

EXPLORANDO ALTERNATIVAS ECO-AMIGÁVEIS: ÓLEOS DE BABAÇU E MORINGA COMO ELEMENTOS VISCOELÁSTICOS EM USINAGEM POR FLUXO ABRASIVO PARA MELHORIA DA QUALIDADE SUPERFICIAL DE LIGAS METÁLICAS

Janaína Fracaro de Souza Gonçalves (UTFPR) E-mail: janainaf@utfpr.edu.br

Alisson Caetano Neves (UTFPR) E-mail: caetano.neves.a@gmail.com

João Victor Severino (UTFPR) E-mail: joao_vs12@hotmail.com

Luiz Mateus Fernandes Romano (UTFPR) E-mail: mateus_lmr@hotmail.com

Resumo: O desenvolvimento de uma nova mistura viscoelástica para o processo de usinagem por fluxo abrasivo à base de óleos vegetais de coco babaçu e moringa, gesso e carbeto de silício é o objetivo principal do trabalho. Para a validação da mistura, são realizados ensaios com diferentes combinações de três ciclos de operação e duas ligas metálicas – aço SAE 1045 e liga de alumínio ASTM 1050 – para que os resultados de rugosidade superficial e redução percentual de massa dos corpos de prova sejam analisados. Os parâmetros avaliados foram a redução percentual na rugosidade da superfície usinada pelos parâmetros Ra, Rq, e Rz, e a quantidade de material extraído. Foi possível comprovar a eficácia da mistura proposta, com redução máxima de 90,93% na rugosidade dos corpos de prova da liga de alumínio, com melhoria constante dependendo do número de ciclos. Resultados positivos foram obtidos nas ligas SAE 1045, com redução máxima de 56,09%, mas com necessidade de um número de ciclos mais significativo para comprovar a relação linear entre a redução de rugosidade e o número de ciclos. A pasta abrasiva proposta mostrou-se promissora para aplicações em usinagem de ligas com baixa resistência mecânica, apresentando potencial dentro de propostas de baixo custo e ecologicamente corretas.

Palavras-chave: Usinagem por fluxo abrasivo, óleo de coco babaçu, óleo de moringa, acabamento superficial, pasta abrasiva, carbeto de silício.

EXPLORING ECO-FRIENDLY ALTERNATIVES: BABASSU AND MORINGA OILS AS VISCOELASTIC ELEMENTS IN ABRASIVE FLOW MACHINING FOR IMPROVE SURFACE QUALITY OF METALLIC ALLOYS

Abstract: Creating a new viscoelastic mixture for the AFM machining process based on babassu coconut and moringa vegetable oils, gypsum, and silicon carbide is the main objective of the work. For the validation of this mixture, tests with different combinations of three numbers of cycles and two metallic alloys – SAE 1045 steel alloy and ASTM 1050 aluminum alloy – are performed so that the results of surface roughness and mass reduction of the specimens are statistically analyzed. The evaluated parameters were the percentage reductions in the roughness of the machined surface by the Ra, Rq, and Rz parameters, and the amount of material extracted. It was possible to prove the effectiveness of the proposed mixture, with a maximum reduction of 90.93% in the roughness of the aluminum alloy specimens, with constant improvement depending on the number of cycles. Positive results were obtained in the SAE 1045 alloys, with a maximum reduction of 56.09%, but with the need for a more significant number of cycles to prove the linear relationship between reduction in roughness and the number of cycles. The proposed abrasive paste proved promising for application in machining alloys with low mechanical strength, showing potential within low-cost and environment-friendly proposals.

Keywords: Abrasive flux machining, babassu coconut oil, moringa oil, finishing, abrasive media, silicon carbide.

1. Introdução

O controle de qualidade superficial é crucial para muitos projetos complexos, pois condições inadequadas da superfície podem impactar negativamente o desempenho e

levar a repercussões financeiras (VERHEIJEN, 2006). Diferentes campos reconhecem a importância das condições da superfície, desde sua influência na geração de energia em parques eólicos (SAGOL, REGGIO e ILINCA, 2013) até seu impacto na dinâmica dos fluidos, transferência de calor (KADIVAR, TORMEY e MCGRANAGHAN, 2021), e tribologia (LI, LI, *et al.*, 2022; ALQALLAF e TEIXEIRA, 2021). Técnicas para mitigar esses efeitos indesejados na superfície evoluíram, enfatizando a Usinagem por Fluxo Abrasivo (UFA) como uma solução de usinagem não convencional. A UFA é conhecida por reduzir significativamente a rugosidade da superfície, especialmente em geometrias complexas onde métodos tradicionais são insuficientes (DIXIT, SHARMA e KUMAR, 2021; SINGH e RAVI SANKAR, 2020). No entanto, os altos custos associados à pasta abrasiva comumente utilizada têm dificultado a adoção generalizada desse método (DAVIES e FLETCHER, 1995; CHEEMA, VENKATESH, *et al.*, 2012; KAR, RAVIKUMAR, *et al.*, 2009).

Óleos derivados da flora brasileira, como o óleo de babaçu e moringa, têm sido explorados como alternativas ecologicamente corretas na usinagem convencional (BORK, GONÇALVES e GOMES, 2015; DE SOUZA, GONÇALVES, *et al.*, 2019; MUNHOZ, DIAS, *et al.*, 2020). Com potencial reconhecido em vários setores, incluindo as indústrias farmacêuticas e alimentícias, esses óleos prometem alternativas viáveis a materiais caros e importados, como o polímero poliborosiloxano (PBS) (PESSOA, FRANÇA, *et al.*, 2014). Dada sua aplicação bem-sucedida em usinagem e tribologia e a pesquisa limitada sobre sua utilidade em usinagem não convencional, este estudo apresenta uma nova pasta abrasiva para UFA, utilizando tanto óleo de moringa quanto de babaçu. A eficácia da pasta será avaliada por meio de testes em duas ligas metálicas distintas, SAE 1045 e ASTM 1050, avaliando tanto mudança na rugosidade da superfície quanto na remoção de material.

2. Processo de Usinagem por Fluxo Abrasivo

A Usinagem por Fluxo Abrasivo (UFA) é classificada como não convencional porque não envolve um processo com uma ferramenta de corte de geometria definida. A remoção de material é realizada ao passar um fluido abrasivo sob pressão sob a superfície de usinagem, produzindo tensão compressiva residual. Devido à remoção de material reduzido (da ordem de 1×10^{-3} g), é comumente utilizada como um processo de acabamento para obter um acabamento superficial com rugosidade da ordem de 1×10^{-9} m. Com avanços e melhorias na execução do processo, atualmente não há contraindicações para aplicar o método à usinagem de materiais, abrangendo desde ligas metálicas e não metálicas até o acabamento de materiais termoplásticos (MUNHOZ, DIAS, *et al.*, 2019).

Em sua forma básica, a UFA envolve forças estritamente mecânicas derivadas de processos de usinagem por jato d'água para melhorar o acabamento da superfície e remover fissuras e rebarbas de difícil acesso ou superfícies internas de máquinas, peças e produtos (BREMERSTEIN, POTTHOFF, *et al.*, 2015). Nas formas mais simplificadas do processo UFA, uma pasta abrasiva em um compartimento cilíndrico é empurrada sobre a superfície e usinada sob pressão por um pistão hidráulico. O número de atuadores hidráulicos e as direções em que a pasta passará sobre a superfície definem o tipo de processo: UFA *one-way* em processos de passagem unidirecional; UFA *two-way* quando há dois cilindros para a pasta abrasiva operando por dois cilindros, resultando em duas direções de passagem; e UFA *multiway*, quando há pelo menos dois cilindros para alimentar a pasta abrasiva e outros dois para receber a pasta, podendo operar em diferentes parâmetros individualmente (DIXIT, SHARMA e KUMAR, 2021). Em processos com desenvolvimento tecnológico mais acentuado, forças adicionais são

usadas para aprimorar os resultados finais, como campo magnético, energia ultrassônica, assistência rotacional e processos híbridos, como UFA magnetorreológico e eletroquímico (SINGH e SHAN, 2002; SHARMA, RAJESHA e KUMAR, 2015; SANKAR, MONDAL, *et al.*, 2009; BRAR, WALIA e SINGH, 2015; VAISHYA, WALIA e KALRA, 20015).

O controle dos parâmetros do processo primário visa, para o resultado final, a melhoria na rugosidade da superfície decorrente da remoção de material. Existem três níveis básicos de gestão relacionados ao ajuste da máquina, composição da pasta abrasiva e condição da peça/superfície a ser usinada. A interdependência de ambos os níveis de controle deve ser considerada para que o resultado desejado seja alcançado, com a possibilidade de um quarto nível de controle paramétrico em condições de processo complementares (DIXIT, SHARMA e KUMAR, 2021).

- **Parâmetros da máquina**

- o Pressão de extrusão;
- o Número de ciclos;
- o Volume da pasta;
- o Taxa de vazão da pasta.

- **Parâmetros da pasta**

- o Polímero;
 - Tipo;
 - Concentração.
- o Viscosidade;

- o Óleo;
 - Propriedades;
 - Concentração.
- o Temperatura;
- o Aditivos;
- o Abrasivo.
 - Concentração;
 - Tipo;
 - Tamanho da malha.

A pasta abrasiva que promove a remoção do material é composta por duas partes em uma proporção pré-estabelecida de elementos viscoelásticos e partículas abrasivas. A responsabilidade do componente viscoelástico é ser o meio de transporte para a partícula abrasiva atuar como a ferramenta de corte para o desbaste da superfície. A Mistura do material polimérico com a pasta abrasiva forma uma pasta semissólida com comportamento não newtoniano e propriedades reológicas que atendem às demandas do processo, especialmente em casos em que geometrias intrincadas e pequenas dimensões são as áreas a serem acessadas. Aditivos são adicionados à massa para alcançar valores específicos de viscosidade ou para processos mais complexos. Os componentes comumente usados para compor pastas abrasivas incluem silicões, borracha e pastas à base de elementos naturais (WALIA, SHAN e KUMAR, 2006; WANG e WENG, 2007; WEI, GAO e WANG, 2019). Mesmo com a existência de misturas abrasivas comerciais estabelecidas e recomendações teóricas para a composição percentual para aplicação em casos específicos, estudos recentes continuam a demonstrar resultados satisfatórios no desenvolvimento de arranjos diferentes de pastas abrasivas com desenhos diversos, muitos deles baseados em elementos naturais, destacando uma crescente preocupação ambiental nesta área de pesquisa (HASHMI, MALI, *et al.*, 2022; HASHMI, MALI e MEENA, 2022; WANG, CHEN, *et al.*, 2019). Os grãos abrasivos precisam de um comportamento de desgaste rápido e eficiente em uma superfície sólida. Por causa disso, materiais abrasivos têm uma dureza igual ou maior que sete na escala de Mohs, incluindo alumina eletrofundida, carburetos verde, preto e de boro, e carbetos de silício, que é o mais comumente utilizado. (SHACKELFORD, 2015; STACHOWIAK e BATCHELOR, 2013).

3. Óleos de coco babaçu e de moringa

Frutos de palmeira têm sido reconhecidos por seu potencial como fontes ricas de óleos vegetais, especialmente no setor alimentício. Esses óleos têm sido fundamentais na produção de itens culinários essenciais, como manteigas, cremes e como substitutos para óleos de cozinha tradicionais. O Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América destacou a magnitude dessa indústria em 2020, com a produção de óleo de palmiste e de coco totalizando impressionantes 87,8 milhões de toneladas (BAUER, 2021; USDA, 2020).

O clima tropical único e a posição geográfica do Brasil o tornam um terreno fértil para diversas espécies de palmeiras, muitas das quais ainda não foram completamente exploradas quanto ao seu potencial de produção de óleo. Entre elas, a palmeira de babaçu, nativa da Floresta Amazônica e cultivada principalmente em regiões como Maranhão e Tocantins, é de particular interesse. O óleo de babaçu, vital para a economia local, é comparável ao óleo de coco em sua composição, sendo rico em ácidos graxos saturados. Em outras partes do mundo, a *Moringa oleífera*, predominante em países tropicais, encontra um lugar nas tradições brasileiras. Desde a década de 1950, esta árvore tem sido essencial para o tratamento de água no nordeste do Brasil. Além disso, seu óleo, conhecido pelo sabor agradável, muitas vezes substitui o azeite na culinária e é celebrado por seus ácidos graxos e monoinsaturados (TEIXEIRA, 2008; SERRA, RODRIGUES, *et al.*, 2019) (SILVA, BAPTISTA, *et al.*, 2014) (PEREIRA, GALVÃO, *et al.*, 2016).

Embora os óleos de babaçu e moringa tenham deixado sua marca nos setores alimentício e medicinal, suas aplicações no campo da usinagem e tribologia ainda são relativamente pouco pesquisados. Alguns estudos, como os de De Souza, Gonçalves, *et al.* (2019) e Junior, Sales, *et al.* (2017), indicaram seu potencial como alternativas sustentáveis aos fluidos lubrificantes convencionais. No entanto, a extensão e a amplitude de seus benefícios, especialmente no que diz respeito às implicações ecológicas e econômicas para a indústria de usinagem, ainda precisam ser totalmente desvendadas.

4. Procedimentos Experimentais

O desempenho da pasta abrasiva foi avaliado em relação à usinagem de duas ligas com diferentes propriedades mecânicas e composições: aço SAE 1045 e a liga de alumínio ASTM 1050, com composição química (Tabela 1) e propriedades mecânicas (Tabela 2) descritas. As amostras foram projetadas com base na configuração da matriz de fixação da máquina de UFA, com um padrão de cabeça hexagonal, rosca métrica M10×1 com comprimento de 8 mm e uma área interna para usinagem com geometria circular e um diâmetro de 6 mm.

Tabela 1 – Composição química (% massa).

Elemento	SAE 1045	ASTM 1050
Fe	98,51 – 98,99	0,4
Si	***	0,25
Cu	***	0,05
Mn	0,6 – 0,9	0,005
Zn	***	0,005
Ti	***	0,003
C	0,42 – 0,5	***
S	0,05	***
P	0,04	***

Tabela 2 – Propriedades mecânicas das ligas.

Propriedades	SAE 1045	ASTM 1050
σ_e	450 MPa	65 MPa
σ_{max}	585 MPa	95 MPa
E	190 – 210 GPa	69 GPa
ν	0,27 – 0,30	0,33
Dureza (HRB)	84	32

A pasta abrasiva (Figura 1(b)) utilizada no estudo é composta por gesso, óleo de

babaçu, óleo de moringa e carbeta de silício. A inclusão de gesso e óleos vegetais garante uma viscosidade controlada. Os óleos de babaçu e moringa são favorecidos devido ao seu cultivo fácil e disponibilidade, sendo que o óleo de moringa atua como redutor de viscosidade. O carbeta de silício, conhecido por sua dureza e uso frequente em estudos de UFA, serve como componente abrasivo. A composição é principalmente baseada em um estudo de (MUNHOZ, 2017), resultando em uma mistura de 2085 g, com uma proporção de 60:40 de base para material abrasivo.

A máquina de UFA é uma ferramenta simples operada manualmente, com um flange que pode usinar nove amostras simultaneamente (Figura 1(c)). Os procedimentos iniciais envolvem a medição da rugosidade interna das amostras em três pontos diferentes usando um rugosímetro Instrutherm RP-200 (Figura 1(e)). Além disso, o peso tanto das amostras quanto da pasta é registrado usando uma balança Bioscale PA 2204 (Figura 1(f)). O processo de usinagem inclui três sessões de UFA com variações no número de ciclos: 5, 10 e 20. Cada ciclo denota o movimento do material através da área de usinagem em ambas as direções, positiva e negativa. Cinco amostras por tipo de material passam por cada processo de UFA, resultando em um total de 45 testes. Após a usinagem, as amostras são limpas com querosene, e sua rugosidade e peso são medidas novamente.

O objetivo do estudo é determinar a redução percentual na rugosidade e na massa antes e após a UFA, possibilitando uma análise estatística da relação entre o número de ciclos e a redução de rugosidade. O método estatístico de Scott-Knott, eficiente para a comparação de diferentes tratamentos, foi empregado para discernir essa relação, com um nível de significância definido em 5% para ambos materiais. (FISHER, 1958; SCOTT e KNOTT, 1974).

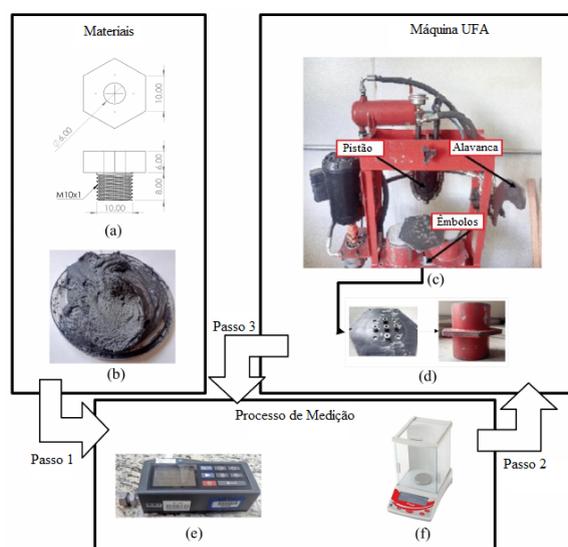


Figura 1 – Sequência experimental: formato dos corpos de prova (a) e mistura abrasiva usada (b); máquina UFA (c) e flange de fixação (d); rugosímetro (e) e balança de precisão (f).

5. Resultados e Discussão

Cada amostra usinada foi submetida a três medições consecutivas de massa e rugosidade para minimizar possíveis erros, sendo os valores médios e desvios padrão utilizados para análises estatísticas subsequentes. As Tabelas 3 e 4 exibem a média (\bar{X}), variância (σ^2) e desvio padrão (s) das medições pré-UFA. Para ambos os materiais, os valores de massa apresentam baixa variância, enquanto os parâmetros de rugosidade

mostram σ^2 significativo. Essa variância na rugosidade pode estar relacionada ao processo impreciso de fabricação das amostras, evidenciado por marcas de broca observáveis na superfície de análise (Figura 2(a)). Especificamente para o aço SAE 1045, a irregularidade do processo de oxidação aumentou ainda mais a variação da rugosidade, pois não afeta uniformemente toda a superfície. A utilização do método de análise de redução percentual pode ajudar a abordar esse problema.

Tabela 3 – Média, variância e desvio padrão obtidas pré-UFA da liga ASTM 1050.

P e ç a	Massa (g)			Ra (μm)			Rq (μm)			Rz (μm)		
	\bar{X}	σ^2 $\times 10^{-9}$	s $\times 10^{-5}$	\bar{X}	σ^2	s	\bar{X}	σ^2	s	\bar{X}	σ^2	s
	1	3,6292	10,0	10,0	1,56	0,04	0,21	1,98	0,07	0,27	8,73	1,02
2	3,4849	23,3	15,3	4,68	0,94	0,97	6,07	1,99	1,41	23,10	22,45	4,74
3	3,6122	10,0	10,0	2,89	0,02	0,14	3,59	0,03	0,18	14,76	2,07	1,44
4	3,6301	23,3	15,3	2,95	0,01	0,09	3,61	0,04	0,20	14,19	3,06	1,75
5	3,6443	3,3	5,8	2,58	0,01	0,07	3,37	0,04	0,20	12,30	2,32	1,52
6	3,6367	10,0	10,0	3,47	0,00	0,04	4,74	0,12	0,34	22,91	10,92	3,30
7	3,6168	103,3	32,1	2,43	0,03	0,18	3,02	0,01	0,09	11,91	5,04	2,24
8	3,6572	90,0	30,0	2,65	0,48	0,70	3,68	0,82	0,90	16,14	26,17	5,12
9	3,6271	10,0	10,0	3,71	0,86	0,93	4,58	1,87	1,37	16,16	49,28	7,02
10	3,6643	23,3	15,3	1,66	0,24	0,49	2,17	0,51	0,71	10,16	7,64	2,76
11	3,6160	23,3	15,3	1,87	0,15	0,38	3,55	7,29	2,70	8,00	5,01	2,24
12	3,5664	40,0	20,0	1,58	0,91	0,95	2,03	1,40	1,18	6,78	17,49	4,18
13	3,6175	40,0	20,0	2,51	0,16	0,40	3,15	0,17	0,41	12,75	1,11	1,06
14	3,6660	0,0	0,0	1,66	0,00	0,07	2,08	0,01	0,09	8,23	0,41	0,64
15	3,6266	23,3	15,3	2,84	0,23	0,48	3,81	0,45	0,67	17,40	18,45	4,30

Tabela 4 – Média, variância e desvio padrão obtidas pré-UFA da liga SAE 1045.

P e ç a	Massa (g)			Ra (μm)			Rq (μm)			Rz (μm)		
	\bar{X}	σ^2 $\times 10^{-9}$	s $\times 10^{-5}$	\bar{X}	σ^2	s	\bar{X}	σ^2	s	\bar{X}	σ^2	s
	1	10,4892	3,0	5,8	3,38	0,16	0,40	4,30	0,07	0,27	34,04	147,0
2	10,5130	70,0	26,5	2,29	0,03	0,18	2,87	0,31	0,56	13,53	8,5	2,90
3	10,4940	60,0	75,7	3,50	0,09	0,30	4,75	0,11	0,34	22,89	20,2	4,50
4	10,4945	10,0	11,5	2,90	0,00	4,00	3,46	0,33	0,58	16,30	1,6	1,20
5	10,4837	20,0	15,3	6,09	0,00	0,05	7,44	0,01	0,08	29,95	0,1	0,40
6	10,4509	10,0	10,0	3,19	0,02	0,15	4,06	0,02	0,13	17,64	0,8	0,90
7	10,4940	30,0	17,3	3,83	0,02	0,13	4,81	0,01	0,11	20,60	1,4	1,20
8	10,4633	3,0	5,8	4,37	0,72	0,85	5,54	1,42	1,19	25,26	34,9	5,90
9	10,5090	20,0	15,3	2,30	0,22	0,47	3,00	0,48	0,69	13,37	13,1	3,60
10	10,5546	300	17,3	3,01	0,28	0,53	3,84	0,59	0,76	17,43	13,6	3,70
11	10,5341	200,0	45,1	2,02	0,15	0,38	2,55	0,21	0,46	10,04	8,6	2,90
12	10,5231	10,0	10,0	2,98	0,24	0,49	3,70	0,19	0,44	14,11	1,9	1,40
13	10,5023	60,0	25,2	4,06	0,14	0,37	4,99	0,16	0,40	20,62	2,6	1,60
14	10,5772	10,0	10,0	2,38	0,15	0,39	2,98	0,50	0,71	14,73	3,5	1,90
15	10,4829	20,0	15,3	2,55	0,02	0,12	3,30	0,08	0,28	15,46	1,5	1,20

Após a realização da UFA, os dados, como mostrado nas Tabelas 5 e 6, indicam uma perda mínima de massa, com uma discrepância média entre 1×10^{-3} a 1×10^{-2} g. No entanto, houve uma variância notável nos valores de rugosidade, especialmente nos parâmetros médios de rugosidade (Rz). As amostras de liga de alumínio apresentaram uma variação de $10,858 \mu\text{m}$, e as amostras de aço SAE 1045 mostraram uma variação de $10,550 \mu\text{m}$, indicando a eficiência do abrasivo na redução dos picos de rugosidade da superfície. O teste de Scott-Knott (Tabelas 7 e 8), que avalia similaridades entre grupos de dados, confirmou a hipótese nula para ambos os tipos de materiais ao analisar dados

de massa das amostras. Essa conformidade com a hipótese é esperada, dada a baixa taxa de remoção de material e as limitações de medição da balança. No entanto, o teste confirmou uma redução significativa e eficaz na rugosidade das amostras.

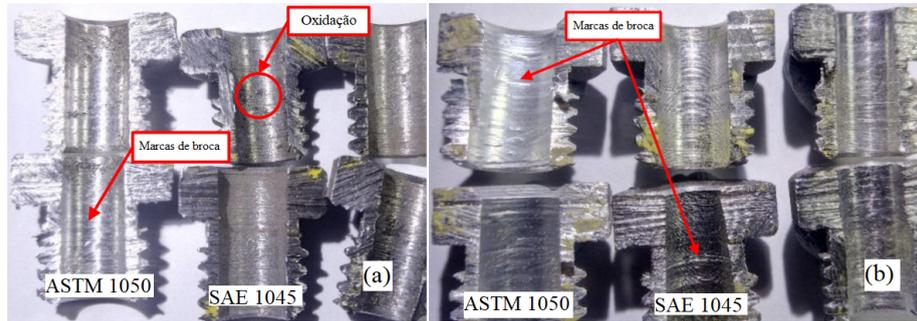


Figura 2 – Condição da superfície usinada pré-AFM (a) e pós-AFM (b).

Tabela 5 – Média, variância e desvio padrão obtidas pré-UFA da liga ASTM 1050.

P e ç a s	C i c l o s	Massa (g)			Ra (µm)			Rq (µm)			Rz (µm)		
		\bar{X}	σ^2 $\times 10^{-9}$	s $\times 10^{-5}$	\bar{X}	σ^2	s	\bar{X}	σ^2	s	\bar{X}	σ^2	s
		1	5	3,6258	10,0	10,0	0,80	0,003	0,05	0,98	0,01	0,08	3,36
2	5	3,4842	3,3	5,8	0,90	0,034	0,18	1,11	0,08	0,28	4,16	2,70	1,70
3	5	3,6101	0,0	0,0	0,84	0,022	0,15	1,04	0,03	0,17	3,20	0,00	0,20
4	5	3,6287	70,0	26,5	0,83	0,000	0,02	0,98	0,00	0,02	3,01	0,10	0,30
5	5	3,6439	43,3	20,8	1,11	0,090	0,30	1,40	0,29	0,54	5,21	6,80	2,60
6	10	3,6250	3,3	5,8	0,28	0,002	0,05	0,33	0,00	0,05	1,01	0,00	0,20
7	10	3,6111	30,0	17,3	0,41	0,026	0,16	0,51	0,06	0,24	1,80	1,00	1,00
8	10	3,6490	13,3	11,5	0,22	0,001	0,03	0,28	0,00	0,03	1,14	0,00	0,10
9	10	3,6212	70,0	26,5	0,57	0,015	0,12	0,68	0,03	0,18	1,94	0,80	0,90
10	10	3,6579	70,0	26,5	0,32	0,000	0,02	0,37	0,00	0,03	1,12	0,00	0,00
11	20	3,6092	43,3	20,8	0,90	0,000	0,01	1,10	0,00	0,06	3,32	0,10	0,30
12	20	3,5598	43,3	20,8	0,50	0,005	0,07	0,62	0,01	0,10	2,12	0,40	0,60
13	20	3,6094	130,0	36,1	0,64	0,001	0,03	0,75	0,00	0,05	2,16	0,20	0,50
14	20	3,6631	40,0	20,0	0,57	0,001	0,03	0,70	0,00	0,03	2,72	0,20	0,40
15	20	3,6231	93,3	30,6	0,98	0,065	0,25	1,21	0,11	0,33	4,38	1,80	1,30

Tabela 6 – Média variância e desvio padrão obtidas pré-UFA da liga SAE 1045.

P e ç a s	C i c l o s	Massa (g)			Ra (µm)			Rq (µm)			Rz (µm)		
		\bar{X}	σ^2 $\times 10^{-9}$	s $\times 10^{-5}$	\bar{X}	σ^2	s	\bar{X}	σ^2	s	\bar{X}	σ^2	s
		1	5	10,4726	63,3	25,2	1,76	0,19	0,44	2,18	0,27	0,50	8,42
2	5	10,5047	23,3	15,3	1,25	0,14	0,37	1,54	0,23	0,48	6,03	4,23	2,06
3	5	10,4832	23,3	15,3	2,06	0,02	0,09	2,60	0,02	0,15	10,07	0,73	0,86
4	5	10,4849	30,0	17,3	1,22	0,08	0,29	1,56	0,16	0,40	6,43	2,54	1,60
5	5	10,4610	70,0	26,5	1,69	0,03	0,13	2,19	0,02	0,14	9,08	0,43	0,66
6	10	10,4350	563,3	75,1	2,08	0,03	0,13	2,69	0,03	0,17	10,02	0,03	0,17
7	10	10,4855	13,3	11,6	2,70	0,32	0,55	3,29	0,50	0,71	11,97	10,32	3,21
8	10	10,4533	3,3	5,8	2,16	0,02	0,15	2,68	0,02	0,16	10,20	0,85	0,92
9	10	10,5128	70,0	26,5	1,02	0,01	0,07	1,28	0,01	0,09	5,53	0,04	0,20
10	10	10,5351	13,3	11,6	1,11	0,01	0,08	1,47	0,01	0,10	6,46	0,17	0,41
11	20	10,5217	3,3	5,8	0,76	0,00	0,06	0,94	0,01	0,09	3,83	0,20	0,45

P e ç a s	C i ç l o s	Massa (g)			Ra (µm)			Rq (µm)			Rz (µm)		
		\bar{X}	σ^2 $\times 10^{-9}$	s $\times 10^{-5}$	\bar{X}	σ^2	s	\bar{X}	σ^2	s	\bar{X}	σ^2	s
		12	20	10,5139	10,0	10,0	2,80	0,14	0,38	3,27	0,02	0,14	12,09
13	20	10,5017	93,3	30,6	2,73	0,02	0,15	3,17	0,02	0,15	11,15	0,37	0,61
14	20	10,5738	30,0	17,3	1,70	0,02	0,16	2,11	0,07	0,26	8,02	1,81	1,34
15	20	10,4822	70,0	26,5	1,71	0,04	0,20	2,10	0,05	0,21	8,39	0,65	0,80

Os resultados da redução percentual na rugosidade são notáveis, pois demonstram que a pasta abrasiva removeu os picos da superfície quando em contato com a superfície do material, causando uma redução significativa no parâmetro Rz, o que consequentemente impacta os outros parâmetros de rugosidade. O efeito do número de ciclos na redução percentual da rugosidade, observado na Figura 3, indica que o alumínio reage mais intensamente à usinagem, enfatizando a redução de 90,93% no parâmetro Rz.

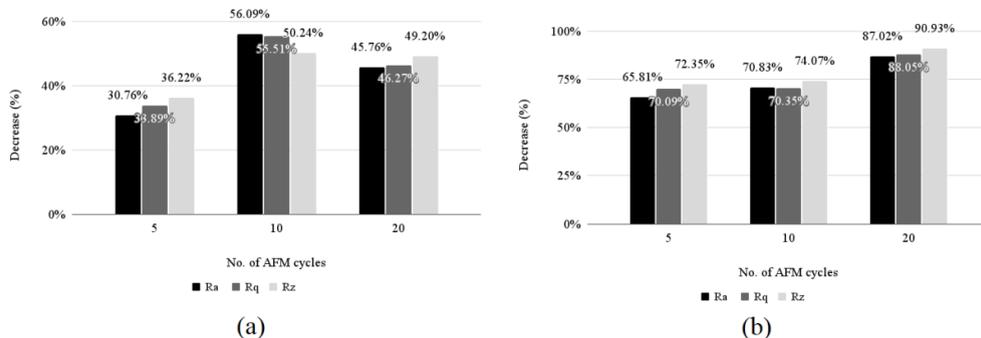


Figura 3 – Redução percentual nos parâmetros de rugosidade nos corpos de prova de (a) aço SAE 1045 e (b) ASTM 1050.

Para a liga de alumínio, há também uma tendência crescente na redução percentual em função do número de ciclos (como demonstrado na Figura 3), com os melhores resultados de rugosidade obtidos em peças usinadas com 20 ciclos. Para o aço SAE 1045, mesmo com uma tendência linear positiva em três ciclos de operação, os valores de R² (Tabela 9) apontam para um ajuste baixo do modelo linear, com o melhor resultado de redução percentual ocorrendo após dez ciclos. As propriedades mecânicas superiores podem explicar esse fato em comparação com a liga de alumínio, e no final do ciclo de vida da pasta abrasiva para esse material, uma hipótese que estudos futuros podem verificar aplicando mais ciclos de usinagem.

Tabela 7 – Teste de Scott-Knott: liga SAE 1045.

Ciclos	Massa (g)	Ra (µm)	Rq (µm)	Rz (µm)
***	10,524	2,803	3,505	14,992
***	10,496	3,635	4,426	23,342
***	10,497	3,343	4,249	18,861
5	10,519	1,941	2,317	9,561
10	10,481	1,596	2,014	11,616
20	10,484	1,813	2,283	9,582

Tabela 8 – Teste de Scott-Knott: liga ASTM 1050.

Ciclos	Massa (g)	Ra (µm)	Rq (µm)	Rz (µm)
***	3,619	2,094	2,924	10,632
***	3,600	2,969	3,721	14,617
***	3,641	2,784	3,638	15,456
5	3,613	0,716	0,875	2,939

10	3,599	0,896	1,103	3,791
20	3,628	0,361	0,435	1,401

Tabela 9 – Coeficiente de determinação (R^2) para a aproximação linear das reduções percentuais em função do número de ciclos.

	SAE 1045	ASTM 1050
Ra	0,181	0,989
Rq	0,164	0,901
Rz	0,505	0,939

A liga ASTM 1050 apresentou uma rugosidade média favorável de $0,804 \mu\text{m}$, com base no parâmetro de rugosidade quadrático Rq. Em contraste, a liga SAE 1045 obteve uma média mais alta de $2,204 \mu\text{m}$ usando o mesmo parâmetro. Embora marcas de usinagem, visíveis na Figura 2, permaneçam após o tratamento, a pasta abrasiva reduziu efetivamente a rugosidade da superfície para ambos os materiais e eliminou a oxidação na liga de aço carbono. Isso destaca o potencial de pastas abrasivas econômicas, especialmente para materiais com atributos mecânicos inferiores. Uma melhoria potencial poderia surgir aumentando a viscosidade da pasta. Notavelmente, em processos da Extrude Hone (2023), a pasta utilizada é mais densa e não aderente. No entanto, devido às limitações do equipamento ($P_{\text{max}} = 5 \text{ bar}$) no estudo atual, o aumento de viscosidade não foi viável. A aderência decorre principalmente do óleo de babaçu. A viscosidade da pasta abrasiva diminuiu após a aplicação de pressão, possivelmente devido à fragmentação do gesso ou ao aumento das temperaturas, afetando as forças coesivas dentro da mistura. Essa teoria exigiria uma análise adicional do material antes e após a usinagem para validação.

6. Conclusões

Este estudo introduziu uma nova composição de pasta abrasiva para o processo de UFA, utilizando componentes viscoelásticos dos óleos vegetais de babaçu e moringa, gesso para correção de viscosidade e carbeto de silício como material abrasivo. Uma proporção de 60:40 de componentes viscoelásticos para abrasivos reduziu efetivamente a rugosidade da superfície das ligas metálicas testadas. A condição das superfícies, com marcas, sulcos e pontos de oxidação, permitiu uma clara comparação dos efeitos da pasta abrasiva, suportada por uma redução mensurável na rugosidade.

A pasta abrasiva apresentou resultados positivos na rugosidade da superfície para ambas as ligas testadas. A melhoria mais substancial foi observada na liga ASTM 1050 após 20 ciclos de UFA, destacando uma correlação linear entre a suavidade da superfície e o número de ciclos de UFA. As amostras de aço SAE 1045, embora apresentassem uma redução menos pronunciada, ainda mostraram uma diminuição significativa de 56,09% no parâmetro de rugosidade Ra. Exames visuais pós-processo indicaram um acabamento mais suave e brilhante, com pontos de oxidação nas amostras de SAE 1045 tornando-se invisíveis após o tratamento.

A composição introduzida da pasta abrasiva mostra um grande potencial para a usinagem de ligas metálicas por UFA, especialmente aquelas com menor resistência mecânica. Pesquisas futuras devem considerar exames microscópicos pós-processo para entender melhor o ciclo de vida da pasta e seus efeitos na redução da rugosidade em ligas variadas.

Referências

- ALQALLAF, J.; TEIXEIRA, J. A. *Blade roughness effects on compressor and engine performance - a CFD and thermodynamic study*. Aerospace, 8, n. 11, 2021. 330.
- BAUER, L. C. *Caracterização do óleo bruto de babaçu (Orbignya phalerata Mart.) obtido por*

diferentes métodos de extração e sua aplicação na formulação de emulsões do tipo água em óleo. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos alimentos. Itapetinga, BA, p. 148. 2021.

BORK, C. A. S.; GONÇALVES, J. F. D. S.; GOMES, T. O. *The jatropa curcas vegetable base soluble cutting oil as a renewable source in the machining of aluminum alloy 7050-T7451.* Industrial Lubrication and Tribology, 67, n. 2, 2015. 181-195.

BRAR, B. S.; WALIA, R. S.; SINGH, V. P. *Electrochemical-aided abrasive flow machining (ECA2FM) process: a hybrid machining process.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 79, 2015. 329-342.

BREMERSTEIN, T. et al. *Wear of abrasive media and its effect on abrasive flow machining results.* Wear, 342-343, 2015. 44-51.

CHEEMA, M. S. et al. *Developments in abrasive flow machining: a review on experimental investigations using abrasive flow machining variants and media.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 226, n. 12, 2012. 1951-1962.

DA SILVA, M. J. F. et al. *Development and characterization of a babassu nut oil-based moisturizing cosmetic emulsion with a high sun protection factor.* RSC Advances, 10, 2020. 26268-26276.

DAVIES, P. J.; FLETCHER, A. J. *The assessment of the rheological characteristics of various polyborosiloxane/grit mixtures as utilized in the abrasive flow machining process.* Proc. Inst. Mech. Eng. Part C: J. Mech. Eng. Sci., 209, n. 6, 1995. 409-418.

DE SOUZA, M. C. et al. *Use of Jatropa and Moringa oils for lubricants: Metalworking fluids more environmental-friendly.* Industrial Crops and Products, 129, 2019. 594-603.

DIXIT, N.; SHARMA, V.; KUMAR, P. *Research trends in abrasive flow machining: A systematic review.* Journal of Manufacturing Processes, 64, 2021. 1434-1461.

EXTRUDE HONE. *AFM.* Extrude Hone, 2023. Disponível em: <<https://www.extrudehoneafm.com/>>. Acesso em: 10 jun 2023.

FISHER, W. K. *On grouping for maximum homogeneity.* Journal of the American Statistical Association, 53, n. 284, 1958. 789-798.

HASHMI, A. W. et al. *A newly developed coal-ash-based AFM media characterization for abrasive flow finishing of FDM printed hemispherical ball shape.* International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), 2022. 1955-2505.

HASHMI, A. W.; MALI, H. S.; MEENA, A. *Design and fabrication of a low-cost one-way abrasive flow finishing set-up using 3D printed parts.* Materials Today: Proceedings, 62, n. 14, 2022. 7554-7563.

JAIN, R. K.; JAIN, V. K. *Optimum selection of machining conditions in abrasive flow machining using neural network.* Journal of Materials Processing Technology, 108, n. 1, 2000. 62-67.

JUNIOR, A. S. A. et al. *Lubri-cooling and tribological behavior of vegetable oils during milling of AISI 1045 steel focusing on sustainable manufacturing.* Journal of Cleaner Production, 156, 2017. 635-647.

KADIVAR, M.; TORMEY, D.; MCGRANAGHAN, G. *A review on turbulent flow over rough surfaces: Fundamentals and theories.* International Journal of Thermofluids, 10, 2021. 100077.

KAR, K. K. et al. *Preferential Media for Abrasive Flow Machining.* J. Manuf. Sci. Eng., 131, n. 1, 2009. 011009.

LI, B. et al. *Contact mechanics in tribological and contact damage-related problems: A review.* Tribology International, 171, 2022. 107534.

MUNHOZ, M. R. *Estudo de caso de uma pasta abrasiva utilizando óleo de oiticica em um equipamento de usinagem por fluxo abrasivo.* Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, PR, p. 155. 2017.

MUNHOZ, M. R. et al. *Abrasive Flow Machining using Abrasive Paste with Oiticica Oil.* International Journal of Advanced Engineering Research and Science, 6, n. 5, 2019. 117-122.

MUNHOZ, M. R. et al. *Analysis of the surface roughness obtained by the abrasive flow machining process using an abrasive paste with oiticica oil.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 106, 2020. 5061-5070.

- PEREIRA, F. S. G. et al.** *The versatility of the moringa oleifera oil in sustainable applications*. Oilseeds & fats Crops and Lipids, 23, n. 6, 2016. 7.
- PESSOA, R. et al.** *Microemulsion of babassu oil as a natural product to improve human immune system function*. Drug Design, Development and Therapy, 9, 2014. 21-31.
- SAGOL, E.; REGGIO, M.; ILINCA, A.** *Issues concerning roughness on wind turbine blades*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 23, 2013. 514-525.
- SANKAR, M. R. et al.** *Experimental investigations and modeling of drill bit-guided abrasive flow finishing (DBG-AFF) process*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 42, 2009. 678-688.
- SCOTT, A. J.; KNOTT, M. A.** *A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance*. Biometrics, 30, n. 3, 1974. 507-512.
- SERRA, J. L. et al.** *Alternative sources of oils and fats from Amazonian plants: Fatty acids, methyl tocols, total carotenoids and chemical composition*. Food Research International, 116, 2019. 12-19.
- SHACKELFORD, J. F.** *Introduction to materials science for engineers*. 8. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2015. 696 p. ISBN 978-0133826654.
- SHARMA, A. K. V. G.; RAJESHA, S.; KUMAR, P.** *Experimental investigations into ultrasonic-assisted abrasive flow machining (UAAFM) process*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 80, 2015. 477-793.
- SILVA, M. O. et al.** *Estudo do processo de extração do óleo de moringa oleifera lam utilizando ultrassom*. Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ, n. 20, 2014.
- SINGH, S.; RAVI SANKAR, M.** *Development of polymer abrasive medium for nanofinishing of microholes on surgical stainless steel using abrasive flow finishing process*. Proc Inst Mech Eng Part B: J Eng Manuf, 234, n. 3, 2020. 355-370.
- SINGH, S.; SHAN, H. S.** *Development of magneto abrasive flow machining process*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 42, n. 8, 2002. 953-959.
- STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W.** *Engineering Tribology*. 4. ed. Oxônia: Butterworth-Heinemann, 2013. ISBN 978-0123970473.
- TEIXEIRA, M. A.** *Babassu - a new approach for an ancient brazilian biomass*. Biomass Bioenergy, 32, 2008. 857-864.
- USDA.** *Oil Seed: World markets and trade*. USDA, 2020. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/oilseeds.pdf>>. Acesso em: 10 jun 2023.
- VAISHYA, R.; WALIA, R. S.; KALRA, P.** *Design and development of hybrid electrochemical and centrifugal force assisted abrasive flow machining*. Materials Today: Proceedings, 2, n. 4-5, 2015. 3327-3341.
- VERHEIJEN, E.** *A survey on roughness measurements*. Journal of Sound and Vibration, 293, n. 3-5, 2006. 784-794.
- VILAS BÔAS, R. N. et al.** *Continuous production of monoacylglycerol via glycerolysis of babassu oil by immobilized Burkholderia cepacia lipase in a packed bed reactor*. Bioprocess and Biosystems Engineering, 44, 2021. 2205-2215.
- WALIA, R. S.; SHAN, H. S.; KUMAR, P.** *Parametric optimization of centrifugal force-assisted abrasive flow machining (CFAAFM) by the Taguchi method*. Materials and Manufacturing Processes, 21, n. 4, 2006. 375-382.
- WANG, A. C.; WENG, S. H.** *Developing the polymer abrasive gels in AFM process*. Journal of Materials Processing Technology, 192-193, 2007. 486-490.
- WANG, T. et al.** *Study on key parameters of a new abrasive flow machining (AFM) process for surface finishing*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 101, 2019. 39-54.
- WEI, H.; GAO, H.; WANG, X.** *Development of novel guar gum hydrogel based media for abrasive flow machining: Shear-thickening behavior and finishing performance*. International Journal of Mechanical Sciences, 157-158, 2019. 758-772.