



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

LUCIANO JERCY FRANÇA

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE EMULSÕES DE ÓLEO DE
BABAÇU E ÓLEO DE MAMONA PARA APLICAÇÃO COMO FLUIDOS DE
CORTE DE USINAGEM**

RECIFE

2018

LUCIANO JERCY FRANÇA

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE EMULSÕES DE ÓLEO DE
BABAÇU E ÓLEO DE MAMONA PARA APLICAÇÃO COMO FLUIDOS DE
CORTE DE USINAGEM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração:
Engenharia Mecânica – Materiais e Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Flávio José da Silva.

Coorientador: Prof. Dr. Kleber Gonçalves Bezerra Alves.

RECIFE

2018

Catalogação na fonte

Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

F814d França, Luciano Jercy.

Desenvolvimento e caracterização de emulsões de óleo de babaçu e óleo de mamona para aplicação como fluidos de corte de usinagem / Luciano Jercy França.
– 2018.

92f., il., figs., gráfs. e tabs.

Orientador: Prof. Dr. Flávio José da Silva.

Coorientador: Prof. Dr. Kleber Gonçalves Bezerra Alves.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2018.
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Mecânica. 2. Usinagem. 3. Sustentabilidade. 4. Fluidos de corte. 5. Fluidos de corte biodegradáveis. 6. Emulsões de fluidos de corte. I. Silva, Flávio José da (Orientador). II. Alves, Kleber Gonçalves Bezerra (Coorientador). III. Título.

LUCIANO JERCY FRANÇA

“DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE EMULSÕES DE ÓLEO DE
BABAÇU E ÓLEO DE MAMONA PARA APLICAÇÃO COMO FLUIDOS DE CORTE DE
USINAGEM.”

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 31/08/2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Flávio José da Silva (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Oscar Olímpio de Araújo Filho (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr^a Salete Martins Alves (Examinador Externo)

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

*Dedico este trabalho à minha linda e amada esposa **Monique Taíse**,
aos meus queridos pais, **Sr. Jersy** e **Sra. Vera**, e aos meus prezados
irmãos **Elaine**, **Adriano** e **Sara**, por tudo quanto me representam.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, todo o meu agradecimento a **Deus** por tudo quanto me proporcionou até aqui, e por sempre guiar os meus passos.

Agradeço à minha linda princesa e esposa **Monique Taíse**, por ter sido o fator essencial e determinante na conquista desta tão sonhada vitória, através de todo o amor, carinho, ajuda e muita paciência para comigo.

Quero agradecer aos **meus familiares**, pelo amor, apoio incondicional e principalmente pelas constantes orações ao meu favor.

Sou grato à **UFPE** pela oportunidade de ingresso na área acadêmica.

Agradeço aos funcionários e professores do **PPGEM**, os quais sempre se demonstraram solícitos e gentis.

De todo o meu coração, agradeço ao meu orientador, o **Prof. Dr. Flávio José da Silva**, pela sua atuação com profissionalismo, dedicação e inestimável paciência, durante as matérias ministradas e no período de correções da fase de orientação.

De igual modo, também agradeço ao meu co-orientador, o **Prof. Dr. Kleber Gonçalves Bezerra Alves**, pelo seu apoio fundamental em todas as fases desta pesquisa.

Especialmente, agradeço ao **Prof. Dr. Oscar Olímpio de Araújo Filho** e ao **Prof. Dr. Maxime Montoya**, pelas preciosas dicas prestadas para a melhoria da versão escrita da presente dissertação, onde através dos seus apontamentos foi possível uma melhor valorização dos dados de resultados da pesquisa.

Também sou grato aos meus **colegas de classe** das disciplinas obrigatórias e eletivas do período regular do curso, pela oportunidade de trocar experiências, crescer em conhecimento e aprendizado, além é claro dos momentos divertidos que vivemos, os quais levarei comigo.

Agradeço ao **CETENE**, pela realização das análises de cromatografia gasosa, perfil dos ácidos graxos, TGA e DSC.

Sou grato à **Esteban, Joana, Katarynna e Adriana** (pesquisadores do CETENE) pela excelente ajuda na interpretação dos dados das análises realizadas no CETENE.

Agradeço ao **LAC**, pela realização das análises de FTIR.

Sou grato à **João e Carolina** (pesquisadores do LAC) pelo fundamental apoio na etapa de interpretação dos parâmetros da análise de FTIR.

Agradeço ao **COMPOLAB** pela realização das análises de molhabilidade.

Sou grato à **Prof.^a Dr. Magda Rosangela Santos Vieira** por ceder os corpos de prova (substrato de aço carbono) para a realização dos ensaios de molhabilidade.

Sou grato à **Isabel (Mestranda do PPGEM)** pelo auxílio fundamental durante os testes de molhabilidade, bem como no tratamento dos resultados.

Agradeço a todos os **voluntários** que participaram com dedicação e paciência do estudo do desenvolvimento das emulsões.

Finalmente, e não menos importante, agradeço a **CAPES** pelo apoio financeiro, através da bolsa concedida para a realização do Mestrado.

“Não é na ciência que está a felicidade, mas na aquisição da ciência” (POE, 2018).

RESUMO

Os processos de usinagem envolvem elevadas temperaturas, as quais podem originar defeitos de natureza térmica nas peças fabricadas e desgaste prematuro das ferramentas de corte, e com isso, a produtividade é afetada e implica no alto custo agregado ao produto final. Os fluidos de corte desempenham a função de agentes de melhoria de usinagem, atuando na lubrificação e na refrigeração da interface cavaco/ferramenta e cavaco/peça, onde ocorre a distribuição do calor. Desta forma, torna-se possível a melhoria significativa em termos de prolongamento da vida útil das ferramentas de corte, de acabamentos superficiais e de integridades estruturais, o que é traduzido em economia e produtividade. A questão ecológica é o principal problema associado aos fluidos de corte por causa da toxicidade dos fluidos de corte convencionais, pois são derivados do petróleo. Pensando no fator sustentabilidade, é necessária a implementação das técnicas de fabricação limpa, e entre as tais estão os fluidos de corte alternativos de origem vegetal. O uso de emulsões de fluidos de corte permite a combinação das excelentes propriedades dos óleos (lubrificação, resistência ao desgaste e resistência à corrosão) e da água (refrigeração), além de garantir uma boa economia, onde a maior parte da composição é de água, além de proporcionar boa economia, visto que a maior parte da composição é formada por água. O desenvolvimento do trabalho de pesquisa tem a temática da produção de emulsões à base de óleos vegetais (óleo de babaçu e óleo de mamona) com fins de aplicações como fluidos de corte de usinagem e como parâmetro comparativo, desenvolveram-se de forma adicional duas formulações de emulsões à base de óleo sintético. A metodologia experimental consistiu na produção das formulações com a variação de quatro teores de óleos vegetais (5%, 10%, 15% e 20%), quatro teores de tensoativo (2%, 5%, 7% e 10%) e dois teores de óleo sintético (5% e 10%) seguido de armazenamento em condições adequadas por 30 dias. Neste tempo, avaliou-se a estabilidade macroscópica de todas as formulações, sendo verificado que algumas amostras não mantiveram algumas propriedades, como a aparência, o odor e a consistência, implicando no descarte das mesmas. Todas as demais formulações foram pré-selecionadas e posteriormente caracterizadas quanto a viscosidade, pH, molhabilidade, espectroscopia de infravermelho, calorimetria exploratória diferencial e análise termogravimétrica. Por meio dos resultados verificou-se que as emulsões vegetais apresentaram resultados satisfatórios de propriedades, o que significa ter um bom potencial de exploração na prática de usinagem, podendo representar uma alternativa aos fluidos de corte convencionais e sintéticos.

Palavras-chave: Usinagem. Sustentabilidade. Fluidos de corte. Fluidos de corte biodegradáveis. Emulsões de fluidos de corte.

ABSTRACT

The machining processes involve high temperatures, which can cause thermal defects in the manufactured parts and premature wear of the cutting tools, and with this, the productivity is affected and implies the high added cost to the final product. The cutting fluids play the role of machining enhancement agents, acting in the lubrication and cooling of the interface chip / tool and chip / part, where the heat distribution occurs. In this way, it is possible to significantly improve in terms of prolonging the useful life of cutting tools, surface finishes and structural integrity, which translates into economy and productivity. The ecological issue is the main problem associated with cutting fluids because of the toxicity of conventional cutting fluids as they are derived from petroleum. Thinking about the sustainability factor, it is necessary to implement clean manufacturing techniques, and among these are alternative cutting fluids of vegetable origin. The use of cutting fluid emulsions allows the combination of the excellent properties of the oils (lubrication, wear resistance and corrosion resistance) and water (cooling), in addition to ensuring a good economy, where most of the composition is water , besides providing good economy, since most of the composition is formed by water. The development of the research work has the theme of the production of emulsions based on vegetable oils (babassu oil and castor oil) for the purpose of applications as cutting fluids of machining and as a comparative parameter, two formulations were further developed of synthetic oil-based emulsions. The experimental methodology consisted in the production of formulations with four contents of vegetable oils (5%, 10%, 15% and 20%), four tensoactive contents (2%, 5%, 7% and 10%) and two contents of synthetic oil (5% and 10%) followed by storage under suitable conditions for 30 days. At this time, the macroscopic stability of all the formulations was evaluated, being verified that some samples did not maintain some properties, like the appearance, the odor and the consistency, implying in the discarding of the same ones. All other formulations were pre-selected and later characterized as viscosity, pH, wettability, infrared spectroscopy, differential scanning calorimetry and thermogravimetric analysis. By means of the results it was verified that the vegetable emulsions presented satisfactory results of properties, which means to have a good potential of exploitation in the practice of machining, being able to represent an alternative to the conventional and synthetic cutting fluids.

Keywords: Machining. Sustainability. Cutting fluids. Biodegradable cutting fluids. Cutting fluid emulsions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Zonas de geração de calor na Usinagem.....	24
Figura 2 – Tipos básicos de fluidos de corte	27
Figura 3 - Esquema de classificação dos fluidos de corte	28
Figura 4 – Tipos principais de fluidos de corte integrais	29
Figura 5 – Tipos de fluidos de corte solúveis.....	30
Figura 6 – Técnicas de fabricação sustentável	36
Figura 7 - Características das técnicas de fabricação sustentável	37
Figura 8 – Estrutura química dos óleos vegetais	39
Figura 9 – Produção de óleos vegetais no Brasil.....	40
Figura 10 – Grau de molhabilidade em função do ângulo de contato	50
Figura 11 – Esquema de funcionamento de um espectrômetro.....	51
Figura 12 - Perfil de ácidos graxos do óleo de babaçu (Análise experimental)	55
Figura 13 - Perfil de ácidos graxos do óleo de mamona (Análise experimental).....	56
Figura 14 – Cromatograma do óleo de babaçu.....	56
Figura 15 – Cromatograma do óleo de mamona	57
Figura 16 – Emulsões experimentais à base de óleo de babaçu selecionadas (5%)	61
Figura 17 - Emulsões experimentais à base de óleo de babaçu selecionadas (10%).....	61
Figura 18 - Emulsões experimentais à base de óleo de mamona (5%)	62
Figura 19 - Emulsões experimentais à base de óleo de mamona (10%)	62
Figura 20 – Viscosidade cinemática das emulsões: óleo de babaçu x óleo sintético (25°C) ...	63
Figura 21 - Viscosidade cinemática das emulsões: óleo de babaçu x óleo sintético (40°C)....	63
Figura 22 - Viscosidade cinemática das emulsões: óleo de mamona x óleo sintético (25°C) .	64
Figura 23 - Viscosidade cinemática das emulsões: óleo de mamona x óleo sintético (40°C) .	64
Figura 24 – Comparativo do pH das emulsões: óleo de babaçu x óleo sintético	66
Figura 25 - Comparativo do pH das emulsões: óleo de mamona x óleo sintético	67
Figura 26 – Variação do ângulo de contato das emulsões: óleo de babaçu x óleo sintético	68
Figura 27 - Variação do ângulo de contato das emulsões: óleo de mamona x óleo sintético ..	68
Figura 28 – Espectro de infravermelho das emulsões à base de óleo de babaçu (5%)	69
Figura 29 - Espectro de infravermelho das emulsões à base de óleo de babaçu (10%)	70
Figura 30 - Espectro de infravermelho das emulsões à base de óleo de mamona (5%).....	70
Figura 31 - Espectro de infravermelho das emulsões à base de óleo de mamona (10%).....	71
Figura 32 - Espectro de infravermelho das emulsões à base de óleo sintético (5% e 10%)....	71

Figura 33 - Espectro de infravermelho das principais formulações de emulsões	72
Figura 34 - Curvas DSC das emulsões à base de óleo de babaçu (5%)	73
Figura 35 - Curvas DSC das emulsões à base de óleo de babaçu (10%)	74
Figura 36 - Curvas DSC das emulsões à base de óleo de mamona (5%)	74
Figura 37 - Curvas DSC das emulsões à base de óleo de mamona (10%)	75
Figura 38 - Curvas DSC das emulsões à base de óleo sintético (5% e 10%).....	75
Figura 39 - Perfis termogravimétricos das emulsões de óleo de babaçu (5%).....	76
Figura 40 - Perfis termogravimétricos das emulsões de óleo de babaçu (10%).....	77
Figura 41 - Perfis termogravimétricos das emulsões de óleo de mamona (5%)	77
Figura 42 - Perfis termogravimétricos das emulsões de óleo de mamona (10%)	78
Figura 43 - Perfis termogravimétricos das emulsões de óleo sintético (5% e 10%)	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Formulações experimentais de emulsões à base de óleos vegetais	45
Tabela 2 - Formulações experimentais de emulsões à base de óleo sintético	46
Tabela 3 - Classificação das soluções em função dos valores de pH.....	49
Tabela 4 – Análise prévia das formulações de emulsões à base de óleo de babaçu.....	58
Tabela 5 - Análise prévia das formulações de emulsões à base de óleo de mamona	58
Tabela 6 - Análise prévia das formulações de emulsões à base de óleo sintético	59
Tabela 7 – Formulações experimentais pré-selecionadas	59
Tabela 8 – Critérios de controle de pH das soluções.....	66
Tabela 9 - Perda de massa das principais formulações experimentais	79
Tabela 10 - Melhores formulações	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AISI	American Institute Steel and Iron
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior
CETENE	Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste
COMPOLAB	Laboratório de Materiais Compósitos e Integridade Estrutural
DP	Desvio Padrão
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
DTG	Termogravimetria derivada
FTIR	Espectroscopia de infravermelho
GC/FID	Cromatografia gasosa por ionização de chama
LAC	Laboratório de Combustíveis
LAFIP	Laboratório de Fitoquímicos e Processos
pH	Potencial hidrogeniônico
PPGEM	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PTFE	Politetrafluoretileno
TGA	Termogravimetria

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

°	Grau de molhabilidade
%	Transmitância/Perda de massa
#	Granulometria
θ	Ângulo de contato
µm	Micrômetro
1/cm	Comprimento de onda
O ₂	Oxigênio
°C	Graus Celsius
°C/min	Graus Celsius por minuto
cSt	Centistokes
mg	Miligramas
mg KOH/g	Miligramas de hidróxido de potássio por grama
ml	Mililitros
ml/min	Mililitros por minuto
mW/mg	Miliwatt por miligrama
rpm	Rotações por minuto
T _i	Temperatura inicial
T _f	Temperatura final

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Contextualização do tema estudado	19
1.2	Justificativas da pesquisa.....	20
1.3	Objetivos da pesquisa.....	21
1.3.1	Objetivo geral	21
1.3.2	Objetivos específicos	21
1.4	Organização da dissertação	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	Principais problemas na Usinagem.....	24
2.2	Fluidos de corte.....	25
2.3	Funções dos fluidos de corte	26
2.4	Tipos de fluidos de corte	27
2.5	Fluidos de corte integrais	28
2.6	Fluidos de corte solúveis.....	30
2.6.1	Emulsões de fluidos de corte	31
2.6.2	Fluidos de corte sintéticos.....	31
2.6.3	Fluidos de corte semissintéticos.....	32
2.7	Fluidos de corte gasosos e sólidos	32
2.8	Periculosidade dos fluidos de corte	33
2.9	Principais aditivos utilizados nos fluidos de corte	34
2.9.1	Anticorrosivo (AC)	34
2.9.2	Antiespumantes (AE).....	34
2.9.3	Antioxidantes (AO).....	34
2.9.4	Extrema pressão (EP).....	34
2.9.5	Agentes de resfriamento (AR)	35

2.9.6	Biocidas.....	35
2.9.7	Detergentes	35
2.9.8	Emulgadores	35
2.10	Fabricação sustentável.....	35
2.11	Fluidos de corte alternativos	37
2.12	Óleos vegetais.....	38
2.13	Pesquisas recentes com óleos vegetais	40
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	44
3.1	Materiais e equipamentos utilizados.....	44
3.2	Desenvolvimento das formulações das emulsões	44
3.3	Técnicas de caracterização utilizadas	47
3.3.1	Cromatografia gasosa.....	47
3.3.2	Viscosidade	48
3.3.3	Análise de pH	49
3.3.4	Análise de molhabilidade	49
3.3.5	Espectroscopia na região do infravermelho (FTIR)	51
3.3.6	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)	52
3.3.7	Termogravimetria (TG)	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
4.1	Caracterização das propriedades físico-químicas	55
4.2	Análise do perfil de ácidos graxos – Cromatografia gasosa.....	55
4.3	Aspecto macroscópico das formulações experimentais desenvolvidas	57
4.4	Análise dos resultados de viscosidade	63
4.5	Análise de pH	65
4.6	Análise de molhabilidade	67
4.7	Análise da Espectroscopia de infravermelho (FTIR)	69
4.8	Análise de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)	73

4.9	Análise de Termogravimetria (TG)	76
5	CONCLUSÕES	80
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	81
	REFERÊNCIAS	82
	APÊNDICE A – PERFIL DE ÁCIDOS GRAXOS.....	89
	APÊNDICE B – VISCOSIDADE DAS FORMULAÇÕES	91
	APÊNDICE C – pH DAS FORMULAÇÕES	92
	APÊNDICE D – ÂNGULO DE CONTATO DAS FORMULAÇÕES	93

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo se descreve as informações preliminares sobre o trabalho de pesquisa, os quais incluem os objetivos gerais e específicos, as justificativas e a forma de organização desta dissertação de mestrado.

1.1 Contextualização do tema estudado

A usinagem é uma grande família de processos de fabricação na indústria e abrange uma série de operações complexas e versáteis. Devido a sua importância no cenário industrial, ocorre um impacto até mesmo na economia, ou seja, segundo pesquisas recentes há uma contribuição da usinagem em cerca de 5% do PIB nos países desenvolvidos (JAYAL et al., 2010).

De forma geral, geram-se altos níveis de calor na execução das operações de usinagem, por causa da deformação plástica do material da peça e do atrito da ferramenta de corte/peça e da ferramenta de corte/cavaco. Então, o rendimento das operações pode ser muito prejudicado, através do desgaste prematuro das ferramentas de corte e dos defeitos dimensionais, superficiais e estruturais das peças fabricadas, o que resulta em prejuízos na indústria. Há várias técnicas de mitigação aos possíveis problemas decorrentes da usinagem, e entre elas, destaca-se a utilização de fluidos de corte (ALMEIDA et al., 2011).

Fluidos de corte são substâncias aplicadas na região do corte durante a execução de uma operação de usinagem, cuja finalidade essencial é lubrificar e refrigerar a interface peça-cavaco-ferramenta de corte. Além disso, os fluidos de corte possibilitam a proteção contra a corrosão e a retirada do cavaco da zona do corte, salientando que essas funções são ditas secundárias. Com o objetivo de melhorias específicas de propriedades, há a possibilidade de utilização de aditivos nos fluidos de corte (DEBNATH; REDDY; YI, 2014).

Desenvolveram-se muitas pesquisas na área de fluidos de corte, e assim, foi constatado que a utilização dos fluidos de corte à base de petróleo, apesar de benéficos à usinagem, também apresentam um elevado grau de toxicidade, e por isso representam um potencial nocivo extremo ao meio ambiente e à saúde humana. Então, iniciou-se uma nova fase na usinagem, buscando-se uma fabricação totalmente sustentável, tendo em vista que o setor industrial apresenta relação direta com os aspectos ecológicos e que a partir do investimento em sustentabilidade no âmbito dos processos de fabricação, haverá benefícios em níveis ambiental, social e econômico. Além dos fatores ecológicos, convém salientar que a implementação de técnicas de fabricação limpas

apresenta resultados satisfatórios de desempenho na usinagem (JAYAL et al., 2010; CHETAN; GOSH; RAO, 2015).

Na atualidade, há diversas metodologias de fabricação voltadas à sustentabilidade. Entre as tais, está a utilização de fluidos de corte alternativos à base de vegetais. Por meio da aplicação de fluidos de corte biodegradáveis nos processos de usinagem torna-se possível uma eliminação dos efeitos nocivos dos fluidos de corte convencionais de base mineral (DEBNATH; REDDY; YI, 2014; CHETAN; GOSH; RAO, 2015).

Especificamente no Brasil, há um grande interesse de expansão das pesquisas com óleos vegetais, tendo em vista a biodiversidade de plantas oleaginosas. O país possui boas condições climáticas, fertilidade de solo e dimensões territoriais continentais, o que corrobora para o fato de ser um dos maiores produtores de óleos vegetais do mundo. Na região nordeste do Brasil, a produção de óleos vegetais é vista com bons olhos, sobretudo na sub-região da Caatinga, porque se nota um enorme potencial de exploração. Deste modo, os diversos segmentos da indústria se aplicam na exploração de pesquisas com óleos vegetais, incluindo o setor de fabricação metal-mecânica (SILVA et al., 2014; COUTINHO et al., 2016).

1.2 Justificativas da pesquisa

A tendência atual da indústria consiste em minimizar os impactos ambientais e de saúde humana causados pelo uso de produtos e subprodutos de petróleo. Hoje, vive-se um período de mudanças de paradigmas, em relação às legislações vigentes associadas às questões de impactos ambientais. O Brasil já tem participado desse esforço mundial, principalmente quanto à geração de energia limpa. Um investimento em sustentabilidade na fabricação, agrega um grande valor de qualidade e produtividade. Todos estes fatores corroboram para que haja uma reformulação na composição dos fluidos de corte (JAYAL et al., 2010; ALMEIDA et al., 2011; DEBNATH; REDDY; YI, 2014).

Em virtude dos diversos efeitos nocivos e catastróficos associados à utilização de fluidos de corte à base de petróleo, fomenta-se a busca por meios alternativos com o objetivo de poupar o meio ambiente e a saúde humana das significativas agressões. Através do avanço de pesquisas nesta área, concluiu-se que os óleos vegetais possuem um grande potencial para a substituição dos fluidos de corte de base mineral, pelas suas excelentes propriedades (OLIVEIRA; ALVES, 2006; GONÇALVES, 2013).

Então, surge a necessidade de um investimento em fluidos de corte ecológicos, os quais possam substituir os fluidos de corte à base de petróleo. Desta forma, com o advento das novas tecnologias sustentáveis, a aplicação de óleos vegetais nos processos de usinagem tende a gerar diversos benefícios, contribuindo para a melhoria das condições de trabalho nas fábricas e para a redução dos custos (CHETAN; GOSH; RAO, 2015).

Em virtude dos aspectos abordados anteriormente, neste trabalho de pesquisa, escolheu-se como matriz o óleo de babaçu e o óleo de mamona (ambos à base de vegetais), buscando-se promover uma contribuição científica para resolução de problemas associados aos processos de usinagem, por meio do desenvolvimento de emulsões vegetais. A escolha dos óleos vegetais e a ideia de produzir emulsões à base de tais óleos, está relacionada aos seguintes aspectos:

- Apresentam um bom rendimento se extraídos das respectivas plantas oleaginosas;
- Encontram-se de forma comercial com facilidade;
- Produtos típicos da região nordeste do Brasil;
- Possibilidade de boa economia, a partir da utilização de emulsões vegetais, visto que os óleos vegetais apresentam um custo mais elevado;
- Utilizando-se as emulsões vegetais, há uma combinação das excelentes propriedades de lubrificação e refrigeração, a partir da mistura de óleo e água;
- Existência de poucos trabalhos científicos no Brasil, abordando o desenvolvimento e/ou aplicação de emulsões de fluidos de corte em usinagem.

1.3 Objetivos da pesquisa

1.3.1 Objetivo geral

O presente estudo científico tem como objetivo geral o desenvolvimento das emulsões de fluidos de corte à base de óleo de babaçu e óleo de mamona.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho de pesquisa são:

- a) Caracterização das propriedades físico-químicas das formulações experimentais desenvolvidas, tendo como parâmetro comparativo duas formulações comerciais à base de óleo sintético, do fabricante *Blaser Swisslube*.

- b) Caracterizar as principais propriedades físico-químicas dos óleos de babaçu e de mamona, em seu estado puro, os quais representam dados de grande importância ao desenvolvimento das emulsões vegetais;
- c) Comparar os resultados obtidos através das análises físico-químicas e os valores da literatura técnica;
- d) Definir em termos de propriedades físico-químicas, uma solução mais adequada para ser empregada na usinagem, como fluidos de corte alternativos.

1.4 Organização da dissertação

A presente dissertação de mestrado está organizada em **cinco capítulos**, objetivando um melhor entendimento acerca do trabalho de pesquisa. Deste modo, a organização deste trabalho segue a ordem abaixo:

- **Capítulo 1:**

Apresenta as noções introdutórias inerentes ao assunto do trabalho de pesquisa, onde é justificada a necessidade de utilização de fluidos de corte na usinagem, enfatizando a aplicação de fluidos de corte de origem vegetal. Em seguida, relata-se os objetivos gerais e específicos da pesquisa e forma de organização do trabalho.

- **Capítulo 2:**

Descreve a revisão bibliográfica, através dos conceitos teóricos da literatura técnica, os quais apresentam alguma relação ao tema da pesquisa. Neste aspecto, aborda-se:

- a) Problemas decorrentes da elevada geração de calor na usinagem;
- b) Tipos de fluidos de corte;
- c) Impactos ambientais e de saúde humana originados pela utilização de fluidos de corte à base de petróleo (convencionais);
- d) Esforços para atingir uma produção limpa e totalmente sustentável;
- e) Principais vantagens dos fluidos de corte alternativos (vegetais);
- f) Limitações das aplicações dos fluidos de corte alternativos (vegetais);

g) Pesquisas mais recentes envolvendo a área dos fluidos de corte vegetais, no setor de fabricação por usinagem.

- **Capítulo 3:**

Descreve a metodologia utilizada nos procedimentos experimentais, as propriedades físico-químicas avaliadas e as técnicas de caracterização respectivas, e de uma forma essencial, relata-se o desenvolvimento das formulações experimentais à base de óleo de babaçu e óleo de mamona (vegetais) e à base de óleo sintético (*Blaser Swisslube*).

- **Capítulo 4:**

Discute os resultados obtidos na caracterização das propriedades físico-químicas das formulações experimentais desenvolvidas. Em seguida, busca-se a possível solução para as operações de usinagem, por meio da comparação em termos de propriedades entre as emulsões à base de óleos vegetais e as emulsões à base de óleo sintético. Os resultados são apresentados preferencialmente na forma de gráficos.

- **Capítulo 5:**

Descreve as conclusões obtidas na pesquisa, as considerações finais sobre o assunto e as sugestões de trabalhos futuros na mesma linha de pesquisa.

- **Referências bibliográficas:**

Apresenta uma listagem completa de referências bibliográficas, incluindo os artigos científicos internacionais e nacionais dos periódicos mais renomados do mundo, os livros técnicos mais importantes da área, dissertações e teses (atualizadas), os quais constituíram a fonte de consulta para a elaboração do trabalho de pesquisa.

- **Apêndices:**

Apresenta os resultados obtidos na fase de caracterização das propriedades na forma de tabelas, com os valores e desvio-padrão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

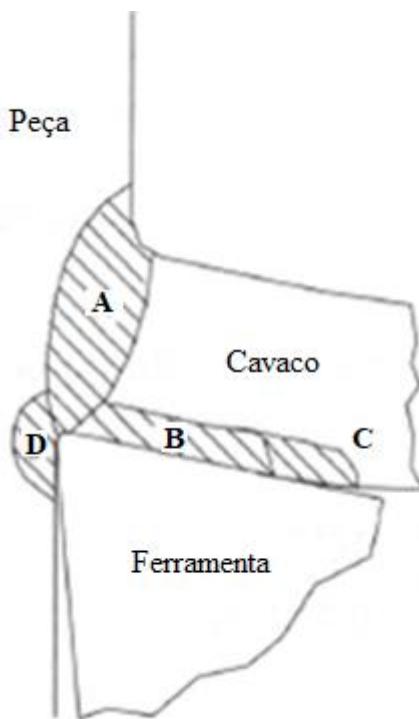
Neste capítulo há uma abordagem teórica sobre os principais conceitos técnicos que se relacionam ao tema proposto desta dissertação de mestrado, os quais estão na literatura técnica. O conteúdo é de grande importância para uma boa compreensão deste trabalho de pesquisa.

2.1 Principais problemas na Usinagem

Usinagem é uma grande família de processos de fabricação relacionada a transformação de matérias-primas em produtos acabados, através de um ou mais operações. Em geral, o termo “usinagem” descreve as operações da indústria que envolvem uma remoção de material, através da ação de ferramentas de corte. Neste contexto, a porção de material removida é denominada “cavaco” (TRENT; WRIGHT, 2000; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Nos processos de usinagem, a maior parte da potência consumida é convertida em calor, principalmente nas adjacências da aresta de corte das ferramentas, podendo ocasionar diversos problemas de ordem técnica e econômica. O elevado calor gerado na usinagem se distribui pelas regiões específicas, conforme mostra a figura 1 (MACHADO et al., 2015).

Figura 1 - Zonas de geração de calor na Usinagem



FONTE: MACHADO et al. (2015)

Na figura 1, verificam-se as regiões de distribuição do calor nas operações de usinagem, as quais são denominadas “zonas do plano de cisalhamento” ou “zonas de cisalhamento”. Neste aspecto, o calor gerado pela zona de cisalhamento primária (região A) é proveniente do trabalho de cisalhamento interno do material, sendo a maior parte deste calor dissipado pelo cavaco. Nas demais zonas de cisalhamento, o calor é originado pela deformação plástica e atrito provocados pela aderência entre as superfícies. Desta forma, na zona de cisalhamento secundária (regiões B/C), o calor gerado tem maior influência no desempenho das ferramentas de corte, na execução das operações de usinagem. Na zona de cisalhamento terciária (região D), o calor é gerado entre as superfícies de folga das ferramentas de corte e a peça usinada, podendo ocasionar problemas de desgaste de flanco nas ferramentas. Na interface ferramenta-cavaco, as temperaturas chegam na ordem de 1.100°C, podendo afetar a formação de cavacos (MACHADO et al., 2015; AKHIL et al., 2016).

Embora a maior parte do calor gerado nas operações de usinagem (cerca de 60 a 80%) é dissipada pelo cavaco, há uma grande preocupação com as parcelas resultantes do calor, visto que cerca de 10 a 20% é dissipado na peça fabricada e outros 10% é dissipado na ferramenta de corte. Estas parcelas podem ocasionar alguns problemas de natureza térmica nas peças usinadas, comprometendo a sua integridade estrutural. Os principais defeitos associados à estas parcelas de calor são: acabamento superficial ruim, tensões residuais, distorções dimensionais, fissuras, trincas e corrosão (ALMEIDA et al., 2011; AKHIL et al., 2016; SRIKANT; RAO, 2017).

As ferramentas de corte quando expostas às excessivas temperaturas, tendem a sofrer os processos de desgaste prematuro, afetando a vida útil. É necessário que as ferramentas de corte sejam fabricadas com materiais de boa resistência às elevadas temperaturas, a fim de poupá-las das precoces deformações plásticas. Uma menor vida útil das ferramentas de corte irá prejudicar bastante a produtividade fabril, pois a troca das arestas de corte exige a paralisação da produção. Tudo isso coopera para o aumento dos custos de fabricação (KUMAR et al., 2016).

2.2 Fluidos de corte

Tendo em vista a comprovação de que as elevadas temperaturas de corte podem originar os diversos problemas citados na seção anterior, é muito importante que este fator seja analisado e considerado na execução das operações de usinagem. Então, utilizam-se os “fluidos de corte” como a forma essencial de mitigação dos efeitos deletérios da alta geração de calor, através do arrefecimento e da lubrificação da região (MAIA et al., 2007; ALMEIDA et al., 2011; LISBOA; MORAES; HIRASHITA, 2013).

A origem da utilização de fluidos de corte nos processos de usinagem é relacionada com as pesquisas do Engenheiro Mecânico *F.W. Taylor* (em cerca de 1894) nos Estados Unidos. Em seu trabalho inicial de pesquisa, objetivou-se uma análise da influência da água na melhoria dos processos de usinagem. A metodologia experimental consistiu em jorrar uma grande quantidade de água na interface ferramenta de corte/cavaco, onde verificou-se um resultado satisfatório em termos de resfriamento desta região, possibilitando incrementar a velocidade de corte (cerca de 40%) sem depreciação prematura da ferramenta de corte. Entretanto, em termos de lubrificação, constatou-se que a água era bastante deficitária, tornando a região do corte susceptível à sérios problemas de corrosão. A partir de então, surgiu a necessidade de buscar formas alternativas de soluções para a usinagem (KURAM et al., 2010; OZCELIK et al., 2011; DEBNATH; REDDY; YI, 2014).

Ao longo dos anos, muitas pesquisas foram desenvolvidas na área de fluidos de corte, o que permitiu a obtenção de novas formulações. Atualmente, encontram-se disponíveis de forma comercial vários tipos de fluidos de corte. É comprovado que a aplicação de fluidos de corte na usinagem possibilita a redução das forças de corte e potência de usinagem, além de considerável melhoria no acabamento superficial das peças usinadas. Também, há o aumento da vida útil das ferramentas de corte, o que se traduz no expressivo ganho de produtividade e grande economia. Todavia, a maior ou menor eficiência dos fluidos de corte é influenciada por fatores, tais como: tipos de operações, parâmetros de corte, métodos de aplicações etc. (LAWAL; CHOUDHURY; NUKMAN, 2012).

2.3 Funções dos fluidos de corte

Os fluidos de corte atuam na missão de agentes de melhoria dos processos de usinagem. As funções essenciais dos fluidos de corte são a lubrificação e a refrigeração da zona do corte. A lubrificação está relacionada com a redução do atrito, ao passo que a refrigeração se relaciona com a diminuição das temperaturas de corte. Ostensivamente, os fluidos de corte desempenham funções secundárias, auxiliando a eliminação do cavaco da região do corte e protegendo toda o sistema de usinagem contra a oxidação e a corrosão (LISBOA; MORAES; HIRASHITA, 2013; BENEDICTO; CAROU; RUBIO, 2017; LIEW et al., 2017).

A propriedade de lubrificação é favorecida se houver uma boa resistência à temperaturas e pressões elevadas sem vaporização, uma boa resistência ao desgaste e uma adequação correta da viscosidade. Por outro lado, a propriedade de refrigeração é favorecida se houver uma baixa

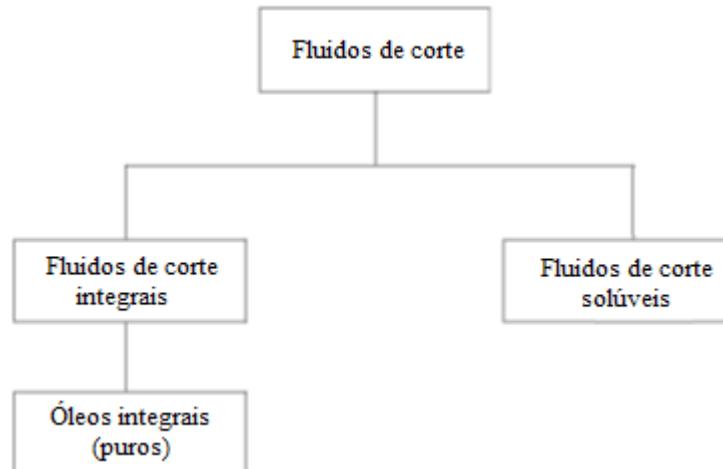
viscosidade, uma boa molhabilidade, um alto calor específico e uma alta condutividade térmica. Conclui-se que as propriedades térmicas dos fluidos de corte são os fatores determinantes para a eficiência da lubrificação e refrigeração da zona de corte na execução da usinagem (LISBOA; MORAES; HIRASHITA, 2013; DEBNATH; REDDY; YI, 2014).

2.4 Tipos de fluidos de corte

Atualmente, encontra-se uma variedade de fluidos de corte disponíveis no mercado. Pela constante evolução tecnológica das operações de usinagem, as formulações dos fluidos de corte tornaram-se cada vez mais complexas. Em relação a forma de classificação dos fluidos de corte, não há consenso, e diversos pesquisadores têm proposto abordagens neste sentido (MACHADO et al., 2015).

Committee (1991) apresentou uma proposta de classificação para os fluidos de corte bem simples. A figura 2 ilustra esta classificação.

Figura 2 – Tipos básicos de fluidos de corte

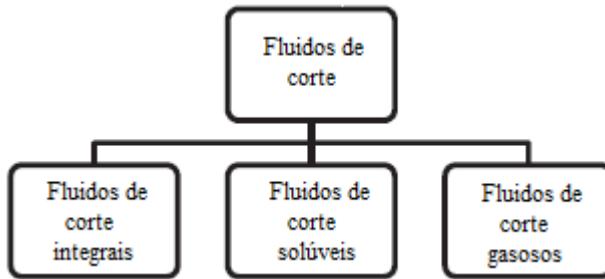


FONTE: COMMITTE (1991)

A classificação idealizada pela figura 2, prioriza unicamente os fluidos de corte de maior aplicação nas indústrias metal-mecânica. Verifica-se que nesta abordagem não foi incluída duas outras classes de fluidos de corte, a saber, fluidos de corte gasosos e sólidos. A justificativa para este fato é que os fluidos de corte supracitados não possuem quase nenhuma aplicação prática.

Divergindo da classificação acima, El Baradie (1996) propôs outra classificação para os fluidos de corte, conforme mostra a figura 3.

Figura 3 - Esquema de classificação dos fluidos de corte



FONTE: ADAPTADO DE EL BARADIE (1996)

A principal diferença desta classificação para a outra classificação anteriormente citada é a inclusão dos fluidos de corte gasosos. Porém, os principais tipos de fluidos de corte aplicados na usinagem são os fluidos de corte líquidos (integrais e aquosos), independente da classificação adotada. Nas próximas seções da presente dissertação, aborda-se um resumo das características essenciais dos fluidos de corte.

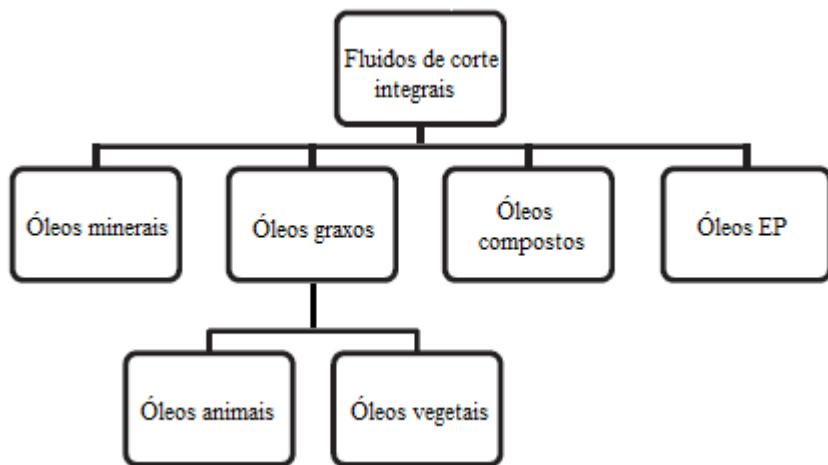
2.5 Fluidos de corte integrais

Os fluidos de corte integrais possuem excelente propriedade de lubrificação e deficitária capacidade de refrigeração. Desta forma, a aplicação prática dos fluidos de corte integrais acaba sendo limitada, pois a baixa propriedade refrigerante pode causar riscos às operações, por causa da alta inflamabilidade. É importante ressaltar que os fluidos de corte integrais são insolúveis em água, e por esta razão, é muito comum no ramo da usinagem as designações de “óleos puros” e “óleos integrais” aos fluidos de corte integrais (EL BARADIE, 1996; SOKRANI; DHOKIA; NEWMAN, 2012; KURAM; OZCELIK; DERMIBAS, 2013).

A propriedade de refrigeração dos fluidos de corte integrais apresenta uma relação direta com o valor respectivo da viscosidade. Deste modo, quanto menor for a viscosidade dos óleos, maior será o poder de refrigeração. Por isso, os óleos mais leves são indicados para as operações de usinagem de altas rotações, onde é necessária a rápida dissipação de calor. Em contrapartida, os óleos mais viscosos possuem maior eficiência nas operações de usinagem de baixas rotações e maiores profundidades de corte e avanços, visto que ocorre uma aderência nas superfícies das ferramentas, e desta maneira, é formada uma película de óxidos responsável que reduz a geração de calor (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Por meio da figura 4, representa-se esquematicamente a subdivisão dos fluidos de corte integrais com aplicações nas operações de usinagem.

Figura 4 – Tipos principais de fluidos de corte integrais



FONTE: ADAPTADO DE DINIZ; MARCONDES; COPPINI (2013)

Os óleos minerais são constituídos basicamente por hidrocarbonetos obtidos a partir de um processo de refino do petróleo. O comprimento da cadeia, a estrutura molecular e o grau de refino são os fatores que influenciam diretamente nas propriedades dos óleos minerais. Por isso, os óleos minerais apresentam excelentes propriedades de lubrificação, resistência ao desgaste e resistência à corrosão. Desta forma, os óleos minerais possuem o maior emprego nas operações que envolvem a lubrificação da região de corte e de partes móveis das máquinas-ferramenta, e como consequência, reduz-se significativamente as forças de corte e o desgaste das ferramentas de corte. Além disso, promove-se uma boa proteção contra a corrosão tanto para as superfícies usinadas quanto para as máquinas-ferramenta. Entretanto, os óleos minerais apresentam um alto custo, além das propriedades deficitárias já citadas na seção anterior. Outrossim, devido ao fato de serem produtos derivados do petróleo, os óleos minerais têm uma alta toxicidade, o que origina sérios riscos ao meio ambiente e à saúde do operador. Por esta razão, nos últimos anos, os óleos minerais acabaram perdendo espaço na usinagem (DEBNATH; REDDY; YI, 2014; CHETAN; GOSH; RAO, 2015; MACHADO et al., 2015).

Os óleos graxos correspondem aos fluidos de corte integrais de origem vegetal e animal. Em termos de propriedades, observa-se nos óleos graxos boas capacidades de lubrificação e de molhabilidade, além de razoáveis capacidades de refrigeração. Em contrapartida, há limitações na utilização dos óleos graxos, principalmente por causa das fracas propriedades antissoldantes, do fato de se tornarem viscosos, da deterioração com o tempo e do custo elevado. Apesar disso, os óleos de origem vegetal e animal (graxos) são empregados principalmente como aditivos dos fluidos de corte minerais (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; MACHADO et al., 2015).

Os óleos compostos correspondem as misturas dos óleos minerais com os óleos graxos, onde a concentração de óleos graxos presentes varia entre 10 a 30%. Nos óleos compostos, têm-se a preservação das vantagens encontradas nos óleos graxos. Além disso, há uma estabilidade química melhor nos óleos compostos, pois não se observa uma alteração da viscosidade com o tempo e nem ocorre uma rápida deterioração. A principal recomendação de aplicações dos óleos compostos é voltada a usinagem do cobre e as suas ligas, bem como as operações de fresamento e furação (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

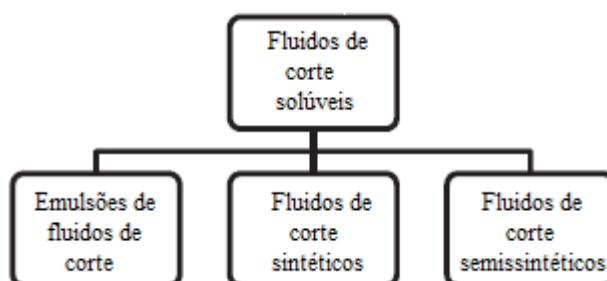
Os óleos de extrema pressão (EP) correspondem aos fluidos de corte aditivados nas suas composições químicas. No geral, adicionam-se aos óleos certos elementos que proporcionam a maior capacidade de suportar as elevadas pressões, sem causar a vaporização. Esta propriedade é essencial para as operações de usinagem com altas velocidades e profundidades de corte, onde os materiais geram forças de corte elevadas. Os aditivos clássicos de extrema pressão utilizados são o enxofre e o cloro (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

2.6 Fluidos de corte solúveis

Os fluidos de corte solúveis consistem na mistura de óleo e água, onde é necessária uma utilização de tensoativos, visando promover a emulsificação através da dispersão das partículas, e desta forma, possibilitar a estabilidade das propriedades. É bastante comum as nomenclaturas de “emulsões”, “óleos solúveis” e “óleos emulsionáveis” para esta categoria de fluidos de corte. Embora utilizado na literatura, o termo “óleos solúveis” não está correto tecnicamente, pois não acontece nenhuma diluição da fase oleosa na fase aquosa, antes, o que realmente se verifica é a formação das emulsões, a partir das fases imiscíveis, até então (EL BARADIE, 1996; LAWAL; CHOUDHURY; NUKMAN, 2012).

A figura 5 mostra o esquema de agrupamento para os fluidos de corte solúveis.

Figura 5 – Tipos de fluidos de corte solúveis



FONTE: ADAPTADO DE EL BARADIE (1996); LAWAL; CHOUDHURY; NUKMAN (2012)

2.6.1 Emulsões de fluidos de corte

O fato de misturar o óleo com a água produz combinações interessantes de propriedades, e por isso, as emulsões de fluidos de corte são potenciais para as aplicações em usinagem. Em geral, sabe-se que os óleos possuem excelente propriedade de lubrificação, enquanto a água tem um elevado poder de refrigeração. A lubrificação é uma propriedade muito importante para que haja a redução do desgaste por atrito, e ainda contribuir para a proteção contra a corrosão. Então, esta combinação de propriedades nas emulsões de fluidos de corte possibilita as suas aplicações em operações de usinagem de altas velocidades de corte e baixas pressões de corte, onde existe uma notável elevação de temperatura. Dependendo do teor de emulsificante empregado, poderá haver um aumento na condutividade térmica, viscosidade cinemática e pH, e ainda uma redução no ponto de fulgor (KALPAKJIAN; SCHMID, 2010; SRIKANT; RAO, 2017).

A estabilidade das propriedades físico-químicas das emulsões de fluidos de corte é algo essencial para a sua aplicação dentro dos processos de usinagem. A emulsificação ocorre devido à quebra de partículas do óleo na água, o que reduz significativamente a tensão interfacial entre o óleo e a água. Ainda é possível obter a melhoria de propriedades físico-químicas das emulsões de fluidos de corte, através de uma seleção criteriosa dos aditivos (EL BARADIE, 1996; MAIA et al., 2007; FRANGE e GARCIA, 2009; FRANZOL e REZENDE, 2015).

A aplicação de emulsões de fluidos de corte gera outros benefícios importantes, pois há a minimização da formação de névoas ou fumaças na execução das operações de usinagem, e a proteção contra os riscos de incêndios. Outrossim, devido a mistura entre o óleo e a água, ocorre uma redução dos custos, o que é traduzido em produtividade e economia. Todavia, as emulsões de fluidos de corte têm uma grave limitação, pois são vulneráveis ao desenvolvimento de vários microorganismos (fungos, bactérias etc.), por causa da grande concentração de água encontrada nas formulações. O crescimento microbiológico é muito prejudicial para as emulsões de fluidos de corte, pois afeta as suas principais propriedades. Em consequência disso, é muito provável a ocorrência de problemas associados a falta de lubrificação e corrosão. Também, pode haver até mesmo a desestabilização completa das emulsões (SOKOVIC; MIJANOVIC, 2001; KURAM; OZCELIK; DERMIBAS, 2013; DEBNATH; REDDY; YI, 2014).

2.6.2 Fluidos de corte sintéticos

Os fluidos de corte sintéticos correspondem a mistura de substâncias químicas e alguns aditivos, os quais podem ser diluídos em água, e que também se constituem totalmente isentos

de óleo mineral. Portanto, esta categoria de fluidos de corte não é considerada como derivados do petróleo. Os fluidos de corte sintéticos são também conhecidos por fluidos de corte químicos (EL BARADIE, 1996; KALPAKJIAN; SCHMID, 2010).

Em termos de propriedades, os fluidos de corte sintéticos apresentam boa capacidade de refrigeração, boa resistência à corrosão e apreciável poder de remoção de calor. A lubrificação é uma propriedade deficitária nos fluidos de corte sintéticos, embora haja certos fluidos de corte com boa lubricidade. Por isso, os fluidos de corte sintéticos são mais apropriados para operações leves de usinagem, onde tenha a necessidade primária de refrigeração. O acréscimo de aditivos aos fluidos de corte sintéticos possibilita os bons resultados lubrificação e resistência à corrosão. Os fluidos de corte sintéticos ainda produzem uma boa visibilidade da região do corte, por causa do seu aspecto transparente (EL BARADIE, 1996; GONÇALVES, 2008; KURAM; OZCELIK; DERMIBAS, 2013; BENEDICTO; CAROU; RUBIO, 2017; LIEW et al., 2017).

2.6.3 Fluidos de corte semissintéticos

Os fluidos de corte semissintéticos são constituídos essencialmente pela combinação de fluidos de corte sintéticos e óleos emulsionáveis em água. Em virtude disso, é possível efetivar uma combinação das melhores propriedades dos diferentes fluidos que o constituem. Em outras palavras, os fluidos de corte semissintéticos são verdadeiras emulsões químicas, possuindo um pequeno tamanho de gotículas, sendo o teor de óleo variando entre 5 e 30%. Os fluidos de corte semissintéticos são também denominados como fluidos de corte semiquímicos (EL BARADIE, 1996; KALPAKJIAN; SCHMID, 2010; KURAM; OZCELIK; DERMIBAS, 2013).

Em termos de propriedades, os fluidos de corte semissintéticos têm certas similaridades com os fluidos de corte sintéticos. Todavia, possuem melhor capacidade de lubrificação, melhor resistência à corrosão e maior grau de limpeza, se forem comparados aos óleos emulsionáveis. Por outro lado, pode haver deterioração mais facilmente e causar riscos de dermatite, afetando a saúde dos trabalhadores (EL BARADIE, 1996; DEBNATH; REDDY; YI, 2014; LIEW et al., 2017).

2.7 Fluidos de corte gasosos e sólidos

Os fluidos de corte gasosos não têm aplicações práticas nos processos de usinagem, por causa de alguns fatores limitantes. O principal tipo de fluido de corte gasoso é o ar comprimido, no entanto, a função prática se restringe à eliminação dos cavacos da região do corte, tendo em vista que nas condições de temperatura ambiente, o ar tem mínima capacidade de lubrificação

e refrigeração. Além disso, a aplicação dos fluidos de corte gasosos nas operações de usinagem, ainda não é viável economicamente. Quanto aos fluidos de corte sólidos, estes apresentam como objetivo a redução do coeficiente de atrito da interface ferramenta/cavaco. Todavia, a aplicação também é bastante restrita, porque para uma reaplicação do produto é necessário interromper a operação (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; MACHADO et al., 2015).

2.8 Periculosidade dos fluidos de corte

Os fluidos de corte convencionais foram largamente difundidos no mundo da usinagem. Mas, pelo fato de serem derivados do petróleo, a utilização de tais fluidos de corte é perigosa, pois não possuem biodegradabilidade, e pela existência de anéis heterocíclicos e poliaromáticos na composição dos fluidos de corte minerais, verifica-se um elevado grau de toxicidade. Por causa disso, há riscos de desencadeamento dos mais diversos impactos ambientais e ecológicos, o que compromete todo o ciclo de vida do planeta. De maneira geral, a questão ambiental associada à usinagem, representa o principal fator problemático verificado nos tempos atuais (SOKOVIC; MIJANOVIC, 2001; OZCELIK et al., 2011; CHETAN; GOSH; RAO, 2015).

Em condições de elevadas temperaturas e pressões, os fluidos de corte minerais possuem a tendência de vaporizar e atomizar, o que resulta na formação de névoas e fumos, na usinagem. A fumaça produzida é constituída por partículas extremamente prejudiciais à saúde humana, as quais podem ocasionar diversas doenças respiratórias. O relatório emitido pela IARC (Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer) constata que os fluidos de corte convencionais geram riscos potenciais de câncer em várias partes do corpo humano, além de doenças dermatológicas, cutâneas e genéticas. De acordo com estudos recentes, cerca de 1 milhão de trabalhadores fabris sofrem algum tipo de efeito toxicológico, originado pelo contato com os fluidos de corte à base de petróleo, o que representa 80% das doenças ocupacionais notadas nos ambientes das fábricas (KALPAKJIAN; SCHMID, 2010; SASHIDHARA; JAYARAM, 2010).

Verifica-se um extremo risco de contaminação da água e do solo, no descarte dos fluidos de corte convencionais, porque o processo de decomposição natural do meio ambiente é afetado pela presença de aditivos biocidas. Além disso, pode haver liberação de formaldeído, que é uma substância potencial ao desenvolvimento do câncer (SOKRANI; DHOKIA; NEWMAN, 2012; LAWAL; CHOUDHURY; NUKMAN, 2012; DEBNATH; REDDY; YI, 2014).

Todos os efeitos nocivos dos fluidos de corte minerais listados acima têm gerado grande discussão e preocupação no mundo atual. Existe a real necessidade de mudança de paradigmas

nos processos de fabricação, pois os órgãos governamentais e as agências de proteção ambiental exercem pressões em relação à política sustentável, visto que cada vez mais ocorre a diminuição dos recursos naturais não renováveis. Além de todas as questões envolvendo a sustentabilidade e a saúde dos trabalhadores, existe a necessidade de redução significativa do custo total aplicado a fabricação (JAYAL et al., 2010; CHETAN; GOSH; RAO, 2015).

2.9 Principais aditivos utilizados nos fluidos de corte

A variação de temperaturas nas máquinas operatrizes durante os processos de usinagem compromete bastante a estabilidade dos fluidos de corte. Deste modo, para garantir aos fluidos de corte a manutenção de suas propriedades ou até mesmo melhorá-las, torna-se essencial o uso de aditivos, que consistem no acréscimo de substâncias químicas ou orgânicas, com finalidades específicas. Desta forma, fica garantida uma maior aplicação dentro dos processos de usinagem (SOKOVIC; MIJANOVIC, 2001; OZCELIK et al., 2013).

2.9.1 Anticorrosivo (AC)

Os anticorrosivos (AC) protegem da corrosão atmosférica a peça fabricada, a ferramenta de corte e a máquina operatriz. Geralmente, utilizam-se produtos à base de nitrito de sódio, óleo sulfurado ou sulfonado. Por outro lado, recomenda-se muita precaução, visto que tais produtos químicos são suspeitos de causar o câncer (BRINKSMEIER et al., 2015).

2.9.2 Antiespumantes (AE)

Os antiespumantes (AE) impedem a formação de espumas na região do corte, e assim, garante uma boa visibilidade desta região, não comprometendo a eficácia da refrigeração desta região, além de reduzir a tensão interfacial do óleo. Geralmente, utilizam-se ceras especiais ou óleos à base de silicone no controle das espumas (MACHADO et al., 2015).

2.9.3 Antioxidantes (AO)

Os antioxidantes (AO) impedem que o fluido de corte seja mais facilmente deteriorado, pelo contato com o oxigênio presente no ar. É uma propriedade de grande importância para os fluidos de corte, garantindo-lhes uma maior durabilidade (MACHADO et al., 2015).

2.9.4 Extrema pressão (EP)

Os aditivos de extrema pressão (EP) proporcionam aos fluidos de corte uma lubrividade adicional, tornando-os mais eficazes em elevadas temperaturas e pressões, por meio da redução

do atrito da ferramenta de corte com o material, sendo mais utilizados em operações severas de usinagem. Geralmente, utilizam-se compostos de enxofre, fósforo e cloro como principais tipos, variando a estrutura e composição química (MORAIS, 2014; MACHADO et al., 2015).

2.9.5 Agentes de resfriamento (AR)

Os agentes de resfriamento (AR) aumentam a oleosidade do fluido de corte. Consistem em substâncias poliméricas naturais ou sintéticas compostas por misturas de óleos animais que são selecionados, filtrados a frio, refinados, desodorizados e clarificados (MORAIS, 2014).

2.9.6 Biocidas

Os biocidas inibem o desenvolvimento e crescimento de microorganismos que possam vir a comprometer a eficácia dos fluidos de corte, por causa da reação com o enxofre presente na composição dos fluidos de corte. Os principais tipos de microorganismos relacionados aos fluidos de corte são os fungos e as bactérias (BRINKSMEIER et al., 2015).

2.9.7 Detergentes

Os detergentes reduzem a deposição de lodo, lamas e borras nos fluidos de corte, visto que tendem a prejudicar a sua eficiência. Geralmente, utilizam-se compostos organometálicos à base de magnésio, bário, cálcio, entre outros, ou ainda álcoois (MACHADO et al., 2015).

2.9.8 Emulgadores

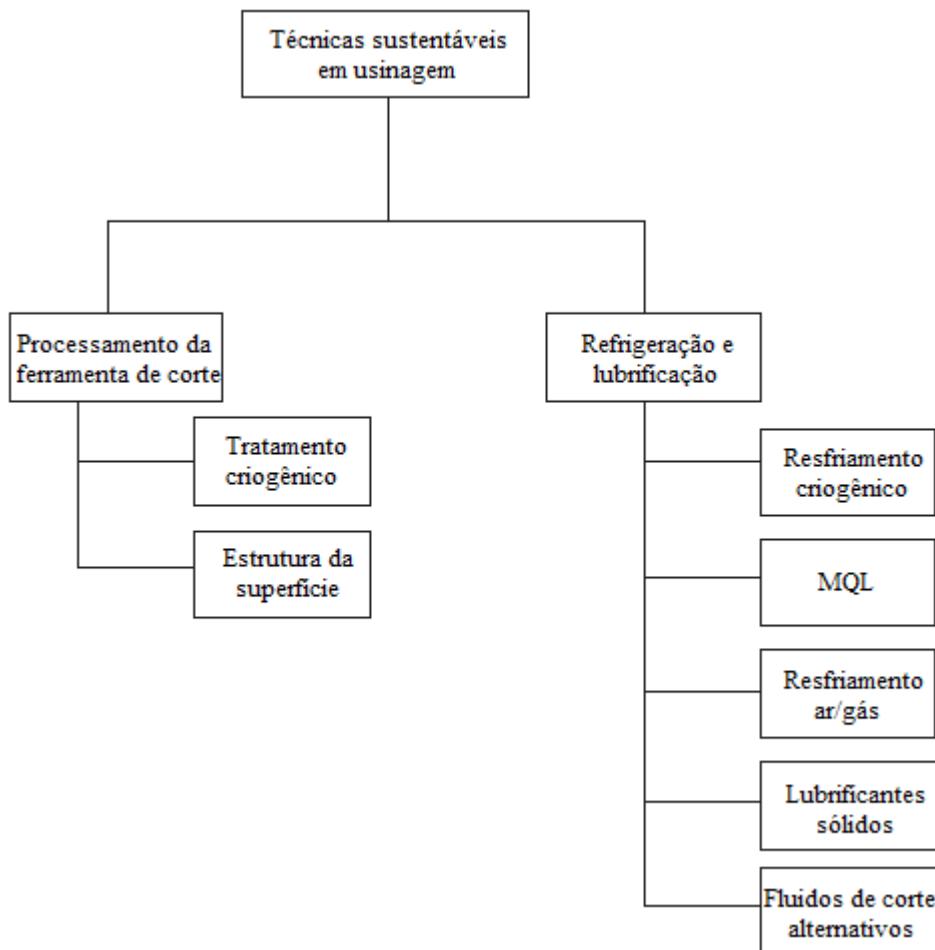
Os emulgadores formam as emulsões de óleos em água e vice-versa. Atuam reduzindo a tensão superficial e formando uma película semiestável na interface óleo-água. Os principais tipos de emulgadores são os emulsificantes e os surfactantes. Geralmente, utilizam-se sabões de ácidos graxos, gorduras sulfatadas, sulfonatos de petróleo e emulsificantes não iônicos como emulgadores (MORAIS, 2014; MACHADO et al., 2015).

2.10 Fabricação sustentável

Por causa de toda a política ambiental do mundo globalizado, há a tendência da indústria se voltar para a implementação de técnicas sustentáveis de fabricação. Deste modo, a fabricação sustentável objetiva minimizar os impactos ambientais negativos, decorrentes da fabricação dos produtos. Aplicando esta nova consciência, é possível obter benefícios industriais e financeiros, por meio da economia de energia e de recursos naturais, além de proporcionar a segurança para os funcionários envolvidos (JAYAL et al., 2010; CHETAN; GOSH; RAO, 2015).

O assunto “fabricação sustentável” possui origem na década de 90, contudo, apenas nos últimos anos, houve a intensificação das pesquisas nesta área. Assim, de forma gradual, tornou-se consolidada a nova filosofia de "tornar verde, pensar verde e agir verde". Por meio da figura 6, mostra-se as técnicas sustentáveis de fabricação (JAYAL et al, 2010; DEBNATH; REDDY; YI, 2014; CHETAN; GOSH; RAO, 2015).

Figura 6 – Técnicas de fabricação sustentável



FONTE: CHETAN; GOSH; RAO (2015)

A figura 6 mostra que a aplicação das técnicas sustentáveis de fabricação possibilita muitas maneiras de corrigir os problemas nocivos dos fluidos de corte convencionais. Ressalta-se que cada técnica sustentável possui particularidades, que incluem vantagens e desvantagens. O primeiro grupo está localizado na parte esquerda da figura, onde as técnicas possuem o foco no processamento da ferramenta de corte, onde é possível eliminar totalmente a aplicação dos fluidos de corte, o que é muito eficiente nos processos de usinagem, mas apresentam um custo operacional muito elevado. O segundo grupo está localizado na parte direita da figura, onde as

técnicas possuem o foco na lubrificação e refrigeração da região do corte, sem haver a completa eliminação do uso dos fluidos de corte. Neste grupo, os fluidos de corte alternativos se destacam como uma ótima solução na usinagem, em relação a substituir os fluidos de corte convencionais (CHETAN; GOSH; RAO, 2015).

A figura 7 mostra as características principais desta nova metodologia sustentável:

Figura 7 - Características das técnicas de fabricação sustentável



FONTE: CHETAN; GOSH; RAO (2015)

De acordo com a figura 7, existem claros benefícios na implementação das metodologias desta nova consciência de fabricação, onde através de um custo bem acessível, a produtividade é aumentada sem afetar o meio ambiente e a saúde humana. Por razões óbvias, as empresas que adotam as técnicas de fabricação sustentável tornam-se muito mais atraentes aos investidores e aos consumidores em geral, ou seja, é um grande diferencial de competitividade (JAYAL et al., 2010; DEBNATH; REDDY; YI, 2014; CHETAN; GOSH; RAO, 2015).

2.11 Fluidos de corte alternativos

Os fluidos de corte alternativos se inserem entre as metodologias totalmente sustentáveis de fabricação por causa de suas desejáveis propriedades. A qualidade de um bom fluido de corte alternativo consiste em possuir excelente lubrificação e refrigeração, além de ser biodegradável, ecológico e renovável. A biodegradabilidade é uma propriedade importantíssima nos fluidos de corte, pois se relaciona à degradação por ação de microorganismos, e com efeito, à reintegração

segura do material orgânico na natureza, fato que não ocorre nos fluidos de corte convencionais (KURAM; OZCELIK; DERMIBAS, 2013; CHETAN; GOSH; RAO, 2015).

Por causa de suas excelentes propriedades, os fluidos de corte alternativos proporcionam grande confiabilidade, sendo possível minimizar os impactos ambientais e os riscos de doenças ocupacionais. Em virtude disso, o assunto é amplamente explorado por diversos pesquisadores da área, objetivando descobrir novos meios potenciais para fluidos de corte alternativos, através de diferentes formulações. Na atualidade, os óleos vegetais representam os meios principais de fluidos de corte alternativos, apesar de que os ésteres sintéticos e os líquidos iônicos pertencem ao mesmo grupo também (KURAM et al., 2010; LAWAL; CHOUDHURY; NUKMAN, 2012; DEBNATH; REDDY; YI, 2014).

Além da questão de sustentabilidade, há outros benefícios ocasionados pelos fluidos de corte alternativos, visto que apresentam melhores desempenhos na usinagem, na grande maioria das aplicações, se comparados aos fluidos de corte convencionais. Então, torna-se possível uma grande economia de energia e aumento da produtividade, através da redução das forças de corte. Também, garante-se melhor acabamento superficial, maior integridade estrutural e aumento da vida útil da ferramenta de corte, pela redução das temperaturas de corte (DEBNATH; REDDY; YI, 2014; CHETAN; GOSH; RAO, 2015).

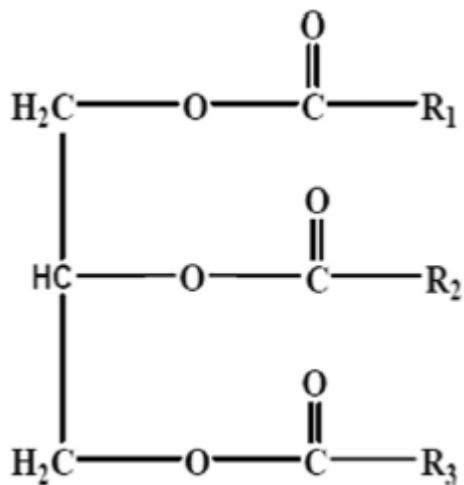
2.12 Óleos vegetais

Desde a Idade Média, utilizavam-se os óleos vegetais e as gorduras animais para compor os fluidos de corte. No entanto, por questões de maior disponibilidade e de baixo custo, ocorreu a natural substituição pelos óleos minerais no século XIX. Atualmente, há uma nova tendência que objetiva voltar aos fluidos de corte vegetais (DEBNATH; REDDY; YI, 2014; OSAMA et al., 2017).

Os óleos vegetais possuem cadeias longas de triglicerídeos, que contém ácidos graxos, e apresentam uma característica de uniformidade na cadeia, com pequenas quantidades de ácidos livres. Na composição dos óleos vegetais, os principais ácidos graxos podem ser insaturados ou saturados. Os ácidos oléicos (C18:1), linoléicos (C18:2) e linolênicos (C18:3) correspondem ao grupo dos insaturados, e por outro lado, os ácidos palmíticos (C16:0) e esteáricos (C18:0) estão no grupo dos saturados (OLIVEIRA; ALVES, 2006; MANNEKOTE et al., 2017).

A figura 8 mostra a estrutura química dos óleos vegetais:

Figura 8 – Estrutura química dos óleos vegetais



FONTE: MANNEKOTE et al. (2017)

De acordo com a figura 8, percebe-se que a estrutura química dos óleos vegetais é permeada por grandes porções de triglicerídeos, os quais constituem os ácidos graxos. Por isso, é justificável os excelentes resultados de desempenho dos óleos vegetais na usinagem, uma vez que a estrutura de glicerídeos contribui para uma exímia lubrificação, permitindo minimizar os problemas de atrito e desgaste. Além disso, verificam-se propriedades tribológicas aprimoradas nos óleos vegetais, pelo fato da estrutura possuir cadeias longas. Dentre as propriedades físico-químicas verificadas nos óleos vegetais, a maioria resulta dos ácidos graxos presentes na cadeia (MANNEKOTE et al., 2017; OSAMA et al., 2017).

A aplicação dos óleos vegetais como fluidos de corte na usinagem é benéfica em todos os sentidos, pois além da biodegradabilidade envolvida, há boa lubricidade em quaisquer faixas de temperaturas e pouca variação nas propriedades físico-químicas. Os óleos vegetais possuem um maior grau de segurança, porque através do elevado ponto de fulgor, diminuem-se os riscos de incêndio, bem como de formação de fumaças e névoas, durante a execução dos processos de usinagem, e resultados expressivos em termos de economia, de produtividade e de usinabilidade de diversos tipos de ligas metálicas. Por outro lado, os óleos vegetais têm fatores limitantes para a função de fluidos de corte, devido à baixa estabilidade térmica, o alto ponto de congelamento e a baixa resistência à corrosão (KURAM et al., 2013; CHETAN; GOSH; RAO, 2015).

A deficiência das propriedades dos óleos vegetais é atenuada pela modificação química. Esta modificação química nos óleos vegetais naturais pode ocorrer pelo acréscimo de aditivos, ou por modificação de base ou genética. Os óleos vegetais modificados quimicamente recebem

a nomenclatura de ésteres sintéticos. Os ésteres sintéticos possuem elevada estabilidade térmica e resistência à corrosão, excelente biodegradabilidade e bons efeitos toxicológicos (PANCHAL et al., 2016; MANNEKOTE et al., 2017).

A obtenção de óleos vegetais ocorre através de diversas sementes ou polpas oleaginosas de plantas que produzem frutos ou nozes. Dentre os países produtores de óleos vegetais de todo o mundo, o Brasil apresenta a maior capacidade de exploração, devido às condições de clima e da fertilidade do solo. Assim, permite-se boa produção de óleos vegetais, sem afetar a produção de alimentos e o meio ambiente (ALUYOR et al., 2009; TOMAS et al., 2012; MORAIS, 2014).

A figura 9 a exploração dos óleos vegetais nas diferentes regiões do Brasil:

Figura 9 – Produção de óleos vegetais no Brasil



FONTE: TOMAS et al. (2012)

De acordo com a figura 9, é evidente a biodiversidade existente no Brasil, sobretudo na região da Caatinga, localizada no Nordeste do país. A biodiversidade é identificada por uma variedade de plantas oleaginosas como potenciais produtores de óleos vegetais. Desta forma, é possível grande exploração e desenvolvimento de pesquisas com óleos vegetais, nos segmentos diversos da indústria (SILVA et al., 2014; COUTINHO et al., 2016).

2.13 Pesquisas recentes com óleos vegetais

A crescente necessidade por fluidos de corte biodegradáveis em processos de usinagem, tendo em vista a aplicação de metodologias sustentáveis de fabricação corrobora ao surgimento de diversos trabalhos de pesquisa. Dessa forma, as recentes publicações envolvendo o tema têm

o propósito de soluções à usinagem dos metais, por meio da melhoria de propriedades dos óleos vegetais disponíveis ou o desenvolvimento de novas formulações de fluidos de corte ecológicos (SASHIDHARA; JAYARAN, 2010).

Belluco e De Chiffre (2004) verificaram o desempenho de cinco tipos de fluidos de corte à base de vegetais e um óleo mineral (convencional), na usinagem do aço inoxidável austenítico AISI 316L. Observou-se que todos os óleos vegetais produziram melhores resultados em termos de vida útil da ferramenta de corte e redução das forças de corte.

Diniz e Micaroni (2007) estudaram a influência do fluido de corte na vida da ferramenta de corte, durante a execução do torneamento do aço AISI 1045. Utilizaram-se como parâmetros de comparação, a usinagem a seco e uma emulsão de fluido de corte à base de vegetais. Chegou-se à conclusão de que a emulsão vegetal produziu menores desgastes à ferramenta de corte, mas que a usinagem a seco também pode ser aplicada, desde que não produza danos térmicos.

Ojolo et al. (2008) utilizaram quatro tipos diferentes fluidos de corte à base de vegetais, a saber, o óleo de amendoim, o óleo de coco, o óleo de palmiste e o óleo de manteiga, durante o torneamento de materiais dúcteis (aço doce, alumínio e cobre), objetivando a investigação das suas influências no valor da força de corte. Mas, observou-se que os efeitos dos fluidos de corte à base de vegetais foram variaram conforme o tipo de material, sendo que o óleo de amendoim apresentou o melhor desempenho.

Xavior e Adithan (2009) investigaram a influência de fluidos de corte à base de vegetais no torneamento do aço inoxidável AISI 304, em termos de desgaste da ferramenta de corte e da rugosidade superficial. Utilizaram-se três diferentes fluidos de corte vegetais, a saber, o óleo de coco, o óleo solúvel (emulsão) e o óleo puro (convencional). Observou-se que o uso do óleo de coco reduziu o desgaste das ferramentas de corte em 31% e a rugosidade superficial em 13% e 27%, se comparado ao óleo solúvel e ao óleo puro, respectivamente.

Xavior e Adithan (2009) avaliaram a temperatura e a força de corte, em um outro estudo, contudo, seguindo os mesmos parâmetros de comparação de fluidos de corte. Verificou-se que o óleo de coco superou os outros dois fluidos de corte (óleo solúvel e óleo puro) possibilitando menores temperaturas de corte e menores forças de corte.

Cetin et al. (2011) avaliaram a variação da rugosidade superficial, da velocidade de corte e do avanço, durante a usinagem do aço inoxidável AISI 304L, utilizando diferentes fluidos de corte, a saber, o óleo de girassol e o óleo de canola (vegetais), um óleo semi-sintético e um óleo

mineral (convencional). Verificou-se que os óleos vegetais produziram melhores resultados de rugosidade superficial, velocidade de corte e avanço.

Ozcelik et al. (2011) realizaram pesquisas experimentais sobre fluidos de corte vegetais com aditivo de extrema pressão, no torneamento do aço inoxidável AISI 304L. Verificou-se o desgaste abrasivo como o mecanismo dominante, além de melhorias em termos de acabamentos superficiais, estabilidades dimensionais e a vida útil da ferramenta de corte.

Paul e Pal (2011) investigaram no processo de torneamento de um aço macio, a eficácia de três diferentes fluidos de corte, a saber, o óleo de karanja e o óleo de nim (ambos vegetais), e um fluido de corte convencional (mineral). Comprovou-se que a aplicação dos fluidos de corte vegetais melhorou a qualidade do acabamento superficial, quando comparado ao fluido de corte convencional e ao torneamento a seco. Verificou-se também que óleo de nim apresentou menor temperatura de corte e viscosidade em relação ao óleo de karanja.

Zhang, Rao e Eckman (2012) investigaram três diferentes condições de usinagem, em uma operação de torneamento via método Taguchi. Utilizaram-se a usinagem a seco, o óleo de soja (vegetal) e o óleo mineral (convencional) como os parâmetros comparativos. Constatou-se que houve um desempenho similar em termos de redução da rugosidade superficial, no entanto, o óleo de soja obteve um resultado muito melhor quanto ao desgaste da ferramenta de corte, se comparado ao óleo mineral.

Kuram et al. (2013) avaliaram os efeitos de diferentes fluidos de corte à base de vegetais, em termos de energia específica, vida útil da ferramenta de corte e rugosidade superficial, nas operações de usinagem. Os autores constataram que os fluidos de corte vegetais promovem uma fabricação mais limpa e melhoram o desempenho dentro dos processos de usinagem. Por causa disso, os fluidos ecológicos possuem um alto potencial para desempenharem a função de fluidos de corte alternativos, em usinagem.

Sodavadia e Makwana (2014) investigaram o uso de nanofluidos à base de óleo de coco, no torneamento do aço inoxidável austenítico AISI 304L. Verificou-se a redução significativa do desgaste do flanco da ferramenta de corte, da rugosidade superficial e das temperaturas de corte, através do uso deste tipo de fluido de corte vegetal.

Agrawala et al. (2014) analisaram o processo de desgaste do aço AISI M2, utilizando distintas condições de lubrificação e variação da velocidade e da carga. Utilizaram-se o óleo de semente de algodão (vegetal) e o óleo SAE 40 (convencional). Verificou-se que o óleo vegetal

obteve o melhor desempenho sob a condição de carga variável, e que nenhuma diferença significativa foi notada em cargas elevadas.

Kumar, Padmanabhan e Krishna (2015) estudaram o emprego de fluidos de corte à base de vegetais com aditivo de extrema pressão, na usinagem do aço AISI 1040. Constatou-se que os óleos vegetais apresentaram melhores desempenhos de usinagem, quando foram comparados à outras condições de lubrificação.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo, aborda-se os principais recursos utilizados na parte experimental, sendo incluída as especificações técnicas dos materiais, reagentes e equipamentos empregados, e toda a metodologia utilizada.

3.1 Materiais e equipamentos utilizados

O desenvolvimento das formulações de emulsões para aplicações como fluidos de corte em usinagem ocorreu através dos seguintes materiais e equipamentos:

- Óleo de babaçu
- Óleo de mamona
- Óleo sintético Blasocut BC 40 NF (*Blaser Swisslube*)
- Tensoativo Tween 80 (Polissorbato 80, Vetec, Brasil).
- Água destilada
- Agitador magnético (Quimis, Diadema/SP – Modelo Q-261-22)

3.2 Desenvolvimento das formulações das emulsões

As formulações experimentais foram preparadas através dos procedimentos a seguir:

1º Passo: Adicionar ao béquer a quantidade de óleo vegetal a ser utilizada e efetuar uma rápida pré-agitação com o objetivo de tirar o equipamento da inércia;

2º Passo: Adicionar ao béquer já contendo o óleo vegetal, a quantidade de tensoativo a ser utilizada. Continuar com a pré-agitação;

3º Passo: Adicionar ao béquer já contendo o óleo vegetal e o tensoativo, a quantidade de água destilada a ser utilizada. Prosseguir com a pré-agitação;

4º Passo: Terminada a fase de pré-agitação, inicia-se o processo de agitação real de cada amostra, pelo intervalo de tempo de 20 minutos;

5º Passo: Após o término da agitação, acondicionar as amostras em um frasco adequado, e identificar cada uma para análises posteriores.

As formulações experimentais das emulsões vegetais e sintéticas foram preparadas com base em concentrações definidas nos estudos preliminares e publicações de mesma natureza e

finalidade. Desta forma, considerou-se inicialmente quatro teores para cada tipo de óleo vegetal (5%, 10%, 15% e 20%), variando-se também quatro teores de tensoativo (2%, 5%, 7% e 10%).

As emulsões experimentais vegetais foram identificadas da seguinte forma:

Lógica de codificação adotada para as emulsões vegetais

Tipo de óleo utilizado – Teor de óleo vegetal – Teor de tensoativo

Tipo de óleo utilizado: BAB: Óleo de babaçu MAM: Óleo de mamona	Teor de óleo vegetal 05 = 5% de óleo vegetal 10 = 10% de óleo vegetal 15 = 15% de óleo vegetal 20 = 20% de óleo vegetal	Teor de tensoativo 02 = 2% de Tween 80 05 = 5% de Tween 80 07 = 7% de Tween 80 10 = 10% de Tween 80
--	--	--

As tabelas 1 e 2 mostram o processo de desenvolvimento das formulações experimentais de emulsões de fluidos de corte.

Tabela 1 – Formulações experimentais de emulsões à base de óleos vegetais

Identificação	Teor de óleo Vegetal	Teor de Tween 80	Teor de água
BAB-05-02 MAM-05-02	5 ml	2 ml	93 ml
BAB-05-05 MAM-05-05	5 ml	5 ml	90 ml
BAB-05-07 MAM-05-07	5 ml	7 ml	88 ml
BAB-05-10 MAM-05-10	5 ml	10 ml	85 ml
BAB-10-02 MAM-10-02	10 ml	2 ml	88 ml
BAB-10-05 MAM-10-05	10 ml	5 ml	85 ml
BAB-10-07 MAM-10-07	10 ml	7 ml	83 ml
BAB-10-10 MAM-10-10	10 ml	10 ml	80 ml
BAB-15-02 MAM-15-02	15 ml	2 ml	83 ml
BAB-15-05 MAM-15-05	15 ml	5 ml	80 ml
BAB-15-07 MAM-15-07	15 ml	7 ml	78 ml
BAB-15-10 MAM-15-10	15 ml	10 ml	75 ml

BAB-20-02 MAM-20-02	20 ml	2 ml	78 ml
BAB-20-05 MAM-20-05	20 ml	5 ml	75 ml
BAB-20-07 MAM-20-07	20 ml	7 ml	73 ml
BAB-20-10 MAM-20-10	20 ml	10 ml	70 ml

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

Para um efeito comparativo, desenvolveram-se duas formulações experimentais para as emulsões, a partir de um óleo emulsionável sintético de fabricação comercial. Do mesmo modo, realizaram-se duas variações de teores para o óleo sintético comercial, entretanto, por se tratar de um óleo emulsionável em água, não houve a aplicação de tensoativos.

As emulsões experimentais sintéticas foram identificadas da seguinte forma:

Lógica de codificação adotada para as emulsões vegetais

Tipo de óleo utilizado – Teor de óleo vegetal – Teor de água

Tipo de óleo utilizado: SINT: Óleo sintético	Teor de óleo sintético 05 = 5% de óleo sintético 10 = 10% de óleo sintético	Teor de água 90 = 90% de água 95 = 95% de água
---	---	--

Tabela 2 - Formulações experimentais de emulsões à base de óleo sintético

Identificação	Teor de óleo	Teor de Tween 80	Teor de água
SINT-05-95	5 ml	-----	95 ml
SINT-10-90	10 ml	-----	90 ml

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

Desenvolveram-se todas as formulações das emulsões nas instalações do Departamento de Engenharia Mecânica, utilizando o Laboratório de Tribologia e Metalurgia do Pó da própria instituição de ensino

3.3 Técnicas de caracterização utilizadas

Os tópicos descritos a seguir incluem as principais técnicas de caracterização utilizadas na avaliação das propriedades físico-químicas das formulações experimentais produzidas, com o objetivo de aplicação prática como emulsões de fluidos de corte dos processos de usinagem.

3.3.1 Cromatografia gasosa

Cromatografia gasosa é uma técnica utilizada para diversos processos onde a substância a ser separada é submetida à partição no equilíbrio entre duas fases, estacionária e móvel. Estas análises são essenciais aos óleos vegetais, pois é possível obter a composição dos ácidos graxos presentes em tais óleos, a partir de uma comparação com padrões analisados previamente. Em geral, emprega-se esta técnica complementando outros tipos de análises (RAMPAZZO, 2015; CARACIOLO, 2016).

A composição química dos óleos vegetais foi obtida por uma análise do perfil de ácidos graxos, através da técnica de cromatografia gasosa por ionização de chama (GC/FID).

Os parâmetros utilizados na análise do perfil de ácidos graxos estão relacionados abaixo:

- Equipamento 1: Balança analítica
- Fabricante: *Shimadzu do Brasil Comércio LTDA*
- Modelo: AY 220
- Equipamento 2: Centrífuga
- Fabricante: *Hettich Zentrifugen*
- Modelo: ROTINA 420R
- Equipamento 3: Agitador Vortex
- Fabricante: *Ika*
- Modelo: GENIUS 3

A partir de 25 ml da amostra de cada tipo de óleo vegetal, adicionou-se 0,5 ml de solução de hidróxido de potássio em metanol a 0,5 mol/l, sendo o sistema agitado por 2 minutos. Logo a seguir, adicionou-se 2 ml de hexano P.A, e novamente efetuou-se a agitação do sistema por 2 minutos. Em seguida, as amostras foram centrifugadas por 6 minutos, em uma rotação de 4500 rpm, nas condições de temperatura de 25°C. Os resíduos de sobrenadante foram filtrados através

de filtro PTFE (0,22 µm), e posteriormente, efetuaram-se as análises cromatográficas conforme foi descrito acima.

Desenvolveram-se as análises de composição química das amostras dos óleos vegetais, a partir da técnica de cromatografia gasosa, nas instalações do LAFIP/CETENE.

3.3.2 Viscosidade

Viscosidade é uma medida da resistência ao fluxo de fluido (fluidez) sob a ação da força da gravidade, e que se caracteriza como a tensão de cisalhamento atuante em um plano do fluido por unidade de gradiente de velocidade normal ao plano. A viscosidade é a mais importante das propriedades dos óleos lubrificantes, visto que no desempenho de tais substâncias como fluidos, há uma forte relação com a capacidade de molhabilidade e de extração de calor. De forma geral, conforme os óleos se degradam, aumentam-se os níveis de viscosidade. A viscosidade dos óleos vegetais é influenciada pelas diversas propriedades físicas e químicas, tais como temperatura, densidade, peso molecular, grau de insaturação e ponto de fusão (IGWE, 2004; MUNIZ, 2008; BELINATO, 2010; SOUZA, 2015).

A análise de viscosidade dos óleos vegetais puros e das formulações experimentais que foram desenvolvidas foi realizada por meio dos parâmetros abaixo:

- Equipamento: Viscosímetro digital
- Fabricante: *Anton Paar*
- Modelo: SVM 3000

Cada uma das amostras foi colocada em uma seringa de 5 ml e depois foi injetada dentro do viscosímetro, de maneira meticulosa, objetivando a prevenção da formação de bolhas de ar, pois poderia interferir nos resultados. Então, realizaram-se cinco leituras no total, entretanto, os valores extremos foram descartados, utilizando apenas os três valores resultantes. Executou-se a primeira leitura com o objetivo de dar estabilidade ao equipamento, e logo a seguir, efetuaram-se as demais leituras. Com um conjunto de valores das leituras, calculou-se a média e o desvio padrão ($\text{DP} \pm$). Para cada amostra de óleos vegetais, executou-se uma lavagem no equipamento para a injeção da próxima amostra, utilizando N-Hexano P.A e Acetona P.A.

A análise de viscosidade das amostras dos óleos vegetais puros e das formulações de emulsões experimentais foram desenvolvidas nas instalações do LAFIP/CETENE.

3.3.3 Análise de pH

O pH é uma medida que representa um maior ou menor grau de acidez ou da alcalinidade de qualquer tipo de soluções, e geralmente é denotado pela presença do íon hidrogênio (H^-). Os valores de pH fazem com que os compostos químicos obedeçam à três possíveis classificações, como mostra a tabela 3 (EL BARADIE, 1996).

Tabela 3 - Classificação das soluções em função dos valores de pH

pH	Avaliação da solução
0	Representa uma extrema acidez
7	Representa uma neutralidade
14	Representa uma extrema alcalinidade

FONTE: EL BARADIE (1996)

A análise de pH das formulações experimentais desenvolvidas ocorreu por meio do uso de um pHmetro digital Hanna pH 21, previamente calibrado com soluções tampão pH 4,0 e 7,0 na temperatura de 25°C.

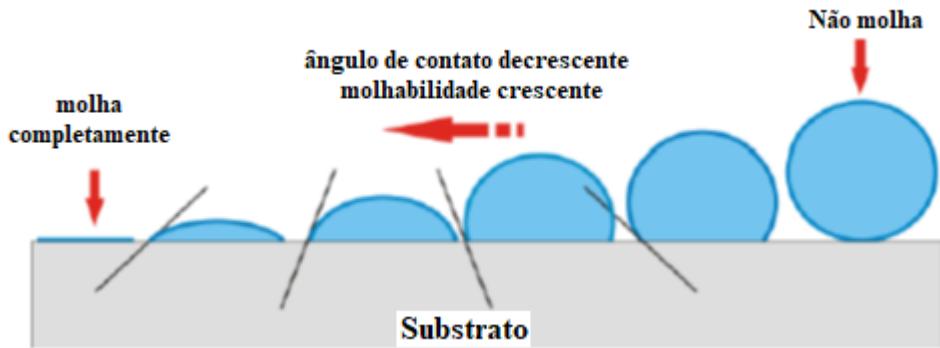
Realizou-se a análise de pH das formulações de emulsões experimentais nas instalações do LAC/UFPE.

3.3.4 Análise de molhabilidade

Molhabilidade é uma tendência que um determinado fluido líquido possui de aderir em uma superfície sólida, levando em consideração a presença do ar atmosférico, entre outros tipos de fluidos imiscíveis. O grau de molhabilidade é determinado através do ângulo de contato (θ^o), que é formado entre o plano tangente do fluido líquido e o plano da superfície sólida (substrato) (BELINATO, 2010).

O ângulo de contato (θ^o) é um parâmetro influenciado diretamente por três fatores importantes, a saber, a tensão superficial, a hidrofobicidade superficial e a pressão de dissociação que atuam nos fluidos líquidos, além da relação entre as forças de adesão e as forças de coesão nos mesmos (CHAUDHURI; SANTANU, 2014; SOUZA, 2015). A figura 10 mostra de forma clara a relação entre a molhabilidade e o ângulo de contato.

Figura 10 – Grau de molhabilidade em função do ângulo de contato



FONTE: ADAPTADO DE SOUZA (2015)

Através da figura 10, percebe-se que a molhabilidade ótima é alcançada se o ângulo de contato for nulo ($\theta = 0^\circ$), visto que nestas condições haverá a completa adesão do líquido na superfície, o que caracteriza a superfície como hidrofílica. Por outro lado, se o ângulo de contato for máximo ($\theta = 180^\circ$), em nenhuma hipótese haverá o molhamento nas superfícies, o que afeta sobremaneira o resfriamento, e em virtude disso, a superfície é caracterizada como hidrofóbica. Finalmente, se o ângulo de contato oscilar entre uma faixa determinada ($0^\circ < \theta < 90^\circ$), ocorre um caso intermediário de molhamento parcial (SHAW, 1975).

As análises do ângulo de contato foram realizadas por meio dos parâmetros a seguir:

- Equipamento: *DROP Shape Analyzer*
- Fabricante: KRUSS
- Modelo: DAS 100

O procedimento experimental consistiu nas etapas a seguir:

Etapa 1:

Preparação metalográfica da superfície metálica (substrato), através do processo de lixamento superficial, de forma automática utilizando uma máquina politriz, em três granulometrias diferentes de lixas (#400, #600 e #1000). O objetivo é de livrar o substrato de uma oxidação característica dos metais e ainda melhorar os aspectos de rugosidade.

Etapa 2:

Aplicação de uma gota de cada amostra na superfície metálica (substrato), a qual foi dantes preparada.

Etapa 3:

Captura das imagens das gotas de cada amostra experimental no substrato, originado os ângulos de contato.

Etapa 4:

Medição dos ângulos de contato, em triplicata, adotando-se a média dos valores. Para isso, utilizou-se um software acoplado ao equipamento.

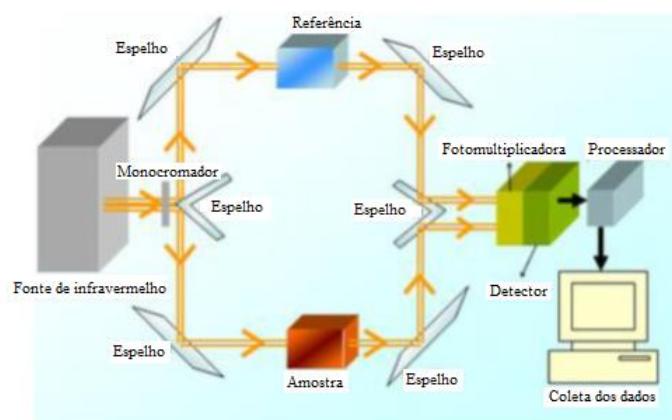
A análise de molhabilidade dos óleos vegetais puros e das formulações experimentais de emulsões foi realizada nas instalações do COMPOLAB/UFPE.

3.3.5 Espectroscopia na região do infravermelho (FTIR)

Espectroscopia na região do infravermelho (FTIR) é uma técnica com muitas aplicações objetivando a identificação dos diversos compostos. De forma geral, uma análise por meio desta técnica envolve transições eletrônicas, vibracionais e rotacionais, as quais estão localizadas nas regiões específicas, tais como a região de ultravioleta e/ou visível, a região do infravermelho e a região de microondas (SILVERSTEIN et al., 2007; MORAIS, 2014).

Uma real intenção da utilização da técnica de espectroscopia na região do infravermelho é a avaliação das bandas da carbonila presentes nos ácidos graxos livres. Os ácidos graxos livres são originados no processo de oxidação, podendo desencadear muitos ataques de corrosão, pelo ataque das superfícies metálicas em contato com o fluido. Em outras palavras, os dados obtidos nas análises da região do infravermelho possibilitam o estudo das amostras e uma identificação qualitativa de suas composições, detectando as possíveis adulterações das amostras (MORAIS, 2014; TRAJANO, 2017). A figura 11 ilustra o esquema de um espetrômetro:

Figura 11 – Esquema de funcionamento de um espetrômetro



FONTE: TRAJANO (2017)

De acordo a figura 11, a produção do feixe de luz infravermelha ocorre em dois raios separados. Deste modo, um dos feixes de luz passa pela amostra, enquanto o outro feixe de luz passa por uma referência, que é uma substância onde a amostra é dissolvida ou misturada. Mas, ambos os feixes de luz são refletidos de volta ao detector, sendo que primeiramente passam por um divisor, cuja função é alternar de forma rápida o tipo de raio luminoso que entra no detector. Finalmente, ambos os sinais são comparados e ocorre a coleta de dados (TRAJANO, 2017).

A utilização da técnica de espectroscopia na região do infravermelho (FTIR) para todas as amostras experimentais produzidas representa um fator determinante para avaliar o processo de oxidação de óleos vegetais. O princípio fundamental da técnica está na incidência de luz nas amostras, sendo a intensidade captada por um detector. A resolução formada pela luz que incide e pela luz que passa nas amostras experimentais é denominada transmitância. Realizaram-se as análises de infravermelho das amostras experimentais formuladas de acordo com os parâmetros a seguir:

- Equipamento: espectrofotômetro de absorção na região do infravermelho;
- Fabricante: *Shimadzu* Corporation
- Modelo: IR Prestige-21
- Transformada de Fourier: FTIR – 8400S
- Tipo de cristal: iodeto de césio
- Ângulo de incidência: 45°
- Resolução: 4 cm⁻¹
- Número de varreduras: 8

Durante a execução das análises, tornou-se necessário a aplicação de um volume de óleo vegetal suficiente para cobrir totalmente a superfície do cristal. Desta forma, conseguiu-se obter êxito nas varreduras e nos resultados.

As análises de espectroscopia de infravermelho (FTIR) das formulações experimentais de emulsões foram desenvolvidas nas instalações do LAC/UFPE.

3.3.6 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) é a técnica de caracterização utilizada para a medição da diferença entre a energia liberada ou fornecida por uma amostra e um determinado padrão de referência, o qual deve ser inerte termicamente. Na avaliação do efeito da temperatura

sobre as propriedades físico-químicas de materiais orgânicos, tal técnica é largamente utilizada, e os resultados obtidos ficam registrados graficamente na forma de picos de temperaturas. É de grande importância ressaltar que a estabilidade oxidativa de óleos vegetais, em curtos períodos, é facilmente verificada por meio desta técnica (BELINATO, 2010; GBOGOURI et al., 2012).

A técnica de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) foi utilizada para a avaliação do comportamento cinético oxidativo das formulações experimentais das emulsões preparadas, utilizando os métodos isotérmico e dinâmico. Assim, avaliou-se a temperatura de oxidação das amostras experimentais formuladas, por meio dos parâmetros a seguir:

- Equipamento: Termobalança
- Fabricante: *Shimadzu* Corporation
- Modelo: DTG-60H
- Taxa de aquecimento: 1,0°C/min até 300°C
- Gás utilizado: Oxigênio (O₂)
- Temperatura: constante por 1 minuto

A partir dos dados experimentais, utilizou-se a intersecção das curvas de início e término do processo de oxidação das amostras, para determinar a temperatura de oxidação.

As análises de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) das amostras experimentais de emulsões foram desenvolvidas nas instalações do LAFIP/CETENE.

3.3.7 Termogravimetria (TG)

Termogravimetria (TG) é a técnica de caracterização utilizada para o monitoramento da variação de massa de uma amostra, em função da temperatura e do tempo. Através da realização de ensaios termogravimétricos é possível estabelecer a faixa dos valores da estabilidade térmica da amostra, além de verificar o desencadeamento de outros tipos de reações químicas. Efetua-se a leitura dos resultados por meio das curvas termogravimétricas, em equipamentos chamados termobalanças, e as principais informações contidas nos gráficos são a temperatura inicial (T_i), a temperatura final (T_f) e o valor da perda de massa apresentada pela amostra (CANEVAROLO, 2007; NUNES, 2013).

As análises termogravimétricas foram obtidas por meio dos parâmetros a seguir:

- Equipamento: Termobalança

- Fabricante: *Shimadzu* Corporation
- Modelo: DTG-60H
- Razão de aquecimento: 10°C/min

Utilizou-se o método dinâmico, onde aproximadamente 5,0mg de cada tipo de amostra experimental formulada alocada em um cadinho de platina, em uma atmosfera de ar com fluxo de 50ml/min, no intervalo de 25°C a 600°C.

As análises de Termogravimetria (TGA) das amostras experimentais de emulsões foram desenvolvidas nas instalações do LAFIP/CETENE.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, apresenta-se a discussão dos resultados obtidos na fase de caracterização das propriedades físico-químicas das formulações experimentais. Através das metodologias que foram empregadas e o conhecimento sobre as propriedades avaliadas, torna-se possível obter a formulação ideal para as emulsões de fluidos de corte à base de vegetais.

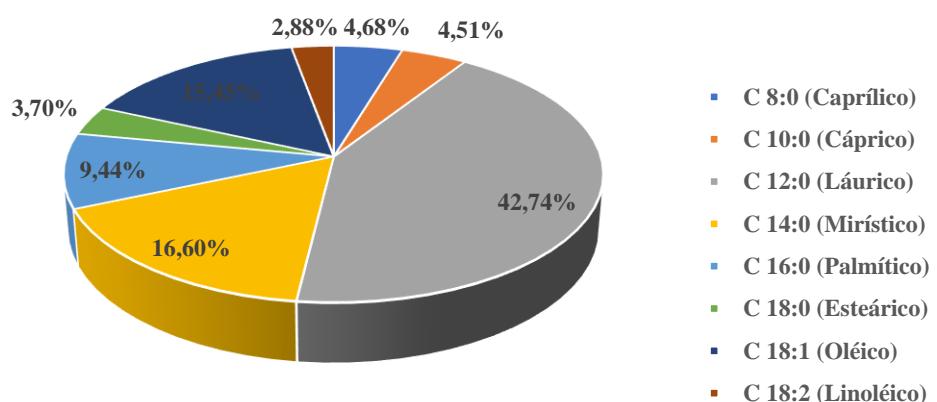
4.1 Caracterização das propriedades físico-químicas

O ato da caracterização das principais propriedades físico-químicas de todas as amostras experimentais desenvolvidas a partir dos óleos vegetais estudados e do óleo sintético comercial adotado como parâmetro comparativo possui a finalidade de selecionar a melhor opção, visando a aplicação como fluidos de corte das operações de usinagem.

4.2 Análise do perfil de ácidos graxos – Cromatografia gasosa

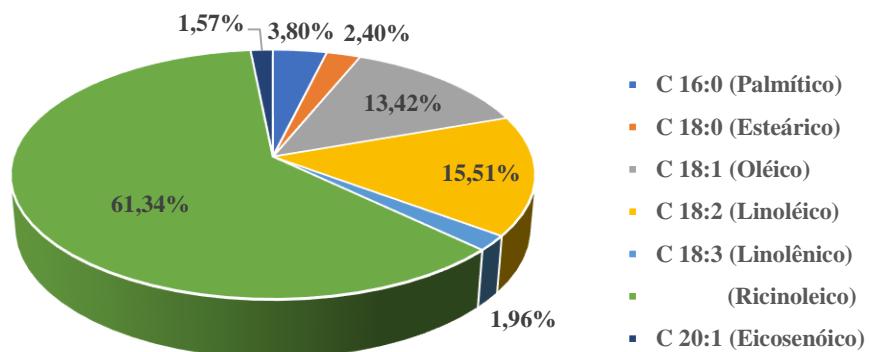
O perfil de ácidos graxos do óleo de babaçu e do óleo de mamona foram analisados pela técnica de cromatografia gasosa. Esta análise é de grande importância, visto que fornece toda a composição química de ácidos graxos presentes nos óleos vegetais. Os resultados obtidos estão apresentados nas figuras 12 e 13:

Figura 12 - Perfil de ácidos graxos do óleo de babaçu (Análise experimental)



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

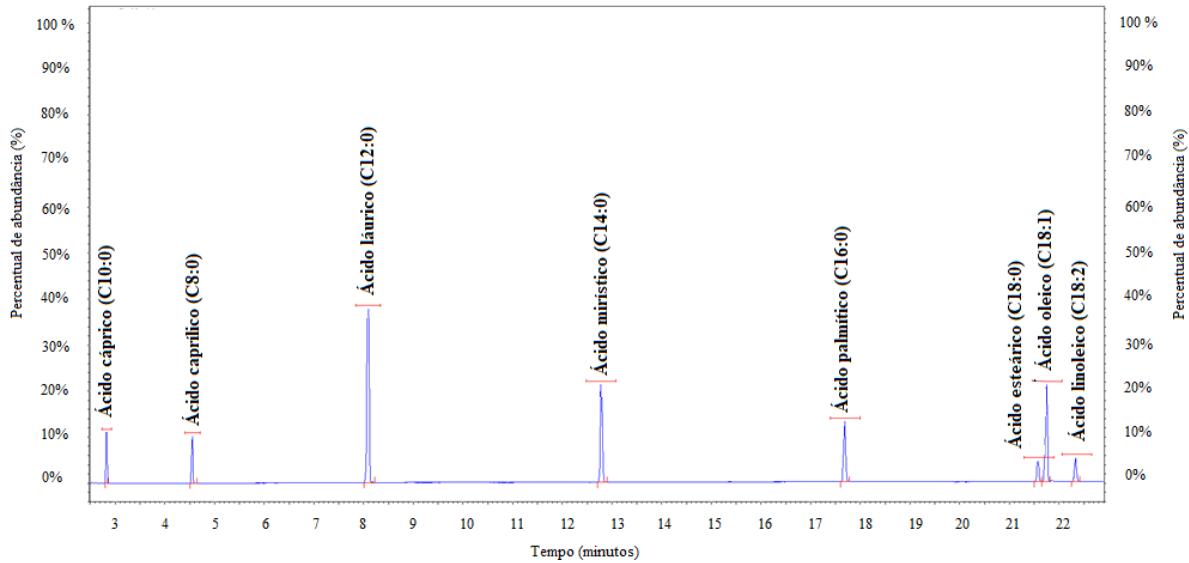
Figura 13 - Perfil de ácidos graxos do óleo de mamona (Análise experimental)



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

Verifica-se a concordância dos valores experimentais obtidos com os valores fornecidos pela literatura técnica. A partir dos valores experimentais, obtiveram-se os cromatogramas dos óleos de babaçu e mamona (puros), os quais estão ilustrados nas figuras 14 e 15. Por meio deles, é possível obter um melhor entendimento sobre o comportamento dos óleos vegetais estudados.

Figura 14 – Cromatograma do óleo de babaçu

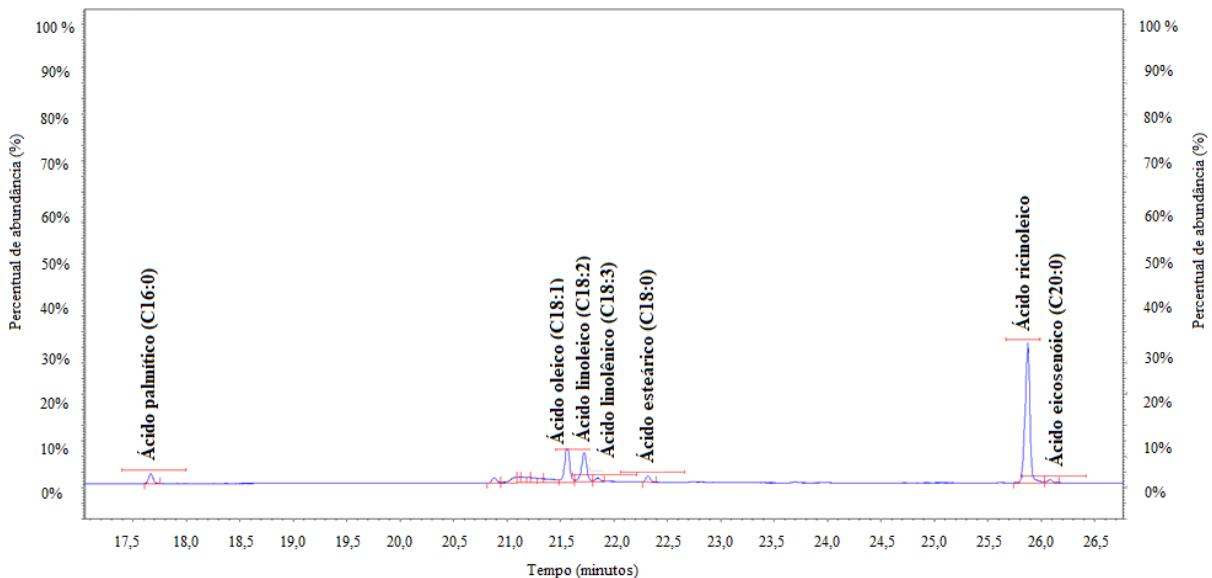


FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

Na composição química do óleo de babaçu há ácidos graxos saturados e insaturados. No entanto, há uma real predominância dos ácidos graxos saturados de cadeia curta, principalmente do ácido láurico (C 12:0). Então, de maneira geral, os ácidos graxos saturados presentes no óleo

de babaçu compõem cerca de 80 a 88% de toda a composição (SANTOS et al., 2013; VINHAL, 2014).

Figura 15 – Cromatograma do óleo de mamona



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

No óleo de mamona, há praticamente a predominância de um único ácido graxo, a saber, o ácido ricinoleico. Este ácido possui a peculiaridade de apenas uma dupla ligação com singela hidroxilação, de modo que o óleo apresenta maior viscosidade, densidade e ponto de ebulição. De forma secundária, nota-se a presença dos ácidos oléico e linoléico com grande importância. As propriedades do óleo de mamona possibilitam um maior valor agregado, além de aplicações industriais diversas. A predominância na composição química é dos ácidos graxos insaturados, chegando a ordem de 97% ou mais (MELO, 2010).

4.3 Aspecto macroscópico das formulações experimentais desenvolvidas

Todas formulações experimentais após desenvolvidas, foram armazenadas utilizando a bancada do laboratório em que foram produzidas. Após períodos específicos, avaliou-se alguns aspectos, tais como coloração, odor, consistência e aparência das formulações, objetivando uma pré-seleção das melhores formulações de emulsões desenvolvidas com potencial às soluções de problemas de usinagem. Estes aspectos foram analisados após 7, 15, 20 e 30 dias após a data de fabricação

Os dados referentes às análises macroscópicas estão nas tabelas 4, 5 e 6:

Tabela 4 – Análise prévia das formulações de emulsões à base de óleo de babaçu

Identificação	7 dias	15 dias	20 dias	30 dias
BAB-05-02	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório
BAB-05-05	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório
BAB-05-07	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório
BAB-05-10	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório
BAB-10-02	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório
BAB-10-05	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório
BAB-10-07	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório
BAB-10-10	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório
BAB-15-02	Satisfatório	Satisfatório	Ruim	Ruim
BAB-15-05	Satisfatório	Satisfatório	Ruim	Ruim
BAB-15-07	Satisfatório	Satisfatório	Ruim	Ruim
BAB-15-10	Satisfatório	Satisfatório	Ruim	Ruim
BAB-20-02	Satisfatório	Ruim	Ruim	Ruim
BAB-20-05	Satisfatório	Ruim	Ruim	Ruim
BAB-20-07	Satisfatório	Ruim	Ruim	Ruim
BAB-20-10	Satisfatório	Ruim	Ruim	Ruim

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

Tabela 5 - Análise prévia das formulações de emulsões à base de óleo de mamona

Identificação	7 dias	15 dias	20 dias	30 dias
MAM-05-02	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório
MAM-05-05	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório
MAM-05-07	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório
MAM-05-10	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório
MAM-10-02	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório
MAM-10-05	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório
MAM-10-07	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório
MAM-10-10	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório
MAM-15-02	Satisfatório	Ruim	Ruim	Ruim
MAM-15-05	Satisfatório	Ruim	Ruim	Ruim
MAM-15-07	Satisfatório	Ruim	Ruim	Ruim
MAM-15-10	Satisfatório	Ruim	Ruim	Ruim
MAM-20-02	Satisfatório	Ruim	Ruim	Ruim
MAM-20-05	Satisfatório	Ruim	Ruim	Ruim
MAM-20-07	Satisfatório	Ruim	Ruim	Ruim
MAM-20-10	Satisfatório	Ruim	Ruim	Ruim

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

Tabela 6 - Análise prévia das formulações de emulsões à base de óleo sintético

Identificação	7 dias	15 dias	20 dias	30 dias
SINT-05-95	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório
SINT-10-90	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório	Satisfatório

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

Baseando-se nas análises prévias das formulações experimentais, verificou-se a relação existente dos teores de óleos vegetais e a capacidade de manter as propriedades físicas avaliadas (coloração, odor e consistência). As formulações qualificadas com nível “satisfatório” foram as que apresentaram os melhores aspectos físicos dentre as amostras experimentais desenvolvidas, enquanto as demais formulações qualificadas com nível “ruim” tiveram maus aspectos, levando até mesmo ao crescimento de microorganismos. Neste aspecto, observou-se que as formulações experimentais com teores de óleos vegetais mais baixos (5% e 10%) apresentaram os melhores aspectos macroscópicos, ao passo que as demais formulações com teores de óleos vegetais mais elevados (15% e 20%) não apresentaram bons aspectos, ao longo dos 30 dias de análise. Ambas as formulações experimentais desenvolvidas a partir do óleo sintético não tiveram nenhum tipo de variação de propriedades físicas, cabendo salientar que se trata de um óleo emulsionável, e portanto, sem a necessidade de utilização de tensoativos. Desta forma, a homogeneização das fases é completa e perfeita.

As formulações experimentais pré-selecionadas para as demais etapas de caracterização das propriedades físico-químicas estão relacionadas na tabela 7. Todas as demais formulações experimentais foram reprovadas nesta fase, sendo posteriormente descartadas.

Tabela 7 – Formulações experimentais pré-selecionadas

Óleo de babaçu	Óleo de mamona	Óleo sintético
BAB-05-02	MAM-05-02	SINT-05-95
BAB-05-05	MAM-05-05	SINT-10-90
BAB-05-07	MAM-05-07	
BAB-05-10	MAM-05-10	
BAB-10-02	MAM-10-02	
BAB-10-05	MAM-10-05	
BAB-10-07	MAM-10-07	
BAB-10-10	MAM-10-10	

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

As formulações de emulsões de fluidos de corte utilizando os teores de óleos mais baixos é algo significativamente atrativo à usinagem, do ponto de vista técnico e econômico. Havendo a presença de água na composição das emulsões, ocorre a expansão da capacidade refrigerante sem prejudicar às propriedades de lubrificação encontradas nos óleos. Além disso, economiza-se bastante na questão econômica, pois a aquisição dos óleos vegetais possui um alto custo.

Verificou-se a ocorrência de um sobrenadante nas formulações experimentais que foram desenvolvidas, inclusive nas amostras pré-selecionadas na etapa anterior. Este inconveniente se observou logo no dia seguinte à produção das amostras de emulsões, e constatou-se que tal fato é relacionado ao comprimento das cadeias e ao perfil de ácidos graxos dos óleos vegetais usados como matéria-prima das formulações experimentais. Nas amostras pré-selecionadas, o aspecto de sobrenadante foi quase nulo, em nada prejudicando a estabilidade das formulações, e por tal razão, foram aprovadas neste quesito. Nas demais amostras reprovadas na etapa de pré-seleção, observou-se que o sobrenadante prejudicou bastante as características físicas vistas na inspeção visual, o que originou uma instabilidade com a possibilidade de iminente separação de fases.

Apesar do sobrenadante, notou-se uma nova homogeneização completa das amostras, a partir de uma leve agitação. Tendo em vista a finalidade das amostras experimentais realizadas, como fluidos de corte aplicáveis aos processos de usinagem, somado ao fato de que as máquinas operatrizes possuem um sistema integrado de circulação dos fluidos de corte do reservatório até a interface peça-cavaco-ferramenta de corte (zona de corte), por ação de uma bomba hidráulica, pode-se afirmar que o sobrenadante gerado nas formulações desenvolvidas não prejudicam em nada às operações de usinagem. Justifica-se este fato através da circulação dos fluidos de corte, visto que a energia transferida pela bomba hidráulica ao fluido de corte é suficientemente capaz de prover a completa homogeneização em poucos minutos.

As figuras 16, 15, 16 e 17 ilustram as formulações pré-selecionadas nesta etapa:

Figura 16 – Emulsões experimentais à base de óleo de babaçu selecionadas (5%)



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

Figura 17 - Emulsões experimentais à base de óleo de babaçu selecionadas (10%)



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

Figura 18 - Emulsões experimentais à base de óleo de mamona (5%)



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

Figura 19 - Emulsões experimentais à base de óleo de mamona (10%)

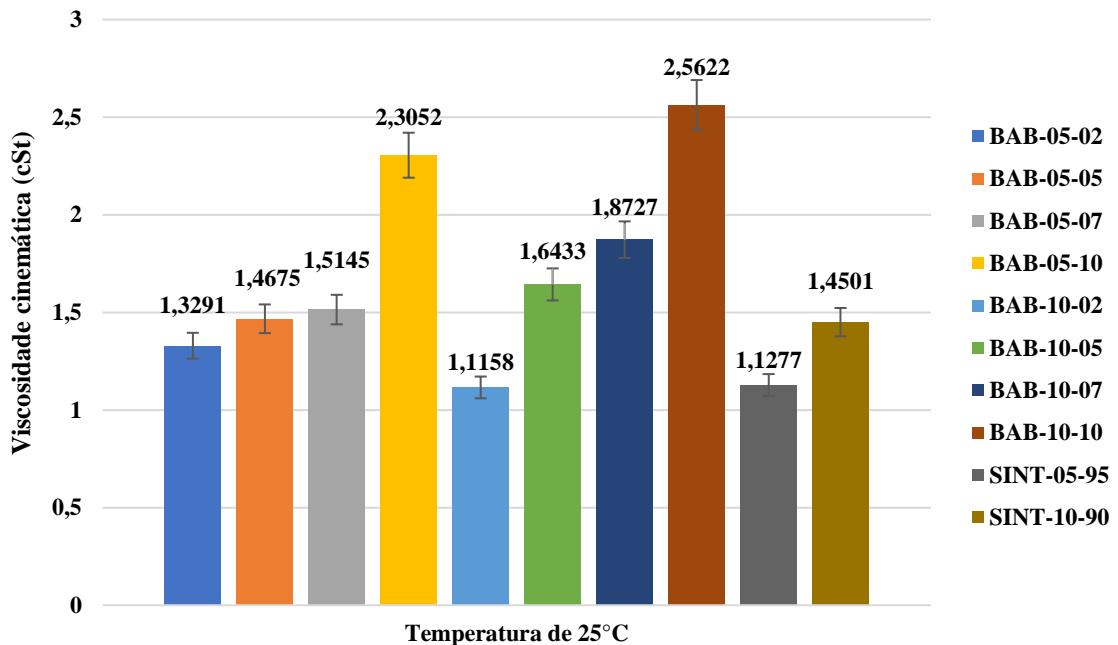


FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

4.4 Análise dos resultados de viscosidade

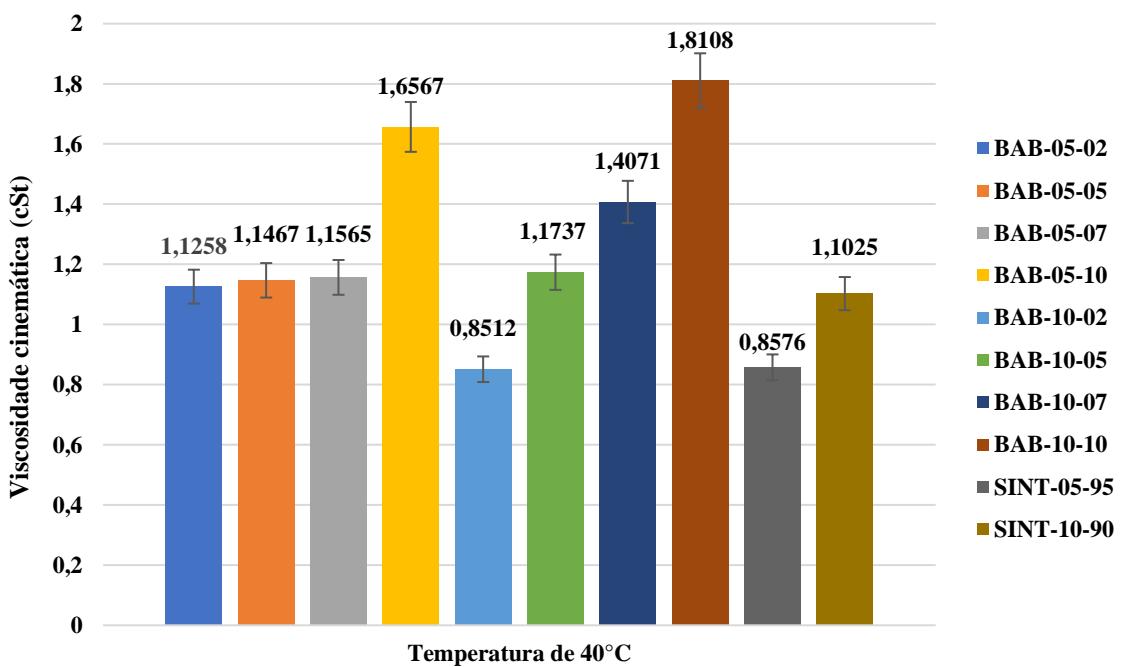
Os resultados experimentais obtidos para a viscosidade das diferentes formulações estão nas figuras 20, 21, 22 e 23.

Figura 20 – Viscosidade cinemática das emulsões: óleo de babaçu x óleo sintético (25°C)



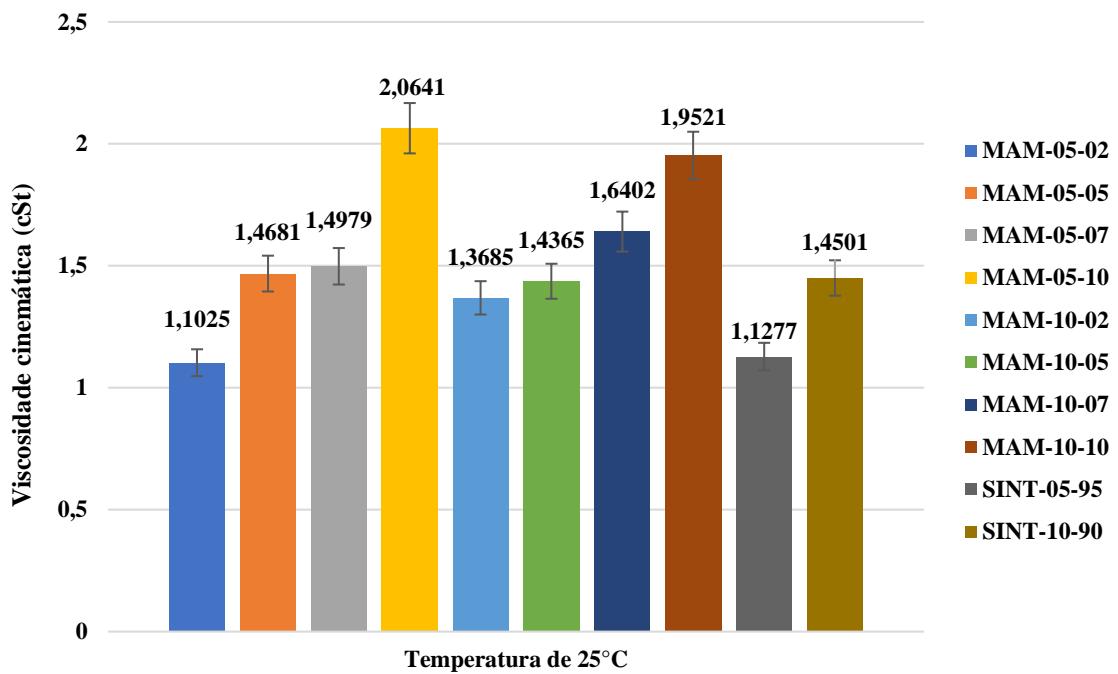
FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

Figura 21 - Viscosidade cinemática das emulsões: óleo de babaçu x óleo sintético (40°C)



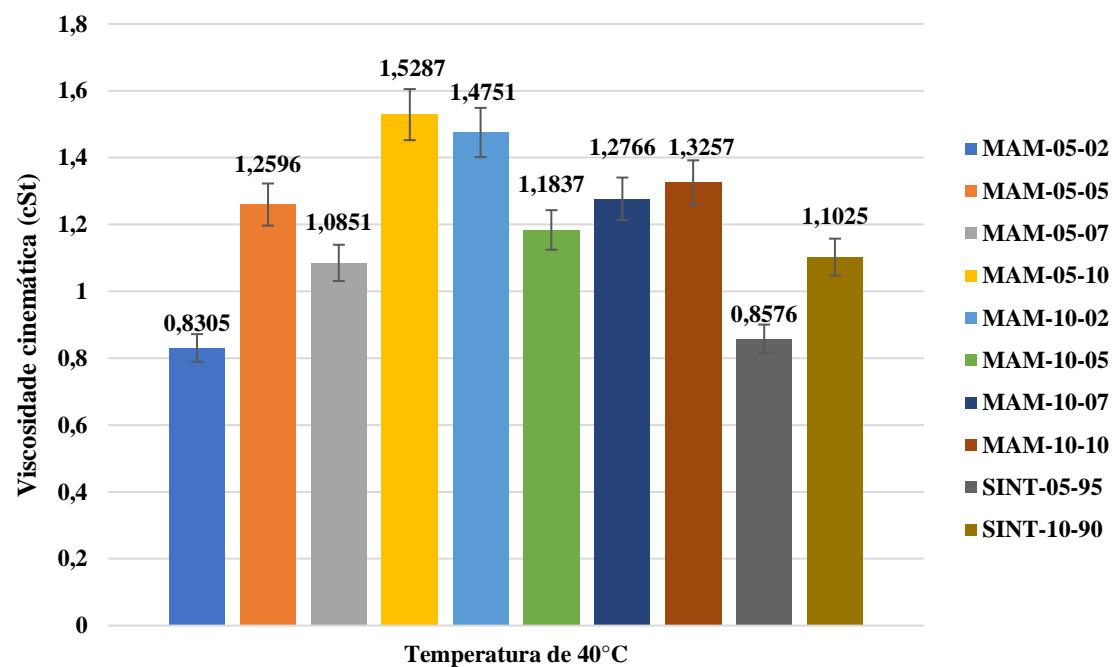
FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

Figura 22 - Viscosidade cinemática das emulsões: óleo de mamona x óleo sintético (25°C)



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

Figura 23 - Viscosidade cinemática das emulsões: óleo de mamona x óleo sintético (40°C)



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

Há um comportamento similar na distribuição dos resultados obtidos de viscosidade de todas as amostras experimentais. Todavia, as formulações de emulsões à base de óleo de babaçu apresentaram uma tendência de valor crescente da viscosidade, o qual pode estar associado com o aumento do teor de tensoativo utilizado (Tween 80). Em outros termos, a maior viscosidade é notada nas formulações com o teor de tensoativo igual a 10% (BAB-10-02, BAB-10-05, BAB-10-07 e BAB-10-10), ocorrendo o caso inverso nas formulações de apenas 2% de tensoativo na composição (BAB-05-02, BAB-05-05, BAB-05-07 e BAB-05-10). Quanto às emulsões à base de óleo sintético (SINT-05-95 e SINT-10-90), também se verificou a elevação da viscosidade em função do teor de óleo sintético utilizado.

De forma geral, pode-se afirmar que na temperatura de 25°C, as emulsões vegetais têm um satisfatório resultado de viscosidade (sobretudo a formulação BAB-10-02), se comparadas às formulações à base de óleo sintético. Com a elevação da temperatura para 40°C, houve a natural redução dos valores de viscosidade em todas as formulações, no entanto, novamente as emulsões à base de babaçu com teor de tensoativo igual a 10% tiveram a maior viscosidade. Há ainda um empate técnico entre as emulsões BAB-10-02 e SINT-05-95, neste quesito.

Comparando-se as emulsões à base de óleo de mamona com as emulsões sintéticas, há uma menor viscosidade por parte da emulsão SINT-05-95. Na temperatura de 25°C, a emulsão MAM-05-02 apresenta a menor viscosidade dentre as demais formulações vegetais, entretanto, o valor ainda foi superior ao resultado da emulsão SINT-05-95. Elevando-se a temperatura para 40°C, a emulsão MAM-05-02 continua possuindo o menor valor de viscosidade, e praticamente está no mesmo patamar da emulsão SINT-05-95.

Do ponto de vista da usinagem dos metais, quanto menor a viscosidade de um fluido de corte, melhor será a qualidade de aplicação nos processos. A capacidade de fluidez é de grande importância aos fluidos de corte, visto que quanto maior a viscosidade, maior será a dificuldade de escoamento deste fluido de corte na interface cavaco-peça-ferramenta de corte, e deste modo, compromete-se a zona de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

4.5 Análise de pH

O pH é um parâmetro de suma importância para as emulsões, atuando como o indicador do nível de crescimento bacteriano e da redução das propriedades anticorrosivas. A proliferação de bactérias é muito rara nas emulsões com valor de pH > 8,8. Por outro lado, as emulsões com pH < 8,5 estão susceptíveis à graves problemas, tais como o aumento da probabilidade de ataque corrosivo, desencadeamento de odores desagradáveis devido ao crescimento microbiológico e

o risco concreto de desestabilização. Torna-se necessário o controle diário do pH das emulsões, e recomenda-se que os estes valores estejam na faixa de $9 < \text{pH} < 10,5$. Porém, alguns estudos apontam para a faixa de $9 < \text{pH} < 9,3$ como o valor ideal para o pH das emulsões, conforme mostra a tabela 8 (RUNGE; DUARTE, 1990; EL BARADIE, 1996).

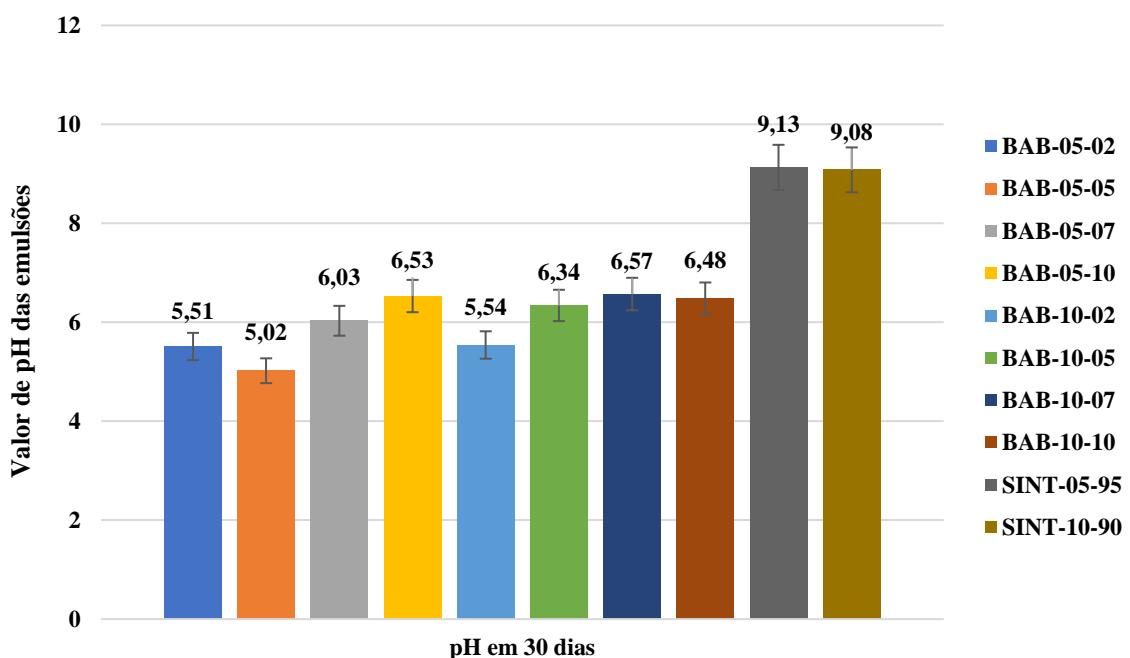
Tabela 8 – Critérios de controle de pH das soluções

Faixa de valores de pH	Situação
$\text{pH} > 8,7$	Emulsão satisfatória; adicionar pequenas quantidades de biocidas visando a manutenção preventiva.
$7,8 < \text{pH} < 8,7$	Adicionar quantidades suficientes de biocidas para um controle bacteriano.
$6,0 < \text{pH} < 8,0$	Ambiente favorável ao crescimento bacteriano; Efetuar um eficiente controle bacteriano.
$\text{pH} < 6,0$	Emulsão com propriedades afetadas; substituição da emulsão.

FONTE: RUNGE; DUARTE (1990); EL BARADIE (1996)

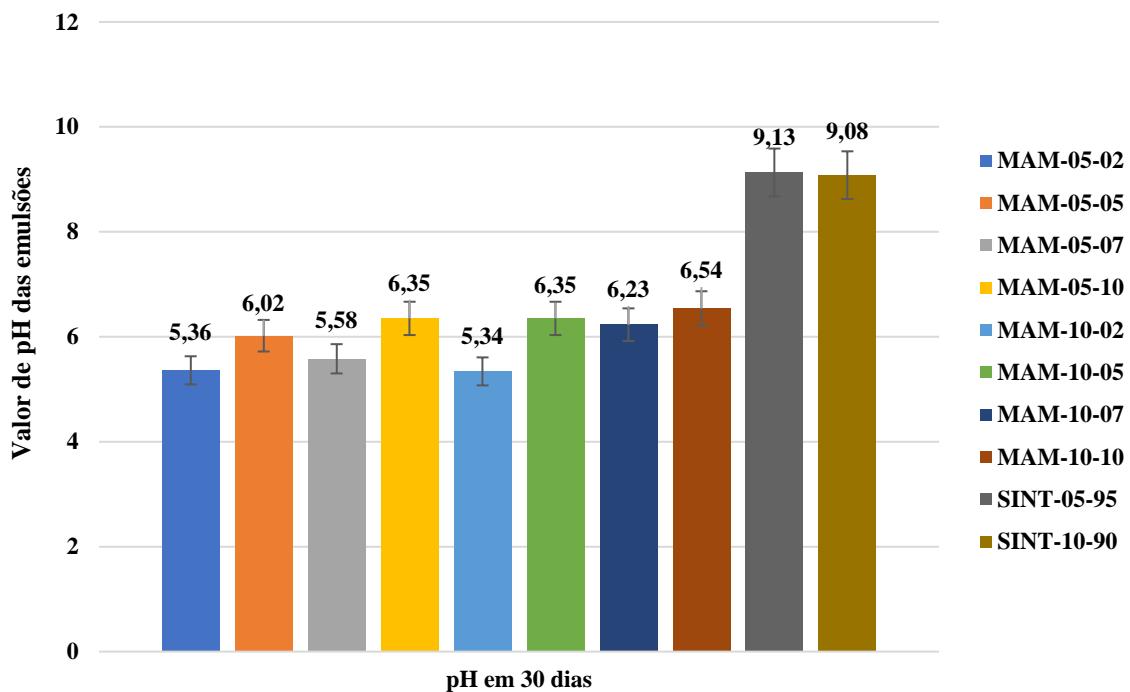
Os resultados de pH foram monitorados durante todo o tempo de estudo da estabilidade, e os resultados após 30 dias estão na figura 24 e 25.

Figura 24 – Comparativo do pH das emulsões: óleo de babaçu x óleo sintético



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

Figura 25 - Comparativo do pH das emulsões: óleo de mamona x óleo sintético



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

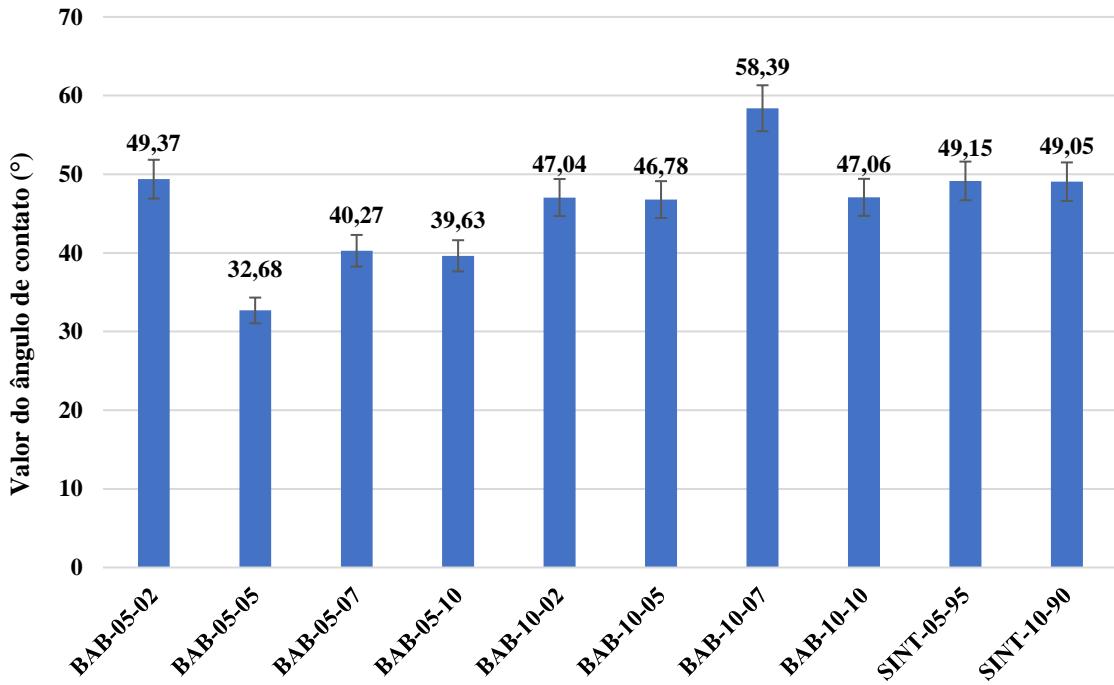
De acordo com os resultados acima, os melhores resultados de pH foram observados em ambas as formulações experimentais à base de óleo sintético (SINT-05-95 e SINT-10-90). Entre as formulações desenvolvidas à base de óleos vegetais, as emulsões com pH > 6,0 apresentam resultados razoáveis, todavia, é necessário um bom controle microbiano. É o caso das emulsões BAB-05-10, BAB-10-07, MAM-05-10, MAM-10-05 e MAM-10-10. Cabe ressaltar que não se utilizou nenhum tipo de agentes bactericidas na composição das formulações experimentais que foram desenvolvidas.

4.6 Análise de molhabilidade

A molhabilidade é a tendência que um determinado fluido possui de aderir ou espalhar sobre uma dada superfície sólida, sendo definida e quantificada termodinamicamente por meio do ângulo de contato. Do ponto de vista da usinagem, um fluido de corte com boa molhabilidade é essencial, tendo em vista a maior vazão proporcionando um escoamento mais fácil. Então, o menor ângulo de contato de uma gota com a superfície sólida produz uma melhor propriedade de molhabilidade do fluido (BELINATO, 2010).

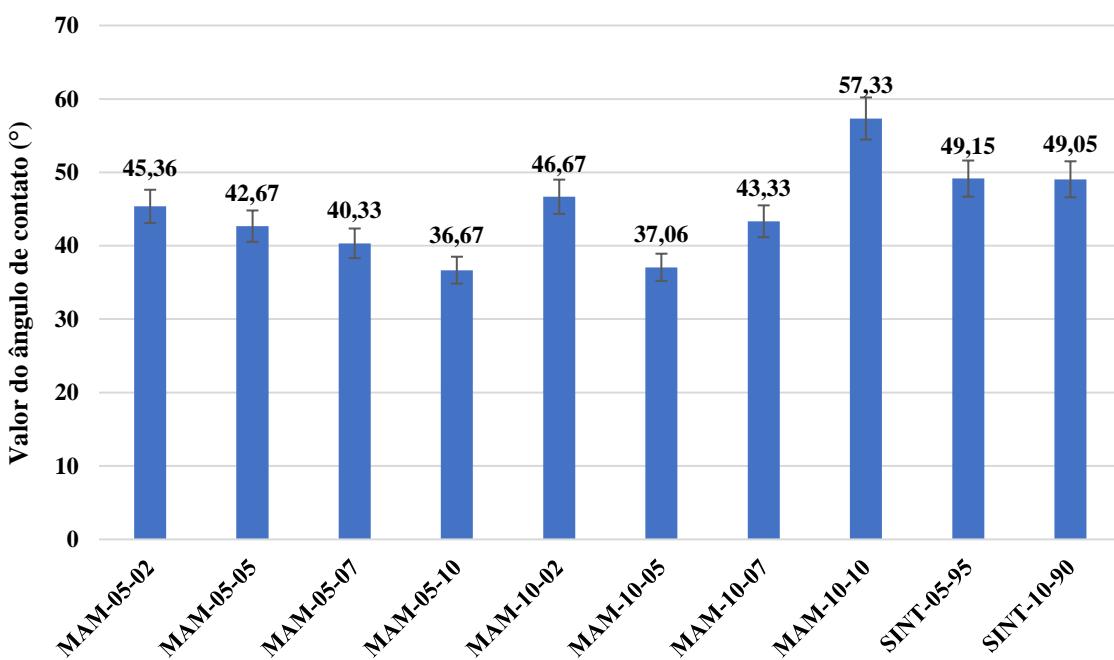
As figuras 26 e 27 fazem referência aos resultados de molhabilidade obtidos para todas as amostras experimentais desenvolvidas, com os valores em função do ângulo de contato.

Figura 26 – Variação do ângulo de contato das emulsões: óleo de babaçu x óleo sintético



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

Figura 27 - Variação do ângulo de contato das emulsões: óleo de mamona x óleo sintético



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

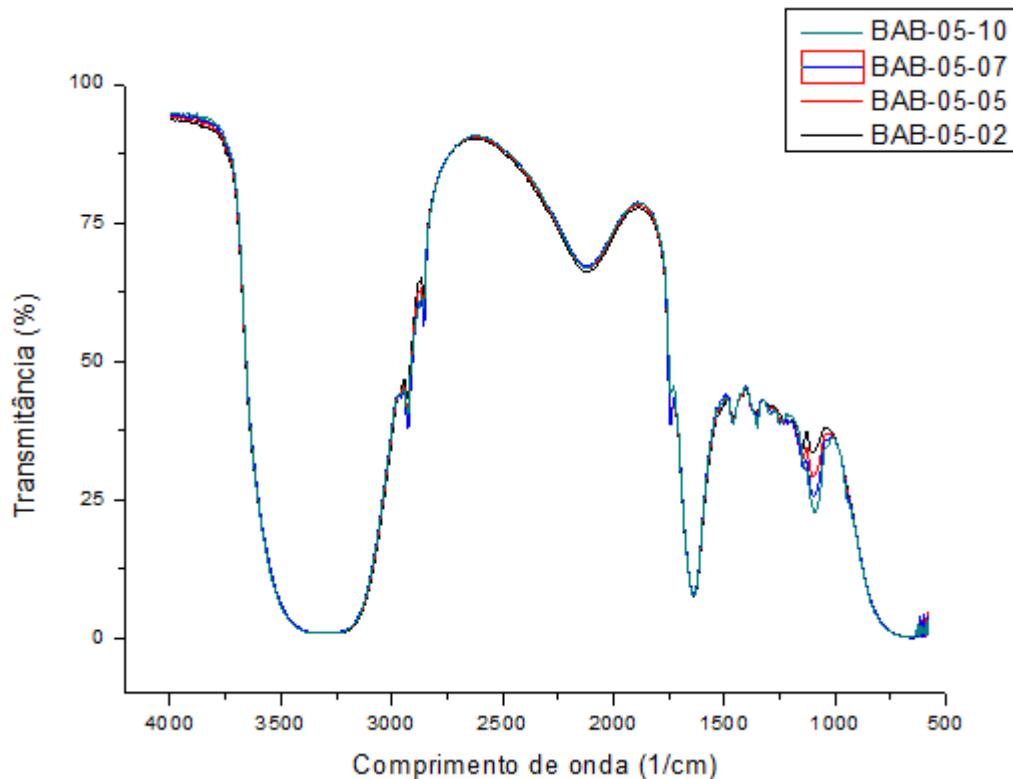
Através das figuras 26 e 27, percebe-se que os valores de ângulo de contato não tiveram grande variação, em todos os casos das formulações experimentais. Então, com base nos valores experimentais obtidos, é possível afirmar que todos os fluidos são molhantes, visto que possuem valores para o ângulo de contato $< 90^\circ$. Quanto mais molhantes forem os fluidos, haverá melhor condição de refrigeração.

Neste aspecto, as emulsões BAB-05-05 e MAM-05-10 têm um destaque, por possuírem os menores valores de ângulo de contato. Se comparadas as emulsões vegetais com as emulsões sintéticas, observa-se que as emulsões à base de óleo de babaçu e à base de óleo de mamona possuem as melhores condições de aplicação na usinagem.

4.7 Análise da Espectroscopia de infravermelho (FTIR)

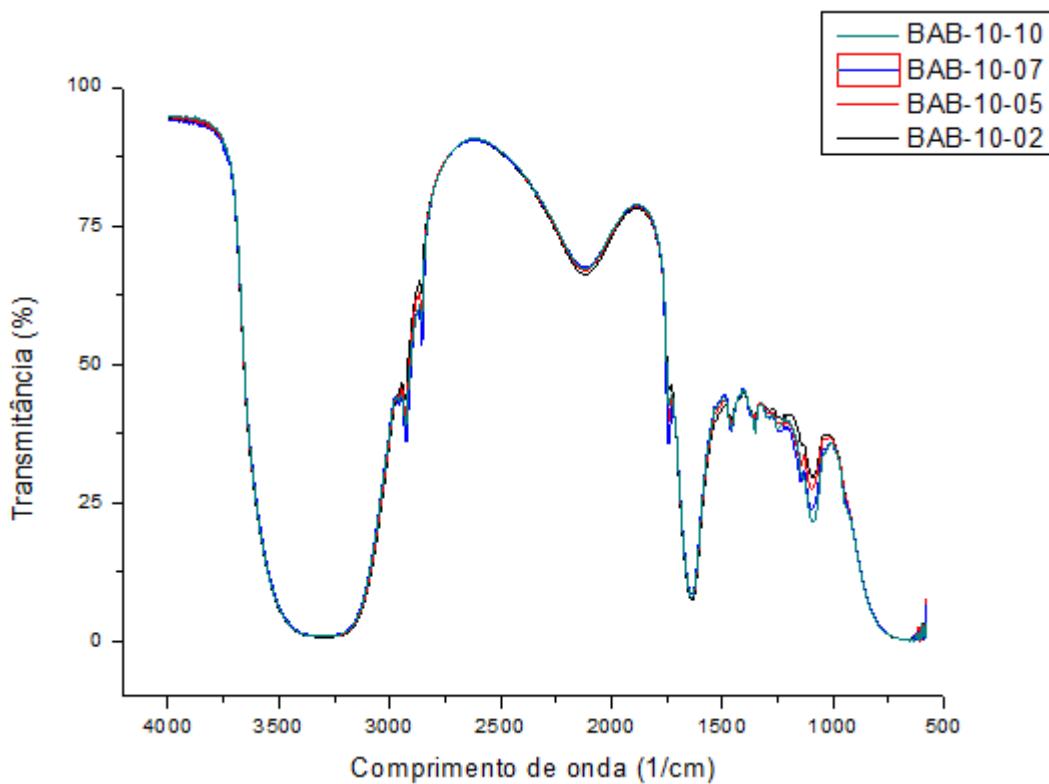
Efetuaram-se as análises dos espectros de infravermelho a partir de todas as formulações experimentais desenvolvidas. As figuras 28, 29, 30, 31 e 32 representam os vários espectros de infravermelho gerados a partir das amostras experimentais desenvolvidas:

Figura 28 – Espectro de infravermelho das emulsões à base de óleo de babaçu (5%)



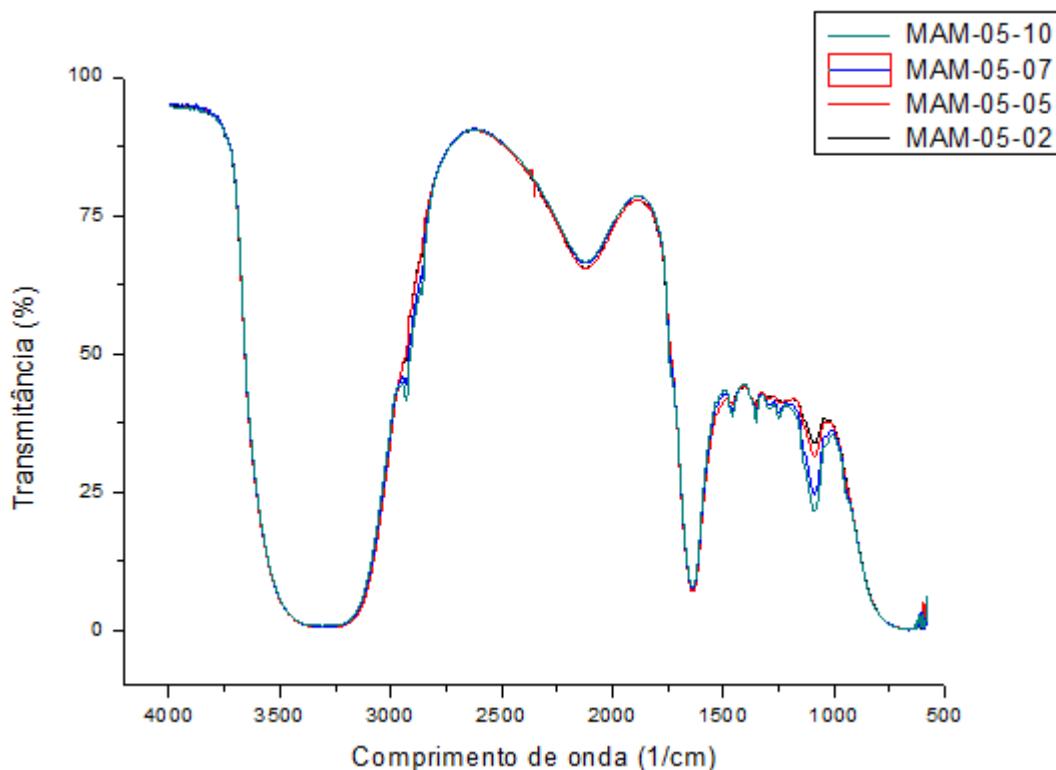
FONTE: AUTORIA PRÓPRIA UTILIZANDO O SOFTWARE ORIGIN 8.0 (2018)

Figura 29 - Espectro de infravermelho das emulsões à base de óleo de babaçu (10%)



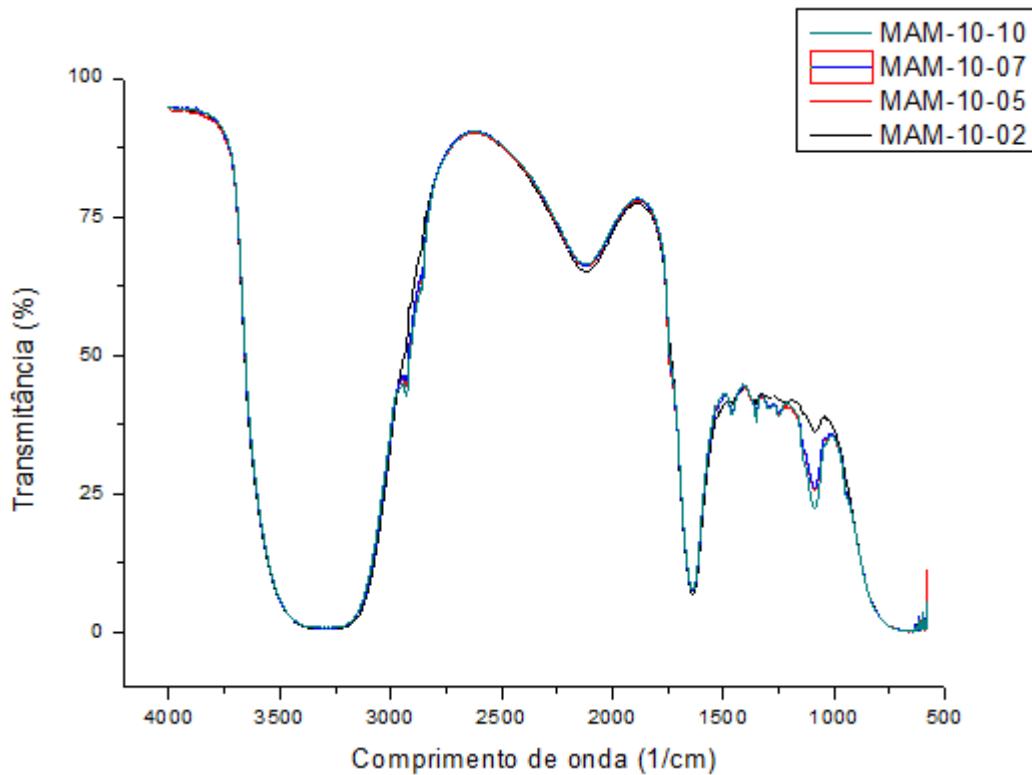
FONTE: AUTORIA PRÓPRIA UTILIZANDO O SOFTWARE ORIGIN 8.0 (2018)

Figura 30 - Espectro de infravermelho das emulsões à base de óleo de mamona (5%)



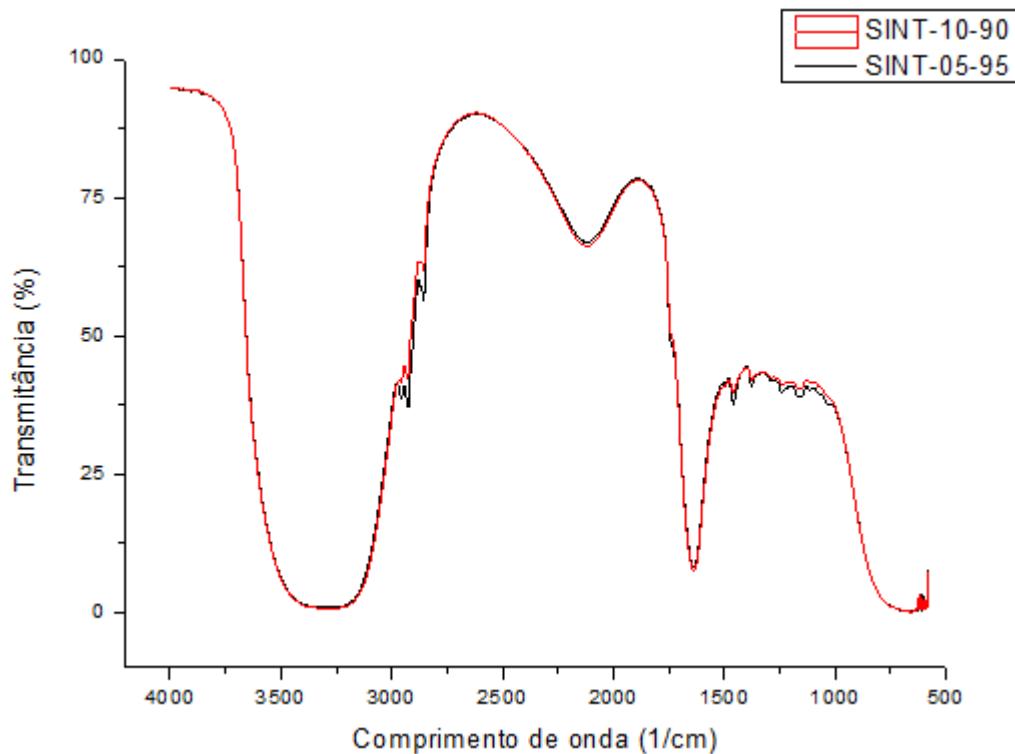
FONTE: AUTORIA PRÓPRIA UTILIZANDO O SOFTWARE ORIGIN 8.0 (2018)

Figura 31 - Espectro de infravermelho das emulsões à base de óleo de mamona (10%)



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA UTILIZANDO O SOFTWARE ORIGIN 8.0 (2018)

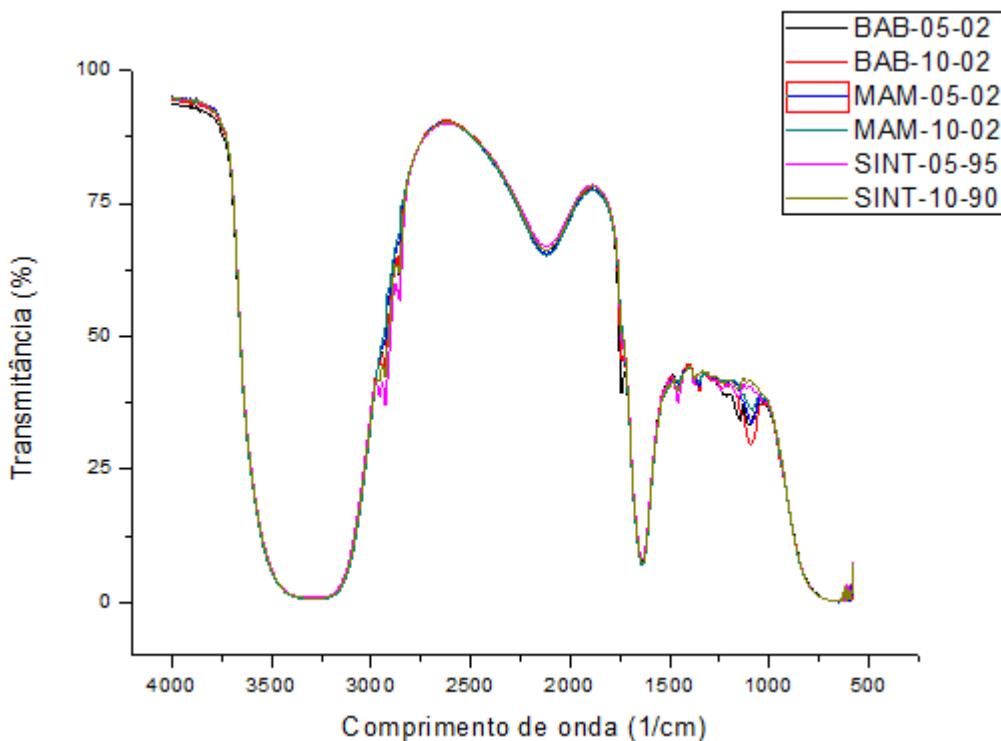
Figura 32 - Espectro de infravermelho das emulsões à base de óleo sintético (5% e 10%)



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA UTILIZANDO O SOFTWARE ORIGIN 8.0 (2018)

Através dos espectros de infravermelho comparativos acima, verifica-se a existência de um comportamento parecido em todas as formulações experimentais desenvolvidas. Na figura 33 está ilustrado o efeito combinado das principais formulações de cada tipo de óleo.

Figura 33 - Espectro de infravermelho das principais formulações de emulsões



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA UTILIZANDO O SOFTWARE ORIGIN 8.0 (2018)

De acordo com Da Rós et al. (2014), os espectros de infravermelho do óleo de babaçu e suas formulações de emulsões apresentam bandas vibracionais relacionadas aos triglicerídeos que possuem na composição (região de 1150–1750 cm⁻¹), atribuídas ao alongamento de grupos C – O (região de 1000–1300 cm⁻¹) e dupla ligação C – O (região de 1735–1750 cm⁻¹). Também foram detectadas bandas intensas devido à presença de CH₃, CH₂ e CH (região de 2855–2918 cm⁻¹), além de uma outra banda atribuída ao grupo CH₂ na região de 723 cm⁻¹. De acordo com Navarra et al. (2010) e Doll et al. (2012), observa-se ainda um pico mais forte em cerca de 3500 cm⁻¹ e 3000 cm⁻¹, o qual é proveniente de um alongamento vibracional de grupos hidroxila nos triglicerídeos. De forma geral, observa-se pela avaliação geral dos espectros monitorados, que não há mudanças significativas espectrais nas amostras experimentais formuladas em qualquer uma das situações das emulsões produzidas.

De acordo com Gherca et al. (2012), os espectros de infravermelho do óleo de mamona e suas formulações de emulsões apresentam bandas vibracionais relacionadas ao grupo O – H,

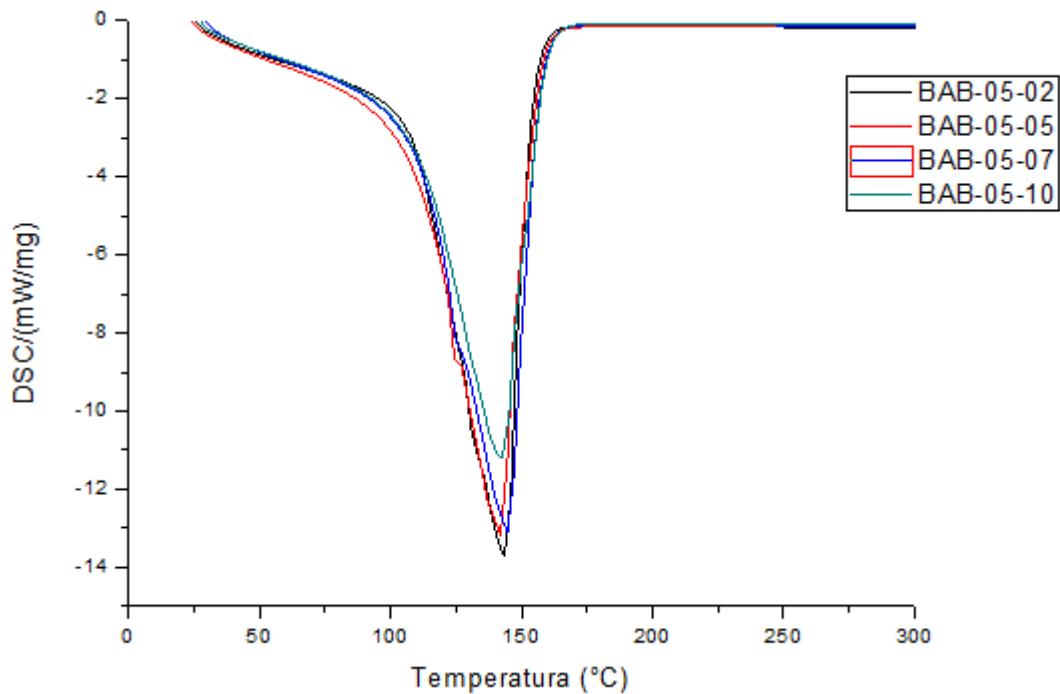
nas regiões de 3500–3000 cm⁻¹. Também, há bandas de vibração em 2950 e 2850 cm⁻¹ que são atribuídos ao grupo CH₂. Os picos observados em 1750 e 1200 cm⁻¹ devem-se ao fato de haver uma ligação C – O. O pico observado em 725 cm⁻¹ foi atribuído às vibrações dos ácidos graxos CH₂.

4.8 Análise de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A técnica de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) está baseada em uma medição do fluxo de calor gerado pelas amostras experimentais de óleos vegetais na fase de aquecimento e/ou resfriamento. Desta forma, avalia-se o momento da cristalização dos triglicerídeos, onde é obtido um valor de pico que mede a entalpia, além das temperaturas inferiores e superiores dos processos. É muito importante ressaltar que a estabilidade oxidativa dos óleos vegetais pode ser avaliada e quantificada por esta técnica (CUVELIER et al., 2012; DRABIK; TRZOS, 2013).

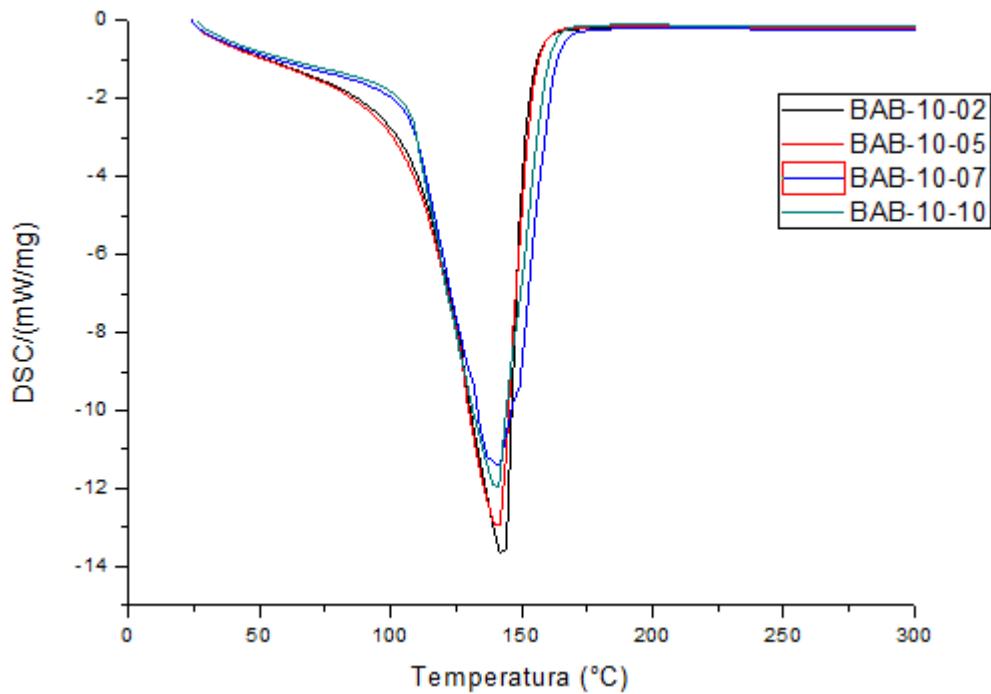
As figuras 34, 35, 36, 37 e 38 mostram as curvas DSC das amostras experimentais:

Figura 34 - Curvas DSC das emulsões à base de óleo de babaçu (5%)



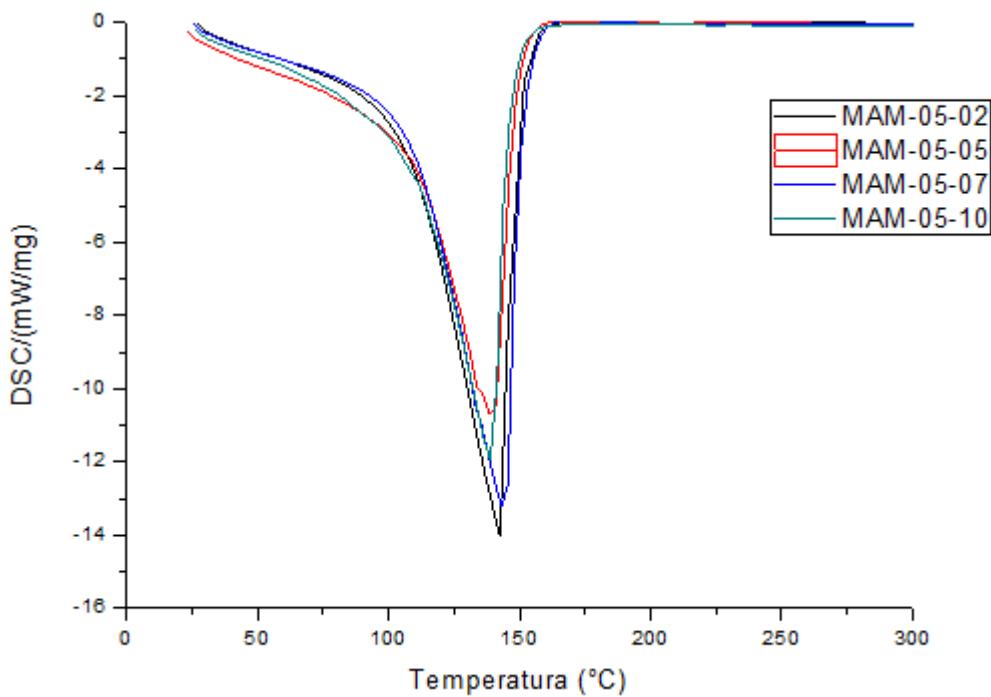
FONTE: AUTORIA PRÓPRIA UTILIZANDO O SOFTWARE ORIGIN 8.0 (2018)

Figura 35 - Curvas DSC das emulsões à base de óleo de babaçu (10%)



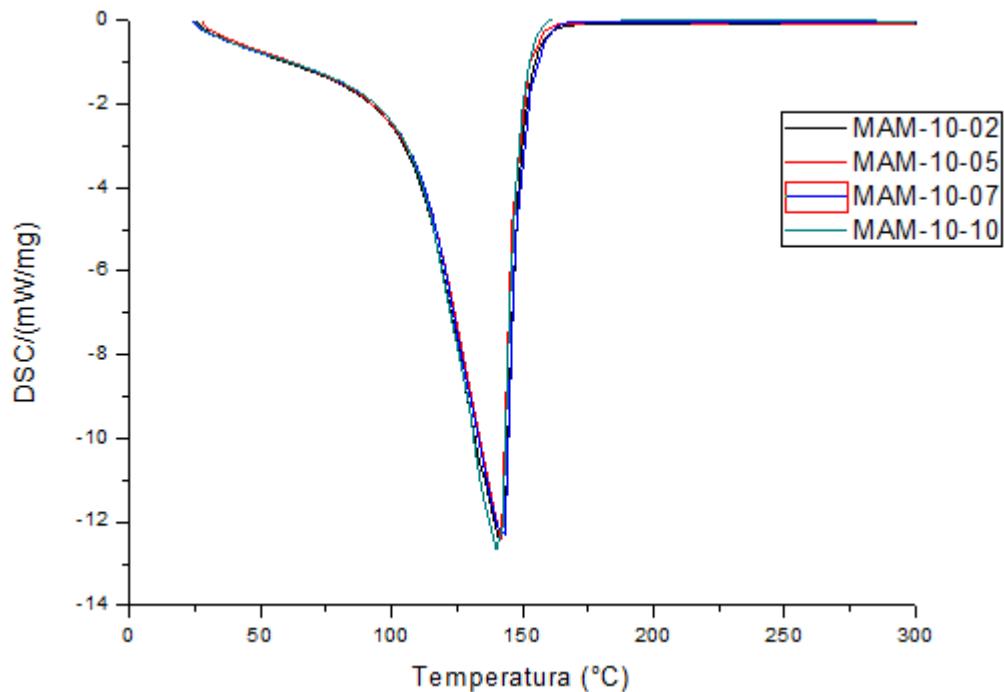
FONTE: AUTORIA PRÓPRIA UTILIZANDO O SOFTWARE ORIGIN 8.0 (2018)

Figura 36 - Curvas DSC das emulsões à base de óleo de mamona (5%)



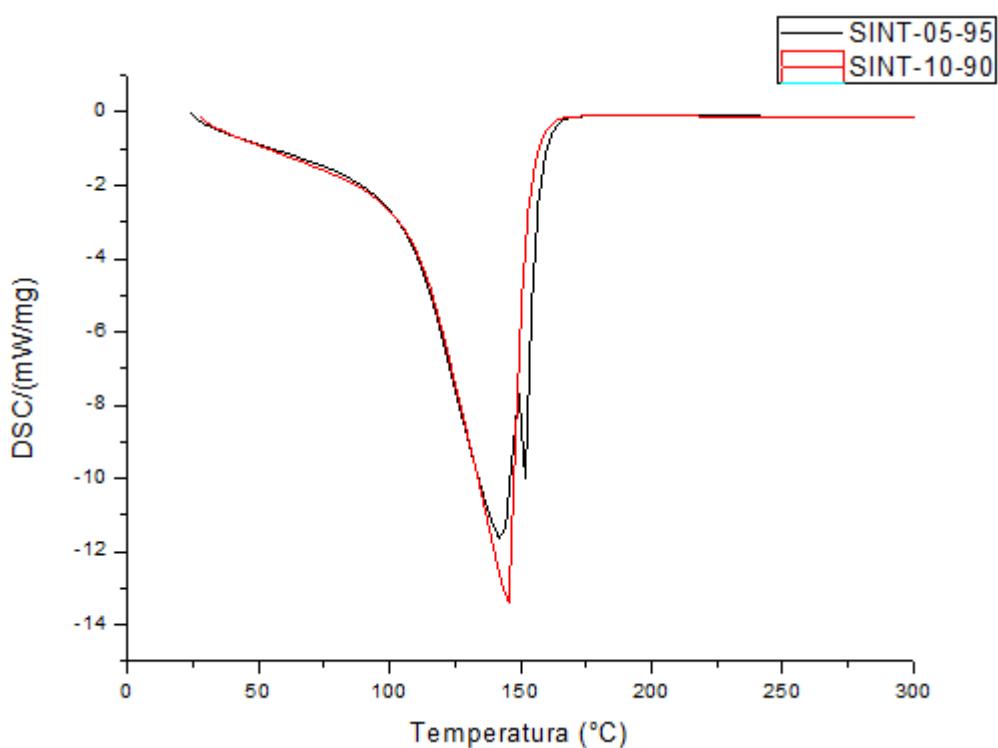
FONTE: AUTORIA PRÓPRIA UTILIZANDO O SOFTWARE ORIGIN 8.0 (2018)

Figura 37 - Curvas DSC das emulsões à base de óleo de mamona (10%)



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA UTILIZANDO O SOFTWARE ORIGIN 8.0 (2018)

Figura 38 - Curvas DSC das emulsões à base de óleo sintético (5% e 10%)



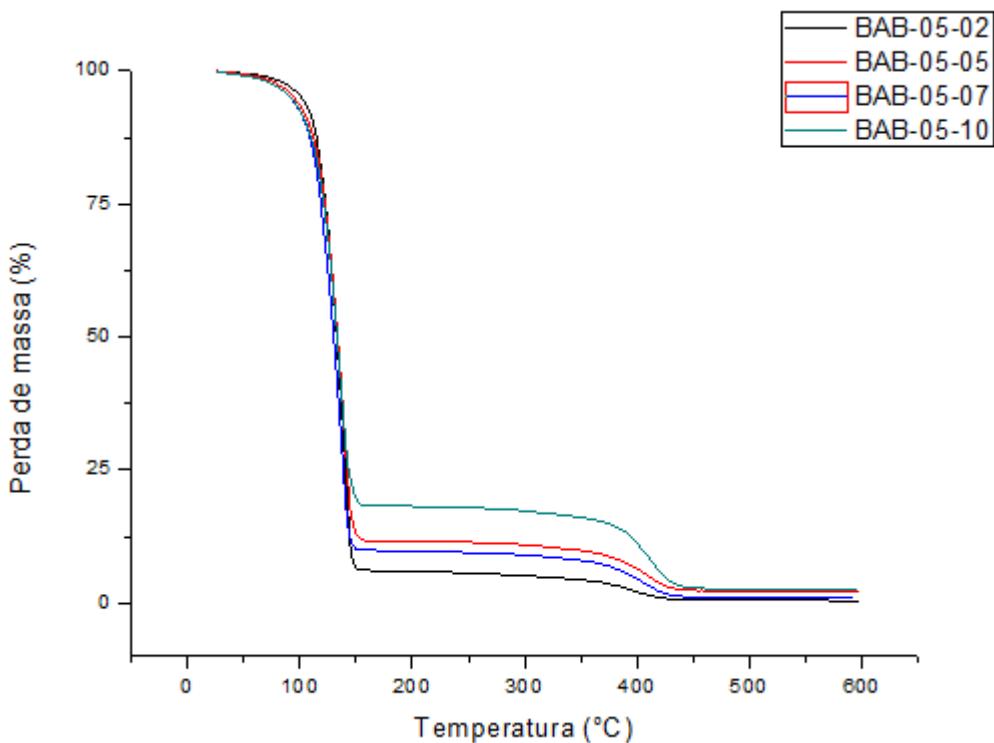
FONTE: AUTORIA PRÓPRIA UTILIZANDO O SOFTWARE ORIGIN 8.0 (2018)

Então, a partir do estudo oxidativo pela técnica de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) para as amostras experimentais de emulsões vegetais e sintéticas, verifica-se a existência de um comportamento similar para todas as amostras desenvolvidas. De acordo com os estudos de Tan e Che (2002) e Gbogouri et al. (2012), através desta técnica torna-se possível estabelecer quantitativamente as diferenças e semelhanças nos óleos vegetais.

4.9 Análise de Termogravimetria (TG)

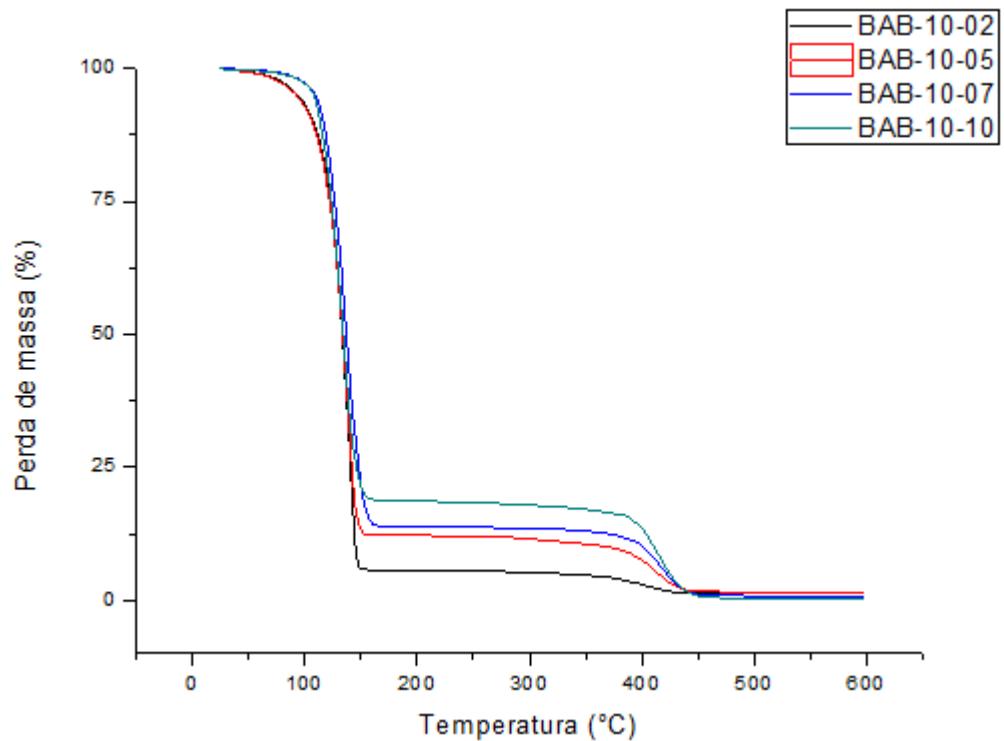
As análises termogravimétricas (TG/DTG) das amostras foram efetuadas com o objetivo de selecionar e investigar o comportamento oxidativo das formulações desenvolvidas. De forma geral, observa-se o mesmo comportamento nas amostras à base de óleo vegetal e à base de óleo sintético, conforme as figuras 39, 40, 41, 42 e 43:

Figura 39 - Perfis termogravimétricos das emulsões de óleo de babaçu (5%)



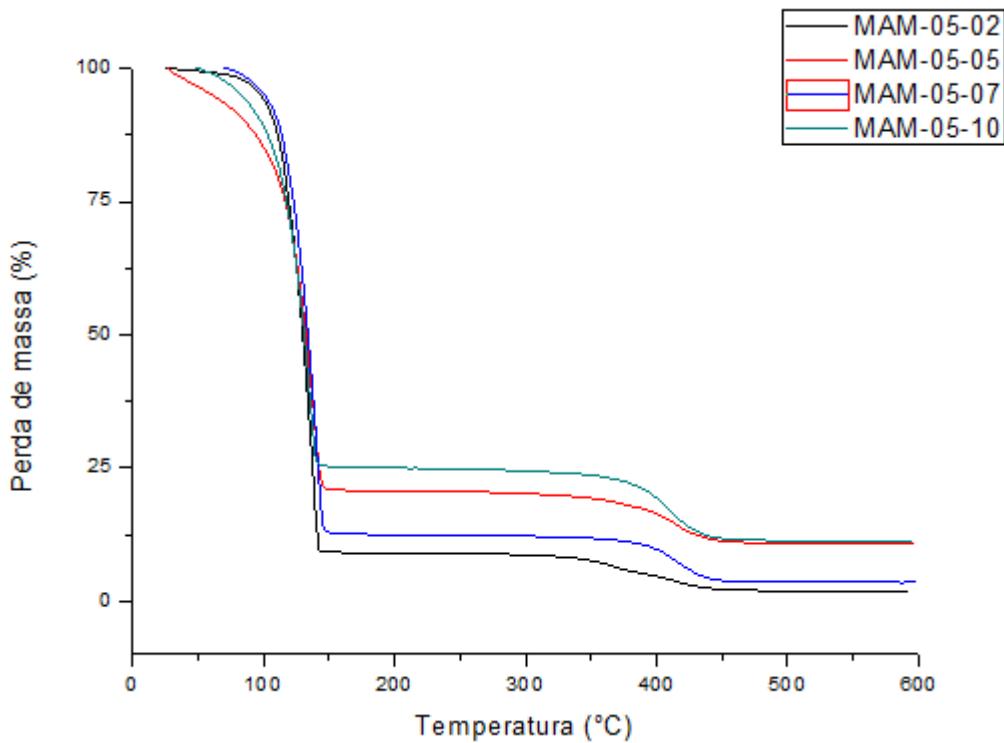
FONTE: AUTORIA PRÓPRIA UTILIZANDO O SOFTWARE ORIGIN 8.0 (2018)

Figura 40 - Perfis termogravimétricos das emulsões de óleo de babaçu (10%)



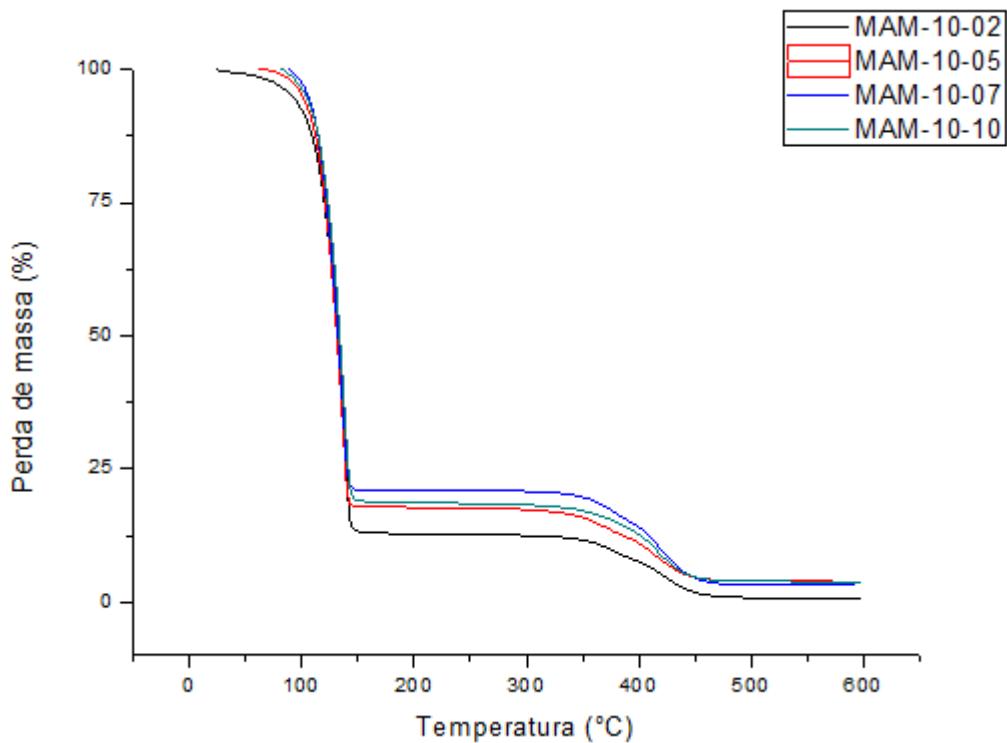
FONTE: AUTORIA PRÓPRIA UTILIZANDO O SOFTWARE ORIGIN 8.0 (2018)

Figura 41 - Perfis termogravimétricos das emulsões de óleo de mamona (5%)



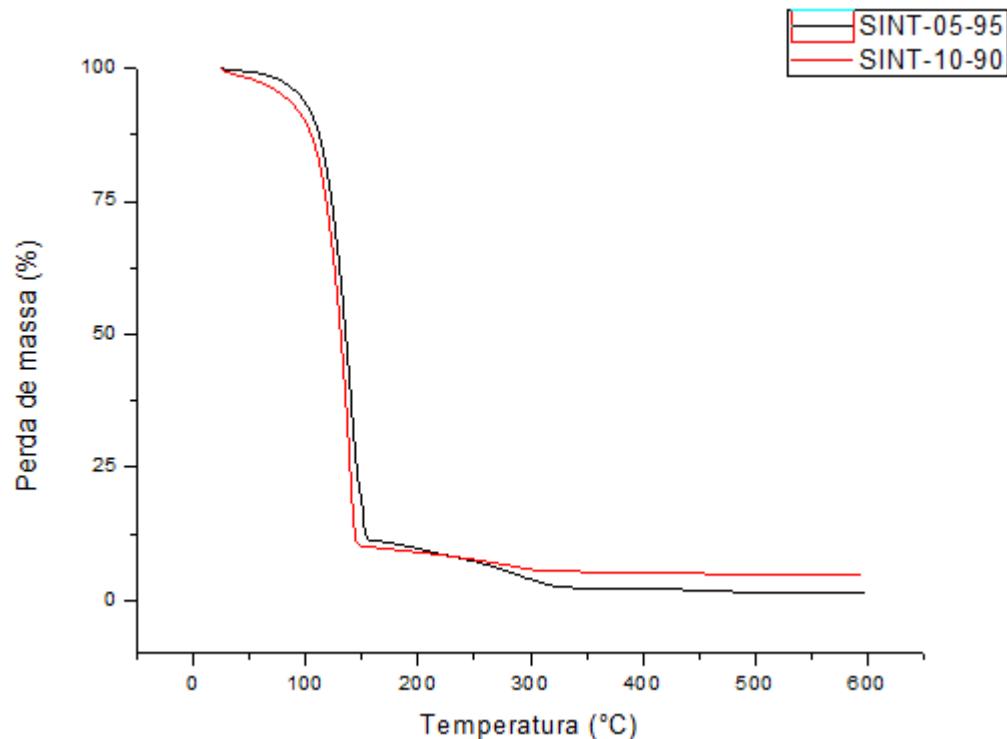
FONTE: AUTORIA PRÓPRIA UTILIZANDO O SOFTWARE ORIGIN 8.0 (2018)

Figura 42 - Perfis termogravimétricos das emulsões de óleo de mamona (10%)



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA UTILIZANDO O SOFTWARE ORIGIN 8.0 (2018)

Figura 43 - Perfis termogravimétricos das emulsões de óleo sintético (5% e 10%)



FONTE: AUTORIA PRÓPRIA UTILIZANDO O SOFTWARE ORIGIN 8.0 (2018)

A tabela 9 faz referência as etapas e os resultados de perda de massa notadas a partir das curvas termogravimétricas:

Tabela 9 - Perda de massa das principais formulações experimentais

Formulação	Evento	Temperatura (°C)	Perda de massa (%)
BAB-05-02	1	25°C – 150°C	20,3%
	2	151°C – 420°C	5,6 %
MAM-05-02	1	25°C – 150°C	30,5 %
	2	151°C – 420°C	4,7 %
SINT-05-95	1	25°C – 130°C	32,7 %
	2	131°C – 350°C	7,5 %
BAB-10-02	1	25°C – 150°C	25,9 %
	2	151°C – 420°C	8,6 %
MAM-10-02	1	25°C – 150°C	33,7 %
	2	151°C – 420°C	7,6 %
SINT-10-90	1	25°C – 130°C	37,2%
	2	131°C – 320°C	5,8 %

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

Verifica-se que nas amostras experimentais à base de óleos vegetais (babaçu e mamona) e à base de óleo sintético, há dois estágios de degradação térmica, sendo que na primeira etapa perde-se mais massa em relação à segunda etapa. Também, nas amostras de óleo sintético houve uma menor temperatura de início do processo de degradação (aproximadamente 150°C), além de maior perda de massa em peso na etapa 1. Dentre as amostras de óleo vegetal, a temperatura de início de degradação foi praticamente a mesma (cerca de 360°C), todavia, verificou-se uma maior perda de massa no estágio 1 da formulação à base de óleo de mamona com 5% e 10% de teor de óleo. As análises de natureza térmica não mostraram diferenças significativas. A tabela 10 faz referência as melhores formulações segundo cada parâmetro:

Tabela 10 - Melhores formulações

Formulação	Viscosidade	pH	Molhabilidade
Vegetal (babaçu)	BAB-10-02	Desempenho pior	BAB-05-05
Vegetal (mamona)	MAM-05-02	Desempenho pior	MAM-05-10
Sintética	Desempenho pior	Emulsão 33	Desempenho pior

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

5 CONCLUSÕES

Neste capítulo, apresenta-se a conclusão com base nos resultados obtidos nas etapas das caracterizações das propriedades físico-químicas. Em seguida, apresentam-se as sugestões para trabalhos futuros envolvendo a linha de pesquisa e as referências bibliográficas.

A partir dos ensaios de caracterização das propriedades físico-químicas, observou-se:

Na usinagem, a análise de viscosidade é fundamental para a seleção de um dado fluido de corte. Neste aspecto, foi constatado que os valores para a viscosidade diminuem conforme o aumento da temperatura. Verificou-se neste aspecto que as emulsões sintéticas apresentaram a menor viscosidade no cenário geral. Mas, a emulsão MAM-05-02 ainda obteve um resultado melhor. Não há uma variação significativa dos valores.

O pH também é um fator essencial na aplicação dos fluidos de corte. Em todas as formulações experimentais, não se utilizou nenhum aditivo. Neste contexto, houve um normal decréscimo nos valores de pH com o tempo, e as emulsões SINT-05-95 e SINT-10-90 tiveram os resultados mais expressivos. A implementação das emulsões vegetais é permitida, com uma atenção ao controle bacteriano. Deste modo, as emulsões BAB-05-10 e MAM-05-05 foram as melhores condições de pH dentre as formulações vegetais.

Em termos da molhabilidade (avaliada pela medição dos ângulos de contato), foi possível constatar que certas formulações vegetais foram mais molhantes, se comparada às emulsões sintéticas. Neste quesito, observou-se que as emulsões BAB-05-05 e MAM-05-10 tiveram os menores resultados dos ângulos de contato, o que é algo muito positivo, pois estes resultados significam uma capacidade satisfatória de refrigeração.

No tocante às análises de FTIR, observou-se o mesmo comportamento para as formulações desenvolvidas, onde todos os espectros apresentaram um pico mais forte em cerca de 3000 cm^{-1} e 2500 cm^{-1} . Não houve variação nesses picos.

Em relação ao comportamento termoxidativo, os quais se investigaram através das análises de TG, DTG e DSC, percebe-se um comportamento muito parecido entre as amostras de emulsões vegetais (babaçu e mamona) e sintéticas. Porém, as emulsões à base de óleo de babaçu (5% e 10%) tiveram uma menor perda de massa e uma maior temperatura para o início de degradação. Torna-se relevante afirmar que a variação dos resultados não foi significativa.

Por meio dos resultados acima, pode-se concluir que os óleos vegetais são potenciais às aplicações de fluidos de corte em usinagem, e desta forma, pode-se contribuir com a fabricação sustentável nas indústrias.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como algumas sugestões para trabalhos futuros, sugere-se alguns itens que envolvem a mesma linha de pesquisa, e que podem complementar o trabalho atual.

Algumas sugestões são:

- Utilização de teores diferentes de óleos vegetais e sintéticos;
- Desenvolvimento de tensoativos biodegradáveis;
- Aplicação de outros tipos de óleos vegetais;
- Utilizar aditivos na composição das emulsões;
- Verificar a sua influência dos aditivos no comportamento das emulsões;
- Aplicação das emulsões desenvolvidas nas operações práticas de usinagem.

REFERÊNCIAS

- AGGARWAL, A. et al. Optimization of multiple quality characteristics for CNC turning under cryogenic cutting environment using desirability function. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 205, p. 42-50, 2008.
- AKHIL, C. S. et al. Measurement of Cutting Temperature during Machining. **Journal of Mechanical and Civil Engineering**, v. 13, p. 108-122, 2016.
- ALMEIDA, D. O. et al. Influência da utilização de fluido de corte de base vegetal nas forças de usinagem do torneamento do aço ABNT 1050 e estudo do crescimento de microorganismos. **6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, p. 1-7, 2011.
- ALUYOR, E. O.; KESSINGTON, O. O.; MUDIAKEOGHENE. Biodegradation of vegetable oils: a review. **Scientific Research and Essay**, v. 4, n. 6, p. 543-548, 2009.
- BELINATO, G. **Estudo da oxidação dos óleos de soja e dendê aditivado com antioxidantes, para uso em tratamento térmico em têmpera**. 2010. 160f. Dissertação (Mestrado), Instituto de Química e Física de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
- BELLUCO, W.; DE CHIFFRE, L. Performance evaluation of vegetable-based oils in drilling austenitic stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 148, n. 2, p. 171-176, 2004.
- BENEDICTO, E.; CAROU, D.; RUBIO, E. M. Technical, Economic and Environmental Review of the Lubrication/Cooling Systems used in Machining Processes. **Procedia Engineering**, v. 184, p. 99-116, 2017.
- BRINKSMEIER, E. et al. Metalworking fluids - Mechanisms and performance. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 54, n. 2, p. 605-628, 2015.
- CANEVAROLO, S. V. J. **Técnicas de caracterização de polímeros**. 1.ed. São Paulo: Artliber, 2007. 448p.
- CARACIOLLO, A. F. **Óleo de catolé: determinação do EHL, ação promotora de absorção de fármacos e efeito hidratante na pele humana**. 2016. 89f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

- CETIN, M. H. et al. Evaluation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure and cutting parameters in turning of AISI 304L by Taguchi method. **Journal Of Cleaner Production**, v. 19, n. 17-18, p.2049-2056, 2011.
- CHAUDHURI, R. G.; SANTANU, P. The Wettability of PTFE and glass surfaces by nanofluids. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 434, p. 141-151, 2014.
- CHETAN; GHOSH, S.; RAO, P. V. Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: a review. **Journal Of Cleaner Production**, v. 100, p.17-34, 2015.
- CODEX ALIMENTARIUS COMMISSION. **Codex Standards for Named Vegetable Oils, CODEX-STAN 210-1999**: Food and Agriculture Organization of the United States Nations World Health Organization (FAO /WHO): 2009.
- COMMITTEE, A. I. H., **Metal Handbook**. 6^a Edição (Cap. 27). p. 14-16, 1991.
- COUTINHO, D. J. G. et al. Biodiesel potential of the seed oils from some Brazilian native Euphorbiaceae species. **Renewable Energy**, Recife, v. 91, p.275-281, 2016.
- CUVELIER, A.M.; LACOSTE, F.; COURTOIS, F. Application of a DSC model for the evaluation of TPC in thermo-oxidized oils. **Food Control**. v. 28, p. 441-444, 2012.
- DA RÓS, P.C.M. et al. Biodiesel from babassu oil: Characterization of the product obtained by enzymatic route accelerated by microwave irradiation. **Industrial Crops and Products**. v. 52, p. 313-320, 2014.
- DEBNATH, S.; REDDY, M.M.; YI, Q.S. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review. **Journal Of Cleaner Production**, v. 83, p. 33-47, 2014.
- DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 8. ed. São Paulo: Artliber, 2013. 243 p.
- DINIZ, A.E.; MICARONI, R. Influence of the direction and flow rate of the cutting fluid on tool life in turning process of AISI 1045 steel. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, p. 247-254, 2007.
- DOLL, K. M. et al. Antiwear additive derived from soybean oil and boron utilized in a Gear oil formulation. **Industrial and Engineering Chemistry Research**. v. 51, p. 11941-11945, 2012.

DRABIK, J.; TRZOS, M. Improvement of the resistance to oxidation of the ecological greases by the additives. **Journal Therm Anal Calorim.** v. 113, p. 357-363. 2013.

EL BARADIE, M. A. Cutting fluids: part I. characterization. **Journal of Material Processing Technology.** V. 54, p. 786-797. 1996.

FRANGE, R. C. C.; GARCIA, M. T. J. Desenvolvimento de emulsões óleo de oliva/água: avaliação da estabilidade física. **Journal of Basic and Applied Pharmaceutical Sciences**, v. 30, p. 263-271, 2009.

FRANZOL, A.; REZENDE, M. C. Estabilidade de emulsões: um estudo de caso envolvendo emulsionantes aniônico, catiônico e não-iônico. **Polímeros**, v. 25, p. 1-9, 2015.

GBOGORI, G. A et al. Assessment of the thermo-oxidation of three cucurbit seed oils by differential scanning calorimetry. **Innovative Romanian Food Biotechnology**, v. 12, p. 32-39, 2013.

GHERCA, D. et al. Synthesis, characterization and magnetic properties of MFe₂O₄ (M=CO, Mg, Mn, Ni) nanoparticles using ricin oil as capping agent. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 324, p. 3906–3911, 2012.

GONÇALVES, P. S. de C. **Boas práticas ambientais na utilização de fluidos de corte nos processos de usinagem**. 2008. 150f. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia, Bauru, 2008.

GONÇALVES, J. F. S. **Proposição de método de desenvolvimento de fluido de corte de base vegetal**. 2013. 223f. Tese (Doutorado), Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2013.

IGWE, I. O. The effects of temperature on the viscosity of vegetable oils in solution. **Industrial Crops and Products**, n.19, p.185-190, 2004.

JAYAL, A. D. et al. Sustainable manufacturing: Modeling and optimization challenges at the product, process and system levels. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 2, p. 144–152, 2010.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing Engineering and Technology**. 6.ed. Califórnia: Prentice Hall, 2010. 320 p.

KUMAR, B. S.; PADMANABHAN, G.; KRISHNA, P. V. Experimental investigations of vegetable Oil Based Cutting Fluids with Extreme Pressure Additive in Machining of AISI 1040 Steel. **Manufacturing Science and Technology**. v. 3, p. 1-9, 2015.

KUMAR, S. et al. Performance evaluation of vegetable-based lubricants in metal cutting. **Journal of Mechanical Engineering and Biomechanics**, v. 1, p. 33-37, 2016.

KURAM, E. et al. Effects of the cutting fluid types and cutting parameters on surface roughness and thrust force. **Proceedings of the World Congress on Engineering 2010**, v. 2, p. 1-4, 2010.

KURAM, E. et al. Optimization of cutting fluids and cutting parameters during end milling by using D-optimal design of experiments. **Journal of Cleaner Production**, v. 42, p. 159-166, 2013.

KURAM, E.; OZCELIK, B.; DERMIBAS, E. Environmentally Friendly Machining: Vegetable Based Cutting Fluids. **Green Manufacturing Processes and Systems, Materials Forming, Machining and Tribology**, v. 1, p. 1-26, 2013.

LAWAL, S. A.; CHOUDHURY, I. A.; NUKMAN, Y. Application of vegetable oil-based metalworking fluids in machining ferrous metals - A review **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v. 52, p. 1 - 12. 2012.

LIEW, P. J. et al. An overview of current status of cutting fluids and cooling techniques of turning hard steel. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 114, p. 380-394, 2017.

LISBOA, F. C. D.; MORAES, J. J. B. D.; HIRASHITA, M. D. A. Fluidos de corte: uma abordagem geral e novas tendências. **XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção: A Gestão dos Processos de Produção e as Parcerias Globais para o Desenvolvimento Sustentável dos Sistemas Produtivos**, p. 1-16, 2013.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da usinagem dos metais**. 1.ed. São Paulo: Blucher, 2015. 397 p.

MAIA, D. A. S. et al. Fluidos de corte: Novas formulações e recuperabilidade. **4º PDPEIRO, Campinas, SP**, p. 1-10, 2007.

MANNEKOTE, J. K. et al. Environmentally friendly functional fluids from renewable and sustainable sources - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, p. 1-15, 2017.

MELO, M. A. M. F. **Avaliação das propriedades de óleos vegetais visando a produção de biodiesel.** 2010. 118f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Química, João Pessoa, 2010.

MORAIS, H. L. O. de. **Análise da viabilidade e das propriedades físico-químicas de formulações de fluido de corte integral utilizando óleos vegetais e minerais no processo de retificação.** 2014. 137 f. Dissertação (Mestrado), Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

MUNIZ, C. A. S. **Novas formulações de fluido de corte:** otimização, propriedades e recuperação do óleo usado. 2008. 177f. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

NAVARRA, G. et al. Thermal oxidative process in extra-virgin olive oils studied by FTIR, rheology and time-resolved luminescence. **Journal Food Chemistry.** v. 126. p. 1226-1231, 2010.

NUNES, A. A. **Óleo da polpa de macaúba com alta qualidade:** processo de refino e termoestabilidade. 2013. 149f. Dissertação (Mestrado), Universidade Católica Dom Bosco, Campo Grande, 2013.

OJOLO, S.J.; AMUDA, M. O. H; OGUNMOLA, O. Y.; ONONIWU, C. U. Experimental determination of the effect of some straight biological oils on cutting force during cylindrical turning. **Matéria**, v. 13 n. 4, p. 650-663, 2008.

OLIVEIRA, J.F.G.; ALVES, S.M. Adequação ambiental dos processos de usinagem utilizando produção mais limpa como estratégia de gestão ambiental. **Produção**, v. 17, n. 1, p. 129-138, 2006.

OSAMA, M. et al. Recent developments and performance review of metal working fluids. **Tribology International**, v. 114, p. 389–401, 2017.

OZCELIK, B. et al. Experimental investigations of vegetable based cutting fluids with extreme pressure during turning of AISI 304L. **Tribology International**, v. 44, p. 1864-1871, 2011.

PANCHAL, T. M. et al. A methodological review on bio-lubricants from vegetable oil based resources. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 65-70, 2016.

PAUL, S.; PAL, P. K. Study of surface quality during high speed machining using ecofriendly cutting fluid. **International Journal of Machining and Machinability of Materials**, v. 11, p. 24-28, 2011.

POEC, E. A. O poder das palavras. s.l., 2018. Disponível em <http://www.citador.pt/frase/nao-e-na-ciencia-que-esta-a-felicidade-mas-na-aq-edgar-allan-poe-2674> Acesso em: 01/06/2018.

RAMPANZO, V. **Avaliação da degradação térmica de óleos vegetais por termogravimetria, cromatografia gasosa e espectroscopia de infravermelho médio**. 2015. 94f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

RUNGE, P. R. F.; DUARTE, G. N. **Lubrificantes nas indústrias – produção, manutenção e controle**. Cotia, Tribocconcept Edições Técnicas, 1990. 323p.

SANTOS, D. S. et al. Extraction and Evaluation of Fatty Acid Composition of *Orbignya phalerata Martius* Oils (Arecaceae) form Maranhão State, Brazil. **J. Braz. Chem. Soc.**, v. 24, p. 355-362, 2013.

SHASHIDHARA, Y. M.; JAYARAM, S. R. Vegetable oils as a potential cutting fluid - an evolution, **Tribology International**, v. 43 p. 1073-1081. 2010.

SHAW, D. J. **Introdução à química de coloides e superfícies**. 1.ed. São Paulo: Blucher. 1975.

SHOKRANI, A.; DHOKIA, V.; NEWMAN, S. T. Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 57, p. 83–101, 2012.

SILVA, S. I. da et al. Seed oils of Euphorbiaceae from the Caatinga, a Brazilian tropical dry forest. **Biomass and Bioenergy**, v. 69, p.124-134, 2014.

SILVERSTEIN, R. M.; BASSLER, G. C.; MORRILL, T. C. **Identificação espectrométrica de compostos orgânicos**. 5.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2007. 490p.

SODAVADIA, K. P.; MAKWANA, A. H. Experimental Investigation on the Performance of Coconut oil Based Nano fluid as lubricants during turning of AISI 304 austenitic stainless steel. **International Journal of Advanced Mechanical Engineering**, v. 4, n. 1, 2014.

SOKOVIC, M.; MIJANOVIC, K. Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes. **Journal of Materials Processing Technology**, p. 181-189. 2001.

SOUZA, J. R. de. **Desenvolvimento de compósitos tribologicamente eficazes**. 2015. 192f. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

SRIKANT, R. R.; RAO, P. N. Use of Vegetable-Based Cutting Fluids for Sustainable Machining. **Sustainable Machining, Materials Forming, Machining and Tribology**, 2017. 1-17.

TAN, C. P.; CHE, M. Y. B. Recent developments in differential scanning calorimetry for assessing oxidative deterioration of vegetable oils. **Trends in Food Science and Technology**. V. 13, p. 312-318, 2002.

TOMAS, G. L. et al. Produção do girassol e teor de óleo nos aquêniros em função da temperatura do ar, precipitação pluvial e radiação solar. **Ciência Rural**, p. 1380-1385, 2012.

TRAJANO, M. F. **Síntese de nanopartículas por sputtering em biolubrificantes para aplicações em turbinas eólicas**. 2017. 131F. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4.ed. Boston: Butterworth Heinemann, 2000. 464p.

VINHAL, J. O. et al. Analytical pyrolysis of the kernel and oil of babaçu palm (*Orbignya phalerata*). **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. V. 107, p. 73-81, 2014.

XAVIOR, M. A.; ADITHAN, M. Determining the influence of cutting fluids on tool wear and surface roughness during turning of AISI 304 austenitic stainless steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, p. 900-909, 2009.

ZHANG, J. Z.; RAO, P. N.; ECKMAN, M. Experimental evaluation of a bio-based cutting fluid using multiple machining characteristics. **International Journal of Modern Engineering**, v. 12, n. 2, p. 35-44, 2012.

APÊNDICES

APÊNDICE A – PERFIL DE ÁCIDOS GRAXOS

Tabela 11 – Análise experimental das formulações à base de óleo de babaçu

Ácido graxo	Leitura 1	Leitura 2	Leitura 3	(Média ± DP)
C 8:0 (Caprílico)	4,72 %	4,61 %	4,70 %	4,68 % ± 0,05
C 10:0 (Cáprico)	4,52 %	4,46 %	4,54 %	4,51 % ± 0,04
C 12:0 (Láurico)	43,19 %	42,46 %	42,58 %	42,74 % ± 0,39
C 14:0 (Mirístico)	16,76 %	16,51 %	16,53 %	16,60 % ± 0,14
C 16:0 (Palmítico)	9,43 %	9,45 %	9,45 %	9,44 % ± 0,01
C 18:0 (Esteárico)	3,68 %	3,69 %	3,73 %	3,70 % ± 0,03
C 18:1 (Oléico)	15,13 %	15,56 %	15,65 %	15,45 % ± 0,27
C 18:2 (Linoléico)	2,57 %	3,27 %	2,81 %	2,88 % ± 0,36

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

Tabela 12 – Análise da literatura técnica das formulações à base de óleo de babaçu

Ácido graxo	Nomenclatura	Composição (%)
C 8:0	Ácido caprílico	2,6 – 7,3
C 10:0	Ácido cáprico	1,2 – 7,6
C 12:0	Ácido láurico	40,0 – 55,0
C 14:0	Ácido mirístico	11,0 – 27,0
C 16:0	Ácido palmítico	5,2 – 11,0
C 18:0	Ácido esteárico	1,8 – 7,4
C 18:1	Ácido oléico	9,0 – 20,0
C 18:2	Ácido linoléico	1,4 – 6,6

FONTE: CODEX-STAN (2009)

Tabela 13 – Análise experimental das formulações à base de óleo de mamona

Ácido graxo	Leitura 1	Leitura 2	Leitura 3	(Média ± DP)
C 16:0 (Palmítico)	3,49 %	4,10 %	3,82 %	3,80 % ± 0,31
C 18:0 (Esteárico)	2,26 %	2,51 %	2,44 %	2,40 % ± 0,13
C 18:1 (Oléico)	11,85 %	14,36 %	14,05 %	13,42 % ± 1,37
C 18:2 (Linoléico)	13,67 %	16,92 %	15,96 %	15,51 % ± 1,67
C 18:3 (Linolênico)	1,66 %	2,43 %	1,79 %	1,96 % ± 0,41
(Ricinoleico)	65,61 %	58,05 %	60,35 %	61,34 % ± 3,87
C 20:1 (Eicosenoíco)	1,47 %	1,43 %	1,60 %	1,57 % ± 0,09

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

Tabela 14 – Análise da literatura técnica das formulações à base de óleo de babaçu

Ácido graxo	Nomenclatura	Composição (%)
C 16:0	Ácido palmítico	3,71%
C 18:0	Ácido esteárico	2,31%
C 18:1	Ácido oléico	12,60%
C 18:2	Ácido linoléico	14,40%
C 18:3	Ácido linolênico	2,05%
	Ácido ricinoleico	63,27%
C 20:1	Ácido eicosénico	1,65%

FONTE: CODEX-STAN (2009)

APÊNDICE B – VISCOSIDADE DAS FORMULAÇÕES

Tabela 15 – Análise das formulações experimentais à base de óleo de babaçu

Formulação	Viscosidade (cSt) à 25°C	Viscosidade (cSt) à 40°C
Óleo de babaçu (puro)	$53,4750 \pm 0,0010^{*DP}$	$29,3877 \pm 0,0020^{*DP}$
BAB-05-02	$1,3291 \pm 0,0024^{*DP}$	$1,1258 \pm 0,0035^{*DP}$
BAB-05-05	$1,4675 \pm 0,0087^{*DP}$	$1,1209 \pm 0,0005^{*DP}$
BAB-05-07	$1,5145 \pm 0,0018^{*DP}$	$1,1565 \pm 0,0035^{*DP}$
BAB-05-10	$2,3052 \pm 0,0036^{*DP}$	$1,6567 \pm 0,0041^{*DP}$
BAB-10-02	$1,1158 \pm 0,0007^{*DP}$	$0,8512 \pm 0,0026^{*DP}$
BAB-10-05	$1,6433 \pm 0,0007^{*DP}$	$1,1737 \pm 0,0054^{*DP}$
BAB-10-07	$1,8727 \pm 0,0065^{*DP}$	$1,4071 \pm 0,0044^{*DP}$
BAB-10-10	$2,5622 \pm 0,0048^{*DP}$	$1,8108 \pm 0,0093^{*DP}$

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

Tabela 16 – Análise das formulações experimentais à base de óleo de mamona

Formulação	Viscosidade (cSt) à 25°C	Viscosidade (cSt) à 40°C
Óleo de mamona (puro)	$661,2135 \pm 0,0087^{*DP}$	$234,2867 \pm 0,0025^{*DP}$
MAM-05-02	$1,0984 \pm 0,0022^{*DP}$	$0,8305 \pm 0,0026^{*DP}$
MAM-05-05	$1,4681 \pm 0,0028^{*DP}$	$1,2596 \pm 0,0015^{*DP}$
MAM-05-07	$1,4979 \pm 0,0020^{*DP}$	$1,0851 \pm 0,0016^{*DP}$
MAM-05-10	$2,0641 \pm 0,0031^{*DP}$	$1,5287 \pm 0,0030^{*DP}$
MAM-10-02	$1,3685 \pm 0,0017^{*DP}$	$1,4751 \pm 0,0070^{*DP}$
MAM-10-05	$1,4365 \pm 0,0007^{*DP}$	$1,1837 \pm 0,0045^{*DP}$
MAM-10-07	$1,6402 \pm 0,0010^{*DP}$	$1,2766 \pm 0,0055^{*DP}$
MAM-10-10	$1,9521 \pm 0,0031^{*DP}$	$1,3257 \pm 0,0012^{*DP}$

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

Tabela 17 – Análise das formulações experimentais à base de óleo sintético

Formulação	Viscosidade (cSt) à 25°C	Viscosidade (cSt) à 40°C
SINT-05-95	$1,1277 \pm 0,0002^{*DP}$	$0,8576 \pm 0,0010^{*DP}$
SINT-10-90	$1,4501 \pm 0,0018^{*DP}$	$1,1025 \pm 0,0015^{*DP}$

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

APÊNDICE C – pH DAS FORMULAÇÕES

Tabela 18 – Análise de pH das formulações experimentais à base de óleo de babaçu

Formulação	Após 7 dias	Após 15 dias	Após 30 dias
Óleo de babaçu (puro)	5,23 ± 0,02 *DP	5,19 ± 0,02 *DP	5,04 ± 0,02 *DP
BAB-05-02	5,78 ± 0,03 *DP	5,62 ± 0,03 *DP	5,51 ± 0,03 *DP
BAB-05-05	5,22 ± 0,04 *DP	5,18 ± 0,04 *DP	5,02 ± 0,04 *DP
BAB-05-07	6,37 ± 0,02 *DP	6,15 ± 0,02 *DP	6,03 ± 0,02 *DP
BAB-05-10	6,67 ± 0,01 *DP	6,61 ± 0,01 *DP	6,53 ± 0,01 *DP
BAB-10-02	5,82 ± 0,01 *DP	5,72 ± 0,01 *DP	5,54 ± 0,01 *DP
BAB-10-05	6,63 ± 0,02 *DP	6,44 ± 0,02 *DP	6,34 ± 0,02 *DP
BAB-10-07	6,75 ± 0,02 *DP	6,69 ± 0,02 *DP	6,57 ± 0,02 *DP
BAB-10-10	6,57 ± 0,01 *DP	6,51 ± 0,01 *DP	6,48 ± 0,01 *DP

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

Tabela 19 – Análise de pH das formulações experimentais à base de óleo de mamona

Formulação	Após 7 dias	Após 15 dias	Após 30 dias
Óleo de mamona (puro)	5,34 ± 0,01 *DP	5,25 ± 0,01 *DP	5,18 ± 0,01 *DP
MAM-05-02	5,51 ± 0,01 *DP	5,48 ± 0,01 *DP	5,36 ± 0,01 *DP
MAM-05-05	6,14 ± 0,03 *DP	6,09 ± 0,03 *DP	6,02 ± 0,03 *DP
MAM-05-07	5,69 ± 0,02 *DP	5,63 ± 0,02 *DP	5,58 ± 0,02 *DP
MAM-05-10	6,45 ± 0,02 *DP	6,42 ± 0,02 *DP	6,35 ± 0,02 *DP
MAM-10-02	5,47 ± 0,01 *DP	5,42 ± 0,01 *DP	5,34 ± 0,01 *DP
MAM-10-05	6,42 ± 0,02 *DP	6,38 ± 0,02 *DP	6,35 ± 0,02 *DP
MAM-10-07	6,33 ± 0,03 *DP	6,28 ± 0,03 *DP	6,23 ± 0,03 *DP
MAM-10-10	6,64 ± 0,01 *DP	6,60 ± 0,01 *DP	6,54 ± 0,01 *DP

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

Tabela 20 – Análise de pH das formulações experimentais à base de óleo sintético

Formulação	Após 7 dias	Após 15 dias	Após 30 dias
SINT-05-95	9,24 ± 0,02 *DP	9,18 ± 0,02 *DP	9,13 ± 0,02 *DP
SINT-10-90	9,31 ± 0,01 *DP	9,19 ± 0,01 *DP	9,08 ± 0,01 *DP

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

APÊNDICE D – ÂNGULO DE CONTATO DAS FORMULAÇÕES

Tabela 21 – Análise de ângulo de contato das formulações experimentais à base de óleo de babaçu

Formulação	Ângulo de contato
Óleo de babaçu (puro)	$27,31^\circ \pm 0,02^{\text{DP}}$
BAB-05-02	$49,37^\circ \pm 0,02^{\text{DP}}$
BAB-05-05	$32,68^\circ \pm 0,04^{\text{DP}}$
BAB-05-07	$40,27^\circ \pm 0,01^{\text{DP}}$
BAB-05-10	$39,63^\circ \pm 0,01^{\text{DP}}$
BAB-10-02	$47,04^\circ \pm 0,01^{\text{DP}}$
BAB-10-05	$46,78^\circ \pm 0,03^{\text{DP}}$
BAB-10-07	$58,39^\circ \pm 0,04^{\text{DP}}$
BAB-10-10	$47,06^\circ \pm 0,02^{\text{DP}}$

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

Tabela 22 – Análise de ângulo de contato das formulações experimentais à base de óleo de mamona

Formulação	Ângulo de contato
Óleo de mamona (puro)	$32,67^\circ \pm 0,01^{\text{DP}}$
MAM-05-02	$45,36^\circ \pm 0,05^{\text{DP}}$
MAM-05-05	$42,67^\circ \pm 0,01^{\text{DP}}$
MAM-05-07	$40,33^\circ \pm 0,01^{\text{DP}}$
MAM-05-10	$36,67^\circ \pm 0,01^{\text{DP}}$
MAM-10-02	$46,67^\circ \pm 0,01^{\text{DP}}$
MAM-10-05	$37,06^\circ \pm 0,02^{\text{DP}}$
MAM-10-07	$43,33^\circ \pm 0,03^{\text{DP}}$
MAM-10-10	$57,33^\circ \pm 0,02^{\text{DP}}$

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)

Tabela 23 – Análise de ângulo de contato das formulações experimentais à base de óleo sintético

Formulação	Ângulo de contato
SINT-05-95	$49,15^\circ \pm 0,01^{\text{DP}}$
SINT-10-90	$49,05^\circ \pm 0,01^{\text{DP}}$

FONTE: AUTORIA PRÓPRIA (2018)