

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

ADRIANA GISELI LEITE CARVALHO

**AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA DE PASTA ABRASIVA À BASE DE
ÓLEOS VEGETAIS DE BABAÇU E MORINGA OLEIFERA NA USINAGEM
SUSTENTÁVEL POR FLUXO ABRASIVO**

CORNÉLIO PROCÓPIO

2024

ADRIANA GISELI LEITE CARVALHO

**AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA DE PASTA ABRASIVA À BASE DE
ÓLEOS VEGETAIS DE BABAÇU E MORINGA OLEIFERA NA USINAGEM
SUSTENTÁVEL POR FLUXO ABRASIVO**

**Technical Evaluation of Abrasive Paste Based on Babassu and Moringa
Oleifera Vegetable Oils in Abrasive Flow Sustainable Machining**

Trabalho de conclusão de curso de Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Programa de Pós-Graduação *Multicampi* em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Dr. Rodrigo Henriques Lopes da Silva

Coorientador(a): Prof^ª. Dra. Janaina Fracaro de Souza Gonçalves

Cornélio Procópio

2024



Esta licença permite compartilhamento do trabalho, mesmo para fins comerciais, sem a possibilidade de alterá-lo, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

Dedico este trabalho aos meus pais e irmão, ao meu
esposo e a todos que me incentivaram neste
processo.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar quero agradecer a Deus por tantas bênçãos, o caminho foi de muita luta, aprendizado e crescimento. Inicialmente venho agradecer aos meus pais que sempre foi e sempre será meu pilar de sustentação, minha inspiração e minha força. Muita gratidão à minha família, pois sem o apoio de cada um eu não seria a pessoa que sou, ao meu irmão, ao meu esposo e enteados que sempre me incentivaram e apoiaram, sem eles seria muito difícil vencer este desafio.

Ao meu orientador Prof. Dr. Rodrigo Henriques Lopes da Silva, gratidão pela oportunidade, estímulo e aos conhecimentos transmitidos. A minha estimada co-orientadora Prof^a. Dra. Janaina Fracaro de Souza Gonçalves que sempre com muita sabedoria me incentivou e acreditou neste trabalho – obrigado pela oportunidade de desfrutar dos seus ensinamentos e orientação.

Em especial quero agradecer aos demais professores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR – Câmpus Cornélio Procopio que fizeram parte da minha trajetória. A Secretaria do Curso, pela cooperação. Aos meus colegas de sala pelo apoio durante este processo, enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização deste trabalho.

Quero registrar os meus agradecimentos pelo apoio recebido na realização deste trabalho a UniSENAIPR – Campus Londrina, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR – Londrina, a Universidade Estadual do Rio Grande do Norte fez a doação do óleo de coco babaçu, Instituto Senai de Inovação em Eletroquímica em Curitiba.

“Porque sou eu que conheço os planos que tenho
para vocês, diz o Senhor, planos de fazê-los
prosperar e não de causar dano, planos de dar a
vocês esperança e um futuro. Então vocês
clamarão a mim, virão orar a mim, e eu os
ouvirei”.

Jeremias 29:11

RESUMO

O cenário atual apresenta uma série de desafios econômicos, políticos e ambientais. Considerando o desenvolvimento tecnológico, há necessidade de adequações nos diversos processos de fabricação, visando impactos sustentáveis positivos e a redução de custos, sem comprometer a qualidade de produtos e/ou serviços. Na usinagem, há fatores desfavoráveis ao uso de fluidos, incluindo o custo, perigo à saúde do operador, riscos ao meio ambiente e o descarte indevido desse material, além da crescente severidade da legislação sendo fundamental a busca por alternativas ambientalmente mais corretas em substituição aos fluidos tradicionais. Nesse sentido, há produtos que exigem uma qualidade elevada no acabamento superficial, sendo necessário recorrer a tecnologias de alta precisão como é o caso da usinagem por fluxo abrasivo (AFM) que é capaz de usinar peças com geometrias complexas por meio de uma pasta abrasiva que contém fluidos em sua composição. Compreendendo a magnitude de avançar em direção a práticas mais sustentáveis, realizou-se uma avaliação técnica do processo de Usinagem por Fluxo Abrasivo (AFM), cujo óleos vegetais de Babaçu e Moringa Oleífera fazem parte formulação de uma pasta abrasiva de baixo custo em substituição de fluidos à base de petróleo comumente utilizados. Corpos de prova de aço SAE 1045, alumínio 6061-T6 e latão C-360 CLA foram submetidos à AFM nas mesmas condições, utilizando uma pasta abrasiva composta que possuía em sua composição carbeto de silício (SiC) e os óleos vegetais de Babaçu e Moringa Oleífera. Para tanto, a pasta abrasiva foi formulada e produzida, em seguida os corpos de prova passaram pela AFM com diferentes números de ciclos (20, 60 e 120) de acordo com o planejamento experimental. As análises de rugosidade superficial (R_a), variação de massa e microscópica das superfícies demonstram que os resultados deste trabalho contribuem para a melhor compreensão dos fenômenos intrínsecos de diferentes materiais quando submetidos ao processo de usinagem por fluxo abrasivo (AFM) utilizando pastas abrasivas de base vegetal. A AFM foi capaz de usinar a superfície de todos os materiais, apesar do comportamento distinto. Avalia-se que esse comportamento distinto está relacionado ao tipo de abrasivo utilizado e ao número de ciclos, não tendo relação com os fluidos vegetais utilizados na produção da pasta abrasiva.

Palavras-chave: Usinagem por Fluxo abrasivo; Pasta Abrasiva; Tribologia; Manufatura Sustentável.

ABSTRACT

The current scenario presents economic, political, and environmental challenges. Considering technological development, there is a need for adjustments in manufacturing processes, aiming for positive, sustainable impacts and cost reduction without compromising the quality of products and services. In machining, there are factors unfavorable to the use of fluids, including cost, danger to the operator's health, risks to the environment, and improper disposal of this material, in addition to the increasing severity of legislation, which makes it essential to seek more environmentally friendly alternatives to replace traditional fluids. In this sense, some products require a high-quality surface finish, which necessitates high-precision technologies such as abrasive flow machining (AFM), capable of machining parts with complex geometries employing an abrasive paste that contains fluids in its composition. A technical evaluation of the Abrasive Flow Machining (AFM) process was carried out, whose vegetable oils from Babassu and Moringa Oleifera are part of a low-cost abrasive paste formulation to replace commonly used petroleum-based fluids. Test specimens made of SAE 1045 steel, 6061-T6 aluminum, and C-360 CLA brass were subjected to AFM under the same conditions, using a composite abrasive media that had in its composition silicon carbide (SiC) and the vegetable oils of Babassu and Moringa Oleifera. For this purpose, the abrasive media was formulated and produced; then, the test specimens underwent AFM with different numbers of cycles (20, 60, and 120) according to the experimental design. The analyses of surface roughness (Ra), mass variation, and microscopic surface analysis demonstrate that the results of this work contribute to a better understanding of the intrinsic phenomena of different materials when subjected to the abrasive flow machining (AFM) process using vegetable-based abrasive pastes. AFM could machine the surface of all materials despite the distinct behavior. It is assessed that this distinct behavior is related to the type of abrasive used and the number of cycles. It is not related to the vegetable fluids used in the production of the abrasive media.

Keywords: Abrasive Flow Machining; Abrasive Media; Tribology; Sustainable Manufacturing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Possível abordagem visando a manufatura sustentável.	21
Figura 2 – Fruto de Babaçu e seus componentes.	24
Figura 3 – Integridade superficial	29
Figura 4 – Impacto da partícula abrasiva em diferentes escalas de interação ..	31
Figura 5 – Caracterização de forma de uma partícula abrasiva	32
Figura 6 – Parâmetros mais importantes da Rugosidade Superficial	34
Figura 7 – Parâmetros do Processo de AFM	36
Figura 8 – Classificação das Máquinas de AFM	37
Figura 9 – Remoção de Material.....	38
Figura 10 – Principais Parâmetros do Processo de AFM	40
Figura 11 – Sequência dos experimentos realizados	43
Figura 12 – Dimensões e identificação dos corpos de prova	46
Figura 13 – Separação, identificação e armazenamento dos corpos de prova de Latão.....	46
Figura 14 – Separação, identificação e armazenamento dos corpos de prova de Alumínio.....	47
Figura 15 – Separação, identificação e armazenamento dos corpos de prova de Aço	47
Figura 16 – Óleos vegetais de babaçu e moringa oleífera.....	48
Figura 17 – Aparatos utilizados no peneiramento.....	48
Figura 18 – Processo de filtragem do óleo de Moringa Oleífera	49
Figura 19 – Processo de banho maria ao qual o óleo de babaçu foi submetido	49
Figura 20 – Confeção da Pasta Abrasiva	51
Figura 21 – Sequência da mistura dos componentes da Pasta Abrasiva	51
Figura 22 – Pesagem das Amostras	53
Figura 23 – Medição da rugosidade superficial.....	53
Figura 24 – Microscópio óptico.....	54
Figura 25 – Aparato experimental para execução dos ensaios de AFM: conjunto motor e bomba (1); reservatório de óleo (2); regulador de pressão (4); alavanca de acionamento do pistão (5).....	55
Figura 26 – Subsistemas do aparato experimental para execução dos ensaios de AFM	56
Figura 27 – Abertura Cilindro com as Amostras e remoção inicial da pasta abrasiva.....	57
Figura 28 – Materiais e limpeza das amostras.....	57
Figura 29 – Processo de limpeza das amostras em meio líquido.....	58
Figura 30 – Variação de rugosidade média (ΔR_a) para o lado 1 e 2, medidos nas amostras de aço (intervalo de confiança de 95%).....	60
Figura 31 – Variação de rugosidade média (ΔR_a) para o aço, considerando o número de ciclos de AFM (intervalo de confiança de 95%).....	61
Figura 32 – Variação de rugosidade média (ΔR_a) para o lado 1 e 2, medidos nas amostras de alumínio (intervalo de confiança de 95%)	62
Figura 33 – Variação de rugosidade média (ΔR_a) para o alumínio, considerando o número de ciclos de AFM (intervalo de confiança de 95%)	63

Figura 34 – Variação de rugosidade média (ΔR_a) para o lado 1 e 2, medidos nas amostras de latão (intervalo de confiança de 95%)	64
Figura 35 – Variação de rugosidade média (ΔR_a) para o latão, considerando o número de ciclos de AFM (intervalo de confiança de 95%).....	64
Figura 36 – Variação de massa ($\Delta massa$) para o aço, considerando o número de ciclos de AFM (intervalo de confiança de 95%).....	66
Figura 37 – Variação de massa ($\Delta massa$) para o alumínio, considerando o número de ciclos de.....	66
Figura 38 – Variação de massa ($\Delta massa$) para o latão, considerando o número de ciclos de.....	67
Figura 39 – Imagens obtidas por microscopia óptica para amostras de aço submetidas a 20 ciclos de AFM, onde é possível observar as marcas de avanço, indicativos de usinagem devido à AFM e pontos de oxidação, mas que não estão relacionados à AFM.....	71
Figura 40 – Imagem obtida por microscopia óptica para amostra de aço submetida a 60 ciclos de AFM, onde é possível observar as marcas de avanço suavizadas como indicativo de usinagem devido à AFM.....	71
Figura 41 – Imagens obtidas por microscopia óptica para amostras de aço submetidas a 120 ciclos de AFM, onde é possível observar o aparecimento de riscos (I), material aderido (II e III) e <i>smearing</i> (na região de IV), fenômenos não observados para quantidades menores de ciclos	72
Figura 42 – Imagens obtidas por microscopia óptica para amostras de alumínio submetidas a 20 ciclos de AFM, onde é possível observar o aparecimento de defeitos que prejudicam o acabamento superficial: material aderido (I), riscos (II), <i>smearing</i> (na região de III), marcas de avanço sob o material aderido (IV).72	
Figura 43 – Imagens obtidas por microscopia óptica para amostras de alumínio submetidas a 60 ciclos de AFM, onde é possível observar o aparecimento de defeitos que prejudicam o acabamento superficial, com grande quantidade de material aderido em (a) e riscos na superfície em (b)	73
Figura 44 – Imagens obtidas por microscopia óptica para amostras de alumínio submetidas a 120 ciclos de AFM, onde é possível observar a grande quantidade de defeitos que prejudicam o acabamento superficial. Na imagem (a) não é sequer possível observar as marcas de avanço, enquanto em (b) há riscos na superfície e material aderido, possivelmente grãos abrasivos pela coloração	73
Figura 45 – Imagens obtidas por microscopia óptica para amostras de latão submetidas a 20 (a), 60 (b) e 120 (c e d) ciclos de AFM, onde é possível observar a evolução do aparecimento de defeitos na superfície do material à medida em que o número de ciclos aumenta, com prevalência de riscos e material aderido para 120 ciclos (c e d). (I) marcas de avanço, (II) pequenos riscos, (III) material aderido, (IV) grandes riscos na superfície.....	74
 Quadro 1 - Processo de Usinagem por Fluxo Abrasivo em áreas Industriais...19	
Quadro 2 - Categorias do Acabamento Superficial.....	33
Quadro 3 - Contribuições sobre o Processo de AFM	35
Quadro 4 - Meios abrasivos desenvolvidos por Pesquisadores.....	39
Quadro 5 – Planejamento da usinagem por fluxo abrasivo de acordo com cada corpo de provas	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição Pasta Abrasiva.....	50
Tabela 2 – Tabela ANOVA para a influência do lado de medida na variação de rugosidade média (ΔR_a) para o aço (intervalo de confiança de 95%)	60
Tabela 3 – Tabela ANOVA para a influência dos ciclos na variação de rugosidade média (ΔR_a) para o aço (intervalo de confiança de 95%)	61
Tabela 4 – Tabela ANOVA para a influência do lado de medida na variação de rugosidade média (ΔR_a) para o alumínio (intervalo de confiança de 95%).....	62
Tabela 5 – Tabela ANOVA para a influência dos ciclos na variação de rugosidade média (ΔR_a) para o alumínio (intervalo de confiança de 95%)	62
Tabela 6 – Tabela ANOVA para a influência do lado de medida na variação de rugosidade média (ΔR_a) para o latão (intervalo de confiança de 95%)	63
Tabela 7 – Tabela ANOVA para a influência dos ciclos na variação de rugosidade média (ΔR_a) para o latão (intervalo de confiança de 95%).....	64
Tabela 8 – Tabela ANOVA para a influência dos ciclos na variação de massa ($\Delta massa$) para o aço (intervalo de confiança de 95%)	65
Tabela 9 – Tabela ANOVA para a influência dos ciclos na variação de massa ($\Delta massa$) para o alumínio (intervalo de confiança de 95%).....	66
Tabela 10 – Tabela ANOVA para a influência dos ciclos na variação de massa ($\Delta massa$) para o latão (intervalo de confiança de 95%)	67

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos específicos.....	16
1.2	Estrutura da dissertação Erro! Indicador não definido.	
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Contexto industrial.....	17
2.2	Manufatura a passos sustentáveis e os óleos vegetais	19
2.3	Usinagem	27
2.4	Princípios da abrasão e tribologia	29
2.4.1	Mecanismos de desgaste	29
2.4.2	Geometria da partícula abrasiva.....	31
2.5	Rugosidade superficial	33
2.6	Usinagem por fluxo abrasivo (AFM)	35
2.6.1	Pasta abrasiva.....	39
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	43
3.1	Planejamento experimental	44
3.2	Corpos de prova.....	45
3.3	Óleos vegetais de coco babaçu e moringa oleífera	47
3.4	Confecção da pasta abrasiva	49
3.5	Procedimentos relacionados às amostras.....	52
3.5.1	Aferição das massas	52
3.5.2	Rugosidade superficial	53
3.5.3	Análise dos dados	53
3.5.4	Microscopia óptica.....	54
3.6	Usinagem por Fluxo Abrasivo (<i>Abrasive Flow Machining</i> – AFM)...	54
3.6.1	Limpeza das amostras	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1	Rugosidade superficial	59
4.2	Variação de massa	65
4.3	Discussão e análise microscópica	67
5	CONCLUSÃO	76
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
	REFERÊNCIAS.....	78

1 INTRODUÇÃO

O cenário mundial atual apresenta uma série de desafios econômicos, políticos e ambientais. Diversos países estão vivenciando um momento em que o crescimento na economia vem afetando diretamente o setor fabril. Assim, considerando o desenvolvimento tecnológico, há necessidade de adequações nos diversos processos de fabricação, visando impactos sustentáveis positivos e a redução de custos, sem comprometer a qualidade de produtos e/ou serviços. Portanto, a falta de um planejamento adequado pode acarretar consequências desastrosas para o meio ambiente, visto que os limites do desenvolvimento não são claramente compreendidos muitas vezes, podendo resultar em níveis alarmantes de poluição e degradação ambiental.

Diversos setores industriais têm sido impactados pelas regulamentações brasileiras, o que tem impulsionado mudanças significativas em diversas áreas. Assim, vem emergindo um novo paradigma, no qual as organizações precisam desempenhar papéis adicionais e assumir responsabilidades mais amplas, que vão além dos aspectos econômicos, mas também ambientais e sociais. Belém (2010) observa que as funções estão mais abrangentes na sociedade e a necessidade de evoluir é notória. Portanto, diante de diversos desafios surge uma demanda por inovação e sustentabilidade nos processos produtivos e racionalização de recursos, cada passo dado é um compromisso renovado com um futuro mais verde e responsável.

No setor de manufatura, o processo de usinagem é um dos mais utilizados, tendo por objetivo transformar matéria-prima em produto acabado, envolvendo operações de desbaste e acabamento que produz uma quantidade de energia considerável devido às solicitações impostas às ferramentas e à peça. Outro aspecto consiste na qualidade do acabamento superficial, pois a energia gerada é transformada em calor, podendo ser prejudicial à peça e ao processo. Para amenizar tais efeitos, contribuindo também para melhorar a produtividade e redução de custos de produção, o uso de fluidos de corte desempenha um papel fundamental, sendo para lubrificar e/ou refrigerar a região de corte, melhorar a potência exigida da máquina e diminuir a força de corte (SANTOS; LIMA, 2022), seja em processos convencionais ou abrasivos.

Nos processos de usinagem usualmente os fluidos são vistos como intrínsecos, porém seu custo representa cerca de 20% do custo envolvido em um projeto. Ademais, a demanda de consumo por fluidos em usinagem vem crescendo significativamente. Em 2019, em média 36,8 milhões de toneladas de fluidos lubrificantes foram consumidos no mundo, por exemplo.

No entanto, há fatores desfavoráveis ao uso de fluidos, apesar de sua importância, que se enquadram os custos, perigo à saúde do operador, riscos ao meio ambiente e o descarte indevido desse material, além da crescente severidade da legislação. Estima-se que a contaminação da água por fluido de corte é de 3,8 a 7,6 milhões de metros cúbicos por ano (GONÇALVES; SEIFERT; NEVES, 2023). Por conseguinte, há uma grande área em desenvolvimento, o de fluidos que tragam o mínimo de impacto ao meio ambiente e possam ser utilizados em processos de usinagem de modo geral, indo muito além dos processos de usinagem convencionais, como fresamento, torneamento, furação, entre outros.

Como os fluidos podem ser um problema, podemos considerar que para Silva (2017) é indispensável que a indústria de manufatura insira adequações em seus processos, visando a redução de geração de impactos e a qualidade de seus produtos. Contudo, tais adequações devem ser realizadas de forma planejada, pois as propriedades dos materiais metálicos desempenham um papel relevante no resultado da usinagem, desde o desempenho funcional, conformidade geométrica e questões econômicas.

Para produtos que exigem uma qualidade elevada no acabamento superficial, é necessário recorrer a tecnologias de alta precisão. Quando processos mais tradicionais (brunimento, tamboreamento, polimento, etc.) tornam-se limitados para a usinagem de peças com geometrias complexas há a possibilidade de se utilizar a usinagem por fluxo abrasivo (do inglês, *abrasive flow machining* – AFM). Portanto, tratando-se de peças com geometria complexa, o processo de usinagem por fluxo abrasivo vem de encontro com essa necessidade, porque é um processo não convencional em que a remoção do material é provocada pela ação de partículas abrasivas (COSEGLIO, 2013). Esse processo é ideal para aplicações equivalentes a superacabamento em cavidades complexas, o que não pode ser alcançado por processos convencionais, podendo ser utilizado em diversos materiais como ligas ferrosas e não ferrosas.

No entanto, as propriedades do material devem ser consideradas para melhor seleção dos parâmetros do processo. Entre elas destaca-se a usinabilidade, podendo ser descrita como o grau de dificuldade de se usinar um determinado material. Existem diversas variáveis envolvidas durante o processo de usinagem que vão desde fatores metalúrgicos até as características inerentes do material (GONÇALVES, 2016). Logo, a qualidade do produto acabado está relacionada diretamente com essas propriedades, uma vez que a qualidade da textura superficial é influenciada pela natureza do material e pelo processo de fabricação, ou pela combinação de ambos (GOMES, 2016).

Muitas vezes, atingir um determinado acabamento em formas complexas e com qualidade elevada, torna-se um desafio. De encontro com essa necessidade, partículas abrasivas são amplamente utilizadas em diversos segmentos de manufatura, elas são transportadas por um meio (pasta abrasiva) que entra em contato com a superfície a ser usinada. Nesse contexto, levando em consideração a biodiversidade de plantas oleaginosas existentes no Brasil, diversas pesquisas estão sendo realizadas com óleos vegetais obtidos pelo processamento de partes vegetais, destacando as sementes. O uso de óleo vegetal (óleo graxo), além de ser menos agressivo ao meio ambiente e ser menos tóxico, costuma ter a vantagem de ser uma substância biodegradável e de sofrer decomposição no período de até um ano (FERREIRA, 2023).

Como potencial componente de uma pasta abrasiva, será avaliado a substituição do óleo sintético pelos óleos vegetais de babaçu que é um fruto obtido da espécie *Attalea Speciosa*, e do óleo de Moringa Oleífera que é uma árvore nativa da Índia presente em diversos países. Nesse contexto, estudos como os de Freire et al. (2023) e de Alexandre (2022) evidenciam o potencial desses recursos no Brasil.

Mudanças de paradigmas relacionados à redução de impactos de processos produtivos, acaba por ampliar a integração entre os sistemas econômicos e ecológicos. Por isso, é possível que algumas restrições e ameaças industriais possam se tornar oportunidades, visando o desenvolvimento sustentável.

A motivação para a realização deste estudo, pauta-se em diversos benefícios para a sociedade, desde a redução do impacto ambiental, o consumo sustentável, redução de custos, oportunidades para pequenos agricultores e possível melhoria nas condições de trabalho a médio e longo prazos, por exemplo. Assim sendo, com o advento das novas tecnologias sustentáveis e a crescente valorização da biomassa

(coproduto da extração de óleo de vegetais) como matéria-prima no Brasil, garantindo o desenvolvimento econômico com a inclusão social, justifica-se a realização deste trabalho. Trata-se de um instrumento que apresenta a coleta de dados de forma a fortalecer informações sobre as possíveis soluções quanto ao emprego do óleo vegetal de Babaçu e de Moringa Oleífera na composição de uma pasta abrasiva de baixo custo utilizada no processo de AFM. Resultados econômicos e de produtividade são combinados entre máquinas, ferramentas e fluidos de corte, podendo se desdobrar em próximas etapas imaginando o futuro.

1.1 Objetivo geral

O presente trabalho visa a avaliação técnica do processo de Usinagem Sustentável por Fluxo Abrasivo (AFM). Assim, os óleos vegetais de Babaçu e Moringa Oleífera foram utilizados como parte da formulação de uma pasta abrasiva de baixo custo em substituição de fluidos à base de petróleo comumente utilizados.

1.2 Objetivos específicos

Com o propósito de alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- Desenvolver uma pasta abrasiva utilizando óleo vegetal de Babaçu e Moringa Oleífera para aplicação no processo de AFM.
- Investigar o desempenho da pasta abrasiva na usinagem de materiais metálicos com propriedades distintas, como o aço SAE 1045, o alumínio 6061-T6 e o latão C-360 CLA, analisando a taxa de remoção de material e a evolução da rugosidade superficial.
- Avaliar o efeito de variáveis do processo AFM, como número de ciclos, na eficiência da usinagem, identificando condições ideais para esses diferentes materiais.
- Qualificar a efetividade do processo de AFM utilizando a pasta abrasiva com óleos vegetais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada a revisão bibliográfica separada por assuntos principais, em que inicialmente será conceituado a área industrial e fatores relacionados à manufatura sustentável. Na sequência, são tratados os assuntos relativos aos processos de usinagem não convencional e os principais mecanismos de desgaste. Também, serão apresentados a usinagem por fluxo abrasivo e o desenvolvimento de uma pasta abrasiva de baixo custo. Serão embasados aspectos relacionados da manufatura a passos sustentáveis e o papel desenvolvido pelo planejamento experimental em trabalhos técnico-científicos.

2.1 Contexto industrial

A área industrial necessita de recursos naturais em seus processos produtivos. Esses recursos podem ser renováveis, ou seja, repostos de forma natural e em tempo hábil, ou podem ser recursos não renováveis que são extraídos com uma velocidade bem maior do que poderão ser repostos. As empresas estão cada vez mais buscando alternativas de ações sustentáveis, seja por uma necessidade, seja para atender o mercado consumidor e/ou para atender à legislação, o que consequentemente também pode ser transformado em uma ação social para uma região. Estudos científicos contribuem com evidências na detecção de impactos ambientais e na busca por soluções viáveis para o problema da geração de resíduos, refletindo em uma crescente conscientização sobre a qualidade ambiental.

Nesse contexto e com a constante evolução tecnológica, muitos modelos de negócios precisarão ser recriados para permanecerem no mercado. Tendo em vista diversas mudanças tecnológicas, avanço de materiais (que vão desde a extração e transformação de matéria-prima), até a substituição de produtos e mudanças nos processos. As unidades produtoras tornaram-se estruturas de produção com funções e responsabilidades que envolvem todos no sistema de produção, em que competências tecnológicas implicam em processos de inovação (LIMA e NETO, 2017). Portanto, as novas tendências evidenciam a necessidade de uma produção mais eficiente, eficaz, personalizada e com um custo competitivo, ou seja, uma transformação sistemática que vem de encontro com os conceitos da Manufatura Sustentável e da Indústria 4.0.

Tendo em vista essa conjuntura, o Mapa Estratégico da Indústria 2023-2032 publicado pela Confederação Nacional da Indústria Brasileira – CNI (2023) reitera que a indústria brasileira será fortalecida por uma década de transformações tomadas por parte do governo e pelo setor privado, tornando-se mais global e adaptada às diferentes demandas de regulamentações dos mercados internacionais. Com um marco inicial em 2020, o Brasil passou a ter grandes oportunidades de inserção no mercado internacional com o protagonismo nas agendas de descarbonização e digitalização. Nessa perspectiva, para Vaidya, Ambad, Bhosle (2018) as linhas de produção são vistas como uma plataforma de fabricação aberta e inteligente, tornando-se um novo nível de organização em toda cadeia de valor e no ciclo de vida dos produtos, sendo assim importante a sua relação com as práticas de fabricação sustentável.

O desenvolvimento sustentável reconhece a necessidade do uso da tecnologia para desenvolver soluções a fim de conservação dos recursos disponíveis e que permitam renová-los à medida que sejam necessários às futuras gerações (VALLE, 2002 b). Segundo Valle (2002), “a poluição industrial é uma forma de desperdício e um indício de ineficiência dos processos produtivos utilizados. Resíduos industriais representam, na maioria dos casos, perda de matéria-prima e insumos”. A responsabilidade ambiental vem como uma oportunidade, mesmo diante de custos adicionais. A reorganização dos processos produtivos e uma melhor definição do produto acabado irá refletir na redução da poluição e de custos industriais.

As empresas devem ter cuidado ao observar a legislação e estarem atentas às constantes mudanças, adequando seus investimentos na gestão ambiental como estratégia para serem eficientes e obter melhores resultados. A indústria metalmeccânica precisa adequar de forma correta o armazenamento e o descarte de seus resíduos, que se enquadram na classe I com base na norma ISO14000, sendo precursora de adequação com a gestão ambiental, que estabelece uma série de critérios a serem cumpridos.

Visando atender às normas e seus requisitos, os setores de manufatura buscam melhorar a sua produtividade em ações que permitam o aumento de eficiência no processo produtivo, através da produtividade e a otimização dos custos, de modo a manter a permanente competitividade do produto (PEREIRA, 2007). A avaliação do desempenho ambiental nos processos produtivos, possui adequados instrumentos de auxílio a tomada de decisão, contribuindo para a promoção da econoinovação de

processos e produtos, gerando vantagens competitivas ao reduzir impactos ambientais negativos. A adoção de práticas industriais alinhadas aos princípios da sustentabilidade é fator essencial para o posicionamento da indústria brasileira como liderança na agenda nacional e global de sustentabilidade, resultando em uma economia de baixo carbono, baseada na redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e no uso eficiente de recursos naturais (CNI, 2023).

No processo de usinagem por fluxo abrasivo (AFM), há estudos que estão voltados para o desenvolvimento de uma pasta abrasiva utilizando fontes renováveis de matéria-prima e que tenham custo mais acessível. Diversas áreas industriais já utilizam esse processo em suas linhas de produção, resultando em diversos benefícios que serão apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Processo de Usinagem por Fluxo Abrasivo em áreas Industriais.

Área Industrial	Contribuições do Processo de AFM
Aeroespacial	Possibilita melhorar a qualidade da superfície, aumentando a vida útil dos componentes, otimiza a combustão, aumento da resistência à fadiga, etc.
Automobilístico	Proporciona melhor uniformidade e qualidade da superfície das peças acabadas, melhorando o desempenho do motor, maior economia de combustível e redução das emissões, aumento da velocidade e do volume do fluxo, melhoria da resistência ao desgaste, etc.
Moldes e Matrizes	Reduz os custos de produção, aumenta o rendimento da produção, melhora a uniformidade, o polimento e a limpeza da superfície, e melhora o desempenho e a vida útil do molde e da matriz.

Fonte: Adaptado de Kumar et al. (2022).

Tratando-se questões técnicas e ambientais, o processo de usinagem por fluxo abrasivo apresenta diversas vantagens. Comparado a outros, como processos de fundição, prototipagem rápida, diversos processos de usinagem, máquinas CNC não conseguem atender superfícies pequenas e de geometria complexas. A AFM contribui para remoção de falhas superficiais, melhoria na funcionalidade, durabilidade e fiabilidade de componentes médicos, aumento de vida útil, entre outras (KUMAR et al., 2022).

2.2 Manufatura a passos sustentáveis e os óleos vegetais

Novos paradigmas da organização industrial com foco intrínseco na eficiência dos recursos e aumento da "responsabilidade social corporativa" aparecem como novos aliados na realização da manufatura sustentável, que é um dos principais

aspectos para atingirmos o desenvolvimento sustentável na era contemporânea, resultando em desafios para uma educação e práticas de manufatura sustentável (PARAVIZO, et. al., 2018). Nessa conjuntura, a NBR ISO 26000 é uma importante referência para a prática da responsabilidade social corporativa, proporcionando comportamento ético das empresas contribuindo com o desenvolvimento econômico e com comunidade local. O engajamento entre as partes fomenta a produção de bens e serviços ambientalmente corretos e sustentáveis, concentrando a atenção em todas as etapas do ciclo de vida, abrangendo o desenvolvimento de processos que minimizem os impactos ambientais negativos e a conservação dos recursos naturais e energéticos.

O crescente processo de industrialização global, aumento acelerado da população, desenvolvimento de novos produtos, altos níveis de produção e consumo excessivo resultaram em impactos ambientais significativos dos ecossistemas. Uma produção em grande escala tornou-se mais complexa devido à demanda de matéria-prima e de geração de resíduos que aumentaram de forma significativa. Assim, salienta-se que nas técnicas produtivas o uso sensato de recursos naturais faz parte de um conjunto de valores, os quais são intrínsecos ao funcionamento de uma indústria sustentável (CARVALHO et. al. 2018).

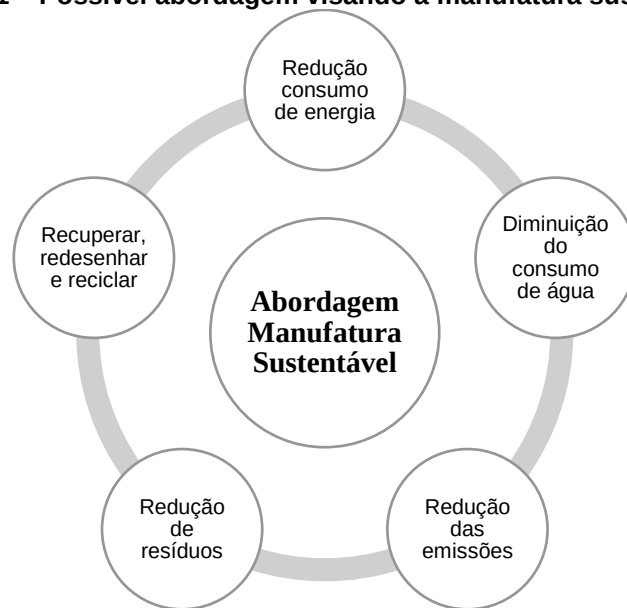
Os processos de extração anual de matéria-prima vêm apresentando crescimento nas últimas quatro décadas e em média apenas 12% dos materiais utilizados são reciclados, a emissão de gases de efeito estufa gira em torno de 50% e mais de 90% da perda da biodiversidade ocorrem na extração de matéria-prima e nos processos de transformação. Esses índices apontam para necessidade de mudanças, a fim de prevenir a escassez dos recursos naturais e econômicos. Iniciativas sobre as práticas da cadeia de abastecimento, juntamente com mapeamento de recursos das áreas de prática da Economia Circular (EC), tornam-se estratégias empresariais eficientes. As organizações a serem geridas por líderes que defendam a responsabilidade pelos recursos e encorajam o desenvolvimento, poderão garantir por meio de inovações, qualidade e aumento da funcionalidade bens e/ou serviços torna-se uma vantagem competitiva (ALAMELU et al., 2023).

O setor de manufatura é responsável por quase 15% e 40% da energia global e do consumo de materiais, o consumo de recursos é muito elevado e responsável por quase um terço dos resíduos globais. Nesse contexto, várias questões decorrem da tomada de decisões sobre estratégias de economia circular, entre elas a

implementação do conceito de sustentabilidade na cadeia de fornecimento, constituindo-se do triplo resultado (econômico, social e ambiental), que exige a adoção de práticas sustentáveis de fabricação e da compreensão de suas métricas básicas. Estudos vem explorando quais são os meios impulsionadores, as barreiras, as práticas e desempenho da manufatura sustentável. Alguns autores abordam que a avaliação de desempenho da manufatura sustentável ocorre através da relação da liderança verde no compartilhamento do conhecimento sustentável, outros exploram possibilidades de incorporar discussões sobre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e as metas estabelecidas, no desempenho da produção (XU; MURUGESAN; EL FAR; DURAIRAJ, 2024).

O setor metalúrgico é de grande importância no cenário econômico brasileiro, contando com uma ampla cadeia produtiva ligada a este segmento. Diferentes estratégias podem ser promover a manufatura sustentável, conforme Figura 1.

Figura 1 – Possível abordagem visando a manufatura sustentável.



Fonte: Adaptado Haleem, Javaid, Singh, Suman e Qadri (2023)

Essas abordagens consistem em passos inteligentes e eficientes em termos de materiais e energia para que as operações de fabricação se tornem aptas para a sustentabilidade global da indústria (HALEEM, JAVAID, SINGH, SUMAN E QADRI, 2023)

Inseridos nesse contexto também está a usinagem, com papel importante dos fluidos de corte. Eles são utilizados para melhorar a vida útil da ferramenta e/ou a integridade superficial, porém requerem sérios cuidados quanto ao seu uso, manuseio

e descarte, pois contém componentes químicos nocivos ao meio ambiente e representam em média 16% no total do custo de uma produção. Ao conceder aos ciclos técnicos uma concepção ecológica, métodos alternativos que controlem o consumo de fluido de corte são fundamentais, resultando em uma diminuição significativa no consumo de fluido e de água (RODRIGUES, 2018).

No contexto de uma produção sustentável, além da redução de consumo de fluido de corte, destaca-se economia de custos, redução de impacto ambiental e desempenho melhorado na operação de corte e da qualidade da superfície. Logo, buscas por fontes alternativas sustentáveis vêm sendo feitas em diversas áreas e os óleos vegetais “in natura” estão sendo estudados para sua utilização como fluidos de corte nos processos industriais. Entre eles, o óleo de babaçu e de moringa apresentam um relevante potencial tecnológico, sendo utilizados tanto para fins comestíveis quanto industriais.

O consumo de óleo lubrificante em processos de fabricação é muito alto, de acordo com as normas vigentes, o descarte deve ser feito de forma correta devido ao grande impacto ambiental que pode ser ocasionado. Entre os diversos e diferentes processos de usinagem, o processo por fluxo abrasivo merece destaque pela sua importância no setor metalmeccânico e por garantir acabamentos superficiais de qualidade apreciável, os qual possui fluidos em sua composição. No contexto da AFM, os processos de acabamento representam cerca de 15% do custo total de fabricação. Além disso, se a rugosidade superficial for inferior ao valor de 1 mm, o custo aumenta de forma acentuada. Pusavec e Kenda (2014) complementam, que o desenvolvimento de tecnologias de acabamento limpo e seco são fatores que fazem parte da manufatura sustentável, desde 2007 o mercado mundial de tecnologia mais limpas aumentou 11,8% ao ano refletindo em um valor de mais de dois bilhões de euros.

Tanto nos processos convencionais como nos processos não convencionais, há uma enorme lacuna para implementar e promover atividades relacionadas às oportunidades na manufatura sustentável. Modelos genéricos de empresas selecionadas podem servir de exemplo e incentivo, para avaliar a sustentabilidade da manufatura em outras organizações fabris, como o aprimoramento nos processos com técnicas de otimização como em usinagem a seco ou quase a seco, por exemplo (WAKJIRA, ALTENBACH, RAMULU, 2018).

Por outro lado, devido à capacidade de precisão na superfície usinada, os meios abrasivos desempenham um papel importante nas operações de acabamento

e existem vários meios que podem ser utilizados para este fim. Quando em forma de pasta, ela precisa apresentar propriedades viscoelástica, alta deformidade, adesividade, permeabilidade, entre outros. Essas características poderão ser atingidas quando aplicado materiais com aditivos e abrasivos de diferentes malhas e concentração (MALI et al., 2018).

Em virtude do elevado consumo de fluidos de corte em empresas de metalmecânica, surge a necessidade de cada vez mais difundir técnicas sustentáveis nos processos produtivos, entre elas o uso de óleos vegetais. No Brasil, a região Nordeste concentra um grande potencial de matéria-prima para produção de óleos de babaçu, mamona, palma e algodão, possibilitando o uso como fluidos de corte para a indústria da usinagem (LIMA JUNIOR, 2021). Uma das fontes de extração do óleo são as sementes, que apresentam porcentagem elevada da biodegradação e que fornecem melhores desempenhos da lubrificação nos termos do comportamento físico e tribológicas. Assim, pode ser utilizado tanto como fluido de corte, como em composições de pastas abrasivas utilizadas em processos não convencionais.

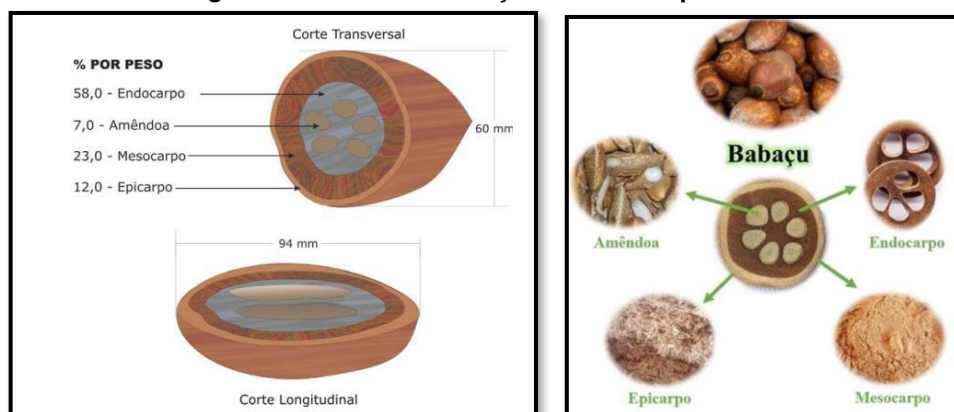
Os óleos vegetais têm sido apontados como de interesse industrial por serem provenientes de fontes naturais, tornando-se matéria-prima relevante. Esses fluidos apresentam boas propriedades de lubrificação, fornecendo um filme lubrificante de alta resistência que interage com superfícies metálicas, reduzindo o atrito e o desgaste. Além do potencial sustentável, desacatam-se por terem alta estabilidade oxidativa e pela capacidade de expansão de sua produção no Brasil devido as condições climáticas e solo fértil (JÚNIOR, 2021 e CASTRO et al., 2022).

No caso o óleo de Babaçu (*Orbignya Phalerata*) e de Moringa Oleífera, como matéria-prima, há o incentivo de cadeias produtivas de oleaginosas, sendo de grande importância socioeconômica e socioambiental. Na região norte e nordeste do Brasil, concentram-se as maiores extensões de mata predominante da palmeira de babaçu (*Orbignya Phalerata*). Estudos apontam que há cerca de 12 milhões de hectares plantados nos estados do Piauí, Tocantins e Maranhão, sendo esse último com maior área de plantio. De acordo com a CONAB (2022), em 2021 a produção de babaçu foi de 32.074 toneladas e nos últimos 6 anos foi período em que houve uma redução na produção.

A produção do Babaçu tem uma grande representatividade no extrativismo vegetal brasileiro. A palmeira de babaçu pode atingir até 20 m de altura, sendo que cada cacho contém em média de 150 a 250 castanhas e os frutos possuem entre 8 e

15 cm de tamanho e peso médio de 3 a 4 g. Para produção do óleo os frutos são selecionados e limpos, seguido da quebra, que deve ser adequada de forma a não quebrar as amêndoas, ao serem manipuladas de forma inadequada, ficam rançosas e perdem suas propriedades (CHAVES; SILVEIRA; NEUBA; JUNIO; RIBEIRO; MONTEIRO; NASCIMENTO, 2023). O coco babaçu possibilita uma variedade de produtos e subprodutos, em que tudo se aproveita, podendo ser utilizado para fins alimentícios, cosméticos e para fins industriais. O mercado formal do óleo de babaçu comestível é estimado em 5 mil toneladas ao ano e cerca de 35 mil toneladas ao ano, são utilizados por indústrias de limpeza, higiene e cosméticos (CAVALCANTE, 2016). O fruto apresenta uma constituição variada, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Fruto de Babaçu e seus componentes.



Fonte: Girardi (2023)

O coco babaçu é formado por 12% do epicarpo que consiste na camada fibrosa externa do fruto, 23% do mesocarpo sendo uma porção intermediária com elevados teores de amido e fibras e 58% do endocarpo que é utilizado na produção de carvão. As amêndoas representam em torno de 7%, de onde o óleo é extraído, com cerca de 65% de óleo GIRARDI (2023). O óleo extraído da semente de babaçu tem uma coloração amarelo transparente, em sua composição há predominância de ácidos graxos saturados, caracterizando-o como um óleo não comestível.

Já a *Moringa Oleífera*, é um vegetal com alto valor nutricional e medicinal, pertencente à família *Moringaceae*, destacando-se economicamente pelo seu cultivo ser tolerante à seca, podendo ser cultivado em regiões áridas e semiáridas. É uma árvore nativa do noroeste da Índia e está presente em diversos países. No Brasil, é encontrada em várias regiões, mas principalmente no Nordeste e cada árvore tem em média uma capacidade de produção que varia entre 15 e 25 mil sementes ao ano. A

semente tem o peso médio de 0,3 g e apresenta em torno de 38% de massa em ácidos graxos, predominado o ácido oleico, contendo os ácidos linoleico, palmítico e esteárico (FREIRE; NOVACK; MELO; FINZI-QUINTÃO; GUALBERTO, 2022). O óleo vegetal produzido com sementes maduras é incolor em torno de 38 a 40% e transparente, contendo elevado teor de ácido oleico que possui alta estabilidade devido a sua baixa insaturação.

Na literatura é mencionado como um óleo combustível sustentável e alternativo para transportes, podendo ser uma das principais fontes de uso do biodiesel na Austrália (JEGADHEESAN et al., 2022). O óleo obtido das sementes, é adequado para aplicações comestíveis e não comestíveis, apresenta valor agregado elevado tanto na área industrial como alimentícia. O óleo vegetal de babaçu e moringa são fortes potenciais na composição de pastas abrasivas utilizadas em processos de usinagem por fluxo abrasivo.

2.3 Influência das Propriedades do Material no processo de AFM

Os materiais metálicos possuem propriedades mecânicas fundamentais que os tornam indispensáveis em uma ampla gama de aplicações industriais e tecnológicas. Entre essas propriedades, destacam-se a ductilidade, resistência mecânica, plasticidade e a versatilidade em acabamentos e tratamentos superficiais, características que influenciam diretamente seu desempenho e aplicabilidade. Dentre os metais utilizados, as ligas ferrosas se sobressaem, representando mais de 90% do total em peso dos materiais metálicos empregados globalmente (SHACKELFORD, 2008), evidenciando sua importância na engenharia e na indústria.

No processo de AFM, o impacto de partículas sólidas sobre a superfície de usinagem, desencadeia transformações estruturais complexas, que podem ser analisadas em três níveis distintos: atômico, micro-nano e mezzo-macro. Cada uma dessas escalas absorve e dissipa a energia de deformação do material, no nível atômico, essa energia gera deslocamentos na rede cristalina, promovendo cisalhamento ao longo dos planos de deslizamento e aumentando a densidade de discordâncias. No nível micro-nano, ocorrem interações interfaciais intensificadas, facilitadas pelo aumento da entropia do sistema, que resulta essencialmente em energia térmica. Esse aquecimento localizado favorece fenômenos como adesão de

partículas, oxidação superficial e modificação da morfologia do substrato. Na escala mezzo-macro, as consequências da energia absorvida se tornam mais evidentes na forma de deformações plásticas, alterações topográficas e fadiga superficial do material (MELENTIEV, 2023).

No nível atômico, a energia cinética da partícula gera deslocamentos na rede cristalina, promovendo cisalhamento ao longo dos planos de deslizamento e aumentando a densidade de discordâncias. Nos aços, fatores que influenciam diretamente na usinabilidade, envolve desde a microestrutura, dureza, presença de inclusões no material e os elementos de liga. A presença de alguns elementos como o chumbo, o enxofre e fósforo, se o percentual de carbono for na faixa de 0,3 a 0,6% contribuem para a usinabilidade do aço (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Quanto ao alumínio, apresenta baixa densidade (2700 Kg/m³), grande ductilidade e alta redução da dureza com o aumento da temperatura (MACHADO et al., 2011). Em geral é de fácil usinagem, a baixa resistência mecânica faz com que o alumínio se deforme três vezes mais que o aço, o coeficiente de dilatação térmica do alumínio por ser maior que a do aço e latão pode influenciar na obtenção de tolerâncias apertadas (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

O cobre e suas ligas normalmente contém massas específicas maiores do que as dos aços, a nível de propriedades mecânicas várias ligas destacam-se pela sua excelente ductilidade, resistência a corrosão, condutividade térmica e elétrica, entre outras. Comparada as ligas de alumínio, as ligas de cobre, tem melhor resistência a fadiga, fluência e ao desgaste. A liga de cobre-zinco, ou seja, o latão é um material muito versátil, podendo ser processado a frio na produção de componentes com geometrias complexas e são muito resistentes a corrosão (ASKELAND; PHULÉ, 2013).

A deformação plástica em materiais metálicos com estrutura cúbica de face centrada (CFC), como cobre e alumínio, ocorre preferencialmente na direção cristalográfica associada ao menor módulo de elasticidade. Esse comportamento está diretamente relacionado à anisotropia elástica do material, a qual influencia a resposta mecânica de cada grão durante o processo de usinagem (PORTO, 2004).

2.4 Usinagem

Existem diversos processos de fabricação mecânica, enquadrando-se em dois grandes grupos: com remoção de cavaco e sem remoção de cavaco. Com ênfase em processo com remoção de cavaco, temos a usinagem que pode ser definida como operação que ao conferir a peça uma forma, dimensão e acabamento produz cavaco. O termo usinagem refere-se a um processo mecânico convencional, que tem por finalidade dar uma forma ao material, dimensões, acabamento ou combinação de quaisquer destes três itens por meio da remoção de material desta peça (GAINER, 1993).

Os processos de usinagem podem ser classificados em convencionais e não convencionais. Nos processos não convencionais, os que utilizam como ferramenta cortante grãos abrasivos, são muito eficientes para materiais metálicos ferrosos e não ferrosos. Os processos de usinagem não convencional, passaram a ter destaque a partir da década de 1940, devido a sua capacidade de produzir peças com materiais de difícil usinabilidade e geometrias complexas. Tais processos são considerados atividades de fabricação que utilizam formas comuns de energia em novos caminhos ou que se aplicam formas de energia diferentes do convencional, podendo ser classificado de acordo com a forma da energia empregada, sendo ela processos mecânicos, elétricos, térmicos e químicos. Neste estudo, será dado uma ênfase nos processos mecânicos, que estão relacionados diretamente com a aplicação de abrasivos para a remoção de material. visando um acabamento superficial de elevada qualidade e tolerâncias estreitas, processos de ultra precisão possibilitam a fabricação de componentes com tolerâncias na faixa de 1 μm a 1 nm (PORTO et al., 2004). O processo mecânico tem por objetivo remover material ou desgastar por abrasão a superfície da peça, a peça e a ferramenta se movimentam com um composto abrasivo aplicado livremente na interface peça, cerca de 10 μm do material é removido melhorando o acabamento superficial.

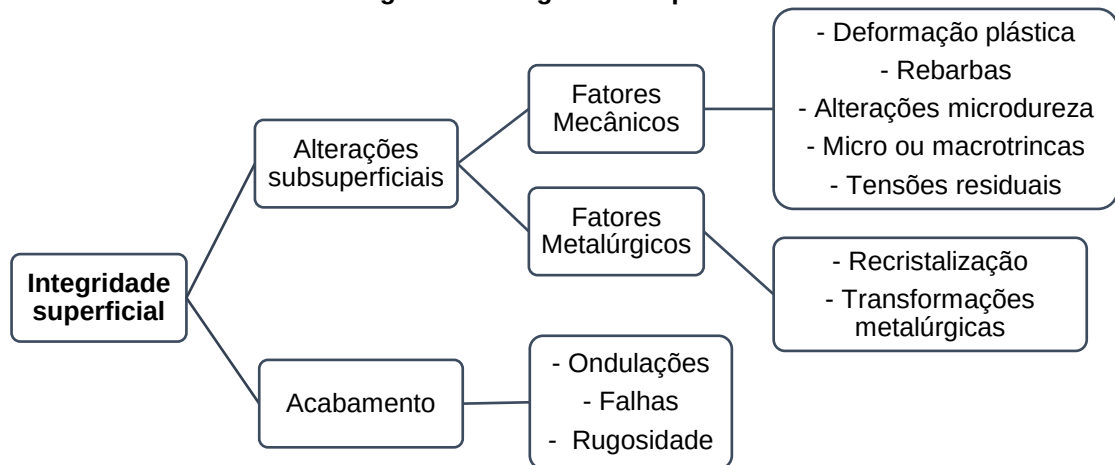
Muitas vezes a eficiência de um determinado componente pode estar relacionada com o acabamento superficial, métodos como observação e medição auxiliam em tais identificações, o que depende de uma série de fatores como a dureza do material, propriedades químicas e físicas, entre outras. O nível de acabamento superficial é analisado de acordo com a rugosidade superficial, conforme a norma NBR ISO 4287/2002. Rugosidade sendo definida como o conjunto de desvios micro

geométricos, caracterizado pelas pequenas saliências e reentrâncias presentes em uma superfície. Tais desvios, podem ser ocasionados por processos de usinagem em que a força de usinagem provoca vibrações e flexões na ferramenta de corte, além de outros fatores como a temperatura de corte, erros no posicionamento de peça ou ferramenta (CAMARGO, 2002).

A obtenção dos materiais e das propriedades são distintas, além do mais as condições nas quais esses materiais são submetidos aos processos de usinagem, resulta na integridade superficial da peça (SILVA, 2017). Assim, com vistas à melhoria de seus processos e com um menor gasto energético, as indústrias necessitam aprofundar seus conhecimentos sobre o comportamento dos materiais, principalmente no que diz respeito aos processos de usinagem.

Nas décadas de 1970, Dowson (1979) relata a importância econômica da tribologia, em que 30% da energia gerada no mundo industrial é dissipada em processos envolvendo atrito. A tribologia, importante aliada da usinagem, é uma ciência voltada para o conhecimento no desgaste, atrito e lubrificação, beneficiando de forma significativa a integridade de movimento de tribo-sistemas de máquinas. O contato entre duas ou mais superfícies submetidas ao atrito podem resultar em perda progressiva de material e, de acordo com o tipo de material, tais perdas podem resultar em maiores ou menores danos. Essa área se desenvolveu muito, sendo de grande interesse para desenvolver tecnologias capazes de diminuir esforços em processos de usinagem devido ao atrito, o que resulta em menor desgaste de materiais. Logo, para o aperfeiçoamento dos processos é fundamental que se tenha conhecimentos sobre as interações tribológicas, permitindo avaliar o desempenho dos materiais utilizado o processo (FERNANDES, 2007).

Ainda, a modificação na superfície do material usinado envolve fatores como deformações plásticas, ruptura, recuperação elástica, geração de calor, vibração, tensões residuais e as vezes reações químicas e a integridade superficial pode ser compreendida como sendo a descrição da qualidade de uma superfície (MACHADO et al., 2011). Nesse sentido, para uma melhor compreensão do que é a integridade superficial, a Figura 3 demonstra existem mais dimensões a serem analisadas, por não abranger apenas a superfície ou a forma geométrica, envolvendo características superficiais em serviço.

Figura 3 – Integridade superficial

Fonte: Adaptado de Machado et al. (2011)

Nota-se que a modificação de uma superfície usinada pode ocorrer devido a uma série de fatores, podendo ser de origem mecânica ou metalúrgica. Quanto ao acabamento superficial, variáveis do processo como vibrações, temperatura de corte, posicionamento e fixação das peças, flexões da ferramenta de corte podem provocar ondulações na superfície, que são erros ou irregularidades superficiais cujos espaçamentos são maiores que as irregularidades consideradas rugosidade. Além das variáveis previstas, problemas intrínsecos do material, defeitos superficiais como trincas, bolhas e inclusões podem resultar em falhas, ou seja, em interrupções na topografia de uma superfície, sendo algo indesejável e inesperado (MACHADO et al., 2011).

Assim sendo, visando atender requisitos dimensionais, o produto deve ser submetido a ensaios de rugosidade, que possibilitam identificar a micro irregularidade geométrica presente na superfície do material usinado. As características de usinabilidade também estão relacionadas ao tipo de material (CALLISTER, RETHWISCH, 2009). Para o caso específico de materiais metálicos, os fatores que influenciam diretamente a usinabilidade, envolvem desde a microestrutura, dureza, presença de inclusões no material e os elementos de liga (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

2.5 Princípios da abrasão e tribologia

2.5.1 Mecanismos de desgaste

Em um sistema tribológico é fundamental conhecer os mecanismos de desgaste, permitindo escolher materiais adequados e prever diversos fenômenos

relacionados a ele. O desgaste corresponde a remoção de material, podendo ocorrer devido ao deslizamento de uma superfície sobre outra quando uma carga é aplicada. Trata-se de um fenômeno complexo e dependente de parâmetros, tais como rugosidade da superfície, a pressão de contato, a dureza, o módulo de elasticidade das superfícies, as condições atmosféricas e as condições de deslizamento, cada um influenciando de forma distinta a taxa e a natureza do desgaste (CRUZ, 2023). A norma DIN 50320 (1979) define o desgaste como a perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido, decorrente da ação mecânica entre o movimento de um contra corpo sólido, líquido ou gasoso.

A intensidade do desgaste depende dos materiais em contato e de como eles interagem, em muitos sistemas a perda de material decorrente ao tipo de desgaste é equivalente a distância de deslizamento das partículas abrasivas. Um comportamento transitório também pode ocorrer, chamado de “amaciamento” (ou *running-in*) até que as condições de equilíbrio da superfície sejam estabelecidas, nesta fase a taxa de desgaste pode ser diferente quando comparado ao estado estacionário (CANABARRO, 2023). Considerando taxas e mecanismos de desgaste diferentes, pode ser classificado em dois regimes, sendo o primeiro identificado como severo e o segundo como leve. O desgaste severo em metais, existe a formação de partículas grandes de detritos metálicos, enquanto no desgaste leve, os detritos consistem em partículas de óxidos.

A transição nos regimes de desgaste de pares tribológicos é um fenômeno no qual a taxa de desgaste é abruptamente alterada, associada ao tipo de movimento do abrasivo. A remoção de material é influenciada pelo tipo do substrato sólido, bem como o meio resultando em transformações que podem ser separadas em três níveis: escala atômica, escala micro-nanométrica e escala mezo-macro, a energia consumida no impacto é distinta conforme a escala. De acordo com Melentiev (2023), a erosão por partículas sólidas em escala atômica baseia-se nas estruturas moleculares, ligações energéticas e outras características atômicas do material. Na Figura 4 para cada uma das escalas, é possível identificar impactos da partícula abrasiva.

Figura 4 – Impacto da partícula abrasiva em diferentes escalas de interação

Meso-Macro Escala	Micro-Nano Escala	Interação Escala Atômica
• Fratura por Deformação • Aquecimento • Ondas acústicas e outras	• Cisalhamento Térmico • Atrito • Adesão	• Eletroquímica • Fotoquímica • Química

Fonte: Adaptado de Melentiev (2023)

A energia de impacto absorvida transita através das escalas que fundamentam a transformação correspondente do material, em que a energia cinética da partícula é convertida em energia de deformação. A fração não recuperável cria um cisalhamento na rede cristalina do material, este fenômeno, resulta em maior entropia que se transforma em energia térmica, facilitando maiores deformações. Quanto aos fenômenos interfaciais, na escala atômica e nano ocorrem adesão e oxidação (MELENTIEV, 2023).

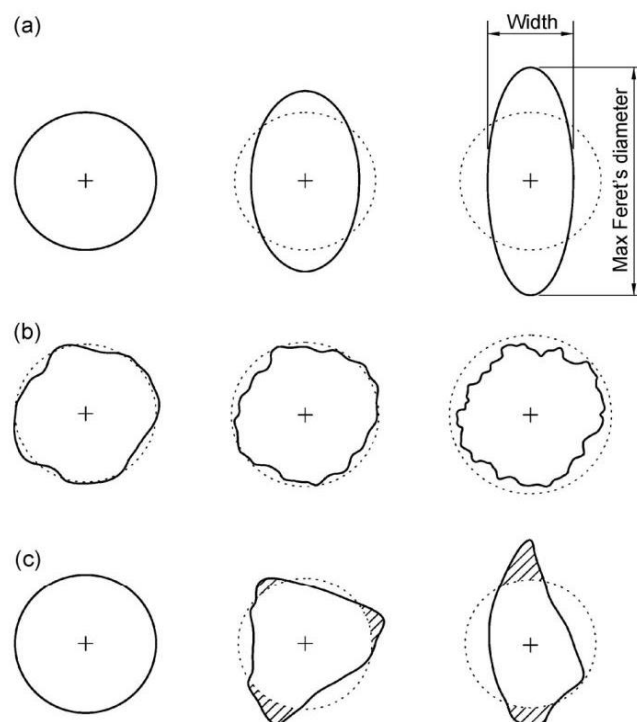
2.5.2 Geometria da partícula abrasiva

Considerado um dos mais importantes tipos de carbetos, o carbetto de silício (SiC) pertence ao grupo de materiais com alta dureza, resistência térmica e à corrosão fazem do SiC um excelente abrasivo. Partindo do pressuposto de que o grão abrasivo é uma partícula de corpo sólido, que não se degrada e cujas propriedades são constantes durante o processo, a geometria, a dureza e o tamanho da partícula são características importantes para a taxa de desgaste (PINTAUDE, 2011). Diversos estudos sobre a variação do tamanho da partícula demonstram que de 10 μm até 100 μm , ocorre um aumento da taxa de desgaste da superfície. Ao aumentar estes índices de 100 μm até 250 μm , as taxas mantêm-se praticamente constantes para os dois tipos de desgaste abrasivos (a dois e três corpos) e isso ocorre devido às partículas maiores que rolam para fora da superfície de atrito ou quebram, gerando partículas menores. Quantificar e definir o formato das partículas é muito difícil, porém, quanto mais dura for a partícula em relação à dureza da superfície a ser usinada, maior será o desgaste e partículas angulares geram um desgaste maior do que partículas arredondas, influenciando no mecanismo de desgaste (GOMES, 2022).

O tamanho da partícula possui forte influência no desgaste, Zhang; Wang; Chen e Shir (2023) complementam que a elasticidade do meio pode fornecer forças normais e axiais, exercidas sobre os grãos, induzindo a geração e extensão da deformação plástica na superfície de usinagem. Uma outra característica importante é a fluidez do meio, que proporciona forças axiais para impulsionar a deformação plástica. A correlação entre a elasticidade e a fluidez do meio abrasivo influencia no desgaste, partículas menores geram microsulcamento, formando microlascas descontínuas e deformáveis, as partículas maiores geram microcorte, originando microlascas contínuas e não-deformáveis (PINTAUDE et al., 2019).

Na usinagem por fluxo abrasivo, as partículas podem sofrer movimento de laminação ou de canal tendendo a formar sulcos quando o tamanho das partículas é menor e a carga normal é maior. Um dos parâmetros mais utilizados para caracterizar uma partícula abrasiva é analisando a sua forma, ou seja, partindo do formato circular geométrico, utiliza-se a razão entre a área de projeção da partícula e a área do círculo correspondente (Figura 5).

Figura 5 – Caracterização de forma de uma partícula abrasiva



Fonte: Pintaude, Coseglio (2016)

Comparando o formato da partícula com um círculo: (a) elipses com diferentes alongamentos; (b) aumento da irregularidade da borda das formas arredondadas; (c) combinação dos casos anteriores.

2.6 Rugosidade superficial

Entre os diversos parâmetros relacionados ao custo de fabricação industrial, o acabamento superficial de peças usinadas representam um papel crucial na qualidade do produto acabado. A rugosidade superficial refere-se a pequenas variações geométricas na superfície da peça usinada, conforme mencionado por Munhoz (2017), torna-se imperativo analisar o perfil das superfícies usinadas, por apresentarem irregularidades com espaçamentos regular ou irregular, tendendo a formação de padrões ou texturas distintas durante o processo de fabricação. Neste quesito, a eficiência do processo AFM é avaliada por meio dos resultados obtidos para os parâmetros de rugosidade, especificamente Ra (rugosidade média aritmética), Rq (rugosidade quadrática média) e Rz (altura máxima da rugosidade).

Os resultados dos parâmetros da rugosidade permitem a obtenção de *insights* valiosos sobre a qualidade do processo. Representam indicadores importantes que oferecem uma visão abrangente da qualidade da superfície, destacando a uniformidade ou irregularidades presentes de forma a garantir que as peças usinadas atendam aos padrões desejados de qualidade e desempenho. A busca por tecnologias adequadas e a otimização de processos são estratégias que permitem gerenciar e reduzir custos associados ao acabamento. A qualidade do acabamento superficial depende da relação entre o material da peça a ser usinada, da máquina-ferramenta, tornando-se um indicativo da qualidade do produto e do processo. Baseado em Troiano et al. (2024), as técnicas de acabamento superficial são agrupadas em três categorias que são apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Categorias do Acabamento Superficial

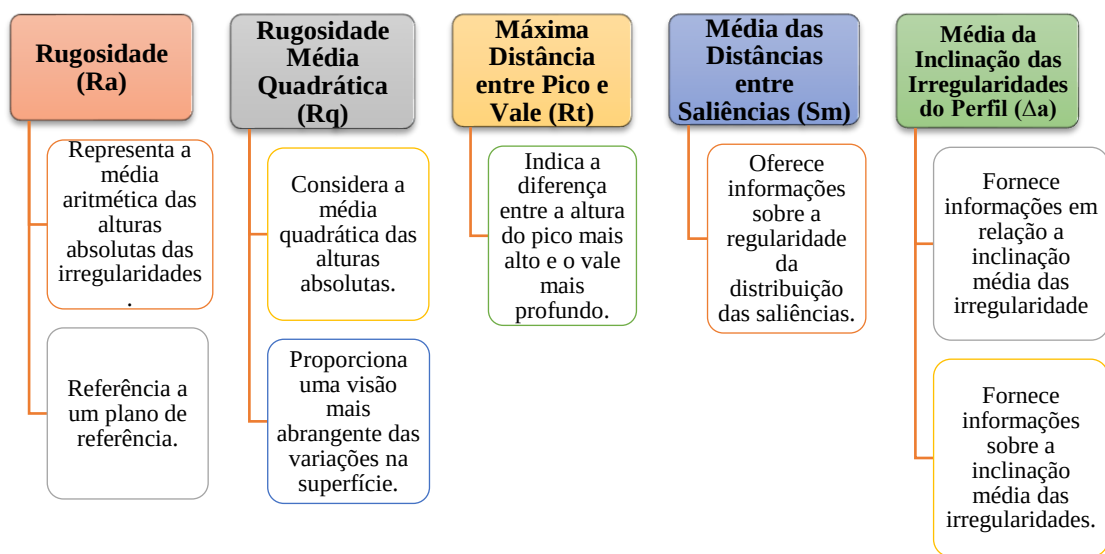
Processos	Mecanismos
Mecânicos	Podem ser por processos de usinagem convencional ou de usinagem por fluxo abrasivo.
Químicos e Eletroquímicos	Soluções formuladas para retirada de material, principalmente em geometrias complexas e de difícil acesso. As condições de temperatura, tempo e agitação são de grande importância para a efetividade do processo.
Moldes e Matrizes	Comumente utiliza o polimento a laser, permitindo um controle mais preciso e elevado grau de atomização através múltiplos comprimentos de onda que podem ser parametrizados conforme o processo. Para que não ocorra modificação (tensões residuais) na superfície da peça a ser usinada, faz-se necessário controlar a entrada da energia térmica.

Fonte: Adaptado de Troiano et al. (2024)

As categorias apresentam diversos mecanismos nos quais é possível buscar alternativas e adequações que se enquadre melhor ao processo. O controle dos parâmetros durante o processo influencia a rugosidade, que consiste na qualidade superficial da peça usinada. As normas as Normas Brasileiras Regulamentadoras (NBR), *International Organization for Standardization* (ISO) 4287/2002 e NBR, ISO 8404/1988 definem vários parâmetros para avaliar a rugosidade (BONGOSKI; GRISON, 2022).

Esses parâmetros desempenham um papel fundamental no processo de usinagem, compreender e controlar esses fatores torna-se essencial para assegurar a obtenção dos padrões desejados de qualidade na superfície das peças, baseado em Carvalho (2023), os parâmetros de suma importância estão evidenciados na Figura 6.

Figura 6 – Parâmetros mais importantes da Rugosidade Superficial



Fonte: Adaptado de Carvalho (2023)

Na área industrial, a rugosidade média (Ra) da superfície da peça é um parâmetro muito utilizado para controlar a qualidade do produto usinado, a medida é realizada por meio de uma multi-escala e modelada em função dos parâmetros de corte. Na usinagem de geometrias complexas a rugosidade média (Ra) é muito difícil de ser obtida, tornando-se um desafio para o processo devido a fatores como rigidez, ferramenta e material (AIO, 2022).

2.7 Usinagem por fluxo abrasivo (AFM)

Um dos grandes desafios da indústria metalmeccânica envolve as áreas de tecnologia e engenharia de alta precisão e atender com qualidade acabamentos superficiais de peças e/ou componentes envolve, desde melhoria de processos até custos de fabricação. Em peças com geometria complexa, a usinagem não convencional por fluxo abrasivo torna-se uma alternativa, por se tratar de um processo semelhante ao superacabamento em cavidades complexas, utilizando um meio não newtoniano consistindo na combinação de polímero, gel e abrasivos (BHARDWAJ; ALI; WALIA; MURTAZA; PANDEY, 2019). A usinagem por fluxo abrasivo (AFM) foi patenteada no final da década de 1970 por uma empresa americana denominada "Extrude Hone Corporation", sediada nos Estados Unidos para processos de acabamento com formas e geometrias complexas. Nela, utiliza-se um meio abrasivo para usinar as peças, por meio de um meio elástico. Através da passagem de um meio abrasivo (pasta) sobre a superfície da peça rugosa a ser usinada é realizado o acabamento (HASHMI; MALI; MEENA, 2022). Diversos estudos estão sendo realizados nesta área, para evidenciar a importância do processo de AFM, o Quadro 3 apresenta algumas contribuições de alguns autores.

Quadro 3 - Contribuições sobre o Processo de AFM

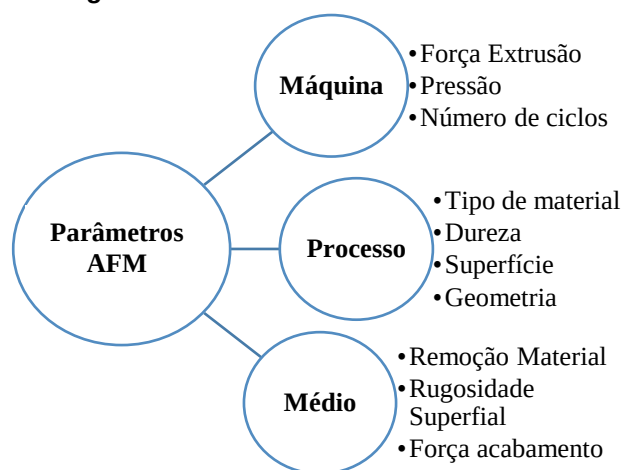
Processos	Mecanismos
Gupta e Chahal (2015)	Experimentalmente observou que a tensão contribui em 45,35% para remoção de material durante o acabamento do processo AFM por eletroquímica.
Tzeng et al. (2007)	Estudaram o meio abrasivo em microcanais, os resultados demonstraram que as partículas abrasivas grossas com maior concentração dão maior velocidade e melhora o acabamento superficial da peça.
Tzeng et al. (2007)	Utilizando amostras de aço inoxidável AISI304, os parâmetros que define o ponto ótimo do processo foram: partículas de dimensão de 150 µm com 50% de concentração, pressão de 6,7MPa na extrusão e tempo de 30 min no processo.
Jain e Jain (2004)	Prepararam um modelo de simulação para calcular a dinâmica das partículas abrasivas no processo de nanoacabamento, e verificaram que a densidade dos grãos de grãos melhorava com o aumento do tamanho da malha abrasiva.
Gorona et al. (2006)	Apresentaram um modelo para calcular as forças desenvolvidas num único grão durante a remoção de material e calcularam as forças axiais e radiais envolvidas no corte, concluíram que estas forças têm um efeito significativo na deformação do material.
Jain et al. (2004)	Observaram que o valor mais elevado da pressão de extrusão, diminui com a rugosidade da superfície.

Fonte: Adaptado de Bhardwaj et al. (2019)

As contribuições apresentadas pelos autores acima e demais estudos são significativos para bases de novos desenvolvimentos do abrasivo e para validação de equipamentos que realizam este processo. Por se tratar de um processo de usinagem por abrasão, ou seja, realizado com uma ferramenta de corte sem geometria definida, o processo permite atingir boa qualidade em termos de precisão, forma e integridade superficial. Os fatores tempo e custo vem sendo um grande desafio no sentido de obter melhores resultados e estudos vem sendo desenvolvidos visando o desenvolvimento de vários processos, apesar de ser possível alcançar um apreciável acabamento superficial por meio do AFM (SIHAG; KALA e PANDEY, 2017). Contudo, no Brasil a obtenção de um fluxo abrasivo só é possível mediante a importação, impactando significativamente os custos do processo.

A otimização do processo de AFM, é essencial para alcançar resultados de alta qualidade na fabricação de componentes industriais. Um dos principais fatores que influenciam diretamente a eficiência são os parâmetros envolvendo a máquina, o processo e o meio. Para obter o melhor resultado é preciso que esses parâmetros sejam cuidadosamente selecionados, levando em consideração o acabamento superficial desejado e a taxa de remoção de material, conforme Figura 7.

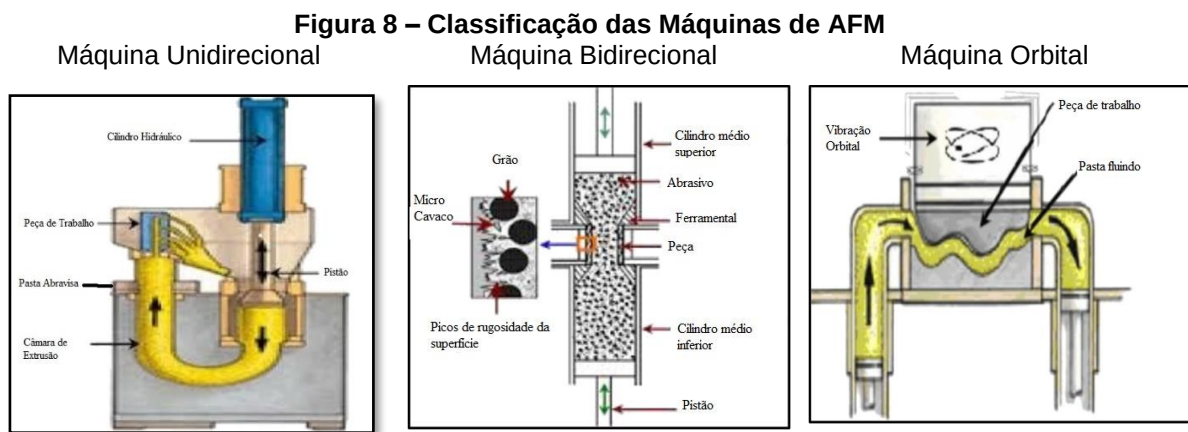
Figura 7 – Parâmetros do Processo de AFM



Fonte: Adaptado de Singh et al. (2022)

Quanto ao processo, o desempenho depende da seleção adequada dos parâmetros operacionais, especialmente aqueles relacionados às variáveis baseadas na máquina. A aplicação de pressão influencia diretamente as forças axiais e radiais exercidas sobre as partículas abrasivas e o número de ciclos correlacionados à taxa de remoção.

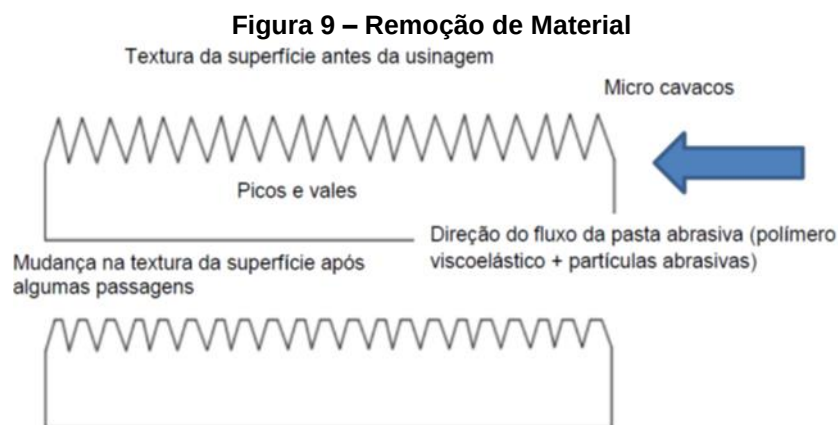
Os requisitos geométricos, as características do material, o processo e o estado inicial da superfície do material de trabalho são os principais componentes dos parâmetros. Os materiais de trabalho de elevada dureza oferecem maior resistência à abrasão (SINGH et al., 2022). Baseado no movimento das partículas abrasivas, as máquinas de AFM podem ser classificadas em três categorias, sendo estas a unidirecional que é um processo mais simples e que possibilita um melhor controle de temperatura do meio. O bidirecional tem uma capacidade de remoção de material reduzido e a categoria orbital em que ocorre oscilações rápidas e de baixa amplitudes no substrato. (BHARDWAJ et al., 2019). Na Figura 8 é apresentado um esquema geral da AFM de forma a exemplificar os princípios do processo classificado em categorias.



Fonte: Goyal et al. (2022) e KUMAR et al. (2022)

Baseado nos autores Goyal et al. (2022) e (KUMAR et al., 2022), o modelo esquemático apresentado na Figura 8, a pasta abrasiva é inserida no cilindro superior e a peça é fixada em uma base na parte inferior, mantendo uma distância entre o a saída da pasta abrasiva que será extrudada sobre a superfície da peça a ser usinada. No processo unidirecional a pasta abrasiva é pressionada em um único sentido, sendo possível controlar a pressão de extrusão, número de ciclos, volume do fluxo do material e velocidade do fluxo do material. Na categoria bidirecional, o equipamento é composto por dois cilindros opostos verticalmente, o acionamento ocorre no sentido de cima para baixo de forma a ejetar a pasta abrasiva sob a superfície da peça, é possível controlar o tipo e o tamanho do abrasivo, a concentração e a viscosidade da pasta. É possível controlar o tipo, área transversal e comprimento da passagem da pasta abrasiva e a rugosidade inicial da superfície da peça.

Munhoz (2017) cita que os processos automáticos de AFM podem reduzir em média 90% do tempo em operações de acabamento manual, sendo possível garantir uma uniformidade no volume por meio da determinação e monitoramento da taxa de corte. Quanto menor for o diâmetro da geometria da peça, uma quantidade maior de grãos abrasivos entrará em contato com a superfície a ser usinada, ocorrendo a remoção do material. Quanto ao mecanismo de remoção no processo de AFM, na Figura 9 nota-se a mudança de textura da superfície após a usinagem.



Fonte: Munhoz (2017)

A remoção de material ocorre de três formas, por deformação elástica, plástica e microcorte do material. O tipo de deformação está condicionado à energia dissipada, ou seja, ao cisalhamento imposto pelo meio abrasivo, devido às forças do grão e da profundidade de corte. A quantidade de vezes (número de ciclos) em que a pasta abrasiva passa pela superfície, a textura da peça usinada muda, os picos e vales tornam-se menores.

A seleção das partículas abrasivas e da base polimérica são elementos importantes, que envolve desde a dureza do material da peça a ser usinado, o custo no processo, qualidade do acabamento superficial desejado, entre outros fatores. A literatura evidencia que o meio abrasivo composto por um polímero é um dos elementos mais importantes no processo de AFM, sendo responsável pelo nível de acabamento superficial que pode ser alcançado no processo (BASHA; VENKAIAH; SANKAR, 2023). A compreensão e o controle desses elementos são essenciais para alcançar resultados consistentes e de qualidade no acabamento de peças, promovendo avanços significativos na eficiência e precisão dos processos industriais.

2.7.1 Pasta abrasiva

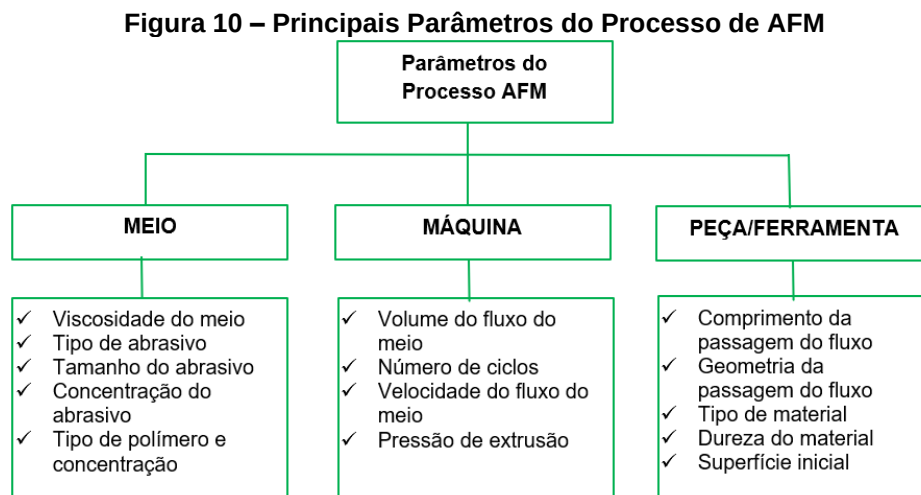
Na usinagem por fluxo abrasivo, por se tratar de um processo apropriado para o polimento fino, a pasta abrasiva atua como uma ferramenta de corte e sua composição pode ser feita de várias formas. Fitzpatrick (2013) complementa que o aglomerante que é o material que une os grãos abrasivos em conjunto e o tamanho do grão são fatores primordiais no processo. Métodos de polimento de qualidade vem tornando-se um foco de investigação em diversos estudos, consistindo em um polímero viscoelástico reforçado com partículas abrasivas. Munhoz (2017) cita que as pastas comumente utilizadas podem ser de base polimérica, como o poliborosiloxano e a borracha de silicone, ou podem ser a base de abrasivos como os carbeto de silício, óxido de alumínio, carbeto de boro e diamante policristalino. Além dos meios comercialmente disponíveis da organização Extrude Hone Corporation e da Kennametals, a comunidade científica e os pesquisadores têm explorado alternativas para composição da pasta, alguns exemplos são citados no Quadro 4.

Quadro 4 - Meios abrasivos desenvolvidos por Pesquisadores

Processos	Base Polimérica	Mecanismos
Wang et al. (2007)	Borracha Silicone Borracha Silicone com aditivos.	Abrasivo: SiC com 50% de concentração e diferentes malhas. Caracterização: NA Abrasivo composto por borracha de silicone com aditivos apresentou melhor acabamento da superfície.
Kar et al. (2009)	Borracha natural Borracha butílica	Abrasivo: SiC com 68% de concentração e diferentes malhas. Caracterização: Propriedades reológica Abrasivo composto por borracha butílica apresentou um bom desempenho.
Kar et al. (2009)	Borracha natural Borracha Etileno Propileno Dieno Monômero (EPDM) Borracha Butílica (Isobutileno Isopreno - IIR) Borracha de silicone (Si) Borracha de estireno butadieno (SBS)	Abrasivo: SiC com 68% de concentração e diferentes malhas. Caracterização: Propriedades Mecânica e Reológicas O abrasivo composto com borracha de estireno butadieno (SBS) demonstraram bom desempenho. O meio desenvolvidos são mecanicamente mais estáveis do que os comerciais. A qualidade do acabamento depende do meio desenvolvido.
Sankar (2011)	Borracha de estireno butadieno (SBS)	Abrasivo: SiC (concentração e malhas não citados) Caracterização: Propriedades Reológicas. As propriedades reológicas afetam a taxa de remoção e o acabamento superficial.

Fonte: Adaptado de Kumar e Hiremath (2016)

A utilização de substratos de carbeto de silício (SiC) na composição da pasta abrasiva, destaca-se por permitir elevadas taxas de remoção de material, produzindo resultados significativos (BAN et al., 2024). A escolha baseia-se na qualidade do material a ser usinado, quanto mais abrasiva for a partículas, ocasionará mais abrasão na superfície de trabalho, em que os abrasivos de carbeto de silício superam os abrasivos de óxido de alumínio quanto aos resultados da abrasão (KUMAR et al., 2022). Por pertencer ao grupo de materiais com alta dureza e ponto de ebulição resultante de ligações covalentes, o carbeto de silício (SiC) nomeado de materiais duros não-metálicos, sendo um dos mais importantes tipos de carbetos devido a suas propriedades tecnológicas (GOMES, 2022). Para que o processo tenha precisão e seja eficiente, os parâmetros controláveis precisam ser compreendidos e otimizados, classificam-se em três categorias distintas: parâmetros relacionados ao meio, parâmetros relacionados à máquina e os parâmetros relacionados à peça e ferramenta são demonstrados na Figura 10.



Fonte: Adaptado de Goyal et al. (2022)

Baseado nos autores da Figura 10, quanto aos parâmetros relacionados ao meio como a viscosidade, a temperatura e o abrasivo afetam o desempenho do processo de AFM. A seleção do tipo, tamanho e concentração das partículas abrasivas dependem do tipo de material utilizado e dos requisitos de acabamento. O tamanho das partículas pode variar entre 0,005 mm e 1,5 mm, sendo que o tamanho menor proporciona um melhor acabamento superficial e é acessível a furos menores, enquanto o maior corta mais rapidamente. Aumentando a concentração do abrasivo no meio, a remoção de material aumenta, enquanto o valor da rugosidade da

superfície torna-se menor. A viscosidade do meio diminuiu com o aumento da temperatura, ao ampliar a concentração de abrasivos este quadro é revertido, resultando em uma maior viscosidade que significa maior resistência. Verificou-se que a diferença pode ser de quase 300 vezes na capacidade de remoção de material dos meios menos viscosos aos meios mais viscosos.

Na segunda categoria, tratando-se da máquina, a pressão de extrusão está diretamente relacionada à estabilidade do movimento durante o processo, correlacionado com a taxa do fluxo abrasivo por unidade de tempo que influencia tanto na rugosidade da superfície quanto na remoção de material. O número que ciclos corresponde a um curso para a frente desde o ponto de partida e um curso para traz de volta ao ponto inicial, sendo fator importante na obtenção do acabamento superficial. Na última categoria relacionada à peça e à ferramenta, o tipo de processo que antecede ao processo de AFM ocorrido na peça de trabalho influencia diretamente nos resultados quanto à qualidade da superfície, os picos e vales podem apresentar variações na taxa de remoção. Quanto à dureza do material a ser usinado, materiais macios promovem uma taxa mais elevado de remoção, porém a qualidade do acabamento é inferior comparado aos materiais de maior dureza (GOYAL; SINGH; GOYAL; SINGH; SINGH, 2022). Ao compreender e otimizar esses três parâmetros, é possível alcançar um desempenho ideal do processo de acabamento, garantindo não apenas a eficácia na remoção de material, mas também a obtenção de acabamentos superficiais de alta qualidade.

Estudos tem recorrido a simulações numéricas para prever os fluxos de meios abrasivos, desenvolver modelos de remoção de material e otimizar os parâmetros operacionais, buscando alcançar uma remoção uniforme de material. Peng et al. (2024) complementam que a geometria do canal de fluxo tem influência na remoção de material durante AFM, podendo causar abrasão. É importante que o grão abrasivo cause um rápido e eficiente desgaste na superfície da peça a ser usinada, causando deformações microplásticas através das arestas dos grãos abrasivos, removendo material através da formação de micro cavacos. Vale ressaltar que duas propriedades são responsáveis pela efetivação do processo, a dureza do grão abrasivo que representa o seu poder de corte e a friabilidade, que expressa a tendência do grão em ser fraturado em menores pedaços melhorando o acabamento superficial da peça (SANCHEZ et al, 1999).

O mecanismo de remoção de material são as partículas abrasivas que causam impacto na superfície, ocasionando erosão. Esses grãos possuem arestas de corte aleatórios, cujo objetivo é penetrar na superfície a ser usinada, tendo como meio aditivo uma matriz polimérica. A movimentação dos grãos ocorre devido ao fluxo viscoso nos meios sob pressão de extrusão e estudos indicam que o alumínio e o latão são materiais de grande visibilidade neste processo. Quanto maior for o tempo de duração do processo, a interação entre os grãos abrasivos e a superfície do material tendem a aumentar o calor, em conjunto com o atrito, pode ocorrer alterações nas propriedades dos meios (ZHANG; CHEN; WANG, 2022).

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão apresentados a condução da montagem experimental, seguido um roteiro detalhado e sequencial que abrangeu as etapas para a realização dos experimentos. Uma vez definida a metodologia, na Figura 11 é apresentado uma sequência das principais etapas dos experimentos realizados.



Fonte: Autoria própria (2024)

Para a formulação apropriada da pasta abrasiva, foram considerados diversos aspectos, como a escolha dos componentes e a proporção adequada entre eles, visando atingir as propriedades desejadas na formulação. Para o sucesso desta etapa, contou com a parceria da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Londrina em que a confecção da pasta abrasiva e o processo de AFM foram realizados. Destacando a utilização de óleos de coco babaçu e moringa oleífera na composição da massa, o procedimento contemplou a seleção cuidadosa desses materiais, levando em consideração suas propriedades específicas e contribuições para as características finais do produto, contado com a parceria da Universidade Estadual do Rio Grande do Norte que forneceu os óleos vegetais. Nesse contexto, foram considerados aspectos primordiais como a escolha dos componentes e a proporção adequada entre eles, visando atingir as propriedades desejadas na formulação.

A etapa seguinte envolveu a determinação de materiais a serem utilizados durante todo processo experimental, garantindo a precisão e consistência em todas

as fases. Os materiais empregados para confecção dos corpos de prova e o processo de usinagem foram realizados em parceria com UniSENAIPR - Campus Londrina, assegurando uma execução de qualidade em cada um dos elementos que posteriormente foram analisados em parceria com o Instituto Senai de Inovação em Eletroquímica em Curitiba.

A fase central do procedimento incluiu o processo de usinagem por fluxo abrasivo (AFM), o equipamento utilizado garantiu as condições adequadas ao processo, algumas análises e medições necessárias para a execução dos experimentos, foram todos realizadas Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Londrina. Para conduzir o desenvolvimento deste estudo e o acompanhamento dos experimentos, destaca-se que o procedimento experimental teve uma abordagem abrangente, desde a concepção da formulação da pasta abrasiva até a análise estatística assegurando uma abordagem rigorosa para investigação proposta. Por fim, uma análise estatística detalhada foi conduzida sobre os dados obtidos no processo de AFM, proporcionando *insights* significativos para a interpretação e validação dos resultados.

3.1 Planejamento experimental

Os modelos matemáticos representam significância estatística, oferecendo uma compreensão dos fatores que influenciam no processo. A observação ativa de um procedimento ou sistema desempenha um importante papel na compreensão de seu funcionamento, permitindo o mapeamento de suas diversas variáveis (MONTGOMERY, 2012). Técnicas sistemáticas de planejamento de experimentos, orientam para atingir diversos objetivos como otimização de processos, redução de custos, maximização de produção, entre outros. Essa abordagem emerge como uma ferramenta valiosa na busca pela excelência e inovação em diversas áreas. Referências como Montgomery (2012), endossam a eficácia e a importância do planejamento de experimentos, possibilitando extrair a quantidade máxima de informações adequadas, de forma a reduzir o número de ensaios necessários. Portanto, pode-se diminuir os custos e tempo no processo, rendimento e qualidade, além de garantir que os erros experimentais sejam distribuídos de forma independente entre os fatores.

Neste estudo a Análise de Variância (ANOVA), apresenta-se como uma ferramenta relevante para interpretação de resultados em pesquisas laboratoriais. É

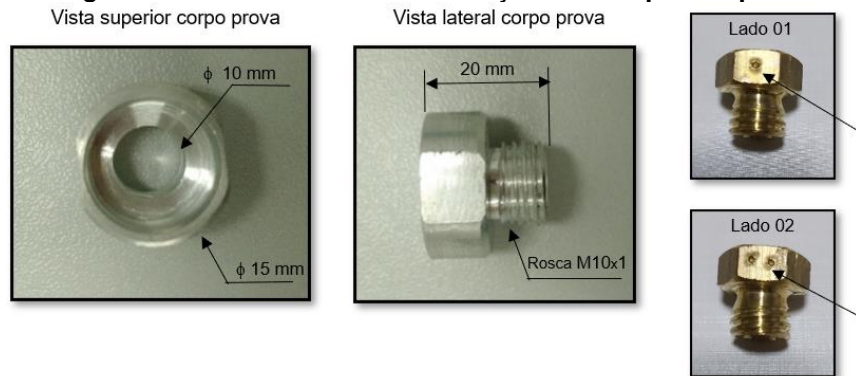
uma técnica estatística amplamente utilizada para comparar as médias de três ou mais grupos e determinar se há diferenças estatisticamente significativas entre eles. Baseia-se na decomposição da variabilidade total de um conjunto de dados em componentes atribuíveis a diferentes fontes de variação.

Seu principal objetivo é determinar se as médias diferem significativamente entre si, ao lidar com duas ou mais amostras, é possível por meio desta análise compreender a que se difere entre elas. Ao conduzir uma análise de variância, é estabelecido um valor alfa (α) de significância, comumente definido como 5% (0,05). Esse valor é fundamental para avaliar a probabilidade de observar variações entre as amostras. As hipóteses são formuladas em duas categorias, sendo H_0 quando não há diferenças significativas entre as médias das amostras, a outra seria H_1 , equivalente ao encontro de pelo menos uma das médias se diferir das demais amostras. Para determinar qual hipótese aceitar ou rejeitar, calcula-se o valor p, que indica a probabilidade de obter um resultado tão extremo quanto o observado, assumindo que a hipótese nula seja verdadeira.

Se o valor p for menor que o valor alfa (α), geralmente 0,05, rejeita-se a hipótese nula (H_0), indicando que há evidências estatísticas suficientes para afirmar que pelo menos uma das médias difere das demais. Se o valor de p for maior que α , não rejeita a hipótese nula, sugerindo que não há evidências suficientes para afirmar que as médias diferem significativamente (BORGES, 2014). A análise de variância desempenha um papel fundamental na pesquisa, permitindo tirar conclusões confiáveis sobre as diferenças entre as médias de diferentes populações amostrais.

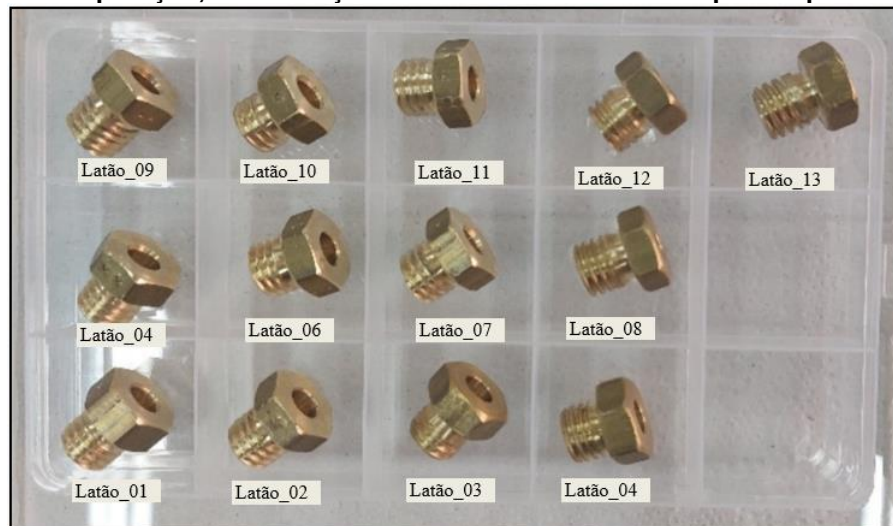
3.2 Corpos de prova

Para a realização dos experimentos, foram utilizados três materiais diferentes, sendo eles a liga de alumínio 6061-T6, aço SAE1045 e latão C-360 CLA no formato hexagonal conforme demonstrado na Figura 12. Visando uma maior homogeneidade na composição química e na microestrutura do material, o material de confecção dos corpos de prova foi adquirido pelo mesmo fornecedor, garantindo que cada um deles fossem do mesmo lote de fornecimento.

Figura 12 – Dimensões e identificação dos corpos de prova

Fonte: Autoria própria (2024)

O material foi submetido ao corte e usinagem, em um torno CNC ROMI Multiplic 30D, 3 fases com rotação máxima do eixo árvore de 4000 rpm no laboratório de metalmecânica da UniSENAIPR - Campus Londrina. As amostras foram confeccionadas nas dimensões padronizadas de 20 mm de altura e 15 mm de diâmetro, separadas por tipo de material e enumeradas na sequência de 1 a 13 (Figura 13, Figura 14 e Figura 15) e armazenadas em caixas transparentes com divisórias. Cada uma das peças, foram marcadas com um punção de forma a identificar lado 1 e lado 2 da peça.

Figura 13 – Separação, identificação e armazenamento dos corpos de prova de Latão

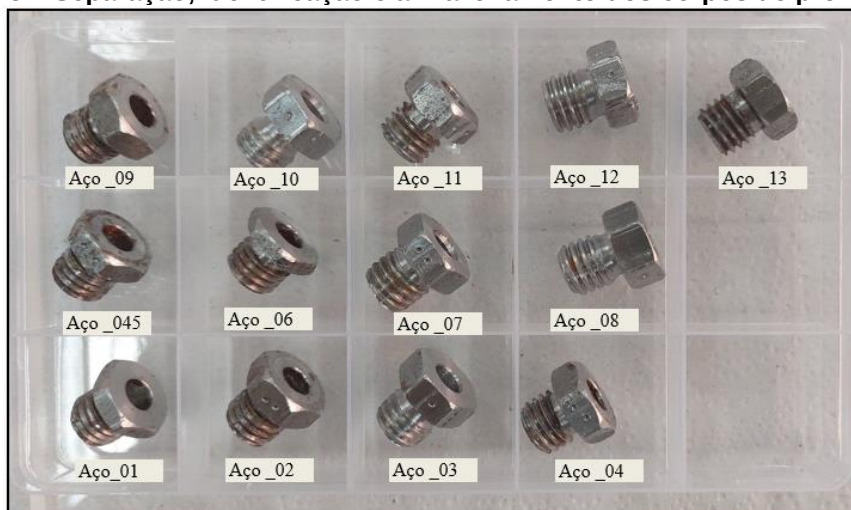
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 14 – Separação, identificação e armazenamento dos corpos de prova de Alumínio



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 15 – Separação, identificação e armazenamento dos corpos de prova de Aço



Fonte: Autoria própria (2024)

Cada um dos materiais, foram organizados de forma individual, permitindo uma organização dos corpos de prova de forma sequencial numérica de 01 a 13. A caixa organizadora possui tampa, ajudando a preservar os corpos de prova limpos, além de permitir uma identificar o lado (1 ou 2) de cada peça, sendo estas regiões foco da investigação antes e após o processo de usinagem por fluxo abrasivo.

3.3 Óleos vegetais de coco babaçu e moringa oleífera

Uma parceria firmada entre a Universidade Estadual do Rio Grande do Norte que realiza estudos sobre a diversidade dos óleos vegetais com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, tem sido fundamental para avanços significativos no estudo das aplicações desses óleos. Foram fornecidas amostras preciosas de óleo

moringa oleífera, permitindo o desenvolvimento experimental na formulação da pasta. O óleo de Babaçu foi adquirido pelo fornecedor Babaçu Nativo, produzido com todos os padrões de higiene e controle de qualidade (Figura 16).

Figura 16 – Óleos vegetais de babaçu e moringa oleífera

Óleo de Babaçu



Óleo de Moringa



Fonte: Autoria própria (2024)

Os dois tipos de óleos vegetais foram escolhidos com o objetivo de verificar o seu comportamento mediante ao processo de usinagem por fluxo abrasivo em três tipos diferentes de materiais. Por se tratar de uma composição de uma pasta abrasiva de baixo custo e o potencial das propriedades contidas nesses óleos, almeja-se alcançar contribuições significativas para área de metalmecânica. O óleo de moringa oleífera passou por um processo de peneiramento e filtragem, para retirada de impurezas. Na etapa do peneiramento (Figura 17), utilizou-se uma peneira para análise granulométrica, ASTM 35 com abertura de 50 μ m de inox, 32 mesh da marca Bertel. Para auxiliar no processo, utilizou um backer e uma bandeja plástica tamanho médio.

Figura 17 – Aparatos utilizados no peneiramento



Fonte: Autoria própria (2024)

O processo de filtragem óleo de moringa oleífera, foi utilizado Papel Filtro Qualitativo 80 g com alta capacidade de retenção de partículas. Para a filtração a vácuo do óleo foi utilizado um Funil de Buchner em Porcelana com diâmetro de 90 mm e um Kitasso com saída superior, conforme mostrado na Figura 18.

Figura 18 – Processo de filtragem do óleo de Moringa Oleífera
Aparato experimental Funil e Filtro



Fonte: Autoria própria (2024)

O processo foi desenvolvido com auxílio de uma bomba a vácuo TE-058 da marca Tecnal, conectada ao frasco de Kitassato, criando um diferencial de pressão no sistema. O vácuo gerado acelera o processo de filtração, forçando o óleo a passar pelo filtro mais rapidamente e com eficiência. O óleo de coco de Babaçu, é natural que ele solidifique em temperatura inferior a 25 °C, por este motivo foi submetido ao banho maria, modelo BMC-10 da marca Centauro (Figura 19).

Figura 19 – Processo de banho maria ao qual o óleo de babaçu foi submetido



Fonte: Autoria própria (2024)

3.4 Confeção da pasta abrasiva

O processo de AFM, é uma tecnologia de fabricação desenvolvida para atender às necessidades da usinagem de precisão, em componentes com geometrias

complexas e áreas inacessíveis, no qual os processos convencionais não podem ser usados devido as suas limitações. A ferramenta de trabalho consiste em um meio carregado de abrasivos (semi-sólido), proporcionando um impacto mecânico dos parciais abrasivos com a peça de trabalho removendo material. Através do polimento químico por fricção, obtém-se taxas de remoção de material, que incorpora materiais inorgânicos com alta dureza para proporcionar a ação de polimento, geralmente utilizam-se substâncias como carbeto de silício (SiC), óxido de alumínio (Al_2O_3) ou carbonato de cálcio (CaCO_3). Neste estudo, buscando uma alternativa sustentável para confecção de uma pasta abrasiva, como meio natural foi utilizado o óleo de Coco de Babaçu e óleo de Moringa Oleífera, como abrasivo na formulação da pasta o SiC devido as suas excelentes propriedades, elevada dureza e por ser um material acessível e utilizado em vários estudos.

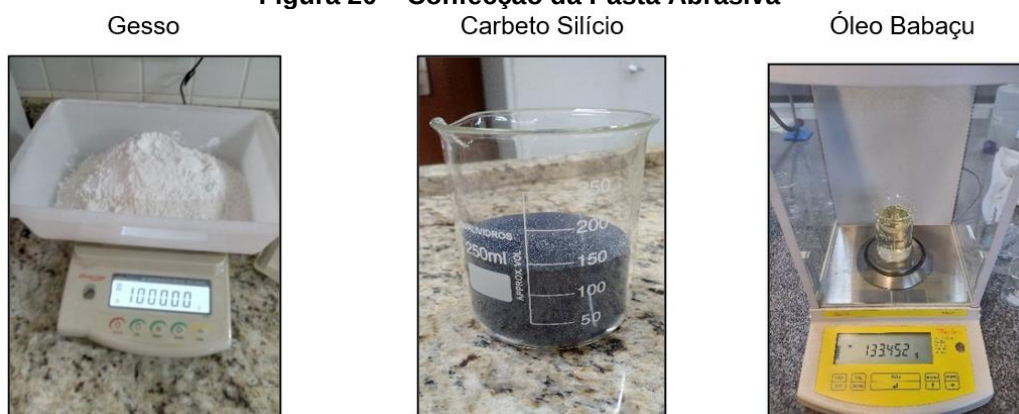
Para que haja a formação de uma película lubrificante, o óleo precisa de duas propriedades essenciais que são coesividade e adesividade, o óleo de babaçu tem a propriedade de adesividade e o de moringa tem a função de coesividade. A pasta abrasiva foi confeccionada com óleo vegetal de babaçu em maior quantidade, já o óleo de moringa teve por objetivo contribuir para a homogeneidade da composição. Os principais componentes na composição da pasta abrasiva estão apresentados na Tabela 1, para reduzir a viscosidade da mistura foi utilizado o gesso, carbeto de silício e óleo de babaçu.

Tabela 1 - Composição Pasta Abrasiva

Material	Quantidade (g)	Proporção (% em massa)
Gesso	1000	55,56%
Óleo de coco de babaçu	410,54	22,81%
Óleo de moringa oleífera	28,84	1,6%
Carbeto de silício – malha 100	360,38	20,02%

Fonte: Autoria própria (2024)

O gesso teve como função principal na formulação da pasta proporcionar plasticidade, contribuindo também para a estabilidade volumétrica. A concentração do carbeto de silício foi de 20,02% em relação a massa final da mistura, a viscosidade resultante da massa está condicionada a quantidade de abrasivo, dos óleos utilizados e da temperatura ambiente além de outros fatores químicos. Na Figura 20 são demonstrados os três principais elementos para confecção da pasta.

Figura 20 – Confeção da Pasta Abrasiva

Fonte: Autoria própria (2024)

Os óleos vegetais e o carbeto de silício foram pesados de forma fracionária em uma balança analítica de capacidade de 220 g e precisão de 0,1 g modelo AW220. Os componentes foram colocados em uma bandeja de plástico, misturados com o auxílio de uma colher e manualmente, obedecendo a sequência mostrado na Figura 21.

Figura 21 – Sequência da mistura dos componentes da Pasta Abrasiva

Etapa 1 - Adição do Gesso



Etapa 2 - Adição Óleo Babaçu



Etapa 3 - Mistura



Etapa 4 – Adição Carbetto Silício/Óleo Moringa



Fonte: Autoria própria (2024)

O primeiro elemento adicionado foi o gesso, a segunda etapa consistiu na adição do óleo vegetal de babaçu de forma fracionária e misturado com auxílio de uma colher. Na sequência, foi adicionado o carbeto de silício e óleo de moringa oleífera, nesta etapa a mistura foi realizada de forma manual que possibilitou a adição dos componentes até chegar na consistência adequada da pasta. A pasta foi

armazenada em Backer, para não haver contaminação com impurezas foi lacrado com plástico filme. Ensaios preliminares foram realizados com o objetivo de obter uma pasta abrasiva homogênea em corpos de prova semelhantes aos do experimento, com uma consistência leve facilitando seu manuseio. A formulação foi misturada cuidadosamente, de forma que o polímero viscoelástico que atua como um meio transportador, reforçado com as partículas de abrasivas para que desempenhem suas funções, garantindo a eficiência no processo de AFM. Vale ressaltar que as pastas comercialmente disponíveis são limitadas, disponíveis pela empresa Extrude Hone Corporation e Kennametals e apresentam um custo elevado.

Dentre as pastas poliméricas utilizadas, destacam-se o poliborosiloxano e a borracha de silicone destacando-se por suas propriedades viscoelásticas ideais para o transporte eficiente da pasta abrasiva. Quanto aos abrasivos empregados, os carbeto de silício, óxido de alumínio, carbeto de boro e diamante policristalino são comumente utilizados, cada um apresentando características únicas que se adequam a diferentes aplicações. Muitos esforços vêm sendo dedicados ao desenvolvimento de pastas abrasivas para o processo de AFM.

3.5 Procedimentos relacionados às amostras

3.5.1 Aferição das massas

A análise das massas possibilita a verificação da perda de massa após o processo de usinagem, o processo foi feito em ambiente adequado. A aferição das massas foi realizada em uma balança analítica da marca Bel Engineering Mark, modelo M214A com resolução de 0,0001 g. As amostras foram aferidas antes e após a usinagem por fluxo abrasivo, sob as condições de temperatura e umidade relativa do ar controladas. A estimativa da quantidade de material removido (RM) em cada peça revela-se necessário para avaliar com precisão o processo de usinagem balança de precisão, na Figura 22 é demonstrado a etapa de pesagem das amostras. Essa etapa consiste na mensuração da diferença entre as massas da peça antes e após a conclusão da AFM, a quantidade de material removido não apenas contribui para a eficácia operacional, mas também na qualidade do produto.

Figura 22 – Pesagem das Amostras

Fonte: Autoria própria (2024)

3.5.2 Rugosidade superficial

A rugosidade superficial dos corpos de prova, foi realizada conforme as normas DIN 6581, DIN 6582 e ISO 3002 e o *cut-off* utilizado nas medições de 0,8 mm. A Figura 23 mostra o equipamento utilizado, rugosímetro Surftest SJ-201p da marca Mitutoyo, tendo como característica a medição indutiva diferencial e capacidade de 350 μm , atendendo a Norma NBR ISO 4287/2002. A rugosidade foi avaliada antes e após a AFM, tendo como foco duas regiões internas identificadas como lado um (I) e lado dois (II) e os parâmetros investigados foram rugosidade média (R_a), rugosidade média quadrática (R_q) e altura média do perfil (R_z).

Figura 23 – Medição da rugosidade superficial

Fonte: Autoria própria (2024)

3.5.3 Análise dos dados

Os dados obtidos foram tabulados e analisados por meio de um programa estatístico. Inicialmente, os dados foram testados quanto a sua normalidade e homogeneidade e, então, submetidos ao teste de Análise de Variância para medidas repetidas (ANOVA), comparando os efeitos de diferentes variáveis, como os materiais utilizados (aço, alumínio e latão) e o número de ciclos de usinagem por fluxo abrasivo

(20, 60 e 120), nas propriedades das peças usinadas. As interações entre os grupos foram analisadas pelo Teste de Tukey com nível de significância de 5%.

3.5.4 Microscopia óptica

As amostras foram analisadas em duas regiões internas identificadas como lado um (I) e lado dois (II), na Figura 22 é mostrado o microscópio óptico da marca ZEISS, modelo AXIO IMAGER acoplado a um computador e a uma câmera digital AXIO CAM MPC ZEISS, o *software* de análise e captura de imagens AXIO VISIO – ZEISS.

Figura 24 – Microscópio óptico



Fonte: Zeiss (2024)

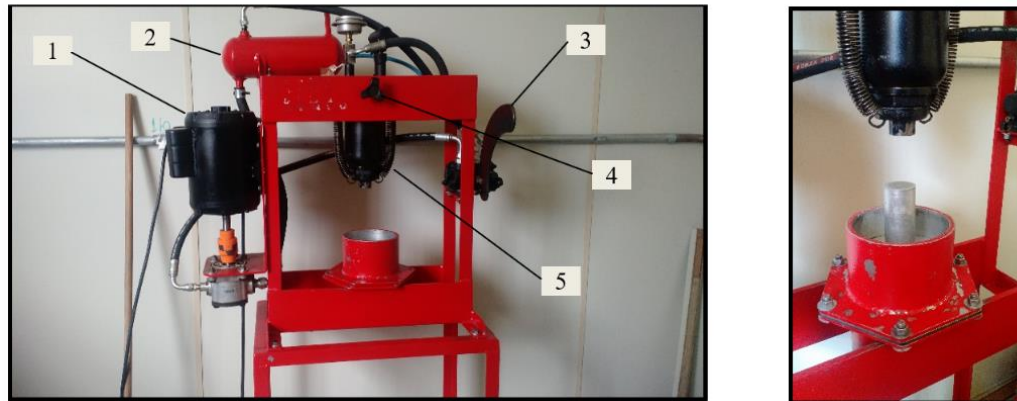
A microscopia óptica foi realizada em duas etapas, ou seja, antes da AFM para verificação do estado superficial interno do furo e após a AFM para analisar as alterações ocorridas na superfície das amostras após a AFM. Essa etapa foi realizada no Laboratório de Imagens do Instituto Senai de Inovação em Eletroquímica em Curitiba. As amostras não foram submetidas a nenhum tipo de corte e embutimento, também não foram caracterizadas com ataque químico.

3.6 Usinagem por Fluxo Abrasivo (*Abrasive Flow Machining – AFM*)

O processo de usinagem por fluxo abrasivo foi realizado com uma máquina cedida pela UTFPR - Campus Londrina. O equipamento é composto por um pistão hidráulico a uma pressão de 50 bar, o processo é realizado com o movimento de compressão em que a pasta abrasiva é comprimida para baixo no interior de um cilindro contendo as peças fixadas para usinagem. A Figura 25 mostra o equipamento utilizado na usinagem por fluxo abrasivo, através do movimento de compressão, pasta

abrasiva ao ser forçada a passar pelo diâmetro interno das peças, realizando o desgaste superficial.

Figura 25 – Aparato experimental para execução dos ensaios de AFM: conjunto motor e bomba (1); reservatório de óleo (2); regulador de pressão (4); alavanca de acionamento do pistão (5)
Máquina de Fluxo Abrasivo Vista ampliada Pistão e base

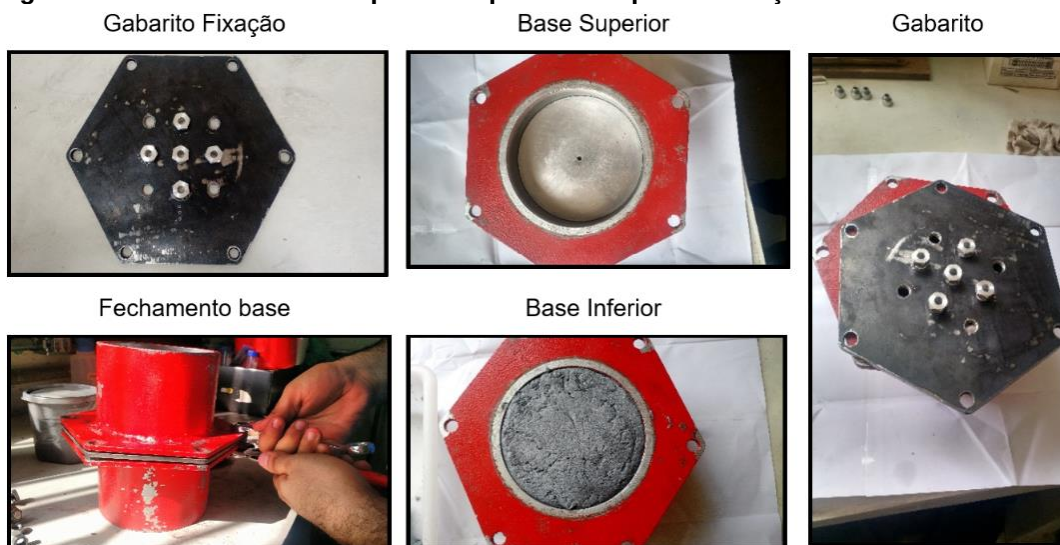


Fonte: Autoria própria (2024)

O processo é iniciado ao acionar a alavanca, isso ocorre quando o cilindro está alinhado com o pistão hidráulico. O percurso é linear e tem 25 mm, ao realizar a primeira passagem da pasta abrasiva nas peças a serem usinadas, os cilindros são invertidos manualmente. Com o cilindro invertido completa-se novamente o percurso de 25 mm e sucessivamente esta combinação de movimentos compõe o ciclo de Usinagem por Fluxo Abrasivo (AFM).

O equipamento é composto por conjunto motor e bomba (1), reservatório de óleo (2), regulador de pressão (4) e uma alavanca de acionamento do pistão (5). As amostras foram fixadas em um gabarito e posicionadas na base móvel composta por duas partes (superior e inferior), o ciclo do processo de Usinagem por Fluxo Abrasivo é dado pela combinação do movimento desta base. Ao término da usinagem, as peças são retiradas do equipamento, seguindo do processo de limpeza.

Os principais subsistemas do equipamento são constituídos por gabarito, base superior e inferior, respectivamente apresentados na Figura 26.

Figura 26 – Subsistemas do aparato experimental para execução dos ensaios de AFM

Fonte: Autoria própria (2024)

O cilindro da base móvel tem um percurso de 25 mm, o pistão quando acionado exerce uma força sobre o cilindro que força a passagem da pasta abrasiva nas peças de forma a usiná-las. A usinagem ocorre na região do furo interno das amostras que estão fixadas no gabarito, a combinação de movimentos de compressão equivale a um ciclo no processo de usinagem por fluxo abrasivo. A usinagem foi planejada com base na numeração sequencial das amostras e o número de ciclos conforme demonstrado no Quadro 5.

Quadro 5 – Planejamento da usinagem por fluxo abrasivo de acordo com cada corpo de provas

Material	Corpos de prova	Número de ciclos
Aço, alumínio e latão	1 a 5	20
	6 a 9	60
	10 a 13	120

Fonte: Autoria própria (2024)

Cada tipo de material foi submetido a AFM obedecendo a numeração das amostras e a quantidade de ciclos. Após a fabricação das peças (amostras), foram submetidas a usinagem por fluxo abrasivo sem ter passado por qualquer tipo de limpeza.

3.6.1 Limpeza das amostras

Após o processo de usinagem, um grande excesso de pasta abrasiva fica nas amostras, a limpeza consistiu em várias etapas demonstradas na Figura 27 – Inicialmente o excesso foi retirado com o auxílio de uma pá de madeira, na sequência utilizou um papel toalha retirando um pouco mais.

Figura 27 – Abertura Cilindro com as Amostras e remoção inicial da pasta abrasiva



Fonte: Autoria própria (2024)

As peças foram retiradas do gabarito com o auxílio de um papel toalha, mais uma vez foi utilizado o papel toalha para retirar excesso contido nos corpos de prova. Na Figura 28 os materiais utilizados no processo de limpeza foram selecionados visando um melhor resultado.

Figura 28 – Materiais e limpeza das amostras

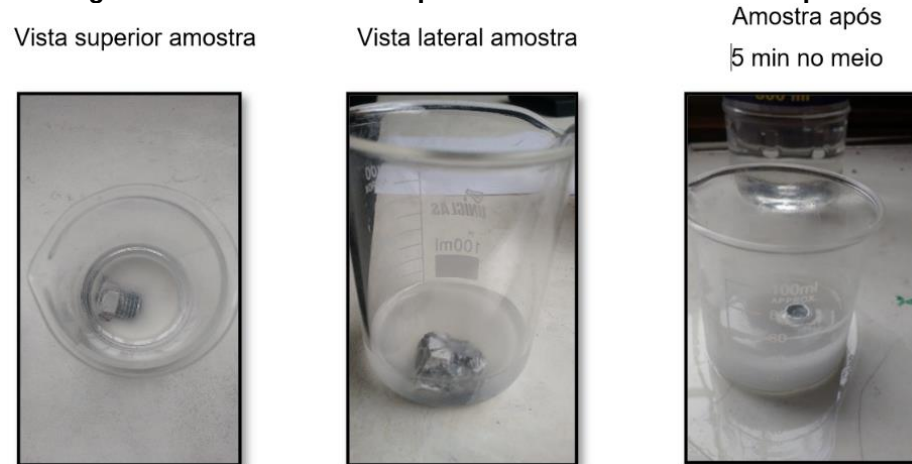


Fonte: Autoria própria (2024)

Na Figura 29 é mostrado as etapas sequenciais da limpeza das amostras, consistindo em mergulhar as amostras em copos de becker (Figura 27) contento

querosene, permanecendo por 5 minutos e durante esse tempo as amostras foram movimentadas com o auxílio de um bastão de vidro, ajudando no desprendimento da pasta abrasiva contida na peça usinada.

Figura 29 – Processo de limpeza das amostras em meio líquido



Fonte: Autoria própria (2024)

Com o auxílio de uma pinça as amostras foram retiradas do copo de becker e colocadas em uma toalha de tecido para escoamento superficial do querosene. Como etapa final internamente as amostras foram limpas com cotonetes e externamente após estarem secas foram novamente escovadas com a escova de cerdas mais grossas, retirando resíduos finais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo os resultados experimentais obtidos a partir dos ensaios de usinagem por fluxo abrasivo (AFM) serão apresentados. Nesse sentido, optamos por demonstrar os resultados de rugosidade para os diferentes materiais primeiro, seguido da análise do comportamento das massas e, por fim, os estudos relacionados às imagens de superfície.

4.1 Rugosidade superficial

No que diz respeito aos resultados de rugosidade superficial, primeiramente foi feita a verificação dos resultados de rugosidade brutos, sendo a rugosidade média (R_a), rugosidade média quadrática (R_q) e altura média do perfil (R_z). Assim, é possível afirmar, que para as condições testadas, os três parâmetros de rugosidade possuem o mesmo padrão de comportamento e, por isso, foi selecionado o parâmetro mais amplamente utilizado em usinagem, a rugosidade média (R_a). Contudo, os valores de rugosidade antes e após os ciclos aplicados não demonstram os resultados de forma clara e adotou-se outro critério.

O critério adotado foi a variação de rugosidade R_a , que é mais adequado para o presente estudo. Afinal, esse parâmetro mede as variações de rugosidade advindas da AFM. O cálculo foi realizado subtraindo a rugosidade final da rugosidade inicial ($\Delta R_a = R_{a_{final}} - R_{a_{inicial}}$) em cada uma das amostras testadas, sendo a rugosidade inicial aquela gerada pelo processo de preparação do corpo de provas por usinagem convencional e a rugosidade final aquela após a AFM.

Inicialmente houve a preocupação de que o processo de AFM apresentasse alguma variação que viesse a afetar a rugosidade em diferentes pontos do corpo de prova padrão (por exemplo, variação de viscosidade ou concentração de abrasivos). Por isso, estabeleceu-se o lado 1 e lado 2 nas amostras, permitindo o controle da medição de rugosidade nessas duas regiões. Logo, os resultados de rugosidade demonstram que não há diferença significativa entre o lado 1 e o lado 2, independentemente do número de ciclos e do material testado. Portanto, todos os dados puderam ser utilizados nas análises seguintes e esse teste simples é um dos demonstrativos da eficácia do processo de AFM. Tais resultados podem ser comprovados nas Tabela 2, Tabela 4 e Tabela 6, em que os valores-p da ANOVA são superiores a 0,05 e nas Figura 30, Figura 32 e Figura 34, em que são apresentadas a

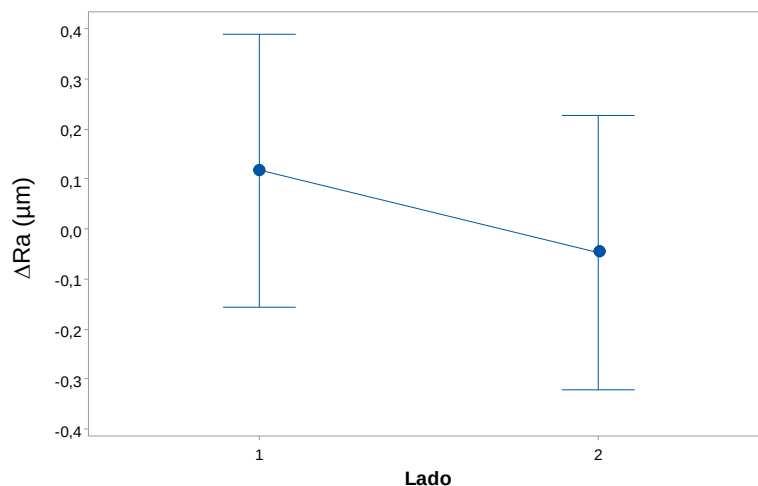
variação de rugosidade média (ΔRa) para os três materiais testados neste trabalho, o aço, o alumínio e o latão a partir de medidas de rugosidade superficial no lado 1 e no lado 2 da amostra.

Tabela 2 – Tabela ANOVA para a influência do lado de medida na variação de rugosidade média (ΔRa) para o aço (intervalo de confiança de 95%)

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Lado	1	0,1761	0,1761	0,77	0,389
Erro	24	5,4993	0,2291		
Total	25	5,6754			

Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 30 – Variação de rugosidade média (ΔRa) para o lado 1 e 2, medidos nas amostras de aço (intervalo de confiança de 95%)



Fonte: Autoria própria (2024)

O aço foi o único material a apresentar diferença significativa ao se analisar os níveis de números de ciclo (20, 60 e 120), como pode ser visto na Tabela 3 (ANOVA), cujo valor-p foi de 0,007 e na Figura 31. Os resultados apresentados na Figura 31 demonstram que o processo de AFM foi capaz de melhorar o acabamento superficial, ao se aumentar o número de ciclos de 20 para 60 e que nível de melhoria foi mantido com 120 ciclos, mas sem melhoria entre os níveis de 60 e 120 ciclos. Entretanto, um olhar mais acurado sob os resultados, nos mostra que com 20 ciclos a rugosidade Ra aumenta, caracterizado pela variação positiva de Ra, enquanto para

60 e 120 ciclos há uma variação negativa de Ra, indicando a melhoria do acabamento superficial promovida pela AFM.

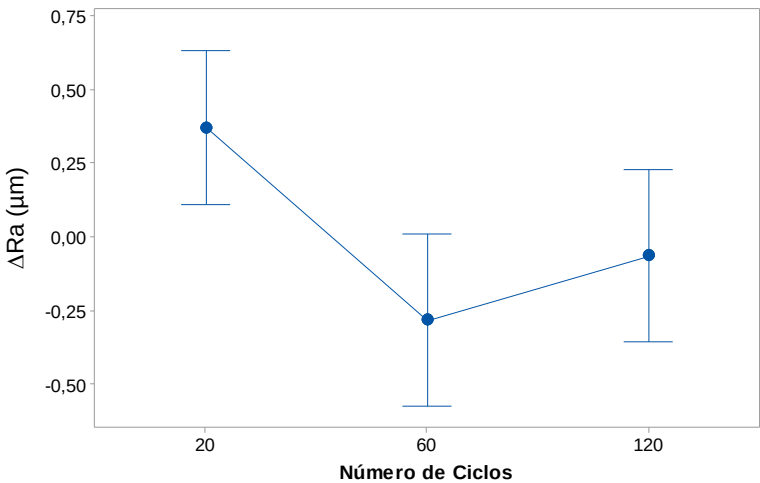
Tendo em vista as características do aço, o mais duro e resistente dentre os materiais testados é possível afirmar que para menos ciclos, o processo foi incapaz de fazer com que a massa abrasiva interagisse de forma satisfatória com a superfície que estava sendo usinada. Assim sendo, a usinagem provocou a piora do acabamento superficial. Contudo, resultados de variação de massa para o aço (Figura 36) e apresentados posteriormente nos indicam que houve usinagem, já que o material perdeu massa em todas as condições testadas (20, 60 e 120 ciclos).

Tabela 3 – Tabela ANOVA para a influência dos ciclos na variação de rugosidade média (ΔRa) para o aço (intervalo de confiança de 95%)

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Ciclos	2	1,995	0,9977	6,24	0,007
Erro	23	3,680	0,1600		
Total	25	5,675			

Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 31 – Variação de rugosidade média (ΔRa) para o aço, considerando o número de ciclos de AFM (intervalo de confiança de 95%)



Fonte: Autoria própria (2024)

Para o alumínio é possível afirmar que o número de ciclos não afeta significativamente a variação de rugosidade média (ΔRa), conforme Tabela 5 (valor-p de 0,371) e Figura 33. No entanto, a observação da Figura 33 nos mostra que para 20 ciclos houve a tendência de melhora da qualidade superficial, o que não aconteceu

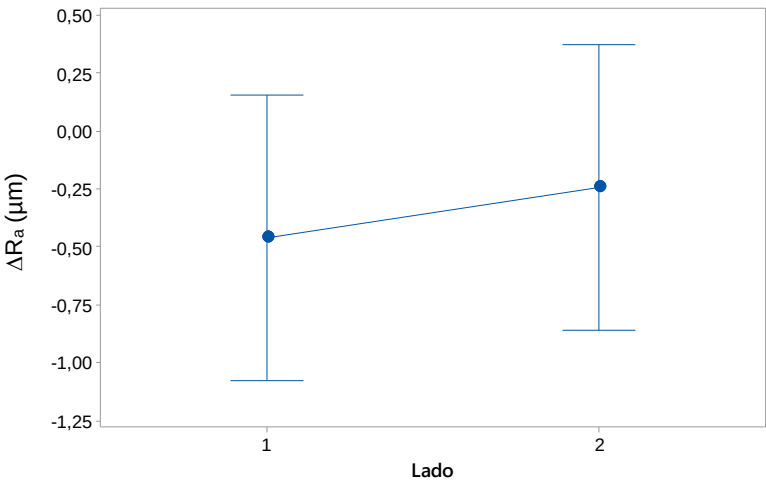
para 60 e 120 ciclos. Cabe ressaltar que o alumínio é o material mais dúctil dentre os materiais testados, com tendência ao empastamento e adesão de material em sua superfície. Nesse sentido, há o indicativo de adesão de material na superfície dos corpos de prova nos resultados de variação de massa (Δ massa), apresentados na Figura 37, uma vez que houve aumento de massa para todos os ciclos testados no alumínio, o que será discutido mais à frente neste trabalho.

Tabela 4 – Tabela ANOVA para a influência do lado de medida na variação de rugosidade média (ΔR_a) para o alumínio (intervalo de confiança de 95%)

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Lado	1	0,3080	0,3080	0,26	0,612
Erro	24	27,9385	1,1641		
Total	25	28,2465			

Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 32 – Variação de rugosidade média (ΔR_a) para o lado 1 e 2, medidos nas amostras de alumínio (intervalo de confiança de 95%)



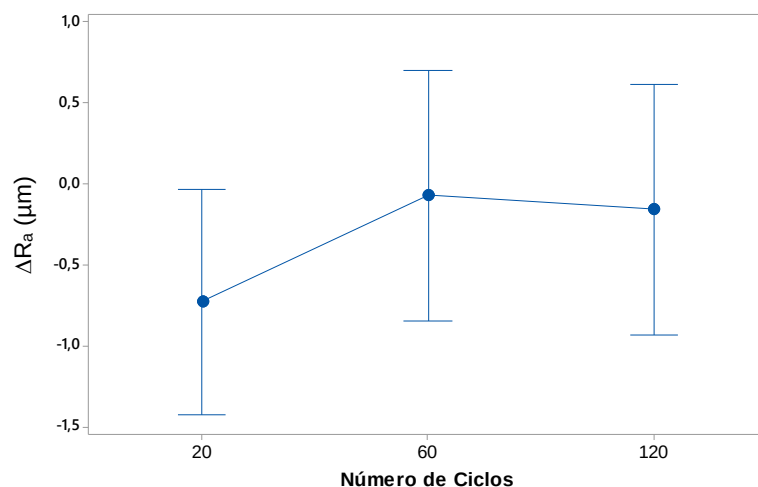
Fonte: Autoria própria (2024)

Tabela 5 – Tabela ANOVA para a influência dos ciclos na variação de rugosidade média (ΔR_a) para o alumínio (intervalo de confiança de 95%)

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Ciclos	2	2,332	1,166	1,03	0,371
Erro	23	25,915	1,127		
Total	25	28,246			

Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 33 – Variação de rugosidade média (ΔR_a) para o alumínio, considerando o número de ciclos de AFM (intervalo de confiança de 95%)



Fonte: Autoria própria (2024)

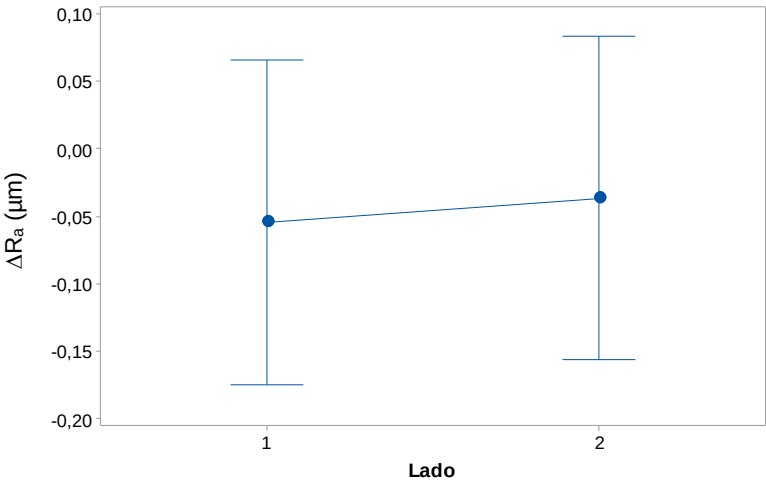
O latão apresentou comportamento semelhante ao do alumínio, após os ensaios de AFM, com valor-p de 0,086 (Tabela 7) na ANOVA, resultando em uma variação não significativa entre o número de ciclos (20, 60, 120). Contudo, conforme pode ser observado na Figura 35, para 20 ciclos houve uma tendência de melhora no acabamento superficial, enquanto para 60 e 120 ciclos essa tendência não se confirmou, resultando em piora no acabamento superficial. Nesse caso específico, o comportamento da massa para o latão (Figura 38) é diferente ao do alumínio, pois em todos os níveis de número de ciclos, ocorreu a redução da massa da amostra. Portanto, o processo de AFM foi capaz de retirar material da superfície, mas essa retirada de material não resultou em melhoria do acabamento superficial necessariamente.

Tabela 6 – Tabela ANOVA para a influência do lado de medida na variação de rugosidade média (ΔR_a) para o latão (intervalo de confiança de 95%)

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Lado	1	0,00203	0,002035	0,05	0,831
Erro	24	1,04760	0,043650		
Total	25	1,04963			

Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 34 – Variação de rugosidade média (ΔR_a) para o lado 1 e 2, medidos nas amostras de latão (intervalo de confiança de 95%)



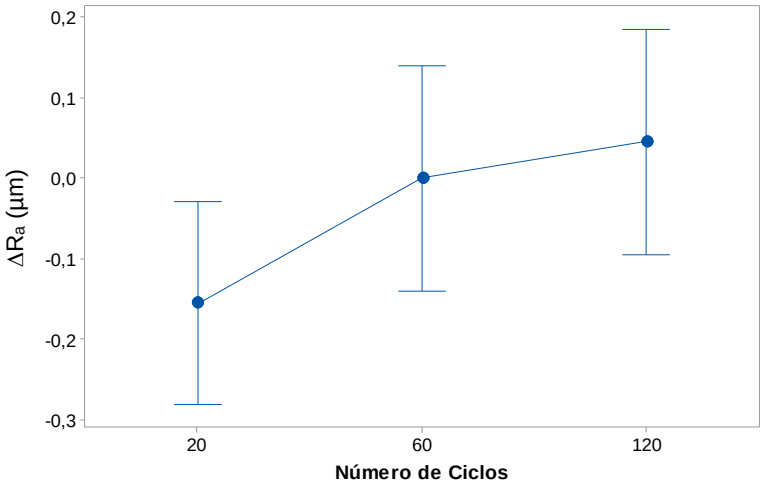
Fonte: Autoria própria (2024)

Tabela 7 – Tabela ANOVA para a influência dos ciclos na variação de rugosidade média (ΔR_a) para o latão (intervalo de confiança de 95%)

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Ciclos	2	0,2020	0,10099	2,74	0,086
Erro	23	0,8476	0,03685		
Total	25	1,0496			

Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 35 – Variação de rugosidade média (ΔR_a) para o latão, considerando o número de ciclos de AFM (intervalo de confiança de 95%)



Fonte: Autoria própria (2024)

4.2 Variação de massa

No que diz respeito à massa, o aço é único dos materiais que apresentou diferença na variação de massa ($\Delta massa = massa_{final} - massa_{inicial}$) entre os diferentes níveis do número de ciclos, com valor-p de 0,002 (Tabela 8). Consequentemente, ocorreu uma redução de massa à medida em que o número de ciclos foi aumentando (Figura 36). Já para o alumínio e o latão não houve diferença significativa entre os diferentes números de ciclos, sendo o valor-p de 0,413 (Tabela 9) para o alumínio e 0,882 (Tabela 10) para o latão.

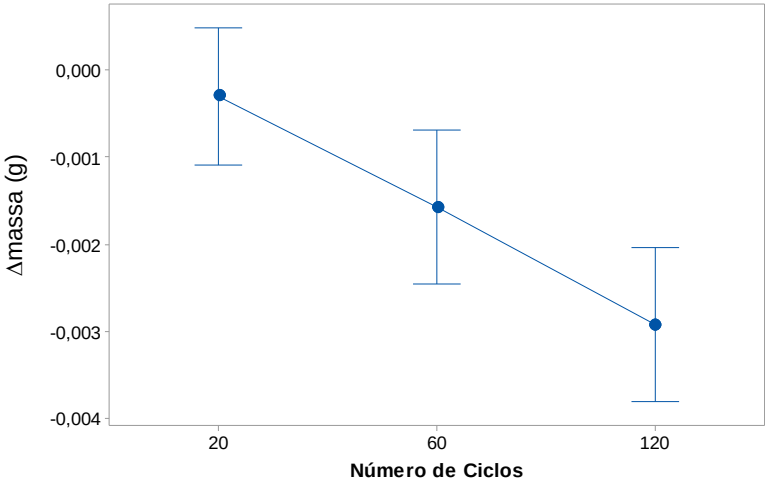
Houve três comportamentos distintos dos valores de massa, além da análise estatística. No caso do aço, o material foi perdendo massa à medida em que o número de ciclos aumentou (Figura 36). Contudo, o mesmo não ocorreu com o alumínio (Figura 37), que possuiu tendência leve de variação positiva de massa em 20 e 60 ciclos e tendência de aumento maior de massa para 120 ciclos. Já o latão (Figura 38) perdeu massa para todos os números de ciclos, apesar de não haver diferença entre eles, ou seja, o aumento do número de ciclos não implicou em aumento de variação de massa. Apesar disso, se avaliássemos o antes e depois da AFM para o latão teríamos que há diferença de massa para todas as situações, sendo que, apenas 20 ciclos já seriam suficientes para o latão, supondo que a qualidade superficial dos corpos de prova tivessem sido atingida.

Tabela 8 – Tabela ANOVA para a influência dos ciclos na variação de massa ($\Delta massa$) para o aço (intervalo de confiança de 95%)

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Ciclos	2	0,000015	0,000008	12,11	0,002
Erro	10	0,000006	0,000001		
Total	12	0,000022			

Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 36 – Variação de massa (Δ massa) para o aço, considerando o número de ciclos de AFM (intervalo de confiança de 95%)



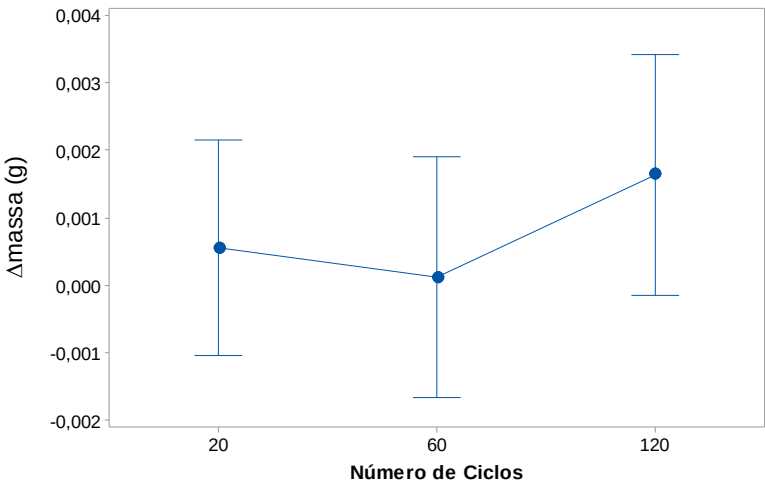
Fonte: Autoria própria (2024)

Tabela 9 – Tabela ANOVA para a influência dos ciclos na variação de massa (Δ massa) para o alumínio (intervalo de confiança de 95%)

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Ciclos	2	0,000005	0,000002	0,97	0,413
Erro	10	0,000026	0,000003		
Total	12	0,000031			

Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 37 – Variação de massa (Δ massa) para o alumínio, considerando o número de ciclos de AFM (intervalo de confiança de 95%)



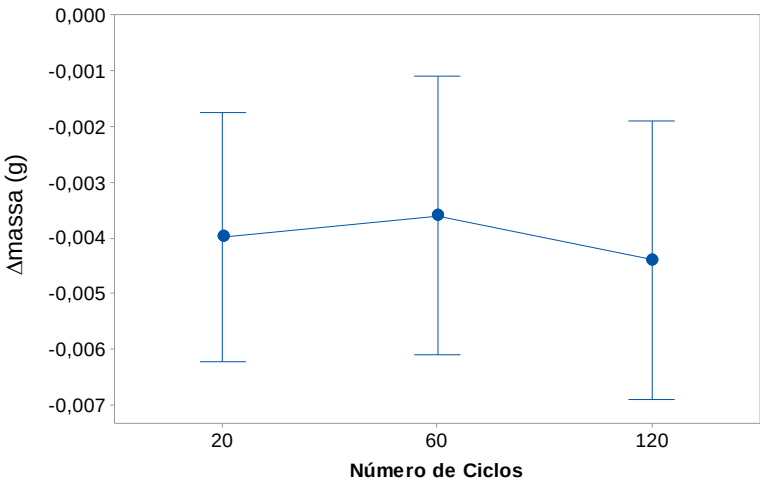
Fonte: Autoria própria (2024)

Tabela 10 – Tabela ANOVA para a influência dos ciclos na variação de massa (Δ massa) para o latão (intervalo de confiança de 95%)

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Ciclos	2	0,000001	0,000001	0,13	0,882
Erro	10	0,000050	0,000005		
Total	12	0,000052			

Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 38 – Variação de massa (Δ massa) para o latão, considerando o número de ciclos de AFM (intervalo de confiança de 95%)



Fonte: Autoria própria (2024)

4.3 Discussão e análise microscópica

Quando submetidos ao processo de usinagem por abrasão, como na usinagem por fluxo abrasivo (AFM), o aço SAE 1045, o alumínio 6061-T6 e o latão C-360 CLA apresentam comportamentos distintos devido às suas propriedades mecânicas, resistência à abrasão e dureza.

Os três materiais testados neste estudo possuem dureza, limite de escoamento, limite de resistência à tração, ductilidade e outras propriedades mecânicas bastante distintas. Nesse sentido, é amplamente conhecido que a usinabilidade do aço SAE 1045 é a pior delas e que tanto o alumínio 6061-T6, quanto o latão C-360 CLA possuem alta usinabilidade. No entanto, isso não quer dizer que a usinagem desses materiais possa ser tarefa simples em todas as condições e para todo o tipo de processo. De fato, os resultados demonstram isso, pois o aço foi o único material que teve seu acabamento superficial melhorado.

O aço possui maior dureza em comparação ao alumínio e o latão, isso implica em maior resistência ao desgaste abrasivo e faz com que o aço seja menos suscetível a remoções significativas de massa, quando comparado a materiais mais macios como o latão e o alumínio. Esse fato pode ser observado nos resultados de variação de massa do aço (Figura 36) e do latão (Figura 38), em que o latão apresenta uma perda de massa muito maior que o aço para 20 ciclos. Em contrapartida, no aço, a perda de massa também ocorre em 60 e 120 ciclos.

Naturalmente, espera-se que a taxa de remoção em materiais mais duros seja menor sob as mesmas condições, necessitando de um número maior de ciclos e uma pasta abrasiva mais agressiva para se obter acabamentos significativos. Logo, a quantidade de ciclos necessários para AFM é maior para aço e é reduzida no alumínio e no latão, justamente pelas propriedades dos materiais. Os resultados apresentados confirmam esse comportamento, pois o aço teve o acabamento superficial melhorado com o aumento do número de ciclos, mas isso não ocorreu para o alumínio ou o latão, cujo acabamento superficial teve até tendência à piora com o aumento do número de ciclos.

Nessa perspectiva, o carbetto de silício (SiC) é um abrasivo adequado no processo de usinagem por fluxo abrasivo (AFM) para os três materiais mencionados (aço SAE 1045, alumínio 6061-T6 e latão C-360 CLA), mas sua adequação e desempenho podem variar dependendo das propriedades de cada um deles. Assim, é razoável esperar que a resposta ao processo realmente seja diferente para cada um dos materiais testados.

A ductilidade é uma das propriedades que pode explicar a diferença de resultados da AFM. Porquanto, em materiais mais dúcteis como o alumínio e o latão, a formação de *smearing* (borramento em tradução literal para o português) é mais comum, o que pode produzir uma superfície com acabamento indesejado (GOV, EYERCIOGLU E CAKIR, 2013).

Para o alumínio, mais que aço e latão, é bastante comum o aparecimento de arranhões e danos superficiais, quando o grão abrasivo utilizado é muito agressivo, o que pode afetar o acabamento superficial. Fora isso, o alumínio tende a ser um material com tendência ao empastamento em processos abrasivos, podendo promover a adesão de partículas nos grãos abrasivos e no próprio material que está sendo usinado. Esse fato pode reduzir a eficiência do corte, além de haver a tendência de adesão do próprio alumínio na superfície do corpo de provas sob condições

abrasivas e de alta pressão, como as que ocorrem na usinagem por fluxo abrasivo (AFM). Por fim, outro fenômeno que pode ocorrer é a adesão de partículas abrasivas na superfície dos corpos de prova. Já a AFM do latão também pode produzir adesão, mas há uma tendência menor, assim como no aço, devido às propriedades desse material.

Os resultados de variação de massa (Figura 36, Figura 37 e Figura 38) apresentados neste trabalho indicam que houve adesão de material no alumínio, mas isso não ocorreu com o aço e o latão, que perderam massa à medida que o número de ciclos foi aumentando. Para o aço houve a redução linear da massa com o aumento do número de ciclos, enquanto para o latão parece haver uma saturação na capacidade de retirada de material dos corpos de prova e o aumento do número de ciclos não reflete em redução da massa.

Cabe ressaltar que foi utilizada a mesma formulação de massa para os três materiais e uma pasta abrasiva foi preparada para cada material, pois julgou-se que pelo número de ciclos não haveria desgaste suficiente dos grãos abrasivos ou a saturação da massa. Portanto, mais um indicativo da adesão de partículas nos corpos de prova de alumínio, pois porções de material dos testes precedentes podem ter aderido nos corpos de prova seguintes, o que não aconteceu com o aço e o latão.

Os resultados apresentados até aqui são muito importantes, pois não devemos nos esquecer que todo o desenvolvimento do trabalho é está baseado na validação dos óleos vegetais sustentáveis de babaçu e moringa *oleífera*. Dessa maneira, a análise técnica da usinagem por fluxo abrasivo nos indica que os eventuais desafios da usinagem dos três materiais estão ligados a outras características do processo e do próprio material. Os resultados também indicam que a massa abrasiva proposta foi capaz de retirar material da superfície dos três corpos de prova em condições específicas, além de produzir melhora da qualidade superficial após a AFM do aço.

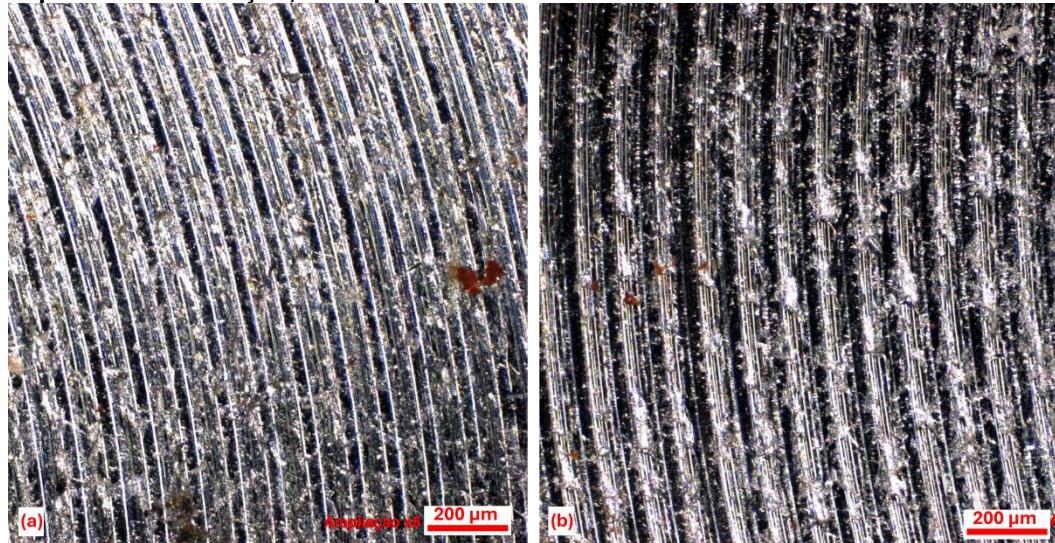
No que diz respeito à análise microscópica das amostras é possível afirmar que em todas as amostras antes do processo de AFM, sejam aço, alumínio ou latão, é possível observar as marcas de avanço características do processo que as deu origem. Assim, na análise microscópica das amostras após o processo de AFM é possível notar de forma bastante clara que houve uma diferença entre as amostras de aço e latão e as amostras de alumínio.

No aço, há marcas de avanço características do processo de preparação das amostras em todos os níveis de ciclos (20, 60 e 120) utilizados no trabalho. Visualmente é possível observar material (o próprio aço) aderido à superfície submetida ao processo de AFM em 20 ciclos, em algumas das imagens obtidas por microscopia óptica, o que já não ficou evidente nas amostras de 60 ciclos, em que aparentemente houve uma suavização das marcas de avanço em algumas situações. Por outro lado, alguns defeitos voltam a aparecer nas amostras com 120 ciclos, indicando o motivo de leve piora do acabamento superficial nessa condição.

No alumínio, independente, do número de ciclos é possível observar riscos na superfície, característicos do processo abrasivo da AFM. O que não é tão visível nas amostras de aço e latão, cujos materiais possuem propriedades características distintas do alumínio, que é mais dútil. Para o caso do alumínio, esses defeitos parecem ficar mais aparentes à medida em que número de ciclos vai aumentando. Isso inclui o aparecimento de materiais aderidos na superfície do material, o que indica o motivo pelo qual a massa da amostra teve tendência de aumento com o aumento do número de ciclos.

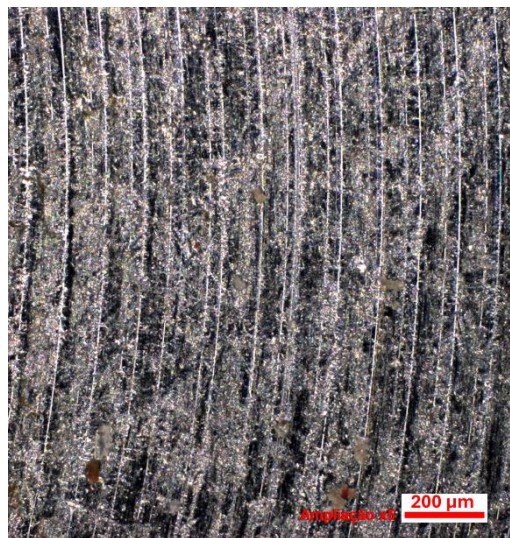
Para o latão, a análise visual também indica que há menos defeitos visíveis na superfície para 20 ciclos e esses defeitos aumentam quando se passa para as imagens dos testes de 60 e 120 ciclos, indicando o papel dos abrasivos da massa, como resultado da AFM. Nesse sentido, ainda é possível observar as marcas de avanço, como em todos os casos, mas existem riscos ou áreas em que as marcas de avanço não estão visíveis. Contudo, ao contrário do alumínio, não ficam evidenciados materiais aderidos na superfície do material.

Figura 39 – Imagens obtidas por microscopia óptica para amostras de aço submetidas a 20 ciclos de AFM, onde é possível observar as marcas de avanço, indicativos de usinagem devido à AFM e pontos de oxidação, mas que não estão relacionados à AFM



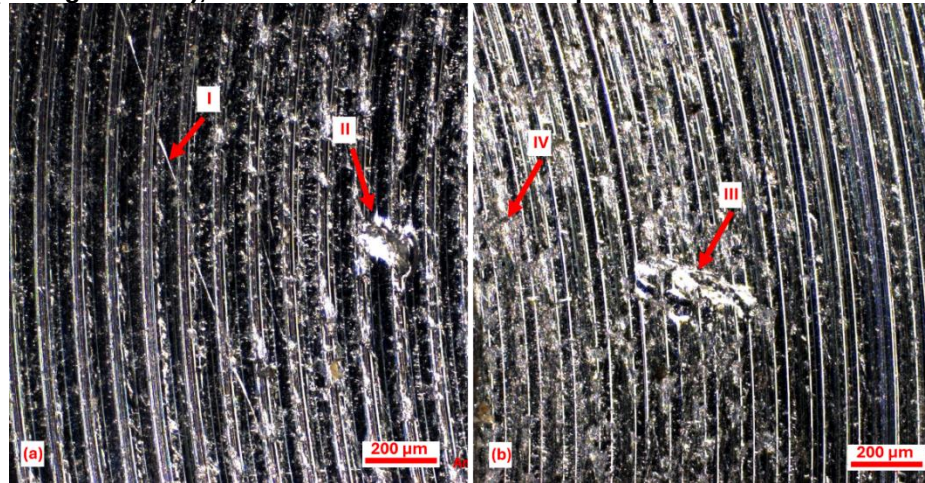
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 40 – Imagem obtida por microscopia óptica para amostra de aço submetida a 60 ciclos de AFM, onde é possível observar as marcas de avanço suavizadas como indicativo de usinagem devido à AFM



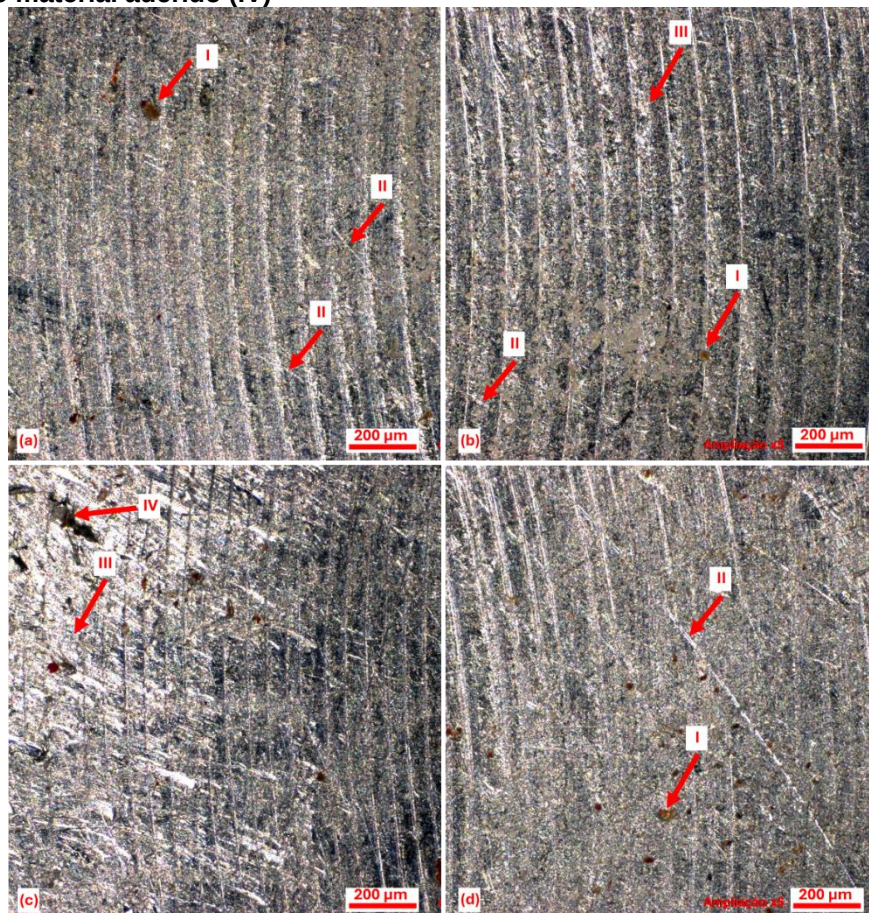
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 41 – Imagens obtidas por microscopia óptica para amostras de aço submetidas a 120 ciclos de AFM, onde é possível observar o aparecimento de riscos (I), material aderido (II e III) e *smearing* (na região de IV), fenômenos não observados para quantidades menores de ciclos



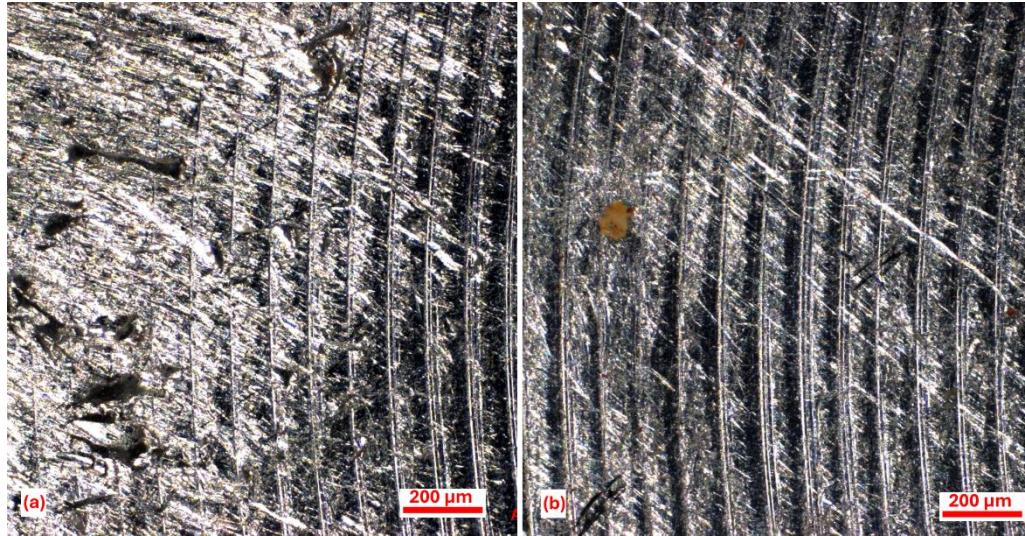
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 42 – Imagens obtidas por microscopia óptica para amostras de alumínio submetidas a 20 ciclos de AFM, onde é possível observar o aparecimento de defeitos que prejudicam o acabamento superficial: material aderido (I), riscos (II), *smearing* (na região de III), marcas de avanço sob o material aderido (IV)



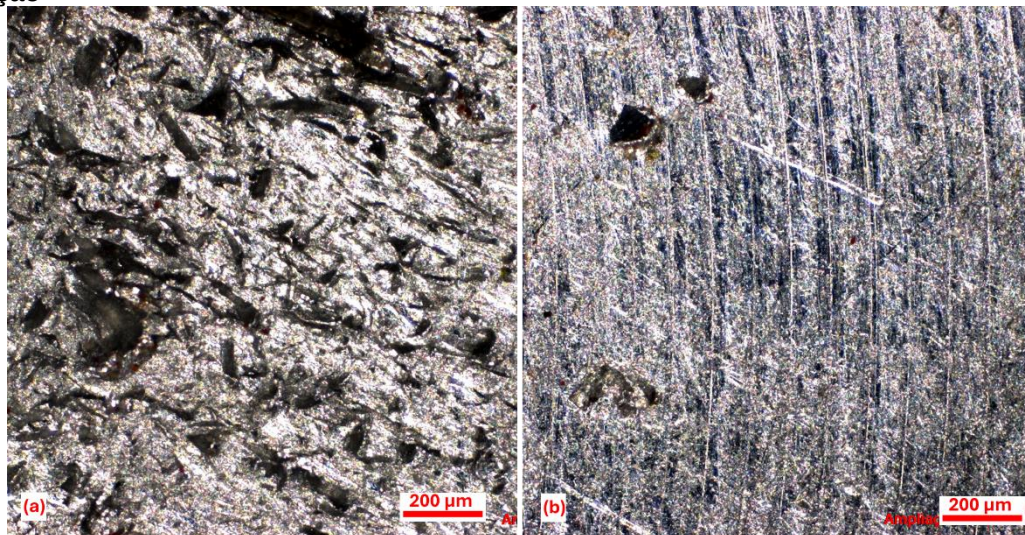
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 43 – Imagens obtidas por microscopia óptica para amostras de alumínio submetidas a 60 ciclos de AFM, onde é possível observar o aparecimento de defeitos que prejudicam o acabamento superficial, com grande quantidade de material aderido em (a) e riscos na superfície em (b)



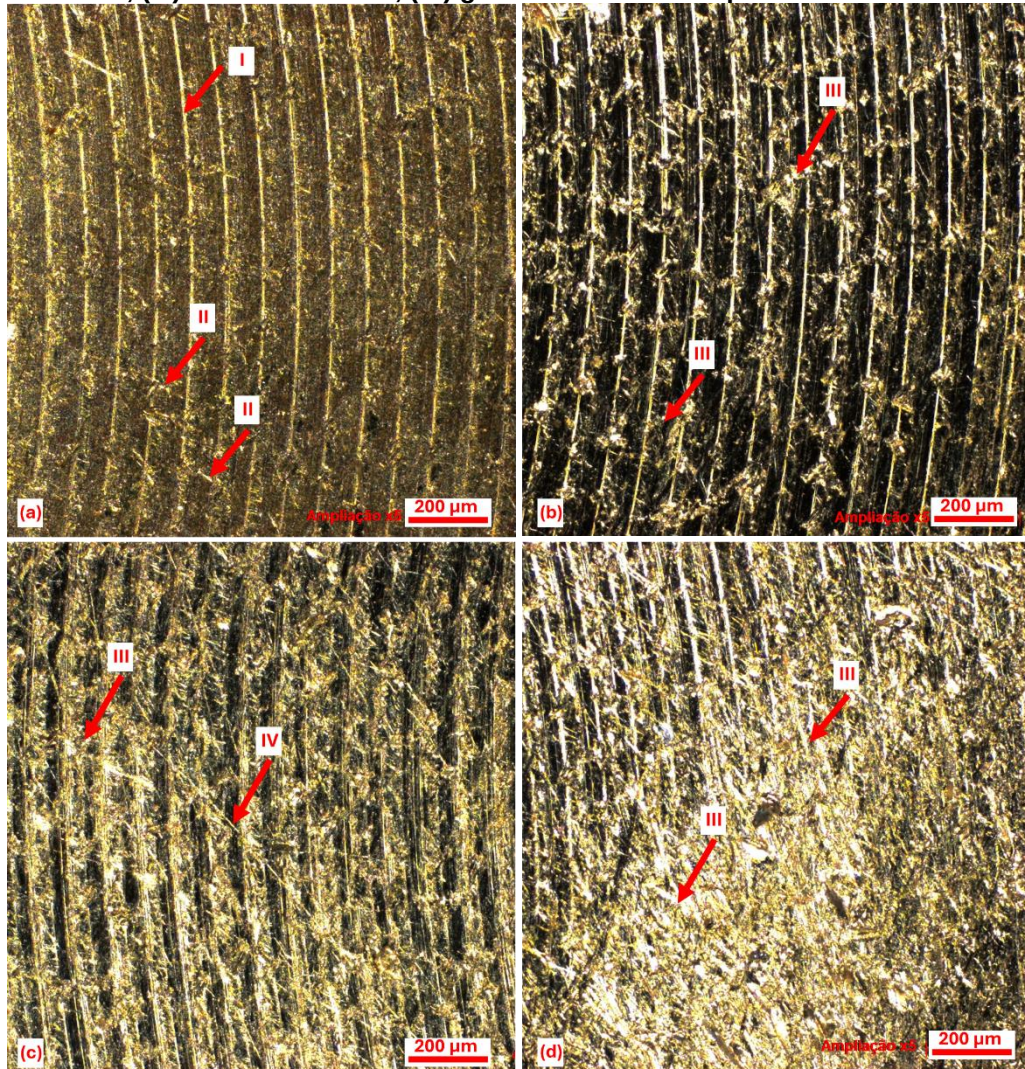
Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 44 – Imagens obtidas por microscopia óptica para amostras de alumínio submetidas a 120 ciclos de AFM, onde é possível observar a grande quantidade de defeitos que prejudicam o acabamento superficial. Na imagem (a) não é sequer possível observar as marcas de avanço, enquanto em (b) há riscos na superfície e material aderido, possivelmente grãos abrasivos pela coloração



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 45 – Imagens obtidas por microscopia óptica para amostras de latão submetidas a 20 (a), 60 (b) e 120 (c e d) ciclos de AFM, onde é possível observar a evolução do aparecimento de defeitos na superfície do material à medida em que o número de ciclos aumenta, com prevalência de riscos e material aderido para 120 ciclos (c e d). (I) marcas de avanço, (II) pequenos riscos, (III) material aderido, (IV) grandes riscos na superfície



Fonte: Autoria própria (2024)

A AFM foi capaz de usinar a superfície de todos os materiais, aço SAE 1045, alumínio 6061-T6 e latão C-360 CLA, apesar do comportamento distinto. Avalia-se que esse comportamento distinto está relacionado ao tipo de abrasivo utilizado e ao número de ciclos, não tendo relação com os fluidos vegetais utilizados na produção da pasta abrasiva. O aço possui maior dureza em comparação ao alumínio e o latão, isso implica em maior resistência ao desgaste abrasivo e faz com que o aço seja menos suscetível a remoções significativas de massa. Naturalmente, espera-se que a taxa de remoção em materiais mais duros seja menor sob as mesmas condições, necessitando de um número maior de ciclos e uma pasta abrasiva mais agressiva

para se obter acabamentos significativos. Logo, a quantidade de ciclos necessários para AFM é maior para aço e é reduzida no alumínio e no latão, justamente pelas propriedades dos materiais. Uma menor taxa de remoção de material também contribui para menor tendência de adesão na superfície do corpo de provas. Porquanto, em materiais mais dúcteis como o alumínio e o latão, a formação de *smearing* (borramento em tradução literal para o português) é mais comum, o que pode produzir uma superfície com acabamento indesejado.

De fato, as propriedades mecânicas dos materiais foram o principal fator de influência na resposta da usinagem, principalmente a ductilidade, existindo uma relação direta com o abrasivo utilizado. Assim, para o aço a AFM foi tecnicamente viável para as condições testadas, com melhoria da qualidade superficial, conforme comprovação por meio da perda de massa, melhoria da rugosidade média (R_a) e imagens da superfície. No entanto, o latão e o alumínio não tiveram resultados tão positivos, uma vez que a ductilidade propiciou a adesão de partículas na superfície da peça usinada. No alumínio, houve adesão para todos as quantidades de ciclos testados (20, 60 e 120). Enquanto no latão, poucos ciclos possibilitaram a melhoria da qualidade da superfície, mas o aumento do número de ciclos fez com que a qualidade da superfície fosse perdida, apesar da perda de massa em todas as situações

5 CONCLUSÃO

Sabendo da conhecida aplicabilidade de fluidos à base de petróleo, a eficácia do processo de AFM utilizando pasta abrasiva de base vegetal de óleo de babaçu e moringa oleífera foram comprovadas. A interação entre esses óleos assegura as propriedades necessárias para a formação de uma película lubrificante eficiente, enquanto o carbeto de silício atua na remoção do material. Avalia-se que o comportamento distinto dos materiais testados está relacionado com o tipo de abrasivo e o número de ciclos, não tendo relação com os fluidos vegetais utilizados na produção da pasta abrasiva. Para o aço a AFM foi tecnicamente viável para as condições testadas, com melhoria da qualidade superficial, conforme comprovação por meio da perda de massa, melhoria da rugosidade média (R_a) e imagens da superfície. No entanto, o latão e o alumínio não tiveram resultados tão positivos, uma vez que a ductilidade propiciou a adesão de partículas na superfície da peça usinada. Assim, o estudo amplia o conhecimento sobre a sustentável por fluxo abrasivo, fornecendo subsídios para otimizações futuras no processo.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Realizar a análise da pasta abrasiva de forma a avaliar suas propriedades.
2. Utilizar um comparativo entre ligas metálicas não ferrosas submetidas ao processo de AFM.
3. Utilizar granulometrias diferenciadas das partículas abrasivas e/ou materiais abrasivos diferentes.
4. Trabalhar com mais variedades nos ciclos aplicados durante a usinagem.
5. Realizar os experimentos considerando corpos de prova com geometrias diferentes.
6. Realizar os experimentos considerando corpos de prova inteiros e cortados na secção transversal, possibilitando uma melhor análise interna do furo.

REFERÊNCIAS

AIO, Leandro Caio. **Proposição de estratégias de usinagem no alumínio 6351-T6 para fabricação de propulsores com geometrias complexas**. 2022. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São Jose dos Campos, 2022.

ALAMELU, R. *et al.* Sustainable supply chain and circular economy ingenuities in small manufacturing firms- a stimulus for sustainable development. **Materials Today: Proceedings**. Thanjavur, p. 2214-7853. mar. 2023.

ALEXANDRE, Jeferson Yves Nunes Holanda. **Um estudo teórico e experimental da produção bioquímica de biodiesel de babaçu (Orbignya SP.)**. 2022. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química Área de Concentração: Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

ALVES, F.R. **Desenvolvimento de um tribômetro tipo cilindro sob disco, para ensaios tribológicos em formulações com óleos vegetais**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Mecânica dos Sólidos) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: Abnt, 2004.

ASKELAND, Donald R.; PHULÉ, Pradeep P.. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2013. 4ª reimpressão da 1ª edição de 2008.

ASM INTERNATIONAL. **Metals Handbook - Friction, Lubrication, and Wear Technology**. Materials Park: ASM International, v. 18, 1992.

BAN, Xinxing; TIAN, Zhuangzhi; ZHU, Jianhui; DUAN, Tianxu; ZHENG, Shaodong; WANG, Ningchang; HAN, Shaoxing; QIU, Hui; LI, Zhengxin. Compound mechanical and chemical-mechanical polishing processing technique for single-crystal silicon carbide. **Precision Engineering**, [S.L.], v. 86, p. 160-169, mar. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2023.12.002>.

BARROS, R. A. **Influência da nitretação a plasma e carbonetação a laser nas propriedades tribológicas do par aço AISI / SAE 4340 e liga de bronze-alumínio 630**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica na área de Materiais) – Universidade Estadual Paulista do Campus de Guaratinguetá.

BASHA, S.M.; VENKAIAH, N.; SANKAR, M.R.. Development and performance evaluation of galactomannan polymer based abrasive medium to finish atomic diffusion additively manufactured pure copper using abrasive flow finishing. **Additive Manufacturing**, [S.L.], v. 61, p. 103290, jan. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2022.103290>.

BELEN, H. M. V. **Gestão Ambiental e Sustentabilidade**. Departamento de Ciências da Administração UFSC. Catalogação na publicação por Onélia Silva Guimarães CRB – 14/071. Florianópolis, 2010.

BRAZILIAN ASSOCIATION OF TECHNICAL STANDARDS. ABNT NBR ISO 26000: Guidelines on Social Responsibility. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

Bhardwaj, A., Ali, P., Walia, R.S., Murtaza, Q., Pandey, S.M. (2019). Development of Hybrid Forms of Abrasive Flow Machining Process: A Review. In: Shanker, K., Shankar, R., Sindhwani, R. (eds) **Advances in Industrial and Production Engineering**. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6412-9_5

BONGOSKI, Fabio; GRISON, Vagner. AVALIAÇÃO DA RUGOSIDADE Ra OBTIDA POR RETÍFICA PLANA COM ACIONAMENTO MANUAL E PNEUMÁTICO DO EIXO TRANSVERSAL. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 419-429, 31 jan. 2022. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciencias e Educacao. <http://dx.doi.org/10.51891/rease.v8i1.3798>.

BORGES, Aline Ramos. **Modelagem em Experimentos Fatoriais Replicados para Melhoria de Processos Industriais Têxteis**. 2014. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014

CALLISTER Jr., W. D. RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: an introduction**. Editora LCT, 8ª ed., 2009.

CÂMARA, Jéssica Monfort Pereira. **Desenvolvimento metodológico para avaliação de desempenho ambiental em processos de usinagem de metais**. 2022. 75 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós- Graduação em Gestão Ambiental, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Recife, 2022.

CANABARRO, Níkolos Andrei Furlan. **comportamento tribológico SAE 1045 x DIN GG20 em contatos côncavo-convexo presentes em máquinas-ferramenta**. 2023. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

CARVALHO, Guilherme Antônio. **Sustentabilidade industrial combinado com conceitos de mitigação de efeito estufa aplicado ao processo de retificação**. 2023. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2023.

CARVALHO, N.; CHAIM, O.; CAZARINI, E.; GEROLAMO, M. **Manufacturing in the fourth industrial revolution: A positive prospect in Sustainable Manufacturing**. 15th Global Conference on Sustainable Manufacturing. São Carlos – Brasil. Procedia Manufacturing 21 (2018) 671–678

CAVALCANTE, G. H. R. **Estudo de óleos nativos da Amazônia (Babaçu e Andiroba): modificação química, caracterização e avaliação como biolubrificante**. 2016. Tese (Doutorado em Biodiversidade e Biotecnologia) – Universidade Federal do Maranhão.

CASTRO, Tarsila F. de *et al.* Biotechnological valorization of mycelium-bound lipase of *Penicillium purpurogenum* in hydrolysis of high content lauric acid vegetable oils. **Process Safety And Environmental Protection**. Lorena, p. 498-505. mar. 2022.

CEMPRE. **Manual de gerenciamento integrado**, Lixo Municipal. São Paulo (1995). IPT, p. 3-124.

CHAVES, Yago S.; SILVEIRA, Pedro Henrique P.M. da; NEUBA, Lucas de M.; JUNIO, Raí Felipe P.; RIBEIRO, Matheus P.; MONTEIRO, Sergio N.; NASCIMENTO, Lucio Fabio C.. Evaluation of the density, mechanical, thermal and chemical properties of babassu fibers (*Attalea speciosa*.) for potential composite reinforcement. **Journal Of Materials Research And Technology**, [S.L.], v. 23, p. 2089-2100, mar. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.100>.

Conab, C. N. D. A. (2022). Volume 6. número 03. dezembro de 2022. **Boletim da Sociobiodiversidade**, 6.

Confederação Nacional da Indústria. **Mapa estratégico da indústria 2023-2032: o caminho para a nova indústria / Confederação Nacional da Indústria**. – Brasília: CNI, 2023.

COSEGLIO, M.S. D. R. **Análise da eficiência do processo de usinagem por hidroerosão sem renovação de partículas abrasivas**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

CRUZ, Crislaine da. **Estudo do comportamento tribológico de materiais vitrocerâmicos**. 2023. 169 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Ciências/Física, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2023.

CUNICO, M. W. M.; CUNICO, M. M.; MIGUESL, O. G.; ZAWADZKI, S. F.; PERALTA, Z. P.; VOLPATO, N. **Planejamento Fatorial: uma ferramenta estatística valiosa para a definição de parâmetros experimentais empregados na pesquisa científica**. Catálogo de Laboratórios da Agência de Inovação UFP. Visão Acadêmica – volume 9, Curitiba 2008.

DHAR, N.R.; AHMED, M.T.; ISLAM, S. An experimental investigation on effect of minimum quantity lubrication in machining AISI 1040 steel. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, n. 47, p. 748-753, 2007.

DIN 50320. **Wear terms systematic analysis of wear processes classification of wear phenomena** Deutsches Institut fur Normung E.V. (DIN), 1979.

ASKELAND, Donald R.; PHULÉ, Pradeep P.. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2013. 4ª reimpressão da 1ª edição de 2008.

DOWSON, D. **History of Tribology**. Editora Longman Group Limited, 677 p., Inglaterra, 1979.

ESPAÇO ACADÊMICO, 194., 2016, Maringá. **Revolução Industrial: considerações sobre o pioneirismo industrial inglês**. Maringá: Revisa Espaço Acadêmico, 2017.

EWALD, Heiter. **Estudo do desgaste por erosão de ligas metálicas utilizadas em sistemas mecânicos de plantas siderúrgicas**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Espírito Santo.

FARIA, Emília de Oliveira. **Do cluster ao ecossistema industrial: uma análise do comportamento das organizações em direção a um modelo circular de produção sob a lente da Simbiose Industrial**. 2022. 192 f. Tese (Doutorado) - Curso de Desenvolvimento Sustentável, Área de Concentração em Política e Gestão da Sustentabilidade., Universidade de Brasília, Brasília, 2022.

FERNANDES, Graciliano Pereira. **Aplicação da tribologia ao estudo e desenvolvimento de materiais pra embreagem automotiva**. 2007. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlandia, 2007.

FERRER, Jorge Antonio Giles *et al.* MANUFATURA ENXUTA SUSTENTÁVEL – METODOLOGIA DE APLICAÇÃO DO MAPEAMENTO DE FLUXO DE VALOR SUSTENTÁVEL (Sus-VSM). **Revista Brasileira de Mecatrônica**, São Paulo, v. 4, n. 3, p. 1-18, jan. 2022.

FERREIRA, Caroline Carvalho. **Estudo da viabilidade de emulsões a base de óleos vegetais para uso em processos de usinagem de liga de alumínio 6061**. 2023. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica do Programa de Pósgraduação em Engenharia Mecânica (Ppgem), Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Ufpr – Campus Cornélio Procopio, Cornélio Procopio, 2023.

FITZPATRICK, Michael. **Introdução aos Processos de Usinagem**. Tradução: Alexandre Augusto Castello Andrade....et al. Revisão técnica: Sergio Luis Rabelo de Almeida, Carlos Oscar Correa de Almeida Filho. Porto Alegre: AMGH, 2013.

FREIRE, Estevão *et al.* Prospective Scenarios for the Production of Moringa oleifera Derivatives: a systemic approach. **Revista Virtual de Química**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 3, p. 529-536, out. 2023. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20220092>.

GANIER, M. (1993). **Reciclar, eliminar e valorizar fluidos e resíduos de corte**. Trad. N. P. Lima. Revista Máquinas e Metais, dezembro, (1993). p. 26-29.

GIRARDI, Julio Cezar. **Aprimoramento das propriedades do biodiesel de babaçu utilizando aditivos naturais**. 2023. 119 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2023.

GLAESER, W. A.; ERICKSSON, R. C.; **Tribology: The Science of Combatting Wear, Society of Tribologists and Lubrification Engineer (STLE)**, Columbus, Estados Unidos, 1981.

GOYAL, Aneesh *et al.* Recent advancements in abrasive flow machining and abrasive materials: A review. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 56, p. 3065-3072, 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.109>.

GOMES, P. R. **Análise do acabamento superficial e da potência consumida na usinagem de fresamento frontal e cilíndrico tangencial da madeira de eucalipto**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica na área de Materiais) – Universidade Estadual Paulista do Campus de Guaratinguetá.

GOMES, Thais Rodrigues. **Influência do tamanho de partícula de carbeto de silício no desempenho de pastilhas de freio automotivo**. 2022. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

GONÇALVES, Janaína Fracaro de Souza; SEIFERT, Stephan Silva; NEVES, Alisson Caetano. USO DE FERRAMENTAS MCDM PARA CLASSIFICAÇÃO DE FLUIDOS DE CORTE DE BASE VEGETAL BASEADO EM PROPRIEDADES DE USINAGEM, TRIBOLÓGICAS E FISCOQUÍMICAS. In: BRITO, Higor Costa de *et al.* **Meio ambiente e sustentabilidade: pesquisas, reflexões e diálogos emergentes**. Campina Grande: Ampila, 2023. p. 300-315.

GONÇALVES, R. A. **Influência do teor de cobre na usinabilidade da liga de alumínio 6351**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica na área de Materiais e Processos de Fabricação) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG.

GONÇALVES, J. F. S. **Proposição de método de desenvolvimento de fluido de corte de base vegetal**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica na área de Mecânica dos Sólidos e Estruturas) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

GOV, K.; EYERCIOGLU, O.; CAKIR, M. V. Hardness effects on abrasive flow machining. **Strojnicki Vestnik/Journal of Mechanical Engineering**, v. 59, n. 10, p. 626–631, 2013.

HALEEM, Abid; JAVAID, Mohd; SINGH, Ravi Pratap; SUMAN, Rajiv; QADRI, Mohd Asim. A pervasive study on Green Manufacturing towards attaining sustainability. **Green Technologies And Sustainability**, [S.L.], v. 1, n. 2, p. 100018, maio 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.grets.2023.100018>.

HASHMI, Abdul Wahab; MALI, Harlal Singh; MEENA, Anoj. Experimental investigation on abrasive flow Machining (AFM) of FDM printed hollow truncated cone parts. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 56, p. 1369-1375, 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.428>.

JEGADHEESAN, C. *et al.* Experimental investigation on performance and emission characteristics of moringa seed oil biodiesel with added ethanol in CI engine. **Elsevier B.V.**. Tamil Nadu, p. 838-834. jun. 2022.

KUMAR, Som *et al.* Effect of processing condition on abrasive flow machining process: A review. **Elsevier B.V.** India, p. 2214-7853. dez. 2022.

KUMAR, S. Santhosh; HIREMATH, Somashekhar S.. A Review on Abrasive Flow Machining (AFM). **Procedia Technology**, [S.L.], v. 25, p. 1297-1304, 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.224>.

LIMA JUNIOR, Josean da Silva. **Análise técnico-econômica de fluidos de corte a base de óleo vegetal e sintético em operações de usinagem do aço SAE 1045**. 2021. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021.

MALI, Harlal S. *et al.* Abrasive flow finishing of FDM printed parts using a sustainable media. **Rapid Prototyping Journal**, Jaipur, v. 24, n. 3, p. 593-606, 9 abr. 2018. Emerald. <http://dx.doi.org/10.1108/rpj-10-2017-0199>.

MELENTIEV, Ruslan. Physical theories of solid particle erosion and abrasive jet wear. **Journal Of Manufacturing Processes**, [S.L.], v. 106, p. 422-452, nov. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.10.014>.

MONTGOMERY, Douglas C. RUNGER, George C. **Estatística aplicada para engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: LCT, 2003. Tradução: Prof. Verônica Calado, D. Sc.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. New York: John Wiley & Sons, 5ed., 2001.

MUNHOZ, M. R. **Estudo de caso de uma pasta abrasiva utilizando óleo de oiticica em um equipamento de usinagem por fluxo abrasivo**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Cornélio Procopio.

OST, C. A. **Análise da qualidade superficial no fresamento de aço p20 com diferentes tratamentos de ferramentas e condições de lubrificarrefrigerantes**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Caxias do Sul.

PARAVIZO, et. al. **Exploring gamification to support manufacturing education on industry 4.0 as an enabler for innovation and sustainability**. 15th Global Conference on Sustainable Manufacturing. *Procedia Manufacturing* 21 (2018) 438 – 445.

PENG, Can; XU, Qihao; DING, Lan; ZHOU, Tianyi; GAO, Hang; WANG, Xuanping. Novel insights into abrasive flow machining uniformity for SLM channels. **International Journal Of Mechanical Sciences**, [S.L.], v. 262, p. 108726, jan. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108726>.

PEREIRA, F. S. G. **Viabilidade sustentável de biomassa de Moringa Oleifera para produção de biodiesel e briquetes**. 2015. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal de Pernambuco.

PEREIRA, Sidnei. **Melhoria da produtividade do processo de usinagem de uniões em ferro fundido maleável preto: um estudo de caso**. Dissertação de Mestrado do programa de pós graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.

PINTAUDE, Giuseppe. Characteristics of Abrasive Particles and Their Implications on Wear. In: PINTAUDE, Giuseppe. **Characteristics of Abrasive Particles and Their Implications on Wear**. Curitiba: Source: Intech, 2011. p. 117-130.

PORTO, Arthur José Vieira et al. **Usinagem de Ultraprecisão**. São Carlos: Rima Editora, 2004.

PUSAVEC, Franci; KENDA, Jani. The transition to a clean, dry, and energy efficient polishing process: an innovative upgrade of abrasive flow machining for simultaneous generation of micro-geometry and polishing in the tooling industry. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 76, p. 180-189, ago. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.071>.

QUINTÃO, C. M. F. **Estudo de poliméricas formadas por PEBD e plásticos biodegradáveis com o óleo e o polímero de moringa oleifera**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais, área de concentração: Análise e Seleção de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais - REDEMAT, Ouro Preto - MG.

RELVAS, Carlos. **Controle Numérico Computadorizado: conceitos fundamentais**. 3º. Edição revista e aumentada. Porto: Publindústria Edições Técnicas, 2012.

RIESENER, Michael *et al.* Design for Circularity – Identification of Fields of Action for Ecodesign for the Circular Economy. **Elsevier B.V.**. Aachen, p. 137-142. fev. 2023.

RODRIGUES, A, R et. al. **Retificação do aço abnt 4340 com a aplicação de mql com água e limpeza superficial do rebolo**. Acta Mechanica Et Mobilitatem, vol 3, nº6. Contaction Information, 2018.

SANCHEZ, L.E.A., Losnak, C.; Perez, F.R.C., 1999, **Comportamento da taxa de remoção e acabamento superficial na lapidação plana sob diferentes parâmetros do processo**, XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 10 p.

SANTOS, João Batista dos; LIMA, Ramses Otto Cunha. Estudo da possibilidade de aplicação de óleos de coco e de soja em substituição de fluidos emulsionáveis no torneamento do aço SAE 1045. **Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica**, Semi-Árido, v. 5, n. 1, p. 23-34, jun. 2022. Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/r4em/article/view/10995>. Acesso em: 23 out. 2023.

SANTOS, Sandro Cardoso; SALES, Wisley Falco. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais**. São Paulo: Artliber Editora, 2007.

SATHISHKUMAR, N.; SELVAM, R.; KUMAR, K.M.; ABISHINI, A.H.; RAHMAN, T. Khaleelur; MOHANARANGA, S.. Influence of garnet abrasive in drilling of Basalt–Kevlar–Glass fiber reinforced polymer cross ply laminate by Abrasive Water Jet Machining process. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 62, p. 1361-1368, 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.861>.

SHACKELFORD, James F. **Introdução a Ciência dos Materiais para Engenheiros**. Tradução: Daniel Vieira, revisão técnica Nilson C. Cruz. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SIHAG, Nitesh; KALA, Prateek; PANDEY, Pulak M. **Analysis of Surface Finish Improvement during Ultrasonic Assisted Magnetic Abrasive Finishing on chemically treated Tungsten substrate**. *Procedia Manufacturing*, India, p.136-146, 4 jul. 2017.

SINGH, Swarn; KUMAR, Harish; KUMAR, Santosh; CHAITANYA, Saurabh. A systematic review on recent advancements in Abrasive Flow Machining (AFM). **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 56, p. 3108-3116, 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.273>.

SILVA, Rodrigo Henriques Lopes da. **Nitrogênio como fluido de corte no fresamento tangencial: efeitos na integridade superficial da superliga de níquel 625 e no aço AISI 8620**. 2017. 119 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, na Área de Materiais e Processos de Fabricação., Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

SILVA, S. D. D. **CNC Programação de Comandos Numéricos Computadorizados - torneamento**. 8ª. ed. São Paulo: Editora Érica Ltda, 2012.

SOUZA, Hellen Cristina Pires *et al.* Análise dos efeitos do uso de óleos vegetais aplicados na forma MQF na usabilidade do aço AISI 316. **Brazilian Journal Of Development**, Curitiba, v. 8, n. 5, p. 6691-36712, maio 2022.

TEIXEIRA, Ricardo Luiz Perez; TEIXEIRA, Cynthia Helena Soares Bouças. Building a sustainable future: the relationship between industrial production and sustainability. **Concilium**, [S.L.], v. 23, n. 11, p. 330-349, 15 jun. 2023. Uniao Atlantica de Pesquisadores. <http://dx.doi.org/10.53660/clm-1427-23g09>.

TROIANO, Maurizio; HASSANIN, Andrea El; SOLIMENE, Roberto; SILVESTRI, Alessia Teresa; SCALA, Fabrizio; SQUILLACE, Antonino; SALATINO, Piero. Fluidized bed finishing of additively manufactured objects: the influence of operating parameters. **Powder Technology**, [S.L.], v. 432, p. 119115, jan. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2023.119115>.

VACARO, Tiago. **Redução da utilização de fluidos de corte: uma abordagem ecológica na gestão de processos de usinagem**. In: XVII ENCONTRO DE JOVENS PESQUISADORES DA UCS, 2009.

VAIDAYA, Saurabh; AMBAD, Prashant; BHOSLE, Santosh. **Industry 4.0 – A Glimpse**. 2nd International Conference on Materials Manufacturing and Design Engineering. Procedia Manufacturing 20 (2018) 233 – 238.

XU, Song; MURUGESAN, Thulasi Mani; ELFAR, Abdullah Abdullatif Aly; DURAIRAJ, Maria Pon Reka. Evaluation of sustainable manufacturing performance – A case illustration with multistakeholder perspective. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 458, p. 142368, jun. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142368>.

ZHANG, Baocai; CHEN, Shifei; WANG, Xinchang. Machining uniformity and property change of abrasive media for micro-porous structures. **Journal Of Materials Processing Technology**, [S.L.], v. 307, p. 117675, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117675>.

ZHANG, Baocai; WANG, Xinchang; CHEN, Shifei; SHI, Sufang. Theoretical and numerical analysis on finishing mechanism by rheological properties and flow behaviors of abrasive media in micro-porous structures. **Journal Of Manufacturing Processes**, [S.L.], v. 99, p. 513-526, ago. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.05.087>.

WAKJIRA, M. W; ALTENBACH, H.; RAMULU, P. J. **Optimization of manufacturing sustainability in the Ethiopian industries**. 15th Global Conference on Sustainable Manufacturing. Ethiopia. Procedia Manufacturing 21 (2018) 890 - 897

APENDICE 1

Apêndice 1: Rugosidade Superficial Aço ABNT 1045

Para a análise da rugosidade superficial, os corpos de prova foram identificados em duas regiões, demarcadas como lado I e lado II. O ensaio foi realizado antes e após a usinagem por fluxo abrasivo, em cada um dos lados que eram o foco das análises. Observa-se os resultados das médias obtidas após três medições de Ra, Rq e Rz (μm) para os corpos de prova de aço.

CP	Antes Usinagem (µm)						Nº	Após Usinagem (µm)					
	Lado I			Lado II				Lado I			Lado II		
	Ra	Rq	Rz	Ra	Rq	Rz		Ra	Rq	Rz	Ra	Rq	Rz
01	6,51	7,90	28,93	5,55	6,72	25,93	20	7,38	8,90	34,06	5,71	6,86	25,96
02	4,15	5,22	20,70	4,96	6,03	24,00		4,90	6,14	24,44	5,48	6,89	26,11
03	6,09	7,37	28,80	4,39	5,36	20,86		6,34	7,44	27,16	4,72	5,82	23,64
04	4,83	5,84	21,96	4,93	6,22	24,81		5,53	6,69	24,40	4,51	5,69	22,55
05	4,97	6,02	22,77	4,67	5,75	22,78		5,40	6,58	25,71	4,76	5,86	23,25
06	5,42	6,87	26,46	8,76	10,79	37,47	60	4,58	5,61	22,14	8,05	9,81	35,09
07	4,95	6,24	26,90	4,43	5,39	20,55		4,70	5,73	21,66	4,54	5,49	20,59
08	4,53	5,52	21,22	4,99	5,93	22,99		4,85	5,92	22,00	4,65	5,46	21,88
09	5,00	5,95	22,13	5,78	6,94	24,59		5,16	6,18	23,60	5,07	6,10	23,93
10	5,36	6,19	23,09	4,06	5,23	20,09	120	5,19	6,06	22,66	4,52	5,62	21,87
11	3,99	5,01	22,36	4,58	5,90	26,59		4,08	4,99	19,46	4,86	6,07	23,99
12	7,30	8,98	33,58	8,43	10,32	36,92		6,51	8,26	30,18	8,26	10,21	36,13
13	5,70	6,74	25,49	4,44	5,36	20,20		5,70	6,99	26,48	4,22	5,14	20,54

Autoria própria (2023)

APENDICE 2

Apêndice 1: Rugosidade Superficial Alumínio 6351-T6

Para a análise da rugosidade superficial, os corpos de prova foram identificados em duas regiões, demarcadas como lado I e lado II. O ensaio foi realizado antes e após a usinagem por fluxo abrasivo, em cada um dos lados que eram o foco das análises. Observa-se os resultados das médias obtidas após três medições de Ra, Rq e Rz (μm) para os corpos de prova de alumínio.

CP	Antes Usinagem (µm)						Nº	Após Usinagem (µm)					
	Lado I			Lado II				Lado I			Lado II		
	Ra	Rq	Rz	Ra	Rq	Rz		Ra	Rq	Rz	Ra	Rq	Rz
01	3,86	5,99	22,01	2,19	2,78	11,55	20	1,76	2,46	9,15	4,23	6,49	22,68
02	4,40	5,71	21,12	2,58	3,44	13,86		2,61	3,48	12,34	1,18	1,59	5,89
03	1,14	1,56	5,18	1,29	1,89	7,37		0,76	1,18	3,87	0,54	0,70	3,42
04	4,00	4,91	18,35	2,00	2,56	10,77		3,12	3,83	15,2	2,26	3,50	14,42
05	2,16	2,98	11,05	4,14	6,10	24,70		2,25	2,95	12,65	1,79	2,36	8,57
06	2,53	3,56	12,31	2,97	4,17	14,67	60	2,01	2,81	9,89	2,15	3,91	12,70
07	1,60	2,13	7,74	2,02	2,57	9,69		2,75	3,66	12,11	2,24	2,93	9,92
08	3,46	4,63	16,06	2,40	2,86	10,83		1,61	1,95	6,42	1,58	1,96	7,48
09	1,92	2,45	9,35	1,91	2,33	8,77		3,49	4,87	16,32	2,41	3,01	11,43
10	1,69	2,19	8,43	2,23	2,70	9,74	120	1,52	2,01	7,89	1,82	2,26	8,31
11	3,05	3,86	12,06	2,42	2,99	10,73		2,70	3,52	12,43	2,15	2,76	9,04
12	3,52	4,53	17,05	3,10	3,80	13,09		2,88	3,53	13,16	2,96	3,69	13,86
13	3,95	4,91	19,24	2,51	3,24	13,36		3,86	4,81	18,12	3,32	4,18	15,44

Autoria própria (2023)

APENDICE 3

Apêndice 1: Rugosidade Superficial Latão

Para a análise da rugosidade superficial, os corpos de prova foram identificados em duas regiões, demarcadas como lado I e lado II. O ensaio foi realizado antes e após a usinagem por fluxo abrasivo, em cada um dos lados que eram o foco das análises. Observa-se os resultados das médias obtidas após três medições de Ra, Rq e Rz (μm) para os corpos de prova de latão.

CP	Antes Usinagem (µm)						Nº	Após Usinagem (µm)					
	Lado I			Lado II				Lado I			Lado II		
	Ra	Rq	Rz	Ra	Rq	Rz		Ra	Rq	Rz	Ra	Rq	Rz
01	1,57	1,92	8,16	1,72	2,32	10,23	20	1,43	1,73	7,38	1,50	1,91	8,79
02	1,78	2,19	9,44	1,90	2,36	10,39		1,79	2,28	9,89	1,89	2,39	10,37
03	2,08	2,56	10,00	2,23	2,67	11,39		1,57	1,99	9,09	1,85	2,20	8,30
04	2,28	2,78	12,47	1,91	2,37	10,08		1,92	2,45	11,01	2,09	2,51	10,61
05	2,08	2,57	10,70	1,70	2,13	8,88		2,03	2,45	10,29	1,63	2,04	8,57
06	1,56	1,97	8,39	1,91	2,33	9,90	60	1,69	2,14	9,40	1,83	2,31	10,98
07	1,91	2,38	10,11	1,80	2,27	10,17		2,16	2,78	11,53	1,66	2,10	9,91
08	1,62	2,05	9,90	1,77	2,17	9,79		1,72	2,14	9,99	1,68	2,12	9,43
09	1,66	2,04	8,93	1,90	2,48	10,89		1,64	2,02	8,63	1,75	2,26	9,69
10	1,51	1,86	8,18	1,77	2,13	8,35	120	1,34	1,62	7,00	2,12	2,69	11,75
11	1,69	2,08	9,30	1,75	2,21	10,09		1,53	1,94	8,93	1,60	2,01	8,85
12	1,69	2,11	9,09	1,73	2,16	10,11		1,94	2,85	11,60	1,79	2,28	10,42
13	1,69	2,08	9,48	2,02	2,47	10,41		1,65	1,99	8,76	2,24	2,70	11,08

Autoria própria (2023)