



**Universidade Estadual Paulista**  
**Faculdade de Engenharia de Bauru**  
**Departamento de Engenharia Mecânica**  
**Laboratório de Usinagem por Abrasão - LUA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM DISPOSITIVO IOT PARA  
COLETA, ARMAZENAMENTO E ANÁLISE DE DADOS  
DE POTÊNCIA E VIBRAÇÃO NO PROCESSO DE  
RETIFICAÇÃO**

**Relatório Final**

**Pós-Doutorado**

**Candidato:** Anderson Francisco Talon

**Orientador:** Prof. Dr. José Claudio Lopes

**BAURU – SP**  
**Novembro de 2025**

## RESUMO

A retificação é um processo de usinagem de alta precisão, aplicado geralmente como etapa final de fabricação, com a função de reduzir erros dimensionais e garantir elevados níveis de acabamento superficial. Trata-se de um processo complexo, caracterizado por elevadas velocidades de corte, múltiplas arestas abrasivas e significativa geração de calor, o que exige monitoramento constante para evitar danos térmicos, desgaste acelerado do rebolo e perdas de qualidade. Nesse cenário, a instrumentação e a análise de sinais provenientes do processo tornam-se essenciais para diagnóstico eficiente e tomada de decisão técnica em tempo real. Com o avanço da Indústria 4.0, dispositivos IoT aplicados à manufatura têm se mostrado alternativas viáveis e de baixo custo para monitoramento inteligente de sistemas produtivos. Nesse contexto, o presente trabalho descreve o desenvolvimento de um dispositivo IoT dedicado à coleta, armazenamento e análise de dados de potência elétrica e vibração no processo de retificação, permitindo acompanhar o comportamento dinâmico do corte e identificar condições de instabilidade ou falha iminente. O dispositivo integra sensores industriais de corrente e vibração, microcontrolador para aquisição em alta frequência, comunicação em rede para transmissão de dados e infraestrutura em nuvem para armazenamento e visualização analítica. Ensaios experimentais foram realizados no processo de retificação cilíndrica externa do aço AISI 4340 com rebolo de óxido de alumínio, nos quais o dispositivo foi utilizado para monitoramento contínuo e correlacionado aos resultados obtidos. Os sinais coletados permitiram identificar variações características nos regimes de usinagem, relacionando vibração e potência com parâmetros de corte e comportamento do processo. Os resultados demonstram o potencial da solução desenvolvida para apoiar decisões relativas ao controle da operação, manutenção preditiva e otimização dos parâmetros de retificação. Conclui-se que o dispositivo IoT proposto representa uma alternativa tecnológica eficaz para monitoramento inteligente do processo de retificação, contribuindo para maior eficiência produtiva, redução de perdas e melhoria da qualidade.

Palavras-chave: Retificação Cilíndrica Externa; Indústria 4.0; Monitoramento Inteligente; Dispositivo IoT; Vibração; Potência.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	4
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	5
<b>3. JUSTIFICATIVA</b> .....	6
<b>4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	7
<b>4.1 O processo de Retificação</b> .....	7
<b>4.2 Cinemática da retificação</b> .....	8
<b>5. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	9
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	13
<b>6.1 Rugosidade média</b> .....	13
<b>6.2 Potência</b> .....	15
<b>6.3 Vibração</b> .....	17
<b>7. CONCLUSÕES</b> .....	19
<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA</b> .....	21

## 1. INTRODUÇÃO

A usinagem desempenha um papel significativo na indústria atual. É um processo de fabricação versátil, no qual se obtêm a forma desejada da peça, através da remoção de materiais sob a forma de cavaco (Sharma et al., 2016).

A retificação consiste em um processo de usinagem, em que há a remoção de material da peça por meio de um rebolo composto por grãos abrasivos, dispostos de forma aleatória (Pawlak et al., 2004). Os grãos removem o material da peça, de modo que a mesma adquira forma, dimensão e acabamento esperado. A retificação de uma peça é de extrema precisão e importância, pois quaisquer erros nessa etapa de sua fabricação, acarreta em custos altamente onerosos, uma vez que a mesma já passou por diversos outros processos de usinagem, o que agregou custos e valores ao produto (Soares & Oliveira, 2002).

Diferentemente de outros processos de usinagem que retiram grandes quantidades de material da peça (como torneamento e fresamento), a retificação é um processo de extrema precisão e é aplicada no final do processo de fabricação da peça, utilizada para reduzir erros dimensionais/geométricos e conferir um acabamento superficial melhor, com uma baixa rugosidade. Por conseguinte, a retificação é um dos processos de usinagem mais complexos que existe, uma vez que diversas variáveis com amplos números de parâmetros, devem ser consideradas para que não influenciem no resultado final (CHEN et al., 2002).

O contato entre o rebolo e a peça gera altas temperaturas, o que faz necessário o uso de fluido de corte, sendo estes responsáveis por duas importantes funções, onde ocorrem os processos físico-químico-mecânicos: lubrificam a peça e a ferramenta; e, removem parte do calor gerado durante a retirada de material (Pawlak et al., 2004). Por ter essas funções, os fluidos de corte geram um menor desgaste da ferramenta e produzem uma melhor qualidade dimensional e superficial, sendo esta última, um fator crucial na resistência da peça contra corrosão e fadiga (Debnath et al., 2014). Além disso, o fluido de corte aumenta a produtividade e a qualidade da manufatura, resfriando e lubrificando o processo de conformação ou corte do material, uma vez que sem eles, a taxa de remoção de cavaco teria que ser reduzida (Rabiei et al., 2015).

Com isso, a probabilidade de dano à peça é reduzida, bem como a taxa de desgaste do rebolo, o que reduz os custos de produção. Porém, a composição desses fluidos causa

riscos significativos ao meio ambiente e à saúde humana, sendo relatado que cerca de 80% de todas as doenças ocupacionais dos operadores de máquinas de corte são devido ao contato da pele com fluidos de corte (Silva et al., 2016).

As indústrias atualmente estão à procura de novas tecnologias de produção, com o objetivo de reduzir os custos e aumentar a qualidade do produto. No entanto, as indústrias estão tendo que lidar com outro fator relevante, que é a diminuição do impacto ambiental, sendo que os fluidos de corte são o grande inimigo do meio ambiente, devido ao alto consumo de água, associado ao fato de poluir fontes naturais de água devido ao descarte irregular (Filho et al., 2017). Assim, a pesquisa para o desenvolvimento de novos fluidos refrigerantes mais tecnológicos e menos nocivos se faz necessária.

Além dos desafios relacionados à escolha do fluido de corte e às condições operacionais, a complexidade do processo de retificação exige monitoramento contínuo e preciso das grandezas envolvidas, como potência, vibração e forças de corte, a fim de identificar fenômenos como queima, vibração regenerativa e desgaste do rebolo. Nesse contexto, a utilização de sistemas de aquisição e análise de dados baseados em tecnologias da Indústria 4.0, como dispositivos IoT conectados a plataformas de armazenamento e processamento, apresenta-se como uma solução promissora. Tais sistemas permitem a coleta em tempo real de informações críticas, oferecendo subsídios para tomada de decisão, controle de processo e manutenção preditiva, proporcionando ganhos significativos em qualidade, produtividade e confiabilidade.

## **2. OBJETIVOS**

O objetivo específico deste trabalho é verificar o desempenho de um fluido sintético com um inibidor volátil 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 inibidor anticorrosivo). A comparação ocorrerá em três diferentes velocidades de avanço (0,25; 0,50 e 0,75 mm/minuto). Dessa forma, deseja-se verificar os resultados das variáveis de saída na retificação, para definir se a adição do inibidor de corrosão beneficiará ou não o processo de retificação como um todo.

Serão avaliadas para cada velocidade de avanço: rugosidade, potência e vibração. Assim, espera-se obter informações úteis para o desenvolvimento tecnológico da retificação, agregando assim para todo o processo de fabricação.

### 3. JUSTIFICATIVA

A VCI Brasil, empresa presente em diversos seguimentos industriais no mundo, com expressivo mercado e sendo pioneira no desenvolvimento de inibidores de corrosão com base aquosa, tem o objetivo de desenvolver e aplicar novas tecnologias, formulando uma nova classe de inibidores de corrosão, que utilizam a água como meio de propagação e eficiência protetiva, sendo denominados como 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 possibilitou desenvolver e formular 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 água. 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, redução de consumo de ferramentas, e ainda, promove a proteção contra corrosão da peça metálica. 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 do passivo trabalhista, pois não serão utilizados óleos na cadeia produtiva.

Pretende-se com este projeto, realizar testes e rotinas que comprovem os efeitos benéficos no processo de retificação, nomeadamente na avaliação do consumo de ferramenta e efeitos do uso do produto nesta etapa. O fluido em questão, apresenta tal inibidor de corrosão que elimina etapas do processo (como desengraxe e limpeza da peça). Esse não é o foco do estudo, uma vez que outras bibliografias já comprovaram a eficiência do protetivo em diversas situações. Porém, não houve estudo algum sobre a influência desse protetivo nas variáveis de saída no processo de retificação. Uma vez que o fluido não agride o meio ambiente, não é nocivo ao ser humano, e pode reduzir etapas do processo de usinagem de uma peça, o presente estudo pode trazer informações úteis

ao conhecimento científico existente atualmente, bem como influenciar na utilização desse novo produto na indústria.

No geral, decorrente da redução dos gastos mencionados, efeitos benéficos na peça retificada com esse fluido com aditivo anticorrosiva, pode vir a influenciar diretamente o meio industrial, propiciando aumento da produção e agregando valor à cadeia produtiva.

Nesse contexto, justifica-se a aplicação de um dispositivo IoT capaz de realizar a coleta, armazenamento e análise em tempo real de variáveis críticas do processo de retificação, como potência e vibração, oferecendo uma visão aprofundada do comportamento dinâmico do corte e permitindo a identificação precoce de instabilidades, desgaste do rebolo, ocorrência de queima e condições inadequadas de usinagem. A integração entre o novo fluido de corte e um sistema inteligente de monitoramento possibilita avaliar de forma objetiva e precisa os efeitos do produto no desempenho do processo, fornecendo informações relevantes para controle de qualidade, otimização de parâmetros e implementação de estratégias de manutenção preditiva. Dessa forma, a combinação entre inovação química e instrumentação digital representa uma contribuição significativa para o avanço tecnológico da manufatura, alinhada às demandas da Indústria 4.0 e à necessidade de processos mais sustentáveis, eficientes e baseados em dados.

## **4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A revisão bibliográfica desse trabalho apresenta os assuntos que foram abordados no mesmo, a fim de contextualizar o leitor sobre os pontos envolvidos na pesquisa.

### **4.1 O processo de Retificação**

Usinagem por abrasão é um processo onde a superfície de corte não é só distribuída como também é organizada de forma aleatória (Marinescu et al., 2013). Na retificação, a ferramenta apresenta geometria de corte indefinida, diferentemente de torneamento e fresamento, uma vez que os abrasivos apresentam arestas de corte irregulares (Anderson et al., 2008 e Ren et al., 2009).

A retificação é um dos processos finais de uma peça, destinado a dar acabamento e tolerâncias, tendo então muito valor agregado. Logo, um erro nesta etapa pode custar caro. Por conseguinte, os parâmetros da retificação devem ser muito bem definidos (Anderson et al., 2008).

Segundo Sinha et al., 2016, a retificação é um processo complexo e dinâmico, muito aplicado na fabricação de peças de alta qualidade, com tolerâncias mais restritas, além de um excelente acabamento superficial. Silva Neto (2012) afirma que 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, a ferramenta abrasiva apresenta uma velocidade tangencial maior comparada com outros processos de usinagem, tais como torneamento e fresamento, atingindo velocidades de entre 20 m/s a 45 m/s na retificação convencional e podendo ser maior em retificação de alta velocidade, chegando a 140 m/s ou mais (Marinescu et al., 2013).

Hassui e Diniz (2003) afirmaram que a maioria dos pesquisadores de usinagem relatam que a retificação é um objeto de difícil estudo, uma vez que envolve muitas variáveis e é sensível a pequenas alterações nos seus valores, além de utilizar uma ferramenta de formato irregular.

## 4.2 Cinemática da retificação

A Figura 1 exemplifica as variáveis do processo de retificação, onde  $d_s$  e  $d_w$  são respectivamente o diâmetro do rebolo e o diâmetro da peça, sendo que o rebolo gira com uma velocidade tangencial  $V_s$  e a peça de gira com uma velocidade tangencial  $V_w$ .  $V_f$  é a velocidade de avanço do rebolo em relação a peça,  $a$  é a profundidade de penetração do rebolo na peça, e a força tangencial  $F_t$  e a força normal  $F_n$  são as resultantes do processo.

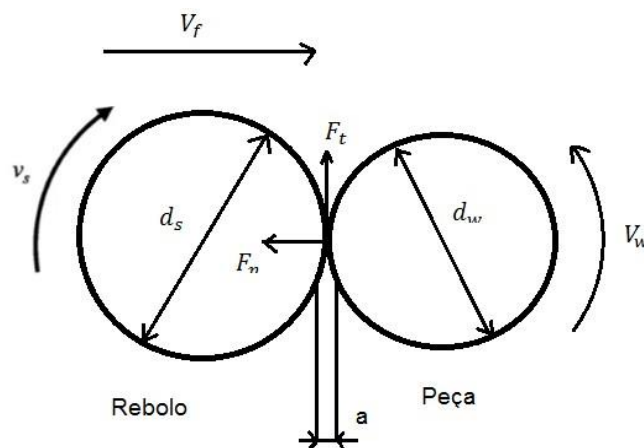


Figura 1: Representação da cinemática na retificação.

Além disso, a retificação pode ser concordante (como na Figura 1), onde rebolo e peça giram em sentidos opostos, ou discordante, onde rebolo e peça giram no mesmo

sentido. Na forma concordante, o grão abrasivo penetra na maior profundidade de corte quando entra em contato com a peça e vai reduzindo gradativamente a penetração, o que gera forças de corte menores, além de melhoria superficial e redução do desgaste do rebolo (Rowe 2014). Já de maneira discordante, ocorre o oposto e o grão penetra na menor profundidade de corte e vai aumentando gradativamente.

A rugosidade superficial é caracterizada por micro irregularidades geométricas na superfície do material usinado. A rugosidade consiste em marcas ocasionadas pelo perfil da ferramenta, somado à outras irregularidades (Carpinetti, 2000).

Porém, se tratando da retificação, segundo Ali e Zhang (1999) e Winter (2014), a rugosidade apresenta elevado grau de complexidade em seu entendimento, uma vez que seu resultado final depende de vários parâmetros, como a composição da peça e do rebolo, a dressagem, o fluido de corte, a técnica de lubri-refrigeração, além de fatores como a rigidez do equipamento, a velocidade de remoção, a granulometria do rebolo, entre outros. Esses parâmetros são de grande avalia, uma vez que influenciam a força de corte, o que gera mudanças na rugosidade superficial ao final do processo.

Segundo Carpinetti (2000), é possível quantificar a rugosidade a partir da amplitude (altura) e espaçamento (largura) das irregularidades na peça. Os parâmetros comumente usados são: Rugosidade média (Ra); Rugosidade média quadrática (Rq); Máxima distância entre pico e vale (Rt); Média das distâncias entre saliências (Sm); Fração de contato (tp); Média da inclinação das irregularidades do perfil ( $\Delta a$ ), entre outros.

A rugosidade normalmente é obtida através de aparelhos eletrônicos, como o rugosímetro. Tal instrumento obtém o valor da rugosidade através da movimentação de um apalpador pela superfície da peça, que varia de acordo com as irregularidades da superfície usinada.

## **5. MATERIAIS E MÉTODOS**

O presente projeto de pesquisa desenvolveu um dispositivo IoT para coleta, armazenamento e análise de dados de potência e vibração no processo de retificação. Podemos observar na Figura 2 a arquitetura do projeto. Na retificadora (a) foi colocado um sensor de corrente não invasivo (b) na alimentação e um sensor com acelerômetro e giroscópio (c) em cima da superfície da máquina. Sabe-se que a corrente está diretamente relacionada com a tensão, medindo corrente é possível medir a potência consumida. E

com o acelerômetro/giroscópio é possível medir a vibração atual da máquina, assim como o aumento da vibração. Os dados dos sensores foram enviados para o dispositivo IoT (d) que enviou os dados em tempo real para um servidor na nuvem (e) e foram armazenados em um banco de dados na nuvem (f).

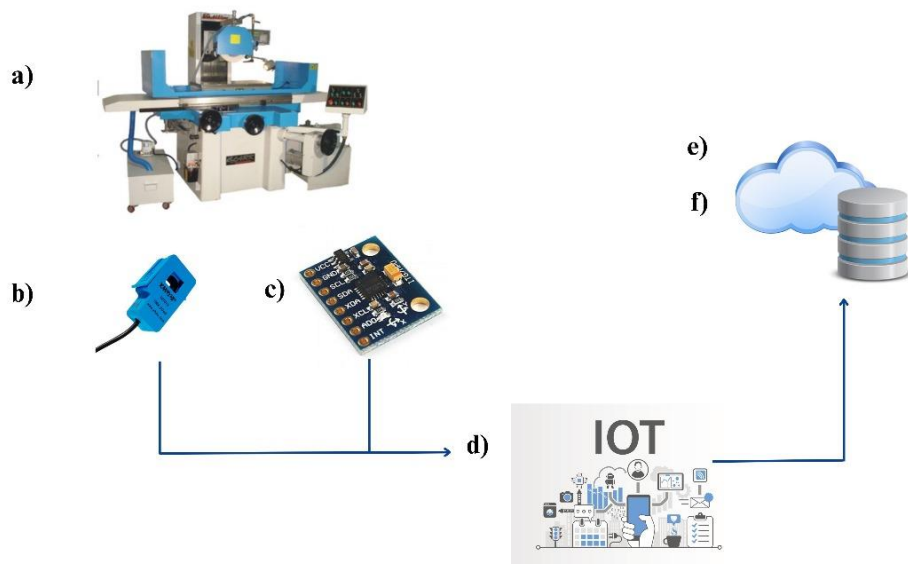


Figura 2: Arquitetura do projeto de pesquisa.

A coleta de dados foi feita usando sensores de corrente não invasivo e sensores com acelerômetro e giroscópio. Para medir a corrente utilizou-se o sensor SCT-013 apresentado na Figura 3 e para medir a vibração utilizou-se o sensor GY-521 apresentado na Figura 4.



Figura 3: Sensor de corrente

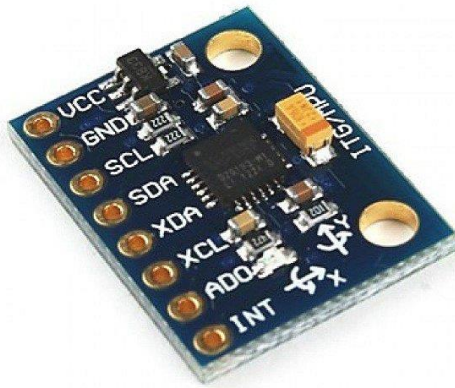


Figura 4: Sensor de vibração

O armazenamento dos dados foi feito em servidores e banco de dados na nuvem. Assim como toda análise foi feita utilizando esses dados armazenados na nuvem.

Para integração dos dados coletados com os sensores e o envio dos dados na nuvem, foi utilizado placas de desenvolvimento disponíveis no mercado, como Arduino e ESP32. Diferente do ESP32 que já tem antena de rádio para conexão WiFi e Bluetooth na própria placa, o Arduino precisa de uma shield para conexão sem fio. A Figura 5 apresenta a placa de desenvolvimento ESP32, a Figura 6 apresenta a placa de desenvolvimento Arduino e a Figura 7 apresenta a shield WiFi para o Arduino.

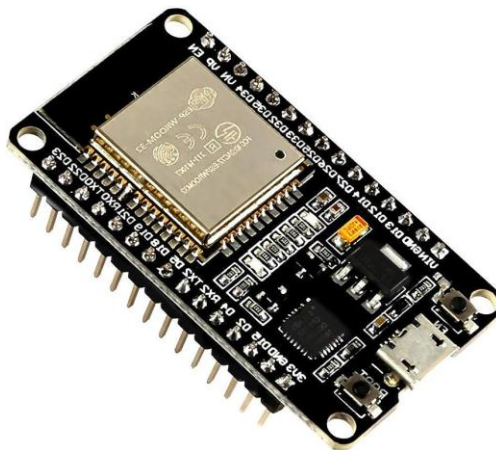


Figura 5: ESP32.

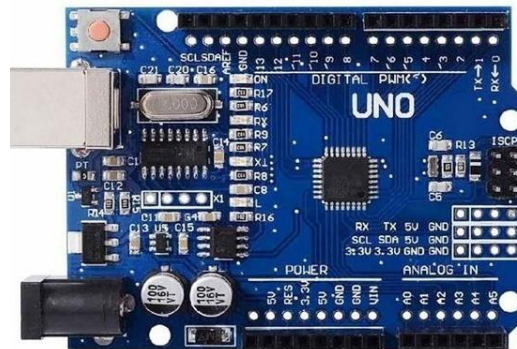


Figura 6: Arduino.



Figura 7: Shield WiFi.

Após o sistema de aquisição de dados de potência e vibração terem sido construído, os ensaios em máquinas foram realizados no Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA) do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” FEB/UNESP, campus Bauru/SP.

Os ensaios experimentais para validação do sistema de aquisição de dados foram realizados em uma retificadora cilíndrica, modelo RUAP515H da empresa Sulmecânica. Esta retificadora cilíndrica está equipada com um CNC Fagor. Para este trabalho, as peças foram fabricadas em forma de anel a partir de alumina comercial, composta por 96% de óxido de alumínio e 4% de óxidos fundidos como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$  e  $\text{MgO}$ , com densidade aparente de  $3,7 \text{ g/cm}^3$  e dimensões de diâmetro externo de 54 mm, diâmetro interno de 30 mm e espessura de 4,5 mm. Foi utilizado um rebolo diamantado composto por um ligante resinóide com dimensões de 350 mm (diâmetro externo)  $\times$  15 mm (largura)  $\times$  5

mm (camada de abrasivo) e diâmetro interno de 127 mm. A dureza do ligante é N, a concentração de 50 e o tamanho de grão de 126 mm (D107N115C50). A ferramenta é da empresa Nikkon Cutting Tools Ltda. – Grupo Saint Gobain. A Figura 8 apresenta as configurações do experimento para MQL e Convencional:

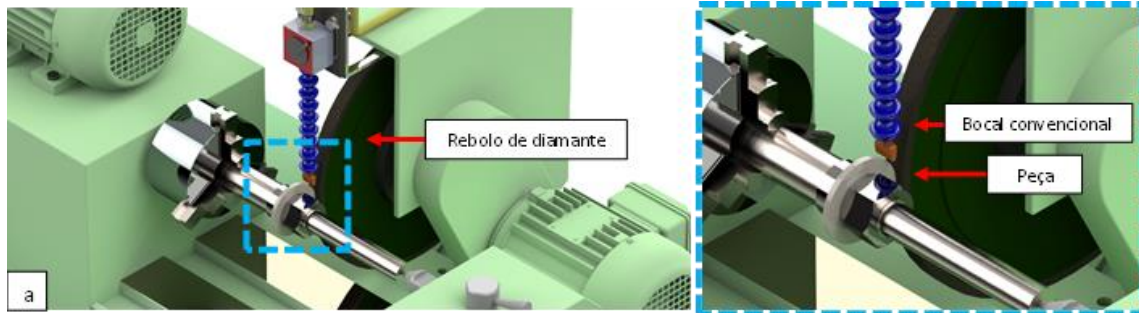


Figura 8: Montagem experimental.

A medição da rugosidade média aritmética ( $R_a$ ) foi realizada com o auxílio de um aparelho da marca Taylor Hobson modelo Surtronic3+. Para tal, adotou-se comprimento de medição (cut-off) igual a 0,25 mm e percurso total (ln) igual a 1,25 mm. Em todas as medidas, para cada corpo de prova, foram realizadas 10 leituras em posições diferentes.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

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 e vibração. Além disso, foram feitas microscopias ópticas e microdureza Vickers para a verificação da presença, ou ausência, de danos térmicos nas peças.

### 6.1 Rugosidade 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 9 apresenta as médias aritméticas da rugosidade média em cada condição presente nos ensaios.

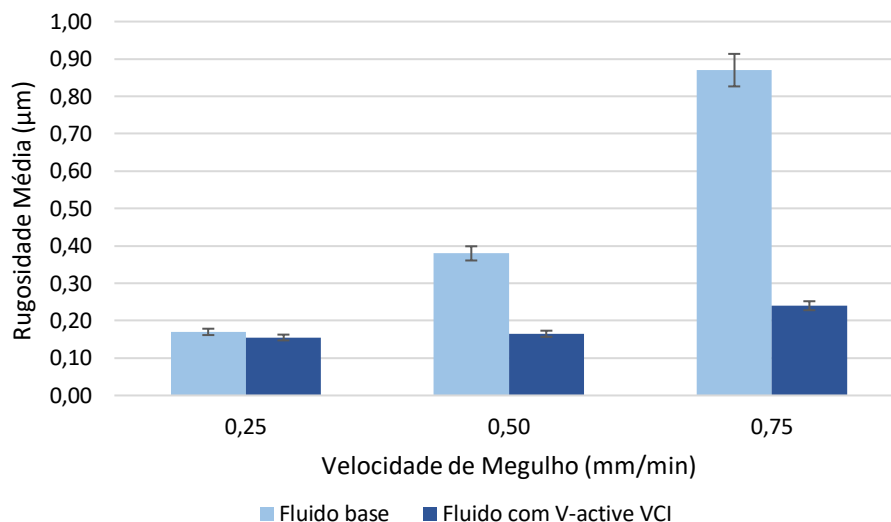


Figura 9: Resultado de rugosidade média por velocidade de mergulho.

A retificação é um processo de usinagem por abrasão, 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 superficial. Logo, é de suma importância que a retificação apresente valores baixos de rugosidade (como observados na Figura 9)

É possível notar que na velocidade de 0,25 mm/min ambos os fluidos foram equivalentes. Conforme se aumenta a velocidade de avanço e o processo fica mais agressivo, 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 lubricidade, 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 lubricidade, 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.

## 6.2 Potência

Nascimento et al. (2015) afirmam que a potência está diretamente ligada as forças de corte. Cada ensaio teve a potência aqusitada e foi gerado um gráfico através do software MatLAB® para se obter a potência média. Um exemplo do gráfico de potência é apresentado na Figura 10.

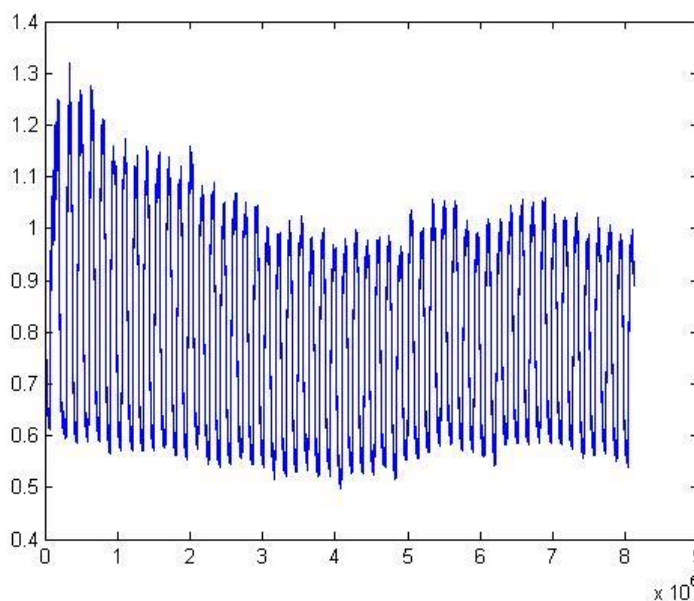


Figura 10: Gráfico de aquisição de potência.

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 do gráfico apresentado na Figura 10, é possível obter a potência média para determinada peça. A média aritmética das potências para cada condição de usinagem é apresentada na Figura 11.

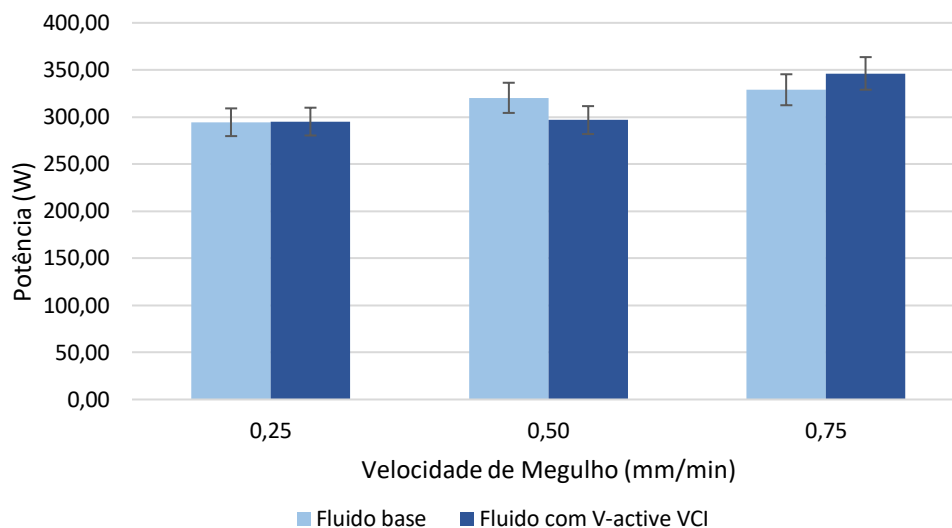


Figura 11: Resultado de potência por velocidade de mergulho.

A Figura 11 mostra que a potência 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 11, 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 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 1 mostra a porcentagem do desvio entre os valores obtidos de potência para ambos os fluidos, dentre de uma mesma condição.

Tabela 1: Porcentagem do erro para os valores de potência em cada condição.

<b>Velocidade de mergulho</b>	<b>Desvio padrão entre os dois fluidos</b>
0,25 mm/min	0,23%
0,50 mm/min	7,37%
0,75 mm/min	5,00%

Portando, a Tabela 1 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.

### 6.3 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. Um exemplo do gráfico de vibração é apresentado na Figura 12. E a Figura 13 apresenta as médias aritméticas dos valores de vibração adquiridos durante os ensaios.

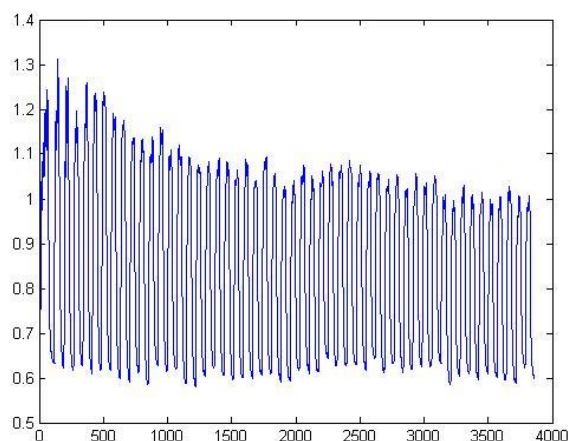


Figura 12: Gráfico de vibração de um ensaio.

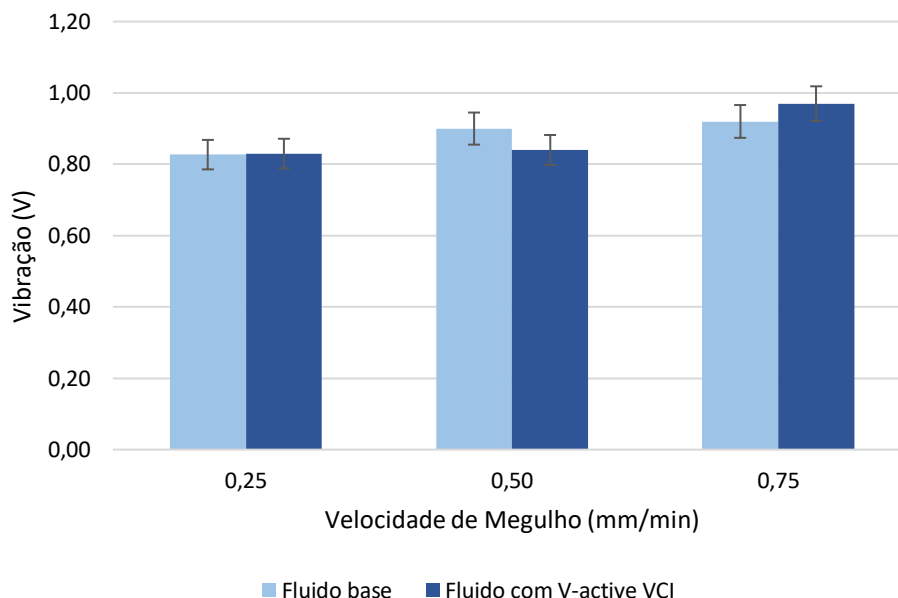


Figura 13: Resultado de vibração por velocidade de mergulho.

Assim, analisando a Figura 13, 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 2 mostra a porcentagem do erro entre os valores obtidos de vibração para ambos os fluidos, dentre de uma mesma condição.

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

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

Pela Tabela 2, 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 houveram 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.

## 7. 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.

Utilizando o fluido com V-active VCI, a qualidade superficial da peça foi significativamente superior, garantindo uma melhor rugosidade, e o desgaste da ferramenta de corte foi consideravelmente menor. De fato, isso já traz bons resultados para essa pesquisa, uma vez que apenas com a troca do fluido de corte, foi possível melhorar duas variáveis de saída, sem prejudicar o rendimento do processo de retificação.

A potência e vibração não apresentaram diferenças significativas entre os fluidos. Porém, a principal vantagem do fluido de corte com a adição do inibidor volátil de corrosão, foi seu rendimento consideravelmente superior em maiores velocidades de avanço. Isso permite um aumento da produção, devido a maiores taxas de remoção de cavaco, sem perda de qualidade. 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 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, garantindo que um aumento da velocidade de mergulho, conservará os resultados de rugosidade média e desgaste diametral do rebolo.

A partir da microscopia óptica e da microdureza Vickers, foi possível verificar que ambos os fluidos refrigeraram o processo de forma eficiente, garantindo que não houve qualquer tipo de queima ou danos térmicos às peças, preservando a dureza do material após o tratamento térmico. Tratando-se do método convencional de lubrificação refrigerada,

esse resultado apenas garante a qualidade dos fluidos estudados, mas não resulta em nenhum tipo de comparação de desempenho entre eles.

Vale ressaltar ainda que essa nova classe de inibidores ainda traz 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. Tais resultados podem servir de referência para o meio industrial, além de possuir potencial de gerar grande impacto no meio acadêmico, através de publicações em periódicos internacionais e formação de recursos humanos, através de uma tecnologia inovadora, que poderá agregar demasiadamente o mercado, otimizando o processo e não agredindo o meio ambiente.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALI, Y.M.; ZHANG, L.C. **Surface roughness prediction of ground components using a fuzzy logic approach.** Journal of Materials Processing Technology 89–90, p. 561–568, 1999.

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

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., 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.

CARPINETTI, L. C. R. **Planejamento e análise de experimentos**, EESC -USP, São Carlos - SP, p.205, 2000.

CHEN, X., ROWE, W. B., CAI, R. **Precision grinding using CBN wheels.** International Journal of Machine Tools and Manufacture V. 42, Pages 585–593. 2002.

DEBNATH, S., REDDY, M. M., YI, Q.S. **Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review**, Journal of Cleaner Production Vol. 83, Pages 33-47.2014.

FILHO, S. L. M. R., VIEIRA, J. T., OLIVEIRA, J. A., ARRUDA, E. M., BRANDÃO, L. C., **Comparison among different vegetable fluids used in minimum quantity**

**lubrication systems in the tapping process of cast aluminum alloy.** Journal of Cleaner Production V. 140, Pages 1255–1262.2017.

HASSUI, A., DINIZ, A. E. **Correlating surface roughness and vibration on plunge cylindrical grinding of steel,** International Journal of Machine Tools & Manufacture 43 855–862. 2003.

MARINESCU, I. D.; ROWE, W.B.; DIMITROV, B.; INASAKI, I. —**Tribology of abrasive machining processes.** 2<sup>a</sup>ed. Norwich, William Andrew Inc, 2013.

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.

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 212, 2559– 2568. 2012.

PAWLAK, Z.; KLAMECKI, E.B.; RAUCKYTE, T.; SHPENKPV, P.G.; KOKOWSKI, A. **The Tribochemical and Micellar Aspects of Cutting Fluids.** Tribology International, 38, 1, 2004.

RABIEI, F., RAHIMI, A. R., HADAD, M. J., ASHRAFIJOU, M. **Performance improvement of minimum quantity lubrication (MQL) technique in surface grinding by modeling and optimization,** Journal of Cleaner Production 86 447-460. 2015.

REN, Y.H.; ZHANG, B.; ZHOU, Z.X. **Specific energy in grinding of tungsten carbides of various grain sizes.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, v.58, p. 299–302, 2009.

ROWE, W.B. **Principles of Modern Grinding Technology.** 2009.

ROWE, W. B. **Principles of Modern Grinding Technology**. Elsevier. Second edition 2014.

SHARMA, A. K., TIWARI, A. K., DIXIT, A. R. **Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review**. Journal of Cleaner Production V. 127, Pages 1–18. 2016.

SILVA NETO, J.F. **Estudo experimental da remoção, por jato de ar comprimido, de detritos na superfície de corte de rebolo diamantado durante a retificação da alumina refrigerada pela técnica MQL**. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, 2012.

SILVA, V.F., BATISTA, L.N., ROBERTIS, E.de, 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.

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.

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.

WINTER, M., HERRMANN, C. **Eco-Efficiency of Alternative and Conventional Cutting Fluids in External Cylindrical Grinding**, Procedia CIPR 15, p. 68-73, 2014.