

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

JÔNATAS MARTINELLI VISCAINO

**Óleos vegetais como fluidos de têmpera: curvas de resfriamento,
remolhamento e propriedades de transferência de calor**

**São Carlos
2019**

JÔNATAS MARTINELLI VISCAINO

**Óleos vegetais como fluidos de têmpera: curvas de resfriamento,
remolhamento e propriedades de transferência de calor**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Materiais e Manufatura da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Materiais e Manufatura.

Orientadora: Profa. Dra. Lauralice de Campos Franceschini Canale

Co-orientadora: Dra. Rosa Lucia Simencio Otero

**São Carlos
2019**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

Martinelli Viscaino, Jônatas

Óleos vegetais como fluidos de têmpera: curvas de
resfriamento, remolhamento e propriedades de
transferência de calor / Jônatas Martinelli Viscaino;
orientadora Lauralice de Campos Franceschini Canale;
coorientador Rosa Lucia Simencio Otero. São Carlos,
2019.

Monografia (Graduação em Engenharia de Materiais
e Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, 2019.

1. Têmpera. 2. Óleos Vegetais. 3. Curvas de
resfriamento. 4. Remolhamento. 5. Fluxo de Calor. I.
Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: JÔNATAS MARTINELLI VISCAINO
Título do TCC: Óleos vegetais como fluidos de têmpera: curvas de resfriamento, remolhamento e propriedades de transferência de calor
Data de defesa: 11/11/2019

Comissão Julgadora	Resultado
Professor Titular Laturalice de Campos Franceschini Canale (orientador)	APROVADO
Institui�o: EESC - SMM	
Professor Doutor Rosa Lucia Simencio Otero	APROVADO
Institui�o: IQSC - Departamento de Química e Física Molecular	
Professor Doutor Rosamel Melita Mu�oz	APROVADO
Institui�o: Fatec-Franca - Fatec-Franca	

Presidente da Banca: **Professor Titular Laturalice de Campos Franceschini Canale**



(assinatura)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha família, minha mãe, Rose Marie R. M. Viscaino, meu pai, Antonio Marin Viscaino e meu irmão, Patrick Martinelli Viscaino pelo apoio incondicional durante toda minha graduação e o amor que me dedicaram durante toda sua vida.

À Prof. Dra. Luralice de Campos Franceschini Canale, por me apresentar e acreditar em mim para desenvolver este projeto junto com seus colegas pesquisadores, pelas suas incríveis classes em sala de aula e seus auxílios durante a realização deste projeto.

À Dra. Rosa Lucia Simencio Otero, por me acompanhar em toda minha jornada durante a realização da iniciação científica, pela orientação deste trabalho e por além de ser uma professora e uma orientadora, uma conselheira que se preocupa com seus alunos.

Aos meu colegas e amigos de classes, Vinicius Ballista Galetti, Jacqueline Pereira Rocha e Vitória Monteiro Dias que me acompanharam durante toda a minha graduação e me apoiaram quando eu necessitava.

À minha namorada, Angie Julieth Duarte Cuellar, por sua ajuda e paciência quando eu precisava.

E por fim, à Universidade de São Paulo e ao Departamento de Materiais, pelos seus recursos disponibilizados e todos seus funcionários que me ajudaram no desenvolvimento do meu aprendizado.

RESUMO

Os óleos vegetais têm sido utilizados como base de formulações para fluidos de têmpera, pois são biodegradáveis e provenientes de fontes renováveis. Entretanto, existem poucas referências quanto à equivalência do desempenho destes óleos no tratamento térmico de têmpera, em comparação aos fluidos derivados do petróleo. Para um melhor entendimento do comportamento dos diversos óleos vegetais empregados como fluidos de resfriamento, no presente trabalho foram obtidas as curvas de resfriamento, bem como, foram determinadas as propriedades de remolhamento de alguns óleos vegetais que apresentam interesse comercial. As propriedades de fluxo de calor superficial também foram calculadas. Os óleos vegetais estudados foram canola, coco, milho, algodão, dendê, amendoim, soja e girassol. As curvas de resfriamento foram obtidas utilizando a sonda cilíndrica de Inconel 600 do tipo Tensi de múltiplos termopares em sua superfície com diâmetro de 15 mm e comprimento de 45 mm. Para efeito de comparação, o mesmo estudo foi realizado em amostras de fluidos de resfriamento disponíveis no mercado. Foram eles: Houghto-Quench H100, um óleo de têmpera convencional (lento), e o Houghto-Quench HKM, um óleo de têmpera acelerado (rápido). Neste trabalho, concluiu-se que os óleos vegetais apresentam maior viscosidade que os óleos minerais e os mesmos apresentam alto índice VI. Os óleos vegetais apresentaram evidências mínimas da camada de vapor. O óleo mineral rápido (HKM) exibiu um Q_{\max} significativamente maior do que qualquer outro óleo (vegetal ou do óleo convencional -H100). O óleo de canola apresentou o menor Q_{\max} , e o óleo de amendoim e o óleo convencional (H100) apresentaram valores comparáveis de Q_{\max} . Os demais óleos vegetais exibiram valores de Q_{\max} intermediários aos óleos minerais. A respeito da habilidade potencial de resfriamento dos óleos vegetais para promover um controle de distorção e minimização de trincas, os dados das curvas de resfriamentos sugerem que os óleos de coco, algodão e amendoim forneceria os melhores resultados, embora todos os óleos vegetais avaliados forneçam resultados superiores ao óleo rápido mineral (HKM).

Palavras-chave: Têmpera. Óleos Vegetais. Curvas de resfriamento. Remolhamento. Fluxo de Calor.

ABSTRACT

Vegetable oils are currently used for biodegradable and renewable base stocks for quenchant formulation. However, there are relatively few references relating to their true equivalency, or lack thereof, comparative to the quenching performance of petroleum oil-based quenchant formulations. To obtain an overview of the variability vegetable oil quenching performance, the cooling curves and rewetting properties were determined, and the surface heat flux properties were calculated. The vegetable oils that were studied included canola, coconut, corn, cottonseed, palm, peanut, soybean, and sunflower oils. Cooling curves were obtained using the Tensi multiple-surface thermocouple 15 mm diameter by 45 mm cylindrical Inconel 600 probe. For comparison, similar data was obtained with Houghto-Quench H100, a conventional (slow) petroleum quenchant oil, and Houghto-Quench HKM, an accelerated (fast) petroleum oil quenchant. In this work, it was concluded that vegetable oils have higher viscosity than petroleum oils and they have a high VI index. Vegetable oils showed minimal evidence of the film boiling. The maximum heat flux (Q_{\max}) values were determined for the vegetable oils and petroleum oil quenchants studied. The data obtained in this study showed that the fast petroleum oil exhibited a significantly greater Q_{\max} than any of the other oils, vegetable oils or the conventional petroleum oil. Canola oil showed the lowest Q_{\max} , and peanut oil and conventional petroleum oil exhibited equivalent Q_{\max} values. The other vegetable oils exhibited Q_{\max} values intermediate between the fast and conventional petroleum quenchants. With respect to the ability of vegetable oil quenchants to provide distortion control potential and cracking minimization, the cooling curve data obtained suggest that coconut, cottonseed, and peanut oils would provide the best results, although all vegetable oils evaluated would provide results superior to the fast petroleum quenching oil.

Keywords: Quenchant. Vegetable oils. Cooling curves. Rewetting. Heat flux.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de equilíbrio Fe-C até 7% de carbono.....	23
Figura 2 – Diagrama de transformação de aço eutetoide com as curvas de resfriamento para vários fluidos usados em têmpera.	24
Figura 3 – Mecanismos de resfriamento durante o processo de têmpera.	25
Figura 4 – Processo de resfriamento mostrando a transição entre os estágios de transferência de calor.	26
Figura 5 – Demonstração de três fases de resfriamento (esq.) e a mudança no coeficiente de transferência de calor alfa, ao longo da superfície da sonda durante a têmpera (dir.).	27
Figura 6 – Comparação entre o ângulo de contato e a molhabilidade.....	28
Figura 7 – Variação do coeficiente de transferência de calor ao redor da barra para fluxo transversal sem agitação (a) e com agitação de 79 m/min (b).....	29
Figura 8 – Determinação do índice de viscosidade (VI).....	35
Figura 9 – Ilustração esquemática da Sonda Tensi utilizada neste trabalho.	37
Figura 10 – Parâmetros de curva de resfriamento.....	38
Figura 11 – Curva de tempo-temperatura de resfriamento para o óleo de dendê a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).	42
Figura 12 – Curva da taxa de resfriamento do óleo de dendê a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).	42
Figura 13 – Curva de tempo-temperatura de resfriamento para o óleo de coco a 60 °C, sem agitação (usando a sonda Tensi).	42
Figura 14 – Curva da taxa de resfriamento do óleo de coco a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).	43
Figura 15 – Curva de tempo-temperatura de resfriamento para o óleo de canola a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).	44
Figura 16 – Curva da taxa de resfriamento do óleo de canola a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).	45
Figura 17 – Curva de tempo-temperatura de resfriamento para o óleo de milho a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).	45
Figura 18 – Curva da taxa de resfriamento do óleo de milho a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).	46
Figura 19 – Curva de tempo-temperatura de resfriamento para o óleo de algodão a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).	46
Figura 20 – Curva da taxa de resfriamento do óleo de algodão a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).	47
Figura 21 – Curva de tempo-temperatura de resfriamento para o óleo de amendoim a 60° C, sem agitação (usando a sonda Tensi).	47

Figura 22 – Curva da taxa de resfriamento do óleo de amendoim a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).	48
Figura 23 – Curva de tempo-temperatura de resfriamento para o óleo de soja a 60° C, sem agitação (usando a sonda Tensi).....	48
Figura 24 – Curva da taxa de resfriamento do óleo de soja a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).	49
Figura 25 – Curva de tempo-temperatura de resfriamento para o óleo de girassol a 60° C, sem agitação (usando a sonda Tensi).	49
Figura 26 – Curva da taxa de resfriamento do óleo de girassol a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).	50
Figura 27 – Curva de tempo-temperatura de resfriamento para o HKM a 60° C, sem agitação (usando a sonda Tensi).	52
Figura 28 – Curva da taxa de resfriamento do HKM a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).....	52
Figura 29 – Curva de tempo-temperatura de resfriamento para o H100 a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).	53
Figura 30 – Curva da taxa de resfriamento do H100 a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).....	53
Figura 31 – Fluxo de calor da superfície em função do tempo para o óleo de canola a 60°C, sem agitação (usando a sonda tensi e obtendo os dados do termopar da linha central).....	59
Figura 32 – Fluxo de calor da superfície em função do tempo para o óleo de coco a 60°C, sem agitação (usando a sonda tensi e obtendo os dados do termopar da linha central).....	59
Figura 33 – Fluxo de calor da superfície em função do tempo para o óleo de milho a 60°C, sem agitação (usando a sonda tensi e obtendo os dados do termopar da linha central).....	60
Figura 34 – Fluxo de calor da superfície em função do tempo para o óleo de algodão a 60°C, sem agitação (usando a sonda tensi e obtendo os dados do termopar da linha central).....	60
Figura 35 – Fluxo de calor da superfície em função do tempo para o óleo de dendê a 60°C, sem agitação (usando a sonda tensi e obtendo os dados do termopar da linha central).....	60
Figura 36 – Fluxo de calor da superfície em função do tempo para o óleo de amendoim a 60°C, sem agitação (usando a sonda tensi e obtendo os dados do termopar da linha central).....	61
Figura 37 – Fluxo de calor da superfície em função do tempo para o óleo de soja a 60°C, sem agitação (usando a sonda tensi e obtendo os dados do termopar da linha central).....	62
Figura 38 – Fluxo de calor da superfície em função do tempo para o óleo de girassol a 60°C, sem agitação (usando a sonda tensi e obtendo os dados do termopar da linha central).....	62

Figura 39 – Fluxo de calor da superfície em função do tempo para o HKM a 60°C, sem agitação (usando a sonda tensi e obtendo os dados do termopar da linha central).	63
Figura 40 – Fluxo de calor da superfície em função do tempo para o H100 a 60°C, sem agitação (usando a sonda tensi e obtendo os dados do termopar da linha central).	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição graxa de alguns óleos vegetais.....	32
Tabela 2 – Estrutura química dos principais AG presentes nos óleos vegetais.....	33
Tabela 3 - Viscosidade cinemática e IV determinados para todos os óleos vegetais e óleos minerais de têmpera.....	40
Tabela 4 – Parâmetros de resfriamento obtidos pela ASTM D6200 em temperatura de banho de 60°C sem agitação.....	54
Tabela 5 – Dados de Fluxo de Calor na Superfície para todos os óleos de têmpera vegetais e minerais.....	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	TRATAMENTO TÉRMICO	22
2.1.1	TÊMPERA.....	23
2.1.2	MECANISMOS DE RESFRIAMENTO.....	24
2.1.3	REMOLHAMENTO/MOLHABILIDADE.....	26
2.1.4	COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	28
2.2	ÓLEOS VEGETAIS	30
2.2.1	COMPOSIÇÃO GRAXA.....	31
2.2.2	BIODEGRADABILIDADE.....	33
2.2.3	VISCOSIDADE	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1	VISCOSIDADE	39
4.2	CARACTERÍSTICAS DE REMOLHAMENTO	41
4.3	DIFERENCIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE RESFRIAMENTO PELA PARAMETRIZAÇÃO DAS CURVAS DE RESFRIAMENTO.....	54
4.4	COMPARAÇÕES DO FLUXO DE CALOR SUPERFICIAL (Q_{MAX})	57
5	CONCLUSÃO.....	64
6	REFERÊNCIAS.....	67

1 INTRODUÇÃO

Embora conhecidos industrialmente há muito tempo, os óleos vegetais têm a sua utilização como fluido de têmpera relativamente recente tendo seu estudo aprofundado devido ao apelo ambiental atual, na qual busca-se por novas fontes renováveis que provoquem menos impactos ambientais e uma substituição aos óleos derivados do petróleo, para minimizar os efeitos negativos causados no ambiente devido ao descarte, vazamento, derramamento, entre outros.

Neste sentido, este trabalho foi realizado primeiramente com foco em um desenvolvimento de iniciação científica para dar continuidade às pesquisas realizadas pelo grupo de pesquisa da Profa. Lauralice C.F. Canale e do Prof. George E. Totten, que vem trabalhando há anos no desenvolvimento de fluidos de resfriamento derivados de óleos vegetais, tendo vários trabalhos publicados [1; 2]. O prof. K. Narayan Prabhu do *Department of Metallurgical and Materials Engineering, do National Institute of Technology Karnatka* (NITK) da Índia, também colabora com diversos estudos sobre óleos vegetais para diversas aplicações [3,4].

Apesar dos estudos previamente reportados na literatura, existe uma carência em relação à avaliação do comportamento dos óleos vegetais como fluidos de têmpera frente aos fluidos comercialmente disponíveis no mercado. Assim, o presente trabalho buscou ampliar o entendimento do desempenho de óleos vegetais no tratamento térmico de têmpera por meio da avaliação de suas curvas de resfriamento e características de remolhamento, bem como, das suas propriedades de transferência de calor, uma vez, que estas variáveis afetam consideravelmente a possibilidade de formação de trincas e distorção do componente a ser tratado termicamente.

Importante ressaltar que os resultados obtidos neste trabalho foram apresentados em reuniões científicas e publicados em revista internacional e também serão discutidos aqui. Foram eles:

1. L. Meekisho, R. Simencio Otero, J. Viscaino, D. Scott MacKenzie, G. Totten, and L. Canale, "Assessment of Cooling and Heat Transfer Properties of Quenchants with MATLAB," *Materials Performance and Characterization* 8, no. 2 (2018): 128-142. <https://doi.org/10.1520/MPC20180046>

2. R. Simencio Otero, J. Viscaino, J. Xu, J. Gu, G. Totten, and L. Canale, "Quenchant Cooling Curves, Rewetting, and Surface Heat Flux Properties of Vegetable Oils," *Materials Performance and Characterization* 8, no. 2 (2018): 143-169. <https://doi.org/10.1520/MPC20180042>
3. Z. Fried, I. Felde, R. Simencio Otero, J. Viscaino, G. Totten, and L. Canale, "Parallelized Particle Swarm Optimization to Estimate the Heat Transfer Coefficients of Palm Oil, Canola Oil, Conventional, and Accelerated Petroleum Oil Quenchants," *Materials Performance and Characterization* 8, no. 2 (2019): 96-113. <https://doi.org/10.1520/MPC20180049>

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tratamento térmico

O tratamento térmico é um procedimento de aquecimento e resfriamento controlado, em peças de aços ou ligas metálicas, visando garantir uma melhoria nas propriedades físicas e mecânicas dos materiais. As propriedades alteram-se de acordo com a mudança da microestrutura dos objetos e variam de acordo com a aplicação desejada, podendo assim ter melhorias em dureza, usinabilidade, ductilidade, resistência à corrosão e ao calor, remoção de tensões internas, modificação de propriedades elétricas e magnéticas e melhorias na resistência mecânica e ao desgaste [5].

Os principais tratamentos térmicos utilizados são:

- Têmpera
- Revenimento
- Recozimento
- Normalização
- Solubilização
- Envelhecimento

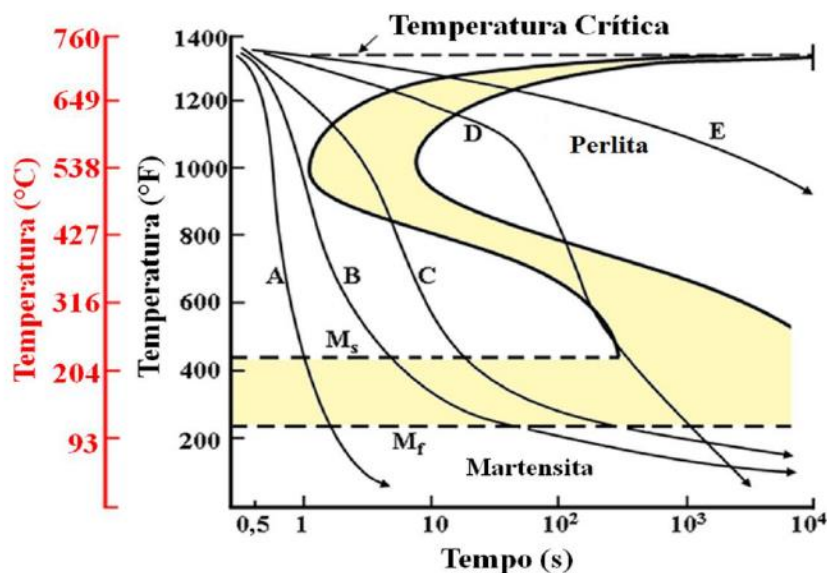
Os tratamentos térmicos são baseados nos diagramas de equilíbrio de ferro-carbono, demonstrado na Figura 1. Este diagrama é um guia para traçar a sequência das mudanças de fases através das operações termomecânicas e térmicas, atingindo assim uma determinada fase do metal. É possível observar as linhas sólidas, que representam o diagrama ferro - cementita ($\text{Fe-Fe}_3\text{C}$) e as linhas tracejadas demonstrando o equilíbrio ferro – grafita (Fe-C). O uso deste diagrama é importante para a produção industrial do aço na qual a partir de resfriamentos muito rápidos obtém-se equilíbrios termodinâmicos e, portanto, a formação de uma fase metaestável, martensita. Este diagrama é constituído por 4 fases, sendo estas: α -ferrita, austenita, δ -ferrita e cementita [6]. Um dos processos destas mudanças de fase consiste no tratamento térmico de têmpera.

à martensita revenida, que é constituída de ferrita e cementita e apresenta dureza de menor e maior tenacidade.

Para a realização da têmpera são necessários a utilização de meios para resfriar o metal a uma taxa adequada. Estes também são conhecidos como meios de têmpera, meios/fluidos de resfriamento, sendo os mais comuns: água, soluções salinas, óleo, ar, soluções poliméricas e soda cáustica [8]. Estes meios são escolhidos de acordo com a transformação metalúrgica desejada para evitar a formação de trincas e minimizar distorções devido a não uniformidade da transferência de calor.

A escolha do fluido de resfriamento a ser utilizado é determinada baseado no diagrama CCT (*Continuous Cooling Transformation*), Figura 2, uma vez que neste diagrama está correlacionado às temperaturas para cada transformação de fase, a quantidade de produto de transformação obtido para uma dada taxa de resfriamento com o tempo e taxa de resfriamento necessário para obter a martensita [9].

Figura 2 – Diagrama de transformação de aço eutetóide com as curvas de resfriamento para vários fluidos usados em têmpera.



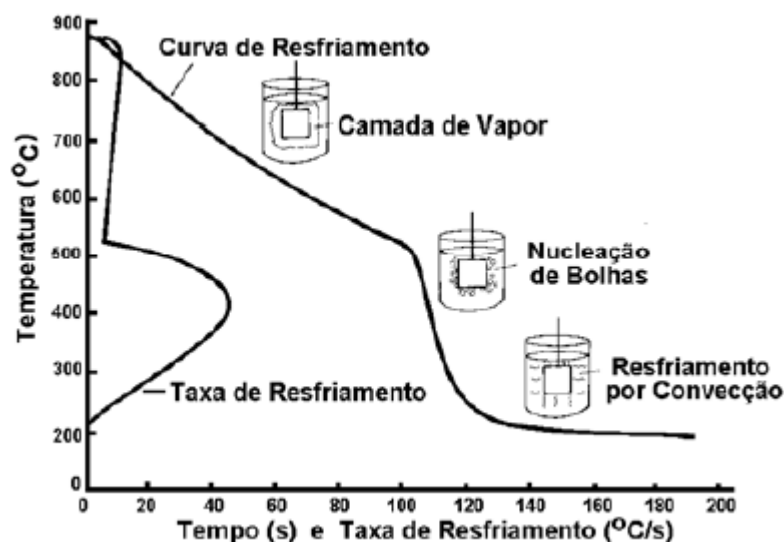
Fonte: Adaptado de Totten, Bates e Clinton [10] e Otero [7].

2.1.2 Mecanismos de resfriamento

O mecanismo de resfriamento é o processo utilizado na aplicação de têmperas, ao emergir um aço em um meio líquido vaporizável. A troca de calor entre o líquido e

o material gera a diferença de temperatura em relação ao tempo sendo composto pelos três estágios, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Mecanismos de resfriamento durante o processo de têmpera.



Fonte: Adaptado de Totten, Bates e Clinton [10].

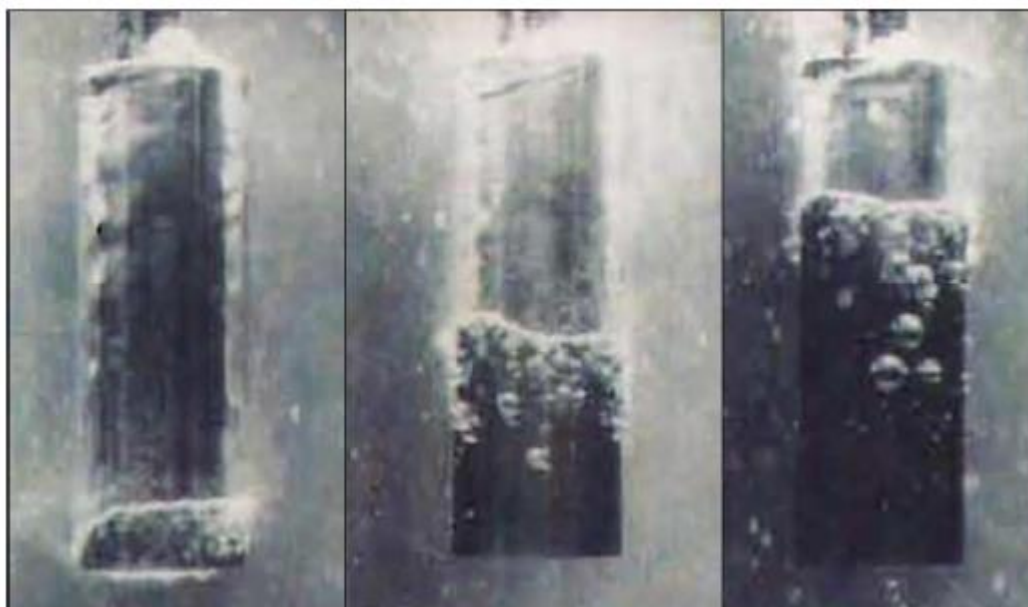
O primeiro estágio acontece devido ao contato do metal aquecido com o meio líquido. Como a temperatura da superfície do metal é suficientemente alta para vaporizar o líquido de têmpera, é formado uma camada de vapor contínua envolvendo a peça e tendo assim um efeito isolante. Com isso, a taxa de resfriamento de calor durante este estágio é baixa, tendo apenas o processo de extração de calor por radiação [10].

No segundo estágio tem-se a ruptura da camada de vapor devido a diminuição da temperatura e com isso um maior contato entre o líquido e a superfície da peça, gerando assim, uma intensa formação de bolhas. Isto causa uma grande taxa de transferência de calor por convecção do metal para o fluido, sendo observadas as maiores taxas de resfriamento. A temperatura na qual se tem a mudança destes estágios é denominada Temperatura de Leidenfrost. [10]

Por fim, no terceiro estágio, a temperatura da superfície da peça torna-se menor do que a temperatura de ebulição e a superfície é totalmente molhada pelo fluido, tendo assim, o resfriamento por condução e convecção, conferindo baixa taxa de transferência de calor em relação ao estágio anterior [11].

Na Figura 4 é possível observar um experimento de estudo realizado por Tensi; Stich; Totten [12], sendo possível observar os estágios de resfriamento com a troca de calor entre o líquido de resfriamento e o metal da sonda. Além disso, nota-se que os três estágios ocorrem simultaneamente, tendo, conseqüentemente, variação de taxas de remoção de calor distintas em tempos semelhantes. Isso representa, um resfriamento não uniforme e contribui para as propriedades da peça, podendo gerar distorções e trincas.

Figura 4 – Processo de resfriamento mostrando a transição entre os estágios de transferência de calor.



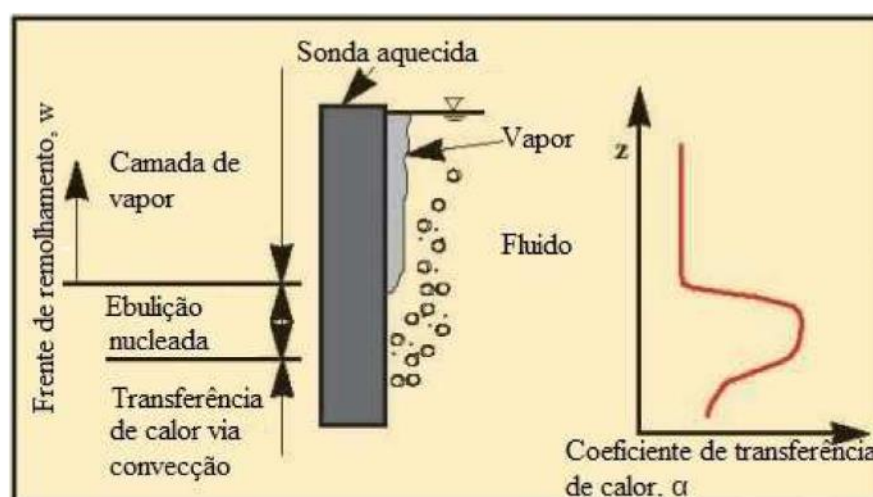
Fonte: Adaptado de Tensi; Stich; Totten [12].

2.1.3 Remolhamento/Molhabilidade

A capacidade de remolhamento é uma medida da uniformidade geral da superfície do processo de resfriamento. A uniformidade ideal é essencial para minimizar a formação de gradientes térmicos durante o processo de resfriamento. Gradientes térmicos excessivos podem levar a problemas crescentes de controle de distorção e até rachaduras. Tensi relatou que as medições de remolhamento são facilmente obtidas medindo o perfil de condutividade elétrica durante o resfriamento ou medindo gradientes térmicos usando uma sonda de múltiplos termopares [13,14].

Com isso, como ressaltado na Figura 4, é possível observar que ocorra os três estágios ao mesmo tempo, dependendo da alta característica de remolhamento oferecida pelo fluido. Outro exemplo que se pode citar é ilustrado na Figura 5, mostrando a influência da velocidade de resfriamento do fluido sobre a superfície da peça e as diferenças de transferência de calor nas diferentes fases do processo de resfriamento, sendo esse comportamento não só determinante pelas características do fluido, mas também pelas características da superfície da peça que está sendo temperada.

Figura 5 - Demonstração de três fases de resfriamento (esq.) e a mudança no coeficiente de transferência de calor alfa, ao longo da superfície da sonda durante a têmpera (dir.).



Fonte: Adaptado de Totten e Tensi [14].

Outra importante característica que influencia positivamente o remolhamento é a molhabilidade. Este aspecto é definido pelo contato entre um fluido e um sólido, e retrata a distribuição de um líquido na superfície de um substrato sólido, sendo avaliado através do ângulo de contato (α) e expresso como cosseno de α . Este ângulo indica o quanto um líquido molha certa superfície, sendo representado na Figura 6.

Esta característica é importante para o remolhamento devido ao contato do líquido com a superfície na transição de fases e influenciando as taxas de resfriamento. Sendo presente na segunda fase com o rompimento da camada de vapor e na terceira fase na qual a superfície é totalmente molhada pelo líquido.

Figura 6 – Comparação entre o ângulo de contato e a molhabilidade.



Fonte: Otero [7]

Quanto maior a molhabilidade, menor serão os valores de α , indicando que o fluido se espalha, ou seja, promove um melhor molhamento da superfície, tendo assim, maior taxa de resfriamento promovida durante o processo de têmpera. Já altos valores de α indicam uma baixa molhabilidade [15].

A molhabilidade também está inversamente relacionada com a viscosidade do líquido. Quanto maior a viscosidade do meio de resfriamento, menor será a molhabilidade, e, conseqüentemente, a taxa de resfriamento também é diminuída [15,16].

2.1.4 Coeficiente de transferência de calor

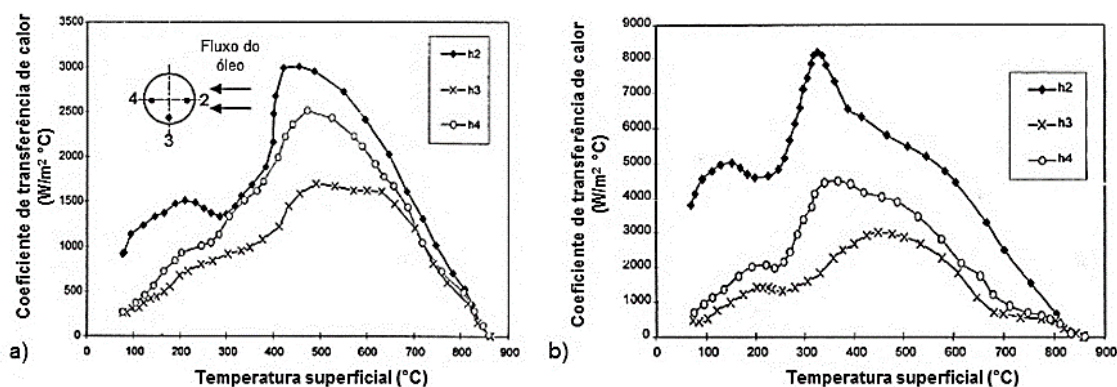
A capacidade da têmpera é caracterizada pelo seu fluxo de calor entre a superfície quente do metal e o fluido de resfriamento. O coeficiente de transferência de calor (h) define a eficiência do resfriamento de um dado fluido, e é definido como a razão do fluxo de calor interfacial para a diminuição da temperatura na interface metal/meio de resfriamento (Equação 1).

$$h = \frac{Q}{A(T_s - T_f)} \quad (1)$$

Nesta equação o h é o coeficiente de transferência de calor, Q é o fluxo de calor entre a peça e o fluido de resfriamento, A é a área superficial da peça, T_s é a temperatura superficial da peça e T_f é a temperatura do fluido de resfriamento [17].

O coeficiente de transferência de calor do aço é significativamente dependente da temperatura da superfície durante o tratamento térmico da têmpera [10]. Há vários métodos propostos para calcular este coeficiente, utilizando-se modelos computacionais de elementos finitos e diferenças finitas, por meio de análises das curvas de resfriamento [15,18,19]. Na figura 7 é possível observar um exemplo da variação do coeficiente de transferência de calor, pois devido ao formato da peça (cilíndrico), obtém-se uma variação da transferência de calor ao redor da superfície, mesmo quando o fluido de resfriamento está sob agitação [20].

Figura 7 – Variação do coeficiente de transferência de calor ao redor da barra para fluxo transversal sem agitação (a) e com agitação de 79 m/min (b).



Fonte: Adaptado de Tensi, Stich e Totten, 2006 [12].

Outro método que normalmente é utilizado para calcular o coeficiente de transferência de calor é o método simples de Kobasko [21], na qual é realizado diretamente nas curvas tempo-temperatura, porém, neste trabalho, devido à parceria com autores do *Institute of Materials Modification and Modelling School of Material Science and Engineering, Shanghai Jiatong University*, as propriedades de transferência de calor foram determinadas pela metodologia do problema inverso de condução de calor (em inglês: *inverse heat conduction problem* ou IHCP) para determinar o fluxo máximo de calor (Q_{max}). Problemas inversos têm sido extensivamente estudados por causa de suas aplicações em várias disciplinas de engenharia [22,23]. Com o aprimoramento da capacidade do computador, várias técnicas numéricas e métodos computacionais foram desenvolvidos para fornecer soluções precisas para o IHCP na última década.

Com isso, os resultados aqui descritos, refletem as propriedades de têmpera, remolhamento e transferência de calor (fluxo de calor) obtidas em curvas de resfriamento a partir de uma sonda Tensi de múltiplos termopares para uma série de óleos vegetais: canola, coco, milho, algodão, dendê, amendoim, soja e girassol. Estes óleos vegetais foram selecionados devido à sua disponibilidade e interesse comercial.

2.2 Óleos vegetais

Os óleos vegetais e as gorduras são largamente encontrados na natureza e compostos principalmente, por ésteres do glicerol, ou seja, por triacilgliceróis. Estes e os óleos animais têm sido usados em têmperas para metais por milhares de anos. Uma revisão do uso de óleos vegetais e animais como meios de resfriamento desde 1850 foi realizada por Otero, Canale e Totten descrevendo o desenvolvimento destas técnicas com o passar dos anos, sendo ressaltado que mesmo que estes óleos foram utilizados em têmperas de materiais desde meados de 1850. Um dos primeiros documentos fornecendo dados comparativos de seus desempenhos foi um capítulo de um livro sobre o tratamento do térmico em 1920 [24].

As principais propriedades lubrificantes dos óleos vegetais são seu alto índice de viscosidade, alto ponto fulgor, baixa volatilidade e boa lubrificação limítrofe. No entanto, a oxidação e a estabilidade hidrolítica dos óleos vegetais são limitadas e suas viscosidades variam em uma faixa estreita. Com o desenvolvimento de novas técnicas de processamento, antioxidantes e instalações de equipamentos, o uso de óleos vegetais em têmperas tem se tornado mais frequente, pois eles são biodegradáveis, renováveis, apresentam baixa toxicidade e podem substituir com sucesso os óleos minerais à base de petróleo [7].

O emprego de óleos vegetais em aplicações industriais caiu em uso após a Segunda Guerra Mundial. No entanto, tem havido uma revitalização no interesse por estes óleos como bases para a formulação de fluidos industriais. Houve uma explosão relativa no número de referências mais recentes que relatam o uso destes óleos como meios de resfriamento pelas seguintes razões [25]:

- (1) A maioria dos líquidos de têmperas vaporizáveis usados na indústria de tratamento térmico são provenientes do petróleo, que têm se mostrado tóxicos ao meio ambiente e são muitas vezes difíceis de descartar após o uso. Os fluidos de têmperas à base de óleo vegetal são normalmente muito mais

biodegradáveis e menos tóxicos quando liberados no solo e nas águas subterrâneas [26,27]. Portanto, os óleos vegetais são uma opção atraente, principalmente quando as regulamentações governamentais inibem ou impedem o uso de óleos minerais em têmperas [28].

- (2) Kinawy, El-Hamidi e Abdallah relataram que os óleos minerais são cancerígenos. A exposição prolongada à névoa de óleo de petróleo pode causar irritação no trato respiratório [29].
- (3) Para serem competitivas comercialmente, as empresas desenvolveram produtos de base biológica e ecológica, sem apresentarem os problemas impostos pela utilização de fluidos à base de óleo mineral [30].
- (4) Os óleos vegetais são renováveis, pelo que oferecem a possibilidade de contribuir para o objetivo de independência e segurança energéticas [28].

Um dos primeiros e mais rigorosos estudos de óleos vegetais, animais e de peixes para serem utilizados como alternativas ao uso de óleo de petróleo em têmpera de aços foi relatado por Tagaya e Tamura [31,32]. Embora esses fluidos apresentem uma capacidade de oxidação limitada em relação aos óleos minerais, eles proporcionaram uma transferência de calor mais uniforme devido à sua mínima camada de vapor e ao comportamento de formação de bolhas, sendo assim importante para a minimização de distorções e fraturas. Além disso, esses óleos mostraram-se eficazes na aplicação de têmperas em uma gama de ligas de aços.

2.2.1 Composição graxa

Os óleos vegetais apresentam uma viscosidade relativamente alta em comparação a viscosidade da água, isto ocorre devido a estrutura das longas cadeias carbônicas dos triacilgliceróis presentes na composição dos óleos vegetais, ou seja, dos seus ácidos graxos (AG) [33]. Além disso, a quantidade de insaturações dos AG influencia nesta propriedade física. Quanto maior o grau de insaturação do AG, menor será a viscosidade do óleo [33]. Nas Tabelas 1 e 2 apresentam-se alguns exemplos de principais AG, bem como sua estrutura química.

As propriedades dos AG variam de acordo com sua classificação devido aos diferentes graus de insaturação e seu tamanho de cadeia, podendo ser de 4 a 24

átomos de carbonos. Entre eles temos: saturados, monoinsaturados e poli-insaturados [34].


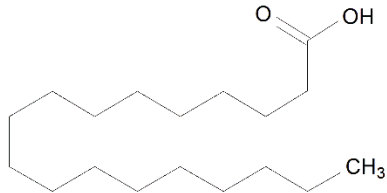
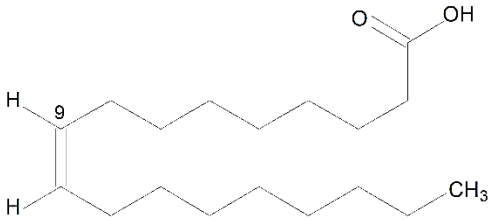
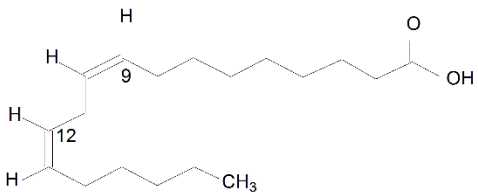
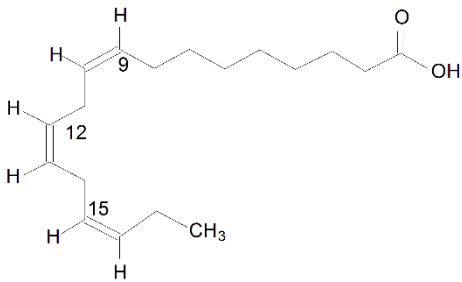
Tabela 1 – Distribuição graxa de alguns óleos vegetais.

Ácidos Graxos		Composição graxa aproximada (%) ¹					
Nome comum	Identificação ^a	Canola	Girassol	Mamona	Milho	Palma	Soja
Láurico	C12:0	-	0,5	-	-	0,2	0,3
Palmítico	C16:0	4,3	6,5	1,0	8,0	45,4	11,0
Palmitoleico	C16:1 9c ^b	0,2	0,1	-	0,1	0,2	0,1
Oleico	C18:1 9c	59,0	29,3	3,5	34,5	39,0	23,1
Linolênico	C18:3 9c, 12c, 15c	9,5	0,5	0,3	1,0	0,3	7,2
Ricinoleico	C18:1, 9c (OH)	-	-	89,5	-	-	-

1. As porcentagens podem não somar 100% devido à presença de algum constituinte não listado.
a. Número de átomos de carbonos: número de insaturações. Exemplo: C10:0
b. Configuração *cis*

Fonte: BOCKISCH, 1998 [35].

Tabela 2 – Estrutura química dos principais AG presentes nos óleos vegetais.

Nome comum (Nome científico)	Fórmula Química	Estrutura Química
Láurico (Dodecanoico)	$C_{12}H_{24}O_2$	
Estearico Octadecanoico	$C_{18}H_{36}O_2$	
Oleico 9- <i>cis</i> -octadecenoico	$C_{18}H_{34}O_2$	
Linoleico 9,12- <i>cis</i> -octadecadienoico	$C_{18}H_{32}O_2$	
Linolênico 9,12,15- <i>cis</i> -octadecatrienoico	$C_{18}H_{30}O_2$	

Fonte: Adaptado de Otero [7].

2.2.2 Biodegradabilidade

A biodegradabilidade tem como significado a influência da decomposição bioquímica por uma substância, sendo fomentada pela ação de micro-organismos. Esta decomposição é definida por uma série de etapas, tendo a primeira etapa chamada de degradação primária e a etapa final de mineralização. Na degradação

primária ocorre o desaparecimento da molécula original e na mineralização tem-se as substâncias sendo convertidas em gás carbônicos, água e biomassa [36].

Os óleos vegetais são biodegradáveis e atendem as normas de biodegradabilidade europeias e americanas apresentado pelos requisitos da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e da *Organization for Economic Cooperation and Development* (OECD) [37].

Em função desta característica e das mudanças climáticas atuais, estes óleos vêm sendo utilizados na base da formulação de vários biofluidos, por apresentarem a vantagem de não afetarem o equilíbrio de dióxido de carbono global, quando comparados com fluidos derivados do petróleo [15,38,39]. Tendo sido provado em estudos anteriores sua biodegradabilidade variando entre 70-100% [37,40].

2.2.3 Viscosidade

A viscosidade é definida como a resistência de um fluido ao cisalhamento. Esta propriedade em fluidos de resfriamento é um importante fator contribuinte para a transferência de calor interfacial entre uma superfície quente e um corpo mais frio durante o resfriamento. Normalmente, com todos os fatores iguais, como por exemplo, fluxo de fluido e turbulência, tipo de fluido, etc., tem-se um aumento das transferências de calor com o aumento da viscosidade [41].

Sabendo assim, que a viscosidade de um fluido varia com a temperatura, é importante obter uma comparação da sensibilidade de um fluido em relação a variação de temperatura, pois conforme o aumento da temperatura tem-se uma diminuição da viscosidade [42].

Para fluidos industriais, uma medida comum de avaliação da sensibilidade à temperatura da viscosidade é determinar o índice de viscosidade (VI) pela norma ASTM D2270. O VI é um método para quantificar a mudança relativa da viscosidade com a temperatura. Quanto mais baixo o VI, maior será a mudança da viscosidade do fluido em relação a temperatura. O cálculo de VI é representando de acordo com a Equação 2 abaixo:

$$VI = \frac{L - U}{L - H} \times 100 \quad (2)$$

onde:

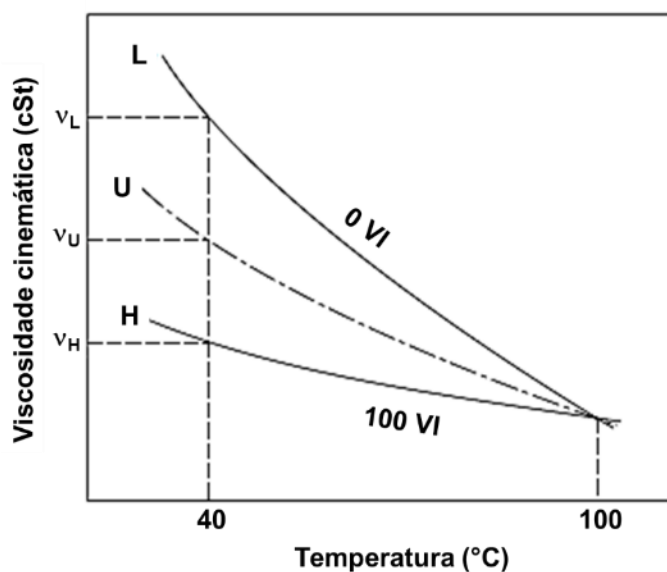
L = viscosidade do fluido a 40°C de um óleo com VI igual a zero, tendo a mesma viscosidade a 100°C do óleo em estudo;

H = viscosidade do fluido a 40°C de um óleo com VI igual a 100, tendo a mesma viscosidade a 100°C do óleo em análise;

U = viscosidade a 40°C do óleo em estudo

O sistema original do VI foi estabelecido pela seleção arbitrária a partir da Figura 8, na qual é definido por duas séries de óleos derivados do petróleo. A primeira série, é a série L, sendo composta por óleos que a viscosidade é fortemente influenciada pela temperatura, já a série H apresenta mudanças insignificativas. Os óleos da série L foram assumidos com VI igual a 100 e os da série H com VI igual a zero [43].

Figura 8 – Determinação do índice de viscosidade (VI).



Fonte: Otero [7]

A viscosidade dos óleos vegetais diminui exponencialmente com a temperatura, conforme descrito na literatura [44]. Outra característica importante a ressaltar é a grande influência nas propriedades da viscosidade dos óleos vegetais pela concentração de AG mono, insaturados e poli-insaturados. Em um estudo realizado por Fasina [44], viscosidade dos óleos vegetais aumentou em função da concentração dos AG monoinsaturados e a diminuiu em relação a concentração dos AG poli-insaturados. As fortes interações moleculares dos óleos vegetais são responsáveis

pela pequena variação em função da temperatura e, portanto, seu índice de viscosidade é relativamente alto em comparação aos óleos minerais [45,46].

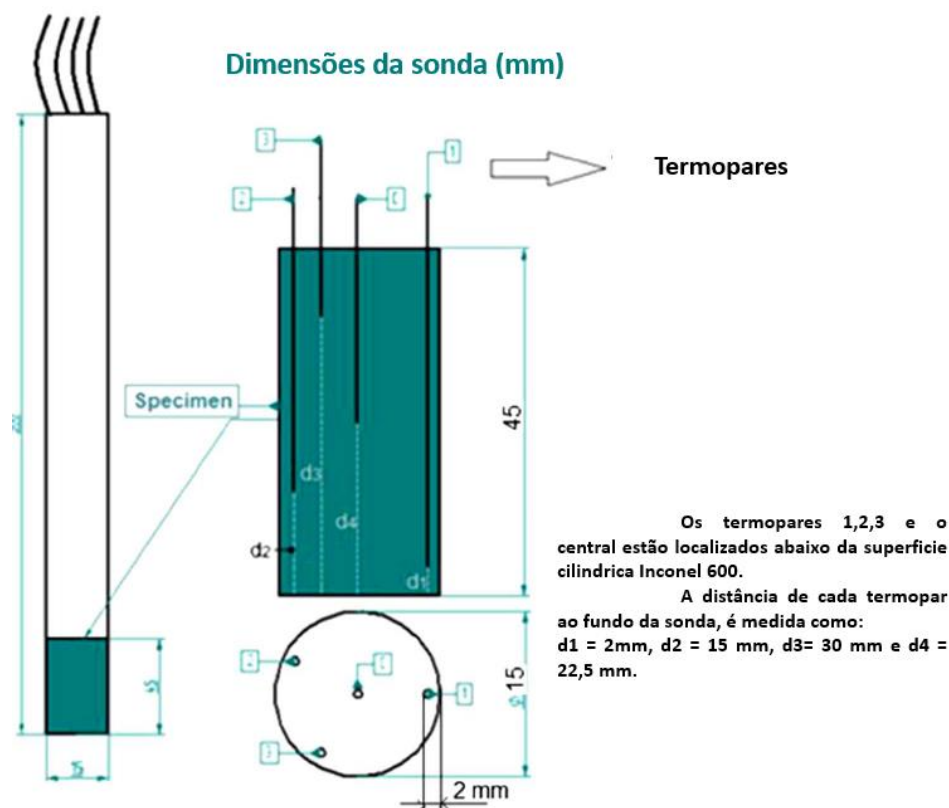
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os óleos vegetais utilizados neste trabalho foram comprados em um mercado local na cidade de São Carlos, São Paulo, Brasil e foram usados na mesma condição de sua compra, sem a adição de aditivos de antioxidantes. O desempenho na têmpera destes óleos foi comparado com dois fluidos comerciais: Houghto-Quench 100 (óleo convencional / lento) e Houghto-Quench KM (um óleo “acelerado”), doados pela Houghton Internacional.

A viscosidade cinemática foi medida em 40°C e 100°C, de acordo com a norma da ASTM D445-17 [47]. O índice de viscosidade foi determinado a partir das medidas da viscosidade cinemática, de acordo com a norma da ASTM D2270-10 [48].

As curvas de resfriamento foram obtidas em condições sem agitação, ASTM D6200-01, com a temperatura de banho de 60°C [49]. Entretanto, em vez de utilizar uma sonda padrão de 12.5-mm de diâmetro com montagem cilíndrica de 60 mm Inconel 600 especificada na ASTM D6200-01, uma sonda com um conjunto de múltiplos termopares, sonda Tensi (Figura 9) foi utilizada.

Figura 9 - Ilustração esquemática da Sonda Tensi utilizada neste trabalho.



Fonte: Adaptado de Otero et al. [41].

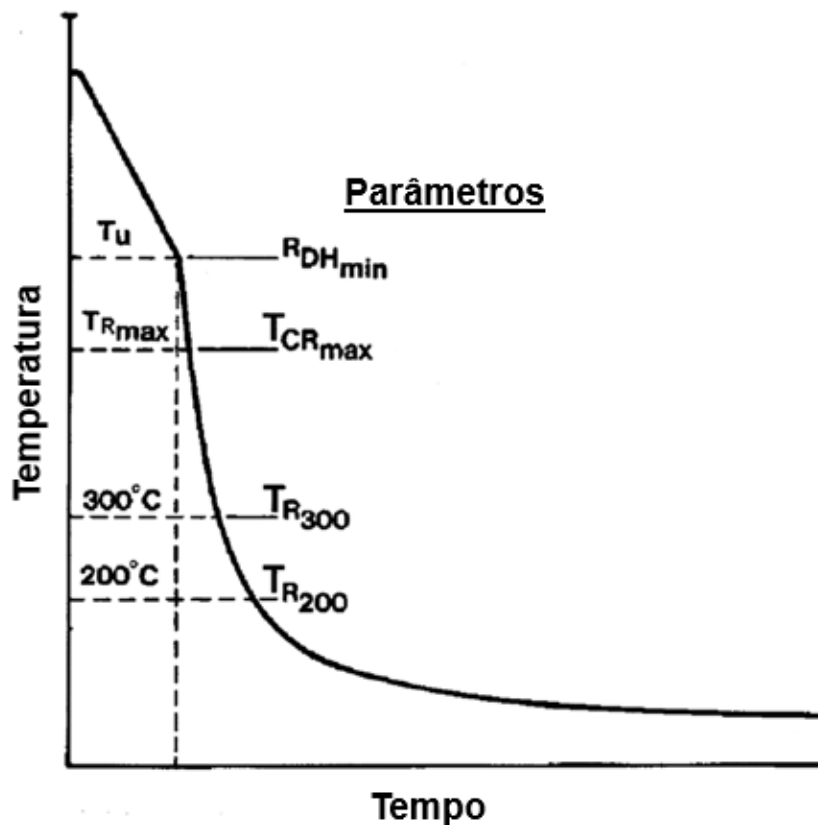
Depois de aquecer a sonda Tensi em um forno a $850\text{ }^{\circ}\text{C}$, esta foi então imersa manualmente e rapidamente em 2 litros do óleo a ser testado (sem agitação). A temperatura de resfriamento da sonda e os tempos de resfriamento foram obtidos a uma taxa de aquisição de dados de 8 Hz, sendo que esses dados foram armazenados e usados para estabelecer uma curva de temperatura versus tempo de resfriamento.

A partir das curvas de resfriamento obtidas, foram obtidos os parâmetros críticos apresentados na Figura 10. São eles:

- 1) Tempo de transição da camada de vapor para a formação de bolhas (t_{A-B})
- 2) Temperatura da transição da camada de vapor para a formação de bolhas (T_{A-B})
- 3) Taxa de resfriamento da transição da camada de vapor para a formação de bolhas (CR_{DHmin})
- 4) Taxa de resfriamento a 700°C (CR_{700})
- 5) Taxa máxima de resfriamento (CR_{max})

- 6) Temperatura da taxa máxima de resfriamento (TCR_{max})
- 7) Taxa de resfriamento a 300°C (CR_{300})
- 8) Tempo para resfriar a 300°C (t_{300})
- 9) Taxa de resfriamento a 200°C (CR_{200})
- 10) Tempo para resfriar a 200°C (t_{200})

Figura 10 - Parâmetros de curva de resfriamento.



Fonte: Adaptado de Totten, Bates e Clinton [10].

A taxa de resfriamento a 700°C, parâmetro 4, é muito importante no processo de têmpera, uma vez que se deve maximizá-la para evitar a região de transformação de perlita de aço. Os parâmetros 5 e 6 são a taxa máxima de resfriamento e a temperatura onde isso ocorre, sendo desejável maximizar o CR_{max} e minimizar o TCR_{max} . A taxa de resfriamento a temperaturas 200°C e 300°C, parâmetros 7 e 9, também é determinada, uma vez que eles estão relacionados ao potencial de trincas e distorção do aço. Para minimizar esses problemas, é desejável minimizar as taxas de resfriamento nessa região. Os parâmetros 8 e 10 estão relacionados às regiões de transformação de martensita.

3.1 Determinação das propriedades de transferência de calor

Os cálculos matemáticos para determinação das propriedades de transferência de calor foram realizados em parceria com os pesquisadores Jun Xu e Jianfeng Gu do *Institute of Materials Modification and Modelling School of Materials Science and Engineering*, da *Shanghai Jiaotong University*, utilizando a solução do problema inverso de transferência de calor (IHCP).

Maiores detalhes a respeito destes podem ser encontrados no artigo recentemente publicado: R. Simencio Otero, J. Viscaino, J. Xu, J. Gu, G. Totten, and L. Canale, "Quenchant Cooling Curves, Rewetting, and Surface Heat Flux Properties of Vegetable Oils," *Materials Performance and Characterization* 8, no. 2 (2018): 143-169. <https://doi.org/10.1520/MPC20180042> [41].

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Viscosidade

Na Tabela 3 é apresentada os dados da viscosidade cinemática a 40°C para os óleos vegetais estudados neste trabalho, sendo observado uma viscosidade média de 33,78 cSt. O óleo de coco apresentou a menor viscosidade (27,94 cSt) e o óleo de amendoim apresentou a maior viscosidade (38,83 cSt). A média de viscosidade para todos os óleos vegetais a 100°C foi de 7,87 cSt, novamente com o óleo de coco exibindo a menor viscosidade (6,42 cSt) e o óleo de amendoim exibindo a maior viscosidade (8,60 cSt).

É importante ressaltar que as viscosidades a 40°C de todos os óleos vegetais são significativamente maiores em relação aos fluidos de têmpera minerais "rápido" ou "convencional", que apresentaram viscosidade de 13,72 cSt e 19,52 cSt, respectivamente. Isso se deve à estrutura química dos óleos vegetais, ou seja, aos triglicerídeos. Não surpreende, que o fluido HKM "rápido" tenha exibido uma viscosidade baixa em comparação ao óleo "convencional" (H100), já que é esperado que as altas transferências de calor ocorram em fluidos com menor viscosidade. Com valores menores de viscosidade, espera-se que ambos os fluidos de petróleo promovam maiores taxas de resfriamento em relação aos óleos vegetais. Entretanto,

outros fatores determinantes devem ser considerados, como por exemplo, a condutividade térmica e capacidade de calor específica.

Tabela 3 - Viscosidade cinemática e IV determinados para todos os óleos vegetais e óleos minerais de têmpera.

�leos Vegetais	Propriedades de Viscosidade			
	Viscosidade 40�C (cSt)	Viscosidade 100�C (cSt)	�ndice de Viscosidade (VI)	Viscosidade a 40�C (cSt) literatura
Canola	35,33	8,30	223	36,92 ^a [50]
Coco	27,94	6,42	194	27,40 [51]
Milho	31,49	7,80	234	33,03 ^a [50]
Algodão	34,58	8,09	219	34,17 [52]
Dendê	35,06	7,89	207	36,0 [51]
Amendoim	38,63	8,60	210	39,58 ^a [50]
Soja	32,84	7,79	221	33,61 ^a [50]
Girassol	34,41	8,04	219	36,04 ^a [50]
<i>Fluidos derivados do petróleo</i>				
HKM (Rápido) ^b	13,72	3,27	106	10-14 (Reportado pelo fabricante)
H100 (Lento) ^c	19,52	4,23	123	20.5 (Reportado pelo fabricante)

Notas: ^a A viscosidade a 40  C foi extrapolada dos valores relatados para 35 C e 50 C na Referência [53]. ^b O fabricante (Houghton International) relata que o HKM é um produto formulado com óleos básicos refinados, contendo aditivos, incluindo antioxidantes e aceleradores da taxa de resfriamento. ^c O fabricante (Houghton International) relata que o H100 é um óleo de têmpera normal de baixa viscosidade e um efeito de têmpera um pouco mais lento que o Houghto-Quench "K" ou "G."

Fonte: Autor.

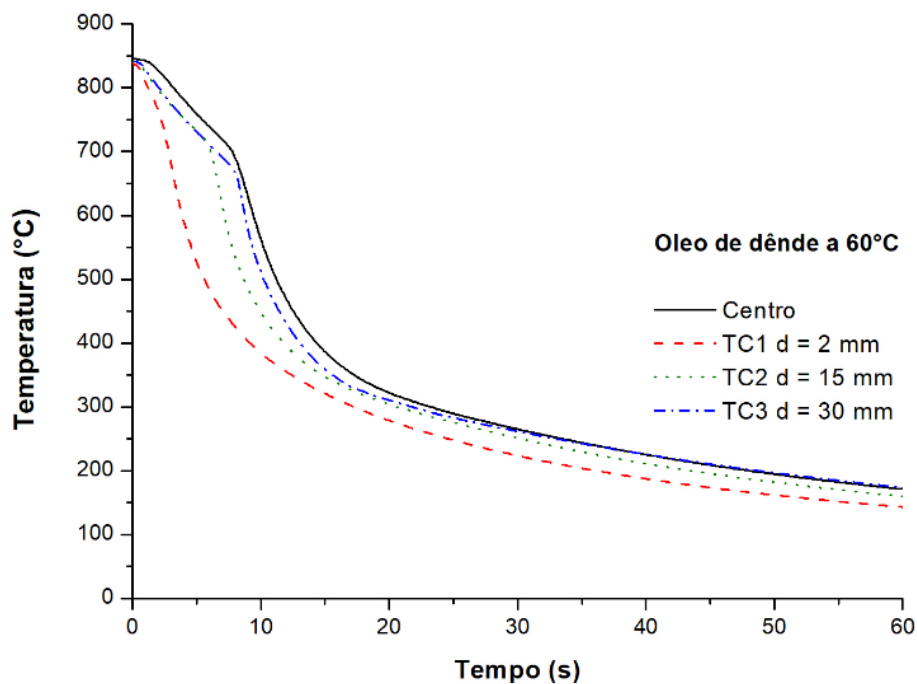
Na Tabela 3 também   possível observar que os valores de VI para todos os óleos vegetais são aproximadamente duas vezes maiores que os valores de VI dos fluidos derivados do petróleo, indicando que a viscosidade dos óleos vegetais sofre menor variação em função da temperatura. O  leo de milho apresentou o maior VI (234) enquanto que o fluido HKM exibiu o menor VI (106).

4.2 Características de remolhamento

Um método utilizado para observar as características de remolhamento no resfriamento é comparar as curvas de resfriamento da superfície em diferentes posições axiais obtidas em uma peça teste, como utilizado neste estudo com a sonda de múltiplos termopares Tensi (Figura 9) durante a têmpera. Se um comportamento de resfriamento perfeitamente uniforme for obtido em toda a superfície ao imergir a sonda, todas as curvas de resfriamento da superfície serão idênticas ou quase idênticas e, normalmente, somente o resfriamento convectivo será observado. No entanto, se houver uma frente de molhamento em movimento na superfície durante o resfriamento, o comportamento de molhamento será refletido pela transição da camada de vapor para a nucleação de bolhas e a nucleação de bolhas para o resfriamento convectivo. O resfriamento não uniforme resulta na geração de gradientes térmicos, o que pode levar ao aumento da distorção na peça e possivelmente à formação de trincas. Assim, o comportamento de molhamento na têmpera é uma variável extremamente importante.

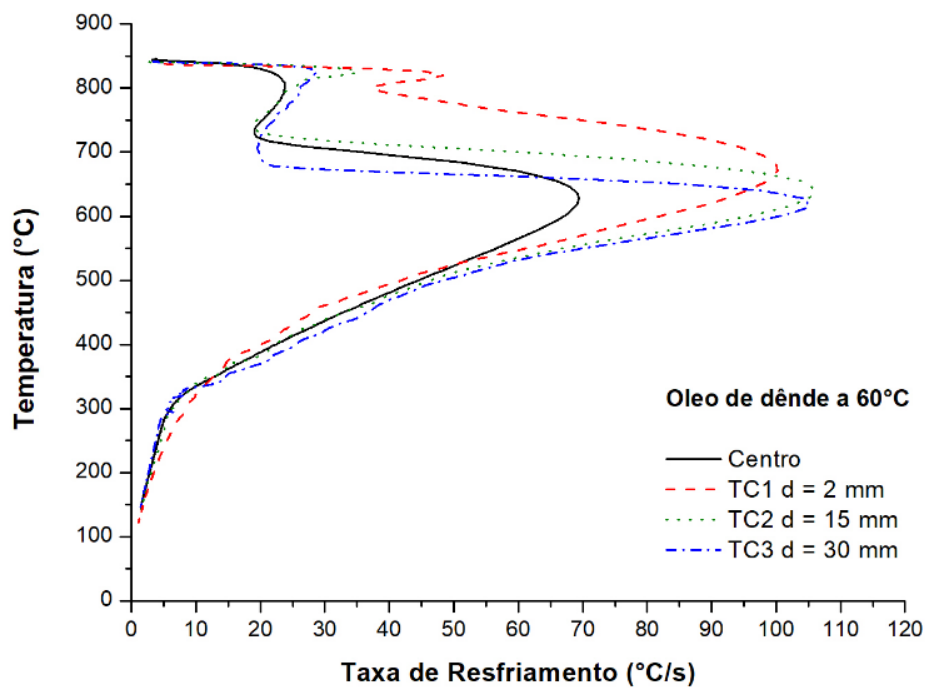
As curvas de resfriamento tempo-temperatura e das taxas de resfriamento obtidas com a sonda de múltiplos termopares são apresentadas nas Figuras de 11 a 30. É esperado que a uniformidade da têmpera aumentasse à medida que a camada de vapor diminuísse. Idealmente, somente a transferência de calor convectiva ocorreria na superfície da sonda. Entretanto, das várias curvas de resfriamento realizadas neste trabalho, a curva de resfriamento na superfície da sonda do óleo de dendê (Figuras 11 e 12) demonstrou uma maior extensão da região consistente com a camada de vapor. Esse comportamento foi muito maior em relação aos outros óleos vegetais avaliados. Por outro lado, o óleo de coco, o óleo vegetal de menor peso molecular estudado, exibiu evidências mínimas de camada de vapor com base nas suas curvas de resfriamento (Figuras 13 e 14). Portanto, observando o comportamento sugerido pela curva de resfriamento do óleo de dendê, era esperado que o óleo vegetal de menor peso molecular, óleo de coco, exibisse uma maior camada de vapor aparente, já que a pressão de vapor deveria aumentar à medida que o peso molecular diminuía. No entanto, isso não foi observado.

Figura 11 - Curva de resfriamento tempo-temperatura para o óleo de dendê a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).



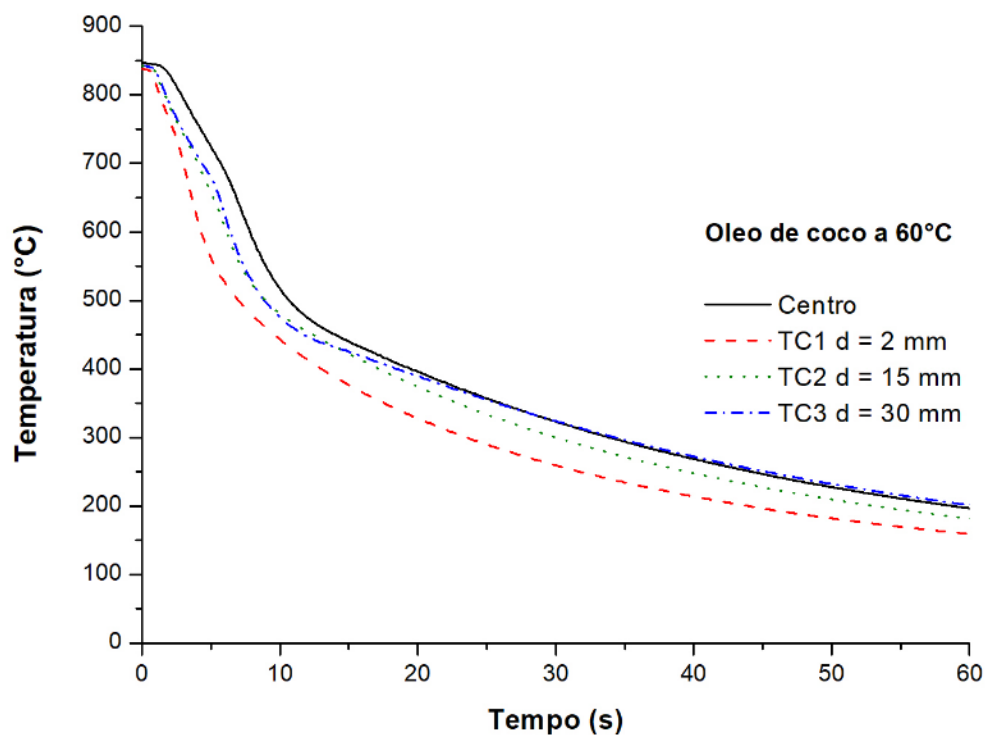
Fonte: Autor

Figura 12 - Curva da taxa de resfriamento do óleo de dendê a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).



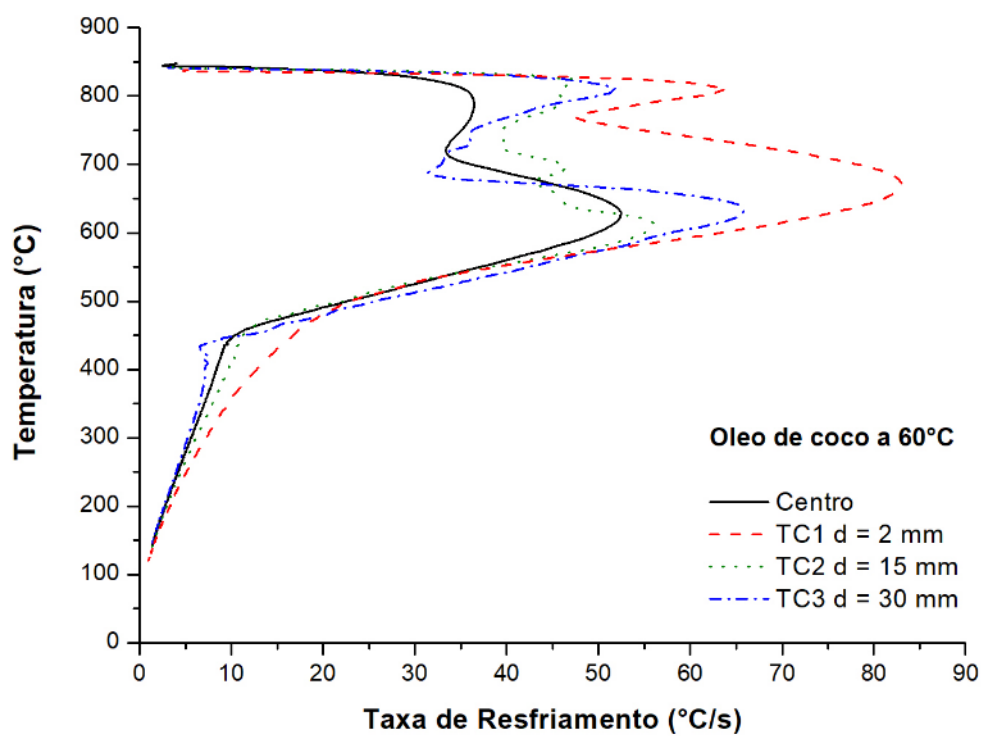
Fonte: Autor.

Figura 13 - Curva de resfriamento tempo-temperatura para o óleo de coco a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).



Fonte: Autor.

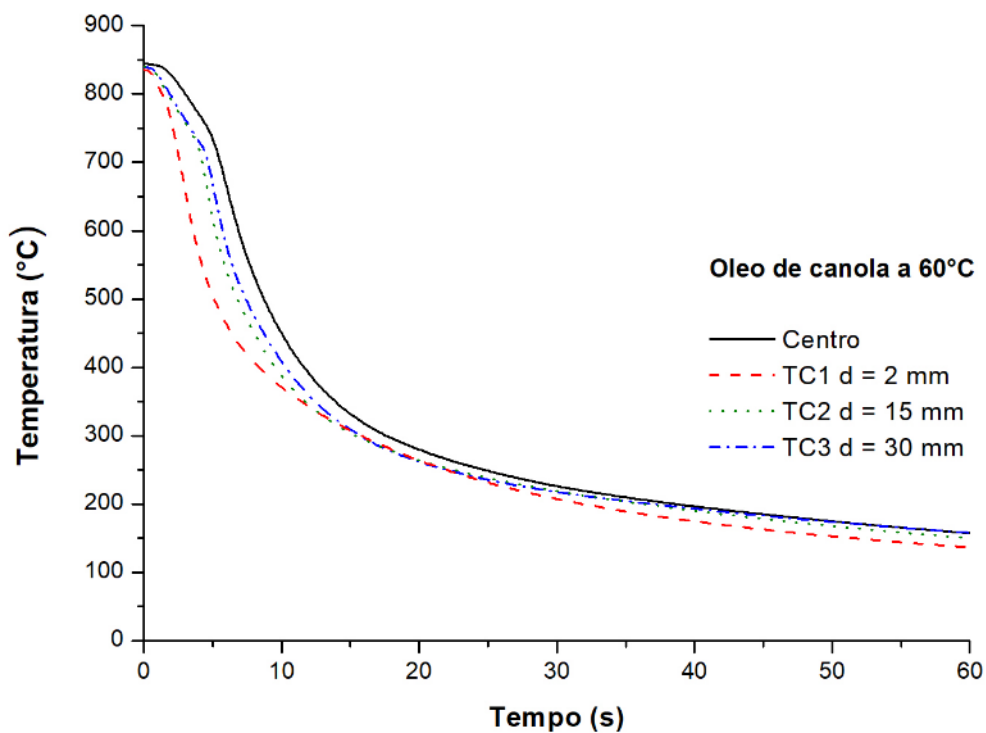
Figura 14 - Curva da taxa de resfriamento do óleo de coco a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).



Fonte: Autor.

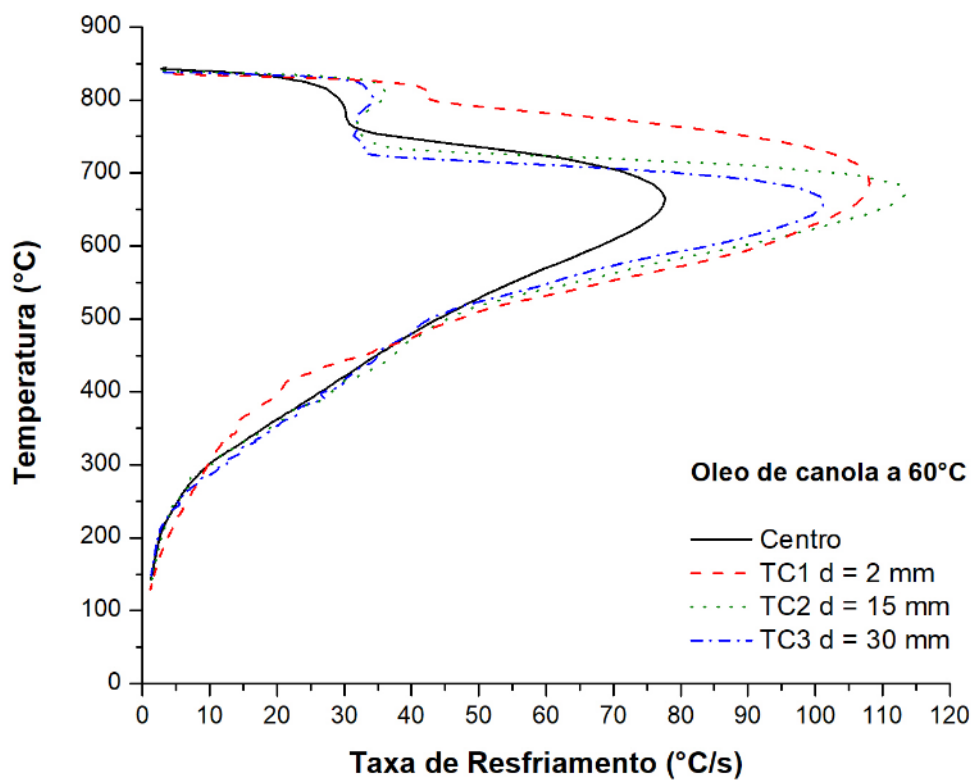
O outro óleo vegetal que apresentou alguma, mas mínima evidência de uma camada de vapor, foi o óleo de canola (Figuras 15 e 16). Já os demais óleos vegetais como o milho (Figuras 17 e 18), algodão (Figuras 19 e 20), amendoim (Figuras 21 e 22), soja (Figuras 23 e 24) e girassol (Figuras 25 e 26) não exibiram esse comportamento. Dentre eles, o óleo de amendoim foi o que menos demonstrou esta característica.

Figura 15 - Curva de resfriamento tempo-temperatura para o óleo de canola a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).



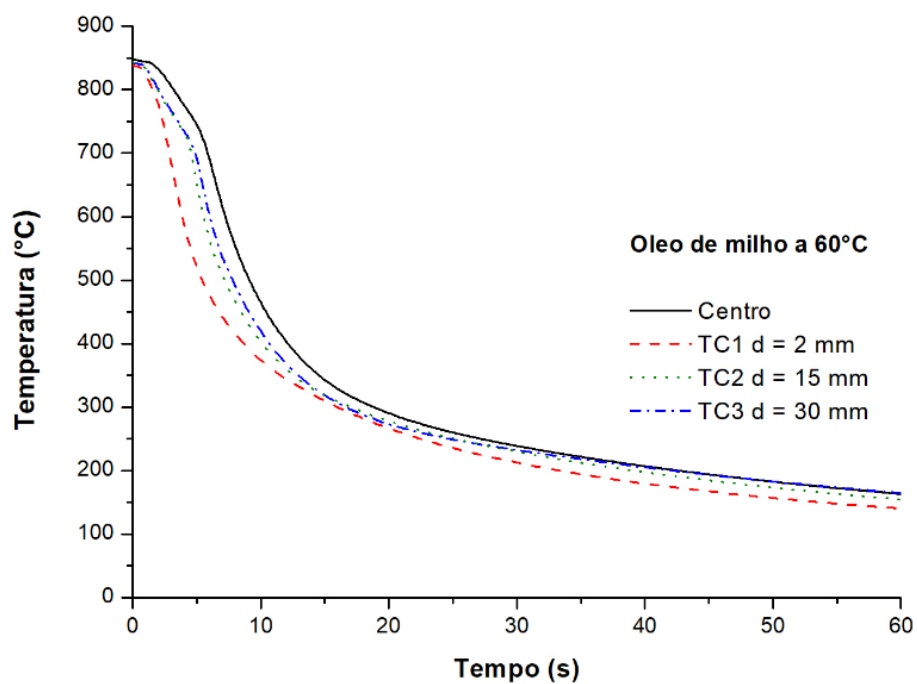
Fonte: Autor.

Figura 16 - Curva da taxa de resfriamento do óleo de canola a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).



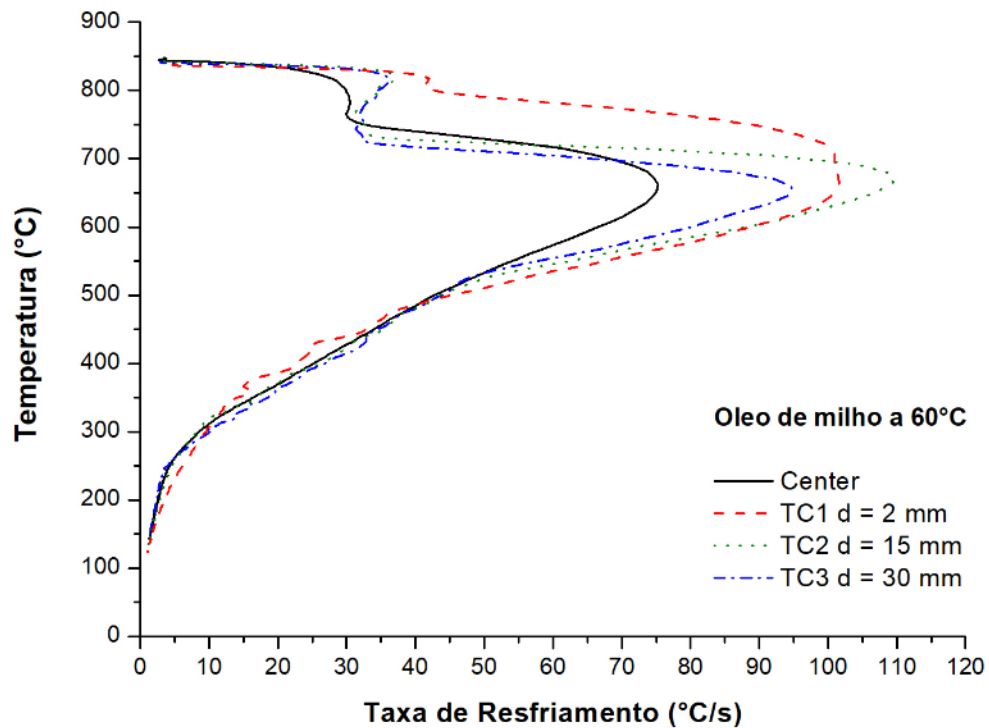
Fonte: Autor.

Figura 17 - Curva de resfriamento tempo-temperatura para o óleo de milho a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).



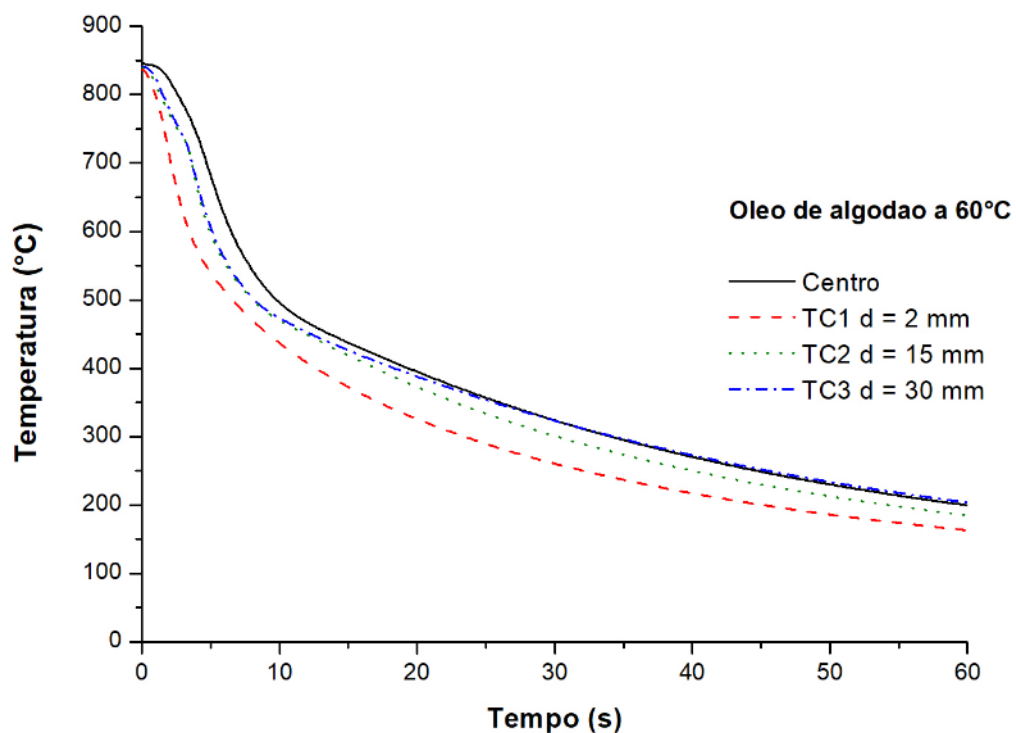
Fonte: Autor.

Figura 18 - Curva da taxa de resfriamento do óleo de milho a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).



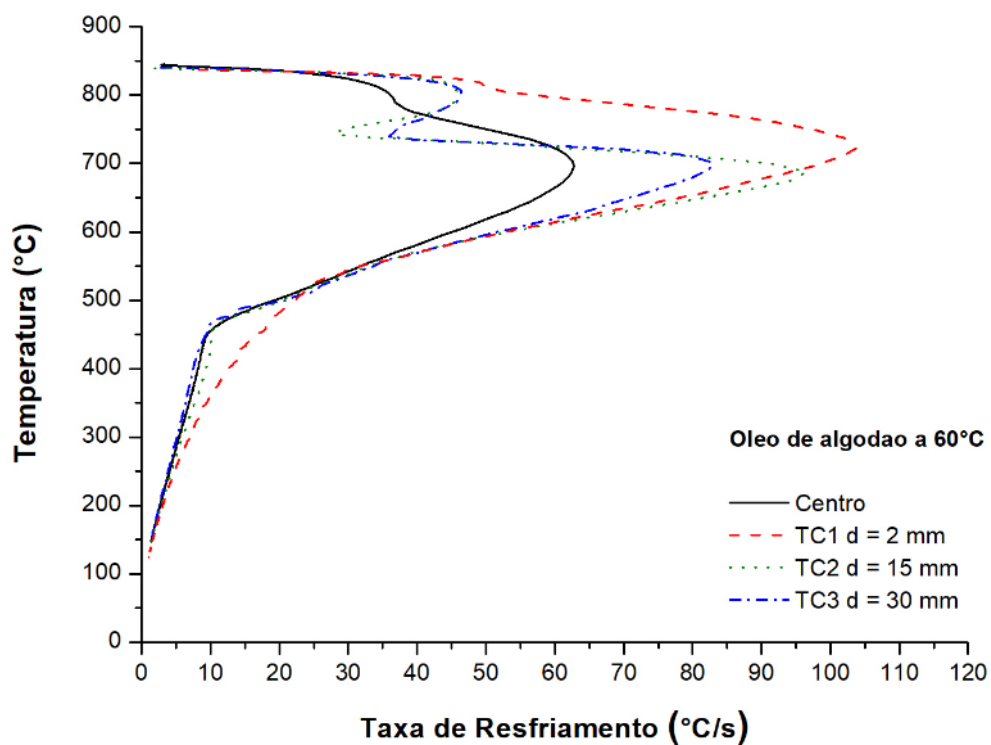
Fonte: Autor.

Figura 19 - Curva de resfriamento tempo-temperatura para o óleo de algodão a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).



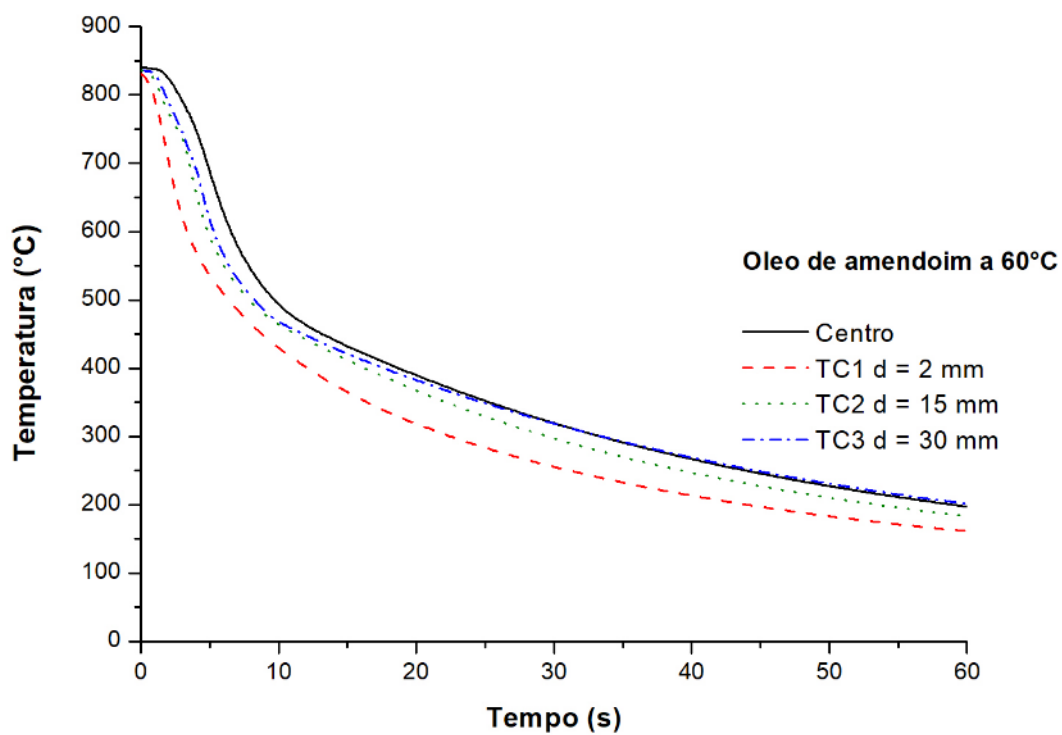
Fonte: Autor.

Figura 20 - Curva da taxa de resfriamento do óleo de algodão a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).



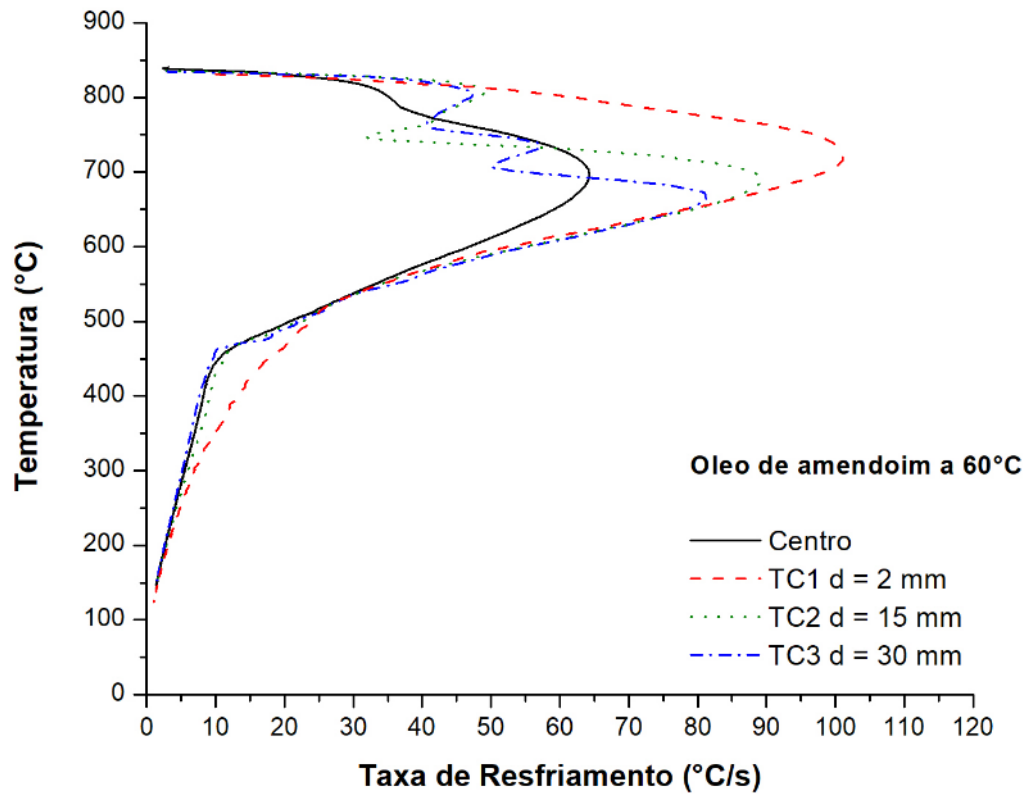
Fonte: Autor.

Figura 21 - Curva de resfriamento tempo-temperatura para o óleo de amendoim a 60 ° C, sem agitação (usando a sonda Tensi).



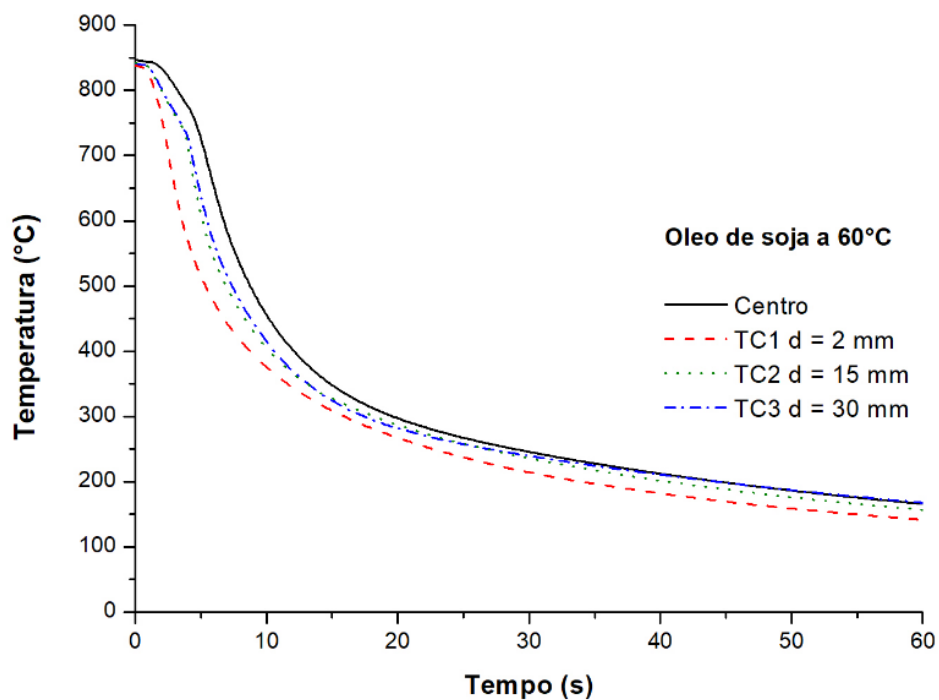
Fonte: Autor.

Figura 22 - Curva da taxa de resfriamento do óleo de amendoim a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).



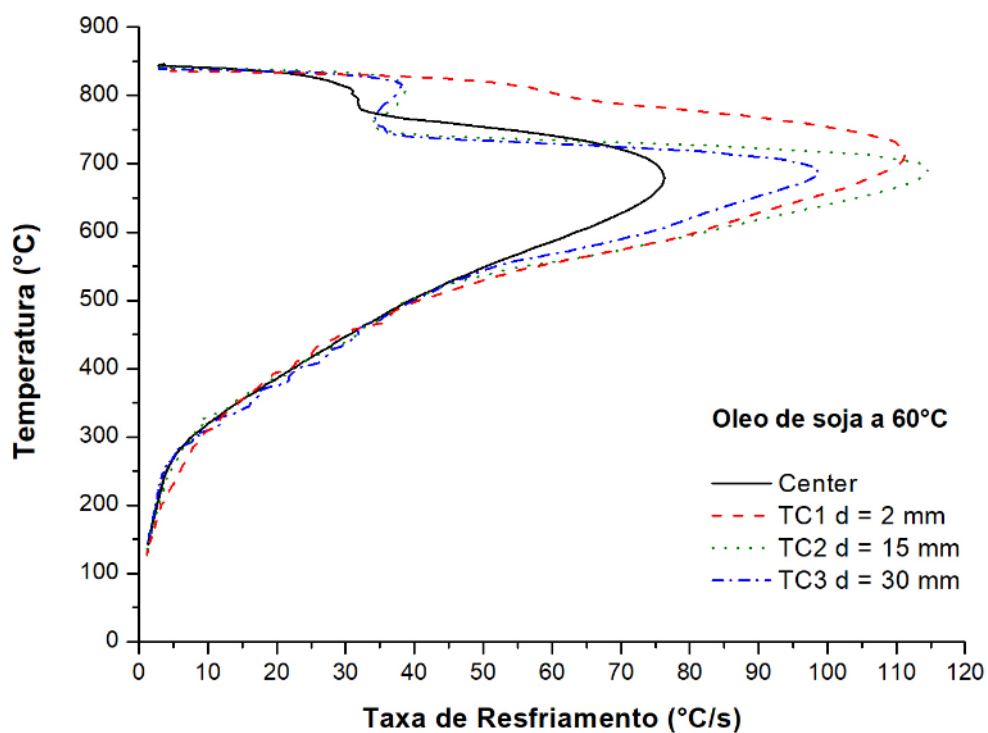
Fonte: Autor.

Figura 23 - Curva de tempo-temperatura de resfriamento para o óleo de soja a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).



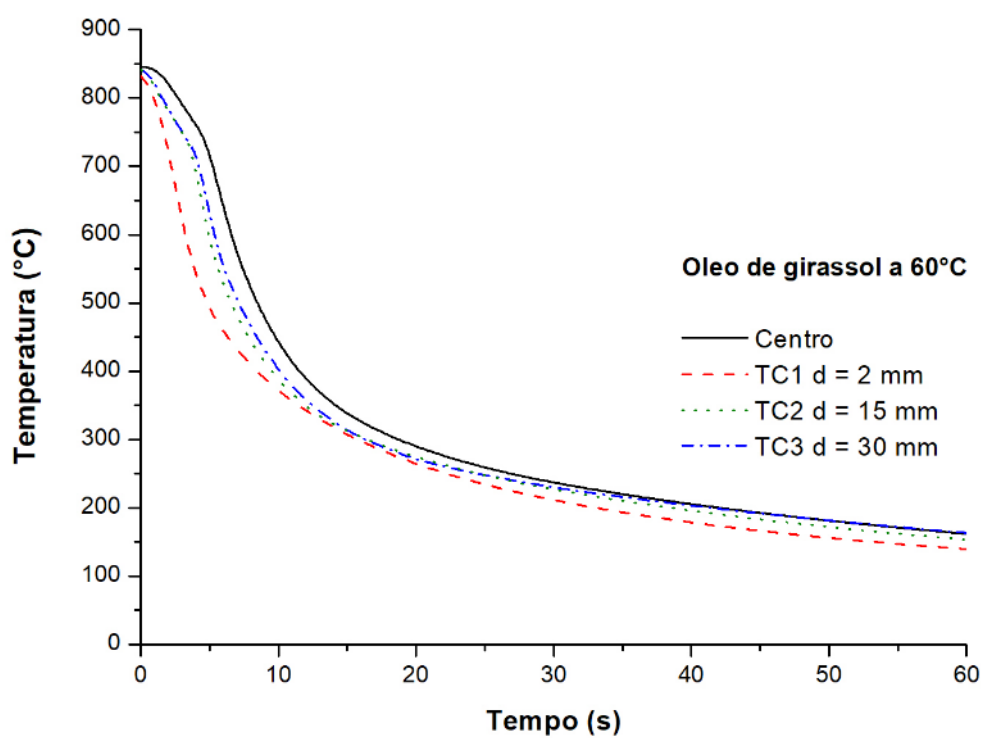
Fonte: Autor.

Figura 24 - Curva da taxa de resfriamento do óleo de soja a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).



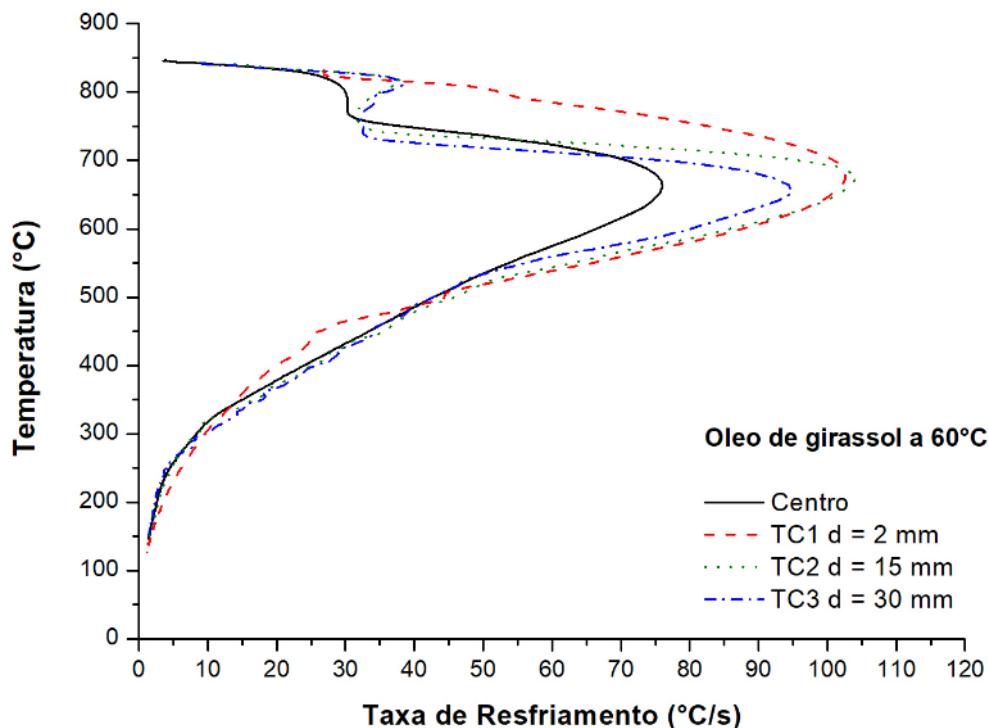
Fonte: Autor.

Figura 25 - Curva de resfriamento tempo-temperatura para o óleo de girassol a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).



Fonte: Autor.

Figura 26 - Curva da taxa de resfriamento do óleo de girassol a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).



Fonte: Autor.

É importante destacar que os óleos vegetais não apresentam ebulição. A temperatura máxima de cozimento para um óleo vegetal é limitada pela temperatura na qual o óleo libera fumos. Os pontos típicos de fumaça para óleos vegetais comuns podem variar entre 121°C a >232°C. Os pontos exatos de fumaça dos óleos vegetais não podem ser citados devido à variação da composição graxa, ao processo de refino, à variedade de sementes e até mesmo o clima e a estação do ano na qual a planta foi cultivada. Mas, como exemplo, pode se citar faixa de valores típicos como: milho (204°C – 213°C), amendoim (216°C a 221°C), algodão (218°C a 227°C), canola (224°C a 229°C), girassol e soja (227°C a 232°C) [54]. Em temperaturas maiores aos pontos de fumaça e à pressão atmosférica, os óleos vegetais se degradam; eles não fervem.

No entanto, os óleos vegetais comerciais disponíveis não são óleos puros de um único componente, mas contêm uma variedade de diferentes estruturas graxas, que depende da sua fonte. Normalmente, eles são refinados por uma variedade de métodos possíveis, mas mesmo após o refino, eles ainda podem conter baixas quantidades de subprodutos. Além das estruturas de monoglicerídeos e diglicerídeos,

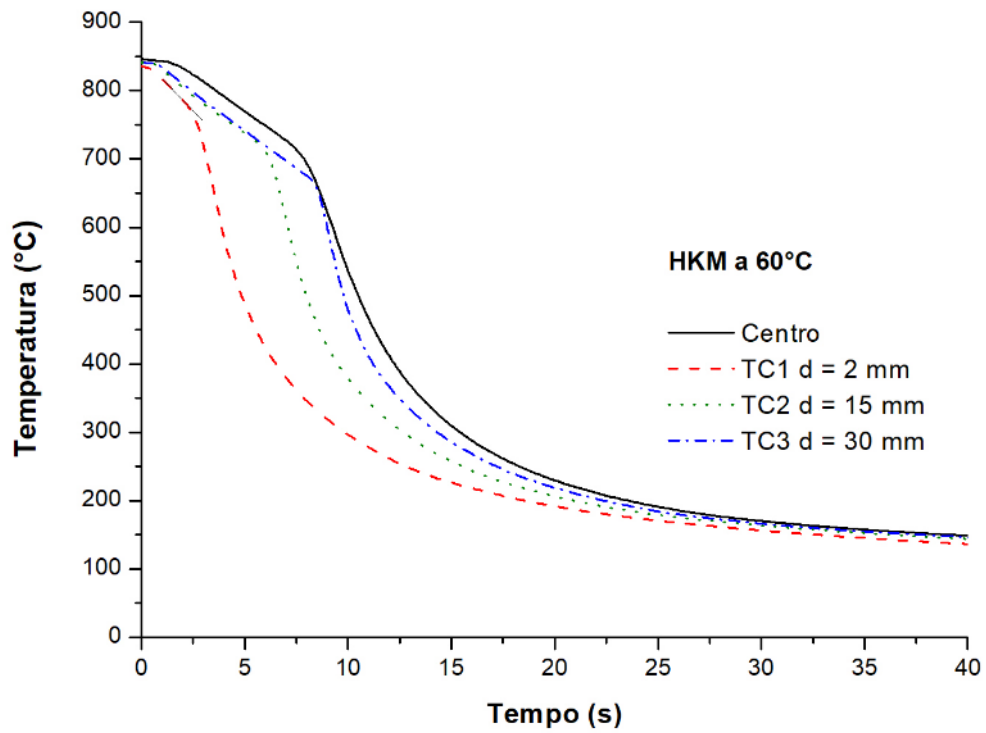
os óleos vegetais também podem conter ácidos graxos livres, tocoferóis, esteróis, compostos fenólicos, fosfolipídios e outras variantes, bem como baixas concentrações de água [50,51]. Alguns destes compostos contribuem para a potencial volatilidade, que pode ser observada como o filme de ebulição durante a imersão em aço quente. A menos que os óleos vegetais comprados sejam mais purificados, todos eles contêm vários desses potenciais subprodutos em concentrações variadas, dependendo do processo de refino e de sua eficácia. Todos os óleos vegetais aqui relatados foram usados em sua condição de compra. No entanto, com base nas curvas de resfriamento obtidas com a sonda Tensi, pode-se afirmar que o óleo de dendê utilizado para este trabalho contém impurezas não triglicéridicas suficientes para exibir o comportamento aparente da camada de vapor observada. As práticas típicas de refino e purificação, bem como, a composição do óleo de dendê comercial são descritas na referência [55].

As curvas de resfriamento obtidas de todos os óleos vegetais na posição de 2 mm, como mostrado na Figura 9, foram claramente as mais rápidas de todas as curvas de resfriamento e indicaram um efeito de resfriamento final relativamente substancial. No entanto, com exceção do óleo de dendê (Figuras 11 e 12), as curvas de resfriamento para as posições de 15 e 30 mm foram quase convergentes, o que indica que, com exceção da posição final, o resfriamento convectivo relativamente uniforme predomina para os demais óleos vegetais avaliados.

Além disso, ao observar o comportamento dos óleos vegetais nas curvas das taxas de resfriamento, nota-se que a taxa de resfriamento máxima ocorre na mesma temperatura para os 4 temporais. Isso demonstra o comportamento de remolhamento dos óleos vegetais, tendo uma melhor homogeneidade no resfriamento. Esse comportamento já é diferente nos óleos minerais em que já temos taxas de resfriamento máximas em diferentes temperaturas para os diferentes termopares.

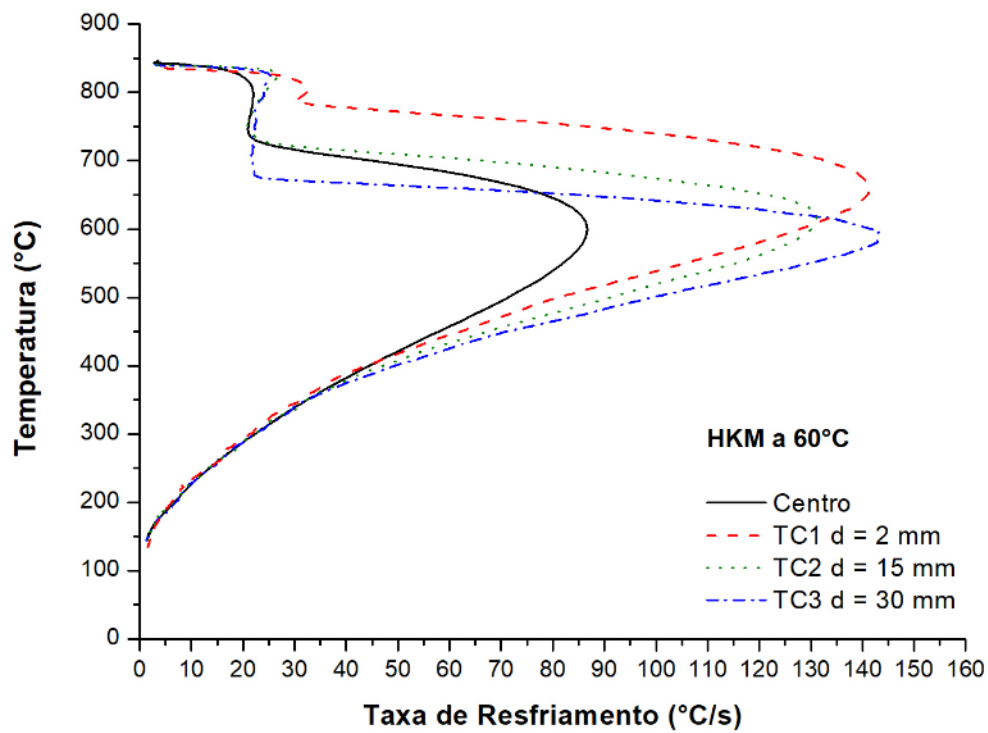
Como esperado, ambos os óleos minerais de têmperas, HKM (“óleo rápido”) (Figuras 27 e 28), e H100 (“óleo convencional”) (Figuras 29 e 30), exibiram regiões de filmes de ebulição bem diferenciadas em seu comportamento nas curvas de resfriamento. Além disso, as curvas de resfriamento da superfície em cada posição da sonda foram bem diferenciadas, indicando uma ação de molhamento durante o processo de têmpera, sendo um resquício não uniforme e inerentemente em relação ao comportamento de resfriamento dos óleos vegetais como um grupo.

Figura 27 - Curva de tempo-temperatura de resfriamento para o HKM a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).



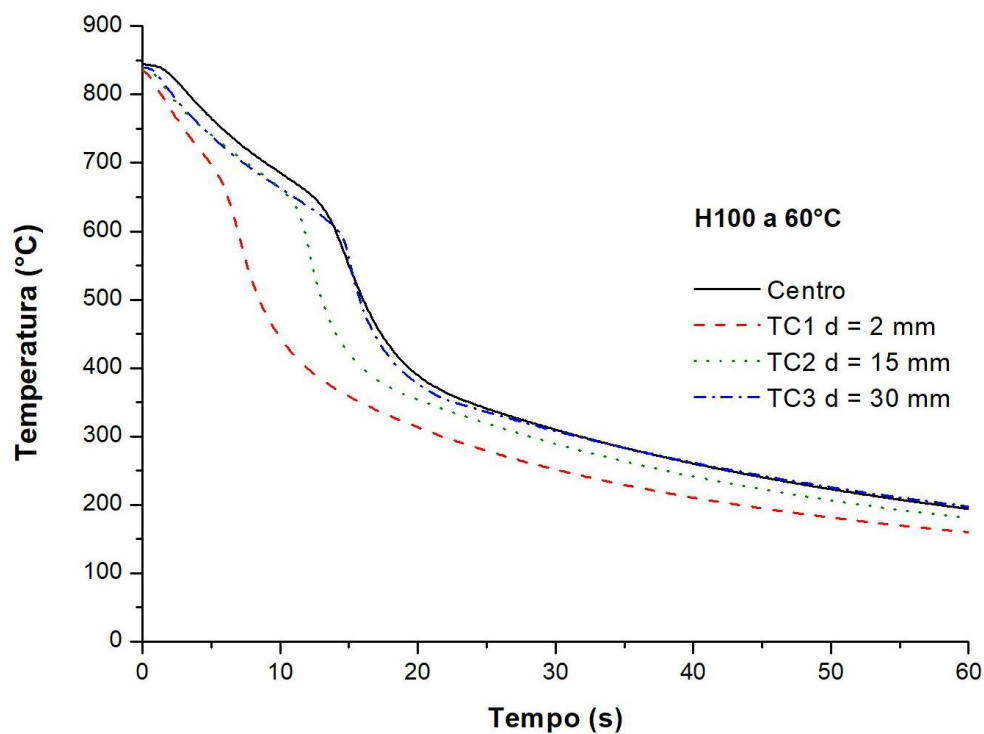
Fonte: Autor.

Figura 28 - Curva da taxa de resfriamento do HKM a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).



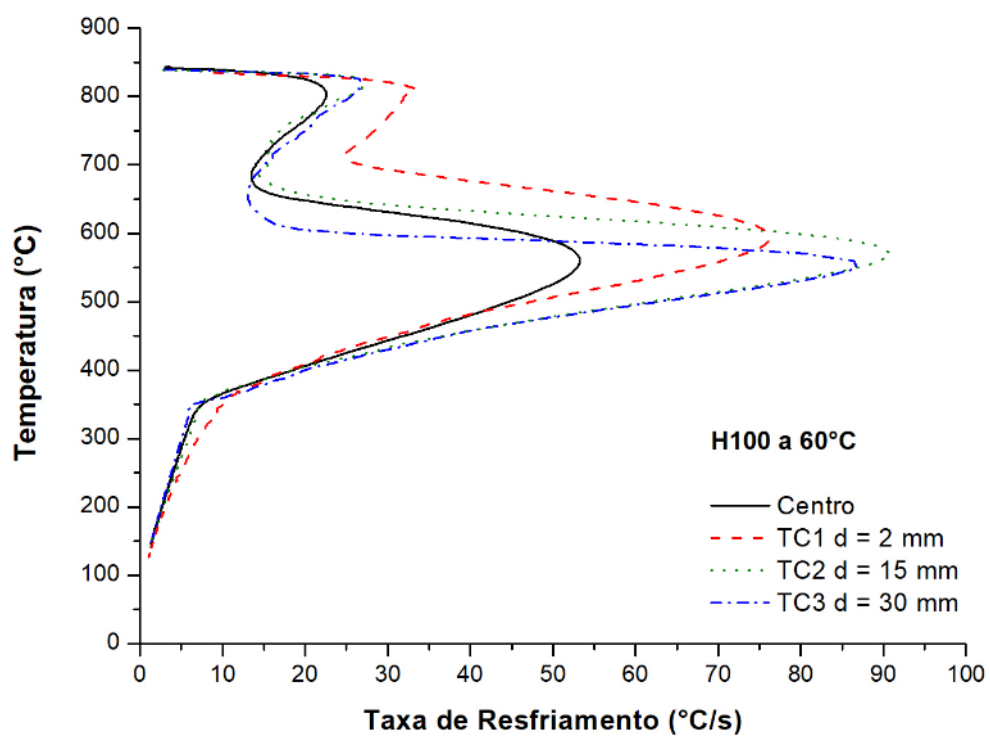
Fonte: Autor.

Figura 29 - Curva de tempo-temperatura de resfriamento para o H100 a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).



Fonte: Autor.

Figura 30 - Curva da taxa de resfriamento do H100 a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi).



Fonte: Autor.

4.3 Diferenciação das propriedades de resfriamento pela parametrização das curvas de resfriamento

O comportamento de resfriamento de uma têmpera pode ser diferenciado e quantificado pela parametrização da curva de resfriamento, conforme descrito na ASTM D6200 [49] e ilustrado na figura 10. Esses parâmetros foram determinados a partir dos dados de resfriamento tempo-temperatura obtidos do termopar na região geométrica central da sonda Tensi (figura 9) e estão resumidos na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros de resfriamento obtidos pela ASTM D6200 em temperatura de banho de 60°C sem agitação.

Curva de Resfriamento Parâmetros obtidos a 60°C	Óleos Vegetais							Óleos Minerais		
	Canola	Coco	Milho	Algodão	Dendê	Amendoim	Soja	Girassol	HKM (Rápido)	H100 (Lento)
t_{A-B} (s)	3,8	5,1	4,4	2,7	6,6	3,1	3,7	3,4	6,4	10,7
T_{A-B} (°C)	778	720	765	795	729	786	787	776	737	678
$CR_{DH\ min}$ (°C/s)	30,3	33,3	29,9	36,4	18,9	36,6	31,8	30,2	21,3	13,5
CR_{max} (°C/s)	77,7	52,4	75,2	62,7	69,4	64,3	76,3	76,0	86,7	53,2
T_{CRmax} (°C)	665	630	662	697	629	695	679	660	599	557
CR_{700} (°C/s)	71,9	36,2	68,3	62,6	35,7	64,2	75	70,6	4,8	14,0
CR_{300} (°C/s)	9,8	5,6	8,6	5,5	6,1	5,5	7,7	8,3	22,1	5,4
CR_{200} (°C/s)	2,5	2,8	2,6	2,6	2,8	2,7	2,6	2,6	6,7	2,6
$t_{700°C}$ (s)	5,5	5,7	5,8	4,7	7,8	4,8	5,4	5,2	7,8	9,0
$t_{300°C}$ (s)	17,6	34	18,8	34,2	23,2	33,5	19,6	18,8	15,5	31,8
$t_{200°C}$ (s)	38,6	58,8	42,7	59,8	48,0	59,1	44,4	42,1	23,5	57,8

Fonte: Autor.

Dos óleos vegetais avaliados, o óleo de dendê exibiu o maior tempo de transição da camada de vapor para a nucleação de bolhas (t_{A-B}). Este tempo de transição

representa o período da duração do filme de vapor observado. O óleo de algodão exibiu o menor tempo de transição. Os demais óleos vegetais exibiram tempos de transição relativamente semelhantes ao observado para o óleo de algodão.

A temperatura em que ocorreu a transição aparente da formação da camada de vapor para a nucleação de bolhas (T_{A-B}) foi menor para os óleos de dendê e de coco e mais alta para o óleo de algodão. As temperaturas de transição (T_{A-B}) para os demais óleos vegetais foram intermediárias entre esses dois limites, porém mais próximas das temperaturas de transição exibidas pelo óleo de algodão.

Provavelmente, dois dos parâmetros mais críticos sejam a taxa máxima de resfriamento (CR_{max}) e a temperatura na qual isso ocorre ($T_{CR_{max}}$). Para os óleos vegetais avaliados, o óleo de coco apresentou a menor taxa máxima de resfriamento (CR_{max}), e as maiores taxas máximas de resfriamento (CR_{max}) foram observadas nos óleos de canola, soja e girassol. Os demais valores de CR_{max} foram semelhantes, embora ligeiramente inferiores aos valores mais altos. Para a temperatura na qual a taxa máxima de resfriamento ocorreu, os óleos de coco e de dendê apresentaram as temperaturas mais baixas ($T_{CR_{max}}$) e o óleo de amendoim, a temperatura mais alta. Os valores de $T_{CR_{max}}$ para os demais óleos foram intermediários entre esses limites.

As taxas de resfriamento a 300°C (CR_{300}) e 200°C (CR_{200}) foram determinadas e também apresentadas na Tabela 3. Destas, o valor mais frequentemente citado é o valor de CR_{300} . O maior valor de CR_{300} foi obtido para o óleo de canola, seguidos pelos óleos de milho e girassol. Os demais óleos vegetais exibiram valores intermediários.

Os tempos de resfriamento a 300°C (t_{300}) e 200°C (t_{200}) também foram determinados. Dos óleos vegetais mostrados na Tabela 3, os óleos de coco, algodão e amendoim exibiram os maiores valores de t_{300} . Os óleos de canola, milho, soja e girassol apresentaram os menores valores de t_{300} . O óleo de dendê exibiu um tempo de resfriamento intermediário. A temperatura de 200°C, o menor valor de t_{200} foi observado para o óleo de canola e os maiores t_{200} foram obtidos para os óleos de coco, algodão e amendoim. Os demais óleos vegetais exibiram valores de t_{200} intermediários.

Os parâmetros de resfriamento para os óleos vegetais diferem entre si, mas essas diferenças devem ser entendidas em relação ao desempenho do resfriamento em comparação aos óleos minerais. O óleo rápido (HKM) exibiu um menor tempo de duração da camada de vapor (t_{A-B}), na qual ocorreu em uma temperatura mais alta (T_{A-B}) quando comparado ao óleo lento (h100). Entretanto, com relação a esses dois

parâmetros de resfriamento, todos os óleos vegetais exibiram tempos de transição substancialmente mais curtos (t_{A-B}), com exceção dos óleos de dendê e coco, em que ocorreram com temperaturas de transição mais altas (T_{A-B}) quando comparados aos óleos minerais.

A taxa máxima de resfriamento (CR_{max}) do óleo mineral rápido (HKM) foi substancialmente maior do que qualquer um dos óleos vegetais, e a CR_{max} para o óleo convencional (H100) foi muito menor que qualquer outro óleo vegetal. As temperaturas de transição nas quais a taxa máxima de resfriamento (T_{CRmax}) ocorre foram mais baixas para ambos óleos minerais em relação aos óleos vegetais. Isso seria esperado, já que a duração da camada de vapor é mais longa para os óleos minerais. Avaliados em conjunto, em relação à temperatura, esses dados sugerem que as propriedades de resfriamento baseadas nos tempos e taxas de resfriamento dos óleos vegetais são intermediárias, entre os óleos minerais rápido e lento.

É geralmente assumido que, para otimizar o controle da distorção e minimizar o potencial das trincas, as taxas de resfriamento a 300°C ($CR_{300°C}$) devem ser minimizadas. A temperatura de 300°C foi selecionada, uma vez que se aproxima da temperatura de transição da martensita para muitos aços carbonos. Os maiores valores de CR_{300} e CR_{200} entre todos os fluidos avaliados foram exibidos pelo óleo mineral rápido (HKM), provavelmente devido à sua viscosidade significativamente menor em relação aos outros óleos avaliados (Tabela 3). Como esperado, baseado em sua viscosidade, o CR_{300} foi substancialmente menor para o óleo mineral “lento” (H100). Contudo, as taxas de resfriamento CR_{300} para os óleos vegetais, coco, algodão e amendoim foram essencialmente equivalentes ao óleo convencional lento (H100). O valor de CR_{300} para o óleo de dendê foi semelhante, mas um pouco mais rápido que o óleo vegetal mais lento. Embora os valores de CR_{300} para os demais óleos vegetais, canola, milho, soja e girassol tenham sido um pouco mais rápidos que os exemplos mais lentos, todos os óleos foram consideravelmente mais lentos que o óleo rápido mineral (HKM). Os valores de CR_{200} foram todos comparativamente mais lentos e todos substancialmente mais lentos que o óleo mineral rápido (HKM).

Os tempos de resfriamento mais rápido para 300°C (t_{300}) foram obtidos para o óleo mineral rápido (HKM), seguidos dos óleos de canola, milho, soja e girassol exibindo tempos apenas um pouco mais lentos. Os valores mais baixos de t_{300} foram obtidos para óleo de coco, algodão e amendoim, comparáveis ao tempo de resfriamento do t_{300} exibido pelo óleo de temperatura convencional (H100). Os demais

óleos vegetais exibiram valores intermediários de t_{300} . Resultados semelhantes foram obtidos nos tempos de resfriamento a 200°C (t_{200}).

Com relação à habilidade dos óleos vegetais promoverem controle da distorção e minimização de trincas, os dados das curvas de resfriamentos obtidos sugerem que os óleos de coco, algodão e amendoim forneceriam os melhores resultados, embora todos os óleos vegetais avaliados forneçam resultados superiores ao óleo mineral rápido (HKM).

4.4 Comparações do fluxo de calor superficial (Q_{max})

Os valores de fluxo de calor superficial obtidos ao resfriar a sonda de múltiplos termopares nos óleos vegetais deste estudo, comparados com fluidos minerais rápido e convencional, são apresentados na Tabela 5 e nas Figuras de 31 a 40. A metodologia computacional utilizada para obter os valores do fluxo de calor na superfície foi descrita em detalhes no artigo científico “Quenchant Cooling Curves, Rewetting, and surface Heat Flux Properties of Vegetable Oils” [41].

Tabela 5 – Fluxos de calor superficial determinados para os óleos vegetais e fluidos derivados do petróleo.

Óleos Vegetais	Fluxo de calor superficial		
	t_{max} (s)	T_{max} (°C)	$Q_{max} \times 10^6$ (Wm ⁻²)
Canola	4,375	535,61	2,54
Coco	5,750	510,35	1,56
Milho	4,750	531,65	2,45
Algodão	3,750	554,06	2,26
Dendê	6,750	486,25	2,38
Amendoim	3,625	562,43	2,08
Soja	4,000	583,24	2,58
Girassol	4,125	532,88	2,35
Óleos Minerais			
HKM (Rápido)	6,875	441,44	2,89
H100 (Lento)	12,125	422,75	2,08

Fonte: Autor.

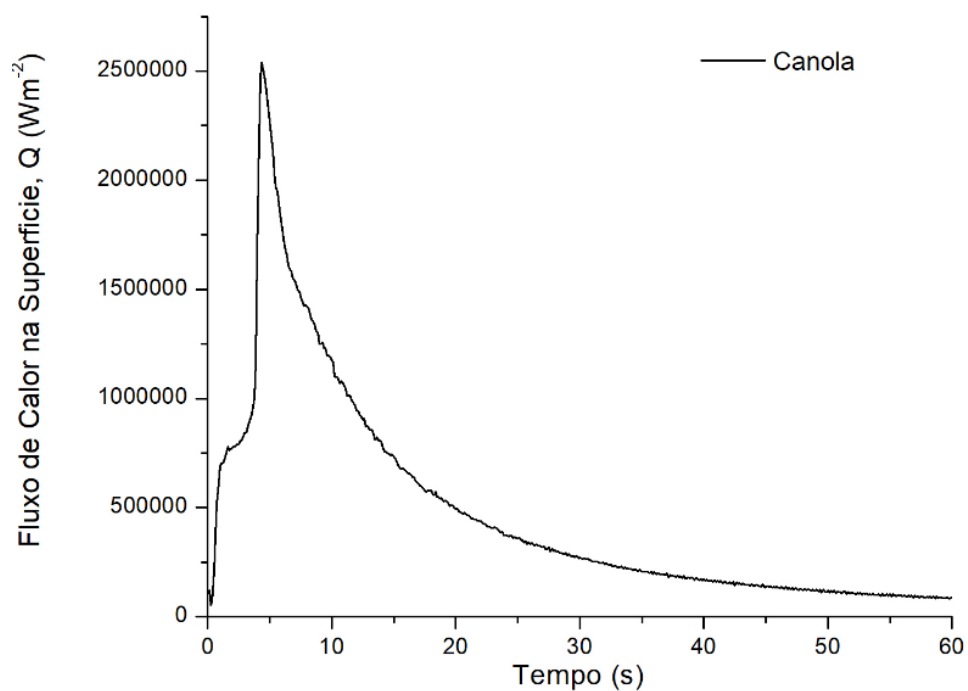
Entre os óleos vegetais, os menores valores de fluxo de calor, Q_{max} , foram obtidos para o óleo de coco e amendoim, sendo esses valores comparáveis ao valor de Q_{max} obtido para o óleo mineral convencional (H100). Os demais óleos vegetais, bem como,

o fluido convencional (H100) exibiram um valor de Q_{\max} menor do que o óleo de têmpera rápido (HKM). Os óleos de canola e soja apresentaram os maiores valores de Q_{\max} , entretanto ainda menor do que o óleo mineral rápido (HKM). Os demais óleos vegetais, milho, algodão, dendê e girassol apresentaram valores intermediários entre os dois óleos minerais de têmpera.

Com a exceção do óleo de dendê (devido ao comportamento prolongado de ebulição do filme), todos os óleos vegetais exibiram temperaturas de transição nas quais Q_{\max} ocorre (T_{\max}). Os tempos de resfriamentos para atingir Q_{\max} (t_{\max}) foram muito mais longos para o óleo mineral convencional (H100) do que para o óleo mineral rápido (HKM) e de qualquer um dos óleos vegetais estudados. Todos os óleos vegetais exibiram valores t_{\max} mais curtos do que o óleo rápido (HKM), embora o valor t_{\max} para o óleo de dendê (seguido do óleo de coco) tenha sido aproximadamente comparável. Os menores valores de t_{\max} foram obtidos para os óleos de algodão e amendoim.

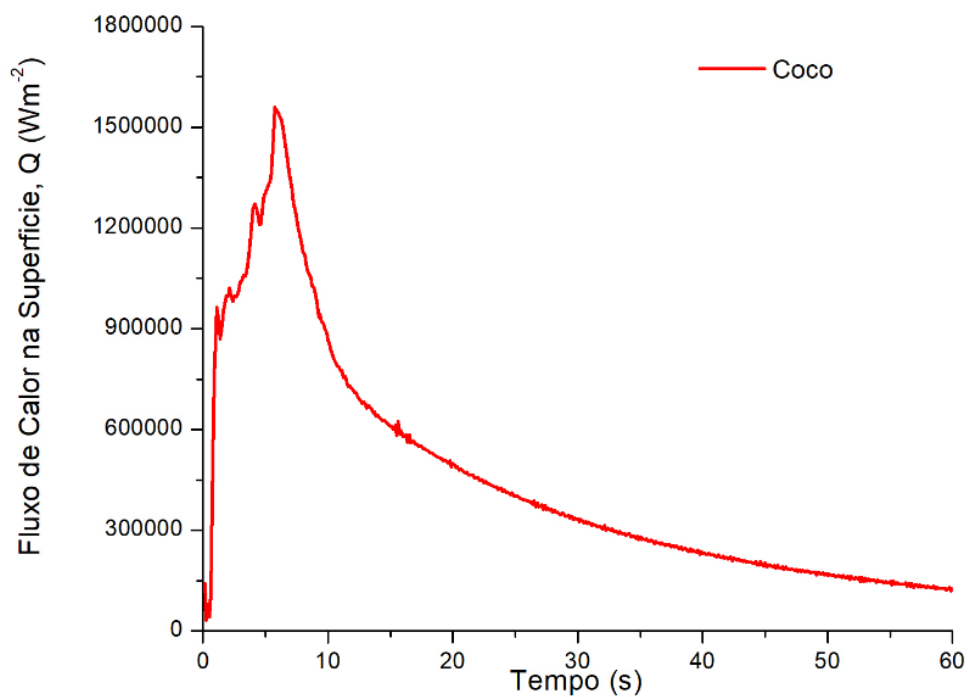
Com base na caracterização do Q_{\max} dos óleos vegetais, os óleos de coco e amendoim parecem ter o desempenho mais semelhante ao de um óleo mineral convencional, e os óleos de canola e soja parecem ser mais comparáveis ao resfriamento com um óleo mineral rápido. Os outros óleos vegetais exibiram fluxo de calor máximo intermediário.

Figura 31 - Fluxo de calor da superfície em função do tempo para o óleo de canola a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi e obtendo os dados do termopar da linha central).



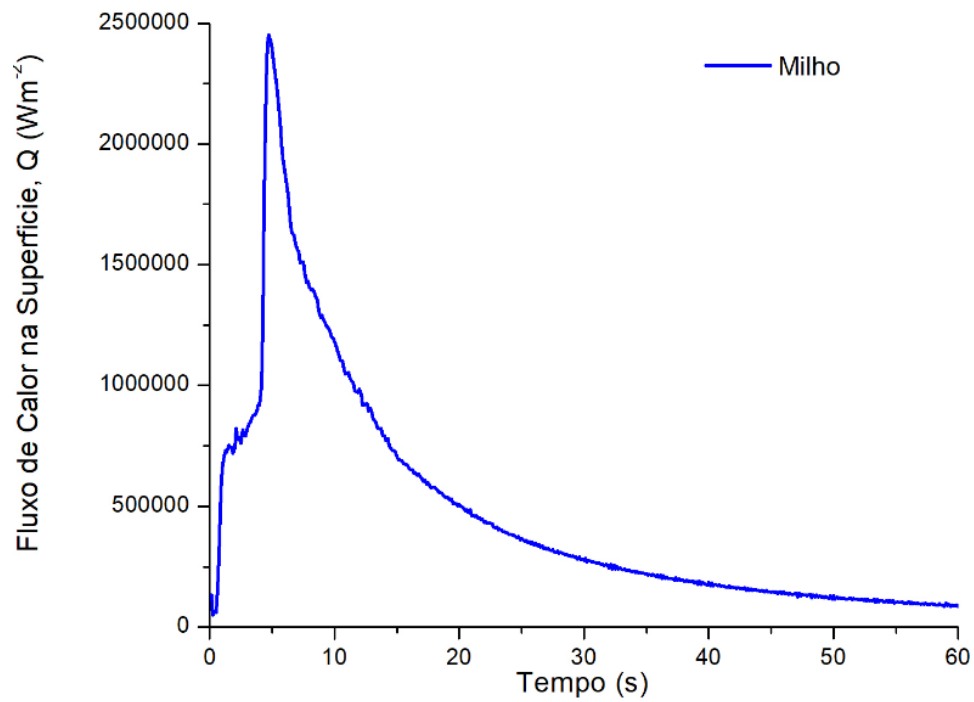
Fonte: Autor.

Figura 32 - Fluxo de calor da superfície em função do tempo para o óleo de coco a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi e obtendo os dados do termopar da linha central).



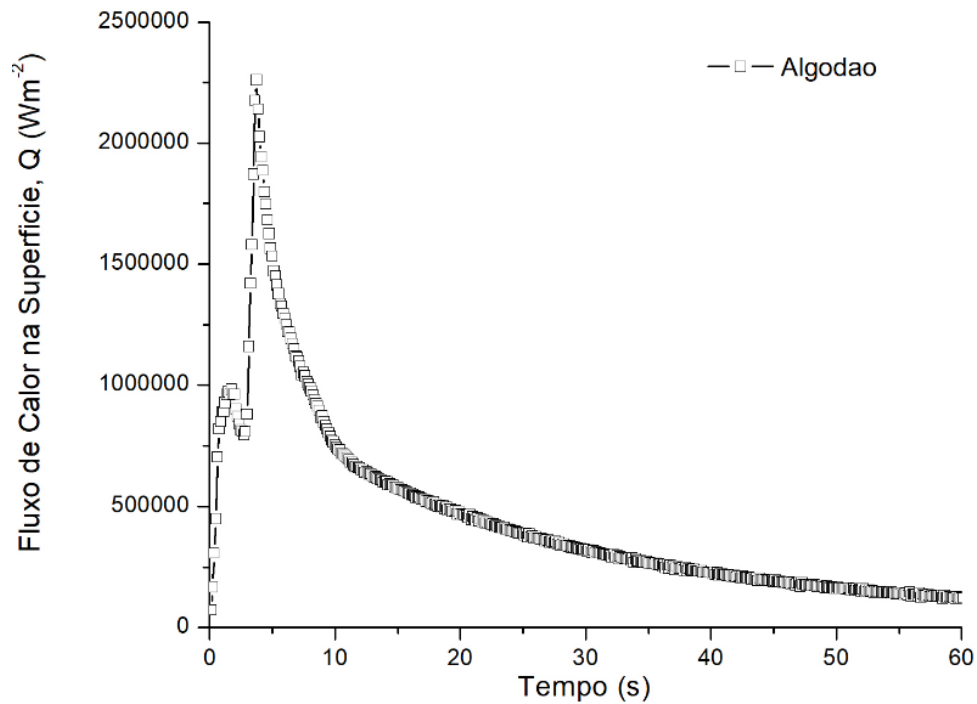
Fonte: Autor.

Figura 33 - Fluxo de calor da superfície em função do tempo para o óleo de milho a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi e obtendo os dados do termopar da linha central).



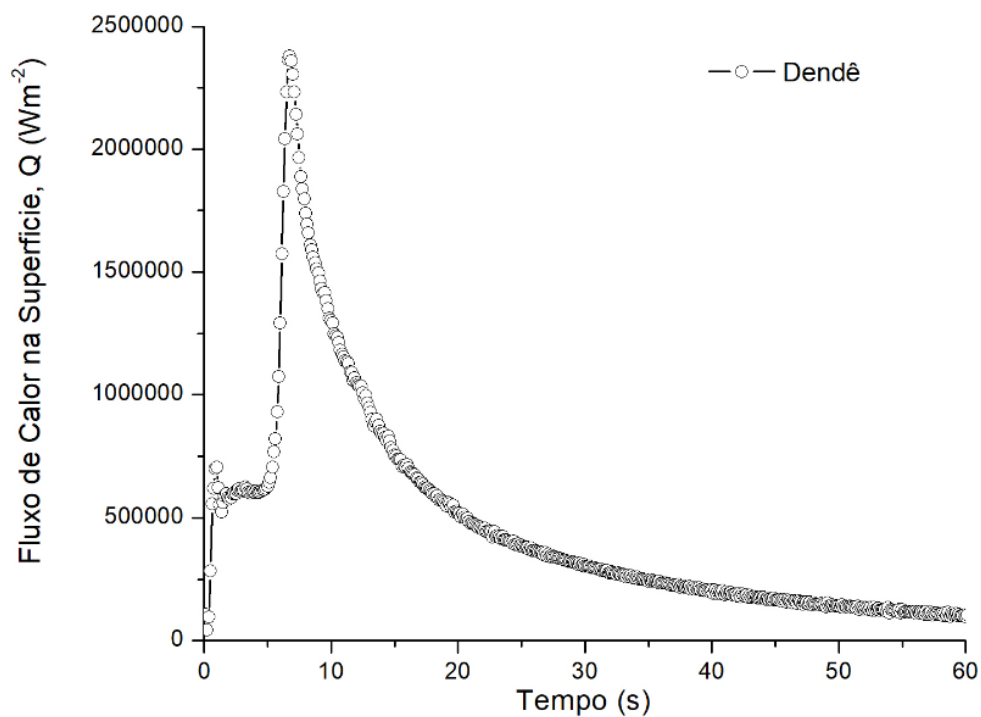
Fonte: Autor.

Figura 34 - Fluxo de calor da superfície em função do tempo para o óleo de algodão a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi e obtendo os dados do termopar da linha central).



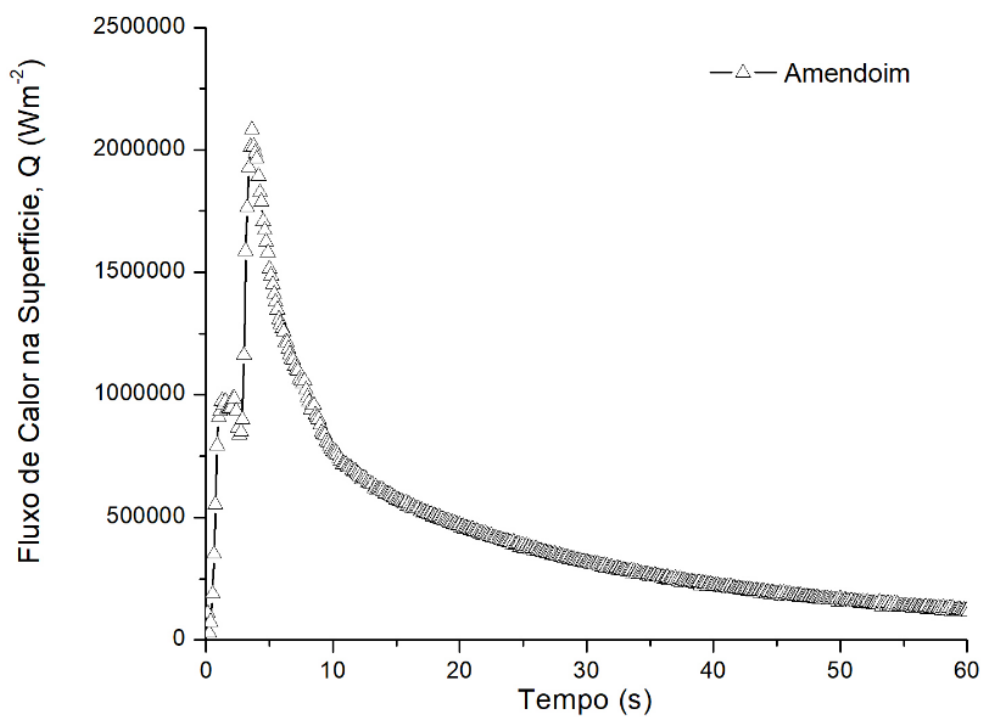
Fonte: Autor.

Figura 35 - Fluxo de calor da superfície em função do tempo para o óleo de dendê a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi e obtendo os dados do termopar da linha central).



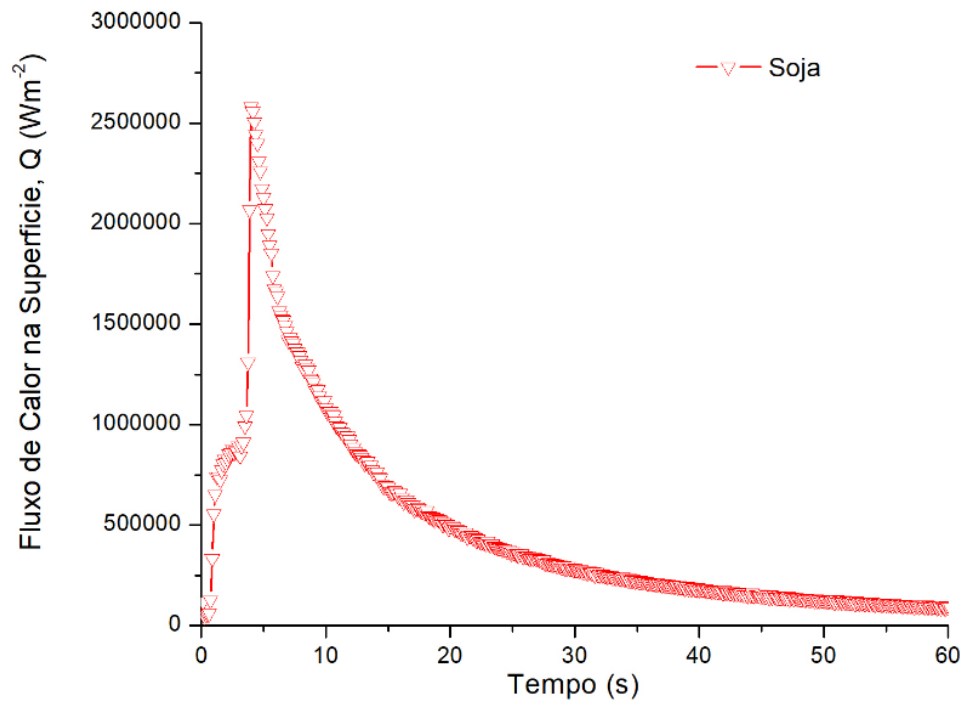
Fonte: Autor.

Figura 36 - Fluxo de calor da superfície em função do tempo para o óleo de amendoim a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi e obtendo os dados do termopar da linha central).



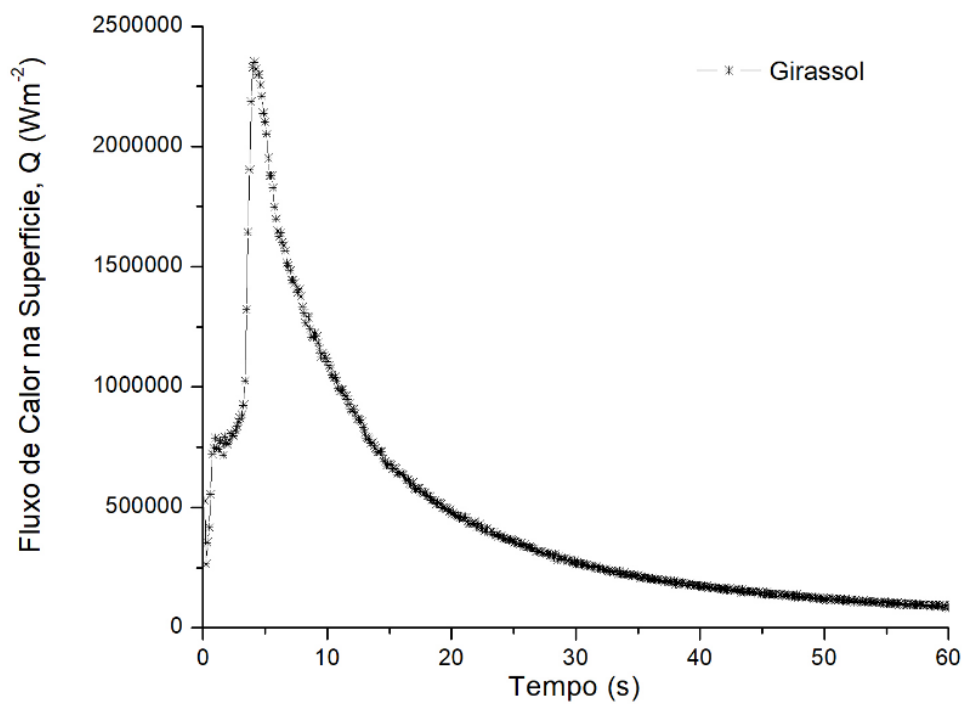
Fonte: Autor.

Figura 37 - Fluxo de calor da superfície em função do tempo para o óleo de soja a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi e obtendo os dados do termopar da linha central).



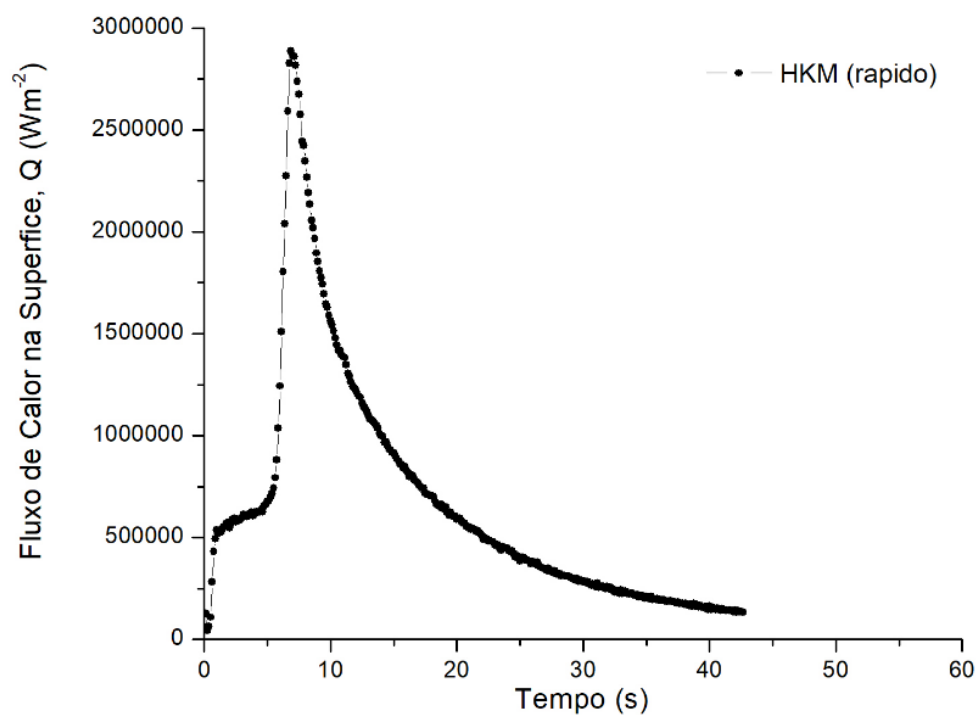
Fonte: Autor.

Figura 38 - Fluxo de calor da superfície em função do tempo para o óleo de girassol a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi e obtendo os dados do termopar da linha central).



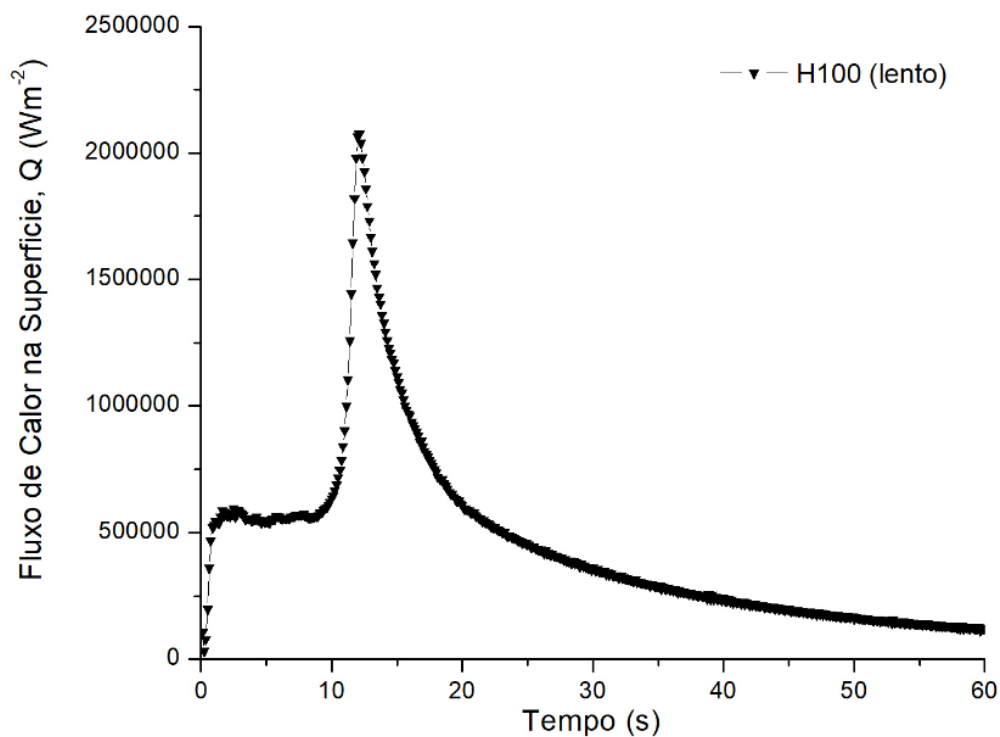
Fonte: Autor.

Figura 39 - Fluxo de calor da superfície em função do tempo para o HKM a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi e obtendo os dados do termopar da linha central).



Fonte: Autor.

Figura 40 - Fluxo de calor da superfície em função do tempo para o H100 a 60°C, sem agitação (usando a sonda Tensi e obtendo os dados do termopar da linha central).



Fonte: Autor.

5 CONCLUSÃO

As propriedades de viscosidade, remolhamento, desempenho da curva de resfriamento e transferência de calor de vários óleos vegetais comuns disponíveis no mercado foram comparados. As propriedades obtidas foram comparadas com dois fluidos derivados do petróleo disponíveis comercialmente: um óleo “rápido” (acelerado), Houghto-Quench HKM, e um óleo convencional (lento), Houghto-Quench H100.

Uma comparação das propriedades de viscosidade mostrou que todos os óleos vegetais exibiram viscosidades cinemáticas a 40°C na faixa de aproximadamente 28-39 cSt, com o óleo de coco apresentando a menor (27,9 cSt) e o óleo de amendoim a maior viscosidade (38,6 cSt). Essas viscosidades foram maiores que do que aquelas exibidas pelos óleos minerais, nos quais o óleo rápido (HKM) apresentou uma viscosidade de 13,7 cSt e o óleo convencional (H100) de 19,5 cSt. Todas as viscosidades obtidas foram semelhantes aos valores relatados na literatura. Os índices de viscosidade (VI) obtidos para todos os óleos vegetais foram muito superiores aos valores obtidos para os óleos minerais, indicando que os óleos vegetais possuem significativamente menor variação de viscosidade em função da temperatura do que os óleos minerais rápido e convencional.

O comportamento da curva de resfriamento de cada óleo vegetal e mineral foi obtido a 60°C sem agitação, conforme a ASTM D6200, usando a sonda Inconel 600 de múltiplos termopares do tipo Tensi. Com exceção do óleo de dendê, todos os óleos vegetais exibiram evidências mínimas de camadas de vapor. As propriedades de remolhamento sugeriram excelente uniformidade de têmpera com predominante transferência de calor convectiva. Como os óleos vegetais não fervem, quaisquer propriedades das camadas de vapor observadas, como para o óleo de dendê, sugerem a presença de quantidades significativas de subprodutos voláteis que não são adequadamente removidos pelo processo de refino. Curiosamente, neste estudo, o óleo de amendoim não exibiu a presença da camada de vapor. Ambos os fluidos minerais exibiram um movimento de molhamento frontal do fundo da sonda Tensi para a posição do termopar da superfície superior não observada em nenhum dos óleos vegetais.

Uma análise extensa das curvas de resfriamento obtidas usando o termopar colocada no centro geométrico da sonda forneceu dados que podem ser resumidos da seguinte forma:

- (1) Para os óleos vegetais analisados, o óleo de coco apresentou a menor taxa máxima de resfriamento, e as maiores taxas máximas de resfriamento foram observadas para os óleos de canola, soja e girassol.
- (2) Para a temperatura na qual ocorreu a taxa máxima de resfriamento, o óleo de coco e dendê exibiram as mais baixas temperaturas de T_{CRmax} e o óleo de amendoim exibiu a temperatura mais alta. Os valores de T_{CRmax} para os óleos restantes foram intermediários entre esses limites.
- (3) Das taxas de resfriamento a temperaturas mais baixas, a taxa de resfriamento a 300 °C (CR_{300}) é geralmente a mais comumente relatada. A maior CR_{300} foi obtida com o óleo de canola, seguida pelos óleos de milho e girassol. Os demais óleos vegetais exibiram valores intermediários.
- (4) Os parâmetros da curva de resfriamento da linha central da sonda Tensi para os óleos minerais rápido e convencional demonstraram que o óleo rápido (HKM) exibiu uma taxa de resfriamento máxima (CR_{max}) mais rápida, com menor tempo de duração da camada de vapor (t_{A-B}) e ocorrendo a uma temperatura mais alta (T_{A-B}) ao compará-lo com o óleo lento (H100). A CR_{300} também foi maior para o óleo rápido (HKM). O comportamento das curvas de resfriamento dos óleos vegetais foi intermediário aos dados obtidos para os óleos de resfriamento minerais.
- (5) Sobre a habilidade potencial de resfriamento dos óleos vegetais para promover um controle de distorção e minimização de trincas, os dados das curvas de resfriamentos sugerem que os óleos de coco, algodão e amendoim forneceriam os melhores resultados, embora todos os óleos vegetais avaliados forneçam resultados superiores ao óleo rápido mineral (HKM).

Finalmente, os valores do fluxo máximo de calor (Q_{max}) foram determinados para os óleos vegetais e óleos minerais estudados. Os dados obtidos neste estudo demonstraram que o óleo mineral rápido (HKM) exibiu um Q_{max} significativamente maior do que qualquer outro óleo (vegetal ou do óleo convencional -H100). O óleo de canola apresentou o menor Q_{max} , e o óleo de amendoim e o óleo convencional (H100)

apresentaram valores comparáveis de Q_{\max} . Os demais óleos vegetais exibiram valores de Q_{\max} intermediários aos óleos minerais.

6 REFERÊNCIAS

- [1] SOUZA, E. C.; FERNANDES, M. R.; AUGUSTINHO, S. C.; CANALE, L. C. F.; TOTTEN, G. E. Comparison of structure and quenching performance of vegetable oils. **Journal of ASTM International**, v.6, n.9, p.1-25, 2009. Doi: <https://doi.org/10.1520/JAI102188>.
- [2] SOUZA, E. C.; CANALE, L. C. F.; SARMIENTO, G. S.; AGALLOTIS, E.; CARRARA, J. C.; SCHICCHI, D. S.; TOTTEN, G. E. Heat transfer properties of a series of oxidized and unoxidized vegetable oils in comparison with petroleum oil-based quenchants. **Journal of Materials Engineering Performance**, v.22, n.7, p.1871-1878, 2013. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-013-0514-2>.
- [3] RAMESH, G.; PRABHU, K. N. Wetting and cooling performance of vegetable oils during quench hardening. **Heat Transfer-Asian Research**, v.45, n.4, p.342-357, 2016.
- [4] NAYAK, U.; PRABHU, K. N. Effect of section thickness on heat transfer during quenching in vegetable oils. **Materials Performance and Characterization**, v.7, n.1, p.384-396, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1520/MPC20180084>.
- [5] SILVA, A. L. C.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. São Paulo: Edgard Blucher, 1998.
- [6] KRAUSS, G. **Steels: heat treatment and processing principles**. Ohio: ASM International, 1989.
- [7] OTERO, R. L. S. **Potencialidade do uso de formulações do óleo de soja epoxidado e éster metílico de ácido graxo como fluidos de resfriamento no tratamento térmico de têmpera de aços**. 2014. 254 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
- [8] CANALE, L. C. F.; RUGGIERI, J. E.; CRNKOVIC, O.R.; TOTTEN, G.E. Brazilian quenching oils: classification of quench severity. **Heat Treatment of Metals**, v.27, n.294, p.48-52, 2002.
- [9] LIŠČIĆ, B.; TENSI, H. M.; LUTY, W. (Ed.). **Theory and technology of quenching: a handbook**. 1992. Doi: 10.1007/978-3-662-01596-4.
- [10] TOTTEN, G. E.; BATES, C. E.; CLINTON, N. **Handbook of quenchants and quenching technology**. Ohio: ASM international, 1993.
- [11] TOTTEN, G. **Steel heat treatment: metallurgy and technologies**. 2nd ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006.
- [12] TENSI, H.; STICH, A.; TOTTEN, G. Quenching and quenching technology. In: TOTTEN, G. **Steel heat treatment: metallurgy and technologies**. 2nd ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006. p.539-605.

- [13] KÜNZEL, T. **Einfluss der wiederbenetzung auf die allotrope modifikationsänderungtauchgekühlter metallkörper**. 1986. Ph.D. thesis - Technical University of Munich, Munich, Germany, 1986.
- [14] TOTTEN, G. E.; TENSI, H. M. Using conductance data to characterize quenchants. **Heat Treating Progress**, v.2, n.5, p.1-4, 2002.
- [15] FERNANDES, P.; PRABHU, K. N. Comparative study of heat transfer and wetting behaviour of conventional and bioquenchants for industrial heat treatment. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.51, n.3, p.526-538, 2008.
- [16] BASHFORD, A.; MILLS, A. The Development of improved additives for quenching oils using laboratory simulations. **Heat Treatment of Metals**, v.11, n.1, p.9-14, 1984.
- [17] TOTTEN, G.; HOWES, M.; INQUE, T. **Handbook of residual stress and deformation of steel**. Ohio: ASM International, 2002.
- [18] PENHA, R. N.; CANALE, L. C. F.; TOTTEN, G.; SARMIENTO, G.S.; VENTURA, J. Simulation of heat transfer properties and residual stress analyses of cooling curves obtained from quenching studies. **Journal of ASTM International**, v.3, n.5, p.1-14, May 2006. Doi: <https://doi.org/10.1520/JAI13614>.
- [19] RAMESH, G.; PRABHU, K.N. Wetting kinetics, kinematics and heat transfer characteristics of Pongamia Pinnata vegetable oil for industrial heat treatment. **Applied Thermal Engineering**, v.65, n.1/2, p.433-446, Apr. 2014. Doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.01.011.
- [20] SEDIGHI, M.; MCMAHON, C. The Influence of quenchant agitation on the heat transfer coefficient and residual stress development in the quenching of steels. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: journal of engineering manufacture**, v.214, n.7, p.555-567, 2000.
- [21] KOBASKO, N. I. et al. **Intensive quenching systems: engineering and design**. Ohio: ASTM International, 2010.
- [22] ALIFANOV, O. M. **Inverse heat transfer problems**. Heidelberg: Springer, 1994.
- [23] ÖZISIK, M. N.; ORLANDE, H. R. B. **Inverse heat transfer: fundamentals and Applications**. New York: Taylor & Francis, 2000.
- [24] SIMENCIO-OTERO, R. I.; CANALE, L. C. F.; TOTTEN, G. Use of vegetable oils and animal oils as steel quenchants: a historical review—1850-2010. **Journal of ASTM International**, v.9, n.1, p.136-195, 2012. Doi: <https://doi.org/10.1520/JAI103534>.
- [25] SIMENCIO-OTERO, R. L.; CANALE, L. C.; TOTTEN, G. E.; MEEKISHO, L. Vegetable oils as metal quenchants: a comprehensive review. **Materials**

Performance and Characterization, v.6, n.1, p.174-250, 2017.
<https://doi.org/10.1520/MPC20160112>.

- [26] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Environmentally acceptable lubricants**. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, Office of Wastewater Management, 2011. (Report EPA 800-R-11-002).
- [27] PENN STATE UNIVERSITY. Anon, "Penn State "Green" **Hydraulic Fluids** – A Fact Sheet," Technical Information Bulletin, College Station, PA, 2006.
- [28] ERHAN, S. Z.; SHARMA, B. K.; PEREZ, J. M. Oxidation and low temperature stability of vegetable oil-based lubricants. **Industrial Crops and Products**, v.24, n.3, p.292-299, Nov. 2006. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2006.06.008>.
- [29] EL KINAWY, O.; EL-HAMIDI, M.; ABDALLAH, R. Utilization of non edible oils in lubrication as substitution to mineral oils. **Journal of Applied Science Research**, v.9, n.6, p. 3492-3496, 2013.
- [30] WELLER, D. E. J.; PEREZ, J. M. A Study of the effect of chemical structure on friction and wear: part 2-vegetable oils and esters. **Lubrication Engineering**, v.57, n.5, p.20-26, 2001.
- [31] TAGAYA, M.; TAMURA, I. **Studies on the quenching media**: third report, the cooling ability of oils. Osaka: Osaka University, 1954. v.4, p.305–319. (Technology Report, nº 123).
- [32] TAGAYA, M.; TAMURA, I. **On the Deterioration of quenching oils**. Osaka: Osaka University, 1957. v.7, p.403–424. (Technology Report, nº 274).
- [33] BAILEY, A.E. **Industrial oil and fat products**. 2nd ed. New York : Interscience, 1951.
- [34] GUNSTONE, F.D. Vegetable oils. In: SHAHIDI, F. (Ed.). **Bailey's industrial oil and fat products**. 6th ed. New Jersey: John Wiley, 2005. v.1, Cap.6, p.213-267.
- [35] BOCKISCH, M. **Fats and oils handbook**. Champaign: American Oil Chemists Society, 1998. p.175-344.
- [36] WILLING, A. Lubricants based on renewable resources—an environmentally compatible alternative to mineral oil products. **Chemosphere**, v.43, n.1, p.89-98, 2001.
- [37] HONARY, A.T.; RICHTER, E. **Biobased lubricants and greases**: chemistry, technology and products. New York: John Wiley, 2011.
- [38] ERHAN, S. Z. **Industrial uses of vegetable oils**. Champaign: AOCS Press, 2005.

- [39] ARUMUGAM, S.; SRIRAM, G.; SUBADHRA, L. Synthesis, chemical modification and tribological evaluation of plant oil as bio-degradable low temperature lubricant. **Procedia Engineering**, v.38, p.1508-1517, 2012.
- [40] ALUYOR, E. O.; OBAHIAGBON, K. O.; ORI-JESU, M. Biodegradation of vegetable oils: a review. **Scientific Research and Essay**, v.4, n.6, p.543-548, 2009.
- [41] SIMENCIO-OTERO, R.; VISCAINO, J.; XU, J.; GU, J.; TOTTEN, G.; CANALE, L. Quenchant cooling curves, rewetting, and surface heat flux properties of vegetable oils. *Materials Performance and Characterization*, v.8, n.2, p.143-169, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1520/MPC20180042>.
- [42] RAO, M.A. **Rheology of fluid and semifluid foods**: principles and applications. Gaithersburg: Aspen, 1999.
- [43] MANNING, R. E.; HOOVER, M. R. Flow properties and shear stability. In: TOTTEN, G. E.; WESTBROOK, S. R.; SHAH, R. J. (Ed.). **Fuels and lubricants handbook**: technology, properties, performance, and testing. Ohio: ASTM International, 2003. Cap.32, p.833–878.
- [44] FASINA, O. O.; HALLMAN, H.; CRAIG-SCHMIDT, M.; CLEMENTS, C. Predicting temperature-dependence viscosity of vegetable oils from fatty acid composition. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v.83, n.10, p.899-903, 2006.
- [45] LAWAL, S.; CHOUDHURY, I.; NUKMAN, Y. Application of vegetable oil-based metalworking fluids in machining ferrous metals—a review. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v.52, n.1, p.1-12, 2012.
- [46] QUINCHIA, L. A.; DELGADO, M.A.; VALENCIA, C.; FRANCO, J.M. Natural and synthetic antioxidant additives for improving the performance of new biolubricant formulations. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.59, n.24, p.12917-12924, 2011.
- [47] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D445-17a**: Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids (and calculation of dynamic viscosity). West Conshohocken, 2017.
- [48] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2270-10(2016)**: Standard practice for calculating viscosity index from kinematic viscosity at 40°C and 100°C. West Conshohocken, 2016.
- [49] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D6200-01**: Standard test method for determination of cooling characteristics of quench oils by cooling curve analysis. West Conshohocken, 2017.
- [50] RETLIEF, L. **Analysis of vegetable oils, seeds and beans by TGA and NMR Spectroscopy**. 2011. Ph.D. thesis - University of Stellenbosch, Matieland, Stellenbosch, South Africa, 2011.

- [51] ALUYOR, E. O.; OZIGAGU, C. E.; OBOH, O. I.; ALUYOR, P. Chromatographic analysis of vegetable oils: a review. **Scientific Research and Essay**, v.4, n.4, p.191-197, Apr. 2009.
- [52] LANG, W.; SOKHANSANJ, S.; SOSULSKI, F. W. Modelling the temperature dependence of kinematic viscosity of refined canola oil. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v.69, n.10, p.1054-1055. 1992. Doi: <https://doi.org/10.1007/BF02541080>.
- [53] FASINA, O. O.; COLLEY, Z. Viscosity and specific heat of vegetable oils as a function of temperature: 35°C to 180°C. **International Journal of Food Properties**, v.11, n.4, p.738-746, 2008. Doi: <https://doi.org/10.1080/10942910701586273>.
- [54] WOLKE, R. W. **Up in smoke**. Washington, 1999. Disponível em: <http://web.archive.org/web/20181016043019/http://www.washingtonpost.com/wp-srv/WPcap/1999-12/15/070r121599-idx.html>. Acesso em: 16 out. 2018.
- [55] GEE, P. T. Analytical characteristics of crude and refined palm oil and fractions. **European Journal of Lipid Science and Technology**, v.109, n.4, p.373-379, Apr. 2007. Doi: 10.1002/ejlt.200600264.