



Artigo

# Estudo da possibilidade de aplicação de óleos de coco e de soja em substituição de fluidos emulsionáveis no torneamento do aço SAE 1045

João Batista dos Santos <sup>[1]</sup> e Ramses Otto Cunha Lima <sup>[2]</sup>

<sup>[1]</sup> Universidade Federal Rural do Semiárido; joabatista1907@hotmail.com

<sup>[2]</sup> Universidade Federal Rural do Semiárido; ramses.cunhalima@ufersa.edu.br

Recebido: 03/12/2021;

Aceito: 12/06/2022;

Publicado: 30/06/2022.

**Resumo:** A indústria metal-mecânica é considerada a mais poluidora quando comparada às outras indústrias devido os rejeitos gerados durante o processo produtivo. A usinagem, de modo geral, é considerada a operação manufaturada mais amplamente utilizada, nesta indústria. A variedade de materiais e produtos envolvidos nesse processo, causa preocupação quanto ao seu descarte e a saúde do operador. Os fluidos de corte, por exemplo, desempenham um papel muito importante nesse processo, pois, estão diretamente relacionados à tribologia do sistema. Portanto, esse estudo teve como objetivo analisar a influência da utilização do óleo de coco e do óleo de soja, como fluido de corte, no processo de torneamento longitudinal externo de um tarugo de aço SAE 1045, tendo como parâmetro de referência a emulsão. Foram coletados dados da temperatura de corte, corrente consumida pela máquina, o desgaste médio de flanco das ferramentas e a rugosidade da peça. Os parâmetros de usinagem foram mantidos constantes para ambos os fluidos:  $ap = 1$  mm,  $f = 0,19$  mm/rot,  $Vc = 170$  m/min. Os dados obtidos por essa pesquisa demonstram que os fluidos vegetais podem ser usados com êxito no processo de torneamento. O óleo de coco apresentou o melhor desempenho dentre os fluidos avaliados.

**Palavras-chave:** desgaste de flanco; rugosidade; análises físico-químicas; óleo vegetal; análises físico-químicas.

**Abstract:** The metal-mechanical industry is considered the most polluting when compared to other industries due to the waste generated during the production process. Machining, in general, is considered the most widely used manufacturing operation in this industry. The variety of materials and products involved in this process causes concern regarding their disposal and the health of the operator. Cutting fluids, for example, play a very important role in this process, as they are directly related to the system's tribology. Therefore, this study aimed to analyze the influence of the use of coconut oil and soybean oil, as cutting fluid, in the external longitudinal turning process of a SAE 1045 steel billet, using the emulsion as a reference parameter. Data were collected on cutting temperature, current consumed by the machine, average tool flank wear and workpiece roughness. Machining parameters were kept constant for both fluids:  $ap = 1$  mm,  $f = 0.19$  mm/rev,  $Vc = 170$  m/min. The data obtained by this research demonstrate that vegetable fluids can be used successfully in the turning process. Coconut oil showed the best performance among the evaluated fluids.

**Key-words:** flank wear; roughness; physicochemical analysis; vegetable oil; turning.

## 1. INTRODUÇÃO

A procura por alternativas renováveis, tornou-se uma prioridade, com o objetivo de amenizar as agressões ambientais, visto que, está cada vez mais difícil conciliar e/ou gerenciar a competitividade, produtividade, flexibilidade e qualidade com as pressões dos públicos de interesse, principalmente na indústria metal-mecânica que geram resíduos que agridem o meio ambiente, quando gerenciadas de forma inadequada. A variável ambiental tem grande importância para a situação do cotidiano, principalmente porque os aspectos ecológicos foram bastante ignorados nos processos de manufatura [1]. Dentre muitos processos, pode-se destacar a usinagem, pois, de modo geral, esse é considerado o processo de fabricação mais utilizado.

Nos processos de usinagem, às solicitações impostas à ferramenta e à peça, devido aos movimentos relativos inerentes às suas operações, o contato direto produz uma grande quantidade de energia em forma de

calor, alterando as dimensões da peça e contribuindo para o desgaste da ferramenta, reduzindo, portanto, sua vida útil. Na tentativa de eliminar ou reduzir essa quantidade de calor do processo, aumentar a vida útil da ferramenta, aumentar a produtividade e reduzir custos de produção, utiliza-se fluidos de corte [2].

Sendo assim, os fluidos de corte têm como principal objetivo lubrificar e/ou refrigerar um processo de usinagem. Logo, irão atuar diretamente nas grandezas mensuráveis, melhorando conseqüentemente o acabamento, diminuindo a força de corte e a potência exigida da máquina. Para garantir um bom desempenho, é necessário a escolha correta do fluido, levando em consideração o material da peça e da ferramenta e o tipo de operação.

Em sua obra, [2] elenca que o fluido de corte com propriedades lubrificantes contribui para reduzir o atrito e a área de contato ferramenta/cavaco, e sua eficiência vai depender da habilidade de penetração na interface ferramenta/cavaco em um curto período de tempo disponível, bem como de formar um filme com uma resistência ao cisalhamento menor do que a resistência do material da peça. Em contrapartida, o fluido com propriedades refrigerantes favorece a transferência de calor da região de corte, reduzindo a temperatura da ferramenta e da peça, mesmo que a temperatura da interface ferramenta/cavaco não seja significativamente alterada.

### 1.1. Tipos de fluidos de corte

A classificação dos fluidos de corte é de extrema importância para a indústria metal-mecânica, visto que, cada fluido possui características específicas as quais ajudam na escolha para determinada aplicação, garantindo a integridade dos componentes e alcançando, portanto, melhores resultados, tanto operacional quanto econômico. Não existe um fluido de corte com características universais, ou seja, capaz de atender todas as exigências do processo de usinagem, portanto, cabe ao usuário avaliar e decidir quais características do fluido lhe proporcionará melhor custo/benefício baseada nas exigências do projeto. Segundo [3], os fluidos de corte são definidos a partir de diferentes fluidos básicos, podendo ser divididos em três tipos, os oleosos, aquosos e gasosos.

#### 1.1.1. Fluidos emulsionáveis

A emulsão é caracterizada por apresentar uma mistura de dois fluidos imiscíveis: um com estrutura polar (água) e outro com estrutura apolar (óleo) [2]. Esse fluido é bastante utilizado no processo de usinagem quando se utiliza altas velocidades de corte, pois, tem como principal vantagem a elevada capacidade de refrigeração na zona de corte, aliada aos fatores de lubrificação e de retirada de cavaco [4, 5]. Em seu estudo [6], afirma que fluidos emulsionáveis não são soluções de óleo em água, mas sim água com partículas de óleo dispersas em seu interior, visto que o óleo e água não se misturam. Portanto é errôneo segundo o autor, chamar esse tipo de fluido como óleo solúvel.

Em estudos recentes [7], observaram que fluidos emulsionáveis a base de óleo de soja epoxidado possuem um maior poder lubrificante, gerando uma redução na potência de corte e menores variações nos desvios dimensionais, no processo de torneamento do aço ABNT 1045, quando comparada ao fluido biodiesel (obtido através do processo de transesterificação do óleo de girassol), à uma solução emulsionável com óleo comercial e à usinagem a seco. A velocidade de corte do processo foi determinada com base no diâmetro do tarugo a uma rotação de 1600 rpm. Utilizaram o metal duro como ferramenta de corte, profundidades de corte de 0,5 mm e 1 mm e avanço de 0,187 mm/rev.

Em seu estudo [8], argumenta que as emulsões possuem maior dificuldade de remover calor na interface ferramenta-peça quando comparadas aos óleos integrais minerais e sintéticos. Para o autor, fluidos emulsionáveis são líquidos misturados à água que possuem baixo ponto de ebulição e quando entram em contato com a superfície quente da peça, a troca de calor e a evaporação do líquido é imediata, promovendo o abaixamento da temperatura da peça, porém não há troca de calor na interface ferramenta/cavaco.

#### 1.1.2. Óleos vegetais

Os óleos vegetais são obtidos de sementes oleaginosas que contêm frutos ou nozes, que possam ser extraídas por métodos que envolve pressão, extração, solvente ou a combinação desses. Esses óleos passam por uma série de tratamentos tanto físico quanto químico para seu refino.

Esses fluidos estão sendo um potencial substituto dos óleos minerais por serem ambientalmente amigáveis, renováveis, menos tóxicos, facilmente biodegradáveis e por fatores econômicos [9]. Além disso, esses óleos possuem excelente lubrificidade, baixa volatilidade e boas características de viscosidade e temperatura; são mais compatíveis com a pele humana, reduz a formação de vapor, fumaça e diminui o risco de incêndio nas máquinas, devido ao seu alto ponto de fulgor; suportam uma maior tensão superficial, devido o arranjo molecular que alinham a superfície do metal, facilitando, portanto, a usinagem e melhorando a vida da ferramenta [10]. Esse tipo de óleo é de interesse particular no Brasil, visto que há uma grande diversidade de óleos vegetais em terras brasileiras, tornando o país um dos maiores produtores desse tipo de óleo, principalmente o de soja [9].

O óleo de soja é obtido pelo grão da soja (*Glycine max*) que é um produto agrícola, originário da china, de grande interesse mundial devido ser empregado na alimentação humana e animal e ao seu valor econômico nos mercados nacional e internacional. As propriedades dos fluidos são de suma importância para determinar a qualidade do mesmo e conseqüentemente a susceptibilidade à oxidação quando exposto ao ar, bem como a sua capacidade lubrificante/refrigerante [10]. O teor de ácidos graxos insaturados e ácidos linolênico são elevadas neste tipo de óleo, tornando-o susceptível às reações de oxidação [11]. A composição e o teor de ácidos graxos presentes no óleo de soja podem ser afetados pelos vários fatores geográficos e do meio ambiente, principalmente pelas condições climáticas e do solo [11,12].

Desde o século passado, estudos na área da usinagem se intensificaram na busca de métodos eficientes e eficazes para os processos, no que diz respeito a qualidade e segurança. Portanto, o uso de produtos oriundos de fontes renováveis e/ou naturais nos processos de usinagem tornou-se uma medida, até então, satisfatória e ecologicamente correta, segundo alguns autores.

Em seu estudo, [13] fez um comparativo entre o óleo dendê e óleo de soja. A autora descobriu, por meio de análises químicas, que o óleo de soja apresenta uma maior tendência à oxidação, devido aos seus altos índice de iodo e índice de acidez. Além disso, por meio da análise de viscosidade à 40°C ([14] *apud* [13]) foi observado que o óleo de soja apresenta uma viscosidade inferior.

Resultados contrários foram encontrados por [15]. Os autores compararam a influência do óleo a base de amendoim e a base de algodão no processo de usinagem de ligas a base de cobre utilizando ferramenta de aço rápido (*High Speed Steel* - HSS). A pesquisa objetivou examinar as conseqüências desses fluidos na intensidade da força de corte e no acabamento superficial. Os parâmetros usados foram rotação de 835 rpm, velocidade de corte de 80,89 m/min, avanço de 0,0916 mm/rot e profundidade de corte de 1,5 mm. Os pesquisadores concluíram que o óleo a base de amendoim apresentou melhores resultados nos parâmetros avaliados, além disso, propiciou um aumento na retirada de material.

Embora seja vasta a quantidade de óleos vegetais estudados como possibilidade de ser um fluido de corte no processo de usinagem, existem ainda óleos que são poucos difundidos pelos pesquisadores. Pesquisas envolvendo o óleo de coco neste contexto, por exemplo, necessitam de uma especial atenção. O óleo de coco é obtido pelo coco propriamente dito, pertencente à família *Cocos Nucifera L.*, que é uma árvore cultivada por proporcionar múltiplas utilidades, principalmente por seus valores medicinais e nutricionais [16].

Em sua obra [17] estudaram a influência de diferentes fluidos de corte, especialmente de origem vegetal, no processo de torneamento do aço ABNT 1045. O trabalho objetivou avaliar a corrente elétrica consumida no eixo da árvore e a temperatura do sistema em função da velocidade de corte. Os parâmetros de usinagem foram: avanço de 0,4 mm/rev e profundidade de 0,5 mm. O material da ferramenta foi metal duro. Os autores concluíram que o fluido a base de óleo babaçu apresentou melhores resultados nos parâmetros avaliados, quando comparado ao fluido de corte emulsionável.

Em seus estudos, [18] fizeram uma investigação experimental de lubrificação por quantidade mínima de fluido a base de óleo de coco. Os autores utilizaram o aço inoxidável austenítico AISI 304 e aço suave como corpo de prova e o metal duro T9325 como ferramenta de corte no processo de torneamento. Segundo os autores, o óleo de coco usado nas condições supracitadas apresentou uma melhor absorção de calor durante o processo de usinagem e dentre os métodos utilizados obteve um menor desgaste de flanco da ferramenta.

Estudo semelhante foi realizado por [19], porém, com resultados contrários. Os autores investigaram o desgaste da pastilha de metal duro e a rugosidade dos corpos de prova feitos do aço AISI 4340 endurecido, no processo de torneamento utilizando a técnica de aplicação de fluido de corte por mínima quantidade de lubrificante (*Minimum Quantity of Fluid* - MQL) com diferentes fluidos de cortes a base vegetal (canola, coco e soja) comparando com o óleo sintético e a usinagem a seco. O óleo de canola de modo geral obteve os melhores resultados nos parâmetros avaliados. Foi observado ainda, que em altas velocidades o uso de óleo sintético com MQL mostra uma vida útil mais longa da ferramenta [20].

Diante de tudo o que já foi exposto, este trabalho de pesquisa discutirá a viabilidade do uso de fluidos sustentáveis como fluido de corte alternativo para diminuir o impacto direto com o meio ambiente e melhoria no processo tribológico. Este estudo consiste na avaliação de 2 óleos vegetais, soja e coco, extraídos de sementes oleaginosas, no processo de torneamento longitudinal externo de um tarugo de aço SAE 1045. Ambos os fluidos passaram por análises laboratoriais para identificar as características anteriormente expostas, as quais serão capazes de rotulá-los como um potencial fluido de corte.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este tópico apresenta a descrição de todos os equipamentos, insumos e materiais utilizados, bem como os procedimentos e planejamentos utilizados durante a experimentação. A pesquisa foi realizada no Laboratório de Usinagem do Centro de Engenharias da UFERSA campus Mossoró/RN.

## 2.1. Materiais utilizados

O material utilizado para o procedimento experimental foi o aço carbono ABNT 1045 sem tratamento térmico e sem acabamento superficial.

A ferramenta de corte usada na operação de desbaste foi um inserto fabricado em metal duro da marca Iscar e referência Tnmg 160404 TF IC907.

O suporte da ferramenta foi fabricado pela *Masterfer*, tipo MTJNR 2020 K16.

Para os ensaios de usinagem, foi utilizado o torno da marca *Nardini* e modelo NODUS 220, com rotação máxima de 2360rpm e avanço de 0,042mm/rot, disponível no laboratório de usinagem na UFERSA. A vazão da bomba do torno para jorrar o fluido foi de 38 L/min.

Foram utilizados aproximadamente 10 litros de óleo de soja, da marca Soya, comprados em supermercados em vasilhames de 900ml; 10 litros de óleo de coco extravirgem prensado a frio, da marca Fillovita, comprados no site da fabricante e 15 litros de emulsão, feita no próprio laboratório, conforme orientação do fabricante (5% de óleo e 95% de água). O óleo utilizado para a emulsão foi o *Lubrax* 148145/357173.

Utilizou-se um multímetro digital do tipo alicate da marca *Kita* e modelo AOV 1000.

Para auxiliar na mensuração do desgaste médio de flanco, utilizou-se um microscópio óptico com câmera Digital USB, 1000X com resolução máxima de 640 x 480, fabricante NovaDigital.

A densidade dos fluidos estudados foi obtida por um densímetro: *Automatic density meter* DDM 2911 plus da empresa *Rudolph Research Analytical*.

Para medir a rugosidade da superfície, foi utilizado um rugosímetro portátil com sensor destacável ISR-C300 da marca INSIZE, com faixa de mensuração do parâmetro Ra, variando de 0,005µm à 32 µm; e uma mesa de desempenho, com número de série 0139911 da fabricante *Mitutoyo*.

A temperatura do sistema foi obtida por um termômetro digital infravermelho da marca Minipa e modelo MT-350A com mira a laser -50 a 800°C.

## 2.2. Métodos

Os corpos de prova foram obtidos a partir de tarugos redondos laminados com diâmetro inicial de 1 1/2 e comprimento de 200mm, sendo que 50mm foi utilizado para fixação na placa autocentrante com 3 castanhas.

Antes da usinagem de cada peça foi realizado um desbaste prévio de 2 mm, a fim de padronizar a superfície do material, retirar a camada de óxido e eliminar possíveis desbalanceamentos que poderiam interferir nas medições da potência de corte. Após retirada da camada de óxido o diâmetro trabalhado foi 36mm.

Com o objetivo de diminuir a inflexão do tarugo durante o processo de usinagem bem como as vibrações no sistema, eles foram usinados até que seu diâmetro atingisse um valor de 25 mm.

Estabelecendo uma comparação entre as recomendações do fabricante e a literatura [7, 8], foi decidido os seguintes parâmetros de usinagem: profundidade de corte  $a_p = 1$  mm, avanço  $f = 0,19$  mm/rot, rotação  $r = 1500$  rpm o que leva a se trabalhar inicialmente com uma velocidade de corte de  $V_c = 170$  m/min, porém, sabe-se que a velocidade de corte tende a mudar ao longo do processo devido a alteração no diâmetro da peça, e por se tratar de um processo de torneamento em torno convencional existe uma limitação por parte da máquina para manter esse parâmetro constante; utilizou-se um percurso de avanço inicial de  $L_f = 150$ mm.

Para cada tipo de fluido destinou-se 1 aresta de corte do inserto. Sempre que o desgaste de uma aresta chegasse a um valor igual a 0,3 mm, era feita a sua substituição e realizada a medição da rugosidade do corpo de prova, conforme recomendações da ISO 3685 de 1993.

A primeira análise de cada aresta de corte foi realizada após 14 passes, em seguida, estabeleceu-se um padrão de análise a cada 5 passes até que o desgaste médio de flanco ( $V_b$ ) chegasse a um valor de 0,3 mm conforme [2, 6, 8].

O Microscópio óptico foi conectado ao computador pelo *software AmScope*, de modo a obter imagens reais do desgaste dos insertos de corte. Nas análises realizadas foi aplicado um aumento de 100 vezes.

A temperatura do sistema foi obtida por um termômetro infravermelho usando uma emissividade de 0,77, a mesma foi usada por [21, 22]. A mira do laser estava apontada a uma distância de aproximadamente 12 cm do plano de cisalhamento, ou seja, da interface ferramenta-peça.

A corrente da máquina foi monitorada por um multímetro do tipo alicate, conectado à um dos fios de alimentação da máquina. A tensão obtida foi de 223 V.

### 2.2.1. Potência de usinagem

A potência de usinagem pode ser medida, experimentalmente, por meio da tensão e da corrente elétrica consumida. É um parâmetro de corte que nos auxilia a estabelecer o quanto podemos exigir de uma máquina-ferramenta para um máximo rendimento, sem prejuízo dos componentes dessa máquina, obtendo-se assim uma eficiente usinabilidade. Conforme [2] a potência instantânea pode ser calculada pela Equação 1:

$$P_i = V(t) \times I(t) \quad (1)$$

Onde,  $P_i$  = Potência instantânea;  $V(t)$  = tensão medida no tempo e  $I(t)$  = corrente medida no tempo

### 2.2.2. Análises Físico-químicas

A caracterização das amostras dos óleos foi realizada em termos das seguintes análises físico-químicas: densidade, índice de acidez e índice de saponificação. A pesquisa foi realizada no Laboratório de Petróleo do Centro de Engenharias da UFERSA, campus Mossoró/RN.

#### 2.2.2.1. Índice de acidez

O índice de acidez é definido como o número de mg de hidróxido de potássio (KOH) necessário para neutralizar um grama da amostra [23]. Para análise de índice de acidez, pesou-se aproximadamente 2 g da amostra em um Erlenmeyer e adicionou-se 25ml de solução de éter-álcool (2:1) previamente neutralizada com uma solução de hidróxido de sódio 0,1M. Em seguida, adicionou-se duas gotas do indicador fenolftaleína e titulou-se com solução de hidróxido de sódio 0,1M até o aparecimento da coloração rósea que deve persistir por 30 segundos. Este procedimento foi determinado segundo [23], que é compatível com a [24]. A Equação 2 é indicada por [23] para obter o valor do índice de acidez.

$$\text{índice de acidez} = \frac{V \cdot f \cdot 100}{P \cdot c} \quad (2)$$

na qual,  $V$  é o volume de KOH, em ml, gasto na titulação;  $f$  é o fator de solução;  $P$  é o peso da amostra e  $c$  é a correção para solução, [21] recomenda utilizar 10 para solução de hidróxido de sódio 0,1M.

#### 2.2.2.2. Índice de Saponificação

Para obter o índice de saponificação (Equação 3) pesou-se aproximadamente 2,0g de amostra em um balão de destilação, adicionou 50ml da solução alcoólica de KOH 0,5N. O balão foi colocado em um sistema de refluxo por uma hora para completa saponificação da amostra. Uma amostra de referência (branco) foi preparada nas mesmas condições descritas acima. Após o resfriamento do frasco, lavou-se a parte interna do condensador com um pouco de água. Desconectou-o do condensador e adicionou 1,0ml do indicador (fenolftaleína 1%) e titulou-se com a solução de ácido clorídrico (HCL) 0,5M até o desaparecimento da cor rósea. Este procedimento é baseado na metodologia de [23].

$$\text{índice de saponificação} = \frac{(V1 - V2) \cdot f \cdot 28,06}{P} \quad (3)$$

Onde,  $V1$  é o volume em ml do ácido utilizado na titulação da prova em branco;  $V2$  é o volume em ml do ácido utilizado para titular o excesso de KOH;  $f$  é o fator do HCL e  $P$  é o peso da amostra.

#### 2.2.2.3. Densidade

A determinação da densidade foi realizada utilizando um densímetro, que foi primeiramente limpo injetando água nos canais de entrada do equipamento. Fez-se o ajuste da temperatura para a análise (25,0°C) e realizou-se a calibração o equipamento obtendo a densidade da água com esse parâmetro de entrada. Em seguida a amostra foi adicionada cuidadosamente com uma seringa, para prevenir a formação de bolhas de ar. Após, aproximadamente, 2 minutos o resultado da análise foi apresentado no visor do equipamento.

#### 2.2.2.4. Rugosidade

Para a medição de rugosidade, os tarugos foram previamente limpos com uma flanela, sempre observando para que não ficasse fios de algodão na superfície. Em seguida, foram preparados em uma mesa de despenho para facilitar o deslocamento do apalpador. A rugosidade foi definida pelo parâmetro de amplitude  $R_a$  de acordo com a norma DIN 4776 (1990) [9], e o comprimento de medição *cut-off* utilizado foi de 2,5mm. As medições foram feitas com um rugosímetro portátil da empresa INSIZE, modelo ISR – C300. A rugosidade foi medida em quatro posições longitudinais e equidistantes à 35mm. Posteriormente foram calculados a média aritmética e o desvio padrão dos resultados obtidos.

## 3. RESULTADOS

A seguir serão apresentados e discutidos os resultados de todos os ensaios realizados, inicialmente com as análises físico-químicas dos fluidos e a capacidade lubrificantes dos fluidos estudados e em seguida com os ensaios de usinagem (corrente consumida, temperatura do processo, vida útil da ferramenta e acabamento superficial).

### 3.1. Análises físico-químicas dos fluidos

A caracterização de análises físico-químicas visa selecionar dentre os fluidos vegetais estudados aquele que apresenta propriedades semelhante às da emulsão. Essa semelhança favorece sua utilização como fluido de corte no processo de torneamento. A Tabela 1 mostra os resultados da pesquisa das análises físico-química dos óleos estudados.

TABELA 1. Análises físico-química dos óleos estudados (autoria própria).

<i>Tipo de fluido</i>	<i>Índice de saponificação (mg.KOH.g<sup>-1</sup>)</i>	<i>Índice de acidez (mg.KOH.g<sup>-1</sup>)</i>	<i>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</i>
Óleo de coco	245,68 ± 2,55	1,114 ± 0,126	0,918985 ± 0,000025
Óleo de soja	191,81 ± 4,52	0,370 ± 0,124	0,916603 ± 0,000013
Emulsão	61,25 ± 26,10	1,084 ± 0,107	0,994305 ± 0,000010

Observa-se na Tabela 1 que o maior índice de saponificação é para o óleo de coco, estando para tanto, (considerando o desvio padrão) dentro da faixa recomendada (248-265 [(mg.KOH.g)<sup>-1</sup>]) pela [25] que estabelece faixas de parâmetros de qualidade para gorduras e óleos utilizados para fins alimentícios. Segundo [9, 26], um alto índice de saponificação indica uma maior probabilidade de oxidação e uma maior propensão a formar borra. O óleo de soja também está dentro da faixa recomendada (189-195 [(mg.KOH.g)<sup>-1</sup>]) pelo órgão regulamentador. E o óleo mineral (usado para fazer a emulsão) teve seu índice de saponificação ligeiramente reduzido, acredita-se que a presença de água em sua composição tenha contribuído para essa redução, pois, devido a mistura não ser completamente homogênea a probabilidade das amostras não serem iguais é muito alta e por isso obteve-se um alto valor para o desvio padrão dessa análise. O autor [9] encontrou um índice de 190 [(mg.KOH.g)<sup>-1</sup>] para o óleo mineral.

Em relação ao índice de acidez, pode-se observar que o óleo de soja é aproximadamente 3 vezes menos ácido do que os outros óleos estudados. Já o óleo de coco, segundo as análises, é o mais ácido. Porém, ambos estão dentro do limite máximo recomendado pela [25], a qual fixa que o índice de acidez máximo para o óleo de soja é 0,6 mg KOH/g e 4 mg KOH/g para o óleo de coco. Altos índices de acidez indica maior probabilidade de corrosão da peça, pois, o fluido tende a se deteriorar e oxidar com maior velocidade, perdendo suas propriedades iniciais.

A densidade de ambos os fluidos também está dentro da faixa recomendada pela [25] sendo 0,908-0,921 g/cm<sup>3</sup> para o óleo de coco e 0,916-0,922 g/cm<sup>3</sup> para o óleo de soja. Em sua obra [9] afirma que esse parâmetro é um bom indicativo para monitoramento de fluido de corte, pois, quanto maior for seu peso molecular mais alto será o seu grau de insaturação.

Os resultados dessas análises são muito próximos daqueles encontrados por [9, 13, 16, 27], as diferenças obtidas são variações que podem ser provenientes da própria região de cultivo do grão, com diferenças de solo, umidade e insolação da região de plantio [13].

### 3.2. Análise da temperatura e corrente do sistema

Na Figura 1, estão representadas as curvas da temperatura ao longo do tempo durante a usinagem utilizando diferentes fluidos de corte. Os valores apresentados referem-se às análises de desgaste das arestas de corte de acordo com o critério pré estabelecido na metodologia, iniciando após 14 passes. Na Tabela 2 encontram-se as médias e desvio padrão dessas temperaturas.

TABELA 2. Média e desvio padrão das temperaturas (autoria própria).

<i>Tipo de fluido</i>	<i>Média da temperatura</i>	<i>Desvio padrão</i>
Óleo de coco	42,7	± 2,4
Óleo de soja	43,8	± 3,4
Emulsão	44,4	± 4,7
A seco	51,4	± 7,8

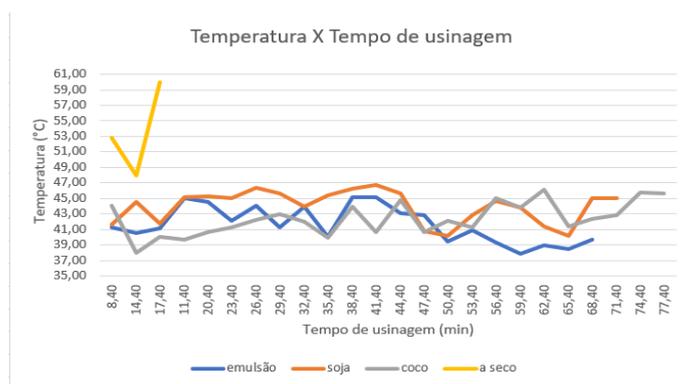


FIGURA 1. Influência da temperatura no processo de usinagem (autoria própria).

As temperaturas registradas durante o processo apresentaram valores mais baixos do que os valores encontrados por outros autores [18, 21], além disso, os valores de desvio padrão foram altos e próximos quando utilizados diferentes fluidos de corte. Porém, os autores [19] utilizando óleo de coco com a técnica MQL e variando a velocidade de corte até aproximadamente 110 m/min, registraram temperaturas de corte inferior a 40°C. Considera-se que esses valores tenham sido influenciados pela distância focal da mira, pois, o movimento relativo entre ferramenta e peça, bem como a aplicação do fluido de corte e a saída do cavaco impossibilitaram a aplicação da distância focal recomendada pelo fabricante resultando em alguns erros nas leituras.

Mas, como todos os fluidos estavam submetidos à uma mesma distância focal, mesmo que não fosse aquela recomendada pelo fabricante do equipamento, as temperaturas registradas ao longo do processo mantiveram a coerência com as temperaturas observadas por outros supracitados. Como já era esperado, as maiores temperaturas foram encontradas para a usinagem a seco. O fato dessa elevada temperatura é devido à ausência de um meio refrigerante e/ou lubrificante em contato direto com aresta de corte e a peça, portanto, a temperatura nessa região é aumentada progressivamente ao passo que a ferramenta avança longitudinalmente, resultando, no fim de vida prematuro da aresta cortante. Esses resultados também foram observados por [7, 17].

Observa-se na Figura 1, que aproximadamente nos 47 primeiros minutos de usinagem, ou seja, mais da metade da vida útil da ferramenta, a temperatura do processo, de forma geral, foi mais baixa quando utilizado o óleo de coco como fluido de corte e depois se manteve dentro de uma faixa, a qual não teve muitas variações quando comparada aos outros óleos estudados, obtendo tanto uma média como um desvio padrão baixo, como mostra na Tabela 2. Apresentando, portanto, características de um fluido refrigerante. Esses resultados corroboram com os resultados encontrados por [17], com a diferença no tipo do coco, pois, o autor em sua pesquisa utilizou o coco de babaçu. E está de acordo também com [18] mesmo que este tenha utilizado a técnica MQL.

O óleo de soja durante quase todo o tempo de usinagem obteve a maior temperatura dentre os fluidos estudados como mostra a Figura 1, apresentando um baixo poder refrigerante quando comparado aos outros fluidos estudados. A emulsão possui características tanto refrigerante quanto lubrificante, devido sua composição. A média da temperatura, apresentada na Tabela 2, para a emulsão foi a mais alta, quando comparada às usinagens com utilização de fluido de corte, acredita-se que essa média foi afetada pelas oscilações da temperatura durante o processo, pois, segundo [8] as emulsões tem uma maior dificuldade em remover o calor na interface ferramenta-cavaco.

É possível observar ainda, na Figura 1, que a temperatura sofreu um aumento nos últimos minutos de usinagem, independentemente do tipo de fluido utilizado, devido ao desgaste progressivo da ferramenta ao longo do tempo.

Na Figura 2, estão apresentadas as curvas da corrente consumida na máquina ao longo do tempo no processo de torneamento, seguindo o mesmo padrão de tempo da Figura 1. Na Tabela 3, estão representadas as médias e desvios padrão dessas correntes, bem como, as potências de usinagem obtidas pela Equação 1 e seus respectivos desvios padrão.

TABELA 3. Média e desvio padrão da corrente consumida pela máquina (autoria própria).

Tipo de fluido	Média da corrente (A)	Desvio padrão	Média da Potência (W)	Desvio Padrão
Óleo de coco	5,0	± 0,2	1115,0	± 34,3
Óleo de soja	5,0	± 0,1	1115,0	± 31,4
Emulsão	5,1	± 0,1	1137,3	± 32,0
A seco	5,0	± 0,1	1115,0	± 22,2

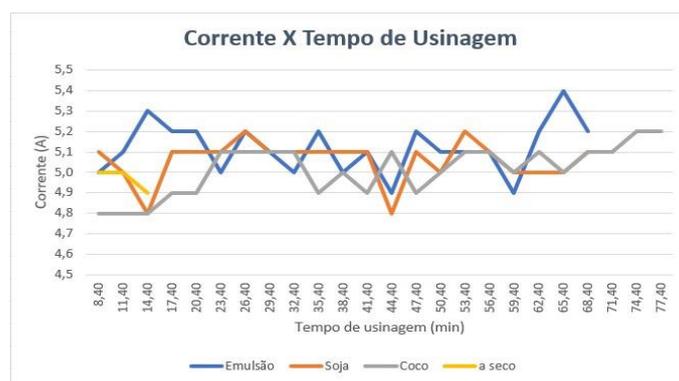


FIGURA 2. Influência da corrente no processo de usinagem (autoria própria).

O consumo de corrente na máquina, diferente da temperatura, apresentaram valores de média e desvio padrão mais baixo para a usinagem a seco (Figura 2) quando comparada à utilização de fluidos, principalmente a emulsão. Isso ocorre por que esse parâmetro está relacionado com a força de usinagem e quanto mais aquecida for a região de contato ferramenta-peça, menos força será requerida da máquina para cisalhar o material da peça. Pode-se observar na Tabela 3 que as potências médias não tem diferenças significativas por apresentarem corrente iguais para: a usinagem a seco, com óleo de coco e com óleo de soja. Esses resultados corroboram com [7], pois os autores constataram que a potência requerida para a usinagem a seco é muito próxima da potência requerida quando utilizados óleos vegetais.

Conforme [2] o fluido de corte para ser efetivo na sua ação lubrificante tem que se fazer presente na interface peça-cavaco-ferramenta, além de ter a capacidade de interagir com o material da peça para formar um filme lubrificante eficiente.

O contrário acontece com a emulsão. Segundo a Tabela 3, a emulsão apresenta a maior média da corrente e conseqüentemente requer mais potência da máquina. Acredita-se que por ser considerado um fluido com alto poder refrigerante, o resfriamento na região de corte tenha contribuído negativamente para o aumento da corrente, pois, será exigido uma maior potência da máquina para cisalhar a mesma quantidade de material. Em conseqüência disso, a potência requerida foi levemente alterada.

### 3.3. Análise do desgaste da ferramenta

A Figura 3 apresenta as curvas de desgaste das arestas de corte para diferentes fluidos de corte.

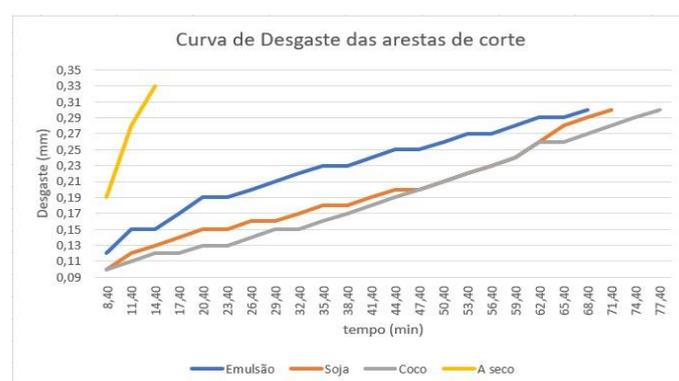


FIGURA 3. Curvas de desgaste das arestas de corte (autoria própria).

Na condição a seco, o calor gerado é distribuído entre a peça, ferramenta e cavaco. Por isso, a ferramenta está sujeita a uma intensa temperatura que favorece a retirada de material, pois, o aquecimento na zona de corte promove diminuição da dureza do material da peça, facilitando o corte. Porém, dentre as condições impostas à mesma ferramenta, essa foi a que apresentou uma usinagem mais brusca e que resultou em um menor tempo de vida útil da ferramenta. Pode-se observar na Figura 3 que a curva de desgaste da aresta de corte para a condição a seco, apresentou um comportamento quase exponencial, isso pode ser confirmado pela Figura 4, que apresenta o avanço de desgaste dessa aresta de corte no decorrer da usinagem a seco, chegando a seu fim de vida com  $V_b = 0,33\text{mm}$ , ou seja, foi registrado um desgaste excedente ao recomendado pela literatura, portanto, essa aresta de corte chegou ao fim de sua vida, antes de um  $L_f = 3600\text{mm}$ , que representa 24 passes ( $T = 14,40\text{ min}$ ).

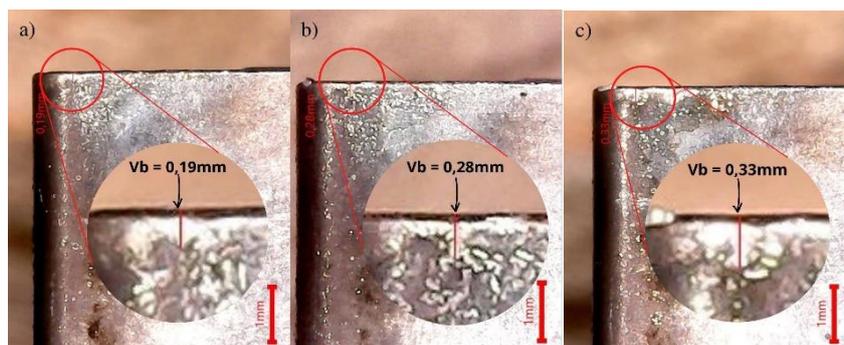


FIGURA 4. Avanço do desgaste da aresta de corte na usinagem a seco: (a) após 14 passes, foi constatado um desgaste de 0,19mm; (b) após 19 passes, o desgaste foi de 0,28mm; (c) após 24 passes, a ferramenta chega no fim da vida útil com desgaste de 0,33mm (autoria própria).

As Figuras a seguir apresentam o avanço do desgaste da aresta de corte no decorrer da usinagem utilizando a emulsão como fluido de corte (Figura 5); utilizando óleo de soja como fluido de corte (Figura 6) e utilizando óleo de coco como fluido de corte (Figura 7).

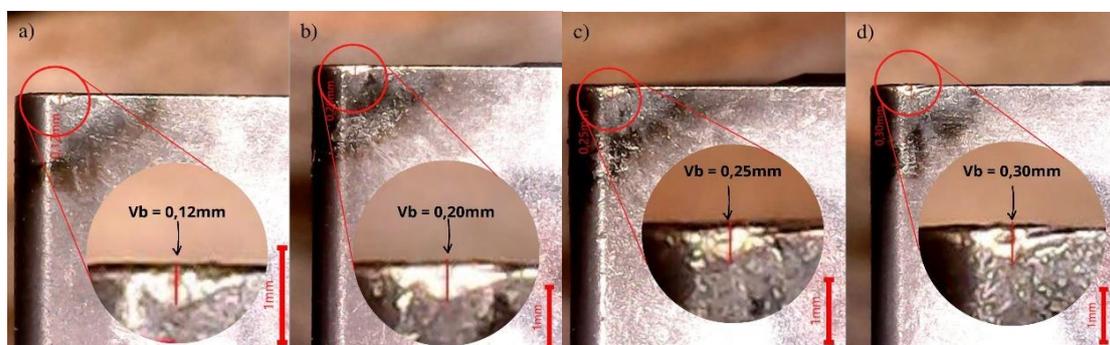


FIGURA 5. Avanço do desgaste da aresta de corte utilizando a emulsão: (a) após 14 passes, foi constatado um desgaste de 0,12mm; (b) após 44 passes, o desgaste foi de 0,20mm; (c) após 74 passes, o desgaste foi de 0,25mm; (d) após 114 passes, a ferramenta chega no fim da vida útil com desgaste de 0,30mm (autoria própria).

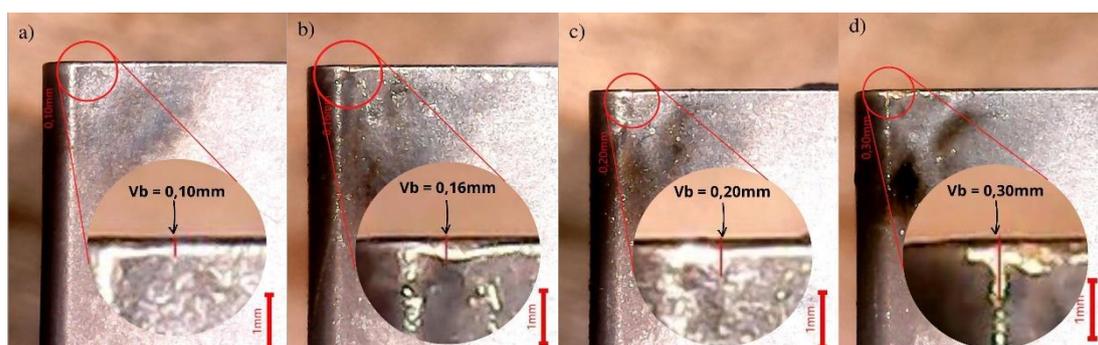


FIGURA 6. Avanço do desgaste da aresta de corte utilizando óleo de soja: (a) após 14 passes, foi constatado um desgaste de 0,10mm; (b) após 44 passes, o desgaste foi de 0,16mm; (c) após 74 passes, o desgaste foi de 0,20mm; (d) após 119 passes, a ferramenta chega no fim da vida útil com desgaste de 0,30mm (autoria própria).

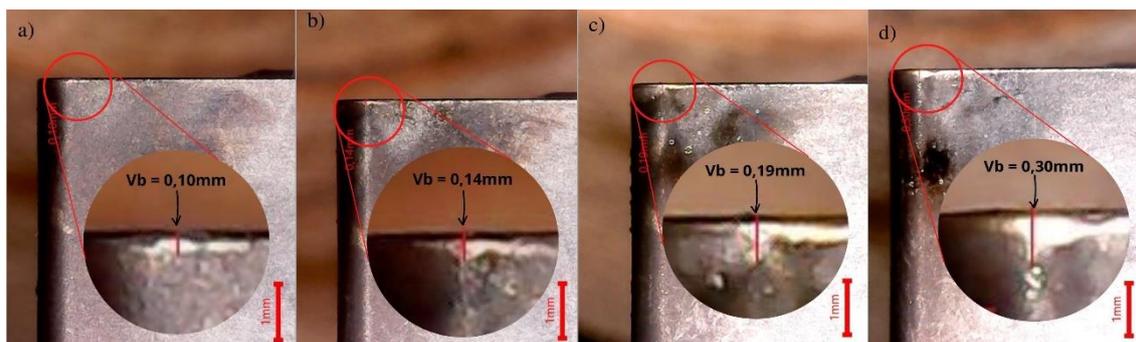


FIGURA 7. Avanço do desgaste da aresta de corte utilizando o óleo de coco: (a) após 14 passes, foi constatado um desgaste de 0,10mm; (b) após 44 passes, o desgaste foi de 0,14mm; (c) após 74 passes, o desgaste foi de; (d) após 129 passes, a ferramenta chega no fim da vida útil com desgaste de 0,30mm (autoria própria).

As análises das Figuras 5 a 7 confirmam a eficiência na utilização de fluidos de corte no processo de torneamento, pois, a presença de fluidos em abundância no processo indicam maior vida da ferramenta e retardo no desgaste desta, gerando uma redução nas tensões e geração de calor, favorecendo o processo de desgaste por parte da ferramenta de corte devido as suas propriedades lubrificantes.

Os óleos vegetais estudados possuem uma taxa de desgaste muito parecida, chegando a serem iguais entre o intervalo de tempo  $T = 47,40$  min à  $T = 62,40$  min. Embora apresentem comportamento muito parecidos, o óleo de coco se destaca por sempre está com um  $V_b$  mais abaixo do que os outros fluidos estudados. Para a mesma quantidade de passes, com  $L_f = 6600$ mm ( $T = 26,40$  min), pode-se observar diferentes valores para  $V_b$ , baseado no tipo de fluido: utilizando emulsão  $V_b = 0,20$ mm; óleo de soja  $V_b = 0,16$ mm e óleo de coco  $V_b = 0,14$ mm, a usinagem a seco não chegou a atingir essa quantidade de passes.

Observa-se ainda nas Figuras 5 a 7, que o critério de fim de vida (0,30mm) foi atingido em tempos e em valores de  $L_f$  distintos, possibilitando uma fácil percepção do desempenho dos fluidos vegetais em comparação à emulsão. A Figura 5, mostra que a aresta de corte quando utilizada emulsão como fluido de corte, chegou ao seu fim de vida no  $L_f = 17100$ mm ( $T = 68,40$ ), enquanto, o para os fluidos vegetais o fim de vida das arestas foi obtido para  $L_f \geq 17850$ mm. Esses resultados estão condizentes com os resultados obtidos por [18], mesmo que o autor tenha utilizado a técnica MQL, foi observado um menor desgaste da ferramenta quando utilizado o óleo de coco.

Com o emprego de fluidos vegetais no processo, percebe-se um retardo no desgaste da ferramenta quando comparados à emulsão. As análises em destaque nas Figuras 5 a 7 nos mesmos intervalos de tempo deixam perceptível essa diferença. Portanto, segundo [9, 12] pode-se afirmar que os fluidos vegetais estudados, principalmente o óleo de coco possui características de um fluido lubrificante por apresentar um menor desgaste na aresta de corte para o mesmo intervalo de tempo e com os mesmos parâmetros de usinagem.

### 3.4. Análise da rugosidade

Na Tabela 4, estão apresentadas as medições do parâmetro  $R_a$  em 4 seções dos tarugos usinados com diferentes fluidos de corte.

TABELA 4. Valores de  $R_a$  para os tarugos usinados com diferentes fluidos de corte (autoria própria).

Tipo de fluido	Amostra 1 ( $\mu\text{m}$ )	Amostra 2 ( $\mu\text{m}$ )	Amostra 3 ( $\mu\text{m}$ )	Amostra 4 ( $\mu\text{m}$ )	Média ( $\mu\text{m}$ )
Óleo de coco	7,897	7,232	7,460	7,378	7,492
Óleo de soja	10,984	9,190	7,381	8,018	8,893
Emulsão	9,231	8,608	8,130	7,354	8,331
A seco	13,233	11,231	9,641	8,551	10,475

Como já era esperado, a rugosidade da usinagem a seco foi a que obteve maiores valores para o  $R_a$ , pois, a ausência de um fluido no processo favorece o desgaste rápido da ferramenta (conforme foi apresentado nas Figuras 3 e 4), portanto, a rugosidade da superfície apresenta uma tendência de aumentar à medida que se aumenta o desgaste da aresta de corte.

Observa-se na Tabela 4 que, para os mesmos parâmetros de usinagem foi obtido diferentes valores para  $R_a$ . O óleo de coco obteve um melhor desempenho desse parâmetro apresentando um  $R_a$  médio de  $7,492 \mu\text{m}$  representando uma diferença percentual de 10% de melhoria na rugosidade da peça em relação ao fluido de referência para esse estudo (emulsão). Esses resultados corroboram com os resultados obtidos por [18].

Já o óleo de soja apresentou valores de Ra médio mais próximos ao Ra médio da emulsão, com uma diferença de 6,74% de piora na rugosidade da peça. Resultados semelhantes foram encontrados por [19], mas, acredita-se que a negativa desse resultado obtido por ele seja explicada pela técnica utilizada, pois, o autor analisou a influência da temperatura, desgaste da ferramenta e rugosidade da peça pela técnica MQL.

#### 4. CONCLUSÃO

Na usinagem do aço SAE 1045, aplicando óleo de coco e óleo de soja como fluido de corte no processo de torneamento, foi observado uma melhoria como um todo ao final do processo quando comparado à emulsão e a usinagem a seco. O óleo de coco apresentou características de um fluido lubrificante e refrigerante, por apresentar uma menor temperatura durante a usinagem, um maior tempo de vida para a aresta de corte e um menor valor de Ra para a peça usinada. Além disso, os óleos vegetais estudados apresentaram um baixo valor de densidade quando comparado à emulsão, ou seja, possui menor probabilidade de oxidação. Porém, é necessário fazer um estudo de custo-benefício para avaliar se esse é o fluido mais recomendado para determinada aplicação.

#### REFERÊNCIAS

- [1] DIAS, A. M. de P. Avaliação Ambiental de Fluidos de Corte Utilizados em Processos Convencionais de Usinagem. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, Brasil, 2000.
- [2] MACHADO, A. R.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M.; DA SILVA, M.B. Fluidos de Corte. Teoria da Usinagem dos Materiais, 2ª Ed.; Ed. Edgard Blucher, São Paulo, SP, Brasil, 2011; p. 175-192.
- [3] HILSDORF, J. W. Química Tecnológica. 1ª Ed. Cengage Learning. São Paulo, SP, Brasil, 2010.
- [4] TAYLOR, C.; HERNANDEZ, S. G. A.; MARSHALL, M.; BRODERICK M. Cutting fluid application for titanium alloys Ti-6Al-4V and Ti-10V-2Fe-3Al in a finish turning process. Elsevier Ltda: 8<sup>th</sup> CIRP Conference on High Performance Cutting (HPC 2018), 2018.
- [5] GAJRANI, K. K.; RAM, D.; SANKAR, M. R. Biodegradation and hard machining performance comparison of ecofriendly cutting fluid and mineral oil using flood cooling and minimum quantity cutting fluid techniques. Elsevier Ltda: Journal of Cleaner Production 165 (2017) 1420-1435. 2017.
- [6] DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. Fluidos de Corte. Tecnologia da usinagem dos materiais, 7ª Ed.; Artliber Editora Ltda, Campinas, SP, Brasil, 2010; p. 173-187.
- [7] ESPINDOLA, E. S. C.; KLAFKE, A. L. Análise comparativa da utilização de fluidos de corte na usinagem do aço ABNT 1045 em operação de desbaste. VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Uberlândia, MG, Brasil, 10 a 15 de agosto de 2014.
- [8] SANTOS, Sandro Cardoso; SALES, Wisley Falco. Aspectos tribológico da usinagem dos materiais. Artliber Editora Ltda, São Paulo, SP, Brasil, 2007.
- [9] MORAIS, H. L. O. DE. Análise da viabilidade e das propriedades físico-químicas de formulações de fluidos de corte integral utilizando vegetais no processo de retificação. Dissertação (Mestrado), Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte/MG, 2014.
- [10] ARAUJO JUNIOR, A. S. Desempenho de óleos vegetais comestíveis aplicados por MQL no fresamento frontal de aço ABNT 1045. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia/MG, 2013.
- [11] FUENTES, P. H. A. Avaliação da qualidade de óleos de soja, canola, milho e girassol durante o armazenamento. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC, 2011.
- [12] CARDOSO, K. P. Óleo de Pinhão-manso e fluido de corte emulsionável: estabilidade oxidativa e propriedades lubrificantes. Dissertação (Mestrado), Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos/SP, 2012.
- [13] BELINATO, G. Estudo da oxidação dos óleos de soja e dendê aditivados com antioxidantes para uso em tratamentos térmicos de têmpera. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-graduação Interunidades em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo. São Carlos/SP, 2010.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMA TÉCNICAS. NBR 10441 – 10/02. Produtos de petróleo – Líquidos transparentes e opacos – Determinação da viscosidade cinemática e cálculo da viscosidade dinâmica. Rio de Janeiro: 2002.

- [15] SAIKIRAN, M.; KUMAR, P. An investigation on the effects of vegetable oil based cutting fluids in the machining of copper alloys. Elsevier Ltda: Materials Today: Proceedings. Warangal, India, 2010, p. 455-461.
- [16] STINGELIN, F. DE SOUZA; DE BARROS, G. V. P.; SANTOS L. A. B.; CRUZ I. S.; DO NASCIMENTO, J. V. S.; BARBOSA, S. A. Caracterização do óleo de coco a ser utilizado na produção de biodiesel via rota etílica. Anais. I Congresso Nacional de engenharia de petróleo, gás natural e biocombustíveis, Campina Grande/PB, Brasil, 13 a 15 de maio de 2015.
- [17] BEZERRA, R. P.; SANTO, C. R. do E.; ALMEIDA, R. S. de; RODRIGUES, J. R. P. Aplicação do fluido de corte de origem vegetal no processo de torneamento do aço ABNT 1045. XVIII Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, Erechim, RS, Brasil, 21 a 24 de novembro de 2011.
- [18] W. L. R. Fernando, N. Sarmilan, K. C. Wickramasinghe et al., Experimental investigation of Minimum Quantity Lubrication (MQL) of coconut oil based Metal Working Fluid, Materials Today: Proceedings, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.079>
- [19] SHRIKANT U. G.; NILESH G. P. Experimental Investigations Into Turning Of Hardened Aisi 4340 Steel Using Vegetable Based Cutting Fluids Under Minimum Quantity Lubrication. 2nd International Conference on Materials Manufacturing and Design Engineering. India: Elsevier Ltda, 2018.
- [20] ANSHUMAN DAS; PATEL, S.K.; BISWAL, B. B.; SAHOO, N.; PRADHAN, A. Performance evaluation of various cutting fluids using MQL technique in hard turning of AISI 4340 alloy steel. Elsevier Ltda: Measurement 150 (2020) 107079. 2020.
- [21] PIOTR, K.; DAMIAN, P.; TADAEUSZ, C. Determination of the emissivity coefficient of heat resistant superalloys and hard metal. Poznan University of Technology. Polônia. 2016.
- [22] MASOUDI, S.; GHOLAMI, M.A.; JANGHORBAN I., M.; VAFADAR, A. Infrared Temperature Measurement And Increasing Infrared Measurement Accuracy In The Context Of Machining Process. Advances in Production Engineering & Management. Iran, dez. 2017. pp 353-362.
- [23] LUTZ, A. Métodos físico-químicos para análise de alimentos, 4ª Ed.; Instituto Adolfo Lutz, São Paulo, SP, Brasil, 2008; p. 595–629.
- [24] ASTM D 974-97. Test method for acid and base number by color – indicator titration. Annual Book of ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA. 1997.
- [25] ANVISA. Regulamento Técnico para Fixação de Identidade e Qualidade de Óleos e Gorduras Vegetais. Resolução RDC nº 482, de 23 de setembro de 1999. Disponível em: [https://freitag.com.br/files/uploads/2018/02/portaria\\_norma\\_499.pdf](https://freitag.com.br/files/uploads/2018/02/portaria_norma_499.pdf) (acesso em 15/10/2021).
- [26] SOUZA, Ester Carvalho de. Estudo da oxidação do óleo de soja com diferentes concentrações de aditivos anti-oxidantes, para uso em tratamentos térmicos de têmpera. 2007. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- [27] G. S. Araujo; R. H. R. Carvalho; E. M. B. D. de Sousa. Produção de Biodiesel a partir de Óleo de Coco (Cocos nucifera L.) Bruto. Key Elements For A Sustainable World: Energy, Water And Climate Change. São Paulo – Brazil – May 20th-22nd – 2009.