

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

JOÃO VICTOR SEVERINO

**ELABORAÇÃO DE MASSA ALTERNATIVA PARA USINAGEM POR
FLUXO ABRASIVO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2018

JOÃO VICTOR SEVERINO

**ELABORAÇÃO DE MASSA ALTERNATIVA PARA USINAGEM POR
FLUXO ABRASIVO**

Trabalho de Conclusão de Curso ou Monografia ou Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica - DAMEC, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadora: Professora. Dra. Janaína Fracaro de Souza Gonçalves

Co orientadora: Professora Dra. Elizabeth Mie Hashimoto

LONDRINA

2018



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Londrina
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Coordenação de Engenharia Mecânica
Engenharia Mecânica



TERMO DE APROVAÇÃO

ELABORAÇÃO DE MASSA ALTERNATIVA PARA USINAGEM POR FLUXO ABRASIVO

por

JOÃO VICTOR SEVERINO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 7 de Dezembro de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Janaína Fracaro de Souza Gonçalves
Professora Orientadora

Amadeu Lombardi Neto
Membro titular

Roger Nabeyama Michels
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

Dedico este trabalho a todos que me apoiaram em momentos de dificuldade e aos professores que tanto me ensinaram.

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço à minha orientadora Profa. Dra. Janaína Fracaro de Souza Gonçalves, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

A Secretaria do Curso, pela cooperação.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

O sucesso é ir de fracasso em fracasso
sem perder o entusiasmo.
(Winston Churchill).

RESUMO

SEVERINO, João Victor. **Elaboração de massa alternativa para usinagem por fluxo abrasivo**. 2018. 52 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso Bacharelado em Engenharia - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2018.

O presente trabalho apresenta o estudo realizado para elaboração de uma massa alternativa para ser utilizada na usinagem por fluxo abrasivo, um processo de acabamento utilizado em geometrias de alta complexidade. Sendo uma massa de baixo custo e constituída por óleos naturais (coco babaçu e moringa), gesso e carbetto de silício, permite explorar a produção de óleo no nordeste do Brasil com a utilização de uma planta pouco explorada até então. No trabalho foi encontrada uma proporção para os componentes da massa, a massa foi elaborada e foi realizado o processo em 45 corpos de prova, para garantir repetibilidade. Assim foi possível estudar a eficiência da massa proposta em três materiais diferentes com números variados de passes. Foi observado uma redução de até 90% na rugosidade, porém, mesmo assim, observou-se que as marcas de broca causadas pelo processo de fabricação dos corpos de prova não foram eliminadas.

Palavras-chave: Usinagem por fluxo abrasivo. Óleo de coco babaçu. Acabamento. Meio abrasivo. Carbetto de silício.

ABSTRACT

SEVERINO, João Victor. **Elaboration of an alternative media for abrasive flux machining**. 2018. 52 pages. Final paper, Bachelor degree at Mechanical Engineering - Federal Technology University - Parana. Londrina, 2018.

The present work aims to develop an alternative media for abrasive flux machining, a finishing process used in highly complex geometries. Being a low-cost media constituted by natural oils (babaçu coconut and moringa), plaster and silicon carbide, allows to explore the oil production in the Brazil's northeast by the use of a few explored plant until now. It was found a proportion for the media components, the media was made and the process was realized on 45 proof bodies, to ensure repeatability. Therefore, this made the possible the study of the abrasive media efficiency on three different materials with varied numbers of cycles. A reduction about 90% in the toughness was observed, however, it was observed that the drill marks caused by the manufacturing process of the proof bodies were not fully eliminated.

Keywords: Abrasive Flux Machining. Babaçu coconut oil. Finishing. Abrasive media. Silicon Carbide.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Esquema da usinagem por fluxo abrasivo.	14
Figura 2. UFA realizada em bloco de motor automotivo.	16
Figura 3. Coco babaçu.	18
Figura 4. Materiais utilizados para fabricação dos corpos de prova.....	25
Figura 5. Corpos de prova.....	26
Figura 6. Massa abrasiva.	27
Figura 7. Máquina de usinagem por fluxo abrasivo.	28
Figura 8. Rugosímetro Instrutherm RP-200.....	29
Figura 9. Fluxograma do procedimento experimental.	30
Figura 10. Solubilização da massa abrasiva em querosene.	31
Figura 11. Área de medição da rugosidade.	31
Figura 12. Redução percentual de Ra x Número de ciclos.	41
Figura 13. Redução percentual de Rq x Número de ciclos.	41
Figura 14. Redução percentual de Rz x Número de ciclos.	42
Figura 15. Superfície interna dos corpos de prova antes e depois da UFA.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Porcentagem de ácidos graxos no óleo de coco babaçu.	18
Tabela 2. Composição dos materiais utilizados.	24
Tabela 3. Proporções utilizadas para elaboração da massa abrasiva.	27
Tabela 4. Dados de massa e rugosidade antes da UFA para aço SAE 1045.	32
Tabela 5. Dados de massa e rugosidade antes da UFA para aço SAE 4140.	33
Tabela 6. Dados de massa e rugosidade antes da UFA para alumínio.	34
Tabela 7. Dados de massa e rugosidade após UFA para aço SAE 1045.	35
Tabela 8. Dados de massa e rugosidade após UFA para aço SAE 4140.	36
Tabela 9. Dados de massa e rugosidade após UFA para alumínio.	37
Tabela 10. Variação de massa e rugosidade para cada corpo de prova.	38
Tabela 11. Teste de Scott-Knott para Alumínio.	39
Tabela 12. Teste de Scott-Knott para aço SAE 1045.	39
Tabela 13. Teste de Scott-Knott para aço SAE 4140.	40
Tabela 14. Medições de massa e rugosidade do alumínio antes da UFA.	49
Tabela 15. Medições de massa e rugosidade do aço SAE 4140 antes da UFA.	50
Tabela 16. Medições de massa e rugosidade do aço SAE 1045 antes da UFA.	51
Tabela 17. Medições de massa e rugosidade do alumínio após a UFA.	52
Tabela 18. Medições de massa e rugosidade do aço SAE 4140 após a UFA.	53
Tabela 19. Medições de massa e rugosidade do aço SAE 1045 após a UFA.	54

LISTA DE ABREVIATURAS

UFA	Usinagem por Fluxo Abrasivo
AFM	Abrasive Flow Machining
CFD	Computational Fluid Dynamics
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
ASTM	American Society for Testing and Materials
SAE	Society of Automotive Engineers

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVO	15
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3 JUSTIFICATIVA	16
4 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	20
5 METODOLOGIA	24
5.1 CORPOS DE PROVA.....	24
5.2 MEIO ABRASIVO	26
5.3 APARATO EXPERIMENTAL	28
5.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	29
6 RESULTADOS	32
7 CONCLUSÃO	44
REFERÊNCIAS	46
APÊNDICE	46

1 INTRODUÇÃO

Usinagem compreende os processos de desbaste mecânico, visando proporcionar uma forma a matéria prima. Existem diversos processos de usinagem, começando milhares de anos atrás com processos totalmente manuais e evoluindo ao ponto de ser totalmente automatizado e proporcionar alta precisão geométrica.

Estes processos se tornaram muito utilizados ao redor do mundo, compreendendo desde uma cópia de chave até a produção de peças automotivas e aeronáuticas. A produção em série com baixo custo é um atrativo para indústrias em geral e, devido a esse fato, houve e ainda há uma grande variedade de pesquisas relacionadas a esse tema com o intuito de aprimorar, reduzir custos ou criar novos processos.

Na área de usinagem é comum ocorrer a separação dos processos em duas áreas: processos com ferramentas de geometria definida e não definida. Em processos de usinagem com ferramentas de geometria não definida a remoção de material é realizada pela ação de grãos de materiais duros que são postos em interferência com o material da peça. Esse tipo de processo é muito utilizado para melhoria da exatidão dimensional, da exatidão geométrica e da qualidade superficial das peças, além de realizar alteração das características superficiais da peça (STOETERAU, 2017).

A usinagem por fluxo abrasivo (UFA) é um dos processos de usinagem que se enquadram na categoria de geometria não definida. Este processo consiste de grãos de material abrasivo dispersos em uma massa viscosa. A função da massa é permitir uma aplicação maior de pressão para realizar o escoamento dos grãos e garantir uma retirada uniforme de material. O esquema representado a seguir exemplifica o funcionamento básico do processo:

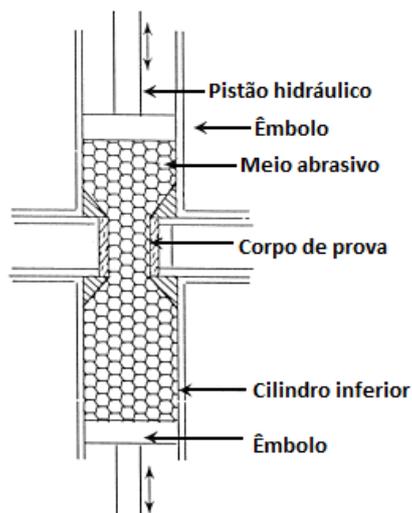


Figura 1. Esquema da usinagem por fluxo abrasivo.
Fonte: Jain R. K. e Jain, V. K. (2000) Adaptado.

Apesar deste processo alcançar um ótimo acabamento superficial o único meio de obter a massa abrasiva no Brasil é mediante a importação, elevando consideravelmente o custo do produto. Além disso, é um processo pouco utilizado e estudado devido à sua baixa divulgação no país, ou seja, ao desconhecimento do mesmo.

A retirada progressiva de material ocorre devido ao atrito do fluxo abrasivo na superfície do material, em muitos casos, nos sistemas tribológicos, o atrito é acompanhado pelo desgaste. Na usinagem por fluxo abrasivo, é necessário um número de ciclos para alcançar o acabamento superficial desejado, visto que o material removido é proporcional a distância de deslizamento percorrida pelo abrasivo e da força aplicada (SANTOS, 2015).

Mesmo com alto custo, a qualidade de acabamento da superfície pode melhorar drasticamente o desempenho do produto e o tempo de vida da peça, removendo concentradores de tensão e cantos vivos, produzindo raios controlados nas bordas, além de melhorar substancialmente a resistência mecânica e a resistência à fadiga dos componentes (MUNHOZ, 2017). Não obstante, o alto custo compensa os custos de ferramentas com geometria definida, já que muitas das vezes a região de acabamento é de impossível alcance para esse tipo de ferramenta.

2 OBJETIVO

Esse trabalho consiste na elaboração de uma massa abrasiva de baixo custo com componentes “verdes”, que possibilite um bom acabamento superficial resultante.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos consistem em:

- Utilizar os óleos de coco babaçu e moringa para obter uma formulação adequada da massa;
- Analisar massa e rugosidade dos corpos de prova;
- Comparar a variação de massa e rugosidade para diferentes números de ciclos.

3 JUSTIFICATIVA

No presente capítulo se encontra a justificativa para a realização do trabalho.

O principal argumento para a utilização da massa abrasiva na indústria para promover o polimento de peças de alto desempenho/precisão, ou seja, é a possibilidade de promover um bom acabamento superficial, polindo e retirando rebarbas, em locais dificilmente acessados por outros processos de usinagem, tais como tubulações longas, orifícios com pequeno diâmetro, ou mesmo uma peça com geometria muito irregular como, por exemplo, as pás de turbinas a gás, turbo compressores, turbinas de avião, entre outros. Um exemplo de utilização pode ser evidenciado no acabamento de blocos de motores para automóveis de alto desempenho, como mostrado na figura 2.



Figura 2. UFA realizada em bloco de motor automotivo.

Fonte: <https://seo.wearehone.com/2017/05/01/extrude-hone-afm-porting-of-a-1993-mustang-cobra-intake-manifold/> (Acessado em: 05/11/2018)

A aplicação de pressão sobre a massa confinada promove o escoamento desta sobre o material, de modo que ocorra uma retirada de material uniforme por toda a superfície em contato com o fluxo abrasivo.

É possível controlar a composição, vazão, viscosidade e temperatura da massa abrasiva no processo de fluxo abrasivo, possibilitando um bom controle da taxa de remoção de material.

O mesmo lote de massa pode ser utilizado em diferentes peças e materiais sem que haja a transferência de material removido de uma peça para outra.

Devido ao fato de o fluxo abrasivo promover alta qualidade de acabamento, removendo as imperfeições causadas por processos mecânicos, seu uso é ideal para alívio de tensões superficiais, polimento, remoção de rebarbas, otimização geométrica e remoção de cantos vivos.

Apesar de promover um bom acabamento final à peça, esse processo não é bastante disseminado na indústria devido ao seu alto custo, principalmente no Brasil, onde a massa é obtida somente mediante importação. Outros fatores que contribui para a baixa utilização desse processo é a falta de disseminação de informações, além disso o material utilizado para o meio abrasivo é o poliborosiloxano, um polímero de alto custo.

Tendo em vista esse argumento, o presente trabalho é uma tentativa de replicar uma massa abrasiva utilizando materiais de baixo custo, que promovam um bom acabamento superficial, divulgando a utilização do processo. A massa elaborada é baseada na massa de “vidraceiro”, que se trata de uma massa com característica abrasiva e possui este nome por ser bastante utilizada entre vidraceiros. A massa de “vidraceiro” é composta basicamente por gesso e óleo de linhaça. Porém, devido à fins alimentares, e a concentração de óleo por semente ser pequena, o óleo de linhaça possui um preço elevado de mercado, o que o torna inviável para aplicações industriais. Assim esse óleo será substituído pelo óleo de coco babaçu.

O babaçu, vegetal típico da região de Mossoró, Rio Grande do Norte, rebrota vigorosamente em enorme quantidade depois que a mata é queimada, esse fato levou a ideia do babaçu ser encarado com uma praga, já que ele brota facilmente e é difícil de ser exterminado, apenas recentemente esse óleo começou a ser utilizado na indústria farmacêutica.



Figura 3. Coco babaçu.

Fonte: <https://www.dicionariotupiguarani.com.br/dicionario/babacu/> (Acessado em: 05/11/2018)

Por se desenvolver em regiões mais secas a utilização do babaçu pode se tornar uma fonte de renda para a região, desenvolvendo a agricultura familiar, aumentando a taxa de empregos e valorizando o vegetal nativo dessa região.

Dois tipos de óleo podem ser obtidos: um para fins alimentícios e cosméticos e outro para fins industriais (com alto teor de ácido láurico). Esse óleo possui altos teores de ácidos graxos, ácidos oleicos, ácidos láuricos, mirísticos e caprílicos (ecycle, 2014). Sendo os dois primeiros os responsáveis por promover a característica de lubrificante ao óleo, justificando a escolha deste vegetal. A tabela 1 quantifica as porcentagens de ácidos graxos presentes no óleo de coco babaçu.

Tabela 1. Porcentagem de ácidos graxos no óleo de coco babaçu.

Ácidos graxos	Porcentagem
Ácido Caprílico	2,6 – 7,3
Ácido Cáprico	1,2 – 7,6
Ácido Láurico	40,0 – 55,0
Ácido Mirístico	11,0 – 27,0
Ácido Palmítico	5,2 – 11,0
Ácido Esteárico	1,8 – 7,4
Ácido Oleico	9 ,0– 20,0
Ácido Linoleico	1,4 – 6,6

Fonte: <http://www.campestre.com.br/oleos-vegetais/oleo-de-coco-de-babacu/oleo-de-coco-babacu-ficha-tecnica/> (Acessado em: 05/11/2018).

Levando em conta a condição e custo, esse óleo pode ser encontrado facilmente por cerca de U\$ 6 o quilo. Além do baixo custo a utilização do óleo vegetal possui a intenção de criar uma massa de característica sustentável e de fácil descarte (pelo fato de ser um produto natural).

4 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

Na sequência será realizada uma revisão bibliográfica em ordem cronológica sobre o tema.

Jain, V. K., Jain, R. K. e Kalra (1999) propôs o trabalho “Modelagem de um processo de usinagem por fluxo abrasivo: uma aproximação por rede neural”. Foi realizado o processo experimental utilizando corpos de prova de alumínio e uma mistura de massa de vidraceiro e carbeto de silício (SiC) em diversas proporções (de 33 a 45%) utilizando granulometrias de malha 100 a 240 e velocidades de 40 a 85 cm/min e número de ciclos variando entre 50 e 100. Ao comparar os resultados numéricos e experimentais foi possível validar o método utilizado, confirmando a possibilidade de sua utilização para os processos de UFA e estendendo para outros processos de abrasão.

Validando a eficácia do processo de rede neural, Jain, R. K e Jain, V. K (2000) publicou um artigo intitulado “Seleção dos parâmetros de usinagem ótimos para o fluxo abrasivo utilizando rede neural”. Utilizando as mesmas condições do artigo anterior foram obtidas condições ótimas para realizar o processo de fluxo abrasivo e também foi confirmado novamente a possibilidade de utilizar o processo de rede neural como simulação para a UFA. As condições ótimas foram: abrasivo malha 100 e concentração de 45%, velocidade de usinagem e 85 cm/min e 110 ciclos.

Jain, R. K e Jain, V. K (2001) publicou um artigo intitulado “Determinação da temperatura e energia específica no processo de usinagem por fluxo abrasivo” onde, levando em conta os parâmetros de processo propuseram um modelo para determinação da energia específica e das forças tangenciais no processo. Foi concluído que a energia específica no fluxo abrasivo é muito maior que no esmerilhamento, além disso a variação da malha de abrasivo não afetou significativamente esse parâmetro, porém foi observado que, quanto mais duro o material, maior foi a energia. Já o modelo para determinação da temperatura ainda precisa ser melhorado.

Sehijpal e Shan (2002) publicaram o artigo “Desenvolvimento de um processo de fluxo abrasivo magnético” visando aumentar a taxa de remoção do material implementando um campo magnético ao redor dos corpos de prova. A

massa utilizada foi composta de um abrasivo de características magnéticas, um polímero de base siliconada e hidrocarboneto em gel. O estudo concluiu que a adição de um campo magnético influencia positivamente na taxa de remoção de material e na rugosidade resultante, necessitando de um número menor de ciclos do que o utilizado no processo convencional.

Gorona et al. (2003) publicou o artigo “Investigação experimental das forças de corte e da densidade ativa de grãos durante a usinagem por fluxo abrasivo”. Visando obter um modelo teórico mais realista foi concluído que a pressão de extrusão, a concentração e o tamanho de grão do abrasivo afetam nas forças de corte, na densidade de grãos ativos e na rugosidade superficial.

Gorona, Jain e Lal (2006) deu continuidade ao trabalho anterior publicando o trabalho intitulado “Predição das forças durante a deformação do material na usinagem por fluxo abrasivo”. No estudo foram obtidos meios para estudar os modos de deformação elástica do conjunto grão-peça vislumbrando a influência das forças axiais e radiais, da profundidade de indentação do grão e da densidade ativa de grão na escala de deformação do material.

Fang et al. (2009) estudou a “Temperatura como monitor sensitivo para eficiência de trabalho na usinagem por fluxo abrasivo”. Concluiu-se que a temperatura da massa é essencial nos resultados, já que altera sua viscosidade. Nos experimentos foi observado um melhor desempenho com um meio abrasivo mais viscoso.

Kamal et al. (2009) propôs a “Avaliação do desempenho e caracterização reológica de uma recém desenvolvida massa de base de borracha butílica para o processo de fluxo abrasivo”. No teste foram utilizadas borracha natural e borracha butílica em conjunto com o óleo naftênico em corpos de prova de alumínio. Os autores conseguiram melhorar a rugosidade da peça em até 50% a rugosidade média dos corpos de prova.

Uhlmann, Mihotovic e Coenen (2009) estudaram a “Modelagem do processo de usinagem por fluxo abrasivo em materiais cerâmicos avançados”. Foram obtidos resultados com baixa rugosidade ao utilizar grãos de diamante como abrasivo, demonstrando a utilização deste processo em cerâmicas.

Com o objetivo de melhorar a superfície resultante do processo de usinagem por eletro erosão (utilizado em injetoras) Wang et al. (2009) estudou um “Método de polimento superficial uniforme de furos complexos na usinagem por fluxo abrasivo”.

Utilizando mecânica dos fluidos computacional (CFD) os autores conseguiram mapear a distribuição de tensão pela superfície usinada demonstrando uma boa redução na rugosidade.

Kenda et al. (2011) publicou o artigo “Integridade superficial de um aço ferramenta endurecido AISI D2 na usinagem por fluxo abrasivo”. Tendo em vista que, para acabamento no material utilizado, geralmente é utilizado o processo de usinagem por descargas elétricas (EDM), que gera micro trincas e altas tensões residuais na superfície do material o autor propôs o uso da UFA como alternativa, observando uma melhora no acabamento superficial, menores tensões residuais e uma melhor integridade da superfície após o processo.

Visando a “Investigação do processo de usinagem por fluxo abrasivo de uma via e a medição das forças axiais” Bähre, Brünnet e Swat (2012) publicaram o estudo sobre a influência de utilizar apenas uma via no ciclo de fluxo abrasivo e obtiveram como resultado uma boa redução da rugosidade com um baixo número de ciclos.

Uhlmann, Doits e Schimiedel (2013) publicaram o artigo “Desenvolvimento de um modelo para o material de uma massa visco elástica para usinagem por fluxo abrasivo”. Com o objetivo de melhorar os modelos computacionais os autores desenvolveram um modelo para ser utilizado para a massa, considerando-a como um material isotrópico. Utilizando o modelo generalizado de Maxwell os autores desenvolveram equações para caracterizar o meio abrasivo, necessitando realizar os experimentos para validarem seu modelo.

Pusavec e Kenda (2014), visando melhorar o processo de polimento na indústria ferramenteira propôs o uso de um processo de UFA alternativo onde o pistão, além de se mover axialmente também possui rotação. Utilizando uma simulação computacional, os autores obtiveram uma ótima redução da rugosidade superficial com um número de ciclos seis vezes menor em relação à UFA convencional. Porém ainda não há disponível no mercado uma máquina que seja capaz de aplicar o movimento utilizado.

Kumar, Murtaza e Walia (2014) propuseram a utilização de uma barra com formato helicoidal acoplada ao pistão da prensa hidráulica de modo a promover um movimento helicoidal ao meio abrasivo. O experimento resultou em um aumento significativo da taxa de remoção de material.

Munhoz (2017) propôs a elaboração de uma massa alternativa utilizando gesso e óleo de oiticica, com corpos de prova de três materiais diferentes. Obtendo uma boa redução da rugosidade superficial.

5 METODOLOGIA

Utilizando as informações apresentadas no capítulo anterior foi realizado a montagem do procedimento experimental de acordo com o seguinte roteiro:

- Conceber uma formulação adequada para a elaboração da massa;
- Utilizar os óleos de coco babaçu e moringa na formulação da massa;
- Determinação dos materiais a serem utilizados;
- Fabricar corpos de prova para serem utilizados;
- Melhorias no equipamento;
- Realizar o experimento e medições; e
- Realizar análise estatística dos dados obtidos.

5.1 CORPOS DE PROVA

Foi realizada a confecção dos corpos de prova. Sendo três diferentes materiais: aço SAE 1045, alumínio ASTM 1050 e aço SAE 4140. A tabela a seguir apresenta a composição química dos materiais citados:

Tabela 2. Composição dos materiais utilizados.

Composição (% em massa)	Material		
	Alumínio ASTM 1050	Aço SAE 1045	Aço SAE 4140
Fe	0,4	98,51 – 98,99	97,15 – 97,85
Si	0,25	---	---
Cu	0,05	---	---
Mn	0,005	0,6 – 0,9	0,75-1
Zn	0,005	---	---
Tl	0,003	---	---
C	---	0,42-0,5	0,38-0,43
S	---	0,05	0,04
P	---	0,04	0,035
Cr	---	---	0,8-1,1
Mo	---	---	0,15-0,25
Dureza (HRB)	32,00	84,00	92,00

Fonte: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017> (Acessado em: 05/11/2018)

Os dois primeiros foram fabricados a partir de uma barra sextavada e o aço 4140 fabricado a partir de uma barra redonda, para diferenciá-lo mais facilmente do aço 1045. Na figura é possível observar o aço SAE 4140 à esquerda, seguido do aço SAE 1045 e do alumínio:



Figura 4. Materiais utilizados para fabricação dos corpos de prova
Fonte: autoria própria;

A barra foi seccionada no tamanho dos corpos de prova, em seguida cada corpo terá em uma de suas extremidades usinada uma rosca para permitir a fixação no equipamento.

Ao ser realizado a secção da barra foi levado em consideração o *cutoff* máximo do rugosímetro de 8 mm, de modo que os corpos de prova devem possuir no mínimo essa medida para possibilitar a utilização do equipamento.

A figura a seguir exemplifica como são os corpos de prova projetados para os experimentos:

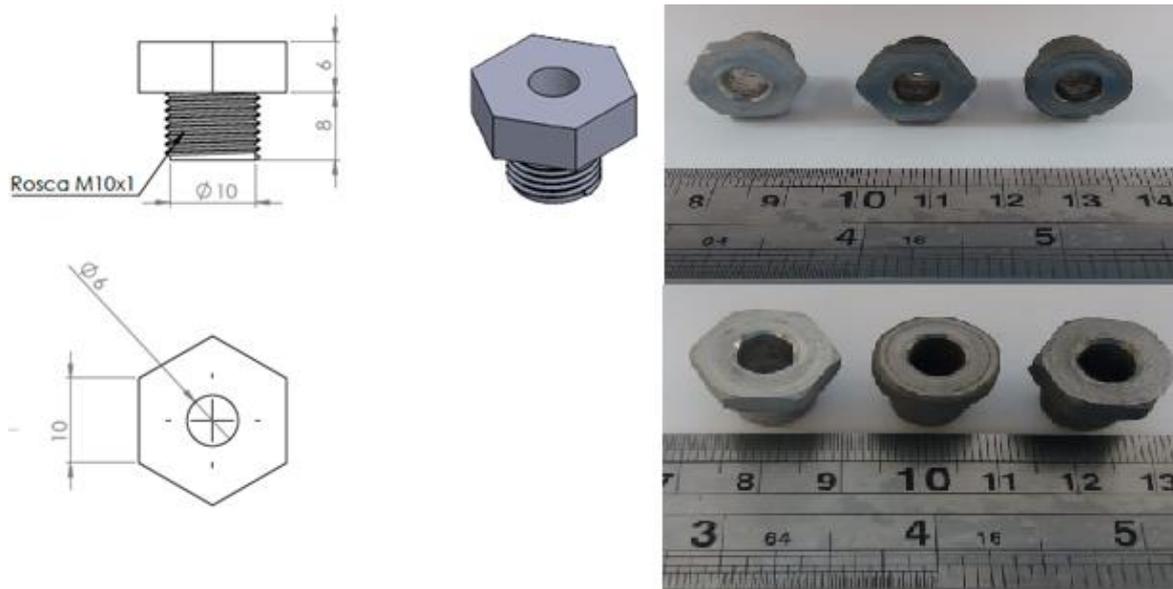


Figura 5. Corpos de prova
Fonte: Autoria própria.

5.2 MEIO ABRASIVO

A massa utilizada como condutora do abrasivo utilizada comercialmente é uma mistura de poliborosiloxano e abrasivo.

A massa abrasiva utilizada neste trabalho é composta por gesso, óleo de coco babaçu, óleo de moringa e carbeto de silício. A mistura de gesso com óleos vegetais foi proposta por Munhoz (2017), sendo escolhido o coco babaçu pela sua facilidade de plantio e o óleo de moringa para reduzir a viscosidade da mistura. Além disso, a Universidade Estadual do Rio Grande do Norte possui uma parceria com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, de modo que a primeira realiza estudos sobre a diversidade dos óleos vegetais enquanto a segunda estuda aplicações para estes óleos, já o carbeto de silício foi escolhido pelo fato de ser um abrasivo acessível, de alta dureza e por ser o abrasivo utilizado em grande parte dos trabalhos já realizados.

Em seus trabalhos Jain, R. K. e Jain, V. K. (2000) determinaram os parâmetros ótimos para a UFA, tais como concentração e granulometria do abrasivo. Já Munhoz (2017) utilizou uma proporção entre óleo e gesso para elaboração de uma massa abrasiva alternativa.

Primeiramente a massa será feita utilizando apenas o gesso e os óleos, as mesmas proporções utilizadas por Munhoz (2017), nas proporções indicadas na tabela a seguir:

Tabela 3. Proporções utilizadas para elaboração da massa abrasiva.

Material	Proporção (% em massa)
Gesso	75
Óleo de babaçu	20
Óleo de moringa	5

Fonte: Autoria própria.

Após a confecção da massa inicial é realizada a mistura de abrasivo. O abrasivo utilizado é o carбето de silício malha 100, em concentração de 45% em relação a massa final da mistura. A viscosidade resultante da massa será dependente da quantidade de abrasivo, dos óleos utilizados e da temperatura ambiente além de outros fatores químicos devido aos componentes utilizados.

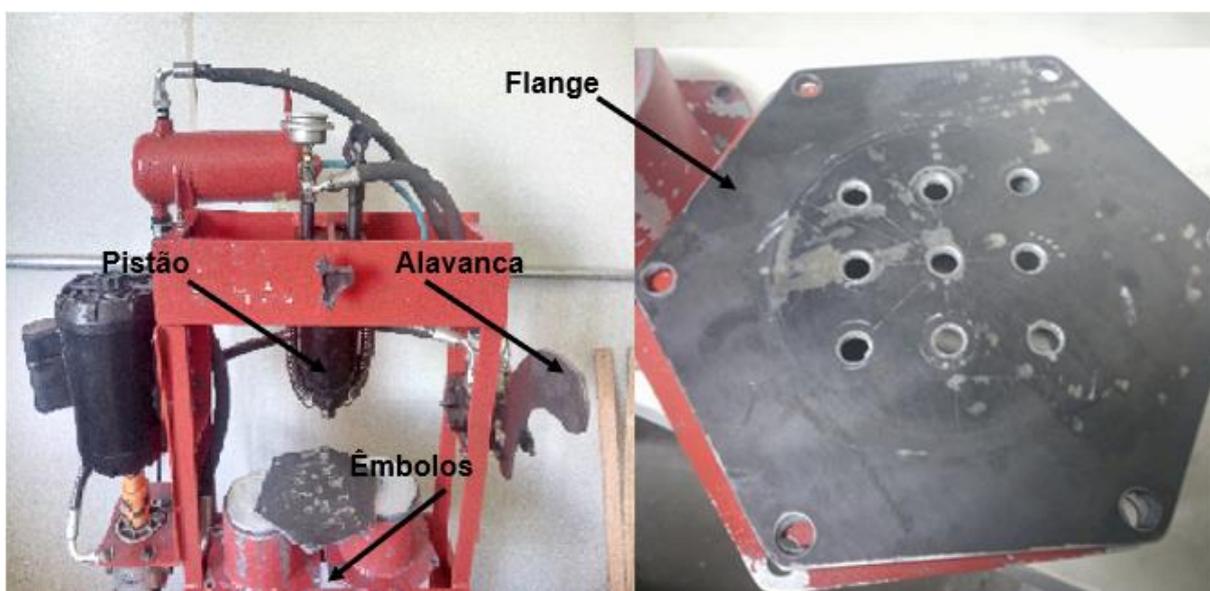
Para a elaboração da massa foi pesado 1 Kg de gesso, 249,63 g de óleo de coco babaçu e 1,46 g de óleo de moringa resultando em uma massa de 1251g. Dessa forma a massa de abrasivo utilizada será de 834 g, totalizando uma mistura final de 2085 g. A massa obtida pode ser vista na figura 6:



Figura 6. Massa abrasiva.
Fonte: Autoria própria.

5.3 APARATO EXPERIMENTAL

A máquina mostrada na figura 7 foi cedida pela UTPR, campos Londrina. Os cinco corpos de prova são fixados na flange que, por sua vez, é posicionada entre os cilindros. A seguir, posiciona-se o cilindro alinhado com o pistão hidráulico e aciona-se a alavanca, iniciando o processo.



**Figura 7. Máquina de usinagem por fluxo abrasivo.
Fonte: Autoria própria.**

Para realizar a aferição da massa e dos corpos de prova foi utilizada a balança analítica modelo Bioscale PA 2204.

Para pesar os componentes do meio abrasivo foi utilizada a balança Bioscale (o modelo não estava disponível na etiqueta de identificação).

Para realizar a medição da rugosidade dos corpos de prova foi utilizado um rugosímetro Instrutherm RP-200 conforme mostrado na Figura 8:



Figura 8. Rugosímetro Instrutherm RP-200.
Fonte: Autoria própria.

5.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Utilizando a balança de precisão foi aferida a massa inicial de cada corpo de prova três vezes e retirada a média desse valor.

Também foi realizada a medição da rugosidade superficial do furo em três pontos diferentes, girando a peça 120 graus a cada medição. Os parâmetros coletados foram Ra, Rq e Rz.

Ao aplicar pressão no cilindro, este conduz a massa para o outro lado realizando a retirada de material, o processo de ida e volta totaliza um ciclo. Para cada material foi realizada a UFA com 5, 10 e 20 ciclos, sendo que para cada número de ciclos haverão cinco corpos de prova do mesmo material. O fluxograma a seguir apresenta o procedimento utilizado para a realização do experimento:



Figura 9. Fluxograma do procedimento experimental.
Fonte: Autoria própria.

As diversas medidas, bem como a quantidade de corpos de prova são para fins estatísticos, de modo a amenizar os efeitos que os erros de paralaxe podem acarretar aos resultados.

Após a usinagem foi realizada a limpeza das peças de modo a eliminar quaisquer resquícios da massa.

Realizando alguns testes observou-se que o querosene atua como solvente, de modo que ele solubiliza os óleos que compõem a massa fazendo com que as partículas de gesso e de carbeto de silício decantem, facilitando a limpeza dos corpos de prova. A figura 10, exemplifica a solubilização da massa abrasiva no querosene, nela é possível observar a deposição do abrasivo no fundo do recipiente.



Figura 10. Solubilização da massa abrasiva em querosene.
Fonte: Autoria própria.

Em seguida mediu-se a massa e rugosidade dos corpos de prova utilizando os mesmos equipamentos de medição para evitar erros de medição devido as tolerâncias dos equipamentos.

Cada dado foi coletado três vezes para cada corpo de prova e retirada uma média desses valores. A região a ser medida é possível ser visualizada na figura a seguir:



Figura 11. Área de medição da rugosidade.
Fonte: Autoria própria.

Após a coleta dos dados ao fim do experimento, os dados de massa e rugosidade foram tabelados, assim como foram analisados a perda de massa e redução de rugosidade, obtidos a partir da diferença entre os dados antes e após o processo.

Além disso, análises estatísticas foram realizadas com finalidade de verificar a semelhança dos dados analisados.

6 RESULTADOS

Após a realização do experimento foi calculada a média, desvio padrão e a variância variáveis em estudo. O presente capítulo trata sobre os resultados do experimento, de modo a exemplificá-los e discuti-los.

A tabela a seguir apresenta as médias (\bar{X}), variâncias (σ^2) e desvios-padrão (s) das medidas coletadas antes do processo de UFA, os dados utilizados se encontram nos apêndices.

A tabela 4 apresenta as peças de aço SAE 1045 antes da UFA, nela é possível observar que há uma variância pequena em relação aos dados de massa, porém para rugosidade as peças possuem uma variação significativa entre si, tal fato é um limitante para as análises estatísticas, dificultando o tratamento dos dados. Para uma melhor análise seria ideal dados iniciais mais homogêneos.

Tabela 4. Dados de massa e rugosidade antes da UFA para aço SAE 1045.

Peça	Aço SAE 1045											
	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	5,8	3,38	0,16	0,40	4,30	0,07	0,27	34,04	147	12,1
2	10,5130	70	26,5	2,29	0,03	0,18	2,87	0,31	0,56	13,53	8,5	2,9
3	10,4984	60	75,7	3,50	0,09	0,30	4,75	0,11	0,34	22,89	20,2	4,5
4	10,4945	10	11,5	2,90	0,00	0,04	3,46	0,33	0,58	16,30	1,6	1,2
5	10,4837	20	15,3	6,09	0,00	0,05	7,44	0,01	0,08	29,95	0,1	0,4
6	10,4509	10	10,0	3,19	0,02	0,15	4,06	0,02	0,13	17,64	0,8	0,9
7	10,4940	30	17,3	3,83	0,02	0,13	4,81	0,01	0,11	20,60	1,4	1,2
8	10,4633	3	5,8	4,37	0,72	0,85	5,54	1,42	1,19	25,26	34,9	5,9
9	10,5209	20	15,3	2,30	0,22	0,47	3,00	0,48	0,69	13,37	13,1	3,6
10	10,5546	30	17,3	3,01	0,28	0,53	3,84	0,59	0,76	17,43	13,6	3,7
11	10,5341	200	45,1	2,02	0,15	0,38	2,55	0,21	0,46	10,04	8,6	2,9
12	10,5231	10	10,0	2,98	0,24	0,49	3,70	0,19	0,44	14,11	1,9	1,4
13	10,5023	60	25,2	4,06	0,14	0,37	4,99	0,16	0,40	20,62	2,6	1,6
14	10,5772	10	10,0	2,38	0,15	0,39	2,98	0,50	0,71	14,73	3,5	1,9
15	10,4829	20	15,3	2,55	0,02	0,12	3,3	0,08	0,28	15,46	1,5	1,2

Fonte: Autoria própria.

A tabela 5 apresenta os parâmetros iniciais para o aço SAE 4140. Assim como para o SAE 1045 os dados de massa são homogêneos entre si enquanto os de rugosidade apresentam variações significativas entre as peças.

Tabela 5. Dados de massa e rugosidade antes da UFA para aço SAE 4140.

Peça	Aço SAE 4140											
	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	9,3677	23,3	15,3	2,13	0,14	0,38	2,66	0,19	0,43	12,09	2,93	1,71
2	9,5063	93,3	30,6	2,35	0,03	0,16	2,96	0,00	0,07	11,85	0,67	0,82
3	9,7756	103	32,1	1,73	0,00	0,05	2,02	0,01	0,08	8,48	2,84	1,69
4	9,4967	3,33	5,77	2,90	1,00	1,00	3,73	1,37	1,17	15,51	35,11	5,93
5	9,7044	30	17,3	2,49	0,20	0,45	3,08	0,06	0,24	15,14	2,01	1,42
6	9,3999	40	20	5,26	0,02	0,15	6,49	0,08	0,28	25,74	0,98	0,99
7	9,3327	13,3	11,5	4,26	0,04	0,20	5,37	0,10	0,32	22,89	2,38	1,54
8	9,3212	23,3	15,3	3,73	0,23	0,48	4,78	0,05	0,23	18,90	3,24	1,80
9	9,5257	123	35,1	3,82	0,08	0,28	4,90	0,01	0,08	22,41	0,02	0,13
10	9,6382	30	17,3	2,35	0,07	0,26	2,73	0,23	0,48	12,71	4,27	2,07
11	9,5108	123	35,1	4,44	1,25	1,12	5,43	2,06	1,43	21,67	19,88	4,46
12	9,9437	90	30	2,88	0,35	0,59	3,72	0,64	0,80	14,93	2,78	1,67
13	9,3934	103	32,1	4,18	0,49	0,70	5,11	1,35	1,16	21,97	32,87	5,73
14	9,4665	70	26,5	2,70	0,22	0,47	3,31	0,38	0,62	11,34	2,02	1,42
15	9,4836	53,3	23,1	2,24	0,04	0,21	2,62	0,003	0,05	11,88	24,44	4,94

Fonte: Autoria própria.

Já a tabela 6 apresenta os parâmetros para o alumínio. Da mesma forma que para os aços é possível observar homogeneidade em relação à massa e uma divergência em relação à rugosidade das peças.

A divergência na rugosidade das peças citadas se deve principalmente ao processo de fabricação, que não garante uma constância, podendo ser observado marcas de broca nas superfícies a serem analisadas, além disso os aços apresentaram oxidação que, por não acontecer uniformemente também ajudaram a destoar os dados iniciais entre os corpos de prova do mesmo material.

Tabela 6. Dados de massa e rugosidade antes da UFA para alumínio.

Peça	Alumínio											
	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	1,01
2	3,4849	23,3	15,3	4,86	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	3,6189	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	17,4	18,45	4,3

Fonte: Autoria própria.

Após ser realizada a UFA foram montadas as seguintes tabelas 7, 8 e 9 com os dados coletados para 1045, 4140 e alumínio respectivamente. Nas peças 1 a 5 foram realizados 10 ciclos, já nas peças de 6 a 10 foram 20 ciclos, por fim, nas peças de 11 a 15 foram 5 ciclos.

Ao observar a tabela 7 é possível observar uma pequena perda de massa, na ordem de 10^{-3} a 10^{-2} , nos corpos de prova e uma redução de rugosidade mais significativa, sendo o parâmetro mais afetado o Rz, ou seja, a massa abrasiva realizou o objetivo de “aparar” os picos de rugosidade na superfície analisada.

Tabela 7. Dados de massa e rugosidade após UFA para aço SAE 1045.

Peça	Aço SAE 1045											
	Massa (g)			Ra (μm)			Rq (μm)			Rz (μm)		
	\bar{X}	σ^2 ($\times 10^{-9}$)	s ($\times 10^{-5}$)	\bar{X}	σ^2 ($\times 10^{-9}$)	s (10^{-5})	\bar{X}	σ^2	s	\bar{X}	σ^2	s
1	10,4726	63,3	25,17	1,755	63,3	25,2	2,176	0,182	0,427	8,42	2,916	1,71
2	10,5047	23,3	15,28	1,248	23,3	15,3	1,543	0,151	0,389	6,03	4,225	2,06
3	10,4832	23,3	15,28	2,062	23,3	15,3	2,601	0,015	0,120	10,07	0,734	0,86
4	10,4849	30,0	17,32	1,218	30,0	17,3	1,555	0,108	0,328	6,43	2,528	1,59
5	10,4610	70,0	26,46	1,691	70,0	26,5	2,189	0,013	0,112	9,08	0,434	0,66
6	10,4350	563,3	75,06	2,077	563,3	75,1	2,693	0,020	0,141	10,02	0,028	0,17
7	10,4855	13,3	11,55	2,696	13,3	11,5	3,288	0,335	0,578	11,97	10,324	3,21
8	10,4533	3,3	5,77	2,161	3,3	5,8	2,684	0,016	0,127	10,20	0,852	0,92
9	10,5128	70,0	26,46	1,017	70,0	26,5	1,282	0,005	0,071	5,53	0,039	0,19
10	10,5351	13,3	11,55	1,113	13,3	11,5	1,467	0,006	0,079	6,46	0,174	0,42
11	10,5217	3,3	5,77	0,760	3,3	5,8	0,935	0,005	0,071	3,83	0,199	0,45
12	10,5139	10	10	2,797	10	10	3,265	0,014	0,116	12,09	0,087	0,29
13	10,5017	93,3	30,55	2,733	93,3	30,6	3,174	0,014	0,119	11,15	0,373	0,61
14	10,5738	30	17,3	1,702	630,0	79,4	2,112	0,044	0,210	8,016	1,801	1,34
15	10,4822	70	26,5	1,710	63,3	25,2	2,098	0,031	0,175	8,392	0,653	0,81

Fonte: Autoria própria.

A tabela 8 é referente aos corpos de prova de SAE 4140 após a UFA e, tal qual para o aço SAE 1045, é possível observar uma redução de massa na ordem de 10^{-3} e perdas significativas de rugosidade, sendo o parâmetro mais afetado o Rz.

Tabela 8. Dados de massa e rugosidade após UFA para aço SAE 4140.

Peça	Aço SAE 4140											
	Massa (g)			Ra (μm)			Rq (μm)			Rz (μm)		
	\bar{X}	σ^2	s	\bar{X}	σ^2	s	\bar{X}	σ^2	s	\bar{X}	σ^2	s
	($\times 10^{-9}$)	($\times 10^{-5}$)										
1	9,3631	53,3	23,1	1,43	0,02	0,14	1,87	0,02	0,15	7,77	0,09	0,29
2	9,4940	3,3	5,8	1,96	0,00	0,03	2,50	0,00	0,06	10,15	0,09	0,30
3	9,7674	70,0	26,5	0,75	0,05	0,22	0,94	0,07	0,26	3,81	1,08	1,04
4	9,4894	103,3	32,1	1,13	0,01	0,09	1,42	0,09	0,30	1,03	0,00	0,02
5	9,6956	13,3	11,5	1,30	0,07	0,26	1,65	0,10	0,32	6,79	1,06	1,03
6	9,3892	23,3	15,3	3,10	0,23	0,48	3,78	0,35	0,59	11,89	1,75	1,32
7	9,3131	3,3	5,8	2,79	0,03	0,17	3,15	0,01	0,08	10,67	0,56	0,75
8	9,3210	53,3	23,1	2,86	0,43	0,66	3,65	0,73	0,86	14,60	15,21	3,90
9	9,5168	10,0	10,0	3,49	1,30	1,14	4,43	2,44	1,56	13,93	1,14	1,07
10	9,6334	10,0	10,0	1,79	0,01	0,11	2,25	0,04	0,21	8,53	0,43	0,65
11	9,5041	3,3	5,8	1,75	0,13	0,37	2,65	0,61	0,78	9,50	12,44	3,53
12	9,9412	10,0	10,0	1,44	0,02	0,13	1,82	0,02	0,14	7,15	0,51	0,71
13	9,3924	603,3	77,7	2,25	0,08	0,29	2,83	0,07	0,27	10,45	0,82	0,90
14	9,4609	3,33	5,77	2,62	0,08	0,28	2,98	0,01	0,11	10,18	59,73	7,73
15	9,4808	63,3	25,2	2,15	0,06	0,24	2,45	0,01	0,07	10,39	1,34	1,16

Fonte: Autoria própria.

A tabela 9 apresenta os dados coletados nos corpos de prova de alumínio após a UFA, nela é possível observar que, de modo semelhante aos aços o alumínio sofreu uma pequena redução de massa e uma redução significativa de rugosidade, sendo o material que apresentou os menores valores de rugosidade. Além disso, da mesma forma que para os outros materiais, o alumínio também apresentou uma redução mais significativa no parâmetro Rz.

Tabela 9. Dados de massa e rugosidade após UFA para alumínio.

Peça	Alumínio											
	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	3,6258	10,0	10,0	0,80	0,003	0,05	0,98	0,01	0,08	3,36	0,2	0,5
2	3,4842	3,3	5,8	0,90	0,034	0,18	1,11	0,08	0,28	4,16	2,7	1,7
3	3,6101	0,0	0,0	0,84	0,022	0,15	1,04	0,03	0,17	3,20	0,0	0,2
4	3,6287	70,0	26,5	0,83	0,000	0,02	0,98	0,00	0,02	3,01	0,1	0,3
5	3,6439	43,3	20,8	1,11	0,090	0,30	1,40	0,29	0,54	5,21	6,8	2,6
6	3,6250	3,3	5,8	0,28	0,002	0,05	0,33	0,00	0,05	1,01	0,0	0,2
7	3,6111	30,0	17,3	0,41	0,026	0,16	0,51	0,06	0,24	1,80	1,0	1,0
8	3,6490	13,3	11,5	0,22	0,001	0,03	0,28	0,00	0,03	1,14	0,0	0,1
9	3,6212	70,0	26,5	0,57	0,015	0,12	0,68	0,03	0,18	1,94	0,8	0,9
10	3,6579	70,0	26,5	0,32	0,000	0,02	0,37	0,00	0,03	1,12	0,0	0,0
11	3,6092	43,3	20,8	0,90	0,000	0,01	1,10	0,00	0,06	3,32	0,1	0,3
12	3,5598	43,3	20,8	0,50	0,005	0,07	0,62	0,01	0,10	2,12	0,4	0,6
13	3,6094	130,0	36,1	0,64	0,001	0,03	0,75	0,00	0,05	2,16	0,2	0,5
14	3,6631	40,0	20,0	0,57	0,001	0,03	0,70	0,00	0,03	2,72	0,2	0,4
15	3,6231	93,3	30,6	0,98	0,065	0,25	1,21	0,11	0,33	4,38	1,8	1,3

Fonte: Autoria própria.

Utilizando os dados coletados antes e depois da UFA foi realizado a diferença para determinar as perdas de massa e rugosidade apresentadas na tabela 10:

Tabela 10. Variação de massa e rugosidade para cada corpo de prova.

Peça	Material											
	Aço SAE 1045				Aço SAE 4140				Alumínio			
	Δm (g)	ΔRa (μm)	ΔRq (μm)	ΔRz (μm)	Δm (g)	ΔRa (μm)	ΔRq (μm)	ΔRz (μm)	Δm (g)	ΔRa (μm)	ΔRq (μm)	ΔRz (μm)
1	0,017	1,62	2,12	25,62	0,00	0,70	0,79	4,31	0,003	0,76	1,00	5,37
2	0,008	1,04	1,33	7,51	0,01	0,39	0,45	1,70	0,001	3,96	4,95	18,94
3	0,015	1,44	2,15	12,82	0,01	0,98	1,07	4,67	0,002	2,06	2,54	11,56
4	0,010	1,68	1,90	9,87	0,01	1,78	2,31	14,47	0,001	2,12	2,63	11,18
5	0,023	4,40	5,25	20,87	0,01	1,19	1,43	8,35	0,000	1,48	1,97	7,09
6	0,016	1,12	1,37	7,63	0,01	2,16	2,70	13,85	0,012	3,19	4,41	21,90
7	0,008	1,13	1,52	8,64	0,02	1,50	2,72	19,91	0,008	2,03	2,51	10,12
8	0,010	2,21	2,86	15,06	0,00	0,88	1,14	4,29	0,008	2,42	3,40	15,00
9	0,008	1,29	1,71	7,84	0,01	0,33	0,47	8,47	0,006	3,14	3,91	14,21
10	0,019	1,90	2,37	10,97	0,00	0,55	0,49	4,18	0,006	1,34	1,79	9,05
11	0,012	1,26	1,61	6,21	0,01	2,69	2,77	12,17	0,007	0,97	2,45	4,67
12	0,009	0,19	0,44	2,02	0,00	1,44	1,90	7,79	0,007	1,08	1,41	4,66
13	0,001	1,33	1,82	9,47	0,00	1,93	2,28	11,53	0,008	1,87	2,40	10,59
14	0,003	0,68	0,87	6,71	0,01	0,08	0,04	1,16	0,003	1,10	1,37	5,51
15	0,001	0,84	1,2	7,07	0,003	0,06	0,17	1,48	0,004	1,86	2,61	13,02

Fonte: Autoria própria.

Utilizando os dados coletados antes e depois da UFA foi realizado uma análise de Scott-Knott com nível de significância de 5% para cada material. As tabelas 11, 12 e 13 apresentam a média de massa e rugosidade para cada número de passes e demonstram a semelhança dos dados. As tabelas representam alumínio, aço SAE 1045 e aço Sae 4140, respectivamente.

Na tabela 11 é possível observar que a análise identificou a massa inicial e final dos corpos de prova semelhantes entre si, ou seja, para uma significância de 5% as massas iniciais e finais de cada corpo de prova são semelhantes. Porém, diferentemente da massa é possível observar que os mesmos corpos de prova após a UFA apresentaram dados diferentes para uma significância de 5%, ou seja, é possível afirmar que a redução de rugosidade observada nos corpos de prova é efetiva.

Tabela 11. Teste de Scott-Knott para Alumínio.

		Alumínio							
	Passes	Massa (g)		Ra (μm)		Rq (μm)		Rz (μm)	
Antes da UFA	5	3,6185	a	2,0940	a	2,9240	a	10,6320	a
	10	3,6002	a	2,9693	b	3,7213	a	14,6167	b
	20	3,6408	a	2,7840	b	3,6380	a	15,4560	b
Depois da UFA	5	3,6129	a	0,7160	c	0,8747	b	2,9393	c
	10	3,5985	a	0,8960	d	1,1033	c	3,7907	c
	20	3,6283	a	0,3613	e	0,4347	d	1,4013	d

Fonte: Autoria própria.

Da mesma forma que para o alumínio, ao analisar a tabela 12 é possível observar que as massas iniciais e finais de cada corpo de prova não apresentam diferenças significativas. Mesmo os dados mostrando uma diferença entre as massas iniciais é possível observar que, para cada grupo não houve redução significativa de massa. Já para a rugosidade pôde ser observada uma diferença significativa.

Tabela 12. Teste de Scott-Knott para aço SAE 1045.

		Aço SAE 1045							
	Passes	Massa (g)		Ra (μm)		Rq (μm)		Rz (μm)	
Antes da UFA	5	10,5239	a	2,8027	a	3,5053	a	14,9920	a
	10	10,4957	b	3,6347	b	4,5260	b	23,3420	b
	20	10,4967	b	3,3433	b	4,2493	b	18,8607	b
Depois da UFA	5	10,5187	a	1,9407	c	2,3173	c	14,9920	c
	10	10,4813	b	1,5960	c	2,0137	c	23,3420	c
	20	10,4844	b	1,8133	c	2,2833	c	18,8607	c

Fonte: Autoria própria.

Da mesma forma que para os materiais anteriores, ao analisar a tabela 13 é possível observar que as massas iniciais e finais de cada corpo de prova não apresentam diferenças significativas. Mesmo os dados mostrando uma diferença entre as massas iniciais é possível observar que, para cada grupo não houve redução significativa de massa. Já para a rugosidade pôde ser observada uma diferença significativa.

Tabela 13. Teste de Scott-Knott para aço SAE 4140.

Aço SAE 4140									
	Passes	Massa (g)		Ra (μm)		Rq (μm)		Rz (μm)	
Antes da UFA	5	9,5559	a	3,2880	a	4,0380	a	16,3593	a
	10	9,5701	a	2,3213	b	2,8907	b	12,6113	a
	20	9,4435	a	3,8847	a	4,8533	a	20,5293	b
Depois da UFA	5	9,5559	a	2,0413	c	2,5460	c	9,5353	c
	10	9,5619	a	1,3113	d	1,6780	d	5,9093	d
	20	9,4347	a	2,8087	b	3,4527	b	11,926	a

Fonte: Autoria própria.

Utilizando o teste de Scott-Knott é possível observar que, para o alumínio bem como para os aços SAE 4140 e SAE 1045, não houveram diferenças significativas na massa, mesmo havendo uma redução de ordem entre 10^{-2} e 10^{-3} g, entre os níveis estudados, a análise identifica como dados iguais. Todavia, essa é uma redução de massa esperada para este tipo de processo. Também é notável a redução e rugosidade ocorrida nos materiais, já que durante o processo, o meio abrasivo ao entrar em contato com a superfície do material remove os picos da superfície, reduzindo significativamente o parâmetro Rz, como observado, além disso, ao reduzir os maiores valores, a média entre picos e vales (Ra) e a média quadrática (Rq) também reduzem.

Os dados das tabelas 11, 12 e 13 foram utilizados para calcular a redução percentual dos parâmetros de rugosidade para cada número de passes, sendo possível organizar os dados em gráficos para cada parâmetro. Os gráficos encontram-se dispostos a seguir:

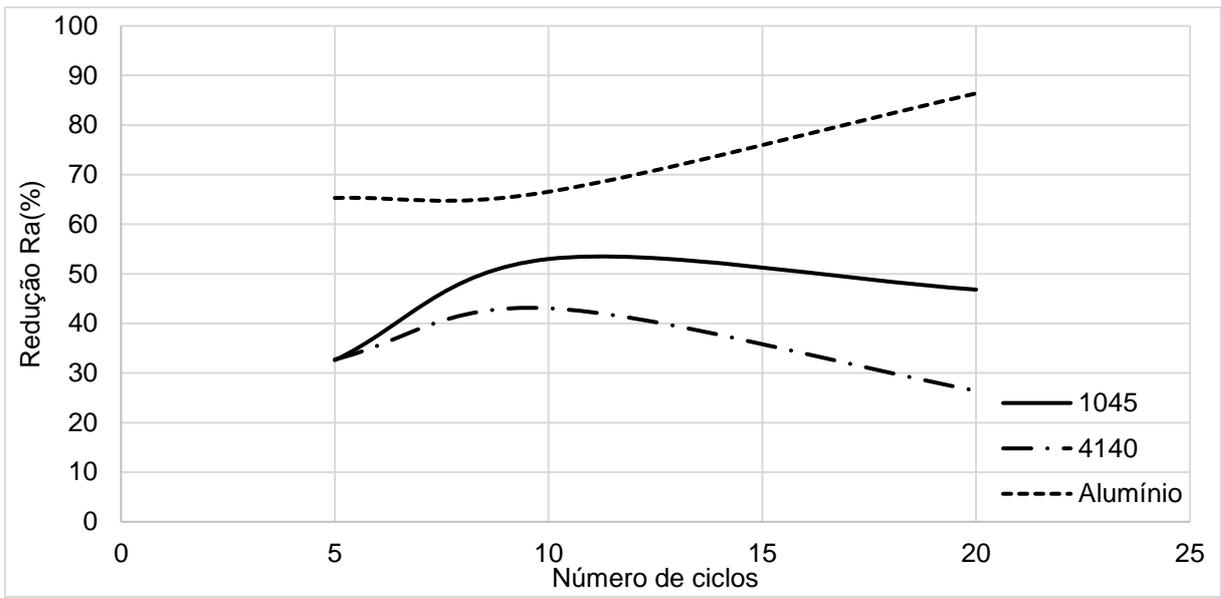


Figura 12. Redução percentual de Ra x Número de ciclos.
Fonte: Autoria própria.

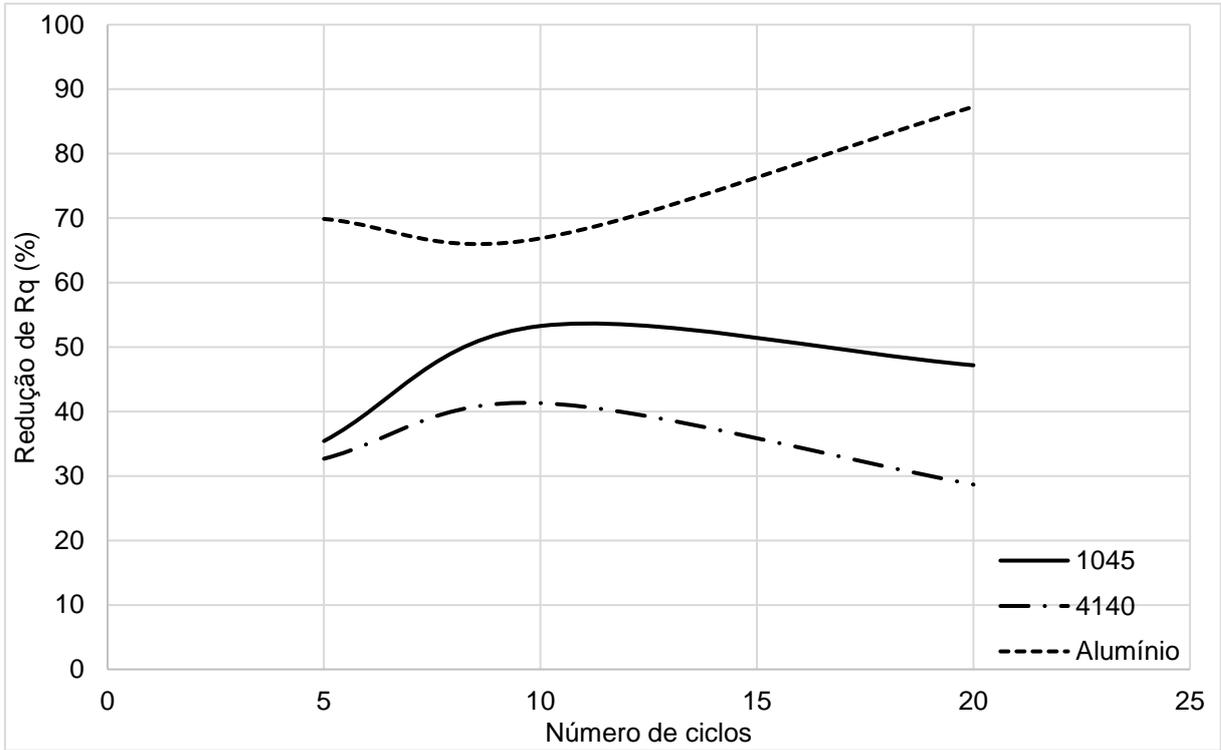


Figura 13. Redução percentual de Rq x Número de ciclos.
Fonte: Autoria própria.

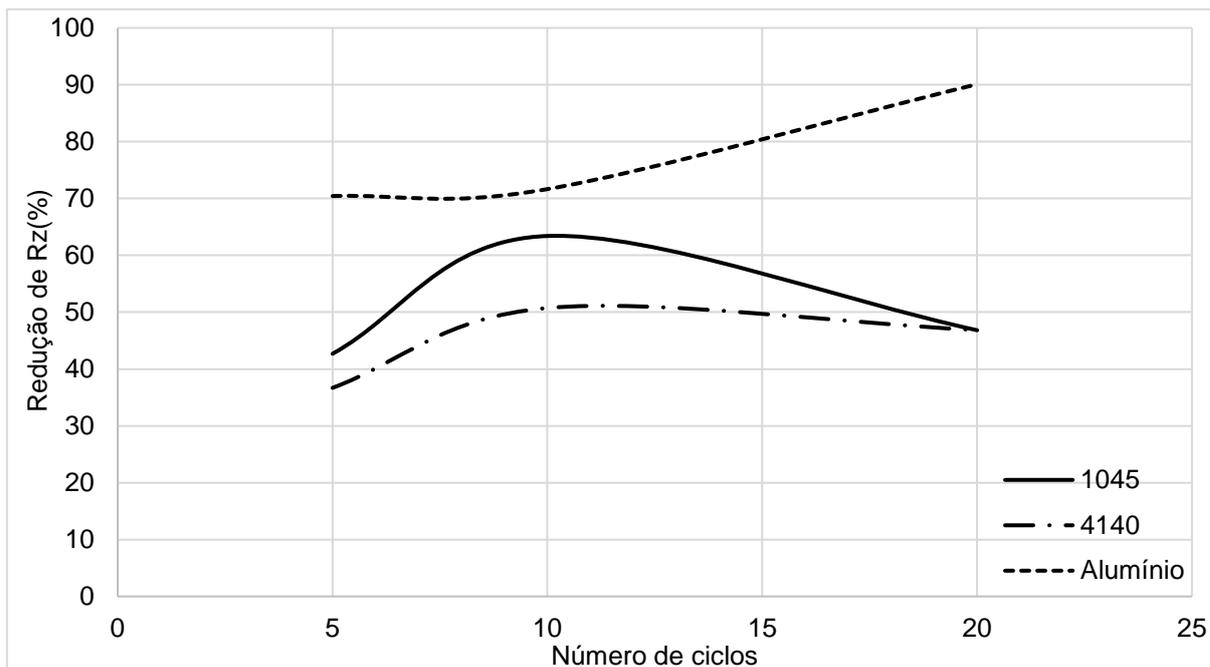


Figura 14. Redução percentual de Rz x Número de ciclos.
Fonte: Autoria própria.

É possível observar que ao variar do número de ciclos realizados no processo houveram interferências na redução de rugosidade de modo diferenciado para cada material.

O alumínio foi o material que mais apresentou redução nos parâmetros de rugosidade, tendo o Ra com reduções percentuais entre 51% e 91%, Rq entre 50% e 92% e Rz entre 57% e 95%, sendo que ao aumentar o número de ciclos as taxas de reduções aumentaram.

A seguir o aço SAE 1045 foi o material que melhor apresentou redução nos parâmetros de rugosidade, atingindo um máximo de 75% de redução no Rz, sendo que apresentou maior redução dos parâmetros com 10 ciclos.

Já o aço SAE 4140, foi o que apresentou mais resistência ao processo, com reduções percentuais máximas de 63% nos parâmetros, sendo que também apresentou maior redução dos parâmetros com 10 ciclos.

Realizando a secção dos corpos de prova foi possível observar a superfície analisada. Observando a figura 15, é possível notar marcas de broca tanto antes quanto depois da UFA, foi possível observar, também a retirada da superfície oxidada dos materiais.



**Figura 15. Superfície interna dos corpos de prova antes e depois da UFA.
Fonte: Autoria própria.**

7 CONCLUSÃO

A partir dos dados obtidos é possível observar uma boa redução da rugosidade nos aços SAE 1045 e 4140, porém observou-se uma redução mais significativa no alumínio, obtendo rugosidades abaixo de 1 μm .

O aço SAE 1045 obteve uma boa redução nos parâmetros de massa e rugosidade, porém, apesar de uma perda de massa semelhante não foi obtido baixas rugosidades como o alumínio.

Foi observado marcas causadas pela broca utilizada na fabricação dos corpos de prova, mesmo após a UFA, ou seja, o processo não removeu os sulcos mais profundos causados pela broca, resultando em uma menor perda da rugosidade. O aumento da granulometria do abrasivo pode ser uma solução para a redução desses sulcos, apesar de Jain, R. K. e Jain, V. K. (2000), em seus trabalhos, propor a granulometria de malha 100 como sendo ótima, não se sabe quais eram as condições de seus corpos de prova, de modo que há a possibilidade de um melhor resultado para os corpos de prova utilizados neste trabalho ao se alterar a granulometria dos abrasivos.

Também é possível constatar que, para os aços, a rugosidade apresenta uma maior redução percentual próxima aos dez ciclos, reduzindo após essa quantidade, já para o alumínio ouve um incremento no valor da redução em relação ao aumento do número de passes.

Observando demonstrações em vídeos realizadas pela empresa *Extrude Hone*, a criadora do processo, observou-se duas diferenças críticas em relação à massa utilizada com a proposta neste trabalho: a massa comercial é mais viscosa e ela não adere à superfície do material. Tal fato demonstra um campo para melhoria na massa proposta nesse trabalho, requerendo um conhecimento químico mais aprofundado.

Para a realização deste trabalho não foi possível aumentar a viscosidade da massa pois a máquina utilizada suportava aplicar uma pressão de até 5 bar. Já relacionado à adesão da massa com o material a ser usinado deve-se a composição da massa, já que o óleo de coco babaçu adere a superfície do material. Além disso, logo após a aplicação da pressão é possível observar uma mudança da consistência da massa utilizada, que se torna menos viscosa. A priori pressupôs-se a possibilidade dessa alteração ser causada pelo aumento da temperatura do meio

abrasivo ao se aplicar pressão, porém, ao retornar à temperatura ambiente, observou-se a mesma situação. Dessa forma conjecturou-se que ocorre uma fragmentação do pó de gesso durante a aplicação de pressão no meio abrasivo reduzindo as forças de atração que mantém unidos os componentes da massa, porém tal fato só pode ser constatado com análises mais profundas no material.

Para futuros trabalhos, indica-se o estudo de novos componentes para elaboração do meio abrasivo, realizar um estudo para constatar o que leva à perda de viscosidade citada e utilizar algum outro componente em que tal fato não ocorra. Além disso é possível alterar a granulometria do abrasivo e observar se é possível reduzir as marcas causadas pela broca, também é possível promover alterações à máquina utilizada para facilitar o processo como, por exemplo, instalar mais um cilindro hidráulico, de modo a realizar a passagem da massa sem ter que rotacionar o embolo, conjuntamente é possível alterar a pressão máxima de trabalho do equipamento e estudar a alteração da pressão no acabamento das peças.

REFERÊNCIAS

BÄHRE, D.; BRÜNNET, H.; SWAT, M. Investigation of one-way abrasive flow machining and in-process measurement of axial forces. **5th CIRP Conference on High Performance Cutting**, p. 419-424, 2012.

eCycle. Óleo de coco babaçu: comum na indústria cosmética de alimentos. Disponível em:< <https://www.ecycle.com.br/2684-oleo-de-coco-babacu>>.

FANG, L.; ZHAO, J.; SUN, K.; ZHENG, D.; MA, D. Temperature as sensitive monitor for efficiency of work in abrasive flow machining. **Wear**, p. 678-687, 2009.

GORANA, V. K.; JAIN, V. K.; LAL, G. K. Experimental investigation into cutting forces and active grain density during abrasive flow machining. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, p. 201-211, out. 2003.

GORANA, V. K.; JAIN, V. K.; LAL, G. K. Forces prediction during material deformation in abrasive flow machining. **Wear**, p.128-139, fev. 2006.

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

JAIN, R. K.; JAIN, V. K. Specific energy and temperature determination in abrasive flow machining process. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, p. 1689-1704, abr. 2001.

JAIN, R. K.; JAIN, V. K.; KALRA, P. K. Modelling of abrasive flow machining process: a neural network approach. **Wear**, p. 242-248, mar. 1999.

KAMAL, K. KAR; RAVIKUMAR, N. L.; TAILOR, B. P.; RAMKUMAR, J.; SATHIYAMOORTHY, D. Performance evaluation and rheological characterization of newly developed butyl rubber-based media for abrasive machining process. **Journal of Materials Processing Technology**, p. 2212-2221, 2009.

KENDA, J.; PUSAVEC, F.; KERMOUCHE, G.; KOPAC, J. Surface integrity in abrasive flow machining of hardened tool steel AISI D2. **Procedia Engineering**, p. 172-177, 2011.

KUMAR, R.; MURTAZA, Q.; WALIA, R. S. Three start helical abrasive flow machining for ductile materials. **Procedia Materials Science**, p. 1884-1890, 2014.

MUNHOZ, M. R. **Estudo de caso de uma pasta abrasiva utilizando óleo de oiticica em um equipamento de usinagem por fluxo abrasivo**. 2017. 156f. Dissertação de Mestrado – Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio. 2017.

PUSAVEC, F.; KENDA, J. 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**, p. 180-189, abr. 2014.

SANTOS, G. R. **Caracterização e Avaliação do Comportamento Tribológico do aço DIN X100CrMoV8-1-1 com Tratamento Duplex**. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas. Metalúrgica e de Materiais). Porto Alegre. 2015.

SEHIJPAL, S.; SHAN, H. S. Development of magneto abrasive flow machining process. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, p. 953-959, fev. 2002.

STOETERAU, R. L. **Processos de Usinagem com Ferramentas de Geometria Não Definida**. São Paulo. Disponível em: <
<http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/PMR2202-AULA%20RS3.pdf> >.
Acessado em 20 de novembro de 2017.

UHLMANN, E.; DOITS, M.; SCHMIEDEL, C. Development of a material model for visco-elastic abrasive medium in abrasive flow machining. **14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations**, p. 351-356, 2013.

UHLMANN, E.; MIHOTOVIC, V.; COENEN, A. Modelling the abrasive flow machining process on advanced ceramic materials. **Journal of Materials Processing Technology**, p. 6062-6066, 2009.

WANG, A.; TSAI, L.; LIANG, K.; LIU, C.; WHENG, S. Uniform surface polished method of complex holes in abrasive flow machining. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, p. 250-257, mai. 2009.

APÊNDICE – Medições de massa e rugosidade dos corpos de prova

Tabela 14. Medições de massa e rugosidade do alumínio antes da UFA

Peça	Ciclos	Alumínio antes da UFA															
		Massa (g)				Ra				Rq				Rz			
		1	2	3	Média	1	2	3	média	1	2	3	média	1	2	3	média
1		3,6291	3,6292	3,6293	3,6292	1,45	1,42	1,80	1,557	1,88	1,76	2,28	1,976	9,12	7,58	9,50	8,7
2		3,4848	3,4851	3,4849	3,4849	3,75	5,53	5,31	4,864	4,44	6,89	6,87	6,067	17,66	25,35	26,30	23,1
3	10	3,6123	3,6122	3,6121	3,6122	3,05	2,79	2,84	2,892	3,73	3,39	3,65	3,587	16,40	14,16	13,72	14,8
4		3,6303	3,6301	3,63	3,6301	3,06	2,91	2,89	2,952	3,84	3,50	3,48	3,606	16,21	13,14	13,22	14,2
5		3,6444	3,6443	3,6443	3,6443	2,50	2,64	2,60	2,582	3,15	3,49	3,47	3,370	10,54	13,21	13,14	12,3
6		3,6368	3,6367	3,6366	3,6367	3,49	3,43	3,50	3,472	5,12	4,64	4,46	4,741	26,42	22,45	19,86	22,9
7		3,619	3,6185	3,6191	3,6189	2,54	2,53	2,22	2,431	3,113	2,932	3,012	3,019	10,76	10,48	14,5	11,9
8	20	3,6569	3,6572	3,6575	3,6572	3,04	3,05	1,84	2,645	4,13	4,267	2,638	3,678	17,56	20,39	10,46	16,1
9		3,6272	3,627	3,6271	3,6271	4,69	3,60	2,84	3,709	6,041	4,387	3,325	4,584	23,53	15,38	9,555	16,2
10		3,6643	3,6644	3,6641	3,6643	2,23	1,44	1,32	1,664	2,985	1,811	1,701	2,166	13,35	8,392	8,751	10,2
11		3,6161	3,616	3,6158	3,6160	1,50	1,85	2,26	1,868	1,81	2,175	6,659	3,548	6,747	6,659	10,58	8,0
12		3,5666	3,5662	3,5664	3,5664	1,05	1,01	2,68	1,579	1,341	1,345	3,394	2,027	3,932	4,823	11,58	6,8
13	5	3,6173	3,6177	3,6175	3,6175	2,91	2,11	2,52	2,511	3,585	2,769	3,093	3,149	13,97	12,21	12,08	12,8
14		3,666	3,666	3,666	3,6660	1,59	1,71	1,69	1,660	1,982	2,107	2,147	2,079	7,555	8,824	8,319	8,2
15		3,6266	3,6265	3,6268	3,6266	3,26	2,31	2,96	2,842	4,094	3,047	4,303	3,815	16,86	13,4	21,94	17,4

Tabela 15. Medições de massa e rugosidade do aço SAE 4140 antes da UFA

Peça	Ciclos	Aço SAE 4140 antes da UFA															
		Massa (g)				Ra				Rq				Rz			
		1	2	3	Média	1	2	3	média	1	2	3	média	1	2	3	média
1		10,4891	10,4892	10,4892	10,4892	3,23	3,08	3,83	3,38	4,43	3,99	4,47	4,30	22,76	32,50	46,86	34,04
2		10,5131	10,5132	10,5127	10,5130	2,31	2,11	2,46	2,29	3,00	2,26	3,35	2,87	14,11	10,38	16,11	13,53
3	10	10,4981	10,4979	10,4993	10,4984	3,79	3,20	3,52	3,50	5,10	4,72	4,43	4,75	28,07	20,15	20,44	22,89
4		10,4946	10,4944	10,4944	10,4945	2,86	2,93	2,92	2,90	3,18	4,12	3,07	3,46	14,90	16,70	17,30	16,30
5		10,4837	10,4838	10,4835	10,4837	6,10	6,04	6,14	6,09	7,50	7,35	7,46	7,44	30,35	29,62	29,88	29,95
6		10,4510	10,4508	10,4509	10,4509	3,05	3,34	3,19	3,19	3,92	4,18	4,08	4,06	16,68	17,87	18,38	17,64
7		10,4941	10,4941	10,4938	10,4940	3,81	3,71	3,97	3,83	4,88	4,68	4,87	4,81	21,95	20,21	19,65	20,60
8	20	10,4633	10,4632	10,4633	10,4633	3,88	3,88	5,36	4,37	4,90	4,81	6,92	5,54	23,63	20,33	31,81	25,26
9		10,5211	10,5209	10,5208	10,5209	1,79	2,71	2,41	2,30	2,26	3,63	3,09	3,00	9,43	16,55	14,14	13,37
10		10,5548	10,5545	10,5545	10,5546	2,66	2,76	3,63	3,01	3,49	3,31	4,72	3,84	15,93	14,72	21,63	17,43
11		10,5346	10,5341	10,5337	10,5341	2,33	2,15	1,59	2,02	2,87	2,74	2,03	2,55	13,18	9,56	7,38	10,04
12		10,5230	10,5231	10,5232	10,5231	2,46	3,08	3,42	2,98	3,21	3,87	4,04	3,70	12,83	15,58	13,91	14,11
13	5	10,5021	10,5023	10,5026	10,5023	3,67	4,40	4,12	4,06	4,55	5,31	5,12	4,99	18,94	20,74	22,18	20,62
14		10,5773	10,5771	10,5772	10,5772	2,42	1,98	2,75	2,38	3,23	2,18	3,53	2,98	15,32	12,64	16,23	14,73
15		10,4830	10,4827	10,4829	10,4829	2,68	2,43	2,56	2,55	3,51	2,98	3,41	3,30	16,37	14,07	15,95	15,46

Tabela 16. Medições de massa e rugosidade do aço SAE 1045 antes da UFA

Peça	Ciclos	Aço SAE 1045 antes da UFA															
		Massa (g)				Ra				Rq				Rz			
		1	2	3	Média	1	2	3	média	1	2	3	média	1	2	3	média
1		9,3677	9,3678	9,3675	9,3677	1,701	2,397	2,299	2,132	2,165	2,965	2,845	2,658	10,32	12,20	13,74	12,09
2		9,5060	9,5066	9,5062	9,5063	2,504	2,365	2,182	2,350	3,015	2,880	2,971	2,955	12,77	11,21	11,57	11,85
3	10	9,7755	9,7754	9,7760	9,7756	1,705	1,689	1,790	1,728	1,931	2,088	2,028	2,016	10,42	7,60	7,41	8,48
4		9,4967	9,4968	9,4967	9,4967	1,766	3,283	3,659	2,903	2,410	4,166	4,628	3,735	8,82	17,59	20,11	15,51
5		9,7045	9,7045	9,7042	9,7044	2,401	2,092	2,975	2,489	3,351	2,877	3,010	3,079	16,16	13,52	15,73	15,14
6		9,4001	9,3999	9,3997	9,3999	5,390	5,094	5,294	5,259	6,661	6,160	6,634	6,485	26,67	24,70	25,85	25,74
7		9,3328	9,3326	9,3326	9,3327	4,035	4,411	4,325	4,257	5,028	5,650	5,430	5,369	21,31	24,39	22,97	22,89
8	20	9,3210	9,3212	9,3213	9,3212	3,825	4,157	3,220	3,734	4,566	5,030	4,748	4,781	17,39	18,41	20,89	18,90
9		9,5261	9,5254	9,5257	9,5257	3,580	3,750	4,134	3,821	4,816	4,899	4,970	4,895	22,28	22,54	22,40	22,41
10		9,6383	9,6380	9,6383	9,6382	2,294	2,118	2,635	2,349	2,284	2,674	3,245	2,734	11,50	11,54	15,10	12,71
11		9,5108	9,5104	9,5111	9,5108	3,165	5,252	4,902	4,440	3,885	6,721	5,675	5,427	16,84	25,63	22,54	21,67
12		9,9434	9,9437	9,9440	9,9437	3,264	3,181	2,202	2,882	4,369	3,972	2,831	3,724	16,72	14,66	13,42	14,93
13	5	9,3938	9,3933	9,3932	9,3934	4,382	4,760	3,402	4,181	5,522	6,006	3,795	5,108	23,13	27,04	15,75	21,97
14		9,4664	9,4668	9,4663	9,4665	2,158	2,951	2,999	2,703	2,595	3,633	3,689	3,306	9,70	12,15	12,18	11,34
15		9,4837	9,4837	9,4833	9,4836	2,308	2,400	1,997	2,235	2,670	2,620	2,570	2,620	7,20	17,05	11,38	11,88

Tabela 17. Medições de massa e rugosidade do alumínio após a UFA

Peça	Ciclos	Alumínio depois da UFA															
		Massa (g)				Ra				Rq				Rz			
		1	2	3	Média	1	2	3	média	1	2	3	média	1	2	3	média
1		3,6257	3,6258	3,6259	3,6258	0,741	0,814	0,842	0,799	0,893	1,001	1,039	0,978	2,82	3,67	3,60	3,36
2		3,4842	3,4841	3,4842	3,4842	0,829	0,769	1,115	0,904	0,986	0,917	1,439	1,114	3,28	3,14	6,06	4,16
3	10	3,6101	3,6101	3,6101	3,6101	0,826	0,690	0,989	0,835	1,070	0,861	1,199	1,043	3,10	3,11	3,41	3,20
4		3,6284	3,6289	3,6288	3,6287	0,817	0,834	0,852	0,834	0,957	0,981	1,004	0,981	2,75	2,94	3,35	3,01
5		3,6437	3,6441	3,6438	3,6439	1,452	0,935	0,931	1,106	2,021	1,092	1,090	1,401	8,22	3,77	3,64	5,21
6		3,6250	3,6250	3,6249	3,6250	0,340	0,263	0,249	0,284	0,392	0,313	0,295	0,333	1,21	0,94	0,87	1,01
7		3,6110	3,6113	3,6110	3,6111	0,591	0,316	0,310	0,406	0,784	0,381	0,366	0,510	2,94	1,32	1,14	1,80
8	20	3,6489	3,6491	3,6489	3,6490	0,258	0,194	0,221	0,224	0,307	0,250	0,292	0,283	1,11	1,10	1,21	1,14
9		3,6211	3,6215	3,6210	3,6212	0,450	0,693	0,578	0,574	0,509	0,872	0,652	0,678	1,25	2,92	1,66	1,94
10		3,6578	3,6582	3,6577	3,6579	0,312	0,308	0,339	0,320	0,351	0,362	0,402	0,372	1,07	1,12	1,16	1,12
11		3,6090	3,6094	3,6093	3,6092	0,906	0,898	0,883	0,896	1,163	1,076	1,049	1,096	3,34	3,06	3,57	3,32
12		3,5597	3,5600	3,5596	3,5598	0,460	0,451	0,583	0,498	0,560	0,560	0,732	0,617	1,61	1,96	2,78	2,12
13	5	3,6090	3,6097	3,6095	3,6094	0,676	0,632	0,614	0,641	0,777	0,780	0,692	0,750	2,19	2,62	1,66	2,16
14		3,6629	3,6633	3,6631	3,6631	0,582	0,578	0,536	0,565	0,683	0,741	0,688	0,704	2,25	3,03	2,88	2,72
15		3,6230	3,6234	3,6228	3,6231	0,851	0,815	1,272	0,979	1,038	0,999	1,583	1,207	3,75	3,48	5,91	4,38

Tabela 18. Medições de massa e rugosidade do aço SAE 4140 após a UFA

Aço SAE 4140 depois da UFA																	
Peça	Ciclos	Massa (g)				Ra				Rq				Rz			
		1	2	3	Média	1	2	3	média	1	2	3	média	1	2	3	média
1		9,3632	9,3628	9,3632	9,3631	1,411	1,303	1,581	1,432	1,826	1,746	2,036	1,869	8,11	7,66	7,55	7,77
2		9,4940	9,4941	9,4940	9,4940	1,962	1,924	1,981	1,956	2,444	2,501	2,561	2,502	10,05	9,91	10,48	10,15
3	10	9,7673	9,7677	9,7672	9,7674	0,620	1,003	0,628	0,750	0,787	1,244	0,803	0,945	3,13	5,00	3,28	3,81
4		9,4892	9,4898	9,4893	9,4894	1,050	1,100	1,230	1,127	1,150	1,370	1,740	1,420	1,02	1,05	1,03	1,03
5		9,6957	9,6955	9,6955	9,6956	1,123	1,170	1,598	1,297	1,477	1,459	2,015	1,650	6,26	6,13	7,98	6,79
6		9,3894	9,3892	9,3891	9,3892	3,338	3,412	2,548	3,099	4,103	4,145	3,098	3,782	12,98	12,28	10,42	11,89
7		9,3132	9,3131	9,3131	9,3131	2,753	2,652	2,978	2,794	3,125	3,090	3,247	3,154	10,37	11,52	10,12	10,67
8	20	9,3211	9,3207	9,3211	9,3210	2,219	3,530	2,828	2,859	2,961	4,607	3,369	3,646	12,03	19,09	12,69	14,60
9		9,5168	9,5167	9,5169	9,5168	4,802	2,957	2,715	3,491	6,215	3,743	3,328	4,429	14,52	14,58	12,70	13,93
10		9,6334	9,6333	9,6335	9,6334	1,912	1,686	1,785	1,794	2,353	2,010	2,382	2,248	9,08	7,81	8,70	8,53
11		9,5042	9,5041	9,5041	9,5041	1,381	2,114	1,741	1,745	1,760	3,228	2,970	2,653	6,91	13,52	8,08	9,50
12		9,9413	9,9411	9,9412	9,9412	1,343	1,587	1,403	1,444	1,686	1,969	1,806	1,820	7,19	7,84	6,42	7,15
13	5	9,3925	9,3924	9,3922	9,3924	2,112	2,051	2,578	2,247	2,621	2,721	3,137	2,826	11,00	9,40	10,94	10,45
14		9,4610	9,4609	9,4609	9,4609	2,307	2,826	2,741	2,625	2,875	2,950	3,100	2,975	1,26	14,54	14,75	10,18
15		9,4810	9,4808	9,4805	9,4808	2,402	2,095	1,939	2,145	2,420	2,534	2,395	2,450	11,24	10,87	9,07	10,39

Tabela 19. Medições de massa e rugosidade do aço SAE 1045 após a UFA

Peça	Ciclos	Aço SAE 1045 depois da UFA															
		Massa (g)				Ra				Rq				Rz			
		1	2	3	Média	1	2	3	média	1	2	3	média	1	2	3	média
1		10,4723	10,4726	10,4728	10,4726	1,820	1,287	2,158	1,755	2,297	1,604	2,628	2,176	9,82	6,52	8,93	8,42
2		10,5046	10,5049	10,5047	10,5047	1,593	1,291	0,861	1,248	1,973	1,624	1,031	1,543	8,03	6,13	3,92	6,03
3	10	10,4832	10,4834	10,4831	10,4832	2,156	2,063	1,968	2,062	2,598	2,750	2,455	2,601	9,18	10,89	10,13	10,07
4		10,4847	10,4850	10,4850	10,4849	0,905	1,477	1,272	1,218	1,104	1,874	1,688	1,555	4,65	6,92	7,72	6,43
5		10,4608	10,4613	10,4609	10,4610	1,793	1,736	1,545	1,691	2,296	2,237	2,034	2,189	8,39	9,70	9,15	9,08
6		10,4341	10,4354	10,4354	10,4350	2,200	1,950	2,080	2,077	2,500	2,750	2,830	2,693	10,15	9,83	10,07	10,02
7		10,4854	10,4856	10,4856	10,4855	2,460	2,300	3,329	2,696	3,024	2,750	4,091	3,288	10,70	9,58	15,62	11,97
8	20	10,4533	10,4533	10,4534	10,4533	2,250	1,992	2,240	2,161	2,822	2,515	2,715	2,684	11,15	9,31	10,13	10,20
9		10,5129	10,5125	10,5130	10,5128	1,099	0,965	0,986	1,017	1,382	1,224	1,240	1,282	5,73	5,52	5,34	5,53
10		10,5352	10,5352	10,5350	10,5351	1,201	1,048	1,089	1,113	1,576	1,389	1,436	1,467	6,57	6,00	6,80	6,46
11		10,5217	10,5218	10,5217	10,5217	0,831	0,734	0,714	0,760	1,033	0,905	0,866	0,935	4,22	3,92	3,34	3,83
12		10,5140	10,5138	10,5139	10,5139	2,665	2,503	3,224	2,797	3,309	3,105	3,380	3,265	12,26	11,75	12,26	12,09
13	5	10,5014	10,5016	10,5020	10,5017	2,865	2,758	2,576	2,733	3,340	3,120	3,063	3,174	11,74	10,52	11,18	11,15
14		10,5737	10,5740	10,5737	10,5738	1,687	1,863	1,555	1,702	1,988	2,408	1,939	2,112	6,82	9,47	7,76	8,02
15		10,4820	10,4821	10,4825	10,4822	1,521	1,916	1,693	1,710	1,874	2,301	2,120	2,098	7,50	8,62	9,06	8,39