



Engenharia Mecânica



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Júlio de Mesquita Filho

FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Dênis Pascolat Magrini

UTILIZAÇÃO DE FLUIDO DE CORTE COM INIBIDORES
VOLÁTEIS DE CORROSÃO NA RETIFICAÇÃO DO
AÇO ABNT 4340

BAURU

2019



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Júlio de Mesquita Filho

FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Dênis Pascolat Magrini

**UTILIZAÇÃO DE FLUIDO DE CORTE COM INIBIDORES
VOLÁTEIS DE CORROSÃO NA RETIFICAÇÃO DO
AÇO ABNT 4340**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Bauru, Universidade Estadual Paulista para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, área de Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi

BAURU

2019

Magrini, Dênis Pascolat.
Utilização de fluido de corte com inibidores
voláteis de corrosão na retificação do aço abnt 4340
/ Dênis Pascolat Magrini, 2019
71 f.

Orientador: Eduardo Carlos Bianchi

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2019

1. Retificação cilíndrica externa. 2. Aço AISI
4340. 3.Fluido de corte sintético. 4.Inibidor
volátil de corrosão. 5.Rebolo de Óxido de
Alumínio. I. Universidade Estadual Paulista.
Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE DÊNIS PASCOLAT MAGRINI, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 26 dias do mês de julho do ano de 2019, às 09:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Dr. HAMILTON JOSÉ DE MELLO do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. CARLOS ELIAS DA SILVA JUNIOR do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de DÊNIS PASCOLAT MAGRINI, intitulada **ANÁLISE DA RUGOSIDADE E DESGASTE DIAMETRAL DO REBOLO NA RETIFICAÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DE FLUIDO DE CORTE COM NOVA CLASSE DE INIBIDORES VOLÁTEIS DE CORROSÃO**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI 

Dr. HAMILTON JOSÉ DE MELLO 

Prof. Dr. CARLOS ELIAS DA SILVA JUNIOR 

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A BANCA EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO ALUNO:
DÊNIS PASCOLAT MAGRINI

DE: "ANÁLISE DA RUGOSIDADE E DESGASTE DIAMETRAL DO REBOLO NA RETIFICAÇÃO
COM A UTILIZAÇÃO DE FLUIDO DE CORTE COM NOVA CLASSE DE INIBIDORES VOLÁTEIS
DE CORROSÃO"

PARA:

UTILIZAÇÃO DE FLUIDO DE CORTE COM
INIBIDORES VOLÁTEIS DE CORROSÃO
NA RETIFICAÇÃO DO AÇO ABNT 4340

Bauru, 26 de julho de 2019.

Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi
Orientador

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu saudoso pai
Dirceu Magrini e a mãe Cely Esther Pascolat
Magrini, minha esposa Ana Paula Fuzinato e
meu filho Vinícius Sanchez Magrini.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS pelo dom da vida, pela saúde, força, paciência para resolver as adversidades e por todas as bênçãos.

Aos meus pais Dirceu e Cely, aos quais devo minha vida, por me ensinarem valores e sempre me incentivarem a buscar novas conquistas.

À minha mulher, companheira e parceira Ana Paula e a meu filho Vinícius, pela paciência pelo carinho, apoio e dedicação.

Ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi por acreditar no meu potencial, por me auxiliar em todas as etapas do desenvolvimento desta pesquisa, por todas as conversas, direcionamentos e compreensão em todo o tempo da realização deste trabalho.

Aos alunos de graduação e pós-graduação José Cláudio Lopes e Anthony Gaspar Tolon, pelo auxílio, dedicação e empenho durante a realização dos ensaios e na análise de dados.

Ao técnico Hamilton José de Mello, do Laboratório de Materiais, e ao técnico Hélio Aparecido de Souza pelo suporte durante toda a realização deste trabalho.

Agradeço também à Faculdade de Engenharia de Bauru, em especial ao programa de Pós-graduação em Programa em Engenharia Mecânica pela oportunidade e a todos os professores que me auxiliaram e por gentilmente ceder os Laboratórios de Usinagem por Abrasão e de Materiais para a elaboração deste trabalho.

Aos Professores Doutores Luiz Eduardo de Angelo Sanchez, Gilberto de Magalhães Bento Gonçalves e César Renato Foschini pela participação e pelas valiosas sugestões para melhoria deste trabalho.

À Empresa VCI Brasil pela doação dos fluidos de corte, além de todo apoio prestado e ambos pela oportunidade de desenvolvimento científico e tecnológico proporcionado por essa pesquisa.

A todos os amigos e familiares que contribuíram mesmo que de forma indireta para realização deste trabalho.

“O maior pecado do ser humano é ignorar suas forças interiores, seus poderes criadores e sua herança divina.

ESTUDA-TE...Vê quanta coisa é capaz de fazer!”

(O. S. Marden)

RESUMO

A retificação é um dos processos mais importantes quando deseja-se atribuir extrema precisão, acabamento e qualidade a superfície da peça, sendo amplamente utilizado na indústria, atribui-se suas características a um processo de usinagem que emprega um rebolo com grãos abrasivos girando em alta velocidade para remover material. Suas aplicações consistem especialmente no final da cadeia produtiva, onde a retificação normalmente representa o último processo por onde a peça irá passar. O rebolo é constituído de grãos abrasivos e poros, unidos por um material aglomerante (ligante), formando uma estrutura abrasiva. Todavia, os rebolos podem possuir diferentes propriedades, uma vez que a dureza dos grãos abrasivos, resistência à abrasão, estrutura cristalina, forma, tamanho e friabilidade podem afetar a durabilidade e o desempenho do abrasivo. Assim, se faz muito importante a escolha correta do rebolo, pois suas propriedades influenciarão diretamente na produtividade e na qualidade da peça que é possível se obter com a utilização deste, levando em consideração os parâmetros do processo e o material a ser retificado. A seleção do material do grão abrasivo mais apropriado para cada operação tem que ser embasada de acordo com o material a ser retificado, além de possuir uma relação custo-benefício aplicável industrialmente.

Fluidos de corte lubrificam e refrigeram a zona de corte, porém são prejudiciais ao meio ambiente e aos seres humanos, adicionando custos à indústria. Atrelado a isso, um método eficaz e relativamente barato de controlar a corrosão em ambientes fechados, é o uso de inibidores de corrosão voláteis (VCI's), que utilizam o ar como meio de propagação. A VCI Brasil, formulou uma nova tecnologia de inibidores de corrosão, que utilizam a água como meio de propagação, sendo denominados genericamente como V-active VCI[®]. Isso possibilitou desenvolver outros produtos que utilizam a água como meio, denominados genericamente como MV Aqua[®], o que inclui fluidos de corte, onde essa família de inibidores promove maior efeito de lubricidade e detergência, ocasionando um menor desgaste do rebolo e melhor acabamento, além de promover a proteção contra corrosão da peça, pois um filme protetivo sobre a superfície evita a necessidade de uso de óleos protetivos intermediários e consequente desengraxe posterior, reduzindo o número de etapas de processo e impacto ambiental. O fluido em questão não apresenta riscos aos seres humanos e é biodegradável.

Após as análises feitas nesse estudo foi possível concluir que o fluido com a nova formulação de inibidores de corrosão (V-active VCI) apresentou melhores resultados para

as variáveis de saída da retificação (rugosidade, desgaste diametral do rebolo e emissão acústica), quando comparado com o fluido base.

Utilizando o fluido com V-active VCI, a qualidade superficial da peça foi significativamente superior, garantindo menores níveis de rugosidade e o desgaste do rebolo foi consideravelmente menor.

Palavras-chave: Retificação cilíndrica externa, Aço AISI 4340, fluido de corte sintético, Inibidor volátil de corrosão, rebolo de Óxido de Alumínio.

ABSTRACT

Grinding is one of the most important processes when it is desired to assign extreme precision, finish and quality to the workpiece surface, being widely used in industry, its characteristics are attributed to a machining process that employs an abrasive grinding wheel spinning at high speed to remove material. Its applications consist especially at the end of the production chain, where grinding usually represents the last process through which the part will pass. The grinding wheel consists of abrasive grains and pores, joined by a binder material, forming an abrasive structure. However, the grinding wheels may have different properties, since abrasive grain hardness, abrasion resistance, crystalline structure, shape, size and friability can affect the durability and performance of the abrasive. Thus, it is very important to choose the correct grinding wheel because its properties will directly influence the productivity and quality of the part that can be obtained with the use of this one, taking into account the parameters of the process and the material to be grinding. The selection of the most suitable abrasive material for each operation has to be based on the material to be rectified, besides having an industrially applicable cost-benefit ratio.

Cutting fluids lubricate and cool the cutting zone, however they are harmful to the environment and humans, adding costs to the industry. Linked to this, an effective and relatively inexpensive method of controlling corrosion indoors is the use of volatile corrosion inhibitors (VCI's), which use air as a means of propagation. VCI Brazil, formulated a new technology of corrosion inhibitors, that use water as a medium of propagation, being generically denominated like V-active VCI[®]. This made it possible to develop other products that use water as a medium, generally referred to as MV Aqua[®], which includes cutting fluids, where this family of inhibitors promotes greater lubricity and detergency, resulting in less wear grinding wheels and better finish. to promote protection against corrosion of the part, because a protective film on the surface avoids the need to use intermediate protective oils and consequent subsequent degreasing, reducing the number of process steps and environmental impact. The fluid in question poses no risk to humans and is biodegradable.

After the analysis made in this study it was possible to conclude that the fluid with the new corrosion inhibitor formulation (V-active VCI) presented better results for the grinding output variables when compared to the base fluid.

Using the V-active VCI fluid, the surface quality of the part was significantly higher, ensuring a better roughness, and the wear of the grinding wheel was considerably less.

Keywords: External cylindrical grinding, AISI 4340 steel, synthetic cutting fluid, Volatile corrosion inhibitor, Aluminum Oxide grinding wheel.

SUMÁRIO

Dedicatória.....	6
Agradecimentos.....	7
Resumo.....	9
Abstract.....	11
Lista de Figuras.....	15
Lista de Tabelas e Quadros.....	16
Lista de Abreviaturas e Símbolos.....	17
1. INTRODUÇÃO	18
1.1 OBJETIVO.....	19
1.2 JUSTIFICATIVA.....	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Processos de Retificação.....	22
2.2 Fluido de Corte.....	23
2.3 Aditivos do Fluido de Corte.....	25
2.4 Problemas do Uso do Fluido de Corte.....	25
2.5 Rebolo de Óxido de Alumínio.....	26
2.5.1 Ligante.....	27
2.5.2 Grãos Abrasivos.....	28
2.6 Aço AISI 4340 Temperado e Revenido.....	31
2.7 Retificação Cilíndrica Externa de Mergulho.....	31
2.8 Velocidade de Mergulho.....	32
2.9 VCI – Inibidor volátil de corrosão.....	33
3. MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 Materiais.....	34
3.1.1 Retificadora.....	34
3.1.1.1 Mandril de Fixação.....	34
3.1.2 Rebolo de Óxido de Alumínio.....	35
3.1.3 Corpos de Prova.....	35
3.1.4 Parâmetros de Entrada.....	36
3.2 Métodos.....	37
3.2.1 Procedimento de Ensaio.....	37
3.2.2 Medição de Rugosidade.....	38
3.2.3 Desvios de Circularidade.....	40

3.2.4	Preparação das Amostras para Análise.....	42
3.2.5	Microscopia Ótica.....	44
3.2.6	Microdureza.....	45
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1	Rugosidade Superficial Média.....	46
4.2	Desvios de Circularidade.....	48
4.3	Desgaste Diametral do Rebolo.....	49
4.4	Potência Elétrica.....	51
4.5	Emissão Acústica.....	52
4.6	Vibração.....	54
4.7	Microscopia Ótica.....	55
4.8	Microdureza.....	60
5.	CONCLUSÕES	63
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	65
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Interface de contato dos grãos abrasivos na retificação.....	22
Figura 2 - Estrutura do Rebolo.....	27
Figura 3 – Dureza e Condutividade Térmica de Abrasivos.....	29
Figura 4 – Variação do Ângulo de saída de acordo com Geometria do Grão.....	30
Figura 5 – Grão realizando Corte, Sulcamento e Escorregamento.....	31
Figura 6 – Retificação Cilíndrica Externa de Mergulho.....	32
Figura 7 – Retificadora Utilizada.....	34
Figura 8 – Dimensões dos Corpos de Prova.....	35
Figura 9 – Corpos de Prova.....	36
Figura 10 – Montagem Experimental.....	38
Figura 11 – Rugosímetro e Suporte.....	39
Figura 12 – Rugosidade sendo aferida.....	39
Figura 13 – Circularímetro.....	41
Figura 14 – Detalhe do Apalpador.....	42
Figura 15 – Desenho esquemático das medições de microdureza.....	45
Figura 16 - Rugosidade Média por Velocidade de Mergulho.....	47
Figura 17 – Desvios de Circularidade por Velocidade de Mergulho.....	48
Figura 18 – Desgaste Diametral do Rebolo por Velocidade de Mergulho.....	50
Figura 19 – Potência Elétrica por Velocidade de Mergulho.....	51
Figura 20 – Emissão Acústica por Velocidade de Mergulho.....	53
Figura 21 – Vibração por Velocidade de Mergulho.....	54
Figura 22 – Microscopia Peças Retificadas com $V_f = 0,25$ mm/min. com Fluido Base.....	56
Figura 23 - Microscopia Peças Retificadas com $V_f = 0,25$ mm/min. com VCI.....	57
Figura 24 - Microscopia Peças Retificadas com $V_f = 0,50$ mm/min. com Fluido Base.....	57
Figura 25 - Microscopia Peças Retificadas com $V_f = 0,50$ mm/min. com VCI.....	58
Figura 26 - Microscopia Peças Retificadas com $V_f = 0,75$ mm/min. com Fluido Base.....	58
Figura 27 - Microscopia Peças Retificadas com $V_f = 0,75$ mm/min. com VCI.....	59
Figura 28 – Microdureza das Peças de Ambos Fluidos na $V_f = 0,25$ mm/min.....	61
Figura 29 - Microdureza das Peças de Ambos Fluidos na $V_f = 0,50$ mm/min.....	61
Figura 30 - Microdureza das Peças de Ambos Fluidos na $V_f = 0,75$ mm/min.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades de alguns materiais abrasivos.....	29
Tabela 2 – Porcentagem do erro para os valores de potência em cada condição.....	52
Tabela 3 – Porcentagem do erro para os valores de vibração em cada condição.....	55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Número de Ensaios e Velocidades de Avanços.....	37
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

a - profundidade de retificação	[μm]
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas	
ASTM - American Society for Testing and Materials	
b - largura de retificação	[mm]
CNC - comando numérico computadorizado	
d_e – diâmetro equivalente	[mm]
d_s – diâmetro do rebolo	[mm]
d_w – diâmetro da peça	[mm]
h_{eq} – espessura equivalente de corte	[mm]
h_{max} - espessura teórica máxima do cavaco	[mm]
HK – Dureza Knoop	
HR _C - Dureza Rockwell C	
ISO – International Organization for Standardization	
l_c – comprimento de contato	[mm]
L - espaçamento médio entre grãos abrasivos	[mm]
L_z - Superfície do rebolo que é atingida pelo jato	[mm ²]
n_s - velocidade ou rotação crítica do rebolo	[rpm]
n_w - rotação da peça	[rpm]
Q_w - taxa de remoção volumétrica	[mm ³ /s]
Q'_w - taxa específica de remoção volumétrica	[mm ² /s]
R_a - rugosidade média	[μm]
RPM - rotações por minuto	[rpm]
t_s – tempo de centelhamento (spark-out)	[s]
v_f - velocidade de avanço ou mergulho	[m/min]
v_s - velocidade tangencial (ou periférica) do rebolo	[m/s]
v_w - velocidade tangencial (ou periférica) da peça	[m/s]
V_s - volume de rebolo gasto	[mm ³]
V_w - volume de material removido	[mm ³]
<i>spark-out</i> : também chamado de faíscamento, representa o tempo em que o rebolo realiza a usinagem sem realizar avanço e é utilizado para corrigir deflexões e deformações na máquina ferramenta.	
VCI – inibidor volátil de corrosão	
CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente)	

1. INTRODUÇÃO

A remoção de material no processo de retificação é realizada pelo rebolo, ferramenta na qual os grãos abrasivos estão dispostos de forma irregular (Rasim, M., Mattfeld, P., Klocke, F., 2015), e ocorre por atrito, deformação e cisalhamento do material, sendo este último responsável pela formação do cavaco, enquanto o atrito e a deformação consomem energia sem remover material (SINHA et al., 2016). A retificação de uma peça é de extrema precisão e quaisquer erros nessa etapa, acarretam em custos altamente onerosos, uma vez que a peça já passou por diversos outros processos de usinagem (SOARES et al., 2002). Na retificação, muitos grãos abrasivos estão em contato com a peça em determinado instante, porém apenas parte deles estão efetivamente cortando e removendo material. Logo, os outros grãos estão apenas se movendo sobre a superfície da peça, o que gera alto atrito, e por consequência, altas temperaturas (TAWAKOLI et al. 2009). Com a utilização de fluido de corte, probabilidade de dano à peça é reduzida, bem como a taxa de desgaste do rebolo, reduzindo os custos de produção. Porém, a composição desses fluidos causa riscos significativos ao meio ambiente e à saúde humana (SILVA et al., 2016).

A VCI Brasil, empresa brasileira localizada na cidade de Bauru-SP, formulou uma nova classe de inibidores voláteis de corrosão que, além da propriedade de inibição de corrosão na fase vapor, possui a propriedade de utilizar a água como meio de propagação. O fluido estudado, apresenta tal inibidor de corrosão que elimina etapas do processo (como desengraxe e limpeza da peça) (GENOVEZ et al., 2015). Esse não é o foco do estudo, porém, não houve estudo até o momento sobre a influência desse protetivo nas variáveis de saída no processo de retificação. Uma vez que, segundo o fabricante, o fluido não agride o meio ambiente, não é nocivo ao ser humano, e pode reduzir etapas do processo de usinagem de uma peça, propiciando aumento da produção e agregando valor à cadeia produtiva, o presente estudo traz informações úteis ao conhecimento científico para a área de retificação.

Um método eficaz e relativamente barato de controlar a corrosão em ambientes fechados é o uso de inibidores voláteis de corrosão (VCI's). Esses compostos podem ser usados como protetores temporários e uma das características que os distinguem dos sistemas permanentes de prevenção da corrosão, como pinturas e revestimentos metálicos, é que eles podem ser removidos da superfície (ESTEVÃO E NASCIMENTO, 2001). Portanto, os VCI's são uma ferramenta boa e econômica para a proteção de metais e ligas

contra os danos causados pela corrosão atmosférica. Os VCI's comerciais são sais de ácidos orgânicos e inorgânicos juntamente com compostos aminos, geralmente fornecidos como cristais contidos em suportes de espuma de plástico e aplicados em veículos tais como papel ou plástico (FODOR, 1985). Além disso, são adicionadas a ambientes corrosivos fechados em doses relativamente pequenas e podem reduzir significativamente a taxa de corrosão subsequente (BASTIDAS et al., 2005). As bases orgânicas (geralmente aminas) funcionam como um "carregador passivo e ativo em alguns casos" que transporta o íon quando volatilizado, depositando o mesmo sobre a superfície metálica, formando um filme uniforme e invisível. Os inibidores voláteis de corrosão (VCI's) são compostos que têm a capacidade de vaporizar e condensar em uma superfície metálica, tornando menos suscetível à corrosão pela formação de uma fina camada de uma película protetora (BASTIDA., 2005; VALDEZ, 2006 SKINNER, 1993). Outra vantagem dos VCI's é que as moléculas volatadas podem atingir os espaços difíceis de alcançar porque, como é uma fase de vapor, a condensação ocorre em qualquer local da superfície metálica, fato que não é possível com outros tipos de proteção, como óleo ou graxa (GENOVEZ et al., 2015). Tais inibidores, conhecidos genericamente como V-active VCI retém as propriedades de um inibidor volátil. Sua formulação química, quando na presença de água ou contaminante aquoso, migra para o meio e isso promove sua dissociação. Por exemplo, se houver contaminação de água em um tanque de diesel (uma ocorrência comum), a água afunda no fundo do tanque e oxida o metal, e também oxida as partes vazias do tanque acima do diesel. O inibidor V-active VCI, se adicionado ao combustível diesel, migra para o meio aquoso e inibe o processo de corrosão, tanto na fase líquida (inferior) quanto na área de vapor (GENOVEZ et al., 2015). Especificamente no caso de fluido de corte, esta família de inibidores quando dissolvidos em água promovem um maior efeito de lubrificidade e detergência, ocasionando um menor consumo de ferramentas de corte (rebolo no caso de retificação), e conseqüentemente, melhor acabamento, e ainda, promove a proteção contra corrosão da peça metálica. Uma vez que o fluido é de base aquosa e isso favorece a oxidação, ter esse composto adicionado é de grande importância, uma vez que o mesmo utiliza a água como meio de propagação para evitar a corrosão.

1.1 OBJETIVO

O presente trabalho teve como objetivo verificar o desempenho de um fluido sintético com inibidor de corrosão no processo de retificação do aço AISI 4340 com rebolo de óxido de alumínio e compará-lo com o desempenho de um fluido sintético base (sem

aditivo anticorrosivo), utilizando de três velocidades de mergulho (0,25; 0,50 e 0,75 mm/minuto). Foram avaliadas para cada velocidade de mergulho: rugosidade média (Ra); desvios de circularidade, desgaste diametral do rebolo, microdureza, microscopia óptica da peça, potência elétrica consumida pelo motor e emissão acústica. Deste modo, pode-se avaliar o quão é aplicável esse novo conceito de fluido de corte e se o mesmo é viável no meio industrial e concluir se o fluido com inibidor de corrosão beneficiou o processo de retificação como um todo.

1.2 JUSTIFICATIVA

A VCI Brasil, localizada na cidade de Bauru, com o objetivo de desenvolver e aplicar novas tecnologias, formulou uma nova classe de inibidores de corrosão, que utilizam a água como meio de propagação e eficiência protetiva, sendo denominados V-active VCI®.

Além da propriedade de inibição de corrosão na fase vapor (característica usada na proteção interna de equipamentos, vasos, tubulações e embalagens), possui a propriedade de formar filme e promover a proteção contra corrosão na fase de contato com o metal, formando uma camada de proteção através da interação química do inibidor com o metal.

Esta nova composição e classe química teve como expectativa possibilitar o desenvolvimento na formulação de outros diversos produtos que utilizam a água como meio, denominados genericamente como MV Aqua®, como fluidos de corte (em geral), desengraxantes e protetivos a base aquosa. Especificamente no caso de fluido de corte, esta família de inibidores quando dissolvidos em água devem promover um maior efeito de lubricidade e detergência, ocasionando um menor consumo de ferramentas de corte (rebolo no caso de retificação), e conseqüentemente, melhor acabamento, redução de consumo de rebolo, e ainda, promover a proteção anticorrosiva da peça. Devido ao efeito protetivo sobre a superfície, um filme protetivo evita a necessidade de uso de óleos protetivos intermediários e conseqüente desengraxe posterior, reduzindo o número de etapas de processo além da redução do passivo ambiental (reduz o consumo de água e agentes químicos de proteção e limpeza) e redução do passivo trabalhista, pois não serão utilizados óleos na cadeia produtiva.

Em quesitos como lubrificação e corrosão, fluidos a base de água devem apresentar desempenhos inferiores aos fluidos a base de óleo, assim, espera-se verificar se há um aumento na eficiência do fluido de base aquosa quando adiciona-se ao mesmo um aditivo (molécula anticorrosiva). Para isso, os dois fluidos mencionados serão utilizados na

retificação cilíndrica externa de mergulho e as variáveis de saída serão analisados para verificar o desempenho de ambos os fluidos.

Considerando que a VCI Brasil não dispõe de laboratórios para realizar ensaios de usinagem, assim, a parceria Empresa/Universidade é um meio eficiente de integração com geração de resultados práticos e objetivos, visando a melhoria do produto. Os fluidos que foram utilizados, bem como todos os materiais necessários para a pesquisa, foram disponibilizados no Laboratório de Usinagem por Abrasão.

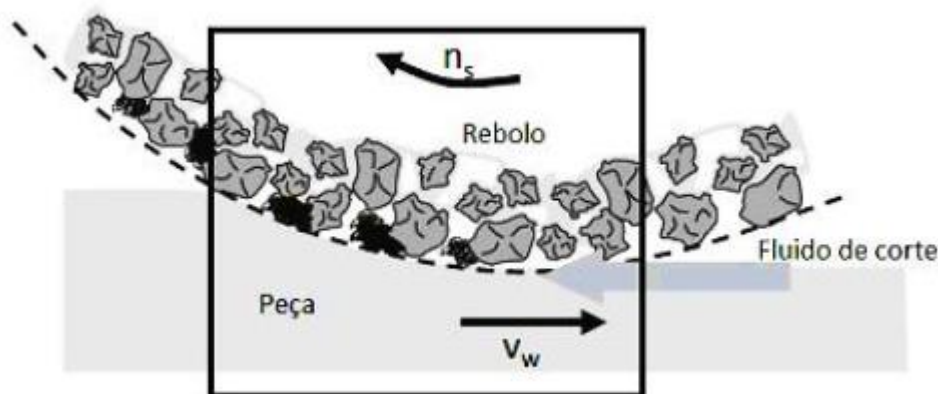
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica desse trabalho apresenta os assuntos que serão abordados no mesmo, de forma introdutória, a fim de contextualizar o leitor sobre os pontos envolvidos na pesquisa. Esses assuntos são: processos de retificação, fluido de corte, seus aditivos e os problemas envolvidos em sua utilização; o rebolo de óxido de alumínio; o aço AISI 4340, retificação cilíndrica de mergulho e velocidade de mergulho.

2.1- Processo de retificação

A retificação é um processo estratégico para aplicações de alta tecnologia, ganhou importante destaque na segunda metade do século XX, onde foi compreendido, por exemplo, por fabricantes de motores aéreos e de sistemas de guia de mísseis que a retificação era o processo que deveria ser desenvolvido para conseguir a qualidade necessária para os respectivos produtos, sendo que mais recentemente, a evolução dessa ideia tornou a retificação um processo novamente estratégico, mas desta vez para a produção de superfícies óticas de qualidade para comunicações e para aparelhos eletrônicos (ROWE, 2014). O contato entre os grãos abrasivos e a peça pode ser observado no esquema disposto na Figura 1.

Figura 1: Interface de contato dos grãos abrasivos na retificação.



Fonte: Adaptado de KLOCKE, 2009.

Em processos de usinagem por abrasão, como a retificação, em especial, para operações de acabamento em materiais de alta dureza e com a finalidade de se obter baixa rugosidade (Puerto et al., 2013): no geral é empregada para obter tolerâncias restritas (micrometros), sejam elas: dimensionais, de forma ou de acabamento.

O rebolo consiste de grãos orientados e posicionados de maneira aleatória (geometria indefinida) (Marinescu; Guo; Wei, 2013) diferentemente do torneamento e fresamento, uma vez que os abrasivos apresentam arestas de corte irregulares (ANDERSON; WARKENTIN; BAUER, 2008). A remoção de material no processo de retificação ocorre por atrito, deformação e cisalhamento do material, sendo este último responsável pela formação do cavaco, enquanto, o atrito e a deformação consomem energia sem remover material (RASIM; MATTFELD; KLOCKE, 2015 e SINHA et al., 2016). A retificação é um dos processos finais de uma peça, destinado a dar acabamento e tolerâncias, tendo então muito valor agregado. Logo, uma possível rejeição devido algum erro pode encarecer muito o processo, por isso, tem-se que os parâmetros utilizados no processo de retificação devem ser muito bem definidos (ANDERSON; WARKENTIN; BAUER, 2008).

Segundo Linke (2015), o cálculo dos custos com a retificação engloba desde os custos com a aquisição do rebolo até os custos com processos auxiliares, tais como condicionamento e troca do rebolo. Os custos com o condicionamento do rebolo podem ainda variar dependendo da escolha do ligante e de seus grãos abrasivos. De acordo com Sinha et al., (2016), a retificação é um processo complexo e dinâmico, aplicado na fabricação de peças de alta qualidade, com tolerâncias mais restritas, além de um excelente acabamento superficial. De acordo com Silva (2013) o processo de retificação é de alta complexidade, envolvendo diversas variáveis, e por isso, é muito sensível a qualquer alteração, desde as condições de usinagem ou o ambiente de trabalho, até a habilidade do operador. Na retificação, o rebolo apresenta uma alta velocidade de corte se comparada com outros processos de usinagem, tais como torneamento e fresamento, por exemplo, uma vez que, na retificação convencional, este atinge velocidades de corte de 20 m/s à 45 m/s na retificação convencional, mas podendo ser maior em retificação de alta velocidade, onde aplica-se velocidade de 140 m/s ou mais (MARINESCU; GUO; WEI, 2013).

2.2 - Fluido de corte

Durante o movimento relativo de corte entre a peça e o rebolo, quase 99% da energia fornecida à máquina é convertida em calor. Ao se usinar um material ferroso, a temperatura aumenta com a velocidade de corte e as forças de corte do rebolo diminuem, o que ocasiona um desgaste mais rápido do rebolo, como também pode ocasionar uma falha na mesma.

Usinar em alta velocidade de corte gera maior produtividade, porém as elevadas temperaturas limitam a velocidade de corte devido ao desgaste do rebolo. O uso de rebolo desgastado, aumenta o consumo de energia e reduz a qualidade do acabamento superficial da peça. Portanto, é necessário arrefecer a zona de corte, de modo a aumentar a vida útil do rebolo e, conseqüentemente, manter a qualidade do acabamento da peça.

Os fluidos de corte são utilizados para melhorar as características dos processos tribológicos que estão sempre presentes no contato entre peça e ferramenta. Logo, geralmente melhoram a eficiência do sistema de produção ao qual são inseridos (SOKOVIC E MIJANOVIC, 2001).

Segundo Irani, r.; Bauer, r.; Wwarkentin, (2005), um dos maiores fatores limitantes no processo de retificação é o dano térmico, sendo que este pode ser reduzido pela aplicação de fluidos de corte, uma vez que os mesmos diminuem a temperatura da zona de corte por transferência de calor.

Os fluidos de corte podem ser agrupados em:

- Óleos de corte integrais;
- Fluidos de corte (integral ou aditivado);
- Fluidos de corte solúveis em água;
- Emulsionáveis convencionais.

Os fluidos sintéticos vêm sendo cada vez mais usados devido ao custo elevado dos fluidos de corte integrais, em função das dificuldades de descarte e das restrições atuais quanto a sua utilização. São soluções químicas constituídas de materiais (sais) orgânicos e inorgânicos dissolvidos em água, livres de óleo mineral. Apresentam facilidade no preparo da solução, permitem rápida dissipação de calor, bom controle dimensional, excelente poder detergente, visibilidade da região de corte e elevada resistência à oxidação do fluido. Como desvantagens na utilização desses fluidos, pode-se citar o baixo poder lubrificante, a formação de compostos insolúveis e de espuma para determinadas operações de usinagem (FUSSE, 2004).

O mesmo autor diz, que de maneira geral, que os fluidos de corte são responsáveis por refrigerar a zona de corte, lubrificar o contato entre a peça e o rebolo (o que reduz o atrito), além de retirar o cavaco da zona de corte. Também, protegem a máquina, peça e rebolo da oxidação, sendo muitas vezes, fortemente voltados para esse fim, onde há a adição de aditivos anticorrosivos em sua fórmula química.

Como consequência dessas funções básicas, o fluido refrigerante reduz a potência necessária para o corte, reduz o consumo de energia, aumentam a vida útil da ferramenta e ajudam no melhor acabamento da superfície usinada. Porém, os custos associados à utilização de fluidos de corte, representam uma parte significativa dos custos totais da peça fabricada.

2.3 - Aditivos do Fluido de corte

Muitas vezes, o fluido de corte em sua forma pura, não atende a todas as necessidades ao qual é solicitado. Portanto, frequentemente são utilizados aditivos que garantem propriedades extras ao fluido original, alterando as características físicas e químicas dos mesmos, melhorando seu desempenho.

Dentre os tipos de aditivos, pode-se citar (KLOCKE, 2009):

- Aditivos que melhoram o processo físico propriamente dito, como aditivos de refrigeração;
- Aditivos que alteram as propriedades químicas do fluido, lhe garantindo propriedades anti-corrosivas, por exemplo;
- Aditivos tribologicamente ativos, que reduzem o atrito na zona de corte.

2.4 - Problemas no uso do fluido de corte

Mesmo com os benefícios econômicos do uso de fluido refrigerante, seu mau uso e métodos errados de sua eliminação pode afetar gravemente a saúde humana e o meio ambiente. Além disso, ele representa 16% à 20% do custo total de fabricação na indústria de produção (SOKOVIC E MIJANOVIC, 2001).

As várias substâncias presentes nos fluidos afetam os operadores de máquinas, seja pelo contato com a pele, pela ingestão da substância, como também pela respiração e pela irritação gerada por uma névoa de fluido que pode se formar devido à evaporação do mesmo. Os fluidos de corte podem ser eliminados após o uso dentro da empresa ou externamente, através de uma empresa de eliminação de resíduos (SOKOVIC & MIJANOVIC, 2001).

Segundo mesmo autor, a qualidade e o modo como esse fluido é eliminado pode resultar na poluição da água, solo e/ou ar. Porém, a resolução 430/11 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) define como zero a quantidade de óleo mineral, animal e vegetal presente na água, o que obriga as indústrias a buscarem a adequada

eliminação dos fluidos. Porém, a eliminação correta significa um considerável aumento dos custos para as empresas.

Durante seu uso, o fluido se altera, pois novas substâncias se formam ou acabam se aderindo a eles, como também, corpos estranhos e microorganismos. Originalmente, o fluido apresenta um risco à saúde, mas isso se agrava no decorrer da sua vida útil (SOKOVIC E MIJANOVIC, 2001).

Considerando todos os efeitos negativos dos fluidos ao meio ambiente e ao ser humano, cada vez mais há um rigor maior na escolha do fluido de corte, para que o mesmo seja eficaz, favorável ao meio ambiente e respeite a normas de regulamentação. Normalmente, os parâmetros ecológicos dos fluidos de corte estão estabelecendo novas restrições nos parâmetros de usinabilidade. Sendo assim, a busca por fluidos de qualidade e ecologicamente corretos são do interesse comum (SOKOVIC & MIJANOVIC, 2001).

2.5- Rebolo de óxido de alumínio

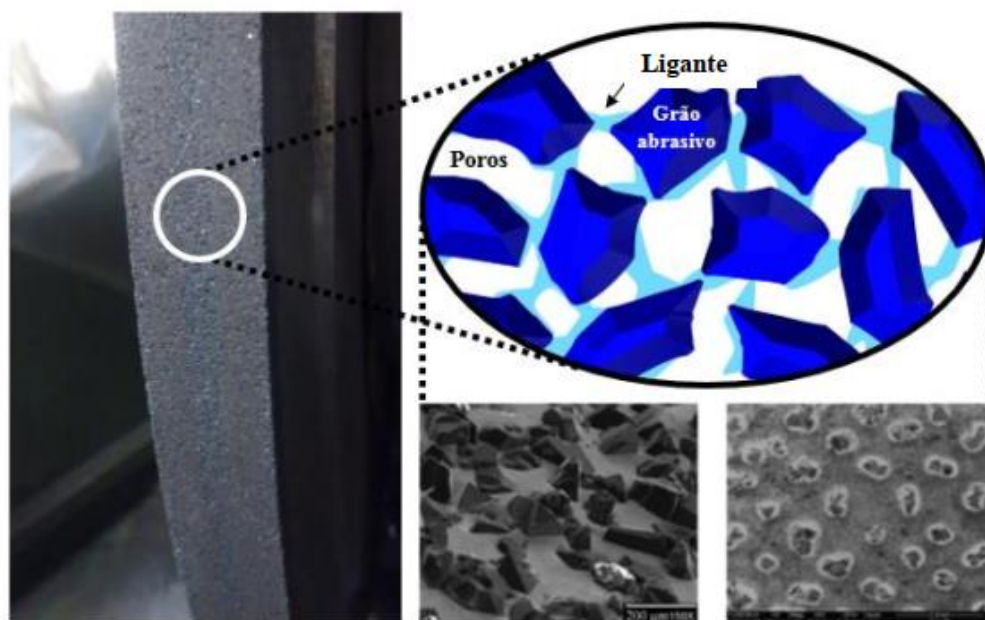
Os rebolos são compostos por três elementos, o grão abrasivo, que é o elemento que deve entrar em contato com a peça para remover material desta, o espaço intergranular, o qual serve para a armazenagem do material removido e permite o fluxo de líquido de arrefecimento, e o ligante que tem a função de reter os grãos no rebolo. (WEGENER et al., 2011). Assim, seu desempenho está relacionado ao tipo e ao tamanho do grão, às propriedades abrasivas do material aglomerante e ainda à porosidade do conjunto. Não obstante, tem-se que as propriedades características da topografia do rebolo podem ser condicionadas por meios da dressagem (afiações do rebolo), das condições de desgaste e das especificações do rebolo. A qualidade da superfície da peça, bem como os mecanismos de formação de cavaco, além das forças envolvidas durante o processo de retificação, estão diretamente relacionadas à forma e ao tamanho das arestas de corte e de toda a cinemáticas decorrente da interação dos grãos abrasivos na superfície da peça (HOLTERMANN, 2013 e DENKENA, 2016).

O rebolo é a ferramenta de revolução utilizada nos processos de retificação. Possui grãos abrasivos ligados por um ligante que formam um corpo abrasivo. Esses grãos formam arestas de corte de geometria não definidas, os quais são responsáveis pela remoção do material no processo de retificação.

Segundo Rowe (2014), o rebolo de óxido de alumínio é mais resistente ao impacto que o carboneto de silício e apresenta menor desgaste quando utilizado para corte de aços. Este rebolo é utilizado para aços, ligas ferrosas e ligas de alta resistência. É altamente

utilizado dentre os abrasivos, pois se mostra eficaz tanto em operações de desbaste, como acabamento.

Figura 2 – Estrutura do Rebolo.



Fonte: BIANCHI et al., 2018.

2.5.1 – Ligante

As propriedades dos rebolos são de suma importância para a determinação da produtividade e qualidade do processo de retificação. O tamanho do grão abrasivo, a concentração, bem como o tipo de ligante são os fatores que vão indicar o comportamento do rebolo. Entretanto, propriedades dos ligantes ainda têm sido pouco estudadas (DENKENA et al., 2016). Webster e Tricard (2004) mencionaram que o material ligante é a chave para as propriedades do rebolo, pois sua influência é primordial para determinação do mecanismo de desgaste do rebolo, taxa de desgaste bem como condições relacionadas à temperatura na interface rebolo-peça. No entanto, a força de ligação entre o grão abrasivo e a matriz ligante desempenha um papel fundamental no rebolo. Uma vez que se o rebolo possuir um ligante duro, o abrasivo não se desprenderá tão facilmente, aumentando sua área de contato devido à planificação do gume de corte, mas se o ligante for mole, sob qualquer esforço o grão abrasivo poderá se desprender da matriz, o que acarretará em um desgaste excessivo de rebolo, visto que ele não terá removido o material condizente com sua durabilidade (ARTINI; MUOLO; PASSERONE, 2012). Logo, Rowe (2014) separou os tipos de ligantes utilizados nos rebolos em três principais classes: ligante resinoide,

ligante vitrificado e ligante metálico, sendo que Marinescu et al. (2004) disse em seu estudo que o ligante deve ser capaz de proporcionar uma adequada retenção do grão no rebolo, sem que o abrasivo se solte de maneira prematura, bem como permitir uma controlada erosão do ligante para que as arestas de corte dos grãos abrasivos sejam expostas. Essa característica tem que estar em conjunto com a resistência para transferir as forças de retificação do eixo para a peça além de proporcionar uma adequada dispersão térmica durante o processo de usinagem.

2.5.2 – Grãos Abrasivos

De acordo com Rowe (2014), a propriedade mais importante de um abrasivo é sua dureza. É importante que a dureza seja mantida sob altas temperaturas e que o abrasivo não reaja quimicamente ou sofra difusão muito facilmente para o material da peça. Stemmer (2005) complementa que a dureza do grão é geralmente definida em função de resistência a indentação estática, como o que é determinado pelo teste de dureza. Segundo Malkin e Guo (2008), a dureza, estrutura do cristal, forma do grão, friabilidade e a composição química dos materiais abrasivos são algumas características que determinam sua eficácia na remoção de material. Alterações químicas ou estruturais de um mesmo tipo de abrasivo podem resultar em diferenças nas propriedades destes materiais. De acordo com Marinescu et al. (2004), a escolha de um abrasivo para uma aplicação em particular, normalmente é baseada nos testes de durabilidade envolvendo resistência ao impacto, resistência à fadiga, compressão, friabilidade dinâmica e a resistência ao lascamento, os quais ocorrem sob a influência de tensão térmica. Os grãos abrasivos devem ter também estabilidade térmica quando submetidos a operações de usinagem nas quais são desenvolvidas elevadas temperaturas na zona de corte. Como exemplo, pode-se citar a interação que ocorre entre grãos de diamante e materiais ferrosos quando solicitados sob pressão e temperatura, onde se tem que através do processo de difusão, o diamante cede carbono para o ferro resultando, conseqüentemente em um desgaste prematuro do rebolo (KLOCKE, 2009). Rowe (2014) afirmou que as propriedades térmicas dos grãos abrasivos são importantes, pois influem na resistência ao desgaste do abrasivo e nas temperaturas durante a retificação. A condutividade térmica dos superabrasivos é extremamente alta, mas depende de sua pureza, sendo os maiores valores encontrados nos abrasivos puros. Mesmo com uma pequena quantidade de outros elementos, a condutividade térmica é extremamente reduzida, apesar de ainda ser elevada quando comparada aos abrasivos convencionais. A Tabela 1 traz uma melhor ideia das diferentes características entre os

principais tipos de abrasivos, em uma comparação de valores práticos de dureza, ponto de fusão, estrutura cristalina, densidade, resistência à compressão e condutividade térmica.

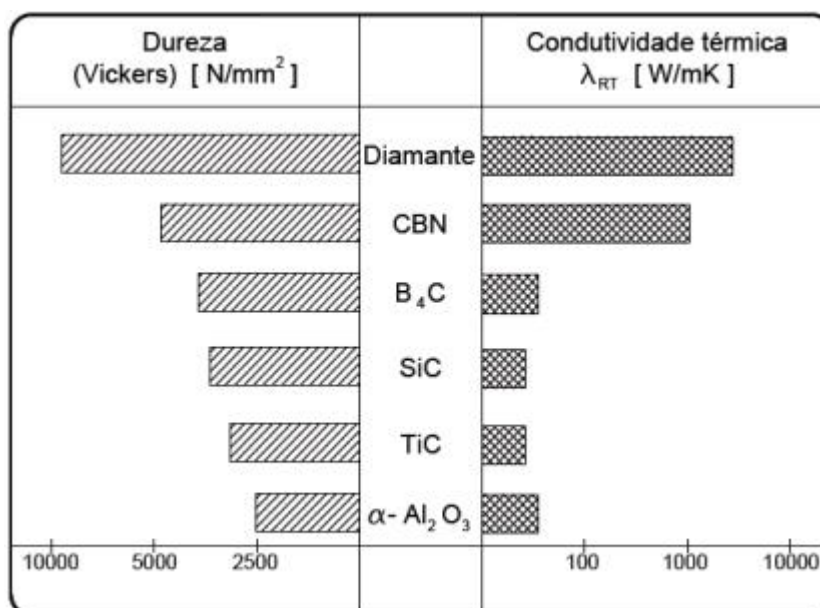
Tabela 1: Propriedades de alguns materiais abrasivos.

Material abrasivo	Dureza Knoop (kgf/mm ²)	Ponto de fusão (°C)	Estrutura Cristalina	Densidade (g/cm ³)	Resistência à compressão (kN/cm ²)	Cond. Térmica (cal/°C.cm.s)
Diamante	8000	3700	Cúbica	3,52	870	5.0
CBN	4500	3700	Cúbica	3,48	650	3.3
Al₂O₃	2500	2040	Hexagonal	3,98	350	0,08
SiC	2700	2830	Hexagonal	3,22	150	0,2
WC	2100	2870	Hexagonal	17,05	350	0,08

Fonte: Adaptado de MALKIN e GUO, 2008.

Porém, como observa Rowe (2014), a dureza da maioria dos abrasivos diminui com a temperatura, sendo importante conhecer a dureza real para cada temperatura a fim de se escolher o melhor abrasivo dependendo das condições em que serão trabalhados. Tais detalhes podem ser vistos na Figura 3.

Figura 3: Dureza e condutividade térmica de abrasivos convencionais e superabrasivos.

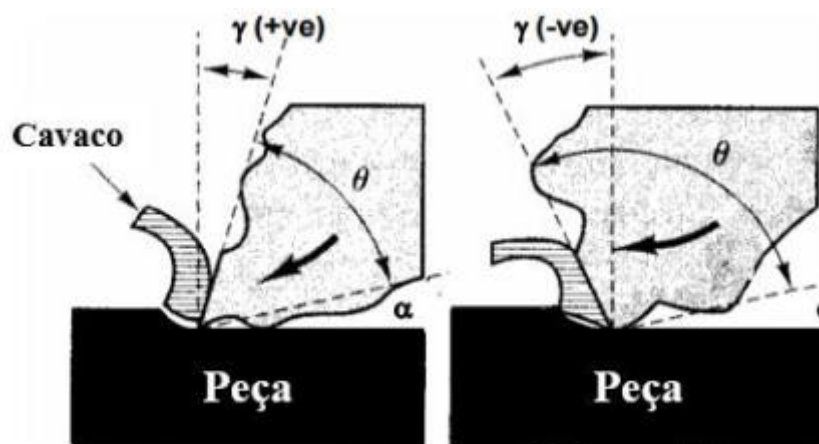


Fonte: Adaptado de MARINESCU et al., 2004.

Em geral, os abrasivos convencionais como óxido de alumínio e carbetto de silício, por exemplo, apresentam grande dificuldade de dissipar calor, devido sua característica isolante, o que pode provocar altas temperaturas na interface de corte entre o

rebolo e a peça. (BOOTHROYD et al., 2006). Além do mais, elevação da temperatura na peça pode provocar variações dimensionais indesejadas e diversos danos térmicos, como alterações microestruturais, trincas e tensões residuais desfavoráveis e redução na resistência à fadiga. Além disso, expansões e contrações do material decorrentes do aumento da temperatura seguido de resfriamento pelo fluido de corte durante a retificação podem piorar a qualidade do produto no que diz respeito à precisão geométrica/dimensional (MALKIN; GUO, 2008). Todavia, o formato e a morfologia do grão são características de grande importância, uma vez que a partir dela que se determina a geometria do grão, como por exemplo, o ângulo de saída. Como é sabido, diferentemente de uma ferramenta de corte como para o torneamento, por exemplo, os grãos não possuem uma geometria definida, sendo que seu ângulo de saída geralmente varia de $+45^\circ$ a -60° , mas isso não representa todos os casos, visto que valores diferentes destes também podem ser encontrados. A Figura 4 exemplifica os diferentes tipos de ângulo de saída do cavaco.

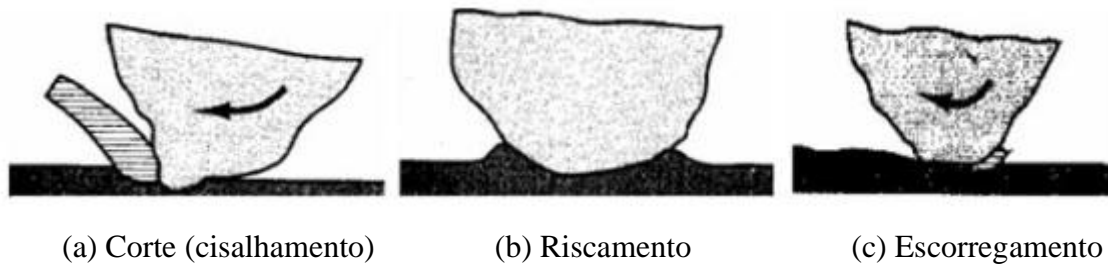
Figura 4: Variação do ângulo de saída de acordo com a geometria do grão.



Fonte: Adaptado de ROWE, 2014.

Grãos com geometria favorável podem produzir cavaco por cisalhamento. Entretanto, grãos que possuem um ângulo de saída negativo mais acentuado ou aresta de corte arredondada não formam cavaco, podendo riscar a peça através do escorregamento, como pode ser visto na Figura 5.

Figura 5: Grãos realizando corte, sulcamento e escorregando sobre a peça.



Fonte: Adaptado de ROWE, 2014.

A transição de escorregamento para riscamento e então de riscamento para corte depende do aumento da profundidade da penetração do grão na superfície (ROWE, 2014). Os três regimes de remoção de material se aplicam à todos os materiais, porém a extensão de cada estágio depende fortemente das características físicas do material da peça, suas características de deformação e sua reatividade química com o abrasivo e com o ambiente. Muitos materiais sujeitos à ação abrasiva exibem predominantemente um regime elástico seguido por um regime plástico.

2.6 - Aço AISI 4340 temperado e revenido

O aço AISI 4340 é um aço com uma boa combinação de resistência e tenacidade, usado na construção de peças de grande porte e que serão sujeitas à um grande esforço mecânico. Aplicado em equipamentos da indústria automobilística, siderurgia, produção de energia, produção de açúcar, mineração e da exploração de petróleo.

A composição do aço AISI 4340 é dada pelas seguintes porcentagens, segundo Bida *et al.* (2000): 0,38% de Carbono (C), 96% de Ferro (Fe), 0,2% de Silício (Si), 1,3% de Níquel (Ni), 0,8% de Cromo (Cr), 0,04% de Enxofre (S), 0,07% Manganês (Mn), 0,025% de Molibdênio (Mo) e 0,035% de Fósforo (P).

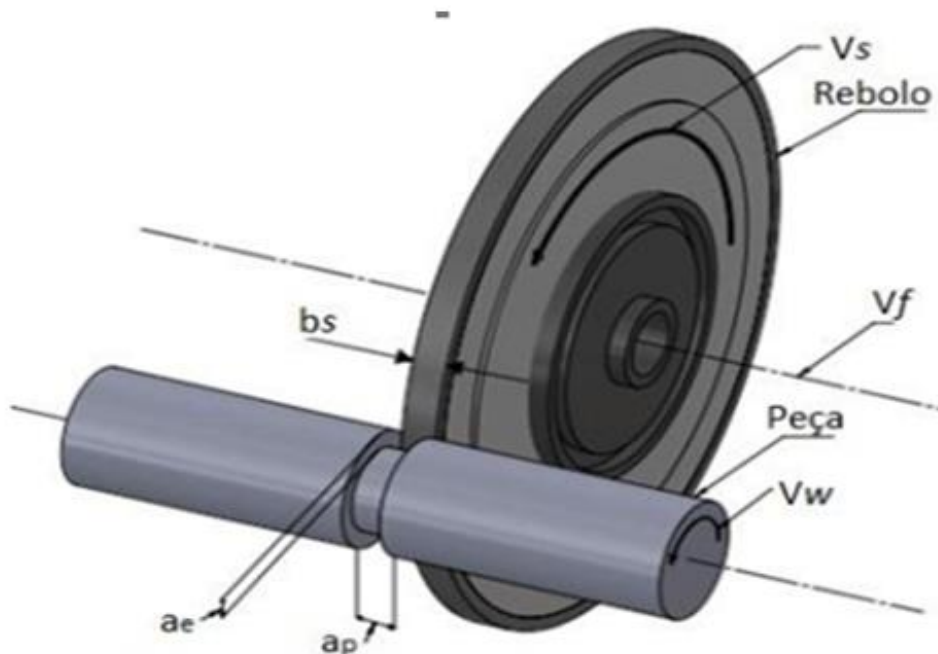
2.7 - Retificação cilíndrica externa de mergulho

Destaca-se entre as variações da operação de retificação a cilíndrica externa de mergulho, pois é um processo rápido e econômico. Na retificação cilíndrica externa de mergulho, o rebolo executa movimento de avanço numa direção perpendicular a superfície retificada. O rebolo normalmente é mais largo que o comprimento da peça, há possibilidade de se fazer a retificação de várias superfícies simultaneamente através da

montagem de diversos rebolos ou a retificação de perfis, através da afiação do rebolo no perfil adequado (DINIZ *et al.* 2008).

A retificação cilíndrica externa de mergulho é representada na Figura 6.

Figura 6- Retificação cilíndrica externa de mergulho.



Fonte: Adaptado de Nguyen e Zhang 2011.

Sendo que a_p representa a largura de corte, a_e a profundidade de corte, v_s a velocidade periférica do rebolo, denominada de velocidade de corte, v_w a velocidade tangencial da peça, v_f a velocidade de avanço e b_s a largura do rebolo.

2.8 - Velocidade de mergulho (v_f)

A velocidade de mergulho v_f também definida como a velocidade de avanço do rebolo, corresponde a velocidade do movimento normal à superfície retificada; esta afeta o acabamento pretendido e também a força tangencial de corte, que se eleva com o aumento da mesma (MARINESCU *et al.* 2007).

Segundo Baldo (1994), no início do processo de retificação de desbaste, remove-se cerca de 95% do material da peça, sendo que a velocidade de mergulho deve estar entre 0,4 a 2,0 mm/min. Já para o acabamento, a velocidade de mergulho deve estar entre 0,1 a 0,3 mm/min.

2.9- VCI – Inibidor Volátil de Corrosão

Inicialmente foi denominado segundo a sua propriedade físico-química como VPI (“Vapor Phase Inhibitor” - Inibidor por fase vapor) e, através de uma designação mais ligada ao lado aplicativo, foi denominado como VCI, Inibidor Volátil de Corrosão, que vem do inglês “Volatile Corrosion Inhibitor”. Inibe a ação corrosiva devido à formação de uma película invisível e monomolecular protetora sobre a superfície do metal. Geralmente são compostos de sais orgânicos e inorgânicos aplicados em suportes como o papel ou plástico, que tendem a volatilizar gradativamente, ou seja, possuem como característica fundamental a baixa pressão de vapor. Esta característica é fundamental para se proceder à formulação de produtos químicos a atuar. Geralmente misturam-se vários produtos químicos com diferentes valores de pressão de vapor, de acordo com o metal a proteger e com a durabilidade de ação do inibidor.

Mecanismo de Ação

A base orgânica funciona como um “carregador ativo”, que ao volatilizar leva consigo um ânion inorgânico ou orgânico. A tendência natural é que se depositem na superfície metálica ocorrendo formação da camada uniforme e invisível. Após um determinado nível de concentração de vapor, estabelece-se o equilíbrio, ocasionando uma perfeita troca entre o inibidor na embalagem e na superfície do metal, ou seja, o mecanismo de condensação possui a mesma velocidade que o mecanismo de vaporização.

Outra vantagem do VCI é que o metal a ser protegido pode apresentar qualquer formato (superfícies lisas, ranhuras, orifícios, etc.), pois como se trata de uma fase vapor, a condensação dá-se em qualquer localização da superfície metálica; fato impossível com outros tipos de protetivos como os oleosos ou graxos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - MATERIAIS

3.1.1 Retificadora

Foi utilizada uma retificadora cilíndrica externa de mergulho com comando numérico computadorizado (CNC) (modelo RUAP515H), Figura 7. O sistema de refrigeração convencional é composto por um tanque de 100 litros, uma bomba de sucção, mangueiras e um bocal fixo para a aplicação do fluido. A retificadora possui vedação com cortinas plásticas e placas de policarbonato para minimizar a perda de fluido para o ambiente.

Figura 7: Retificadora utilizada.



Fonte: Autoria própria.

3.1.1.1 - Mandril de fixação

O corpo de prova em forma de anel foi fixado com interferência e com uma porca em um mandril e este, por sua vez, fixado entre pontas na máquina. Este tipo de sistema é um dos mais utilizados nas indústrias, pois garante rapidez, facilidade de fixação e precisão reduzindo os erros encontrados nas fixações com placas.

3.1.2 Rebolo Óxido de Alumínio

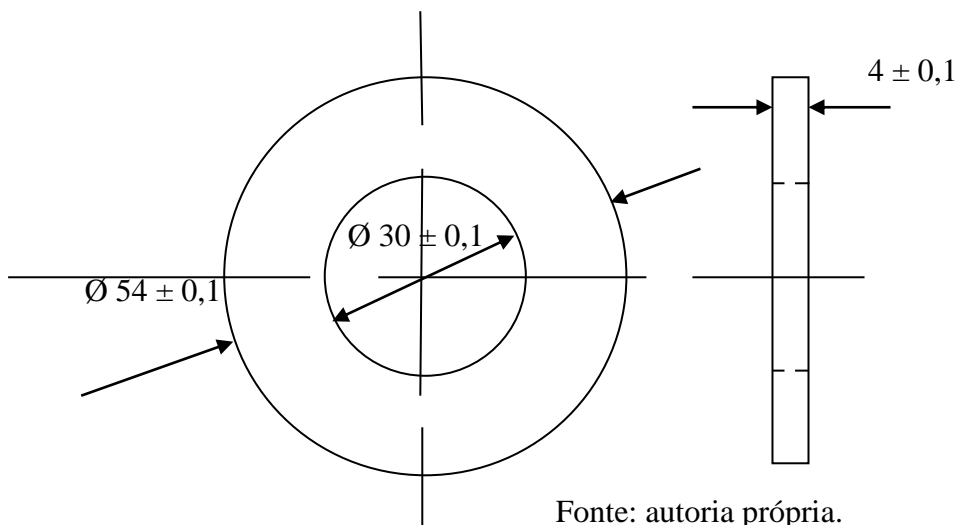
O rebolo convencional 38A150L6V utilizado foi doado pela empresa NORTON Abrasivos Ltda. – Saint-Gobain, e é fabricado com abrasivo convencional de óxido de alumínio (Al_2O_3) e ligante vitrificado de alta resistência ao desgaste, proporcionam facilidade de corte e longa vida para operações que dispensam alta precisão de afiação. Dentre suas especificações, pode-se salientar a dureza L (média), granulometria 150 (muito fina) e dimensões definidas por: 355,6 mm (Diâmetro Externo) x 25,4 mm (Espessura) x 127 mm (Diâmetro Interno).

3.1.3 Corpos de Prova

Os corpos de prova foram feitos de Aço AISI 4340 temperado e revenido, usinados em forma de anéis com diâmetro externo de 54 mm, diâmetro interno de 30 mm e espessura de 4 mm.

A confecção dos corpos de prova ocorreu no Laboratório de Tecnologia da Usinagem LATUS, Faculdade de Engenharia - UNESP - Bauru. O material foi serrado em discos de diâmetro 60 mm e 6 mm de espessura. As peças foram usinadas em torno convencional de forma que atingissem as dimensões desejadas. As dimensões principais dos componentes podem ser observadas na Figura 8.

Figura 8 – Dimensões dos corpos de prova (mm).



Fonte: autoria própria.

Seu tratamento térmico é definido por uma têmpera e um revenimento. A têmpera é feita a uma temperatura em torno de $830^{\circ}C$ à $850^{\circ}C$, sendo seguida por um resfriamento em óleo. Já o revenimento é feito à $250^{\circ}C$ com um resfriamento controlado

(as peças são aquecidas e permanecem durante um intervalo de tempo suficiente para que ocorram as transformações necessárias à recuperação de parte da ductilidade e tenacidade perdidas, sendo depois resfriadas até a temperatura ambiente), o que garante ao aço uma dureza por volta de 54 ± 2 HRc. Figura 9.

Figura 9: Corpos de Prova.



3.1.4 Parâmetros de Entrada

Nesta seção, serão apresentados os parâmetros que foram definidos durante os ensaios preliminares com o objetivo de atingir resultados satisfatórios no processo de retificação, e que se mantiveram constantes no decorrer dos ensaios definitivos. A seguir, são apresentados estes parâmetros:

- Velocidade de corte (V_s) de 30 m/s;
- Velocidades de mergulho (V_f): 0,25, 0,50 e 0,75 mm/min
- Rotação da peça (N_w) de 163 RPM;
- Penetração do rebolo na peça (a) de 0,1 mm;
- Tempo de spark-out (t_s) de 3,68 segundos;
- Largura de retificação (b) de 4 mm;
- Vazão do fluido de corte na refrigeração convencional de 10 l/min;
- Pressão do fluido de corte convencional: 1,3 bar;
- Profundidade de dressagem (a_d): 200 μm – 50 passes de 4 μm cada, em um único sentido.

Os parâmetros variáveis no processo foram os diferentes fluidos de corte e a velocidade de mergulho.

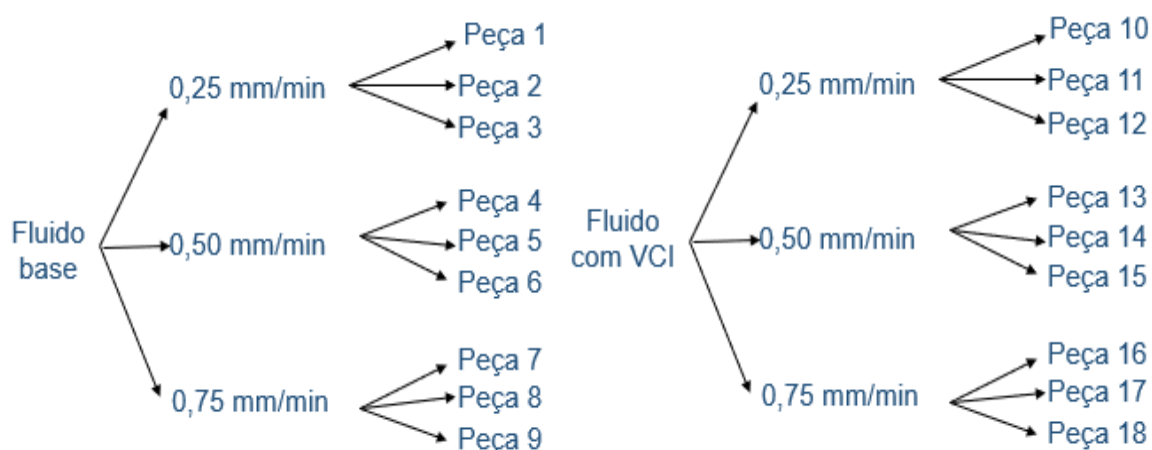
A programação CNC da retificadora foi definida para que o processo de retificação repetisse 50 vezes, de modo que pode-se atribuir duas características específicas a esses: Primeiro que o número de repetições foi essencial para que houvesse a possibilidade de mensurar o desgaste diametral do rebolo, pois com menor quantidade de material removido o sistema de medição não afere com total confiabilidade estatística. Segundo, pode-se atribuir analogamente que o fato de haver 50 repetições é correspondente à realização de 50 peças; decorrente do desgaste sofrido pelo rebolo, se a última peça (analisada) está em um padrão aceitável, logo pode-se assumir que todas as peças anteriormente feitas no processo também estariam em excelentes condições.

3.2 – MÉTODOS

3.2.1 – Procedimento de Ensaio

O procedimento para o ensaio foi realizado dividindo as amostras em dois grupos de 9 peças, utilizando fluido base e fluido com VCI. Três amostras de cada grupo foram retificadas com velocidades de mergulho de 0,25 mm/min., 0,50 mm/min. e 0,75 mm/min., conforme mostra o quadro 1.

Quadro1: Número de ensaios e velocidades de avanços.



As amostras foram fixadas num suporte através de uma porca e instaladas entre pontas na retificadora para o procedimento do ensaio (Figura 10).

Após cada ensaio, o rebolo foi dressado em 200 μm para evitar que o desgaste do rebolo interferisse no ensaio subsequente. As condições de dressagem foram mantidas constantes utilizando dressador conglomerado cuja ponta é composta de diamantes em uma matriz metálica de dimensões 15 mm x 8 mm x 10 mm, da empresa Master Diamond Ltda, utilizando sempre lubrificação convencional.

As condições de dressagem foram: velocidade de corte (v_s) = 30 m/s, velocidade de dressagem (v_d) = 100 mm/min, profundidade de dressagem por passada (a_d) = 4 μm . A montagem do ensaio está apresentada na Figura. 10.

Figura 10: Montagem experimental.



Fonte: Autoria própria.

3.2.2 - Medição de Rugosidade

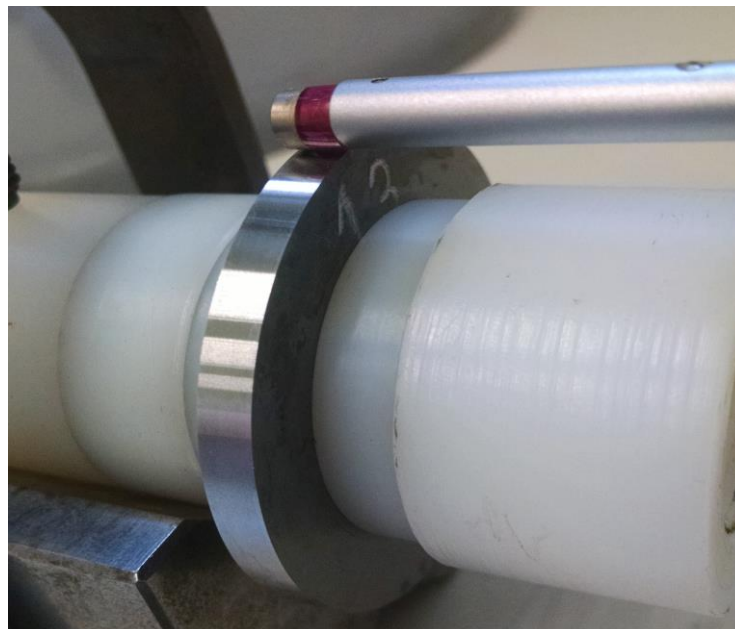
A medição da rugosidade média aritmética (R_a), bem como o desgaste diametral do rebolo, foi feita com um aparelho da marca Taylor Hobson modelo Surtronic3+. A rugosidade foi medida em três pontos diferentes da peça, e então, foi retirada uma média aritmética.

Este instrumento possui agulha do apalpador de diamante com raio de ponta de 5 μm , resolução de 0,01 μm e trabalha com carga de 150 a 300 gf. O conjunto é anexado a um microcomputador mediante a interface de transmissão para coleta de dados RS232. Este equipamento é capaz de fazer medições de rugosidade nos parâmetros Ra, Ry, Rz, Rq. Tem-se a possibilidade de configurar o comprimento de amostragem (cut-off), assim como o número de cut-offs de uma medição. No experimento, foi utilizado o parâmetro Ra (rugosidade média aritmética). As Figuras 11 e 12 mostram a Rugosidade sendo aferida.

Figura 11: Rugosímetro e suporte utilizados para medir a rugosidade das peças.



Figura 12: Rugosidade Média sendo aferida em um corpo de prova.



O equipamento foi aferido e calibrado antes das medições, sendo configurado com cut-off de 0,25 mm, comprimento de amostragem de 0,8 mm e o filtro 2CR-fase corrigida. O apalpador do equipamento foi posicionado de forma que a mensuração fosse praticada no sentido axial da peça. Os corpos de provas foram limpos utilizando uma sequência de banhos, respeitando a ordem crescente de volatilidade dos líquidos, a seguir: querosene, thinner, álcool etílico P. A. e álcool metílico P. A. Para a realização das medições, fixou-se o corpo de prova em um eixo, o qual por sua vez foi preso em um bloco em “V”. Executou-se 3 medições em cada peça, sendo estas feitas em regiões distintas e equidistantes. Com estes valores foi possível obter uma média aritmética e também o desvio-padrão dos valores aferidos de rugosidade.

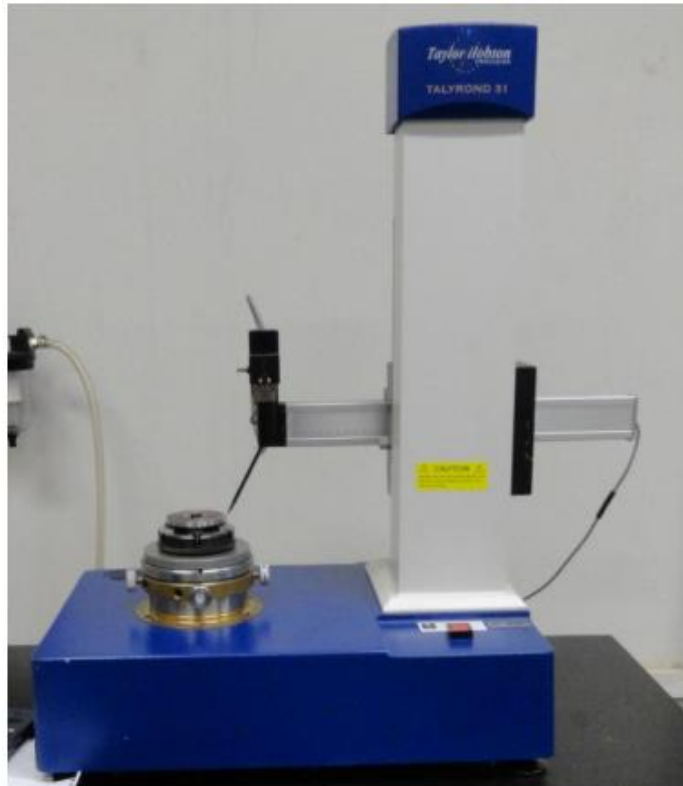
3.2.3 - Desvios de Circularidade

O desvio de circularidade é o espaço anelar entre dois círculos concêntricos no mesmo espaço, onde uma peça circular está dentro da tolerância se o par de círculos concêntricos envolver seu perfil ou o perfil da seção transversal. Esse tipo de análise está relacionado às condições de retificação, aos danos térmicos, à resistência mecânica, ao fluxo de fluido de corte e à pressão. Além disso, pode-se indicar uma variação da geometria da peça que dependendo do sistema, rebolo, sistema de refrigeração e parâmetros de usinagem empregados, qualquer processo de usinagem com alta geração de calor pode causar variação dimensional e geométrica na peça (HADAD et al., 2012). Durante as operações de retificação, a quantidade de cavacos gerados aumenta até se alojarem nos poros do rebolo, causando deformação elástica e plástica da peça e, conseqüentemente, aumentando o atrito na zona de contato. Como as forças de corte são aumentadas, o acabamento da peça é prejudicado e os desvios de circularidade são aumentados. As altas temperaturas na zona de corte causam a expansão mecânica descontrolada e a retração da peça devido ao resfriamento pelo fluido lubrificante, que são as causas primordiais do desvio de circularidade (SOUZA et al., 2004). O produto final fabricado nunca será verdadeiramente circular, uma vez que existem imperfeições no seu processo de manufatura. No que se relaciona ao processo de fabricação, os erros de circularidade são possíveis de ocorrer devido ao desgaste do rebolo, lubrificação inadequada, defeitos nos componentes da máquina, vibrações, desalinhamento dos mandris (AYUB et al., 2014). O desvio de circularidade também corresponde a um parâmetro relevante quando a retificação cilíndrica é estudada, uma vez que a deflexão elástica do sistema ferramenta-peça, além do perfil irregular do rebolo e remoção irregular do material

pode ser responsável por erros geométricos. Entretanto a aplicação de um tempo de spark-out adequado e um processo de dressagem adequado pode evitar o perfil irregular do rebolo (LOPES et al., 2018).

O desvio de circularidade foi obtida por meio da utilização de um circularímetro modelo *Talyrond 31C* marca *Taylor Hobson* (Figura 13).

Figura 13: Circularímetro Talyrond da marca Taylor Hobson.

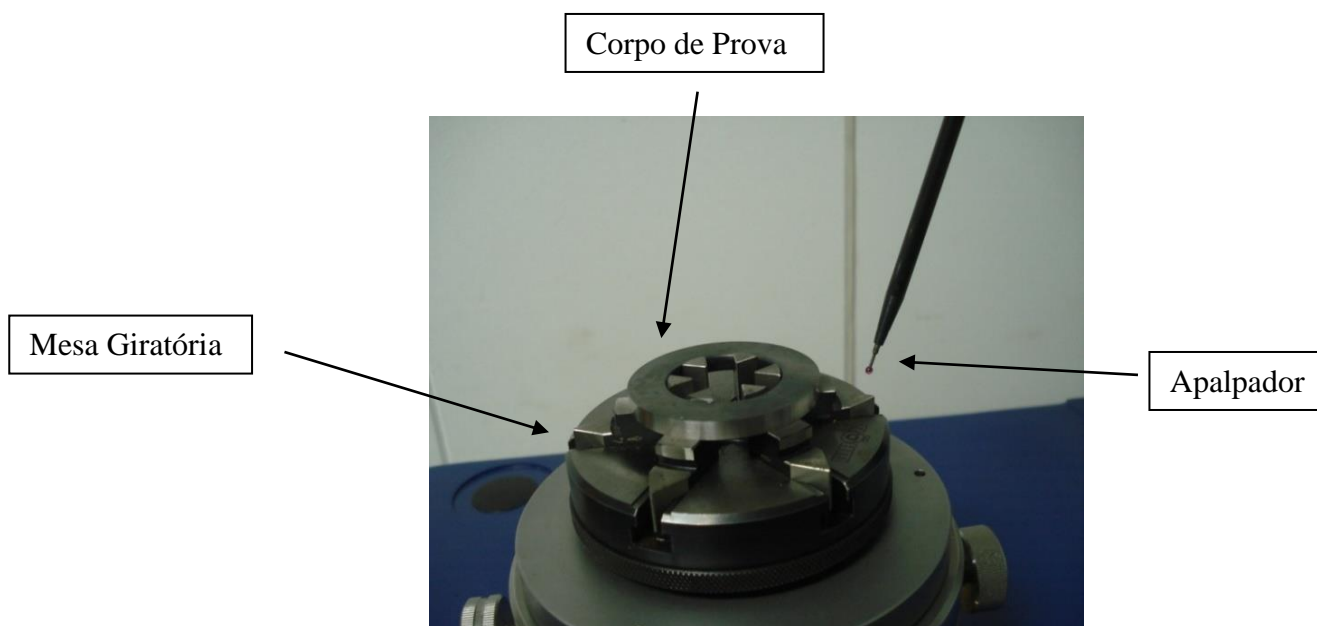


Na ponta do braço encontra-se o apalpador com uma ponta de rubi, elemento que efetua o contato com a peça para a obtenção da circularidade. O detalhe da ponta de rubi pode ser visto na figura 14.

A precisão deste equipamento é de $0,03 \mu\text{m}$ e sua capacidade máxima de medição é de 370 mm de diâmetro e 225 mm de altura. O equipamento é dotado de um conjunto braço/coluna, que possibilita o movimento em dois eixos (vertical e horizontal). A mesa giratória do dispositivo é alimentada através de um sistema de ar comprimido para que o movimento de rotação seja constante e suave. Antes da entrada no circularímetro, o ar comprimido passa por um registro e um filtro de ar que permitem regular a pressão no sistema.

A peça foi fixada em uma placa de três castanhas, verificando-se a melhor fixação. A linha de centro de giro é perpendicular à face da peça e passa pelo centro determinada por dois diâmetros perpendiculares da peça (considerada no seu plano da face). Na ponta do braço do equipamento encontra-se a parte mais sensível da máquina, o apalpador com uma ponta de rubi, elemento que efetua o contato com a peça para a obtenção dos desvios de circularidade. Antes das medições, as amostras foram submetidas a banhos de limpeza como nas medições de rugosidade, para impedir que pequenas partículas abrasivas influenciassem na medição desta grandeza. Deste modo, foram executadas três medições em posições distintas, defasadas a 120° da posição anterior. A largura total da peça para cada passe de retificação foi de 4 mm. Portanto, foi realizado um deslocamento axial na máquina (vertical) de 0,75 mm entre cada medição.

Figura 14 - Detalhe do apalpador.



3.2.4 - Preparação das amostras para análise metalográfica e microdureza

Após os ensaios para a determinação dos desvios de circularidade e de rugosidade, os corpos de prova foram seccionados em três partes distintas. A avaliação e caracterização microestrutural e mecânica das amostras nas condições: como recebida, tratadas termicamente e após os ensaios de retificação foi realizada com o auxílio de várias técnicas complementares de análise, a saber: macrografias da superfície, microscopia

óptica e ensaios de microdureza Vickers. Tais processos de preparação metalográfica são normatizados pela norma ASTM E 3-01 (2001) Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens. A preparação das amostras foi realizada no Laboratório de Materiais da Faculdade de Engenharia - UNESP - Bauru.

Inicialmente, as amostras foram retiradas dos corpos de prova utilizando uma máquina de corte metalográfico da marca Struers, na sequência, empregou-se uma máquina de microcorte de precisão da marca Presi, modelo Mecatome 180 para a finalização do dimensionamento das amostras. Em ambos os equipamentos, foram utilizados discos de corte abrasivo de carbeto de silício (SiC), assistidos por refrigeração a fim de evitar alterações microestruturais. Por consequência do dimensionamento das amostras (10 mm x 10 mm x 4 mm), foi necessário utilizar a técnica de embutimento a quente utilizando resina fenólica (baquelite), com reforço metálico no contorno das unidades. Esta condição facilitou a manipulação das amostras e suas observações no microscópio, pois se conseguiu um maior paralelismo entre a superfície polida a ser analisada e o plano focal da lente objetiva, resultado em foco em toda a superfície. As amostras foram embutidas individualmente em um equipamento da marca Teclago, modelo EM30D, utilizando-se uma temperatura de 180 °C, pressão mínima de 9,81 MPa, com resfriamento de 10 minutos.

A preparação da superfície iniciou-se com o lixamento em lixadeira manual da marca Struers, utilizando lixas de carbeto de silício (SiC) de granulometrias 120, 220, 320, 400, 500, 600, 1000, 1200, 1500 e 2000 mesh. Em todas as etapas do processo foi utilizada água filtrada como lubrificante e refrigerante. Utilizou-se o líquido para que ocorresse maior rendimento possível dos consumíveis e para que as partículas abrasivas que se soltam do papel e partículas do material desgastado fossem levadas pelo fluido, impedindo impregnações. Cada vez que se mudou para uma granulometria menor, deu-se um giro de 90 graus na amostra em relação a direção anterior de lixamento. Esta sequência fez com que os riscos deixados pelo papel abrasivo anterior fossem removidos. Procedeu-se também lavar a amostra com água nas trocas das lixas para evitar que houvesse contaminação com grãos maiores do que os utilizados pelo processo de lixamento posterior. Antes de iniciar o polimento, foi importante lavar as amostras com detergente neutro e álcool hidratado 92,8 °INPM, secando posteriormente com jatos de ar quente oriundos de um soprador térmico da marca Dewalt, modelo D26414.

O polimento foi efetivado em quatro etapas, utilizando pastas à base de diamante de 6 μm e 3 μm , e posteriormente com óxido de alumínio (Al_2O_3 , alumina) em suspensão de 1 e 0,3 μm . Entre cada etapa, as amostras eram lavadas com água e detergente neutro para evitar contaminação dos panos de polimento. Para as atividades com pastas de diamante utilizou-se uma politriz metalográfica rotativa da marca Arotec, modelo APL-4, e para as aluminas, uma politriz da marca Buehler, modelo AP 2, ambas com uma rotação do prato de 500 rpm (rotações por minuto), durante 3 minutos por amostra. Utilizou-se panos de polimento da marca Arotec, modelo DBM para o óxido de alumínio e Gold para o diamante. No polimento, foram eliminados todos os riscos do lixamento e as amostras ficaram totalmente espelhadas, com alta refletividade. Concluindo o processo de polimento, utilizou-se uma cuba de ultrassom digital microprocessada para limpeza (Clear Machine) da marca Yaxun, modelo 3560. As amostras foram imersas em álcool isopropílico na temperatura de 25 °C e agitadas por 10 minutos, depois secas em soprador térmico. Durante o procedimento de preparação e caracterização das amostras, a temperatura do laboratório foi mantida em 25 °C e a umidade do ambiente em 45%, as medições dessas grandezas foram feitas empregando um termohigrômetro digital da marca Icel Manaus, modelo HT – 208.

3.2.5 - Microscopia Ótica

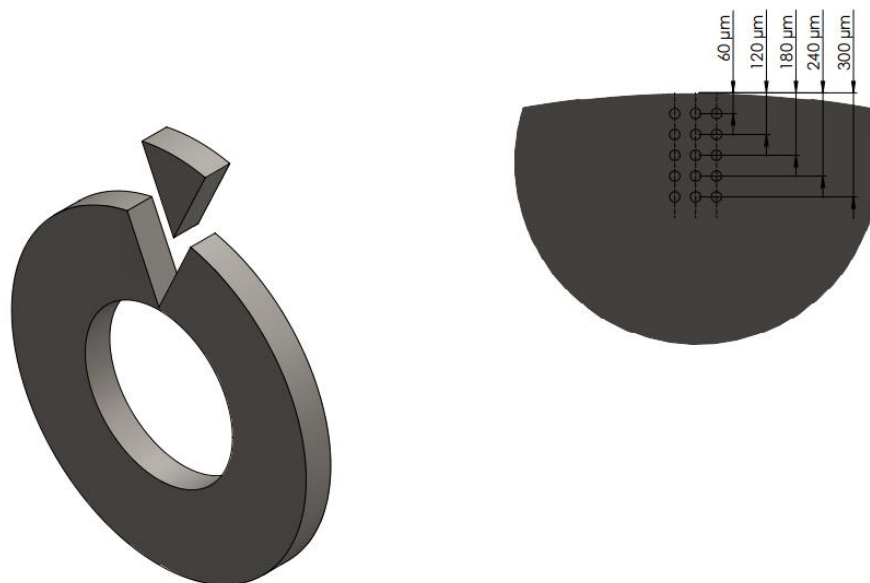
A princípio, investigou-se o material observando-se as amostras polidas sem ataque, com ampliação de 500x. Na sequência, para observar as microestruturas, atacou-se quimicamente a superfície a ser estudada pelo método de imersão, utilizando uma solução de Nital 2% (álcool etílico P.A. com 2% de ácido nítrico P.A.) na temperatura de 25 °C por cerca de cinco segundos. Para neutralizar a ação do reagente químico, as amostras foram lavadas com água, detergente neutro e álcool etílico. As observações e documentação fotomicrográfica das amostras foi feita em microscópio óptico da marca Olympus, modelo BX51, acoplado a uma câmera digital da marca Leica, modelo EC-3 e o aplicativo de registro fotográfico Leica Application Suite EZ - versão 2.0, pertencentes ao Laboratório de Materiais da Faculdade de Engenharia UNESP - Bauru.

3.2.6 - Microdureza

Para as medições de microdureza, foi utilizado um Microdurômetro digital da marca Mitutoyo modelo HM-211.

Após a análise por microscopia óptica, as amostras foram submetidas novamente a um polimento metalográfico com alumina de 1 μm e direcionadas à medição de microdureza. A medição de microdureza foi realizada a partir da impressão produzida por um indentador padrão com ponta de diamante em forma da pirâmide alongada, utilizando carga de 500 gf de 10 a 15 segundos, depois de atingido o valor total da carga. A medição da microdureza superficial baseou-se nas normas ASTM E384-07 (2007) e ASTM E92-17 (2017). Nesta pesquisa, os ensaios de microdureza foram realizados de duas maneiras: sob a superfície retificada e ao longo das faces perpendiculares a superfície retificada. Para tanto, foi preparado outro conjunto de amostras, estas embutidas em baquelite de forma que a parte convexa da amostra proporcionasse condições de executar o lixamento até obter-se um comprimento (l) de aproximadamente 5 mm, o que resultaria em uma profundidade abaixo da superfície de aproximadamente 160 μm . Em cada amostra foram realizadas cinco medições em dez posições diferentes, respeitando a distância mínima de 2,5 vezes o comprimento da maior diagonal encontrada, conforme figura X. Os resultados apresentados são as médias dos valores obtidos, juntamente com seus respectivos desvios-padrão, sendo utilizados para verificação do perfil de microdureza em função da taxa de avanço e do número de entalhes de cada corpo de prova retificado.

Figura 15 – Desenho esquemático das medições de microdureza



4 DISCUSSÕES E RESULTADOS

Essa seção apresenta os resultados das variáveis de saída na retificação do aço AISI 4340 com rebolo de óxido de alumínio utilizando dois fluidos de corte diferentes. As variáveis analisadas foram: rugosidade média, circularidade, desgaste diametral do rebolo, potência, emissão acústica e vibração. Além disso, foram feitas microscopias ópticas e microdureza Vickers para a verificação da presença, ou ausência, de danos térmicos nas peças.

A adição do inibidor volátil de corrosão se mostrou benéfica com processo de retificação. As duas variáveis de saída analisadas (rugosidade e desgaste diametral do rebolo), apresentaram valores melhores com a presença do VCI que utiliza a água como meio de propagação, se comparado ao fluido base. Isso se deve ao fato do VCI apresentar propriedades de lubrificidade e detergência, porém, o principal motivo para o melhor desempenho, pode se dar por o VCI ser um sal de amina que se saponifica de forma diretamente proporcional a temperatura. É possível perceber que ambos os fluidos apresentaram resultados semelhantes em uma baixa velocidade de mergulho. Porém, ao se aumentar a velocidade de mergulho, ocorre o aumento da temperatura por tornar o processo mais agressivo, e então, o fluido com o VCI apresentou melhores resultados se comparado com o fluido base. Isso permite aumentar velocidade de corte e com isso melhorar a produção.

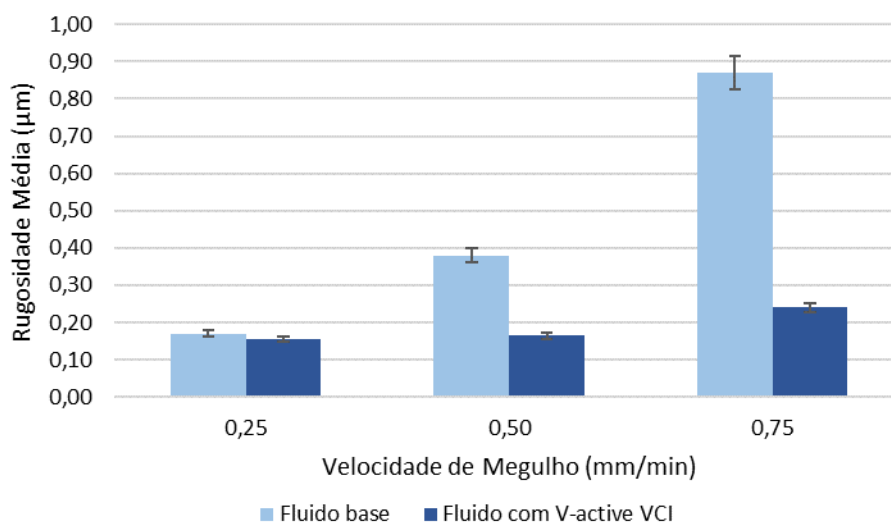
4.1 Rugosidade Superficial Média

Segundo Silva et al. (2013) a rugosidade superficial é um parâmetro importante de ser analisado, uma vez que infere diretamente na resistência a fadiga dos componentes quando submetidos a ciclos de tensão. Entre os fatores que influenciam na rugosidade estão: o coeficiente de atrito, tipo de abrasivo, lubrificação, condutividade térmica, resistência mecânica da peça, entre outros.

Assim, observa-se que todos os parâmetros que influenciam nos valores finais de rugosidade foram mantidos constantes, com exceção da lubrificação, uma vez que dois fluidos foram comparados durante a realização deste trabalho. Portanto, os diferentes resultados estão relacionados exclusivamente ao fluido de corte do processo.

A Figura 16 apresenta as médias aritméticas da rugosidade em cada condição presente nos ensaios.

Figura 16: Rugosidade média por velocidade de mergulho.



Fonte: Autoria própria.

É possível notar que na velocidade de 0,25 mm/min ambos os fluidos foram equivalentes. Conforme se aumenta a velocidade de mergulho e o processo fica mais agressivo, devido ao aumento da taxa de remoção de material, as curvas de rugosidade apresentaram considerável discrepância. Isso indica que a adição do V-active VCI se torna benéfico no quesito variáveis de saída, a medida que se aumenta a severidade do processo.

Ao se aumentar a velocidade de mergulho, ocorre o aumento da temperatura por tornar o processo mais agressivo, e então, o fluido com o V-active VCI apresentou melhores resultados se comparado com o fluido base. Isso se deve ao fato do V-active VCI apresentar em sua formulação, um agente de lubrificação, que tem a propriedade de polimerizar conforme a necessidade e exigência. Assim, quanto maior a pressão e a temperatura, maior o nível de polimerização (determinado pela concentração em banho). Além desta propriedade, os sais constituintes do V-active VCI interagem quimicamente com os agentes de lubrificação, potencializando seu efeito.

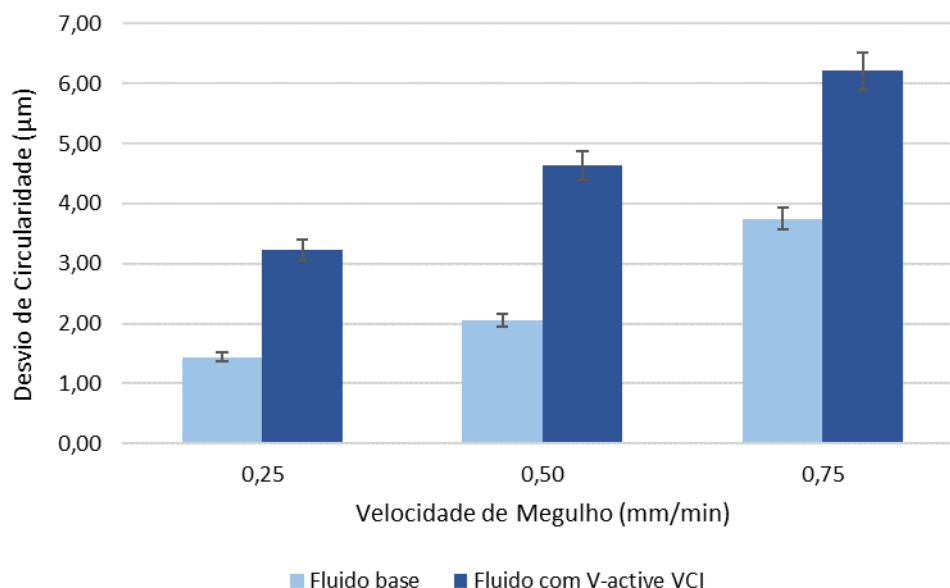
A adição do inibidor volátil de corrosão no fluido de corte se mostrou benéfica para a rugosidade, uma vez que essa variável apresentou valores melhores com a presença do V-active VCI, principalmente quando o processo se tornou mais agressivo.

4.2 Desvios de circularidade

Realizaram-se três medições em posições distintas na região retificada de cada uma das três peças retificadas em cada ensaio.

A Figura 17 apresenta as médias dos valores de circularidade obtidos neste trabalho.

Figura 17: Desvio de circularidade por velocidade de mergulho.



Fonte: Autoria própria.

Conforme apresentado na figura 17, é possível notar uma pequena melhora nos valores de circularidade nos corpos de amostra utilizando fluido base. Além disso, para ambos fluidos, os desvios de circularidade seguiram a tendência de aumentar com o aumento da velocidade de mergulho. Esse comportamento é justificável, uma vez que é sabido que uma maior velocidade de mergulho aumenta a severidade do processo, o que resulta em uma maior espessura do cavaco e, conseqüentemente, um aumento da geração de calor na interface de corte (ROWE, 2014).

Silva et al. (2013) afirmam que a precisão do processo piora conforme a temperatura do processo aumenta devido a dilatação da peça. Como consequência, erros geométricos tendem a ocorrer quando a refrigeração não ocorre de maneira eficaz.

Além disso, de acordo com Yoshimura et al. (2005), a adição de água no fluido utilizado melhora significativamente a dissipação de energia térmica, que é provida pela evaporação da água durante o processo de usinagem. De acordo com Belentani et al. (2014) a água possui duas vezes mais capacidade de refrigeração que o óleo puro. Uma vez que ambos fluidos foram diluídos na concentração de 3%, a quantidade de água no

processo foi à mesma para os dois. Dessa forma, o poder de refrigeração da água foi o mesmo para os dois fluidos, e o melhor desempenho do fluido base na circularidade pode ser explicado pela melhor refrigeração do mesmo, se comparado ao fluido com V-active VCI.

Vale ressaltar que o maior desvio de circularidade foi menor do que 7 μm para ambos os fluidos, o que indica que os dois apresentaram resultados consideravelmente satisfatórios nessa variável de saída.

4.3 Desgaste Diametral do Rebolo

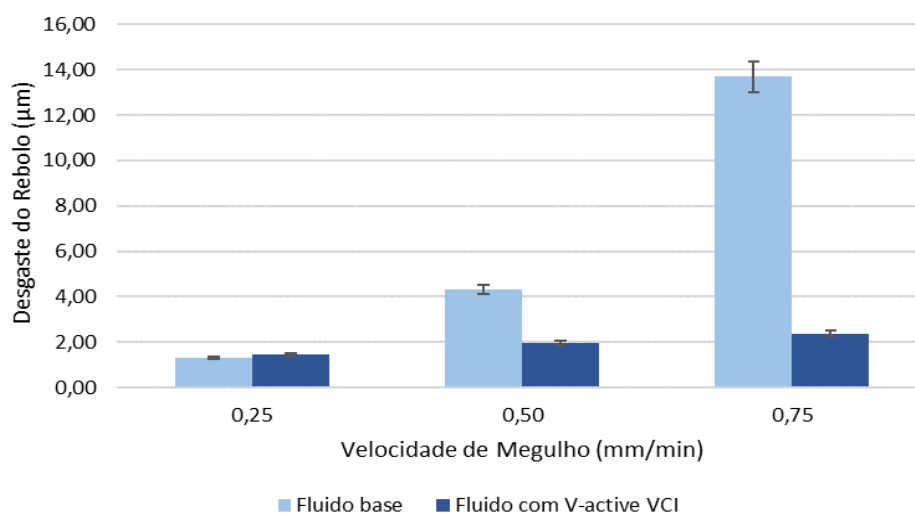
A importância estudar o comportamento do desgaste do rebolo é relevante para que a qualidade e a eficiência do processo de retificação sejam atendidas, uma vez que as forças de retificação e a qualidade da operação de usinagem são determinadas pelo desempenho da ferramenta de corte (DING et al., 2014). Além disso, o desgaste do rebolo tem relação direta com o sistema de lubrificação utilizado. O melhor método de lubrificação é aquele capaz de manter os grãos abrasivos mais tempo no ligante (Iceri et al., 2012).

Segundo Silva et al. (2007), o aumento da lubrificação pela aplicação do fluido de corte, gera a diminuição do desgaste do rebolo, devido a diminuição do atrito entre o grão, a peça e o cavaco. Assim, a lubrificação permite aos grãos abrasivos permanecerem por mais tempo fixado ao ligante, o que gera um menor desgaste diametral do rebolo.

Logo, uma eficiente lubrificação da zona de contato reduz o desgaste do rebolo, por diminuir as forças de corte (SILVA et al., 2013).

A Figura 18 apresenta as médias dos valores de desgaste diametral do rebolo para cada uma das condições de usinagem dessa pesquisa.

Figura 18: Desgaste diametral do rebolo por velocidade de mergulho.



Fonte: Autoria própria.

A partir da Figura 18 é possível verificar que o desgaste seguiu a mesma tendência da rugosidade, apresentada na Figura 16. O aumento da velocidade de mergulho, e por consequência o aumento da severidade do processo, resultou em maiores valores de desgaste diametral do rebolo. Além disso, os dois fluidos apresentaram valores semelhantes na velocidade de mergulho mais baixa, porém o fluido com V-active VCI se mostrou superior conforme aumentou-se a velocidade de mergulho. Sabendo-se a influência da lubrificação no desgaste, é possível afirmar que devido ao fato do V-active VCI apresentar um agente de lubrificação em sua composição, capaz de se polimerizar conforme a necessidade e exigência, a lubrificação do fluido ficou mais eficiente conforme ocorreu a elevação da agressividade do processo.

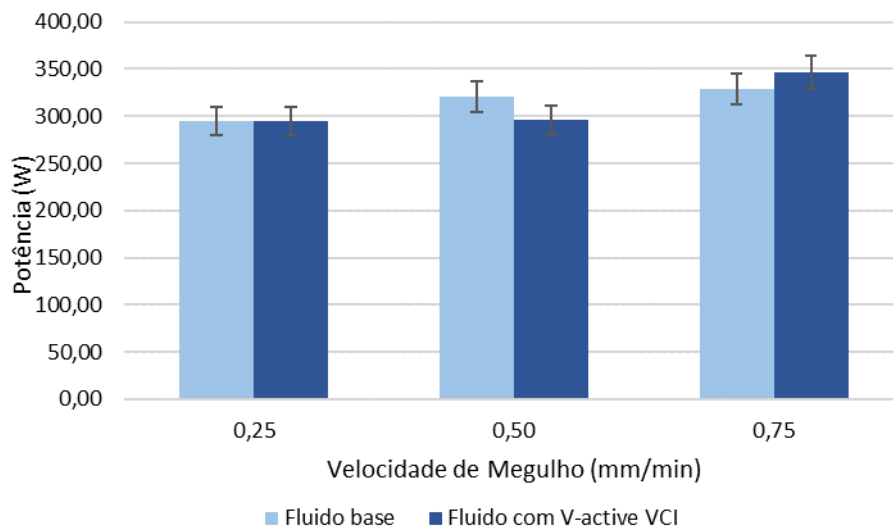
Assim, como no desvio de circularidade, é necessário ressaltar que a comparação entre os desgastes diametraes para os dois fluidos, ocorreu em uma margem de valores expressiva para essa variável, o que indica a qualidade de lubrificação de ambos os fluidos. No estudo de Bianchi et al. (2017), o rebolo de CBN apresentou um desgaste levemente maior que o desgaste apresentado na Figura 18, utilizando também a lubrificação convencional. Ou seja, tem-se que a adequação do fluido de corte com V-active VCI permitiu utilizar um rebolo convencional proporcionando seu desgaste compatível ao CBN, o que no meio industrial, pode resultar em grandes perspectivas econômicas, pois, segundo Marinescu et al. (2007), os rebolos convencionais são em média 10 vezes mais baratos que um rebolo superabrasivo.

4.4 Potência Elétrica

Nascimento et al. (2015) afirmam que a potência está diretamente ligada as forças de corte.

É possível notar a oscilação da potência durante o ensaio. Esses picos e vales são uma consequência do spark-out definido no processo. A partir dos valores apresentados na Figura 19, é possível obter a potência elétrica média para determinada peça.

Figura 19: Potência elétrica por velocidade de mergulho.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 19 mostra que a potência elétrica se manteve semelhante entre os dois fluidos em todas as condições. Segundo Belentani et al. (2014), a lubrificação do processo influencia diretamente na potência da retificação, uma vez que reduz as forças de atrito e com isso o rebolo desliza com maior facilidade sobre a peças. Os dois fluidos apresentaram excelentes resultados nas variáveis de saída. A partir da Figura 19, é possível concluir que uma sutil diferença na lubrificação ou refrigeração entre os fluidos, não foi capaz de influenciar drasticamente na potência da retificação. Isso justifica a proximidade nos resultados obtidos para cada condição. Deste modo, ressalta-se que houve uma sutil variação nos valores de potência entre as três condições, o que é esperado, uma vez que o aumento da velocidade de mergulho eleva as forças de corte, resultando em uma maior potência.

Oliveira et al. (2012) afirmam que, conforme aumenta o número de cavacos alojados nos poros do rebolo, aumenta-se o atrito no processo e com isso a potência

elétrica consumida eleva-se. Logo, a lubrificação convencional é a melhor condição para a potência na retificação, uma vez que evita o entupimento dos poros do rebolo e lubrifica de maneira eficiente o processo.

A Tabela 2 mostra a porcentagem do desvio entre os valores obtidos de potência para ambos os fluidos, dentro de uma mesma condição.

Tabela 2: Porcentagem do erro para os valores de potência em cada condição.

Velocidade de mergulho (mm/min.)	Desvio-padrão entre os dois fluidos (%)
0,25	0,23
0,50	7,37
0,75	5,00

Portando, a Tabela 2 mostra a semelhança entre os valores de potência em cada condição, apresentando valores percentuais baixos de erros. Isso indica que os fluidos não apresentaram considerável discrepância na potência de retificação, resultando em um desempenho semelhante.

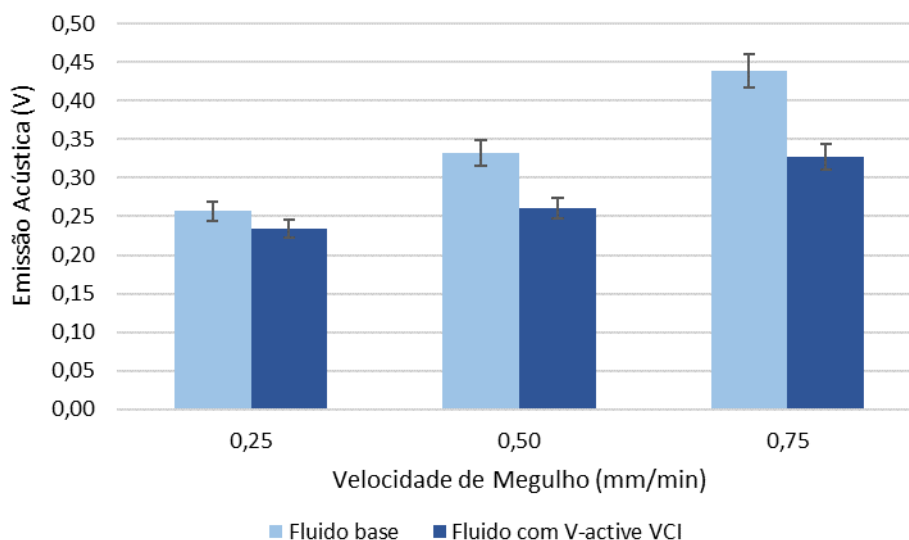
4.5 Emissão Acústica

Diversos fenômenos físicos geram a emissão acústica, como por exemplo: atrito, deformações plásticas e elásticas, cisalhamento para formação do cavaco (OLIVEIRA et al., 2012).

A emissão acústica é um método indireto comumente utilizado devido ao fato de poder ser adquirido sem interromper o processo de usinagem para a aquisição de seus sinais.

A Figura 20 apresenta a média aritmética dos valores de emissão acústica para cada uma das condições estudadas.

Figura 20: Emissão acústica por velocidade de mergulho.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 20 seguiu a mesma tendência dos resultados obtidos de rugosidade e desgaste diametral do rebolo, apresentados nas Figuras 16 e 18 respectivamente. Para a velocidade de mergulho mais baixa, ambos fluidos tiveram valores semelhantes para essa variável, e o fluido com V-active VCI apresentou um desempenho significativamente melhor que o fluido base conforme aumentou-se a severidade do processo.

Sabendo-se que a emissão acústica é reduzida com uma melhor lubrificação do processo (ou seja, são inversamente proporcionais), a tendência observada na Figura 18, é justificada pela capacidade de polimerização do agente de lubricidade presente no V-active VCI, conforme aumenta sua exigência. Portanto, com o aumento da severidade do processo, o fluido com V-active VCI reagiu de forma a aumentar sua lubricidade, causando uma redução da emissão acústica quando comparada ao fluido base. Novamente, essa característica se mostra como crucial para o ambiente industrial, já que possibilita os mesmos resultados de emissão acústica, em uma velocidade de mergulho superior.

Segundo Lee et al. (2006), o desgaste diametral do rebolo influencia diretamente na emissão acústica. Isso se deve ao fato de que a emissão acústica capta sinais de fratura do grão e do ligante. Sabendo-se que esses dois fatores resultam em um desgaste no rebolo, conclui-se que o aumento do desgaste do rebolo gera um aumento da emissão acústica no processo de retificação. Ainda observando a Figura 20, porém analisando a tendência de ambos fluidos, é possível notar que o aumento da velocidade de avanço gera um aumento dos valores de emissão acústica. Com o aumento da velocidade de mergulho ocorre um

aumento das forças de corte, resultando em uma maior friabilidade de grãos e em um maior desgaste do ligante, além do favorecimento do entupimento do rebolo (que também é um influenciador no aumento da emissão acústica).

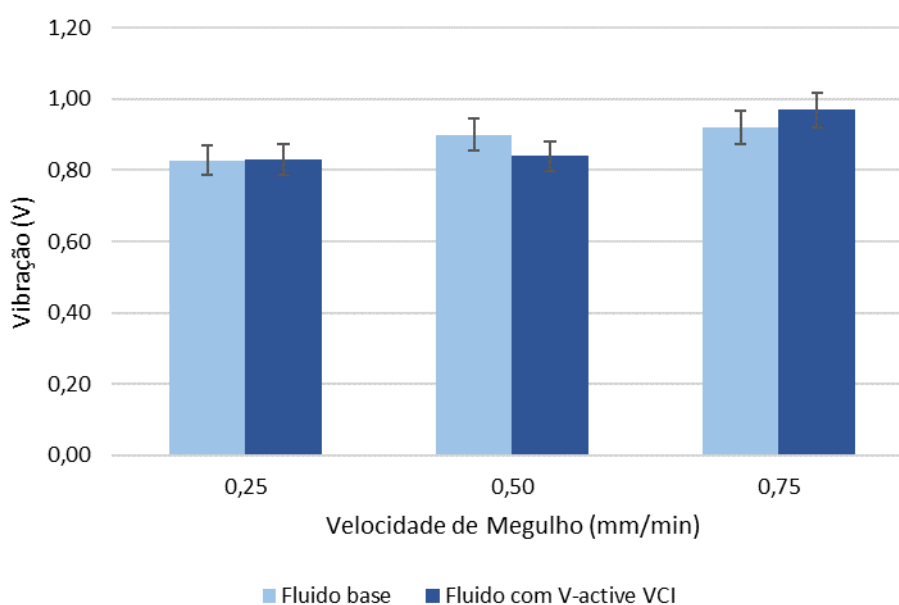
4.6 Vibração

Rowe (2014) afirma que a vibração está associada à rigidez da máquina e ao balanceamento do rebolo, sendo que esses parâmetros foram mantidos constantes durante os ensaios. Portanto, a variação de vibração ocorreu devido às condições de refrigeração e lubrificação do processo. Segundo o mesmo autor, a vibração provoca ondulações na superfície da peça e perda na precisão do processo.

A partir da Figura 21, é possível notar a semelhança com a Figura 18, onde não houve grande discrepância entre os valores da variável, dentro de uma mesma condição.

A Figura 21 apresenta as médias aritméticas dos valores de vibração adquiridos durante os ensaios.

Figura 21: Vibração por velocidade de mergulho.



Fonte: Autoria própria.

Assim, analisando a Figura 21, é possível notar que a vibração manteve a tendência de aumentar conforme a velocidade de mergulho foi elevada, o que é justificável, uma vez que a severidade do processo aumentou. Também, nota-se a semelhança entre os valores de vibração para ambos os fluidos.

A Tabela 3 mostra a porcentagem do erro entre os valores obtidos de vibração para ambos os fluidos, dentre de uma mesma condição.

Tabela 3: Porcentagem do erro para os valores de vibração em cada condição.

Velocidade de mergulho (mm/min.)	Desvio padrão entre os dois fluidos (%)
0,25	0,36
0,50	6,66
0,75	5,43

Pela Tabela 3, percebe-se que os valores foram próximos o suficiente para se concluir que ambos os fluidos apresentaram um desempenho semelhante na vibração, sem maiores discrepâncias, provando a efetividade de ambos na lubrificação e refrigeração do processo. Analisando os respectivos desvios-padrão, tem-se que independentemente dos fluidos, não houve grandes variações. Em seu estudo, Bianchi et al. (2018) afirmam que valores baixos de vibração não interferem no resultado final da peça. Nesse mesmo estudo, os autores conseguiram valores de vibração semelhantes entre lubrificação convencional e MQL com limpeza, e mostraram que a equiparidade da vibração entre as condições fez com a que a mesma não fosse de grande influência nas outras variáveis de saída, não havendo diferença estatística entre os resultados.

4.7 Microscopia ótica

Silva et al. (2013) afirmam que toda energia gasta na retificação é transformada em calor na zona de contato entre peça e rebolo, logo, é de suma importância analisar a integridade superficial da peça na retificação, visto que, caso a lubrificação não tenha sido eficaz, poderão ocorrer danos à microestrutura da peça, como por exemplo: micro trincas, queima, e mudanças micro estruturais.

Segundo os mesmos autores, caso não haja mudanças micro estruturais, significa que a quantidade de calor e de deformação plástica aplicadas na peça durante o processo de retificação não foram suficientes para produzir alterações micro estruturais na superfície da peça.

Nas Figuras 22 a 27, estão apresentadas algumas das microscopias óticas dessa pesquisa, utilizando uma ampliação de 500x. Em todas essas imagens, é possível observar a microestrutura do aço AISI 4340 temperado e revenido. Percebe-se a presença de

martensita em todas elas (parte clara da imagem) e baquelite (parte escura). No caso da retificação, qualquer dano térmico iria ocorrer na superfície retificada, que seria a zona de fronteira entre o aço e o baquelite nas subseqüentes imagens.

Figura 22: Microscopia de peça retificada com $V_f=0,25$ mm/min com o fluido base (aumento 500X).



Fonte: Autoria própria.

Figura 23: Microscopia de peça retificada com $V_f=0,25$ mm/min com o fluido V-active VCI (aumento 500X).



Figura 24: Microscopia de peça retificada com $V_f=0,50$ mm/min com o fluido base.



Fonte: Autoria própria.

Figura 25: Microscopia de peça retificada com $V_f=0,50$ mm/min com VCI.



Figura 26: Microscopia de peça retificada com $V_f=0,75$ mm/min com o fluido base.



Fonte: Autoria própria.

Figura 27: Microscopia de peça retificada com $V_f=0,75$ mm/min com o fluido V-active VCI (aumento 500X).



Fonte: Autoria própria.

Pequenas diferenças de coloração e tamanho da martensita não são danos térmicos e podem ser desconsideradas. O importante a se observar nessas microscopias ópticas é a homogeneidade da martensita em cada peça. A martensita é originada pelo processo de têmpera no aço, que consiste no aquecimento do mesmo acima da temperatura de austenitização do material, seguido de um resfriamento rápido (normalmente em algum óleo), tornando o aço uma estrutura tetragonal de corpo centrado (CALLISTER, 2007).

Logo, segundo Oliveira et al. (2012), no processo de retificação é possível que ocorra uma retêmpera, onde o material atinge a temperatura de austenitização devido ao calor gerado pelo processo de usinagem, e o próprio fluido de corte retira calor do material em uma taxa rápida de resfriamento, retemperando a peça. Isso gera um tratamento térmico indesejável, tornando o aço um material imprevisível quanto às suas características mecânicas. Geralmente, o dano térmico será identificado nas análises de microscopia, onde é possível notar uma camada branca ou escura na superfície retificada, ou na microdureza Vickers, onde será captada uma alteração de dureza na peça.

Com isso, nota-se que em nenhuma condição houve a formação de camada branca ou escura, o que indica que o calor na superfície da peça não foi suficiente para gerar

qualquer dano térmico, significando a total eficiência de ambos os fluidos de corte estudados.

Logo, os dois fluidos foram eficazes a ponto de preservar as características microestruturais das peças durante o processo de retificação.

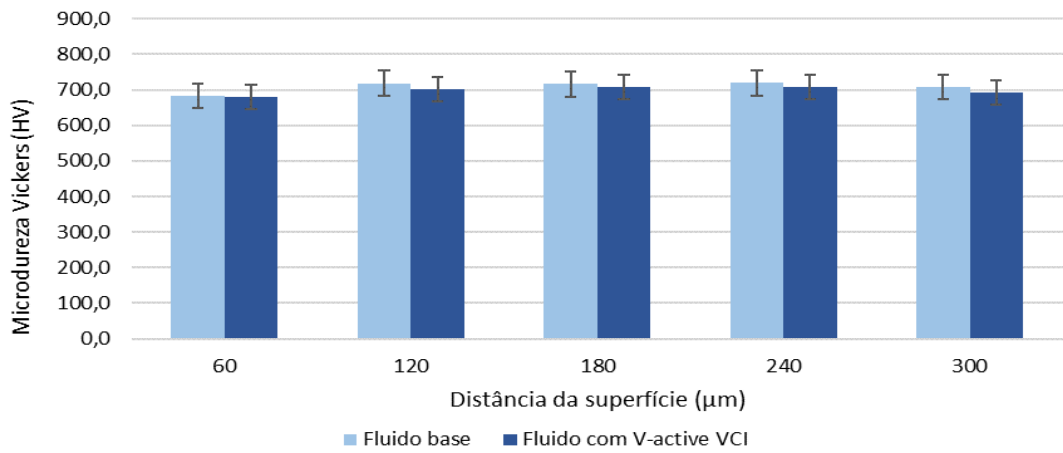
Segundo Rasim et al. (2015), este resultado é de suma importância no meio industrial, pois o fato de não ocorrer danos térmicos na peça, garante a manutenção de pontos como: qualidade microestrutural, propriedades mecânicas de projeto e eficácia do processo de usinagem.

4.8 Microdureza

Segundo Silva et al. (2013), esse parâmetro pode ser correlacionado com as imagens das microestruturas das peças. A análise de microdureza serve como um complemento para a microscopia óptica, pois tem a função de identificar danos térmicos de forma quantitativa, ou seja, verifica a existência de uma zona com dureza alterada na superfície retificada. Nas Figuras 28, 29 e 30, são apresentados os resultados da avaliação da microdureza das amostras retificadas. Essa análise foi feita segundo a norma ASTM E 384-07 (Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials), onde foram estabelecidos cinco pontos de medições após a superfície retificada, iniciando-se com a profundidade de 60 μm até 300 μm . Utiliza-se essa metodologia afim de verificar se houve algum dano térmico na superfície retificada. Isso é feito de forma comparativa, verificando a ocorrência de alterações na microdureza do material, conforme se avança da superfície para o interior da peça. Faz-se isso, uma vez que danos térmicos irão gerar alterações superficiais de microdureza, e o interior da peça preservará a dureza real do material (antes da retificação).

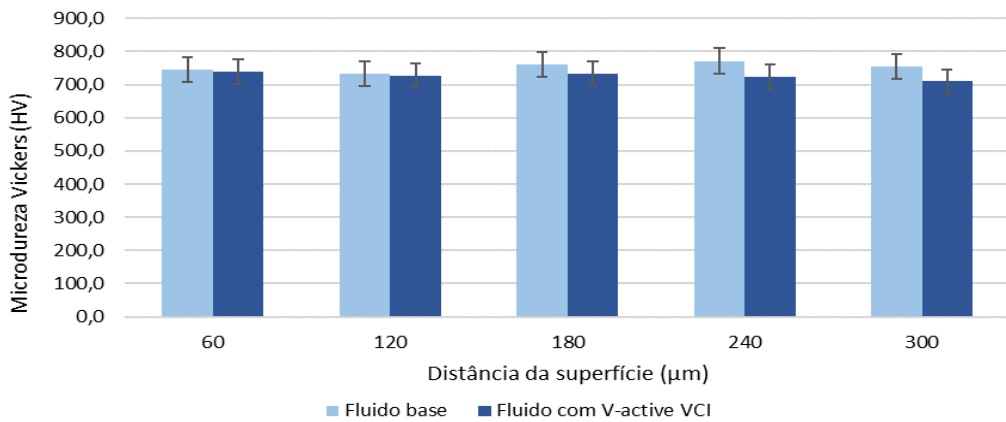
Esse procedimento foi repetido 3 vezes para cada peça, e a dureza Vickers foi calculada a partir da média dos valores das duas diagonais deixadas na peça pelo indentador. Justamente por esse fato, utiliza-se a microdureza Vickers, uma vez que a média das diagonais aumenta a precisão do valor obtido por levar em conta a anisotropia do material.

Figura 28: Microdureza das peças de ambos fluidos na velocidade de 0,25 mm/min.



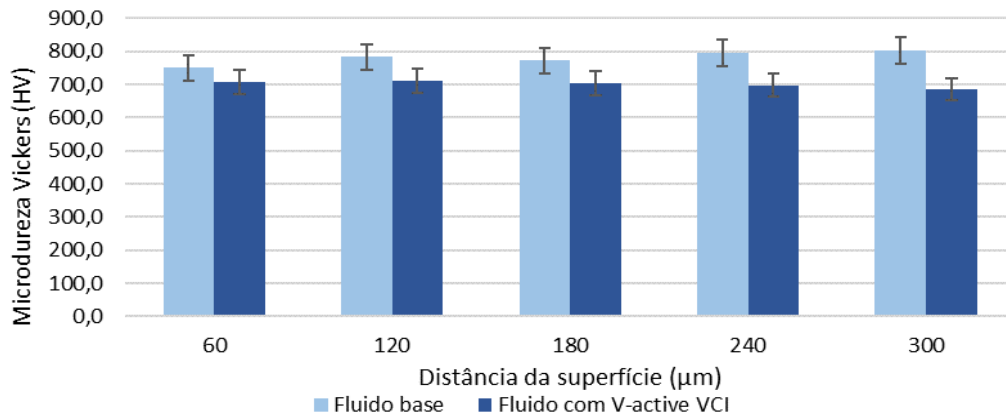
Fonte: Autoria própria.

Figura 29: Microdureza das peças de ambos fluidos na velocidade de 0,50 mm/min.



Fonte: Autoria própria.

Figura 30: Microdureza das peças de ambos fluidos na velocidade de 0,75 mm/min.



Fonte: Autoria própria.

As Figuras 28, 29 e 30, foram obtidos a partir da média aritmética de todos os valores a uma dada distância da superfície, em cada condição. As três velocidades de mergulho foram separadas em três gráficos distintos para facilitar a leitura.

A partir dos gráficos de microdureza apresentados, nota-se que em todas as peças não houve um endurecimento superficial, isto é, a microdureza não sofreu alterações significativas conforme avançávamos da superfície retificada para o interior da peça. Portanto, é possível aferir que não houve nenhum tipo de dano térmico nas peças, uma vez que a dureza se manteve constante nas mesmas.

Não se deve comparar os valores de dureza entre os dois fluidos. É necessário analisar se, dentro de uma mesma condição, não houve alteração da microdureza conforme mediu-se da superfície para o interior da peça. Com isso pode-se concluir que a superfície retificada não apresenta nenhum dano térmico, já que está com a mesma dureza do interior da peça.

Sutis diferenças nos valores de dureza entre um fluido e outro, ou entre uma condição e outra, são aceitáveis, uma vez que a microdureza Vickers é sensível o bastante para ter interferência de um contorno de grão, ou de diferenças no tratamento térmico.

Justamente por esses motivos, deve-se comparar se houve ou não constância na microdureza dentro de uma condição, e não comparar as durezas entre condições.

5 CONCLUSÕES

Após as análises feitas nesse estudo da retificação do aço AISI 4340 com rebolo de Óxido de Alumínio, foi possível concluir que o fluido com a nova formulação de inibidores de corrosão (V-active VCI) apresentou melhores resultados para as variáveis de saída da retificação, quando comparado com o fluido base:

1 - A qualidade superficial da peça foi superior (menor rugosidade) e o desgaste do rebolo foi considerado menor, com redução da emissão acústica com fluido V-active VCI, quando comparado com o fluido base.

2 - Desvios de Circularidade apresentaram uma pequena perda de qualidade com a utilização do fluido com V-active VCI, porém ainda com excelentes resultados.

3 - Potência Elétrica e Vibração não apresentaram diferenças significativas entre os fluidos.

4 - A Principal vantagem do fluido VCI foi o rendimento superior em maiores velocidades de avanço. Isso permite um aumento da produção, devido a maiores taxas de remoção de cavaco, sem perda de qualidade.

5 - A partir da microscopia óptica e da microdureza Vickers, foi possível verificar que ambos os fluidos refrigeraram de forma eficiente, garantindo não houve qualquer tipo de queima ou danos térmicos.

6 - Benefícios para outras etapas do processo, uma vez que é biodegradável, não é prejudicial à saúde humana e reduz etapas do processo por ser um protetor anticorrosivo.

Esta pesquisa traz resultados significativos para o meio industrial, por ser o primeiro estudo da ação dessa nova classe de inibidores de corrosão em fluidos de corte na retificação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Agradeço profundamente a oportunidade oferecida pela Unesp, através de meu Orientador Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi, que por todo esse período foi de extrema importância para minha formação pessoal, profissional e acadêmica.

Eu tive a oportunidade de me inserir no meio acadêmico e aprender como é fazer pesquisa, o que foi muito importante, visto que me identifiquei com a área de pesquisa e passei a perceber o grande valor deste campo para o bem-estar da sociedade.

Como pessoa, me sinto realizado por ter me identificado com a área de retificação. Além disso, tive a oportunidade de trabalhar com pessoas de conhecimento imensuráveis, sempre dispostas a ajudar e ensinar.

Foi muito gratificante trabalhar em parceria com uma empresa e ter a possibilidade de estudar um produto completamente inovador e com grande potencial no mercado.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Aproveitando a experiência no desenvolvimento científico e tecnológico na oportunidade de parceria entre universidade e empresa, pode-se estabelecer algumas sugestões para trabalhos futuros envolvendo esse inibidor volátil de corrosão:

- Utilizando outros tipos de metais como aço liga especial;
- Aplicando rebolo de CBN nos testes;
- Aumentando as velocidades de mergulho;
- Comparando com fluidos sintéticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARTINI, C.; MUOLO, M. L.; PASSERONE, A. diamond–metal interfaces in cutting tools: a review. *Journal of materials science*, v. 47, n. 7, p. 3252-3264, 2012.

ASTM E3-01, Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001.

ASTM E92-17, Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017. 104.

ASTM E350-95, Standard Test Methods for Chemical Analysis of Carbon Steel, Low-Alloy Steel, Silicon Electrical Steel, Ingot Iron, and Wrought Iron, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005.

ASTM E384-07, Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.

ANDERSON, D.; WARKENTIN, A.; BAUER, R. Experimental validation of numerical thermal models for dry grinding. *Journal of materials processing technology*, v. 204, n. 1-3, p. 269-278, 2008.

AYUB, Muhammad Azmi; MOHAMED, Azmi B.; ESA, Abdul Halim. In-line inspection of roundness using machine vision. *Procedia Technology*, v. 15, p. 807-816, 2014.

BALDO, E. D. **Redução do ciclo de retificação cilíndrica de mergulho com auxílio da emissão acústica**. Dissertação de Mestrado - UNICAMP, Campinas, 1994.

BASTIDAS, D. M., CANO, E. AND MORA, E. M., **Volatile corrosion inhibitors: a review**, *Anti-Corrosion Methods and Materials*, Vol. 52 No. 2, pp. 71-77. 2005.

BELENTANI, R. M., FUNES, H. J., CANARIN, R. C., DINIZ, A. E., HASSUI, A., AGUIAR, P. R., BIANCHI, E. C. “**Utilization of Minimum Quantity Lubrication (MQL) with water in CBN grinding of steel**”, *Materials Research*, Vol. 17, pp. 88-96, 2014.

BIANCHI, E. C., SATO, B. K., SALES, A. R., LOPES, J. C., MELLO, H. J., SANCHEZ, L. E. A., DINIZ, A. E., AGUIAR, P. R., **Evaluating the effect of the compressed air wheel cleaning in grinding the AISI 4340 steel with CBN and MQL with water**, *International Journal of Manufacturing Technology*, 95: 2855, 2017.

BIANCHI, E. C., RODRIGUES, R. L., HILDEBRANT, A. R., LOPES, J. C., MELLO, H. J., AGUIAR, P. R., SILVA, R. B., JACKSON, M. J. **Application of the auxiliary wheel**

cleaning jet in the plunge cylindrical grinding with Minimum Quantity Lubrication technique under various flow rates, Journal of Engineering Manufacture, 2018.

BOOTHROYD, G., KNIGHT, W. A., Fundamentals of Machining and Machine Tools, Third Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006.

CALLISTER, W. D., “**Ciência e engenharia de materiais**”, 7º ed., LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 2007.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente.

DENKENA, Berend. Design of bronze-bonded grinding wheel properties. **CIRP Annals**, v. 65, n. 1, p. 333-336, 2016.

DING, K., FU, Y., SU, H., GONG, X., WU, KEQIN. **Wear of Diamond grinding wheel in ultrasonic vibration-assisted grinding of silicone carbide**. International Journal of Manufacturing Technology, 71:1929-1938, 2014.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. Artiliber Editora Ltda., Campinas, SP, Brasil, 6ª Edição, 2008.

ESTEVÃO, L.M. AND NASCIMENTO, R. V., **Modifications in the volatilization rate of volatile corrosion inhibitors by means of host-guest systems**, Corrosion Science, Vol. 43 No. 6, pp. 1133-1153.2001.

FODOR, G. E., “**The inhibition of vapor-phase corrosion: a review**”, US Army Belvoir Research and Development Center Materials, Fuels and Lubricants Laboratory. Report number: Internal Report BFLRF No. 209.1985.

FUSSE, R. Y.; FRANÇA, T. V.; CATAI, R. E.; SILVA, L. R.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. **Analysis of the cutting fluid influence on the deep grinding process with a CBN grinding wheel**. Materials Research, São Carlos - SP, v. 7, n. 3, p. 451-457, 2004.

GENOVEZ, M. C.; ARAÚJO, L. H.; PINTO, T. D.; HRDINA, R. **New concept of corrosion protection in the presence of water: V-active VCI. Concept and application**. Anti-Corrosion Methods and Materials, ISSN: 0003 5599.2015.

GUO, C.. Virtual high performance grinding with CBN wheels. **CIRP Annals Manufacturing Technology**, v. 57, n. 1, p. 325-328, 2008.

HADAD, M. J.. Temperature and energy partition in minimum quantity lubrication MQL grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 54, p. 10-17, 2012.

HOLTERMANN, Raphael. Modelling, simulation and experimental investigation of chip formation in internal traverse grinding. **Production Engineering**, v. 7, n. 2-3, p. 251-263, 2013.

ICERI, D. M., SOUSA, R. M., DESTRO, R. S., OIKAWA, M. H., BIANCHI, E. C., AGUIAR, P. R., FORTULAN, C. A. **Comparação entre os métodos de aplicação de fluido de corte convencional e otimizado na retificação plana de cerâmicas**. *Cerâmica*, 58: 84-89, 2012.

IRANI, R.; BAUER, R.; WARKENTIN, A.. A review of cutting fluid application in the grinding process *International Journal Of Machine Tools & Manufacture*. [s.i.], p. 1696-1705. dez. 2005.

KLOCKE, F. *Process Design. Manufacturing Processes 2–Grinding, Honing, Lapping*. 2009.

LEE, D. E., HWANG, I., VALENTE, C. M. O., OLIVEIRA, J. F. G., DORNFELD, D. A. **Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission**. *International journal of machine tools and manufacture*, v. 46, p. 176-188, 2006.

LINKE, Barbara S. A review on properties of abrasive grits and grit selection. **International Journal of Abrasive Technology**, v. 7, n. 1, p. 46-58, 2015.

LOPES, José C.; Application of minimum quantity lubrication with addition of water in the grinding of alumina. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, p. 1-9, 2018.

MALKIN, Stephen; GUO, Changsheng. **Grinding technology: theory and application of machining with abrasives**. Industrial Press Inc., 2008.

MARINESCU, Ioan D.; **Tribology of abrasive machining processes**. Elsevier, 2004. 751 p.

MARINESCU, I. D., HITCHINER, M., UHLMANN, E., ROWE, W. B., INASAKI, I. **Handbook of Machining with Grinding Wheels**, CRC Press, 2007.

MARINESCU, Ioan; GUO, Lei; WEI, Peng. Basic Research for the UV Fixed Abrasive Lapping Plate. In: **Applied Mechanics and Materials**. Trans Tech Publications, 2013. p. 95-100.

NAKAI, M. E.; Neural tool condition estimation in the grinding of advanced ceramics. **IEEE Latin America Transactions**, v. 13, n. 1, p. 62-68, 2015.

NASCIMENTO, W. R., YAMAMOTO, A. A., MELLO, H. J., CANARIM, R. C., AGUIAR, P. R., BIANCHI, E. C. (2015) **A study on the viability of minimum quantity lubrication with water in grinding of ceramics using a hybrid bonded diamond wheel**. Journal of Engineering Manufacture DOI: 10.1177/0954405415579016, 2015.

NGUYEN, Thai; ZHANG, L. C. Realisation of grinding-hardening in workpieces of curved surfaces—Part 1: Plunge cylindrical grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, n. 4, p. 309-319, 2011.

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

PUERTO, P., FERNÁNDEZ, R., MADARIAGA, J., ARANA, J., GALLEGO, I. **Evolution of surface roughness in grinding and its relationship with the dressing parameters and the radial wear**. Procedia Engineering, 63: 174-182, 2013.

RASIM, M., MATTFELD, P., KLOCKE, F. **Improving minimum quantity lubrication in CBN grinding using compressed air wheel cleaning**. Journal of Materials Processing Technology 226, p. 60-68, 2015.

ROWE, W. B. **Principles of Modern Grinding Technology**. 2^a ed., Waltham, William Andrew, 2014.

SILVA, L. R.; BIANCHI, E. C.; FUSSE, R. Y.; CATAI, R. E.; FRANC, T. V.; AGUIAR, P. R. **Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant –MQL in grinding.** International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 47, p. 412–418, 2007.

SILVA, L. R., CORRÊA, E. C. S., BRANDÃO, J. R., ÁLIVA, R. F. **Environmentally friendly manufacturing: behavior analysis of minimum quantity of lubricant – MQL in grinding process.** Journal of Cleaner Production doi: 10.1016/j.jclepro.2013.01.033, 2013.

SILVA, V. F., BATISTA, L. N., ROBERTIS, E., CASTRO, C. S. C., CUNHA, V. S., COSTA, M. A. S. Thermal and rheological behavior of ecofriendly metal cutting fluids. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry V. 123, Pages 973-980. 2016.

SINHA, M., Setti, D., Ghosh, S., Rao, V. An investigation on surface burn during grinding of Inconel 718, Journal of Manufacturing Processes 21 124–133. 2016.

SOARES, D. D., OLIVEIRA, J. F. G. Diagnóstico de processos de retificação pela análise de sinais. Revista Máquina e Metais, ano XXXVIII, nº 436, Maio, p. 140-157. 2002.

SOKOVIC M.; MIJANOVIC K. **Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes,** Journal of Materials Processing Technology, 109, p. 181-189, 2001.

SOUZA, C. N.. Analysis of diametrical wear of grinding wheel and roundness errors in the machining of steel VC 131. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering,** v. 26, n. 2, p. 209-212, 2004.

STEPHENSON, David A.; AGAPIOU, John S. **Metal cutting theory and practice.** CRCpress, 2016. 969 p.

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos e abrasivos.** Ed. da UFSC, 2005. 315 p.

SKINNER, W., **New method for quantitative evaluation of volatile corrosion inhibitor,** Corrosion Science, Vol. 35 Nos 5/6/7/8, pp. 1491-1494.1993.

TAWAKOLI, T.; HADAD, M. J.; SADEGHI, M. H.; DANESHI, A.; STOCKERT, S.; RASIFARD, A. An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding

parameters on minimum quantity lubrication—MQL grinding International. *Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 49, p. 924–932, 2009.

VALDEZ, S. B., ZLATEV, R. K., SCHORR, W. M., ROSAS, G. N., DOBREV, T., MONEV, M. AND KRASDEV, I., **Rapid method for corrosion protection determination of VCI films**, *Anti-corrosion methods and materials*, Vol. 53 No. 6, pp. 362-366. 2006.

WEBSTER, J.; TRICARD, M. Innovations in abrasive products for precision grinding. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, v. 53, n. 2, p. 597-617, 2004.

WEGENER, Konrad. Conditioning and monitoring of grinding wheels. *CIRP AnnalsManufacturing Technology*, v. 60, n. 2, p. 757-777, 2011.

YOSHIMURA, H., ITOIGAWA, F., NAKAMURA, T., NIWA, K. “**Development of nozzle system for oil-on-water droplet metalworking fluid and its application on practical production line**”. *JSME International Journal*, vol. 48, n. 4, pp. 723-729, 2005.