamente e quimicamente estáveis para suportar o calor gerado pela abrasão não permitindo que ocorram reações químicas indesejadas quando da presença simultânea de ar, fluido de refrigeração e calor. A Figura 9 ilustra este processo e suas etapas.

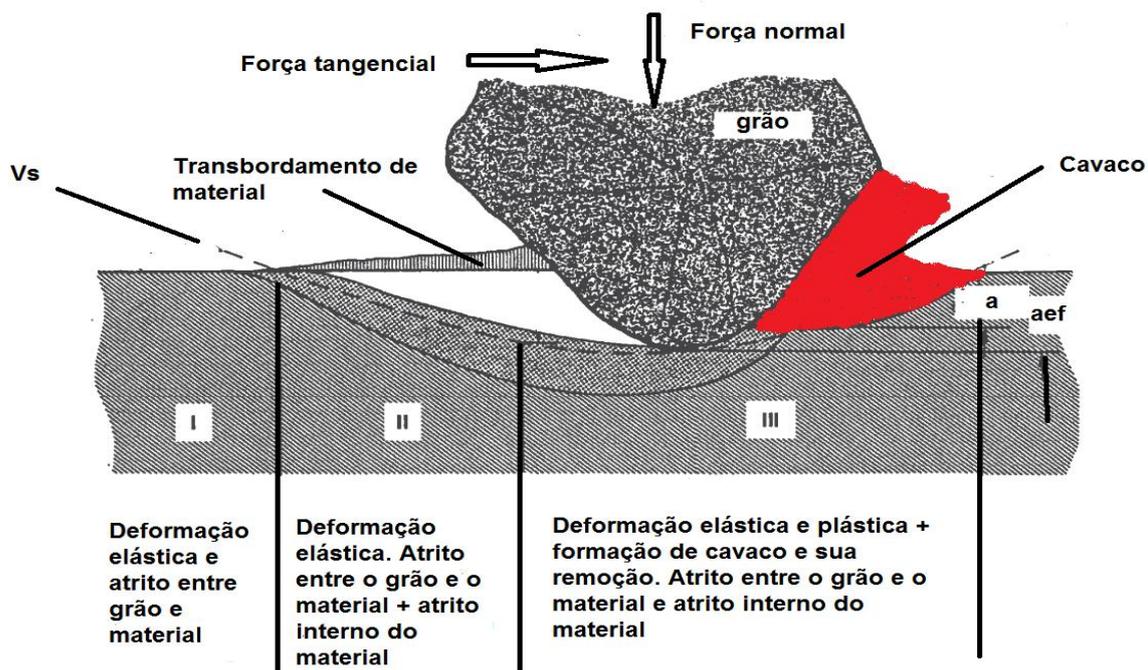


FIGURA 9: MECANISMO DE REMOÇÃO DO MATERIAL.

FONTE: KOPAC E KRAJNIK (2006).

O processo de remoção do material da peça e a conseqüente formação do cavaco é realizada em três zonas distintas. Na primeira zona ocorre a deformação elástica onde o material é empurrado pelo grão abrasivo sem que haja sua ruptura da peça. Na segunda zona, denominada fase elástica onde o material continua sendo empurrado pelo grão, porém tem início um processo de ruptura deste material e uma quantidade menor transborda lateralmente em relação ao grão e a maior parte flui em direção da terceira zona. Na terceira zona ocorre a formação total do cavaco e seu rompimento da peça. Conforme Klocke e König, (2005), a maior parte da energia empregada neste processo é transformada em calor, ilustrado na Figura 10, sendo a quantidade total de calor (q_t), é a soma do calor gerado na zona de contato entre o rebolo e a peça (q_{rp}), com o calor gerado pela peça usinada (q_{pu}), o calor gerado pela ruptura do cavaco (q_{rc}) e o calor transportado pelo fluido de refrigeração (q_{fr}), apresentado na Equação (11).

Equação (11)

$$q_t = q_{rp} + q_{pu} + q_{rc} + q_{fr}$$

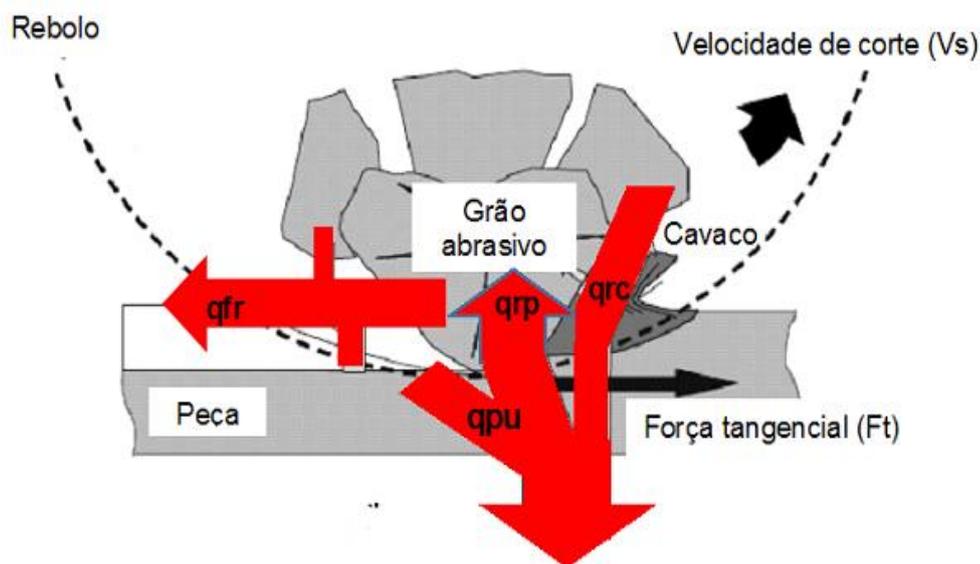


FIGURA 10: DISTRIBUIÇÃO DO CALOR GERADO NA RETIFICAÇÃO.

FONTE: KLOCKE E KÖNIG (2005).

De acordo com Rowe (2009), o desgaste sofrido pelas grãos abrasivos durante a retificação é classificado em quatro modalidades. A primeira é a micro ruptura que em si é benéfica para o processo de refitificação pois ao romper-se novas arestas de corte afiadas são formadas recuperando assim o poder de remoção do material. A segunda é o denominado desgaste por alisamento. Este fenômeno ocorre quando o grão escorrega sobre a superfície da peça sem que ocorra a remoção do material, não ocasionando a sua quebra mas gerando um alisamento da aresta de corte tornando-a incapaz de remover material. O terceiro tipo de desgaste é o da fratura da liga aglutinante que mantém os grãos unidos entre si. Neste caso, com a quebra da liga ocorre um despreendimento do grão da superfície do rebolo que não pode ser recuperado. A macro ruptura é a quarta modalidade de desgaste e ocorre devido a quebra da estrutura cristalina do grão provocada pela intensidade da força de retificação ao qual está submetido. A Figura 11 ilustra estes desgastes.

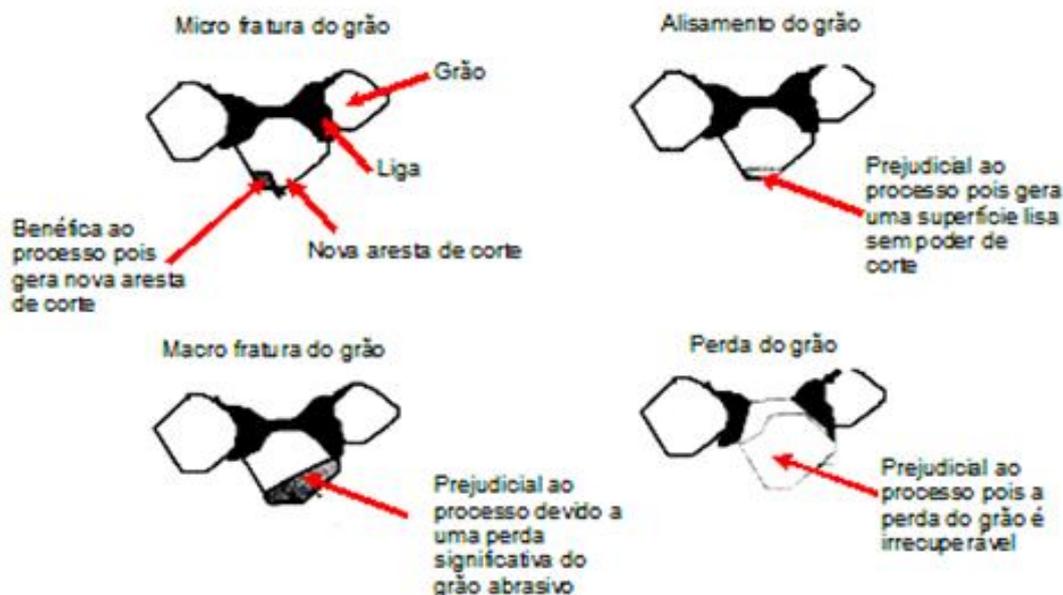


FIGURA 11: TIPOS DE FRATURA DO GRÃO ABRASIVO.

FONTE: ROWE (2009).

De acordo Marinescu *et al.* (2007), para amenizar o impacto térmico e químico do processo de abrasão entre o grão e a peça deve ser utilizado fluido refrigerante cujas principais funções são a da refrigeração da zona de retificação retirando calor da peça, lubrificação entre o grão e a superfície da peça facilitando a remoção de material superficial da peça e protegendo a superfície retificada do processo de oxidação reduzindo o desgaste do rebolo. Uma função secundária do fluido é a de transportar o cavaco gerado para longe da zona de retificação. A Figura 12 adaptada de Tawakoli, Hadad e Sadeghi (2010), ilustra a aplicação do fluido de retificação.

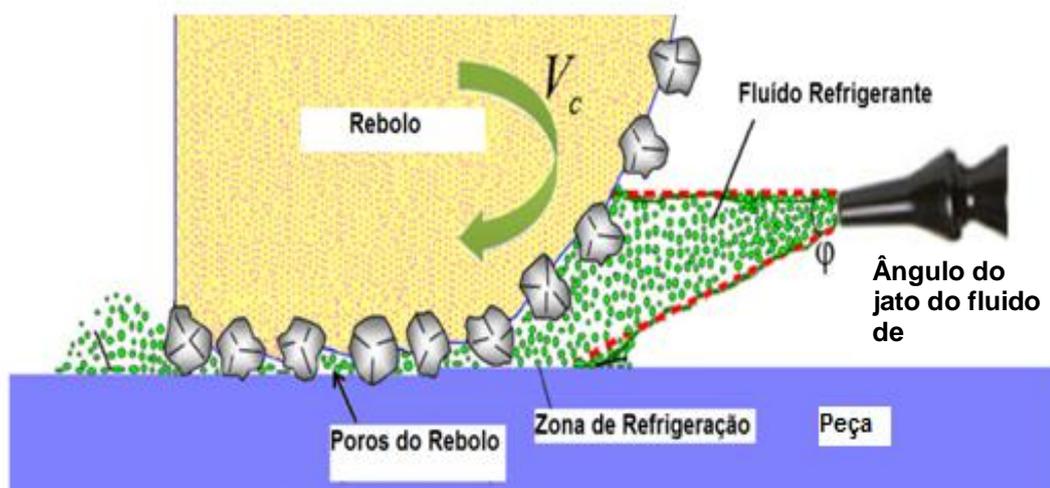


FIGURA 12: APLICAÇÃO DE FLUIDO DE REFRIGERAÇÃO.

FONTE: TAWAKOLI, HADAD E SADEGHI (2010).

A aplicação do fluido refrigerante é realizada com o uso de um bocal cuja função é o de guiar o jato o mais próximo da zona de retificação. Uma vez que o fluido tenha sido injetado pelo bocal sobre a superfície de corte do rebolo, este é transportado através dos poros existentes entre os grãos abrasivos até a zona de retificação. As principais características de um bocal que influenciam no desempenho de refrigeração são: (i) o projeto que deve ser adequado a modalidade de retificação executada, (ii) seu perfil deve permitir acesso o mais próximo possível a zona de retificação, (iii) permitir o correto alinhamento do o jato, (iv) dever ser dimensionado de maneira a aplicar a quantidade correta de fluido garantindo a eficiência da refrigeração. Para que o fluido de refrigeração cumpra a missão de remover da zona de retificação o cavaco formado é fundamental que os poros existentes entre os grãos do rebolo permaneçam livres, permitindo o armazenamento e transporte do fluido. A porosidade do rebolo em conjunto com uma aplicação correta de fluido refrigerante mantém baixas as temperaturas geradas na remoção de material retardando o desgaste da superfície de corte do rebolo, permitindo adoção de remoção de material (Q_w), otimizadas aumentando a produtividade do processo de retificação. Porém os poros existentes entre os grãos da superfície de corte do rebolo são

espaços onde os cavacos, se não corretamente removidos pelo fluido de refrigeração, se alojam prejudicando o processo de remoção de material e dando origem ao chamado empastamento do rebolo. A Figura 13 ilustra a formação do cavaco e a alocação nos poros do rebolo.

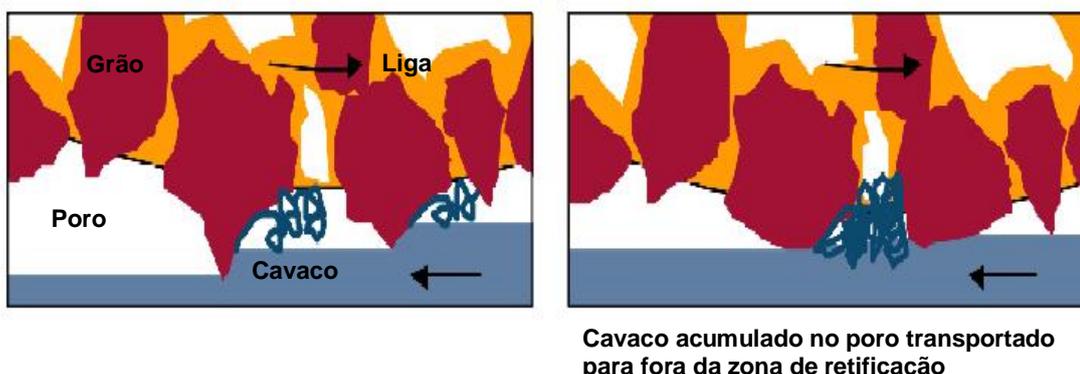


FIGURA 13: ACUMULAÇÃO DE CAVACO NOS POROS DO REBOLO.

FORTE: PRÓPRIO AUTOR (2015).

Quando o cavaco não é retirado dos poros pelo fluido refrigerante, este é transportado pelo rebolo repetidamente até a zona de retificação onde é novamente submetido novamente a força normal (F_n) e tangencial (F_t) e ao calor produzido pelo atrito do grão e a peça (q_t), resultando no surgimento do chamado empastamento de rebolo que se caracteriza pela união entre rebolo e partícula metálica. De acordo com Heinzl e Anstusupov (2012), o empastamento provoca uma queda dramática do poder de corte do rebolo aumentando o valor da força total de retificação (F_r), necessária para remover material da peça e as temperaturas geradas, diminuindo a produtividade e aumentando o risco de dano térmico para a peça. A Figura 14 apresenta uma superfície empastada.

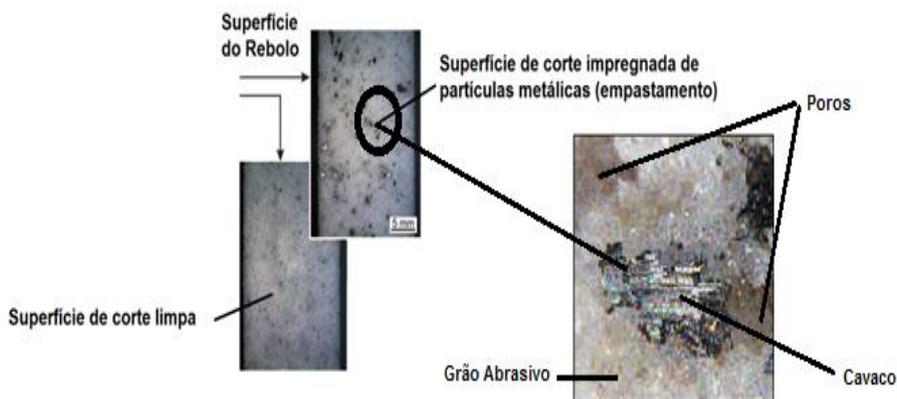


FIGURA 14: ASPECTO DE UMA SUPERFÍCIE DE CORTE DO REBOLO EMPASTADA.

FONTE: HEINZEL E ANTUSUPOV (2012).

O empastamento também provoca a perda do perfil do rebolo levando a erros de forma na peça acabada. De acordo com Gift, Wojciech e Force II (2004), o surgimento do empastamento ocorre em seis etapas classificadas como : (a) inicia-se quando o grão sofre um alisamento gerando a adesão do cavaco na sua lateral, (b) em seguida devido a ausência de uma aresta afiada de corte do grão o material removido da peça inicia uma migração para a superfície lisa do grão, (c) na terceira etapa o material inicia um deslocamento para o grão adjacente, (d) a movimentação do material cria uma interligação entre os grãos adjacentes, (e) material removido continua seu movimento de deslizamento em direção a lateral do grão adjacente cobrindo o poro existente entre esses grãos, (f) a não remoção deste material pelo fluido de refrigeração permite a adesão deste material com o rebolo criando uma superfície lisa com baixo poder de corte e remoção de material induzindo a um aumento da força de retificação necessária para obtenção da superfície retificada desejada. A Figura 15 ilustra esse mecanismo.

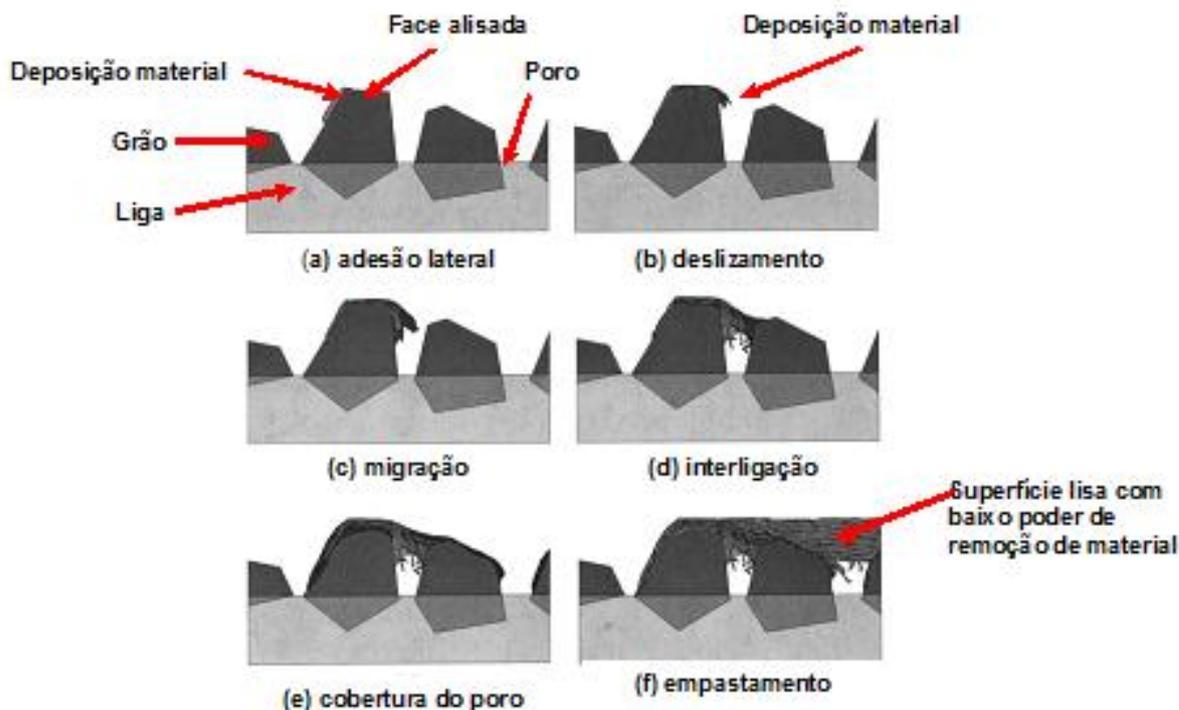


FIGURA 15: FORMAÇÃO DO EMPASTAMENTO NO REBOLO.

FONTE : GRIFT *ET AL...*(2004).

Adibi, Rezaei e Sarhan (2013), realizaram experimentos com o intuito de quantificar o valor do empastamento. No experimentos ficou comprovado a relação entre o empastamento com o aumento da quantidade de energia para necessária para retificação (E_c) e aumento temperatura na zona de retificação (q_t), reduzindo a vida útil do rebolo afetando negativamente a produtividade do processo de retificação devido a maior necessidade limpar a superfície de corte do rebolo contaminada com partículas metálicas. Este efeito negativo é maior quando da usinagem de materiais com durezas superficiais maiores que exigem maiores valores de força de retificação e produzem maiores temperaturas gerando potenciais danos térmicos para peça.

Para Danesh, Jandaghi e Tawaloki. (2014), a eficiência da remoção de material pelo rebolo e o seu perfil só podem ser recuperados através da

execução da denominada dressagem da superfície de corte do rebolo que remove mecanicamente as partículas metálicas aderidas da sua superfície através do uso de uma ferramenta diamantada denominada dressador. que remove uma espessura pré determinada da superfície do rebolo recuperando o poder de corte e seu perfil.

Wegener *et al.* (2011), afirmam que a dressagem é necessária para restaurar a micro geometria do rebolo neste processo grãos desgastados são substituídos por novos grãos das camadas mais profundas do rebolo com arestas de corte afiadas.

De acordo com Klocke e König, (2005), a dressagem pode ser realizada com dressadores fixos ou rotativos dependendo do modelo de retificadora utilizado e do perfil desejado da peça retificada. A Figura 16 ilustra o conceito básico destas ferramentas.

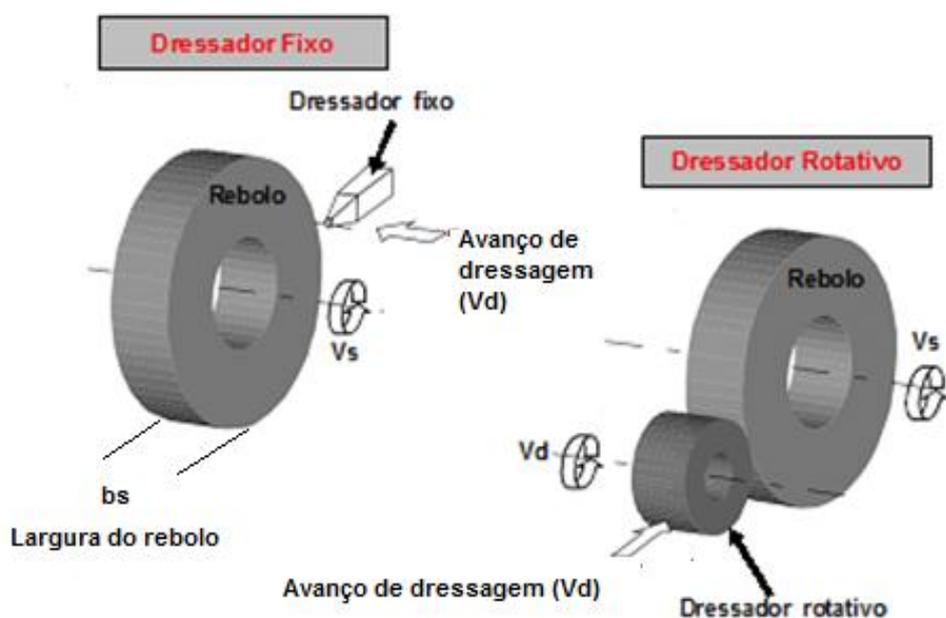


FIGURA 16: TIPOS BÁSICOS DE DRESSADORES DE REBOLO.

FONTE: ADAPTADO DE KLOCKE ET AL...(2005).

De acordo com Rowe (2009) a frequência na qual um rebolo deve ser dressado é em função do tipo de grão abrasivo utilizado, dos parâmetros de retificação definidos e da qualidade da peça desejada. Para peças muito largas ou com um valor alto de material a ser removido é necessário realizar mais do que uma dressagem, ocasionando um aumento do tempo não produtivo de retificação. Frequentes dressagens aumentam a necessidade de troca prematura do rebolo e assim como troca do próprio dressador utilizado devido a seu desgaste, reduzindo o número de peças produzidas por estas duas ferramentas. Os parâmetros utilizados que definem o processo de dressagem são:

2.2.11. TEMPO DE DRESSAGEM

Segundo Marinescu *et al.* (2007), o tempo de dressagem é expresso em segundos e calculado considerando a largura do rebolo (b_s), o número de vezes (passes) (n_d) que o dressador percorrerá sobre a superfície de corte do rebolo até que ela esteja limpa e o avanço de dressagem (V_d). A Equação 12 apresenta o cálculo.

Equação (12)

$$td = \frac{bs \cdot nd}{Vd} (s)$$

2.2.12. NÚMERO DE PEÇAS RETIFICADAS POR REBOLO

Para Marinescu *et al.* (2007), a quantidade de peças retificadas por um rebolo depende diretamente do número de vezes que o rebolo é dressado até atingir o menor diâmetro de uso sem haver a possibilidade de ruptura da sua estrutura gerando riscos para a integridade física do operador e para segurança da retificadora. O cálculo leva em consideração o diâmetro inicial máximo do rebolo (d_{max}), o diâmetro final mínimo do rebolo (d_{min}), o desgaste radial do rebolo por peça (r_s), a profundidade de dressagem (a_d) e o número de dressagens (l_d), é apresentado na Equação 13.

Equação (13)

$$Np = \left[\frac{dmáx - dmin}{rs + ad.l d} \right] . Id (peças)$$

2.2.13. PROFUNDIDADE DE DRESSAGEM

A profundidade de dressagem deve ser suficiente para garantir que toda a superfície de corte gasta seja removida permitindo surgir uma nova superfície de corte formada por grãos com arestas de corte vivas. A profundidade da dressagem para rebolos de óxido de alumínio é de 30 μm , porém superfícies a ocorrência do empastamento faz necessário, dependendo do seu grau, remover camadas do rebolo de espessuras maiores. Rowe (2009)

2.3. INFLUÊNCIA DA DRESSAGEM NA REDUÇÃO DO CUSTO DA RETIFICAÇÃO

De acordo com Rowe (2009), são três os objetivos, que um processo de retificação deve atender: (i) seu custo de execução deve ser economicamente viável, (ii) atingir a qualidade desejada para a peça e (iii) ter alta produtividade. A análise dos custos de retificação leva em consideração: (i) fatores de entrada, (ii) parâmetros de retificação e (iii) saídas produtivas. A Figura 17 exibe os três requerimentos e sua relação com o processo de dressagem.

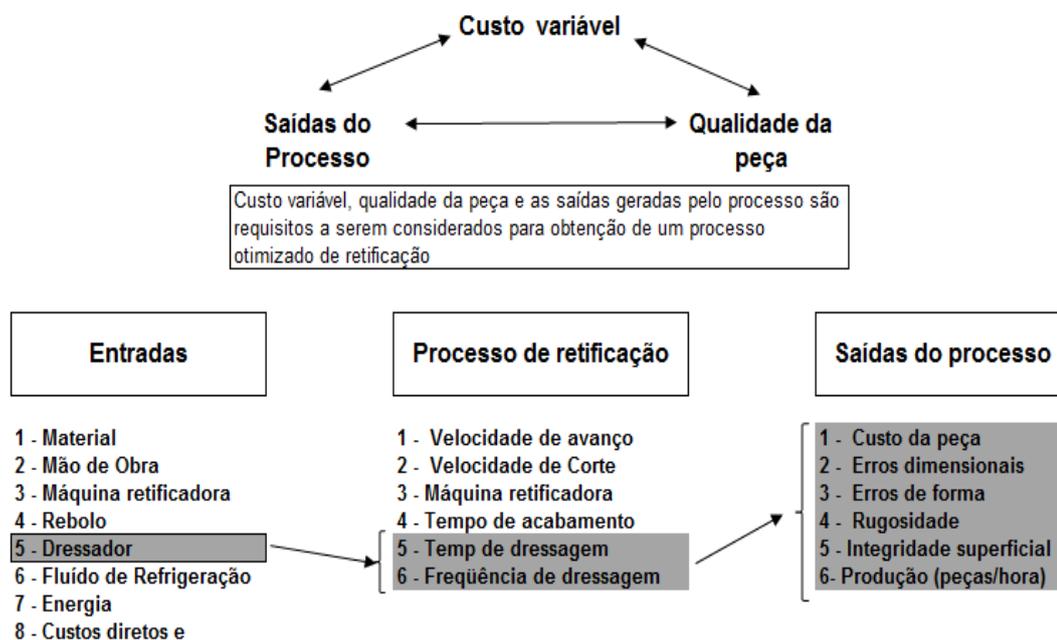


FIGURA 17: INFLUÊNCIA DA DRESSAGEM NA RETIFICAÇÃO.

FONTE: ROWE (2009).

A Figura 17 mostra que a dressagem do rebolo é um fator de entrada que deve ser analisado devido ao alto custo de aquisição do dressador, composto de diamantes naturais ou industriais. No processo de retificação a influência negativa da dressagem na produtividade reside no fato de necessitar de um tempo de execução considerado não produtivo e diminuir a vida útil do rebolo, porém a não execução da dressagem no intervalo correto, ou a sua execução incorreta afeta a qualidade final da peça, rugosidade, circularidade, forma, dimensional, integridade superficial.

2.4. SISTEMAS ADICIONAIS DE LIMPEZA DA SUPERFÍCIE DE CORTE DE REBOLO

Conforme Khubodin e Unyanin. (2008), as propriedades de corte de um rebolo se deterioram a medida que ocorre o empastamento da sua superfície de corte. Este fenômeno é considerado pelo autor como inevitável, porém alguns métodos de dressagem podem ser usados para recuperar a superfície de corte.

Estes métodos são, (i) por ação hidráulica através da aplicação de jatos pressurizados, (ii) por ação mecânica com uso de ferramentas fixas ou rotativas; (iii) cavitação hidrodinâmica, (iv) pela aplicação de campo magnético, (v) pela aplicação de lubrificação forçada através do interior do rebolo. Os métodos mais promissores para aplicação na indústria são o da ação mecânica com utilização de ferramentas fixas ou rotativas e da limpeza hidráulica. A aplicação destes métodos exige o desenvolvimento de sistemas adicionais específicos projetados para o tipo de modalidade de processo de retificação utilizado.

Conforme Rowe (2009), a utilização de sistemas adicionais de limpeza de rebolo podem auxiliar a na otimização do processo de dressagem reduzindo a frequência da sua execução e conseqüentemente reduzindo custos de produção com a diminuição de tempos não produtivos, com uma menor consumo de rebolo e menor desgaste do dressador. Pelo fato da grande maioria dos processos de retificação utilizarem emulsão ou óleo para refrigeração da zona de retificação este recurso também pode ser usado para limpar a superfície de corte do rebolo. A aplicação é feita através da instalação de um bocal adicional cuja função é posicionar o jato de fluido aplicado na superfície de corte do rebolo limitada a uma pressão máxima de 100 bar, sendo nesta situação o jato de fluido possui a capacidade de não só auxiliar na refrigeração adicional da zona de retificação como também promover uma limpeza da superfície do rebolo. A Figura 18 expõe o conceito geral desta proposta. Deve-se escolher uma posição de instalação do bico adicional de limpeza longe da zona de retificação para garantir que toda a superfície de corte do rebolo seja atingida pelo jato e permitindo a remoção do cavaco aderido e seu transporte para o sistema de filtragem.

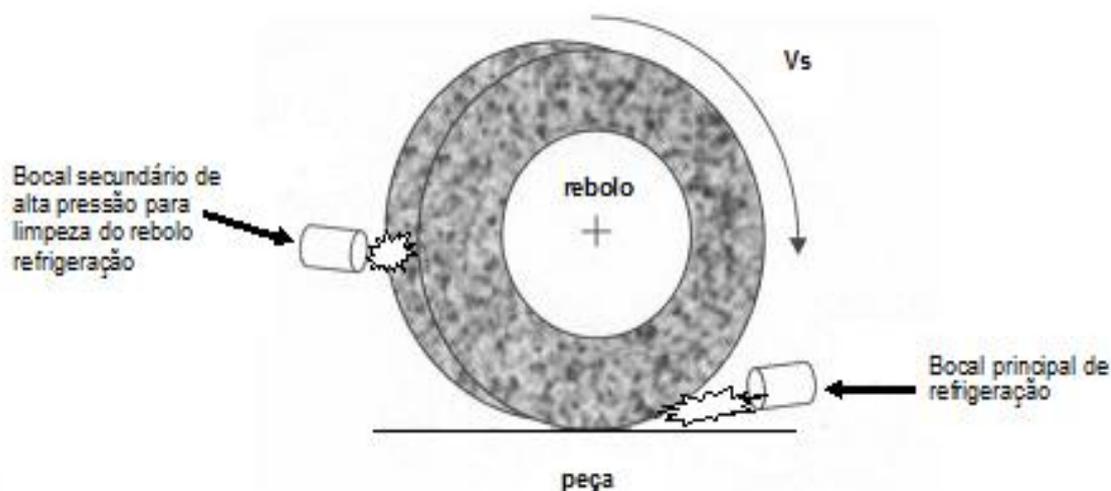


FIGURA 18: CONCEITO GERAL DE UM BOCAL ADICIONAL DE LIMPEZA.

FONTE: ROWE (2009).

Sinot, Chevrier e Padilla. (2006), afirmam que a qualidade da limpeza da superfície de corte do rebolo é melhor quando é utilizado como meio de limpeza o fluido de refrigeração, pois ocorre uma lavagem dos poros do rebolo removendo as partículas metálicas aderidas.

Nguyen e Zang. (2003), estudaram a aplicação de nitrogênio como fluido de limpeza, porém os resultados obtidos não foram satisfatórios.

Cameron *et al.* (2010), afirmam que apesar da literatura indicar o alto potencial benéfico da técnica de limpeza da superfície de corte de rebolo ainda são necessárias mais pesquisas sobre o assunto com a utilização de diferentes parâmetros de limpeza e diferentes tipos de rebolo.

Oliveira *et al.* (2012), analisaram aplicação de ar comprimido, ao invés de fluido refrigerante, para efetuar a limpeza dos poros da superfície de corte do rebolo não somente para reduzir a ocorrência de empastamento mas como uma ferramenta de apoio à viabilização da aplicação da técnica da mínima quantidade de refrigerante na zona de retificação.

Adibi, Reazai e Sarhan. (2013), estudaram a influência do projeto do bocal de geração do jato pressurizado, relacionado com a distância entre o início da formação do jato até a superfície de corte do rebolo, sua direção, vazão e velocidade avaliando a qualidade da limpeza obtida.

Barros *et al.* (2014), analisaram o uso de uma bastão de teflon como ferramenta mecânica adicional de limpeza da superfície de corte do rebolo em substituição ao fluido de refrigeração. A motivação deste estudo está associada ao alto custo do fluido e sua necessidade de um cuidadoso manuseio de maneira a não por em risco o operador e o meio ambiente.

A utilização de do fluido de refrigeração como elemento de limpeza tem sua justificativa nas propriedades técnicas e vantagens adicionais que esta solução fornece.

Monici *et al.* (2006), realizam uma análise de diferentes formas de aplicação de fluido refrigeração utilizados em retificação de mergulho. De acordo com o estudo o fluido refrigerante devido a sua característica lubrificante possui o poder de expulsar as partículas metálicas alojadas nos poros do rebolo com isto diminuindo a ocorrência do empastamento. O fluido de refrigeração classificado como emulsão é composto por óleo diluído em água cuja concentração varia entre 2,0% a 15,0%. A quantidade de concentração do óleo determina a capacidade de lubrificação aplicada no rebolo.

Sobre aplicação do fluido refrigeração para limpeza da superfície de rebolo, os principais trabalhos analisados a partir do ano de 2005 foram:

Heinzel e Antusupov (2012), descrevem os mecanismos da colisão laminar das gotas de um jato de fluido a alta velocidade contra uma superfície sólida. Através da aplicação da equação de Bernoulli, a pressão de estagnação (p_s) da partícula líquida é calculada pela Equação 14, considerando a densidade do fluido (δ_f) e a velocidade do jato (v_j).

Equação (14)

$$p_s = \frac{1}{2} \cdot \delta_f \cdot v_j^2 \text{ (bar)}$$

A interação do jato com o ar ambiente leva a formação de gotas na chamada zona de transição. Cada gota ao chocar-se com a superfície de corte do rebolo produz internamente uma onda de choque devido a sua compressibilidade. Esta onda propaga-se dentro da gota a uma velocidade (c_f) equivalente a 1500 m/s, gerando uma pressão (p_g), e com ela um efeito denominado de efeito martelo com duração de milésimos de segundo. Na zona final as gotas sofrem uma transformação para micro gotas atingindo velocidade até dez vezes maiores da gota original aumentando o poder de remoção de material da superfície de corte do rebolo podendo até danificá-la por erosão. A carga exercida na superfície de corte do rebolo (p_r) pode ser determinada utilizando a equação de Cook (15).

Equação (15)

$$p_r = \delta_f \cdot c_f \cdot v_j \text{ (bar)}$$

Adibi, Rezai e Sarhan. (2013), analisaram a estrutura do jato de fluido a alta pressão e a influência da distância entre o bocal de limpeza e a superfície de corte do rebolo. A maior taxa de remoção de sujeira é obtida quando aplicada uma determinada pressão numa correspondente distancia de equilíbrio (SOD). Distâncias maiores o ou menores que a distância de equilíbrio provocam uma redução da taxa de remoção de sujeira. A razão para este resultado é o fato que a complexa dinâmica da gota resultante da interação entre fluido e o ar em combinação que em conjunto com as turbulências do jato fazem que o maior efeito de remoção de material de um específico bocal seja obtido na zona ampla de difusão. A Figura 19 ilustra a estrutura do jato de limpeza.

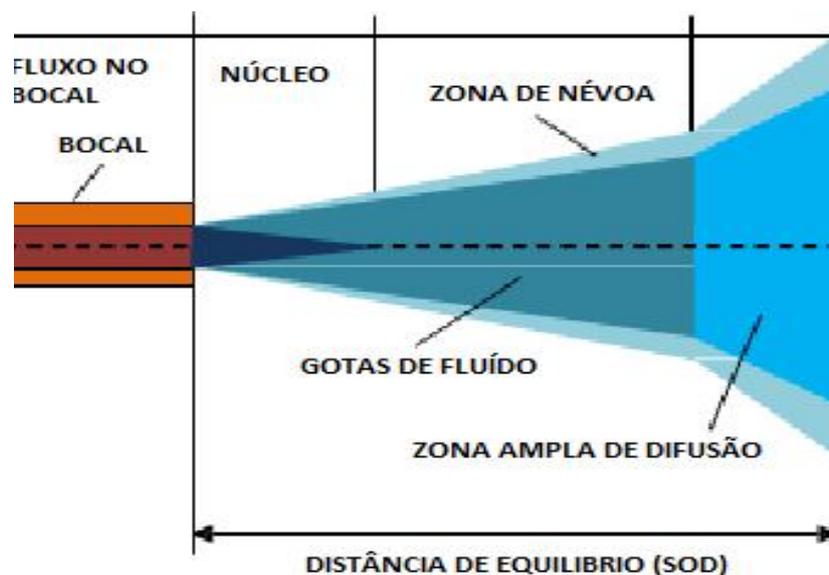


FIGURA 19: ESTRUTURA DE DO JATO DE LIMPEZA.

FONTE: ADIBI *ET AL.* (2014)

A Figura 20 ilustra o mecanismo presente na colisão da gota contra a superfície de corte do rebolo. O choque na zona de ampla de difusão gera um jato lateral tangencial em relação a superfície de corte do rebolo provocando uma tensão de capaz de não só remover as partículas aderidas como até ocasionar danos erosão quando utilizadas pressões elevadas.

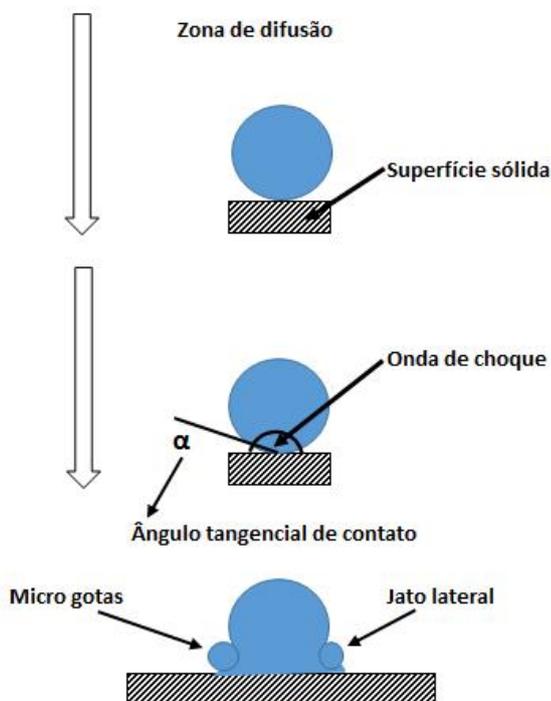


FIGURA 20: MECANISMO DE LIMPEZA REALIZADO PELAS GOTAS DO JATO.

FORTE: ADIBI *ET AL.* (2014).

A incidência do jato de limpeza sobre a superfície de corte do rebolo é afetada pela cortina de ar existente ao redor do rebolo. Esta barreira é criada pela rotação a alta velocidade angular do giro do rebolo. Sinot, Chevrier e Padilla. (2006), afirmam que a barreira pneumática localizada ao redor do rebolo interfere no contato do fluido com a superfície de corte. Ao rompê-la o jato sofre um deflexão para um ângulo (δ), maior que 90° a uma distância de equilíbrio (h). Considerando uma unidade de área da superfície de corte do rebolo, esta será submetida a uma força elementar de limpeza (dF), num período de tempo (t_{cl}), a cada rotação do rebolo. Quanto maior o valor da componente força (F_y), aplicada por um tempo de limpeza determinado (t_{cl}), maior eficiência de limpeza é obtida. Essa eficiência de limpeza (P'_{cl}), é

calculada pela relação entre a componente da força de limpeza ($F_{cl} \cdot \cos(\delta)$), pela largura da superfície do rebolo atingida pelo jato (L_z), com a velocidade do rebolo (v_s). A Figura 21 ilustra o processo.

Equação (16)

$$P'_{cl} = \frac{\cos(\delta) F_{cl}}{L_z \cdot v_s} \text{ (Pa s)}$$

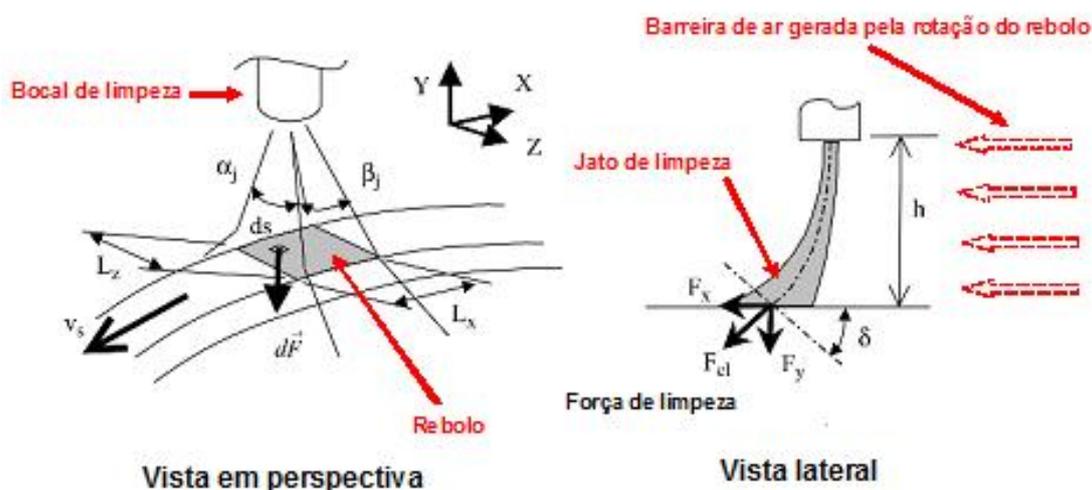


FIGURA 21: DEFLEXÃO DO JATO DE LIMPEZA CAUSADO PELA BARREIRA PNEUMÁTICA.

FONTE: SINOT, CHEVRIER E PADILLA (2006).

De acordo com Mandal *et al.* (2011), a existência desta barreira pneumática restringe a quantidade de fluido que atinge a superfície de corte do rebolo pois o ar próximo ao rebolo em rotação expulsa parte do jato aplicado. A intensidade deste processo de expulsão aumenta com o aumento gradativo da velocidade periférica provocada pela redução do diâmetro externo. De modo a entender melhor este fenômeno os autores realizaram experimentos simulando soluções que pudessem romper a barreira pneumática através da aplicação de um jato de ar comprimido. Os resultados obtidos permitiram aos autores a

concluir que : (i) a aplicação de um jato de ar comprimido pode efetivamente quebrar a barreira pneumática criada pela rotação do rebolo, (ii) com o aumento da distância de equilíbrio (SOD) e o ângulo de incidência do bocal o efeito de bloqueio da barreira pneumática se torna menor, (iv) o poder de bloqueio da barreira pneumática aumenta com o aumento da velocidade do rebolo.

Na pesquisa para desenvolvimento e aplicação de jatos hidráulicos para limpeza da superfície de rebolo foram encontrados trabalhos que analisaram a performance do processo com diferentes tipos e quantidade de bocais, parâmetros, influência da temperatura, diferentes distâncias entre o bocal e a superfície de corte do rebolo, diversos ângulos de incidência do jato de limpeza e sua influência na capacidade de remoção de partículas metálicas aderidas entre os poros do rebolo.

Cameron, Bauer e Warkentin. (2010), realizaram experimentos com diferentes modelos de bocal de limpeza e diferentes distâncias de equilíbrio (SOD), variando a distância entre 50,0 a 120,0 mm e ângulos de incidência do jato de limpeza 50°, 90° e 111° graus para uma velocidade de corte (V_s) fixa de 30 m/s. Inicialmente foi pesquisada e estabelecida qual distância de equilíbrio do jato (SOD) ideal para um ângulo de 90°, sendo o melhor resultado obtido com SOD de 70,0 mm. A conclusões deste trabalho foram: (i) com a adição do sistema de limpeza houve uma queda de 100% na ocorrência de empastamento e uma diminuição em até 30% da energia necessária para retificação do corpo de prova, (ii) a distância de equilíbrio do jato de limpeza (SOD), onde ocorreu a menor quantidade de empastamento foi de 70,0 mm e a qualidade da limpeza decresce se adotado distâncias maiores quanto menores a 70,0 mm, (ii) o valor da vazão ideal a aplicada ao jato de emulsão para limpeza da superfície de corte do rebolo foi de 12,8 l/min., acima deste valor não ocorreram alterações significativas na qualidade da remoção de partículas, (iii) a direção de aplicação do jato de limpeza seja no mesmo sentido de rotação do rebolo ou em sentido oposto a rotação do rebolo não influenciou na eficiência da limpeza. A Figura 22 ilustra o arranjo deste experimento.

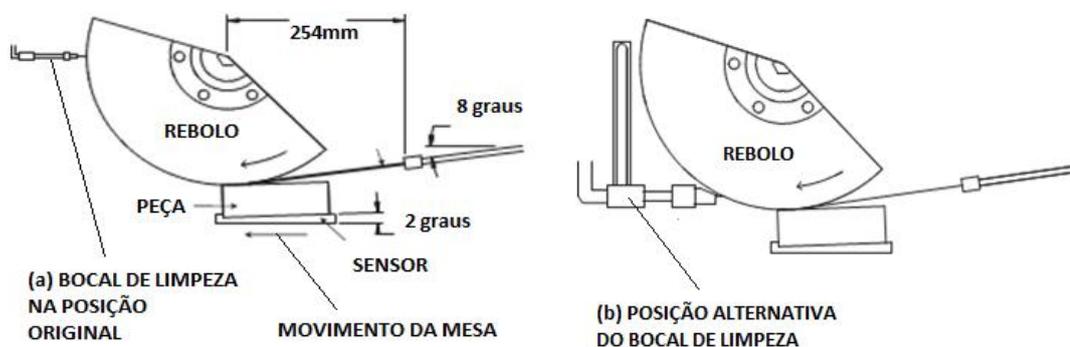


FIGURA 22: POSIÇÃO DOS BOCAIS DE LIMPEZA.

FORTE: CAMERON *ET AL.* (2010).

Barnerjee, Ghosal e Dutta. (2008), conceberam experimentos para determinar qual são os parâmetros ideais de posicionamento do bocal (distância em relação ao centro do rebolo e ângulo polar), de forma a vencer a barreira pneumática. Os melhores resultados de remoção de material $Q'w$ foram obtidos com uma distância de equilíbrio de 20,0 mm entre a superfície de corte do rebolo e o bocal e um ângulo de 30° medidos a partir de um plano vertical. As principais conclusões deste trabalho foram: (i) o bocal de limpeza deve ser instalado o mais próximo possível da superfície de corte do rebolo, (ii) o ângulo de 30° de incidência do jato foi aquele que gerou os melhores resultados substancialmente melhores e (iii) a barreira pneumática deve ser mecânicamente quebrada ou bloqueada para obter uma melhor vazão efetiva na superfície do rebolo, (iv) A vazão efetiva do jato de fluido que atinge o rebolo foi na realidade apenas uma fração de 7% dos 22m/l aplicados, (v) foram obtidos melhores resultados com a utilização de bocais que geram jatos pressurizados quando comparados a bocais que apenas fornecem maiores quantidades de fluido a pressão normal.

Heinzel e Antusupov (2012), pesquisaram sistemas adicionais para limpeza da superfície de corte de rebolos utilizando jatos pressurizados de fluido de emulsão 5% diluído em água para um rebolo vitrificado A60H16 com largura da superfície de corte $b_s = 20$ mm, velocidade de corte $V_s = 40$ m/s, e uma

retificadora plana externa. De acordo com os autores a ocorrência de empastamento pôde ser reduzida através da otimização dos parâmetros de limpeza e do bocal de limpeza. O foco deste trabalho foi o de avaliar três conceitos de bocal de limpeza, (i) plano, (ii) tubular e (iii) rotativo, variando a pressão de limpeza e a distância do jato até a superfície do rebolo. O bocal plano caracterizado por produzir um jato em forma de leque com ângulo de 20° foi o que gerou os melhores resultados de limpeza devido a maior velocidade alcançada pelo jato quando comparado ao tubular e o rotativo. Nos experimentos realizados foram analisados diferentes intervalos de distância SOD variando de 35,0 mm até 50,0 mm. Obteve-se um processo de limpeza efetivo a partir da pressão de 20 bar. A Figura 23 apresenta os três modelos de bocais utilizados nos experimentos.

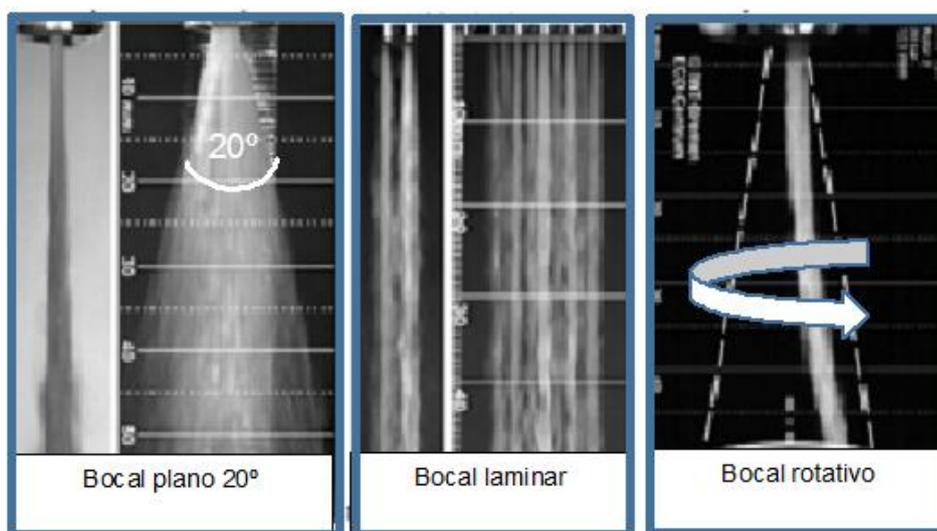


FIGURA 23: MODELOS DE BOCAIS APLICADOS EM EXPERIMENTOS.

FONTE: HEINZEL E ANSTUSUPOV (2012).

Apesar das vantagens da aplicação da emulsão como meio de limpeza, outras soluções foram estudadas.

Conforme Babic, Murray e Torrance (2005), os fortes argumentos contra utilização da emulsão como meio de limpeza são o alto custo e o fato de ser

um agente poluidor necessitando de um descarte controlado. A partir deste ponto de vista os autores pesquisaram o potencial de aplicação de jatos de névoa composto por uma pequena quantidade de água injetada em um fluxo de ar comprimido. A Figura 24 apresenta o conceito do arranjo físico do experimento. Dois bocais de limpeza foram instalados em posições opostas entre si com ângulo de incidência de 15° e uma distância de equilíbrio de 40,0 mm. A velocidade de corte do rebolo fixada em 30 m/s e a velocidade do jato fixada em 340 m/s. O conjunto foi montado sobre um dinamômetro de maneira a medir e gravar a força tangencial (F_t) e a força normal (F_n) de retificação durante o experimento e a temperatura do rebolo monitorada por um pirômetro. As conclusões obtidas deste trabalho foram (i) aplicação de jatos de névoa são uma eficiente e barata solução para limpeza de rebolo e reduzem a energia de retificação necessária para o processo, (ii) os melhores resultados foram obtidos com o uso de dois bocais, (iii) jatos pressurizados de névoa produzem um resfriamento da temperatura na zona de retificação sendo este mecanismo mais intenso com o aumento da vazão do jato.

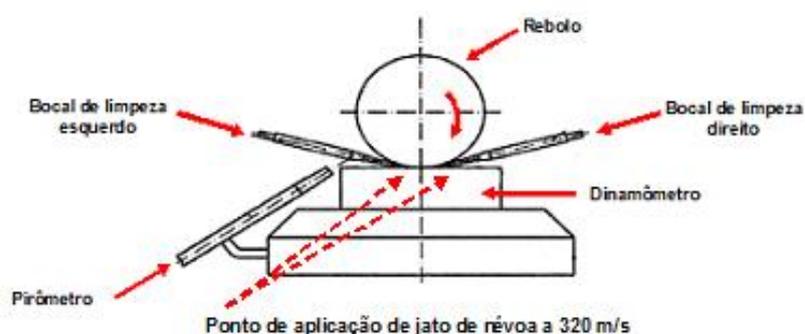


FIGURA 24: ARRANJO DO EXPERIMENTO.

FONTE: BABIC, MURRAY E TORRANCE (2005).

Não foram encontrados nos trabalhos analisados uma clara explicação dos critérios de escolha do uso de emulsão como fluido de limpeza, contudo segundo Blenkowski (1993), em seu trabalho sobre fluidos refrigerantes e lubrificantes fornece uma visão geral da aplicação de fluido no processo de retificação e suas vantagens. O autor apresenta quatro classificações para os

fluidos refrigerantes, afirmando porém não haver um fluido perfeito que atenda todas as propriedades desejadas. A Tabela 1 apresenta um resumo das vantagens e desvantagens dos diversos fluidos utilizados na retificação. O óleo solúvel e o puro são as opções que têm o maior impacto positivo para lubrificar e influenciar a vida do rebolo.

	Sintéticos	Semi sintéticos	Solúvel	Óleo puro
Remoção do calor	4	3	2	1
Capacidade de lubrificar	1	2	3	4
Manutenção	3	2	1	4
Capacidade de ser filtrado	4	3	2	1
Impacto no meio ambiente	4	3	2	1
Custo	4	3	2	1
Influência na vida do rebolo	1	2	3	4

1, o pior; 4, o melhor

TABELA 1: PROPRIEDADE DOS ÓLEOS REFRIGERANTES.

FONTE: BLENKOSWSKI (1993).

Apesar das vantagens da aplicação da emulsão como meio de limpeza, os pesquisadores analisaram outras alternativas técnicas como a aplicação de ar comprimido como fluido de limpeza da superfície e outra alternativa considerando a limpeza realizada por um dispositivo mecânico.

Irani, Bauer e Warkentin. (2005), realizaram uma revisão sobre aplicação dos vários fluidos utilizados na retificação. Os resultados encontrados indicaram que os fluidos de refrigeração possuem vantagens sobre a aplicação de ar, porém de acordo com os autores mais estudos são necessários nesta área.

Lee *et al.* (2002), realizaram estudos sobre o efeito de um jato de ar pressurizado na superfície do rebolo utilizado em retificação de ranhuras comparando três situações (i) retificação normal sem utilização de jato de ar pressurizado, (ii) retificação com aplicação de jato de ar na mesma direção de rotação do rebolo e (iii) retificação com aplicação de jato de ar porém na direção oposta à rotação do rebolo. As conclusões deste trabalho foram: (i) quanto maior a velocidade e pressão do jato de ar maior a força

aplicada na superfície de corte do rebolo, (ii) a utilização de ar pressurizado previne o aparecimento do empastamento, (iii) sem a utilização de ar pressurizado a profundidade de retificação diminui devido ao desgaste do rebolo porém a largura da ranhura aumenta devido ao surgimento do empastamento lateral do rebolo, (iii) os erros de forma na peça são menores quando o ar pressurizado é aplicado no mesmo sentido de rotação do rebolo. quando aplicado no sentido contrário da rotação do rebolo, o acabamento das peças produzidas apresentavam uma superfície com marcas de vibrações. A Figura 25 apresenta a ilustração da aplicação de ar pressurizado num superfície de corte de rebolo.

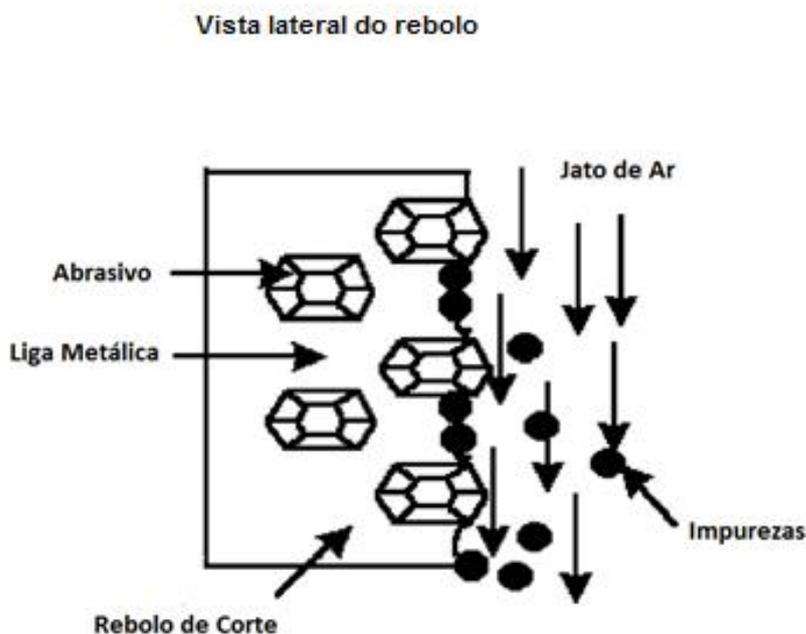


FIGURA 25: APLICAÇÃO DE AR COMPRIMIDO EM UMA SUPERFÍCIE DE CORTE.
FONTE: LEE ET AL. (2002).

Oliveira *et al.* (2012), pesquisaram a limpeza da superfície de corte de rebolo com jato de ar como uma técnica auxiliar para viabilização do uso da mínima quantidade de lubrificação na zona de retificação do aço AISI 4340 temperado. A técnica da mínima quantidade de lubrificação aplica pequenas quantidades de fluido refrigerante associado a um jato de ar sobre pressão na zona de

retificação. O benefício deste processo é o de utilizar quantidades menores de fluido causando um impacto benéfico ao meio ambiente, reduzindo os gastos com reposição deste insumo. A técnica da mínima quantidade de lubrificação tem se mostrado de difícil implementação pois devido a redução da aplicação da quantidade de fluido refrigerante há o aumento da temperatura na zona de retificação gerando uma maior ocorrência de empastamento do rebolo com um alto risco de geração de danos térmicos para a peça. A aplicação de jatos adicionais de ar comprimido permitiu aos pesquisadores obter os benefícios esperados pela redução do uso de fluido de retificação. A Figura 26 ilustra a aplicação da técnica da mínima quantidade de lubrificação associada com a técnica adicional de limpeza da superfície de corte rebolo com aplicação de ar pressurizado.

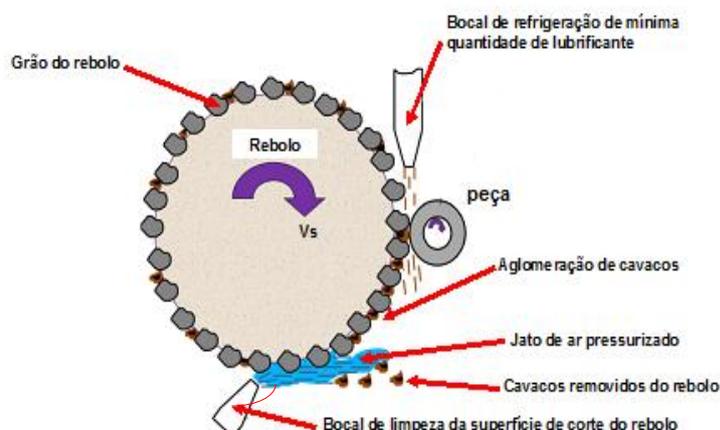


FIGURA 26: CONCEITO DE APLICAÇÃO DE AR COMPRIMIDO.

FORTE: OLIVEIRA *ET AL.* (2012).

A conclusões deste trabalho foram, (i) a técnica de limpeza de rebolos com jato de ar aplicado a um ângulo de 30° associada a técnica da mínima quantidade de lubrificante resultou numa melhor limpeza da superfície de corte do rebolo, (ii) o empastamento do rebolo foi responsável pela piora na rugosidade superficial da peça, pelos erros de forma, e o desgaste do rebolo, (iii) o uso

combinado da mínima quantidade de lubrificação com o processo de limpeza por ar aplicado com ângulo de incidência de 30 graus , permitiu utilizar taxas mais agressivas de remoção de material, (iv) a drástica redução do uso de fluido refrigerante reduz a contaminação do meio ambiente assim contribuindo para um processo mais efetivo do ponto de vista do custo de produção e limpo de retificação.

Bianchi *et al.* (2012), analisaram o impacto da associação das técnicas de limpeza da superfície de corte de rebolo utilizando ar pressurizado e a mínima quantidade de lubrificação na retificação de material cerâmico alumina comercial com 96,0% de óxido de alumínio e 4,0% de óxidos. Foram realizados experimentos com retificação convencional, com aplicação de mínima quantidade de lubrificação e limpeza de rebolos com 3 ângulos distintos de incidência com 30, 60 e 90 graus e outro experimento utilizando somente com o uso da mínima quantidade de lubrificação sem uso da técnica de limpeza. Foram controladas e comparadas as características de rugosidade e circularidade. Os resultados levaram a conclusão que a utilização da técnica da mínima quantidade de lubrificação sem o uso adicional da técnica de limpeza de rebolos não produz peças com a qualidade desejada. Nos experimentos foram aplicadas ambas as técnicas e obtidos bons resultados confirmando o efeito positivo da limpeza da superfície de corte de rebolo com utilização de ar pressurizado. Os resultados mostraram que dependendo do valor do avanço do rebolo utilizado o resultado ótimo foi obtido com diferentes ângulos de incidência do jato de limpeza.

Uma linha de pesquisa sobre limpeza da superfície de corte de rebolos analisou a viabilidade de um bastão de teflon associado a um disco de óxido de alumínio.

Barros *et al.* (2014), realizaram experimentos sobre a performance da mínima quantidade de lubrificação com a utilização de diferentes conceitos de limpeza de rebolo. O primeiro experimento avaliou a capacidade de limpeza de um sistema mecânico formado por um bastão de teflon e um disco de óxido de alumínio. O segundo experimento avaliou a capacidade de limpeza com a

utilização de jatos de ar comprimido. Os resultados obtidos mostraram que a limpeza mecânica com uma barra de teflon não é eficiente quando comparado a aplicação de jato de ar devido influência dos cavacos empastados no rebolo que acabam por agredir a superfície da barra, da qualidade do teflon utilizado e a não possibilidade de garantir um contato uniforme entre a barra e a superfície de corte de rebolo empastada.

Ao final da revisão bibliográfica ficou constatado que entre os trabalhos elaborados sobre limpeza de superfície de corte de rebolo as duas principais alternativas técnicas viáveis para implementação num ambiente de alta produção seriada de peças são a aplicação de jatos de fluido refrigerante ou a aplicação de ar comprimido. Uma característica comum aos trabalhos analisados é que todos tiveram como foco o desenvolvimento da tecnologia de limpeza analisando seus mecanismos de funcionamento e definição dos parâmetros que influenciam seu desempenho do processo de retificação, porém não foram encontrados trabalhos cujo o objetivo principal fosse de avaliar esta técnica de limpeza com relação ao impacto causado por ela na produtividade do processo de retificação e a qualidade da peça obtida, através do desenvolvimento e construção de um protótipo de sistema de limpeza de rebolo baseado nas configurações dos experimentos científicos e da aplicação dos parâmetros de processo de limpeza conhecidos de reproduzindo assim em uma ambiente de produção os experimentos acadêmicos.

O critério de escolha de qual meio de limpeza deve ser utilizado em ambiente de produção dependerá diretamente das condições de trabalho existentes e das orientações internas da empresa quanto a políticas ambientais e de conservação de energia. Em muitas empresas a aplicação de ar comprimido tem sido restrita baseada devido a política interna da manutenção onde objetivo é de reduzir o consumo deste insumo cujo custo de geração é considerado alto.

2.5. VISÃO SISTÊMICA DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Para o desenvolvimento de um protótipo de um sistema adicional de limpeza de superfície de corte de rebolos e análise dos impactos que produzirá na produção se faz necessário realizar inicialmente realizar uma análise do processo de retificação sob a ótica de um sistema produtivo.

Rowe (2009), define um sistema de retificação por meio de nove elementos básicos, (i) a peça que é objeto que sofre a transformação através do processo de retificação adquirindo uma forma definida com a qualidade dimensional, superficial, mantendo suas características químicas e metalúrgicas especificadas em projeto, (ii) a retificadora que é o nome dado ao equipamento que aciona o rebole e dá início ao ciclo de retificação executada de acordo com um software específico alimentado com parâmetros de processo pré definidos que definem a precisão dos movimentos dos sub conjuntos da retificadora de modo a produzir superfícies acabadas atendendo a precisão e tolerâncias indicadas no desenho de produto. Uma retificadora deve possuir uma alta rigidez estrutural, não permitindo surgimento de vibrações que prejudiquem a qualidade da peça e possuir uma boa estabilidade térmica impedindo o surgimento folgas ou dilatações indesejadas entre seus componentes internos que prejudiquem a qualidade do processo e conseqüentemente e da peça ao longo do tempo, (iii) cinemática que é a denominação dada ao conjunto de movimentos dos vários componentes e sub conjuntos internos da retificadora que permitem a execução do ato de retificação e que são determinados à partir de um programa específico de usinagem, (iv) rebole que é a ferramenta abrasiva utilizada para arrancar material da peça e gerar a superfície final desejada. Suas características são definidas pelo tamanho do grão, tipo de liga, estrutura, dureza, rigidez, velocidade periférica, propriedades térmicas e químicas, (v) sistema de dressagem que é o conjunto formado por uma ferramenta denominada dressador constituída por diamantes naturais ou sintéticos e uma base de apoio móvel, responsáveis por limpar a superfície desgastada de corte do rebole. As principais características desta ferramenta são o modelo (fixo ou rotativo) e formato (ponta única, rotativa). Os parâmetros

que influenciam a performance são velocidade, avanço (V_f), a refrigeração aplicada, a lubrificação e a manutenção da ferramenta, (vi) fluido de refrigeração que é responsável por lubrificar a zona de retificação diminuindo o atrito entre o grão e a peça retirando o calor gerado e transportar para descarte as partículas metálicas arrancadas da peça. Suas características fundamentais são a taxa de vazão, pressão, propriedades físicas, químicas e térmicas, (vii) ar e atmosfera sendo as características fundamentais atuantes temperatura e a umidade, (viii) saúde e segurança do operador pois o sistema de retificação não deve permitir riscos de acidente ao operador da máquina, (ix) resíduos não aproveitáveis gerados após retificação formados por uma mistura do fluido de refrigeração, restos de partículas metálicas, pedaços fragmentados de grão abrasivo e da liga pertencentes ao rebolo. Sua principal característica está no efeito de contaminante que produz ao processo, sendo necessária sua remoção do sistema através da aplicação um processo de filtragem eficiente do fluido refrigerante. A Figura 27 apresenta os elementos básicos de um sistema de retificação.

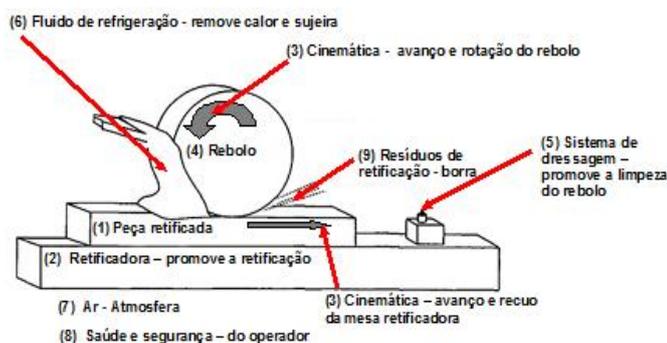


FIGURA 27: ELEMENTOS DE UM SISTEMA DE RETIFICAÇÃO.

FONTE: ADAPTADO DE ROWE (2009).

Estes elementos se materializam em uma retificadora automática para alto volume de produção, conforme ilustra a Figura 28.



FIGURA 28: RETIFICADORA EXTERNA DE MERGULHO AUTOMÁTICA CNC.

FONTE: DO AUTOR (2015).

Ao adicionarmos a este sistema um equipamento de limpeza de superfície de rebolos termos uma nova configuração apresentada pela Figura 29 com dez elementos atuantes.

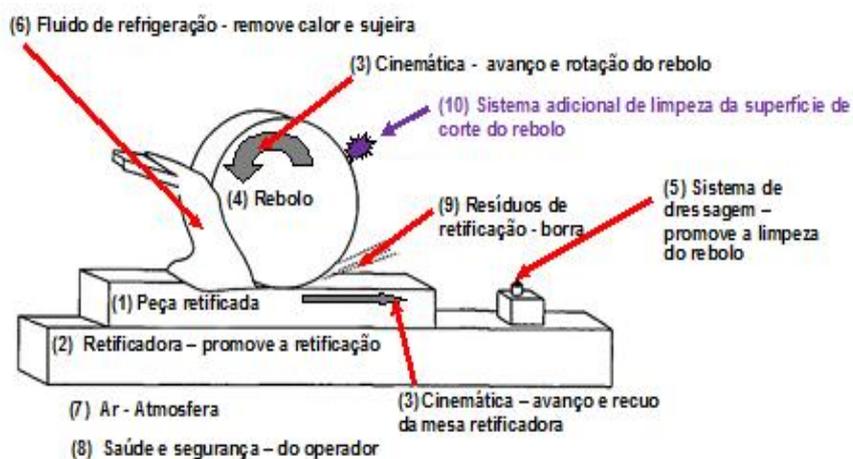


FIGURA 29: ADIÇÃO DE UM SISTEMA DE LIMPEZA DE SUPERFÍCIE DE CORTE.

FONTE: ADAPTADO DE ROWE (2009).

Este novo sistema sofre influência: (i) dos parâmetros de entrada definidos pelas velocidades e avanços de retificação adotados, pela qualidade do ferramental, materiais utilizados, pela qualidade da peça a ser retificada, pela qualificação do operador responsável pelo processo e a energia necessária para retificação. Com a implementação de um sistema de limpeza de superfície de corte de rebolos são adicionados a este conjunto de parâmetros a pressão, vazão e ângulo de incidência do jato de limpeza, tipo de bocal de limpeza e distância entre o bocal de limpeza e a superfície de corte do rebole, (ii) ruídos que uma vez presentes atuam de maneira desfavorável ao processo. Deflexões e vibrações da estrutura da máquina além dos estimados devido aos esforços de retificação, erros originários do ferramental utilizado e erros provenientes da própria retificadora são exemplos de ruídos. A adição de um sistema de limpeza de rebolos pode gerar um aumento da influência destes ruídos. Não somente os parâmetros de entrada e os ruídos sofrerão influência da adição do sistema de limpeza de superfície de rebolos, as saídas produtivas e não produtivas serão afetadas. São consideradas saídas produtivas, (i) as peças usinadas que baseado nos estudos acadêmicos já realizados será possível confirmar ou não uma qualidade superior devido a limpeza manter a superfície de corte do rebole afiada por maior tempo, (ii) a produção que deverá ser impactada positivamente com a adoção de maiores intervalos de peças para dressagem, (iii) qualidade dimensional e de forma, com impacto positivo devido a implementação da limpeza da superfície já comprovados nos experimentos acadêmicos estudados, (iv) os custos fixo e variável do processo necessitarão comprovação e quantificação dos impactos e potenciais ganhos pois não há referência sobre estes parâmetros na literatura revisada. A Figura 30 apresenta uma visão geral das entradas, ruídos, saídas produtivas e não produtivas de um sistema de retificação com a adição de um sistema de limpeza de superfície de corte de rebole. A revisão bibliográfica permitiu definir os principais fatores de processo que deverão ser analisados nos experimentos na produção (i) pressão de limpeza, (ii) Vazão de limpeza, (iii) tipo de bocal, (iv) quantidade de bocais, (v) ângulo de incidência do jato de limpeza e (vi) distância de equilíbrio entre o bocal e a superfície de corte do rebole. Os

principais dados de desempenho da qualidade que devem ser observados são (i) circularidade da peça, (ii) variação do diâmetro da peça, (iii) forma externa retificada. Com relação a produtividade do processo de retificação deverão ser analisadas (i) avanços e velocidades de retificação, (ii) intervalo de dressagem do rebolo, (iii) quantidade de peças produzidas por hora, (iv) quantidade de pelas produzidas por rebolo, (v) remoção de material por peça e (vi) custo da operação de retificação.



FIGURA 30: ENTRADAS, SAÍDAS PRODUTIVAS E NÃO PRODUTIVAS.

FONTE: ROWE (2009).

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos metodológicos foram definidos em função da classificação da pesquisa quanto aos seguintes aspectos: abordagem; natureza; objetivos e procedimentos, conforme ilustra a Figura 31.

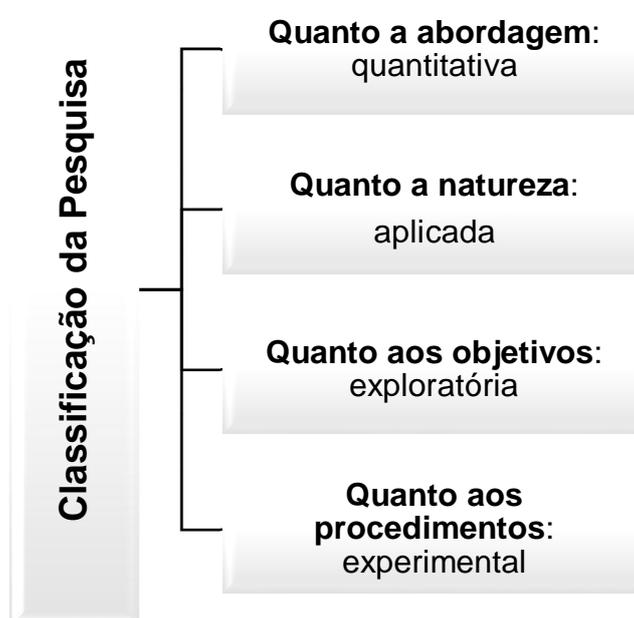


FIGURA 31: CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.

FONTE: DO AUTOR (2015).

Esta pesquisa está classificada de acordo com a sua abordagem como uma pesquisa quantitativa, pois utiliza técnicas de quantificação tanto na coleta dos dados como na análise dos mesmos, por meio de técnicas estatísticas adequadas (RICHARDSON, 2010).

Quanto a sua natureza, esta pesquisa está classificada como aplicada, pois ela objetiva gerar conhecimentos para aplicações práticas, na busca pela solução de problemas específicos. Já com relação aos objetivos, busca proporcionar mais familiaridade com o problema, procurando potenciais soluções ou a construção de hipóteses, portanto, ela é uma pesquisa exploratória, que pode

ser definida como uma pesquisa bibliográfica ou um estudo de caso (GIL, 2008).

Finalmente, quanto os procedimentos técnicos, esta pesquisa está definida como experimental, pois ela segue um planejamento rigoroso, e consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis de influência e definir as formas de controle e observação dos efeitos que as variáveis produzem no objeto avaliado (GIL, 2008).

Considerando que esta pesquisa está classificada de acordo com os seus procedimentos como experimental, deve-se definir as etapas, passo-a-passo, para desenvolver a pesquisa, que corresponde ao seu método. Neste estudo, o método de pesquisa foi definido em 5 etapas, conforme ilustra a Figura 32.

Etapa 1: Realizar a Revisão Bibliográfica

1. Levantamento bibliográfico para definir o referencial teórico para o estudo;
2. Avaliar trabalhos similares para definir as condições de realização do experimento

Etapa 2: Definir os objetos de estudo e as variáveis envolvidas

1. Definir os seguintes objetos de estudo: sistema de retificação; sistema de limpeza de rebolos; corpos de prova, dentre outros
2. Definir todas as variáveis do estudo: dependentes, independentes e de controle.

Etapa 3: Planejar o experimento

1. Definir o experimento: tipo, fatores e respectivos níveis dos fatores; condições para realizar o experimento; forma de medição das variáveis.
2. Construir a matriz experimental;

Etapa 4: Realizar o experimento

1. Realizar as corridas do experimento, de acordo com a matriz experimental definida no planejamento do experimento.

Etapa 5: Analisar os dados

1. Realizar as análises estatísticas dos dados obtidos no experimento e discutir os resultados obtidos;
2. Concluir o estudo respondendo aos objetivos definidos

FIGURA 32: O MÉTODO DE PESQUISA.

FONTE: DO AUTOR (2015).

De acordo com a Figura 32 este estudo será desenvolvido em 5 etapas, cujas atividades de cada uma delas foram previamente definidas. A Etapa 1 consiste no levantamento bibliográfico com dois objetivos principais: identificar na literatura nacional e internacional, trabalhos que tenham relações como este estudo; construir o referencial teórico que sirva como base para seu o

desenvolvimento, inclusive da parte experimental. Para desenvolver esta etapa, deve-se identificar artigos científicos, livros e demais materiais que permitam tanto conhecer os estudos relacionados como construir a teoria envolvida neste estudo.

Na Etapa 2 estão apresentados, de forma detalhada, os objetos de estudo e as respectivas variáveis que, por alguma razão, causam variabilidade no processo de retificação. Especificamente para este estudo, foram definidos como objetos um sistema de retífica de mergulho adicionada de um sistema de limpeza de rebolos, proposto para este estudo. Também faz parte desta etapa, definir o corpo de prova que será usado para o desenvolvimento do estudo, que consiste de um tipo de peça fabricada em condições reais, pelo sistema avaliado, e as respectivas características que nela serão avaliadas, definido as variáveis dependentes.

A Etapa 3 é importante para o estudo, pois nela estão definidas e descritas todas as condições para o desenvolvimento do experimento. Primeiramente deve-se definir o tipo de experimento a ser realizado, se fatorial completo ou fracionado. Em seguida devem ser definidos os fatores avaliados no experimento. Estes fatores são derivados das variáveis que influenciam no sistema avaliado, além dos fatores, também devem ser definidos os seus respectivos níveis, como por exemplo, se o operador do sistema é uma potencial fonte de variabilidade e o sistema opera com vários operadores diferentes, deve-se considerar vários operadores para quantificar esta variabilidade e verificar se a mesma é significativa, considerando um determinado nível de significância. Além das variáveis dependentes e independentes, também devem ser definidas as condições experimentais que serão mantidas constantes, seja porque elas podem ser mantidas sob controle durante o desenvolvimento do experimento, ou porque, experiências anteriores mostraram que elas não são fontes de variabilidade. Outra definição importante nesta etapa é o número de repetições que serão realizadas no experimento. O número de repetições é definido, especialmente, pela dificuldade em realizar o experimento ou pelo custo do mesmo. Após definidas estas condições, deve-se

construir a matriz experimental, que é definida pelas corridas (experimentos) que serão realizados e pela ordem aleatória de realização dos mesmos. Finalmente, nesta etapa deve-se definir a forma de análise dos dados, em função das características avaliadas variável dependente (peça fabricada pelo sistema avaliado).

Na Etapa 4 serão realizadas as corridas, para isso, o sistema avaliado deve ser preparado, considerando as condições definidas para a realização do experimento. Como o sistema aqui avaliado é um sistema real e produz uma grande quantidade de peças, deve-se definir como as peças avaliadas serão usinadas e retiradas do sistema para avaliação das respectivas características. Como resultado desta etapa deve-se ter os dados que serão avaliados na etapa posterior. Desta forma, deve-se definir como as características da peça serão medidas e os respectivos dados coletados.

Finalmente a Etapa 5 consiste na realização do experimento e na análise dos dados coletados. Basicamente estão definidos dois tipos de análise: exploratória, por meio de estatística descritiva; ANOVA para verificar se os fatores considerados no estudo de fato causam variabilidade no sistema avaliado, além de avaliar a variabilidade decorrente da interação entre os diferentes fatores. Para finalizar, este estudo propõe comparar indicadores de produtividade do sistema avaliado, considerando dados históricos (antes da instalação do processo de limpeza de rebolos) e dados dos mesmos indicadores coletados durante a realização do experimento. Esta análise deve fornecer informações sobre o comportamento destes indicadores com e sem a utilização do processo aqui proposto. Considerando as etapas do método aqui proposto, o próximo tópico descreve o desenvolvimento de cada uma das etapas e os respectivos resultados obtidos.

4. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Para o desenvolvimento desta etapa serão consideradas as etapas definidas na Figura 32. Este capítulo apresenta todos os resultados obtidos em cada uma dessas Etapas.

4.1. DESENVOLVIMENTO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com a Figura 32, o desenvolvimento da Etapa 1 resultou na revisão bibliográfica para a construção do referencial teórico do estudo e na definição das condições de realização do experimento. O Quadro 1 mostra o resumo dos principais trabalhos e temas que foram utilizados nesta Etapa.

Autor	Ano	País	Tema do Trabalho
Babic, Murray e Torrance	2005	Irlanda	Aplicação de névoa para refrigeração em processo de retificação.
Barros <i>et al.</i>	2012	Brasil	Utilização de teflon e disco de óxido de alumínio para limpeza de rebolos em retificação com mínima quantidade de lubrificação.
Bianchi <i>et al.</i>	2012	Brasil	Limpeza da superfície de corte de rebolo com ar comprimido na retificação externa de mergulho.
Cameron, Bauer e Warkentin.	2010	Canadá	Uma investigação dos efeitos dos parâmetros de limpeza de rebolo em retificação.
Mandal <i>et al.</i>	2011	Índia	Melhorando a performance da etificação ao controlar o fluxo de ar ao redor do rebolo.
Oliveira <i>et al.</i>	2012	Brasil	Melhorando a técnica da mínima quantidade de lubrificante na retificação com CBN utilizando a limpeza de rebolo.
Heinzel e Antusuov	2012	Alemanha	Previnindo o empastamento na retificação através de uma eficiente limpeza de rebolo.
Lee <i>et al.</i>	2002	Coreia	Efeito do jato de ar aplicado a alta pressão na retificação de canais.
Sinot, Chevrier e Padilla	2005	França	Simulação experimental da eficiência da limpeza de rebolos em processos de alta velocidade.

QUADRO 1 – PRINCIPAIS TRABALHOS LOCALIZADOS.

FONTE: DO AUTOR (2015).

Dentre os artigos científicos e os livros técnicos que foram usados para a construção do referencial teórico deste estudo, o Quadro 1 apresenta os principais estudos que abordam as questões sobre limpeza de rebolos, que serão usados como base para o desenvolvimento deste estudo. O Quadro 2 apresenta a matriz de impacto de resultados dos experimentos analisados em comparação a dos impactos que serão analisados proposta deste trabalho.

ELEMENTOS DE UM SISTEMA DE RETIFICAÇÃO ROWE (2009)		BABIC 2005	BARROS 2004	BIANCHI 2012	CAMERON 2010	HEINZEL 2012	LEF 2002	MANDAL 2011	OLIVEIRA 2012	SINOT 2006	PEREZ 2015
ENTRADAS	VELOCIDADES E AVANÇOS	POSITIVO		POSITIVO		POSITIVO			POSITIVO		AVALIAR
	FERRAMENTAL										
	MATERIAIS										
	MÃO DE OBRA										
	ENERGIA DE RETIFICAÇÃO				POSITIVO			POSITIVO			AVALIAR
CUSTOS											AVALIAR
SAIDAS PRODUTIVAS	PEÇAS USNADAS										AVALIAR
	PRODUÇÃO / HORA										AVALIAR
	PERFIL E ACURACIDADE	POSITIVO	POSITIVO	POSITIVO		POSITIVO	POSITIVO		POSITIVO	POSITIVO	AVALIAR
	TEXTURA SUPERFICIAL	POSITIVO	POSITIVO	POSITIVO		POSITIVO			POSITIVO	POSITIVO	AVALIAR
	INTEGRIDADE SUPERFICIAL	POSITIVO	POSITIVO	POSITIVO	POSITIVO	POSITIVO			POSITIVO		AVALIAR
SAIDAS NÃO PRODUTIVAS	GERAÇÃO DE BORRA					POSITIVO			POSITIVO	POSITIVO	AVALIAR
	PERDA DE FLUÍDO										AVALIAR
	GERAÇÃO DE CALOR										
	BARULHO										AVALIAR
	GERAÇÃO DE NÉVOA										AVALIAR
DESGASTE DO REBOLO										AVALIAR	
RUIDOS	DEFLEXÃO ELÁSTICA										
	VIBRAÇÃO										
	FORMA INICIAL DA PEÇA										AVALIAR
	ERROS DA FERRAMENTA			POSITIVO							AVALIAR
	EMPASTAMENTO			POSITIVO	POSITIVO		POSITIVO		POSITIVO		AVALIAR
	FLUTUAÇÕES DE TEMPERATURA										
ERROS DA MÁQUINA										AVALIAR	

QUADRO 2 – RESUMO DOS PRINCIPAIS TRABALHOS E PROPOSTA DESTES PROJETO.

FORNE: DO AUTOR (2015).

4.2. DEFINIÇÃO DOS OBJETOS DE ESTUDO E AS VARIÁVEIS ENVOLVIDAS

Nesta Etapa foram definidos, primeiramente, os objetos de estudo: a célula de manufatura e o sistema de retificação; o sistema de limpeza de superfície de corte de rebolo e o corpo de prova utilizados neste estudo. Para a definição da célula de manufatura de forma que os objetivos deste estudo fossem alcançados foram considerados os seguintes critérios: (i) a célula de manufatura e a retificadora devem ser representativas quanto ao volume de produção programado, (ii) a retificadora deve ser gargalo de produção da célula de manufatura considerada, (iii) o processo de retificação externa deve remover o maior volume possível de material (Qw'), (iv) deve ser utilizada emulsão como fluido refrigerante, (v) a retificadora deve estar interligada a uma central de refrigeração equipada com um sistema de filtragem da emulsão para remoção de partículas dispersas, (vi) a célula de manufatura deve possuir um espaço livre na sua configuração que permita a instalação completa do sistema de limpeza de superfície de corte de rebolos proposto neste estudo, (vii) a produção deve possuir sistema de qualidade assegurada e meios de controle de qualidade certificados, (viii) a retificadora deve ser operada por funcionários treinados. Baseado nestes critérios foi escolhida uma célula de manufatura destinada para produção de anéis de rolamento de esferas utilizados na indústria automobilística. Esta célula destina-se a produção de diferentes anéis externos de rolamentos de esfera, com diâmetro externo entre 24,0 a 60,0 mm e largura entre 9,5 a 70 mm, produzidos em aço 100Cr6, tratamento térmico por têmpera plena e revenido com dureza entre 58,5 a 61,5 HRC, e com uma produção mensal programada de 42.000 peças/mês. Todas as máquinas desta célula utilizam emulsão como fluido refrigerante que é filtrado por uma central e abastecido para toda a fábrica. O controle dimensional das peças produzidas nesta célula é realizado por meio de calibradores certificados instalados em postos de qualidade. O ferramental é revisado, pré-preparado em sala especial, onde é realizado o controle de desgaste e quebra, havendo troca de peças quando necessário. O gargalo de

produção desta célula é a retífica externa de mergulho. Para definir a retificadora para o desenvolvimento dos experimentos, foram considerados os seguintes aspectos: (i) possuir excelente estabilidade estrutural e térmica, para que seja possível manter essas condições controladas durante a realização dos experimentos, (ii) dispor de espaço interno livre suficiente para instalação do sistema de limpeza da superfície de corte de rebolos, (iii) utilizar rolo diamantado como dressador do rebolo, como condição válida para o sistema de limpeza deste estudo, (iv) possuir comando CNC, (v) permitir a carga e a descarga de peças de forma automática, (vi) Possui uma carenagem para contenção da formação de névoa e de ruído, (vii) possuir sistema automático de balanceamento e de supervisão do processo. Considerando estes aspectos, a máquina selecionada foi uma retífica externa de mergulho (ano de fabricação 2002), CNC modelo PGE-U, fabricante Mecânica Nova – Itália, com as especificações conforme a Quadro 3.

Características Técnicas	Valor
Mínimo diâmetro de retificação (mm)	10,0
Máximo diâmetro de retificação (mm)	200,0
Máxima largura de retificação (mm)	60,0
Comando Numérico	CNC 91
Número de eixos	4,0
Rigidez mínima da máquina (N/ μ m)	50,0
Máxima rotação do rolo diamantado (rpm)	6000
Máxima rotação de giro da peça (rpm)	1500
Velocidade do fuso principal do rebolo (m/s)	40 / 60/ 80
Pressão hidráulica de fixação da peça (bar)	25,0

QUADRO 3 – PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA RETIFICADORA PGE-U.

FONTE: MECCANICA NOVA (2015).

4.3. PROJETO E CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE LIMPEZA DE REBOLOS

A definição e o projeto do sistema de limpeza de rebolos proposto neste estudo, inicialmente considerou os seguintes aspectos: (i) os elementos e os parâmetros definidos para o projeto basearam-se em trabalhos acadêmicos desenvolvidos sobre este tema. A motivação para isso foi a possibilidade de

comparar os resultados obtidos neste estudo com outros já publicados, (ii) o sistema de limpeza deve ser operado independentemente do sistema de retificação, para não gerar erros adicionais na máquina retificadora, (iii) o equipamento deve ser instalado o mais próximo da máquina retificadora de modo a evitar perdas de carga significativas (iv) o sistema deve possuir indicadores de monitoramento da vazão e da pressão utilizadas nos experimentos.

A definição das características de capacidade e campo de atuação do sistema de limpeza de superfície de corte de rebolo foi realizada baseada nas informações técnicas disponibilizadas pelos pesquisadores dos trabalhos mais significativos encontrados. A Tabela 2 apresenta a definição dos elementos do experimento deste trabalho. O objetivo foi o de desenvolver um equipamento que possua as melhores características técnicas dos equipamentos desenvolvidos pelos pesquisadores, porém adaptado às necessidades, limitações e regras existentes na produção.

Item	Configuração do Experimento	Autores								
		Babic 2005	Barros 2012	Bianchi 2012	Cameron 2010	Heinzel 2012	Lee 2002	Mandal 2011	Oliveira 2012	Perez 2015
1	Modelo de retificadora utilizada nos experimentos	Retificadora Plana	Retificadora Cilíndrica	Retificadora Cilíndrica	Retificadora Plana	Retificadora Cilíndrica	Centro de Usinagem	Retificadora Externa	Retificadora Cilíndrica	Retificadora Externa de Megulho
2	Material do corpo de prova	AISI 1018	AISI 4340	Alumínia	AISI 4140	Pressscale PSS	M 50	Aço Liga	AISI 4340	52100
3	Especificação do rebolo utilizado nos experimentos	Alumínia Vitrificada	Não informado	Resinóide	Alumínia Vitrificada	Vitrificado	CBN	Vitrificado	CBN	Óxido de Alumínio
4	Diâmetro de rebolo	200,0 mm	Não informado	350,0 mm	Não informado	Não informado	80,0 mm	200,0 mm	350,0 mm	500,0 mm
5	Velocidade periférica do rebolo	29,5 m/s	30,0 m/s	Não informado	22,35 m/s	Não informado	Não informado	30,0 m/s	30,0 m/s	80,0 m/s
6	Meio de limpeza utilizado nos experimentos	Ar + água	Teflon + disco de óxido de alumínio	Ar	Emulsão (5%) + água (95%)	Emulsão (5%) + água (95%)	Ar	Ar	Emulsão (5%) + água (95%)	Emulsão (5%) + água (95%)
7	Pressão aplicada nos experimentos	Não informado	Não informado	7,0 bar	Não informado	10,0 a 40,0 bar	7,0 bar	1,95; 3,90; 7,85 e 11,75 bar	7,0 bar	10, 15 20 e 25 bar
8	Vazão do meio de limpeza	Não informado	Não informado	Não informado	4,2 e 17,8 l/min	15,0 e 24,0 l/min	Não informado	Não informado	Não informado	14,7 a 24,5 l/min
9	Ângulo do jato de limpeza	15°	Não informado	0°, 30°, 60° e 90°	8°	0°	52°	0°	30°	0° e 30°
10	Distância do jato de limpeza até a superfície do rebolo	40,0 mm	Não informado	Não informado	254,0 mm	50,0 mm	Não informado	10,0 mm	1,0 mm	20,0 mm
11	Quantidade de bocais de limpeza	2,0	Não informado	1,0	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0	3,0

TABELA 2: BASE PARA DEFINIÇÃO TÉCNICA DO EQUIPAMENTO DE LIMPEZA.

FONTES: DO AUTOR (2015).

A escolha final foi pelo uso de emulsão como meio de limpeza sendo as razões que levaram a tal decisão foram: (i) emulsão é largamente utilizada na empresa, (ii) a existência de uma central de coleta, filtragem e distribuição de emulsão na ala onde a retificadora está instalada, (iii) a pressão de rede de ar comprimido na produção sofre grandes flutuações não garantindo uma estabilidade do processo de limpeza caso seja adotada esta opção como meio de limpeza (iv) a orientação interna da empresa é de reduzir a aplicações de ar comprimido na produção atendendo a um projeto interno de conservação energética. A partir desta decisão o projeto do sistema de limpeza de superfície de corte de rebolo foi idealizado baseado nos trabalhos voltados para a aplicação de emulsão como meio de limpeza. Composto por dois sistemas sendo o primeiro dedicado ao bombeamento por alta pressão através do uso de uma moto bomba de pistão com capacidade máxima de gerar 40 bar de pressão, um motor elétrico de 5 cv, um filtro com 12 elementos filtrantes tipo cartucho com capacidade de 50 micra de retenção, e 12 m³/h, três manômetros de controle de pressão sendo um manômetro para controle da pressão da bomba utilizado para fazer a regulagem dos experimentos, um manômetro para controle de pressão antes filtro cuja função é mostrar possíveis perdas de carga por vazamentos, um manômetro após o filtro cuja função é mostra perda de pressão por saturação dos elementos filtrantes indicando a necessidade de troca desses elementos. A Figura 33 ilustra a vista geral do sistema de bombeamento. O segundo sistema é dedicado a geração do jato de emulsão e as regulagens de ângulo de incidência e distância entre os bocais e a superfície de corte do rebolo. O projeto deste sistema sofreu influência direta do projeto construtivo da retificadora pois o foi necessário considerar o espaço livre no interior da retificadora para definição da passagem da tubulação, do local de instalação dos jatos de limpeza e das alavancas de regulagem de ângulo e distância. O estudo da área disponível no interior da retificadora mostrou que o equipamento de limpeza apesar de ser capaz de realizar experimentos com diferentes distâncias entre o bocal e o rebolo, disponibilizou um campo livre de apenas 2,0 cm para regulagem desta distância. Devido a este fato foi fixado em 20,0 mm a distância entre os bocais de limpeza e a

superfície de corte do rebolo. A regulação linear é obtida por meio da movimentação do conjunto regulador que desliza sobre uma guia prismática movimentando linearmente a distância do bocal de limpeza em relação a superfície de corte do rebolo permitindo fixar a distância e ao mesmo tempo compensar o desgaste do rebolo. A regulação angular do jato é realizada por um disco graduado, sendo após a regulação fixada através de uma porca de aperto. A Figura 34, apresenta a vista frontal do sistema de geração de jatos.

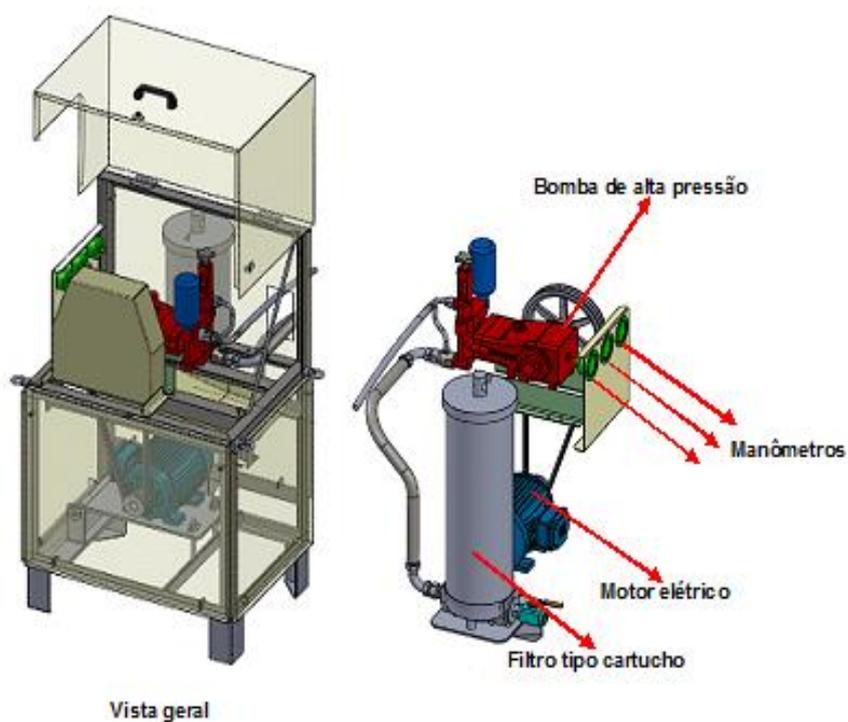


FIGURA 33: SISTEMA DE BOMBEAMENTO E FILTRAGEM.

FONTE: PRÓPRIO AUTOR (2015).

A definição do modelo de bocais de limpeza adotado baseou-se nos trabalhos realizados por Heinzl et Antsupov (2012), sendo escolhido o modelo de bocal

que gera um jato em leque plano com ângulo de abertura de 20° . A Tabela 3 apresenta as principais características técnicas deste modelo de bocal. A quantidade de bocais foi definida em três devido a produção utilizar diferentes larguras de rebolos. A utilização de três bocais permitiu a realização de experimentos com qualquer produto manufaturado da célula. O conceito do equipamento de limpeza permite trabalhar com um bocal, dois ou três bocais ativos.

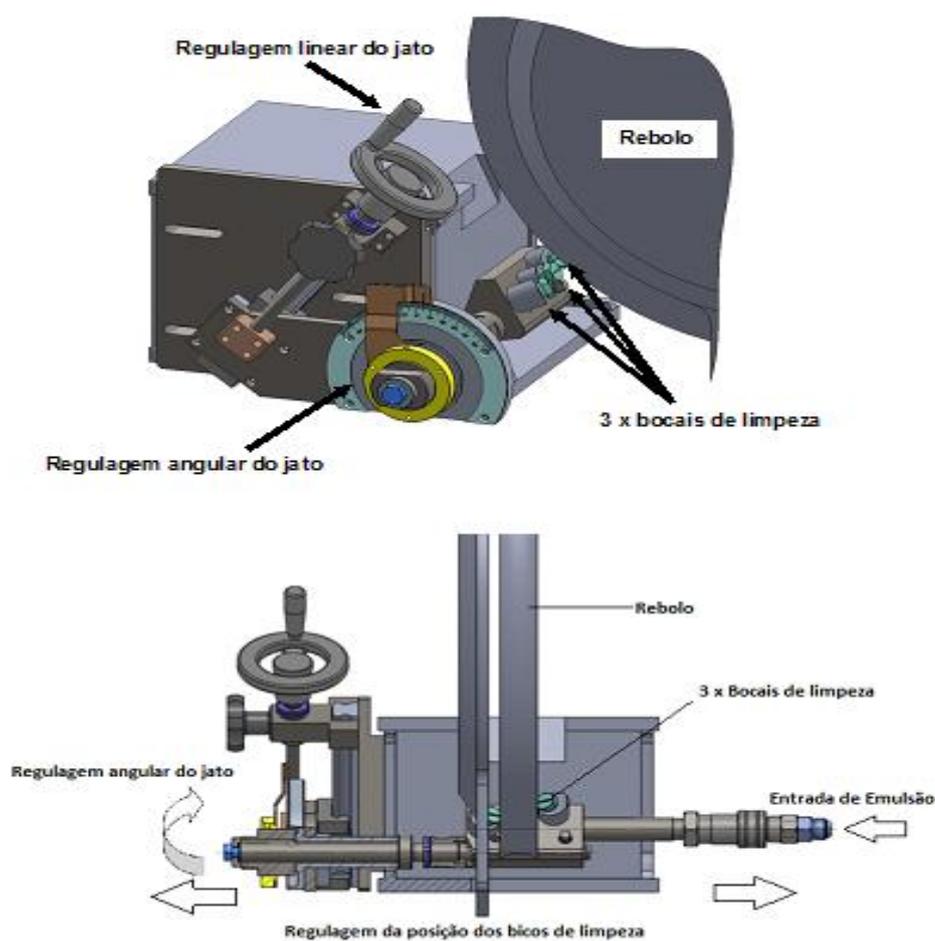


FIGURA 34: VISTA LATERAL E VISTA FRONTAL DO EQUIPAMENTO.

FONTE: DO AUTOR (2015).

Descrição	Especificação
Material	Aço Inoxidável AISI 303
Conexão	1/4"
Ângulo de abertura do Leque	20°
Diâmetro Equivalente do Bocal	2,3 mm
Peso do Bocal	18 g
Pressão Máxima Admissível	35,0 bar

TABELA 3: DADOS BOCAL DE LIMPEZA UTILIZADO NOS EXPERIMENTOS.

FORTE: LECHLER (2015).

A Figura 35 apresenta a posição do bocal montado na retificadora com a apresentação do ângulo de incidência.

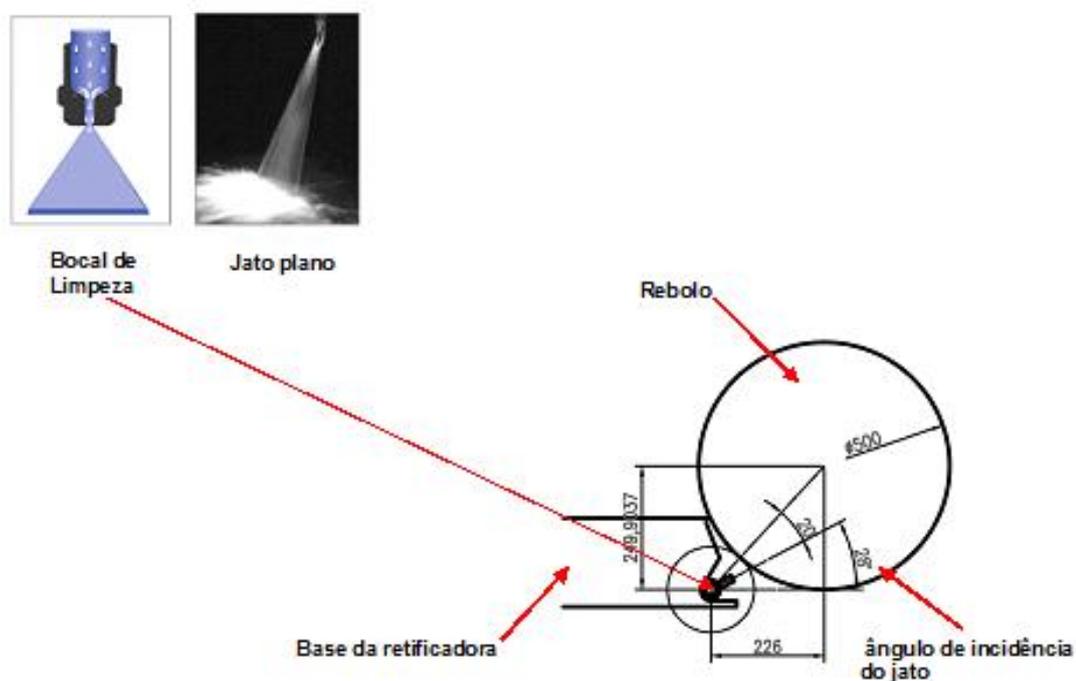


FIGURA 35: POSICIONAMENTO DO BOCAL DE LIMPEZA NA RETIFICADORA.

FORTE: DO AUTOR (2015).

A proposta deste sistema de limpeza da superfície de corte de rebolo é de um equipamento flexível permitindo utilizar diferentes parâmetros de limpeza sendo de fácil instalação, autônomo não exigindo radicais alterações no projeto construtivo original da retificadora na qual foi instalada. Criou-se um sistema isolado evitando a adição de ruídos ao processo de retificação, causando baixo impacto ambiental, fácil de operar e assegurando a integridade física do operador. Teste piloto foi realizado em uma bancada para permitir a visualização de todos os componentes do sistema e assim determinar sua funcionalidade e correção de falhas de projeto ou fabricação, garantindo assim a validade dos experimentos realizados conforme mostram as Figuras 36 (a) e 36 (b).

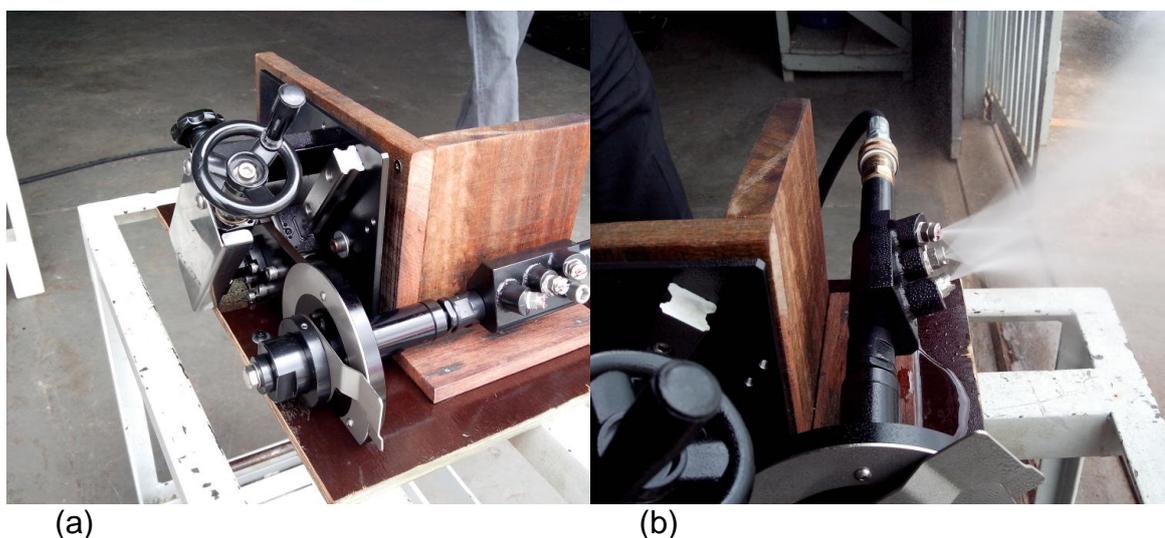


FIGURA 36: VISÃO FRONTAL (A) E VISÃO LATERAL (B) DO EQUIPAMENTO.

FONTE: DO AUTOR (2015).

O teste piloto detectou a necessidade de reforço das conexões e nas mangueiras garantindo que as mesmas não se desconectassem durante a realização dos experimentos. Após estas modificações, a etapa seguinte foi a montagem do sistema de limpeza de rebolos na retificadora. Também detectada a necessidade de instalação de um medidor de vazão na saída da bomba hidráulica. Figura 37. A Figura 38 mostra o sistema montado na retificadora.



FIGURA 37: MEDIDOR DE VAZÃO INSTALADO NA SAÍDA DO EQUIPAMENTO.

FORTE: DO AUTOR (2015).

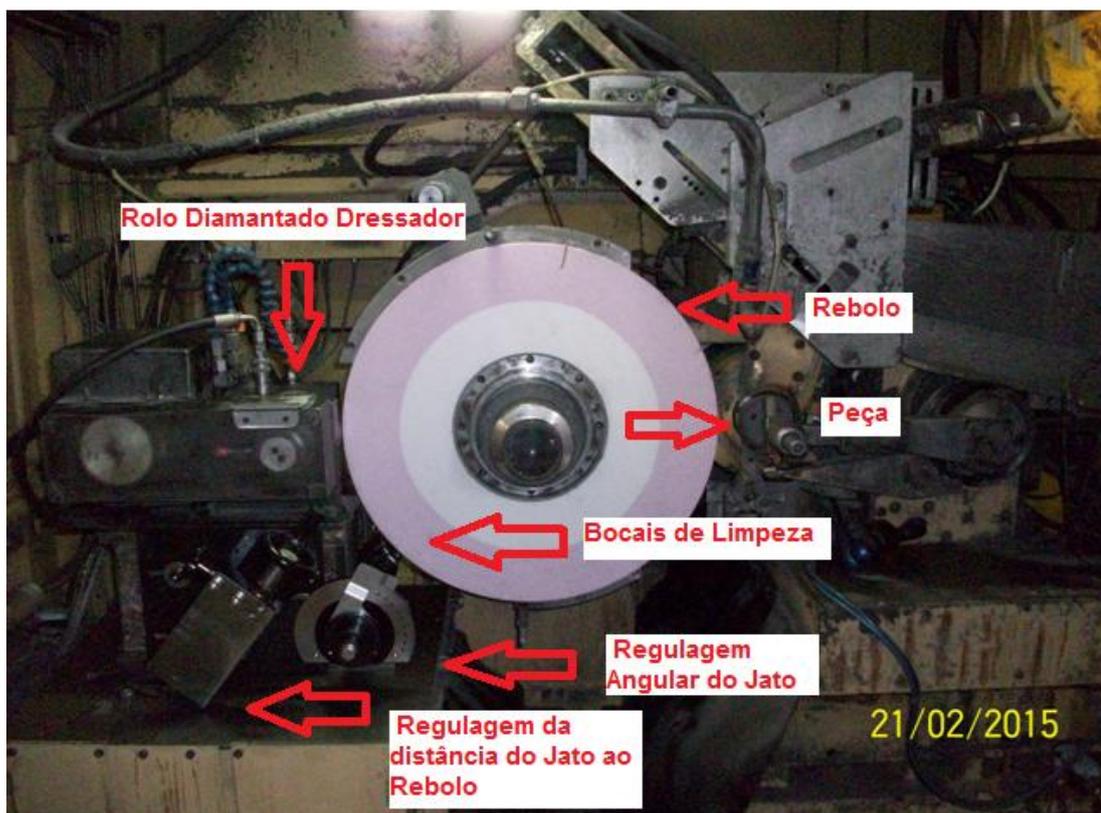


FIGURA 38: SISTEMA DE LIMPEZA DE REBOLOS INSTALADO NA RETIFICADORA.

FORTE: DO AUTOR (2015).

A definição do corpo de prova considerou os seguintes critérios: (i) possuir um volume de produção representativo, (ii) ser uma peça circular, com uma relação entre diâmetro externo e espessura que minimize as deformações geradas

após tratamento térmico, (iii) ser produzida em aço 52100, (iv) ser temperada e revenida, (v) possuir medidas de controle dimensional e tolerâncias de retificação e de textura de superfícies consagrados na produção, (vi) possuir métodos, parâmetros de controle da qualidade definidos e consagrados na produção, (vii) possuir parâmetros de retificação definidos e consagrados na produção, contudo para os experimentos foi definido a utilização dos valores máximos destes parâmetros com o objetivo de criar uma situação crítica de volume de material retirado da peça. A Figura 39 apresenta o corpo de prova utilizado nos experimentos.



FIGURA 39: AMOSTRAS PARA EXPERIMENTOS.

FONTE: DO AUTOR (2015).

Os parâmetros de qualidade do produto e os respectivos métodos de avaliação foram definidos segundo os seguintes critérios: (i) as características a serem controladas nos experimentos, circularidade, variação de diâmetro externo,

rugosidade e forma da superfície retificada. Definido o procedimento de registro visual através de foto realizada através de microscópio sobre a superfície de corte do rebolo após cada experimento, porém este registro foi adotado somente como ferramenta auxiliar de análise dos resultados alcançados (ii) utilizados os mesmos sistemas de medição da produção, (iii) os equipamentos de medição devem estar devidamente calibrados. Os equipamentos de medição devem possuir uma peça padrão de calibração, permitindo aferi-los antes da sua utilização, (iv) as medições foram realizadas por funcionários treinados e habilitados, com experiência maior que 01 ano em operação de máquina e controle de qualidade do processo. (v) os métodos e procedimentos de medição das características do corpo de prova foram os determinados nas respectivas instruções de qualidade e folhas de controle da produção, (vi) os resultados registrados em planilha apropriada. A definição dos parâmetros de qualidades analisados e suas interpretações para os experimentos sem a utilização do sistema de limpeza de rebolo são apresentados no Quadro 4.

Característica de Qualidade	Avaliação do processo do processo de retificação sem utilização do sistema de limpeza de superfície de corte do rebolo
Circularidade do diâmetro externo	Avalia se adoção de parâmetros máximos de retificação adotados para o processo são compatíveis.
Variação do diâmetro externo	Avalia a perda de poder de corte do rebolo por empastamento ou alisamento do grão
Rugosidade do diâmetro externo	Avalia a perda da agressividade do grão do rebolo.
Forma do perfil do diâmetro externo	Avalia a deteriorização do perfil do rebolo.

QUADRO 4: TABELA DE ANÁLISE DO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO.

FONTE: DO AUTOR (2015).

As características de qualidade e suas respectivas interpretações na avaliação do processo de limpeza de superfície de corte de rebolo são mostradas no Quadro 5.

Característica de Qualidade	Avaliação do processo de limpeza da superfície de corte do rebolo
Circularidade do diâmetro externo	Avalia a capacidade do sistema de limpeza em manter o rebolo afiado dentro do intervalo de dressagem determinado com a utilização de parâmetros máximos de retificação definidos para os experimentos.
Variação do diâmetro externo	Avalia o poder do sistema de limpeza de manter o rebolo limpo ao longo do intervalo de dressagem adotado para os experimentos.
Rugosidade do diâmetro externo	Avalia se as arestas de corte do grão abrasivo do rebolo se mantêm afiadas ao longo do intervalo de dressagem adotado para os experimentos.
Forma do perfil do diâmetro externo	Avalia a perda do perfil de corte do rebolo ao longo do intervalo de dressagem adotado para os experimentos. .

QUADRO 5: TABELA DE ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE LIMPEZA.

FONTE: DO AUTOR (2015).

A Figura 40 apresenta os equipamentos de medição utilizados para medir as características dimensionais acima citadas tanto para as peças usinadas nos testes de validação da condição atual de produção sem o equipamento de limpeza assim como para as peças usinadas nos experimentos com a aplicação do sistema de limpeza.

Característica da peça	Sistema de medição	Foto do equipamento
Circularidade do diâmetro externo	Aparelho marca Taylor Robson, modelo Tayrond 585 com manuseio e leitura de medidas realizado por inspetor de qualidade. Instalado em sala de controle com temperatura ajustada em 21 graus. Sala isolada da produção.	
Varição do diâmetro externo	Dispositivo de bancada com relógio comparador. Equipamento localizado em posto de controle da qualidade na produção	
Rugosidade	Rugosímetro marca Taylor Robson, modelo Taylor Surf 2, operado por inspetor de qualidade. Equipamento instalado em sala de controle com temperatura ajustada em 21 graus. Sala isolada da produção	
Forma do diâmetro externo	Aparelho marca Taylor Robson, modelo Tayrond 585, operado por inspetor de qualidade. Equipamento instalado em sala de controle com temperatura ajustada para 21 graus. Sala isolada da produção.	
Superfície de corte do rebolo	Microscópio eletrônico marca dnt, modelo Dis Micro 2.0 scale, conectado a um notebook. Equipamento instalado ao lado da retificadora. Operado pelo técnico de produção.	

FIGURA 40: EQUIPAMENTOS DE CONTROLE E MEDIÇÃO.

FONTE: DO AUTOR (2015).

A especificação do rebolo e os parâmetros de dressagem para os experimentos foram definidos com base nos seguintes critérios: (i) manter a mesma especificação de rebolo indicada na folha de processos de produção da peça definida como o corpo de prova (ii) utilizar os parâmetros atuais consagrados na produção, especificados em folha de processo, porém para o experimento sem a utilização de sistema de limpeza e adotar o intervalo de dressagem o maior possível porém tendo como limitante a perda do perfil do rebolo, (ii) o ferramental utilizado é o indicado na folha de processos e submetidos a uma prévia inspeção pelo operador da retificadora, (iii) o rolo diamantado utilizado nos experimentos também foi submetido a uma prévia

inspeção para conformar possuir a forma correta, (iv) o rebolo foi submetido a uma prévia verificação de trincas realizado pelo operador. Antes da realização de cada experimento o rebolo foi submetido a balanceamento para evitar surgimento de vibrações indesejadas devido pela distribuição irregular de massa, erros de forma por eventuais danos superficiais. O fluido refrigerante utilizado na produção foi o de limpeza da superfície de corte do rebolo. A definição do intervalo de dressagem utilizado nos experimentos foi obtida a partir de teste de comprovação do valor de intervalo historicamente utilizado para produção de três peças. Desta maneira foi proposto um experimento representado no fluxograma apresentado na Figura 41. Os resultados confirmaram que a partir da quarta peça retificada, sem utilização de sistema de limpeza da superfície de corte e com o uso de parâmetros de retificação médios, não foi possível manter a qualidade desejada da peça, validando assim os dados atuais utilizados pela produção. A Tabela 4 apresenta a definição dos parâmetros de retificação utilizados nos experimentos com sistema de limpeza de rebolo.

Parâmetro	Descrição / Valor
Especificação do rebolo	AA100L6V16
Dimensões do rebolo (mm)	500 x 36 x 203,0
Fluido de refrigeração	Castrol RI0010 10012
Tratamento térmico da peça	Tempera plena
Material da peça	100CrMn6
Intervalo de dressagem (peça)	a cada 08 peças
Velocidade de corte (m/s)	80,0
Diâmetro inicial da peça (mm)	85,0
Sobremetal a ser removido (mm)	0,4
Dureza superficial da peça (HRC)	58,6 – 61,5
Velocidade de desbaste 1 ($\mu\text{m/s}$)	70,7
Velocidade de desbaste 2 ($\mu\text{m/s}$)	61,4
Velocidade de desbaste 3 ($\mu\text{m/s}$)	38,7
Velocidade de acabamento ($\mu\text{m/s}$)	21,5
Tempo de faiscagem (s)	0,3 – 0,5

TABELA 4: PARÂMETROS DE RETIFICAÇÃO DOS EXPERIMENTOS COM LIMPEZA.

FONTE: DO AUTOR (2015).

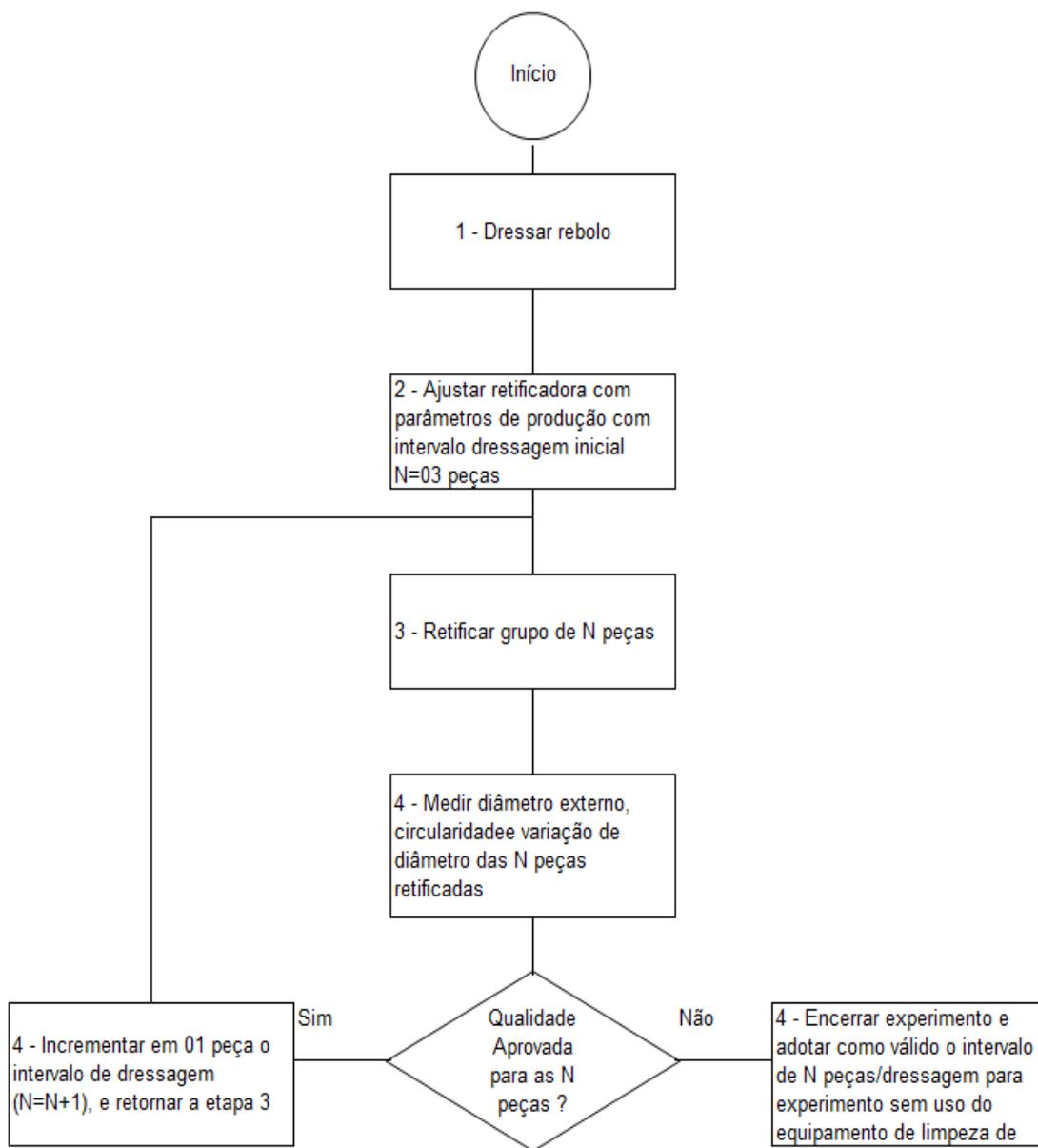


FIGURA 41: FLUXOGRAMA VALIDAÇÃO DO INTERVALO DE DRESSAGEM.

FONTE: DO AUTOR (2015).

4.4. PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

Na etapa 3 do trabalho a primeira tarefa foram definidas e avaliadas as variáveis dependentes, que correspondem às saídas do sistema de retificação e as variáveis independentes, que representaram os fatores do experimento e então gerada a matriz de experimentos Figura 42 e o resumo do procedimento dos experimentos é apresentado na Tabela 5.

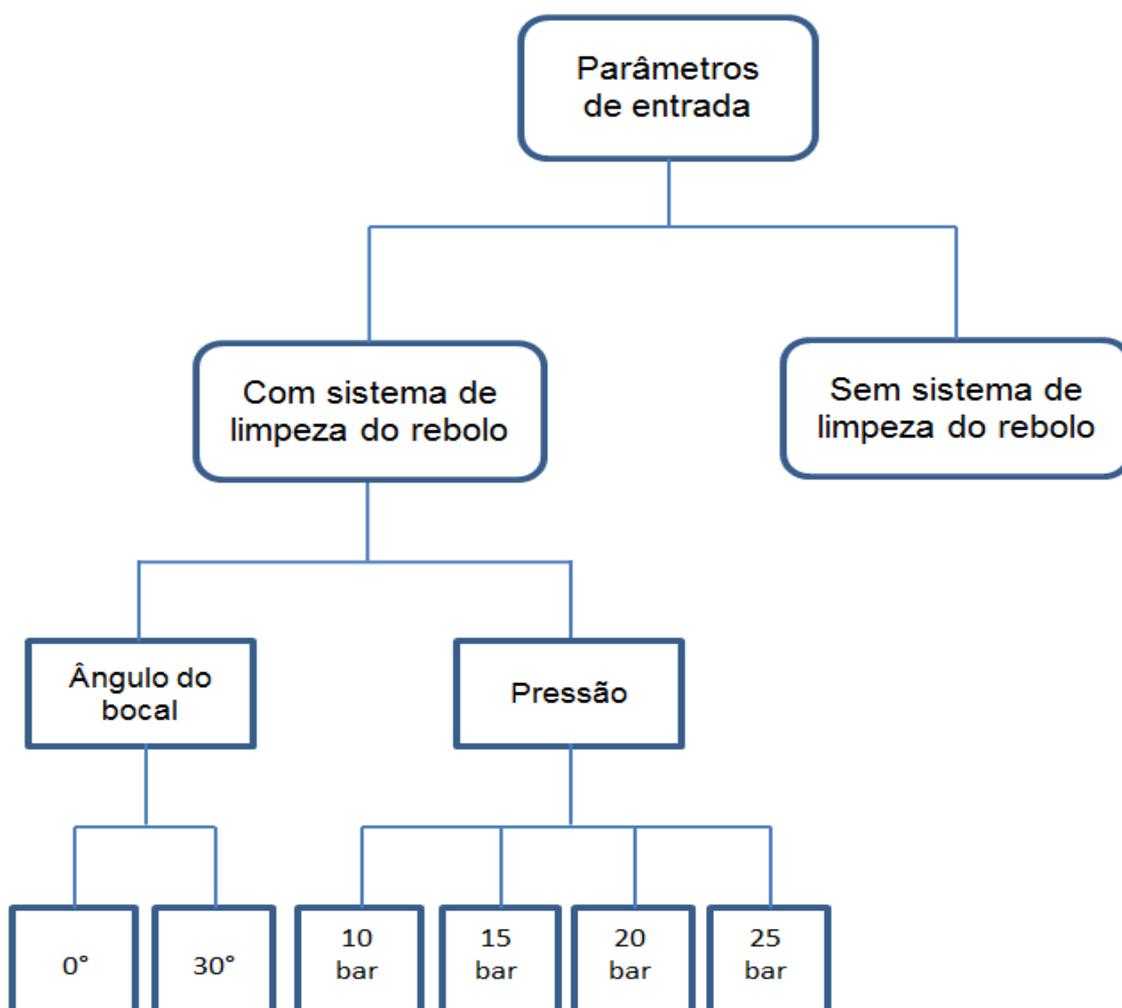


FIGURA 42: MATRIZ DE EXPERIMENTOS.

FONTE: DO AUTOR (2015).

Procedimento de experimento - Sistema de limpeza de rebolo		
1. Objetivos: Avaliar o processo de retificação do aço endurecido SAE 52100 com o sistema de limpeza do rebolo.		
2. Informações		
Processo de retificação		
Máquina:	Retificadora Externa de Mergulho: PGE10 150	
Rebolo:	Espec: Desenho: 62055508 - Norton	
Velocidade periférica:	80 m/s.	
Produto:	AU (Esférico) - AU 209-DDB-FA125-AH20	
Fluído de corte:	Emulsão	
Ferramentas dressagem:	Rolo diamantado	
Quantidade de peças para análise:	08 peças de cada experimento (TC=15,25 s)	
3. Variáveis experimentais		
Variáveis resposta	Método de medição	Local de medição
1- Rugosidade 2- Variação de diâmetro 3- Circularidade 4- Perfil 5- Ciclo de dressagem	1- Rugosímetro 2- Dispositivo de diâmetro 3- Circularímetro 4- Medidor de perfil 5- SWD	Laboratórios - Schaeffler
Fatores	Níveis	
1- Pressão 2- Ângulo do bocal 3- Distância (bocal - rebolo) 3- Sobre metal médio	1,0, 1,5, 2,0 e 2,5 Mpa 0 - 30° 20 mm 0,4 mm	
Variáveis ruído	Método de controle	
- Variação do sobremetal - Obstrução dos bocais - Parâmetros de dressagem	Agrupar peças antes dos experimentos (manter 0,01mm de variação de sobre metal). Avaliar saída do fluido dos bocais a cada experimento. Avaliar antes de iniciar os experimentos.	
4. Forma de condução do experimento: Conforme matriz de aleatorização, conforme DOE.		
5. Matriz de aleatorização: Através do minitab.		
6. Matriz de planejamento de análise estatística:		
7. Método de análise estatística:		
Fatorial completo: 2^k		
Fatores: 2;		
Fator 1: 4 níveis		
Fator 2: 2 níveis		
Réplica: 2;		
Blocos: 0		
Pontos centrais: 0.		

TABELA 5: QUADRO RESUMO DOS EXPERIMENTOS.

FONTES: DO AUTOR (2015).

A avaliação visual da superfície de corte do rebolo através do uso de microscópio eletrônico teve o objetivo de fornecer informações complementares sobre as características de qualidade citadas na Tabela 5, de forma a auxiliar na avaliação da eficiência e eficácia do sistema de limpeza de rebolos. Para que esta avaliação visual fosse realizada foi necessário adotar padrões visuais de diferentes condições de empastamento, tornando possível especificar um grau de contaminação da superfície do rebolo. Para o processo de captura de imagens da superfície de corte do rebolo indicado do item 6 do fluxograma foi realizado posicionando a câmera e ajustando foco manualmente o foco de imagem e capturando com o auxílio de um notebook. O método utilizado para coleta de imagens foi baseado nas recomendações do trabalho realizado por Feng e Chen, (2007). A Figura 43 apresenta o arranjo físico.



FIGURA 43: REGISTRO VISUAL ATRAVÉS DE MICROSCÓPIO PORTÁTIL.

FONTE: DO AUTOR (2015).

O manuseio e identificação das corridas para posterior controle dimensional é ilustrado na Figura 44. Uma vez usinados os corpos de prova foram banhados em óleo protetivo para evitar o surgimento de oxidação superficial, etiquetados com identificação do número do experimento, o valor do ângulo de incidência do jato de limpeza e a pressão de limpeza utilizados.



FIGURA 44: PREPARAÇÃO DAS CORRIDAS APÓS EXPERIMENTOS.

FONTE: DO AUTOR (2015).

4.5. REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Para a execução dos experimentos foram definidos fluxogramas. A Figura 45 ilustra as etapas do experimento dedicado a avaliar a performance do processo de retificação sem a aplicação do sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo. O fluxograma dos experimentos com aplicação de limpeza é apresentado na Figura 46.

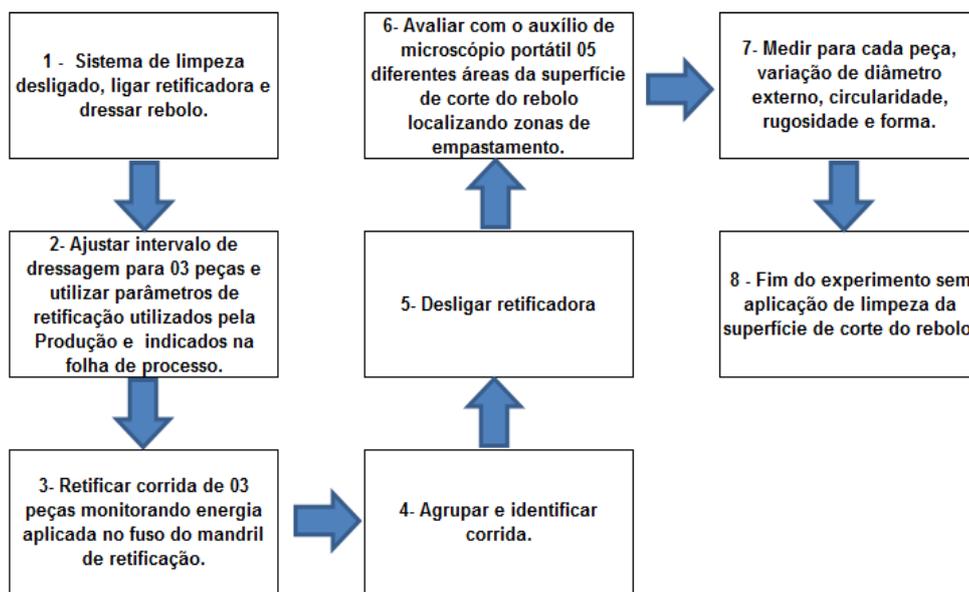


FIGURA 45: FLUXOGRAMA EXPERIMENTO SEM APLICAÇÃO DE LIMPEZA DE REBOLO.

FONTE: DO AUTOR (2015).

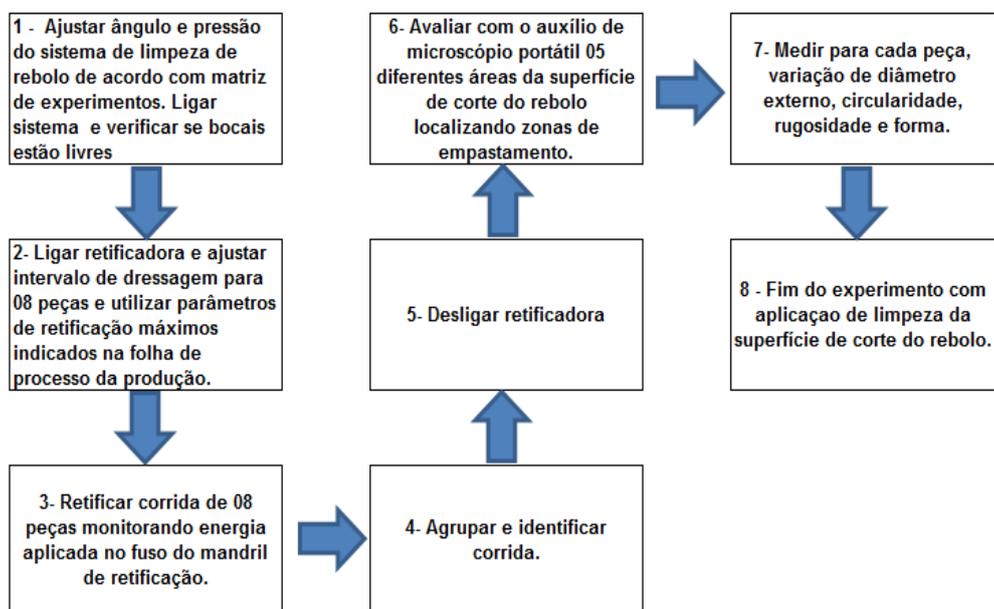


FIGURA 46: FLUXOGRAMA EXPERIMENTOS COM LIMPEZA DE REBOLO.

FONTE: DO AUTOR (2015).

4.6. RESULTADOS – EMPASTAMENTO

Através do registro fotográfico da superfície de corte do rebolo, realizado ao final de cada experimento, foi possível detectar a ocorrência do empastamento nos poros existentes entre os grãos abrasivos. A Figura 47 apresenta a superfície de corte do rebolo após a realização do experimento com 0 MPa ou seja, sem a utilização do sistema de limpeza e com os parâmetros tradicionais de retificação utilizados pela produção.

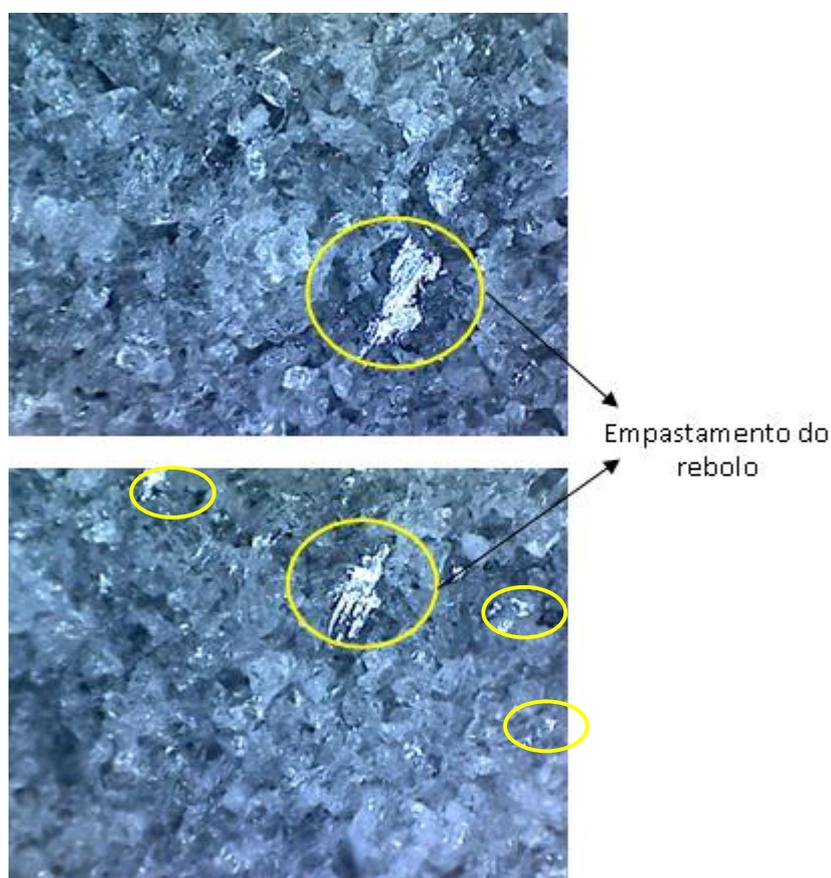


FIGURA 47: SUPERFÍCIE DO REBOLO (0MPa).

FONTE: DO AUTOR (2015).

As imagens colhidas mostram a presença de metal brilhante incrustado entre os poros do rebolo, oriundo da peça retificada. Como esperado, o material incrustado apresenta uma forma típica de material alisado com ausência de

arestas de corte. Há presença de empastamentos com dimensões menores As Figuras 48 e 49 apresentam a superfície de corte após aos experimentos com 1,0 Mpa e ângulo de inclinação do bocal zero grau (Figura 47) e 1,0 MPa e ângulo de inclinação 30 graus (Figura 48).

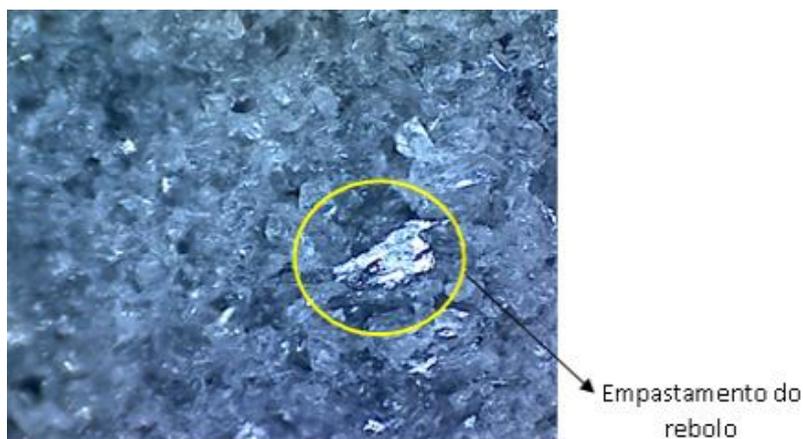


FIGURA 48: SUPERFÍCIE DO REBOLO (1,0 MPa E 0°).

FONTE: DO AUTOR (2015).

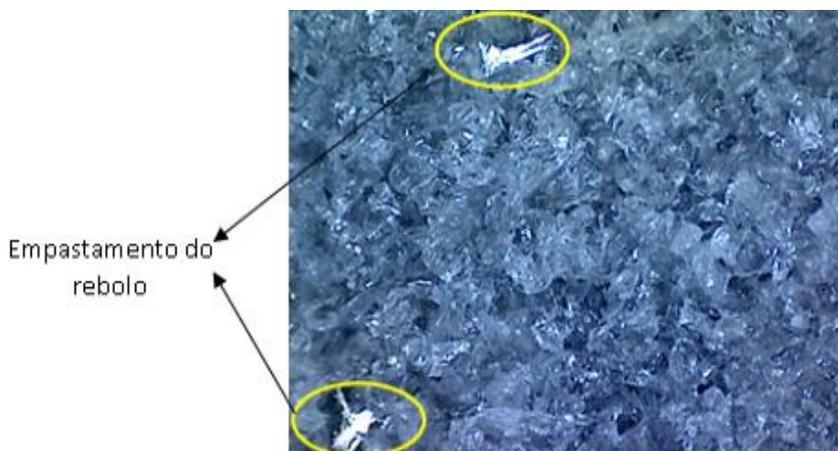


FIGURA 49: SUPERFÍCIE DO REBOLO (1,0 MPa E 30°).

FONTE: DO AUTOR (2015).

Em ambas situações foram detectadas a presença de empastamento porém apenas em tamanho similar as encontradas no experimento sem limpeza. As Figuras 50 e 51 apresentam a superfície de corte do rebolo após os

experimentos com 1,5 MPa e ângulos de inclinação do bocel de zero e trinta graus.

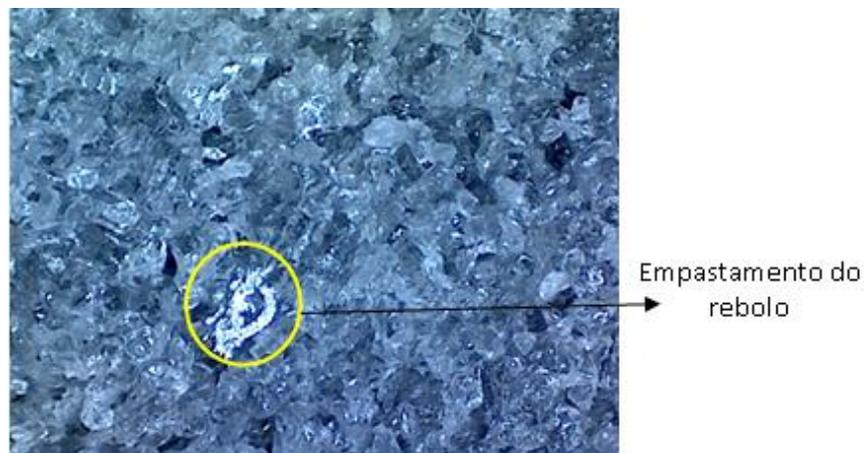


FIGURA 50: SUPERFÍCIE DO REBOLO (1,5 MPa E 0°).

FONTE: DO AUTOR (2015).

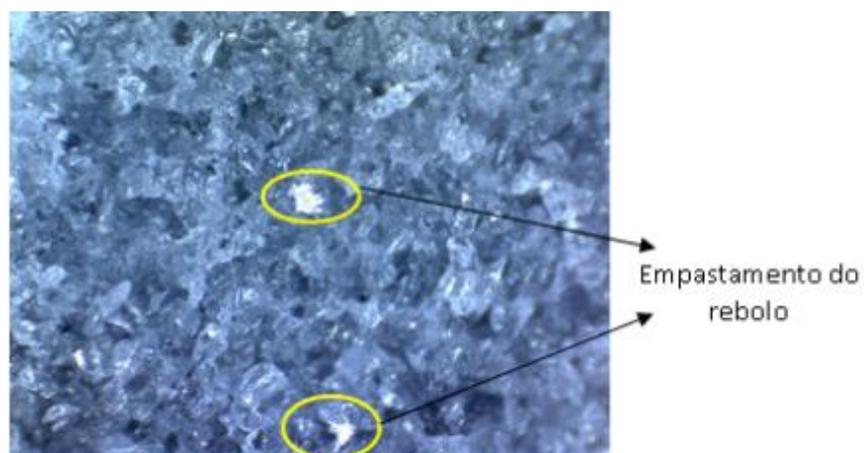


FIGURA 51: SUPERFÍCIE DO REBOLO (1,5 MPa E 30°).

FONTE: DO AUTOR (2015).

A aplicação de 1,5 MPa não foi capaz de remover partículas metálicas de tamanho similar as encontradas no experimento sem a utilização da limpeza porém foi detectado que as pequenas incrustações de metal não estão mais presentes gerando uma superfície de corte mais limpa com grãos potencialmente com maior poder de corte. Para os ensaios utilizando pressão de 2,0 MPa, Figuras 52 e 53, foi evidenciado a presença de uma menor

ocorrência de empastamento da superfície do rebolo com dimensões menores que as dos experimentos anteriores.

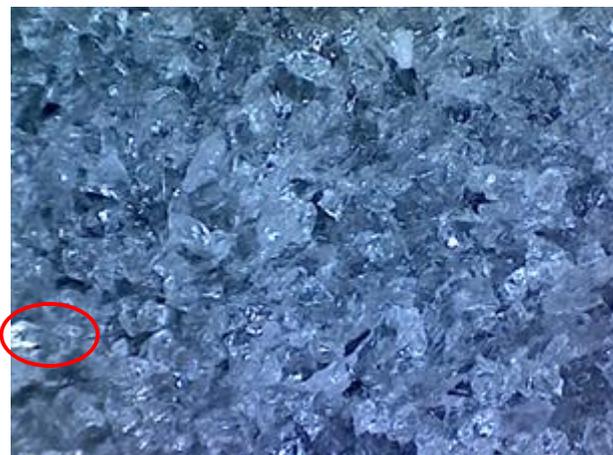


FIGURA 52: SUPERFÍCIE DO REBOLO (2,0 MPa E 0°).

FONTE: DO AUTOR (2015).



FIGURA 53: SUPERFÍCIE DO REBOLO (2,0 MPa E 30°).

FONTE: DO AUTOR (2015).

Os melhores resultados de qualidade de limpeza do rebolo foram obtidos com a aplicação de 2,5 Mpa com da inclinação do jato de limpeza igual tanto a zero grau, quanto com 30 graus,

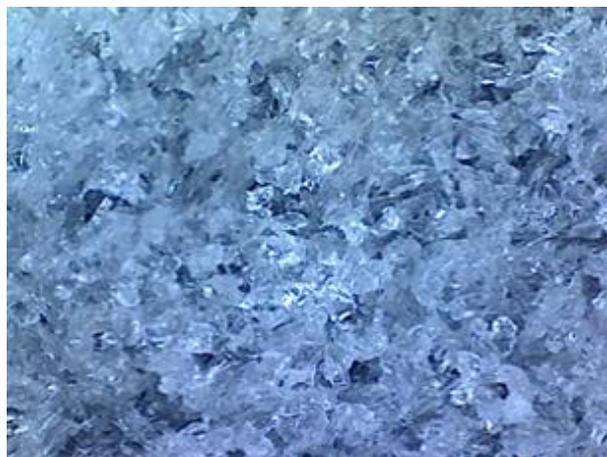


FIGURA 54: SUPERFÍCIE DO REBOLO (2,5 MPA E 0 °).

FONTE: DO AUTOR (2015).



FIGURA 55: SUPERFÍCIE DO REBOLO (2,5 MPA E 30 °).

FONTE: DO AUTOR (2015).

A eficiência da limpeza pôde ser comprovada durante a realização dos experimentos através medição da potência de retificação necessária aplicada no fuso de retificação da máquina. Nos experimentos com pressão 2,5MPa foram registrados os menores valores de potência aplicada pelo fuso indicando que a as arestas dos grãos mantiveram o poder de corte mesmo com um

intervalo maior de dressagem. Para comprovar esta afirmação se faz mandatório a análise estatística dos resultados dimensionais das amostras obtidas após cada experimento.

4.7. RESULTADOS – ANÁLISE DO DESVIO DE CIRCULARIDADE

Para os ensaios realizados utilizando o sistema de limpeza de rebolo, as diferenças entre os valores de circularidade foram comparadas entre si através da utilização do procedimento de Tukey, considerando um nível de significância de 5%. Mostraram-se significativas as relações de pressões 1,0 MPa – 2,5 MPa e 2,0 MPa – 2,5 MPa conforme apresentado no Gráfico 1.

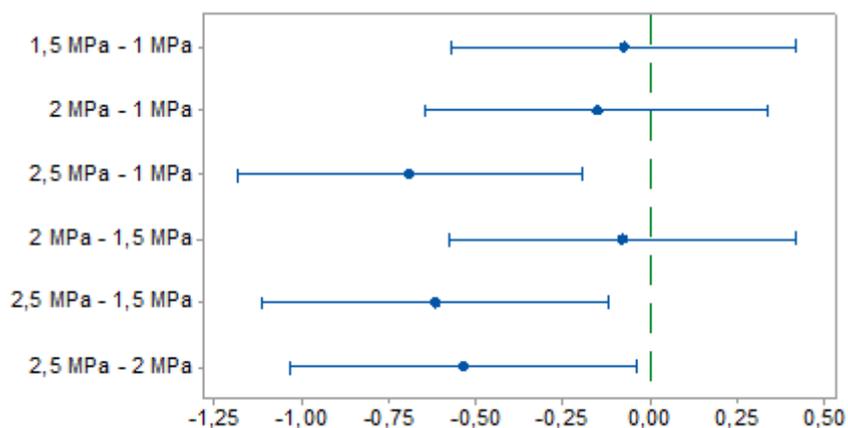


GRÁFICO 1: TESTE DE COMPARAÇÃO MÚLTIPLA DOS VALORES DE CIRCULARIDADE.

FONTE: DO AUTOR (2015).

No Gráfico 2, estão representados os valores do desvio de circularidade (μm) e sua variabilidade em função da variação da pressão de bombeamento do fluido de corte do sistema de limpeza da superfície de corte do rebolo.

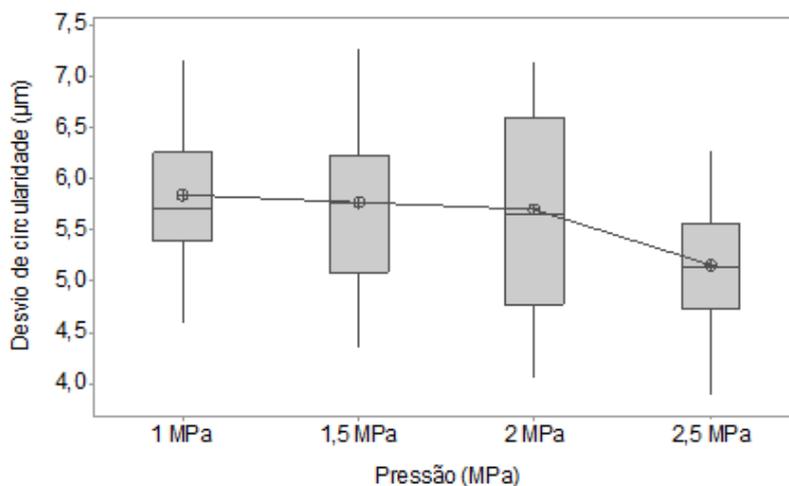


GRÁFICO 2: VALORES DOS DESVIOS DE CIRCULARIDADE EM FUNÇÃO DA PRESSÃO.

FORTE: DO AUTOR (2015).

Observa-se que no Gráfico 2 ocorreu uma redução tanto nos valores dos desvios de circularidade como da sua variabilidade para o ensaio com pressão 2,5 MPa. Os Gráficos 3 e 4 apresentam os valores médios dos desvios de circularidade para os ângulos de inclinação do bocal de 0° e 30°. Observa-se uma significativa diferença entre os valores de circularidade entre os ensaios utilizando com a maior pressão (2,5 MPa) e sem a utilização do sistema (Pressão igual a “0° MPa”). Os ensaios realizados com pressões abaixo de 2,5 MPa e sem a aplicação do sistema (0° MPa), geraram maiores desvios de circularidade. A análise destes resultados deve levar em consideração os efeitos que a característica de qualidade circularidade representa para o processo de retificação apresentado nos Quadros 4 e 5 anteriormente apresentados no Capítulo 4.

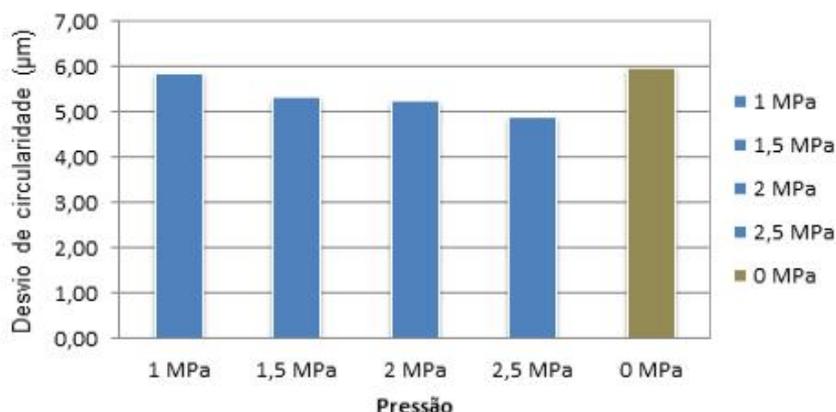


GRÁFICO 3: DESVIO DE CIRCULARIDADE - INCLINAÇÃO DO BOCAL = 0 °

FONTE: DO AUTOR (2015).

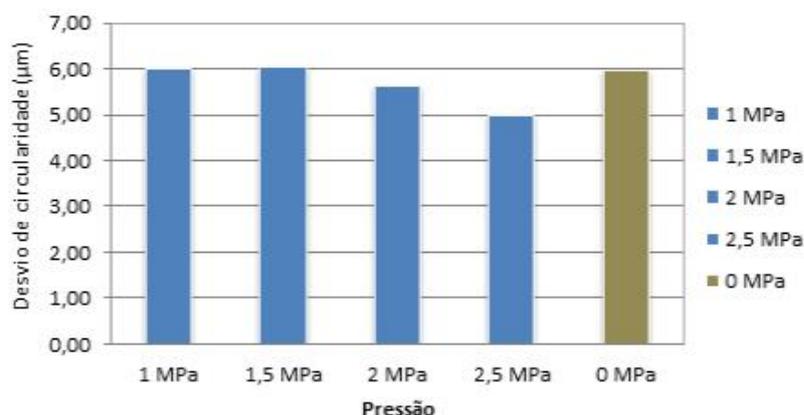


GRÁFICO 4: DESVIO DE CIRCULARIDADE - INCLINAÇÃO DO BOCAL = 30 °

FONTE: DO AUTOR (2015).

Considerando que os resultados de circularidade sem aplicação do sistema de limpeza já estão dentro da tolerância do desenho de produto, os números alcançados com a aplicação de limpeza de rebolo indicam que a adição da técnica de limpeza, neste caso, independente do ângulo de inclinação do bocal, da pressão do jato de emulsão geram um incremento da qualidade do produto devido ao fato do sistema de limpeza conseguir manter o rebolo afiado com um intervalo maior entre dressagens. A constatação que os menores desvios de circularidade são obtidos com a aplicação de 2,5 MPa vai de encontro a análise

fotográfica da superfície de corte que se apresenta isenta de ocorrência de empastamento. Pode ser afirmado que no quesito circularidade a introdução da técnica de limpeza permitiu a aplicação de parâmetros de retificação que reduziram o tempo de processo. O Gráfico 5 apresenta a interação entre as variáveis pressão e ângulo de incidência do jato de limpeza. Observa-se que tanto para 0° e 30° os valores do desvio de circularidade são minimizados com o aumento da pressão.

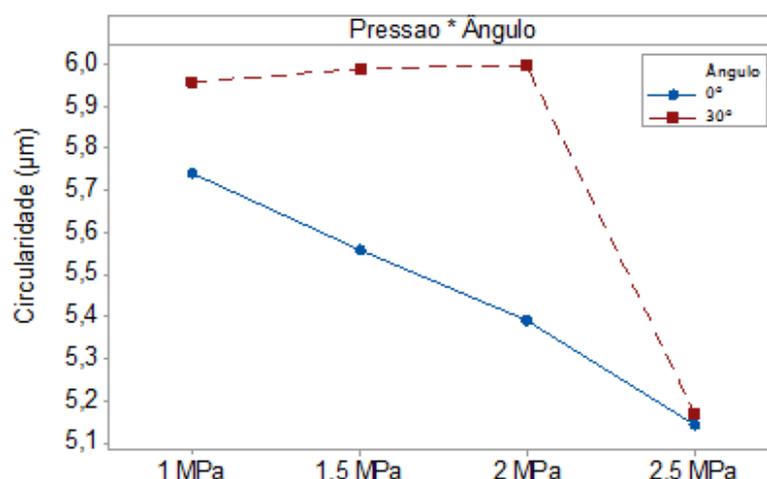


GRÁFICO 5: INTERAÇÃO ENTRE PRESSÃO E ÂNGULO DO JATO.

FONTE: DO AUTOR (2015).

No Gráfico 6 observa-se o gráfico dos efeitos principais onde a variação dos níveis de pressão e ângulo do bocal interferem nos valores de circularidade. Conforme gráfico, pode-se observar que os valores de circularidade podem ser reduzidos com o aumento na pressão de bombeamento do fluido e com o menor ângulo de ajuste do bocal, ou seja, 0°.

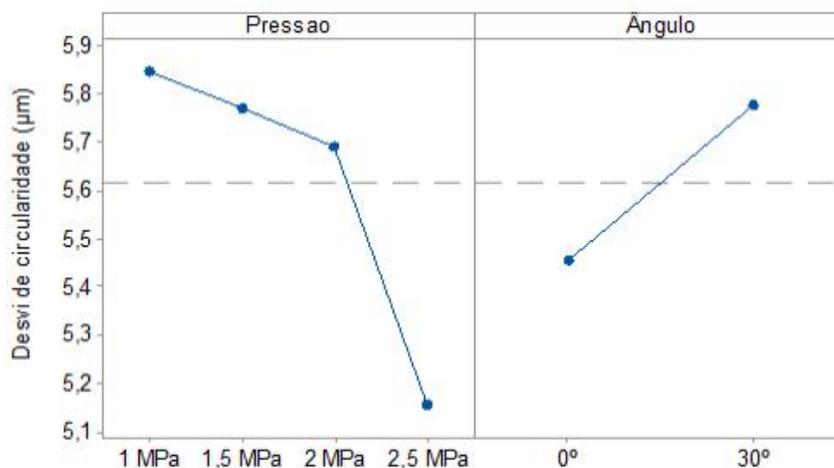


GRÁFICO 6: EFEITO DA PRESSÃO E DO ÂNGULO NA CIRCULARIDADE.

FONTE: DO AUTOR (2015).

O ângulo de limpeza 0° não só reduz os valores do desvio de circularidade, mas também a variabilidade, conforme mostra o Gráfico 7.

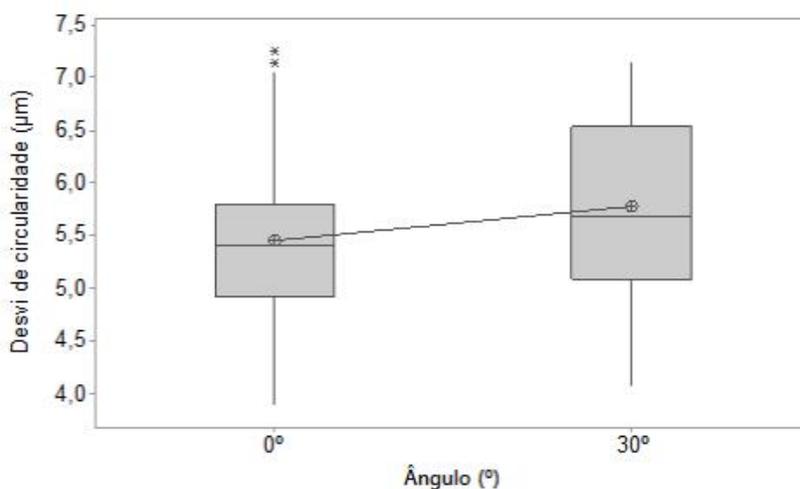


GRÁFICO 7: DESVIO DE CIRCULARIDADE EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DO JATO.

FONTE: DO AUTOR (2015).

O ângulo de ajuste 0° do jato favorece uma limpeza mais eficiente da superfície de corte do rebolo devido a um menor distúrbio da configuração do jato de limpeza beneficiado por uma menor resistência da barreira pneumática em existente ao redor do rebolo. Uma menor resistência desta barreira pneumática ocorre devido a configuração interna do projeto de construção da retificadora

que na sua parte inferior possui obstáculos mecânicos que agem como rompedores do fluxo de ar gerado pela rotação do rebolo. Os resultados obtidos também confirmam a teoria sobre eficiência de lavagem desenvolvida no trabalho de Sinot, Chevrier e Padilla (2006), a qual afirma que a componente da força aplicada pelo jato de limpeza sobre uma perda do seu valor devido ao ângulo de deflexão (d), gerado pela barreira pneumática. Com o rompimento mecânico desta barreira pneumática a deflexão é nula e portanto o valor associada a componente da força de limpeza é maior gerando uma limpeza mais eficiente

4.8. RESULTADOS – ANÁLISE DOS VALORES DE RUGOSIDADE

Os resultados dos valores de rugosidade (R_a), com a utilização do sistema de limpeza de rebolo estão representados no Gráfico 8. A análise através do procedimento de *Tukey* para um grau de significância de 5%, mostra não haver diferença significativa entre as variáveis testadas.

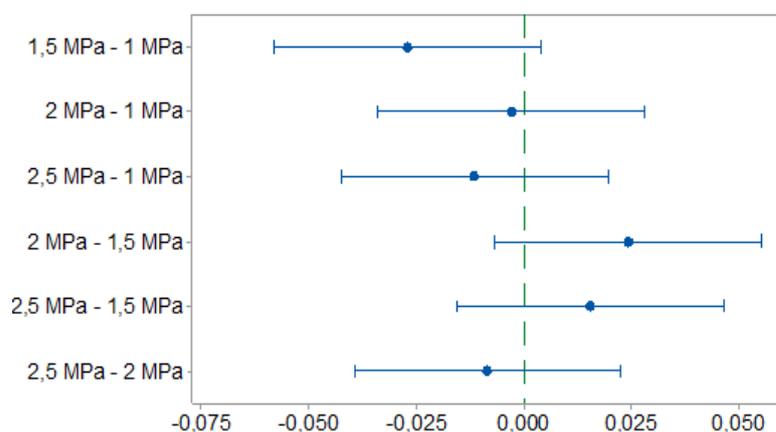


GRÁFICO 8: TESTE DE COMPARAÇÃO MÚLTIPLA DOS VALORES DE RUGOSIDADE.

FONTE: DO AUTOR (2015).

Mesmo que tenha sido constatada a ocorrência do empastamento para pressões de 1,0 MPa e 1,5 MPa, esse empastamento não foi o suficiente para influenciar negativamente os valores de rugosidade que ficaram abaixo do

especificado em desenho de produto como apresentado no Gráfico 9. Esta constatação permite afirmar que mesmo com um intervalo maior de peças entre dressagem a adição do processo de limpeza da superfície de rebolo manteve a por um tempo maior a agressividade dos grãos de corte permitindo adoção de maiores valores de avanços de retificação porém com menor demanda de energia para arrancamento de material da peça.

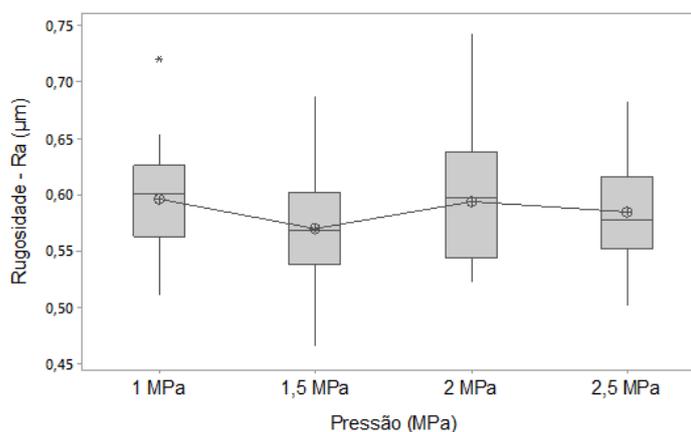


GRÁFICO 9: VALORES DE RUGOSIDADE EM FUNÇÃO DA PRESSÃO.

FONTE: DO AUTOR (2015).

O Gráfico 10 apresenta os valores de rugosidade para as duas inclinações 0° e 30°.

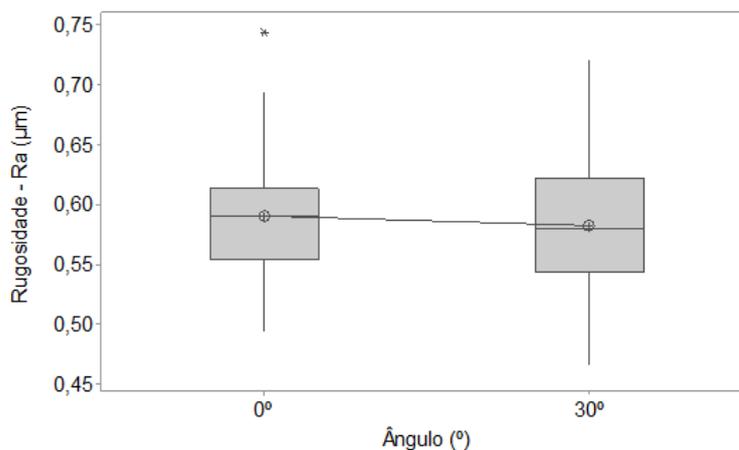


GRÁFICO 10: VALORES DE RUGOSIDADE EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DO JATO.

FONTE: DO AUTOR (2015).

Observa-se que as diferenças dos valores de rugosidade não foram significativas. A utilização do ângulo 30° apresentou uma maior dispersão dos valores de rugosidade. Os valores médios de rugosidade obtidos com os experimentos sem a aplicação de limpeza de rebolo e com a aplicação estão representados nos Gráficos 11 e 12. Analisando os resultados de ambas figuras verifica-se uma diferença significativa entre os resultados sem a aplicação do sistema de limpeza (0 MPa), e os resultados com a aplicação da técnica, porém quando aplicado a limpeza não foram constatadas diferenças significativas no valor da rugosidade alterando-se o ângulo de incidência do jato de 0° para 30° .

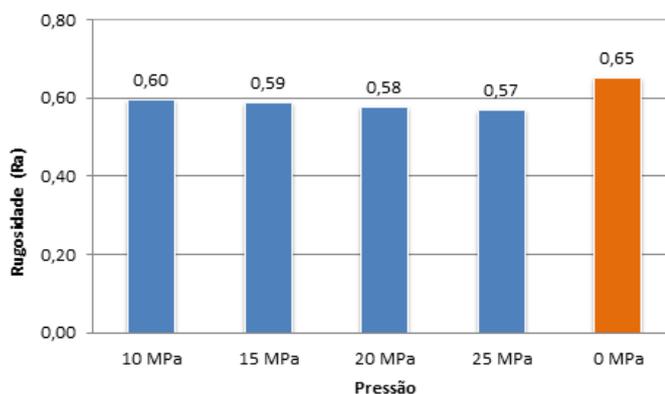


GRÁFICO 11: VALORES DE RUGOSIDADE COM INCLINAÇÃO DO JATO EM 0° .

FONTE: DO AUTOR (2015)

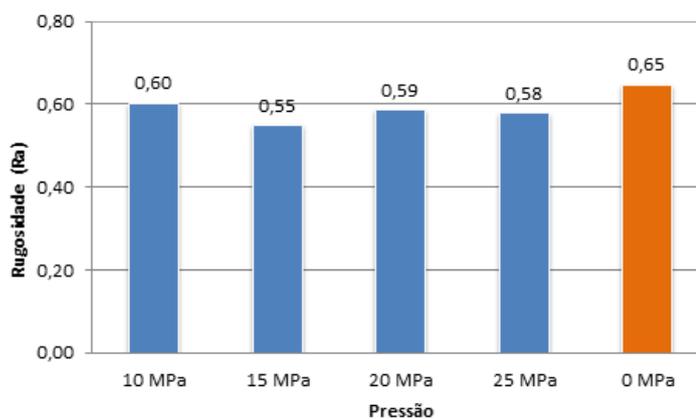


GRÁFICO 12: VALORES DE RUGOSIDADE COM INCLINAÇÃO DO JATO EM 30° .

FONTE: DO AUTOR (2015).

O menor valor de rugosidade obtido, mesmo em pressões mais baixas 1,0 MPa e 1,5 MPa, onde a ocorrência de empastamento foi detectada pelo registro fotográfico da superfície do rebolo, pode ser explicado pela menor concentração de poros empastados na superfície do rebolo quando comparado a superfície obtida sem a aplicação a técnica de limpeza (0 MPa), indicando a ação benéfica da adoção de um jato adicional de limpeza mesmo que a retirada do material empastado seja parcial, porém deve-se ter sempre considerado na análise da rugosidade a aplicação final a qual a superfície retificada estará sujeita, rugosidades muito baixas podem não ser as recomendadas em aplicações mecânicas que necessitem de uma certa dose de interferência de montagem com outras peças.

4.9. RESULTADOS – ANÁLISE DOS VALORES DE DISPERSÃO DO DIÂMETRO EXTERNO

As diferenças entre os valores de variação do diâmetro externo retificado estão representadas no Gráfico 13. Observa-se uma menor variação de diâmetros para ensaios realizados utilizando o sistema de limpeza de rebolos quando utilizada a pressão 2,5 MPa. Os ensaios realizados para as pressões 1,0 MPa e 1,5MPa apresentaram uma variação maior do diâmetro externo retificado.

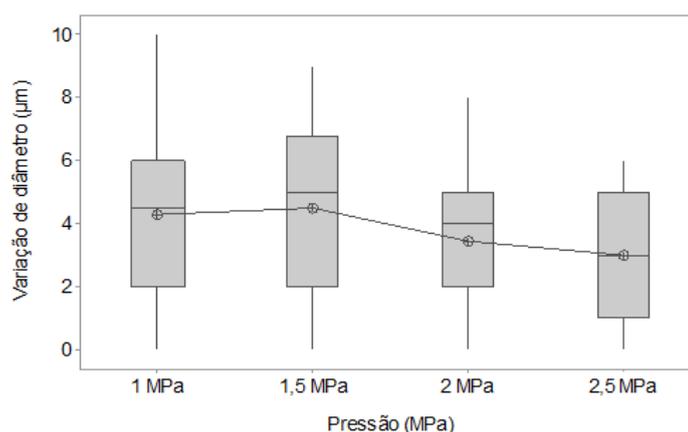


GRÁFICO 13: VALORES DE VARIAÇÃO DO DIÂMETRO POR PRESSÃO APLICADA.

FONTE: DO AUTOR (2015).

Comparando os resultados dos Gráficos 14 e 15, observa-se que para o ângulo de 0° a menor variação foi obtida quando aplicada a pressão de 2,5 MPa enquanto os experimentos realizados com ângulo de 30° mostram que a menor variação de diâmetro externo ocorre quando a pressão é de 2,0 MPa.

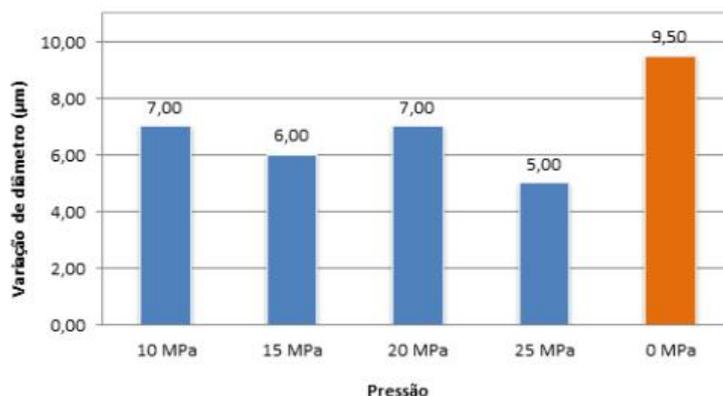


GRÁFICO 14: VARIAÇÃO DE DIÂMETRO COM INCLINAÇÃO DO JATO EM 0° .

FONTE: DO AUTOR (2015).

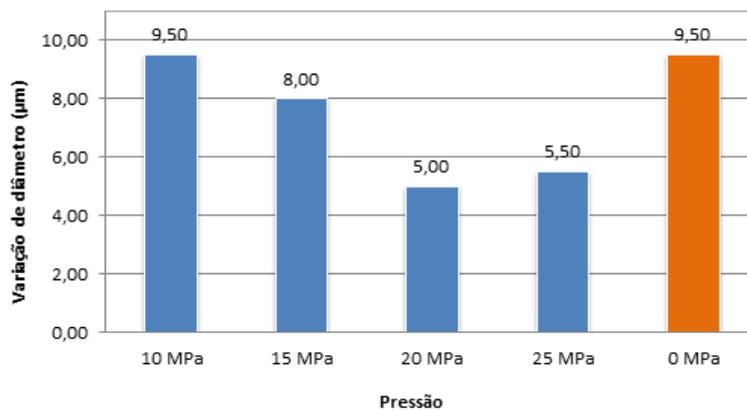


GRÁFICO 15: VARIAÇÃO DE DIÂMETRO COM INCLINAÇÃO DO JATO EM 30° .

FONTE: DO AUTOR (2015).

No Gráfico 16 estão representados os gráficos dos efeitos principais com os valores da variação do diâmetro externo retificado em função da pressão aplicada pelo jato de limpeza do rebolo e o ajuste do ângulo de incidência do jato. Observa-se que a menor variação de diâmetro pode ser obtida com a maior pressão aplicada (2,5 MPa) e o menor ângulo de incidência do jato (0°).

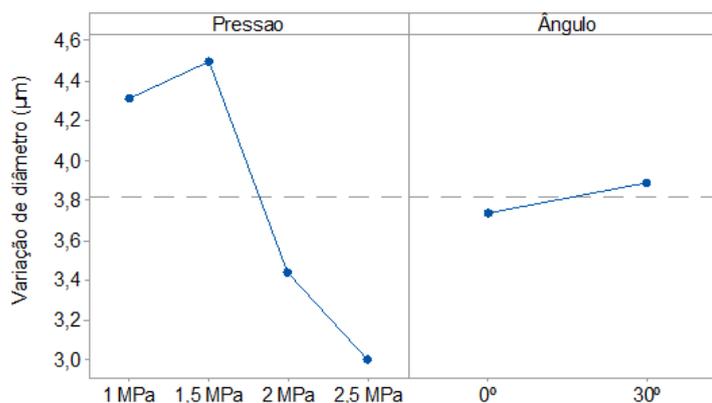


GRÁFICO 16: RELAÇÃO ENTRE VARIAÇÃO DO DIÂMETRO, PRESSÃO E ÂNGULO.

FONTES: DO AUTOR (2015).

Os resultados permitem concluir que com 2,5 MPa de pressão de limpeza e 0° para o ângulo de incidência ocorre a situação na qual há a menor perda do poder de corte do rebolo devido ao empastamento ou devido ao alisamento do grão. Os experimentos mostraram que nesta condição de pressão e ângulo o jato não somente retira as partículas metálicas aderidas como auxilia na geração de novas arestas de corte afiadas indo de encontro com o registro fotográfico da superfície do rebolo (Figura 53).

4.10. RESULTADOS – VAZÃO APLICADA NOS EXPERIMENTOS

A Tabela 6 apresenta os valores das vazões do fluido de limpeza aplicada nos experimentos. O valor da vazão foi obtido a partir de leitura direta do manômetro instalado no equipamento (Figura 37). O valor obtido da vazão está ligado a pressão aplicada em cada experimento. A Tabela 6 mostra que a maior vazão é obtida com a pressão 2,5 Mpa (24,5 L/min). Nos experimentos realizados por Barnejee, Ghosal e Dutta (2008), foi constatado que apenas 7% de um jato aplicado a 30°, com uma vazão de 22,0 L/min, atingem efetivamente a superfície de corte de um rebolo devido a ação da barreira pneumática. Também afirmam os autores que os efeitos de limpeza são significativos a partir de 2,0 Mpa de pressão. Conclui-se que 0° de ângulo de incidência do jato de limpeza e 2,5 Mpa temos a condição de máxima remoção do empastamento superficial.

Vazão aplicada em cada experimento (obtida por leitura direta do manômetro)		
Pressão (bar)	Vazão (L/min)	Ângulo bucal (°)
25	24,5	0
25	24,5	30
20	21,4	0
10	14,7	30
15	19,3	30
15	19,3	0
10	15	30
20	21,6	30
10	15,3	0
25	24,3	30
25	24,3	0
15	18,5	0
15	18,5	30
20	21,8	0
20	21,8	30
10	14,6	0

TABELA 6: VAZÕES E PRESSÕES APLICADAS NOS EXPERIMENTOS.

FONTE: DO AUTOR (2015).

4.11. RESULTADOS – ANÁLISE DA FORMA DA PEÇA RETIFICADA

Não foram detectados danos da superfície de corte do rebolo após os experimentos

4.12. RESULTADOS – ANÁLISE DE QUEIMA DE RETÍFICA

Não foram detectadas alterações na estrutura das amostras Figura 56.

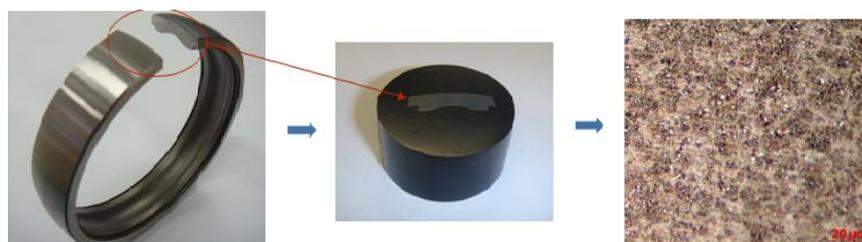


FIGURA 56: ESTRUTURA DAS AMOSTRAS.

FONTE: DO AUTOR (2015).

4.13. RESULTADOS – ANÁLISE DO IMPACTO NA PRODUTIVIDADE

O impacto na produtividade e custos de retificação foi determinado a partir do acompanhamento do uso do sistema de limpeza de rebolos por um período de uma semana na célula de manufatura. Baseado nos resultados obtidos nos experimentos foram fixados os valores da pressão de limpeza em 25,0 MPa e o ângulo de incidência do jato em 0°. A análise da viabilidade econômica da inserção do sistema de limpeza na célula de manufatura avaliada é apresentada na Tabela 7.

Descrição	Sem o sistema de limpeza de rebolos (atual).	Com o sistema de limpeza de rebolo (0°, 2,5MPa)
Tempo máquina [min]	0,300	0,275
Peças por diamantagem [unidade]	3	8
Compensação por diamantagem [mm]	0,003	0,003
Diâmetro inicial do rebolo [mm]	500	500
Diâmetro final do rebolo [mm]	390	390
Quantidade de rebolos por troca [unidade]	1	1
Fator G	6,251	10,419
Consumo rebolo por peça [mm/unidade]	0,00009	0,00005
Custo do abrasivo por unidade [R\$]	300,00	300,00
Quantidade de peças por rebolo [unidade]	11.000	18.333
Custo de retificação por peça [R\$]	1,25	1,14
Custo de rebolo por peça [R\$]	0,03	0,02
Custo com troca [ano] [R\$]	12.148,53	7.289,12
Custo total de retificação [ano] [R\$]	1.002.253,82	918.732,67
Custo total com rebolo [ano] [R\$]	21.902,40	13.141,44
Custo total [ano] [R\$]	1.036.304,76	939.163,23
Economia total [ano] [R\$]		97.141,52

TABELA 7: RESULTADOS DA ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA.

FONTE: DO AUTOR (2015).

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

A adição de um sistema de limpeza de rebolo permitiu ganhos de produtividade devido ao aumento do intervalo de dressagem do rebolo de 03 para 08 peças o que gerou um aumento do fator G em 67% e a adoção de parâmetros máximos de retificação viabilizando uma redução do tempo de ciclo em 9%, gerando um aumento na quantidade de peças retificadas por rebolo em 66% e significando a quebra do gargalo de produção para a peça analisada. A menor frequência da execução da dressagem resultou numa redução de 37% dos tempos mortos do processo aumentando a disponibilidade de capacidade produtiva. Com relação aos custos de manufatura houve uma redução no custo de troca do rebolo, horas improdutivas anuais, em 60%, redução do custo de compra anual de rebolo em 60%, gerando uma economia anual projetada em R\$ 97.141,52. Todos estes dados são relacionados apenas a um dos produtos manufaturados na célula de retificação. O impacto na qualidade foi positivo pois foram obtidos menor rugosidade, melhor circularidade, menor variação de diâmetro da peça. Os benefícios desta técnica para o produto e processo demonstrados pelos pesquisadores foram reproduzidos em ambiente de produção. A criação de um protótipo de sistema de limpeza, a partir das informações colhidas dos experimentos acadêmicos, exigiu que alguns dos conceitos desenvolvidos para os experimentos acadêmicos fossem adaptados ou descartados na aplicação em produção. Foi necessário desenvolver um sistema de filtragem eficiente devido a qualidade do fluido de refrigeração. Limitações reais como a proibição do uso de ar comprimido pela empresa, auxiliaram na definição do fluido de refrigeração como meio de limpeza e indicam a necessidade de que os pesquisadores direcionem suas trabalhos em consonância com as tendências da manufatura. Como sugestão de novos trabalhos, sugere-se a análise da influência de diferentes distâncias, entre os bocais de limpeza até a superfície de corte do rebolo, análise da aplicação da técnica de limpeza de rebolos em diferentes tipos de grão abrasivos e ligas; estudo da aplicação da técnica de limpeza em diferentes velocidades de rotação do rebolo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADIBI, H; REZAEI, S.M. E SARHAN, A.D. 2013. Analytical modeling of grinding wheel loading phenomena. **International Journal of Advance Manufacture Technology**, vol. 68, pp. 473-485, 2013.

ADIBI, H; REZAEI, S.M. E SARHAN, A.D. Investigation on using high- pressure fluid jet in grinding process for less wheel loaded area. **International Journal of Advance Manufacture Technology**, vol. 70, pp. 2233-2240, 2014.

BABIC, D; MURRAY, D.B. E TORRANCE, A.A. Mist jet cooling of grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol. 45, pp. 1171-1177, 2005.

BANERJEE, S.; GHOSAL, G.; DUTTA, T. Development of a simple technique for improving efficacy of fluid flow through grinding zone. **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 197, pp. 306-313, 2008.

BARROS, B, SILVA; T.; CANARIM, R.; AGUIAR, P.R. BIANCHI; E.C. Utilization of Teflon and Aluminium oxide for wheel cleaning. **Materials Research**, vol. 17, pp. 23-32, 2014.

BIANCHI, E.C.; DINIZ, A.E., PEREIRA, M.G; DA SILVA NETO, J.F.; DE AGUIAR, P.R.; GUERMANDI, L.G. Grinding wheel surface cleaning usig a compressed air system in external plunge grinding of ceramics using the minimum quantity lubricant (MQL) technique. **Cerâmica**, vol. 58, pp. 270-274, 2012.

BLENKOWSKI, K. Coolants and lubricants part 1—the truth. **Journal Manufacturing Engenieering**, pp. 90-96, 1993.

CAMERON, A.; BAUER, R.; WARKENTIN, A. An investigation of effects of wheel-cleaning parameters in creep-feed grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol. 50, pp. 126-130, 2010.

DANESH, A.; JANDGHI, N.; TAWALOKI, T. Effect of dressing on internal cylindrical grinding. **Procedia CIRP**, vol. 14, pp. 37-41, 2014.

DINIZ, A.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia de usinagem dos materiais**. Artliber Editora Ltda, Campinas Brasi. 6.ed., 2008.

FENG, Z.; CHEN, X. Image processing of grindning wheel surface. **International Journal of Manufacture Technology**, vol. 32, pp. 27-33, 2007.

GIFT, F. C.; WOJCIECH, W.Z.; FORCE II, E. Mechanics of loading for electroplated cubic boron nitride (CBN) wheels during grinding of a nickel – based superalloy in water-based lubricating fluids. **Journal of Tribology**, vol. 126, pp. 795-801, 2004.

Gil, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**, São Paulo: Editora Atlas, 6.ed., 2008.

HEINZEL, C.; ANTSUPOV, G. Prevention of wheel clogging in creep feed grinding by efficient tool cleaning. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, vol 61, pp. 323-326, 2012.

IRANI, R.A.; BAUER, R.J.; WARKENTIN, A. A review of cutting fluid application in the grinding process. **Journal of Machine and Manufacture**, vol. 45, pp. 1696- 1705, 2005.

JACKSON, M.J. ROBINSON, G.M. Development of morphology in laser dresser grinding wheel. **Journal of Achievements and Manufacturing Engineering**, vol. 22, pp. 81- 84, 2007.

KHUDOBIN, L.V.; UNYANIN, A.N. Improved performance of grinding wheels in machining plastic steel and alloy blanks. **Russian Engineering Research**, vol 28, pp. 1190-1195, 2008.

KOTHER, R.; RAU, W. *Fertigungstechnik für Wirtschaftsingenieure* 1. Auflage. **Carl Hanser Verlag Berlin Heidelberg**, 1999. ISBN 978-3-44643084-6.

KLOCKE, F.; KÖNIG, W. *Fertigungsverfahren 2 - Schleifen, Honnen, Läppen*, 4. Auflage. **Springer Verlag**, 2005. ISBN 978-3-540-23496-8.

KOPAC, J.; KRAJNIK, P. High performance grinding. **Journal of Materials Processing Technology**, vol 175, pp. 278-284, 2006.

LEE, S.W.; LEE, Y.C.; JEONG, H.Z.; CHOI, H. Z. The effect of high pressure air jet on form accuracy in slot grinding. **Journal of Materials Processing Technologie**, vol. 128, pp. 67-72, 2002.

MANDAL, B.; SINGH, R.; DAS, R., BANERJEE, S. Improving grinding performance by controlling air flow around a grinding wheel. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol 51, pp. 610-676, 2011.

MARINESCU, I.D.; HITCHNER, M.; ROWE, W.B.; INASAKI. **Handbook of modern grinding technology**, 1st Edition. CRC Press, 2007. ISBN 13-978-1-57444-671-5.

MONICI, R.D.; BIANCHI, E.C.; CATAI, R.E.; AGUIAR, P. R. Analysis of the different forms of application and types of cutting fluid used in plunge cylindrical grinding using conventional and superabrasive CBN grinding wheels. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol. 46, pp. 122-131, 2006.

MONGOMERY, D.C. **Design and analysis of experiments 7th Edition**. John Wiley & Sons, 2009. ISBN 978-0-470-12866-4.

MORGAN, M.N.; JACKSON, A.R.; WU, H.; BAINES-JONES, V.; BATAKO, A.; ROWE W.B. Optimization of fluid application in grinding. **CIRP Annals Manufacturing Technology**, vol. 57, pp. 363-366, 2008.

NGUYEN, T.; ZANG, L.C. An assessment of applicability of cold air and oil mist in surface grinding, **Journal materials Processing Technology**, vol 40, pp. 224-230, 2003.

OLIVEIRA, D.J.; GUERMANDI, L.G.; BIANCHI, E.C.; DINIZ, A.E.; AGUIAR, P. R.; CANARIN, R.C. Improving minimum quantity lubrication in CBN using compressed air wheel cleaning. **Journal of Materials Processing Technology**, vol 212, pp. 2559-2568, 2012.

RICHARDSON R.J. **Pesquisa Social**, São Paulo : Editora Atlas, 3.ed., 2010.

ROWE, W.B. **Principals of modern grinding technology, 1st Edition**. Elsevier, 2009. ISBN 978-0-8155-2018-4.

SINOT, O.; CHEVRIER, P.; PADILLA, P. Experimental simulation of efficiency of high speed grinding wheel cleaning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol 46, pp. 170-175, 2006.

TAWAKOLI, T.; HADAD, M.,J.; SADEGHI, M.H. Investigation on minimum quantity lubricant – MQL grinding 100Cr6 hardened steel using different abrasives and cooling lubricants types. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, vol 50, pp. 698-708, 2010.

WEGENER, K.; HOFFMEISTER, H.-W.; P.; KARPUSCHWESKI, B.; KUSTER F.; HAHMANN W.-C.; RABIEY, M. Conditioning and monitoring of grinding wheels. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, vol 40, pp. 737-777, 2011.