



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA  
QMC5533 – Estágio Supervisionado

**RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO DESENVOLVIDO NO ATELIÊ DE  
CONSERVAÇÃO E RESTAURAÇÃO DE BENS CULTURAIS MÓVEIS DA  
FUNDAÇÃO CATARINENSE DE CULTURA EM FLORIANÓPOLIS/SC**

**PAULA DE OLIVEIRA DOBKOWSKI LONGO**

**Prof. Dr. Alexandre Luis Parize e Dr. Thiago Guimarães Costa**

Florianópolis-SC  
Junho/2026

Paula de Oliveira Dobkowski Longo

**Estudo da influência da cadeia lateral nos parâmetros cinéticos e termodinâmicos na fase inicial de cura da resina alquídica de óleo de soja**

Relatório de Estágio Supervisionado (QMC 5533)  
apresentado ao Departamento de Química da  
Universidade Federal de Santa Catarina  
desenvolvido no ATECOR em Florianópolis.

Florianópolis-SC  
Junho/2026

Longo, Paula de Oliveira Dobkowski

Relatório de estágio supervisionado desenvolvido no Ateliê de conservação e restauração de bens culturais móveis da Fundação Catarinense de Cultura em Florianópolis. Influência da cadeia lateral nos parâmetros cinéticos e termodinâmicos na fase inicial de cura da resina alquídica de óleo de soja / Paula de Oliveira Dobkowski Longo ; supervisor, Alexandre Luis Parize, 2026. 48 p.

Relatório de Estágio - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Graduação em Química - Bacharelado, Florianópolis, 2026.

Inclui referências.

1. Química - Bacharelado. 2. resinas alquídicas. 3. cura térmica. 4. parâmetros cinéticos e termodinâmicos. I. Parize, Alexandre Luis. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Química - Bacharelado. III. Título.

Paula de Oliveira Dobkowski Longo

**Título:** relatório de estágio do estudo da influência da cadeia lateral nos parâmetros cinéticos e termodinâmicos na fase inicial de cura da resina alquídica de óleo de soja.

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em química tecnológica e aprovado em sua forma final pelo Curso de Química Tecnológica.



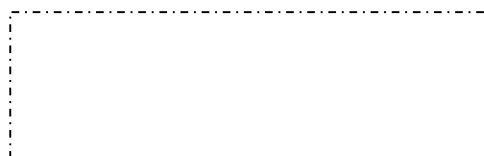
Coordenação do Curso

**Banca examinadora**



Prof. Dr. Alexandre Luis Parize

Orientador



Prof. Dr. Adolfo Horn Jr

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Dr. Gustavo Amadeu Micke

Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 2026.

## RESUMO

Neste trabalho, desenvolvido no Laboratório de Materiais do Ateliê de Conservação e Restauração de Bens Culturais Móveis (Atecor), em Florianópolis, determinaram-se os parâmetros cinéticos e termodinâmicos da cura oxidativa de resinas alquídicas à base de óleo de soja com diferentes comprimentos de cadeia, curta, média e longa, visando fornecer subsídios para a caracterização e conservação de obras de arte e bens culturais. Filmes das resinas foram aplicados sobre corpos de prova de linho e submetidos à cura em estufa, na ausência de luz, a 20, 30, 40 e 50 °C, com coleta de amostras nos tempos de 5, 24, 29, 48, 53 e 72 horas. O avanço da reação foi monitorado por espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier com refletância total atenuada, diretamente na superfície das amostras, sem tratamento prévio. Quantificou-se a redução da intensidade da banda atribuída ao estiramento de grupos vinílicos dos ácidos graxos, indicador direto do consumo das duplas ligações pela auto-oxidação. Utilizaram-se modelos cinéticos já conhecidos para estas reações para obtenção dos parâmetros cinéticos e as equações de *Arrhenius* e de *Eyring* para obter a energia de ativação, a entalpia, a entropia e a energia livre de Gibbs no estado de complexo ativado. Na temperatura de 30 °C, a resina curta apresentou o menor tempo de meia-vida para cura (82,03 h), seguida da média (102,68 h) e da longa (232,60 h). A resina longa apresentou a menor energia de ativação com valor de 16,02 kJ/mol e a resina curta a maior restrição entrópica no estado de transição, resultado do maior teor de anidrido ftálico em sua composição. Os resultados contribuem para a estimativa da estabilidade físico-química dessas tintas alquídicas utilizadas em pinturas e para o desenvolvimento de novos materiais visando modificações no tempo de secagem das resinas.

**Palavras-chave:** resinas alquídicas; cinética química; espectroscopia de infravermelho; cura oxidativa; conservação de bens culturais.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Registros fotográficos do Atecor: (A) Laboratório de materiais e (B) Ateliê de conservação e restauro .....                                                                                                                                                              | 12 |
| Figura 2 – (A) Forma em evolução, Ivan Serpa. Tinta alquídica sobre aglomerado, 1952. 87,5 x 72,5 cm, Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro. (B) A poltrona vermelha, Pablo Picasso. Óleo e tinta alquídica sobre tela, 1931. 131,1 x 98,7 cm, Instituto de Arte de Chicago ..... | 15 |
| Figura 3 – Rota em etapa única para síntese de resinas alquídicas .....                                                                                                                                                                                                             | 16 |
| Figura 4 – Rota em duas etapas para síntese de resinas alquídicas .....                                                                                                                                                                                                             | 17 |
| Figura 5 – Estrutura básica de uma resina alquídica .....                                                                                                                                                                                                                           | 18 |
| Figura 6 – Reações do mecanismo de cura de resinas alquídicas.....                                                                                                                                                                                                                  | 19 |
| Figura 7– Diagrama do fluxo de trabalho .....                                                                                                                                                                                                                                       | 27 |
| Figura 8 – Espectro do ATR-FTIR de uma das resinas alquídicas antes da cura.....                                                                                                                                                                                                    | 29 |
| Figura 9 – Espectros ATR-FTIR da resina alquídica de cadeia curta em diferentes intervalos de tempo, nas temperaturas de (A) 20 °C, (B) 30 °C, (C) 40 °C e (D) 50 °C .....                                                                                                          | 31 |
| Figura 10 – Espectros ATR-FTIR da resina alquídica de cadeia média em diferentes intervalos de tempo, nas temperaturas de (A) 20 °C, (B) 30 °C, (C) 40 °C e (D) 50 °C.....                                                                                                          | 31 |
| Figura 11 – Espectros ATR-FTIR da resina alquídica de cadeia longa em diferentes intervalos de tempo, nas temperaturas de (A) 20 °C, (B) 30 °C, (C) 40 °C e (D) 50 °C.....                                                                                                          | 32 |
| Figura 12 – Gráfico de $\ln A$ em função do tempo para resina alquídica de cadeia curta, média e longa nas temperaturas de (A) 20 °C, (B) 30 °C, (C) 40 °C e (D) 50 °C .....                                                                                                        | 33 |
| Figura 13 – Linearização de <i>Arrhenius</i> ( $\ln K$ versus $1/T$ ) das resinas (A) curta; (B) média e (C) longa.....                                                                                                                                                             | 36 |
| Figura 14 – Gráficos de $\ln (k/T)$ em função de $1/T$ das resinas (A) curta; (B) média e (C) longa.....                                                                                                                                                                            | 38 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Propriedades físico-químicas das resinas utilizadas neste trabalho .....                                         | 25 |
| Tabela 2 – Atribuições das bandas de absorção características da resina alquídica de óleo de soja.....                      | 29 |
| Tabela 3 – Valores da constante de velocidade, tempo de meia-vida para resina alquídica de cadeia curta, média e longa..... | 34 |
| Tabela 4 – Parâmetros de <i>Arrhenius</i> para as resinas alquídicas de cadeia curta, média e longa.....                    | 36 |
| Tabela 5 – Parâmetros termodinâmicos para as resinas alquídicas de cadeia curta, média e longa.....                         | 38 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

Atecor - Ateliê de Conservação e Restauração de Bens Culturais Móveis

ATR - Refletância Total Atenuada

CIC - Centro Integrado de Cultura

DPAC - Diretoria de Patrimônio Cultural

FCC - Fundação Catarinense de Cultura

FTIR - Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier

IPHAN - Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional

MASC - Museu de Arte de Santa Catarina

TST - Teoria do Estado de Transição

## SUMÁRIO

|                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 JUSTIFICATIVA .....</b>                                   | <b>10</b> |
| <b>2 APRESENTAÇÃO DO LOCAL DE ESTÁGIO.....</b>                 | <b>11</b> |
| <b>3 REVISÃO DA LITERATURA .....</b>                           | <b>13</b> |
| 3.1 Patrimônio cultural e conservação das obras de arte .....  | 13        |
| 3.2 Resinas alquídicas .....                                   | 14        |
| 3.2.1 Uso das resinas alquídicas .....                         | 15        |
| 3.2.2 Obtenção e classificação das resinas alquídicas .....    | 16        |
| 3.2.3 Estrutura das resinas alquídicas .....                   | 17        |
| 3.2.4 Mecanismo de cura das resinas alquídicas.....            | 18        |
| 3.3 Parâmetros cinéticos.....                                  | 19        |
| 3.4 Parâmetros termodinâmicos.....                             | 21        |
| 3.5 Espectroscopia de infravermelho .....                      | 22        |
| <b>4 OBJETIVOS .....</b>                                       | <b>24</b> |
| 4.1 Objetivo geral .....                                       | 24        |
| 4.2 Objetivos específicos.....                                 | 24        |
| <b>5 METODOLOGIA.....</b>                                      | <b>25</b> |
| 5.1 Materiais.....                                             | 25        |
| 5.2 Preparo da amostra.....                                    | 25        |
| 5.3 Ensaio cinético de cura .....                              | 26        |
| 5.4 Análise por ATR-FTIR .....                                 | 26        |
| 5.5 Monitoramento espectroscópico e tratamento dos dados.....  | 27        |
| 5.6 Segurança no laboratório e tratamento de resíduos .....    | 28        |
| <b>6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>                          | <b>29</b> |
| 6.1 Caracterização inicial da resina alquídica.....            | 29        |
| 6.2 Monitoramento da cura por ATR-FTIR .....                   | 30        |
| 6.3 Determinação dos parâmetros cinéticos.....                 | 32        |
| 6.4 Determinação dos parâmetros termodinâmicos.....            | 37        |
| <b>7 CONCLUSÃO.....</b>                                        | <b>41</b> |
| <b>8 CONTRIBUIÇÃO DO ESTÁGIO À FORMAÇÃO PROFISSIONAL .....</b> | <b>42</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                       | <b>43</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>                                            | <b>45</b> |
| <b>APÊNDICES.....</b>                                          | <b>47</b> |

## 1 JUSTIFICATIVA

O estágio supervisionado é uma etapa fundamental na graduação de química tecnológica. É por meio do estágio que o estudante visualiza e participa de ambientes fora do meio acadêmico e é uma oportunidade para adquirir experiências em diferentes áreas até mesmo fora do escopo teórico da grade curricular do curso.

A escolha do tema se justifica pela importância da química auxiliando na conservação do patrimônio cultural. Pinturas, vernizes e outros materiais presentes em acervos museológicos se degradam continuamente por reações químicas e compreender esses processos é a condição básica para qualquer ação de conservação ou restauro. As resinas alquídicas passaram a ser empregadas em pinturas artísticas a partir de meados do século XX e estão presentes em relevantes pinturas de valor cultural e monetário, entre as quais se destacam obras de Ivan Serpa e Pablo Picasso. As resinas utilizando óleo de soja são uma alternativa atual e de baixo custo para produção de tintas alquídicas. Ainda assim, há poucos estudos sobre seu processo de cura e envelhecimento, sobretudo em como o comprimento das cadeias laterais influencia esse processo.

O estágio foi desenvolvido no Atecor – Ateliê de Conservação e Restauração de Bens Culturais Móveis da Fundação Catarinense de Cultura, e as atividades concentraram-se no estudo cinético para determinação dos parâmetros cinéticos e termodinâmicos da fase inicial de cura de três formulações dessas resinas, com cadeias laterais curta, média e longa.

## **2 APRESENTAÇÃO DO LOCAL DE ESTÁGIO**

O Ateliê de Conservação e Restauração de Bens Culturais Móveis (Atecor) está localizado no bairro Agronômica em Florianópolis/SC, junto ao Centro Integrado de Cultura (CIC), um importante polo cultural de Santa Catarina que abriga instituições como o Museu de Arte de Santa Catarina (MASC), Museu Histórico de Santa Catarina e Museu Etnográfico. Foi fundado em 1982 pelo professor Aldo João Nunes, especialista em conservação e restauração de Bens Culturais Móveis, formado pela Escola de Belas Artes da Universidade Federal de Minas Gerais.

Um marco decisivo na trajetória da instituição ocorreu em 2010, com a contratação de um profissional de Química. Essa iniciativa viabilizou a criação do Laboratório de Materiais, incorporando análises científicas aos processos de restauro.

Para a execução de suas atividades, o Atecor dispõe de infraestrutura setorizada para documentação, arquivamento e intervenções práticas, operada por uma equipe multidisciplinar composta por conservadores-restauradores, historiadores, artistas plásticos e químicos. Além das intervenções físicas, o setor promove ações de pesquisa, fortalecendo a interface entre a prática restaurativa e a investigação acadêmica em prol da memória catarinense.

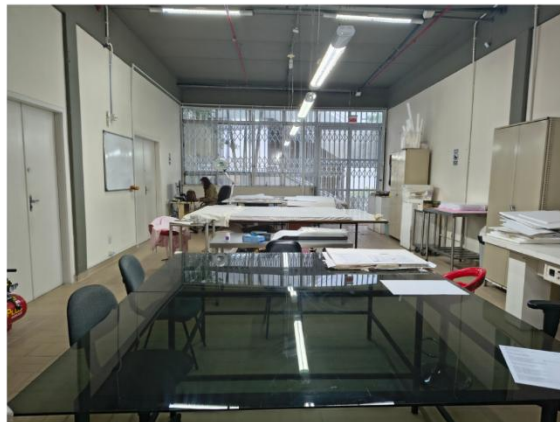
O Laboratório de Materiais tem como função principal a realização de análises químicas e físico-químicas, essenciais para a identificação de materiais, técnicas construtivas e patologias de degradação. Esses diagnósticos subsidiam a tomada de decisões técnicas, processos de autenticação e estudos históricos. O setor também atua na produção interna de insumos, como tintas, vernizes, e no desenvolvimento de novos materiais para conservação e restauro de obras de arte.

Figura 1 – Registros fotográficos do Atecor: (A) Laboratório de materiais e (B) Ateliê de conservação e restauro

**(A)**



**(B)**



Fonte: Autoria própria (2026).

### **3 REVISÃO DA LITERATURA**

#### **3.1 Patrimônio cultural e conservação das obras de arte**

A preservação do patrimônio cultural fundamenta-se no reconhecimento da cultura material e imaterial como testemunho essencial da trajetória humana, portadora de valores históricos, artísticos, estéticos e identitários que articulam o presente às gerações que o antecedem. Ao longo do século XX, a salvaguarda desses bens deixou de ser entendida como tarefa restrita ao zelo individual ou institucional para se constituir em responsabilidade coletiva, pautada por princípios formalizados em sucessivos marcos internacionais. As Cartas de Atenas e de Veneza consolidaram diretrizes de respeito à autenticidade e à integridade dos monumentos, ampliando a noção de bem cultural para incorporar o entorno e os conjuntos urbanos<sup>2</sup>. A Convenção do Patrimônio Mundial da UNESCO instituiu a noção de patrimônio da humanidade, articulando proteção e cooperação internacional, enquanto o Documento de Nara reconheceu a diversidade cultural como critério legítimo na avaliação patrimonial, contestando uma visão eurocêntrica até então dominante. A Convenção para a Salvaguarda do Patrimônio Cultural Imaterial, por sua vez, estendeu a proteção a saberes, práticas, expressões e celebrações de natureza não material<sup>22</sup>.

No Brasil, a institucionalização da proteção ao patrimônio iniciou-se com a criação do atual IPHAN, que estabeleceu o tombamento como principal instrumento jurídico de proteção dos bens de valor histórico e artístico<sup>23</sup>. A Constituição de 1988 representou um ponto de inflexão ao ampliar significativamente o conceito de patrimônio cultural, contemplando bens de natureza material e imaterial portadores de referência à identidade, à ação e à memória dos diferentes grupos formadores da sociedade brasileira<sup>3</sup>. Essa expansão foi posteriormente consolidada pela instituição do Registro de Bens Culturais de Natureza Imaterial, que conferiu estatuto jurídico próprio a saberes, ofícios, formas de expressão e celebrações<sup>24</sup>. Apesar do avanço normativo, persiste uma tensão entre o reconhecimento legal do patrimônio e os recursos efetivamente destinados à sua conservação. Episódios como o incêndio do Museu Nacional em 2018 e os sucessivos sinistros envolvendo a Cinemateca Brasileira tornaram visível a fragilidade de acervos culturalmente estratégicos diante da escassez de investimento, da carência de pessoal especializado e da ausência de protocolos consistentes de conservação preventiva<sup>25</sup>.

A garantia legal, portanto, precisa ser acompanhada por diagnóstico científico, uma vez que a deterioração de materiais orgânicos e inorgânicos é um processo natural, acelerado por variáveis ambientais como temperatura, umidade relativa, radiação luminosa e poluentes atmosféricos<sup>1,13</sup>. A ciência da conservação atua de forma interdisciplinar, articulando química, física, biologia e ciências humanas, e recorre a ferramentas analíticas como espectroscopia vibracional, cromatografia, microscopia e técnicas termoanalíticas para compreender mecanismos de degradação, identificar materiais constituintes e fundamentar intervenções estruturadas e, sempre que possível, reversíveis<sup>1</sup>. No Brasil, esse campo consolidou-se progressivamente nas últimas décadas, com a criação de laboratórios universitários voltados à conservação-restauração e a formação de profissionais habilitados a articular o saber técnico-artístico ao tratamento científico dos materiais<sup>4</sup>.

Historicamente, as técnicas artísticas tradicionais valeram-se de materiais naturais como o óleo de linhaça. Entretanto, devido às vulnerabilidades químicas, por exemplo, sensibilidade à oxidação, amarelecimento, fissuração e migração de componentes, amplamente documentadas motivaram ao longo do século XX, o desenvolvimento de alternativas sintéticas com maior previsibilidade comportamental, secagem mais rápida e custo reduzido. Entre essas alternativas, as resinas alquídicas ocuparam posição de destaque na pintura artística a partir de meados do século passado, ao combinarem características de manuseio próximas às das tintas a óleo com propriedades de formulação compatíveis com a produção industrial em larga escala<sup>4,6</sup>.

### **3.2 Resinas alquídicas**

As resinas alquídicas são poliésteres modificados por ácidos graxos de óleos vegetais. O nome deriva de *alcohols* e *acids*, em referência aos monômeros que compõem a cadeia principal. A modificação com ácidos graxos insaturados é o que diferencia esses polímeros, as cadeias laterais reagem com o oxigênio do ar, viabilizando a formação de um filme sólido por reticulação oxidativa sem necessidade de solventes para cura<sup>7</sup>. Além disso, caso o artista desejar pode-se solubilizar as resinas em diferentes tipos de solventes em função do tamanho de sua cadeia, por exemplo, resinas de cadeia curta são mais solúveis em solventes mais polares

enquanto resinas de cadeia longa são solúveis em solventes apolares. Por isso estas resinas são amplamente utilizadas em tintas e vernizes industriais e artísticas<sup>8</sup>.

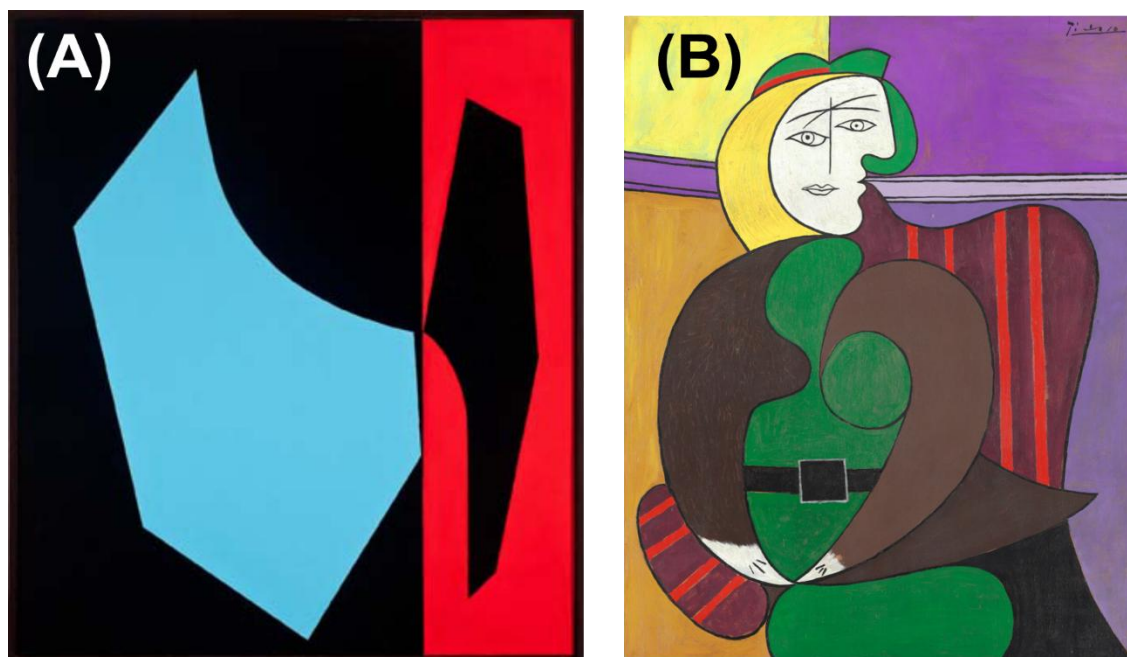
### 3.2.1 Uso das resinas alquídicas

Além do uso industrial em revestimento, vernizes e esmaltes, as resinas alquídicas foram introduzidas em materiais artísticos a partir dos anos 1950. Fabricantes como Winsor e Newton e Gamblin lançaram produtos que reduziram o tempo de secagem de dias para horas, mantendo a aparência e trabalhabilidade das tintas a óleo tradicionais, atraindo artistas que trabalhavam com veladuras sobrepostas ou prazos reduzidos<sup>5,6</sup>.

Artistas como Ivan Serpa, em sua obra "*Forma em evolução*" (1952) e Pablo Picasso, na obra "*A poltrona vermelha*" (1931) são exemplos notórios do uso pioneiro dessas formulações.

E a disseminação dessas tintas em acervos museológicos faz com que o estudo cinético e termodinâmico de sua cura tenha relevância direta para a conservação preventiva.

Figura 2 – (A) Forma em evolução, Ivan Serpa. Tinta alquídica sobre aglomerado, 1952. 87,5 x 72,5 cm, Museu de Arte Moderna do Rio de Janeiro. (B) A poltrona vermelha, Pablo Picasso. Óleo e tinta alquídica sobre tela, 1931. 131,1 x 98,7 cm, Instituto de Arte de Chicago



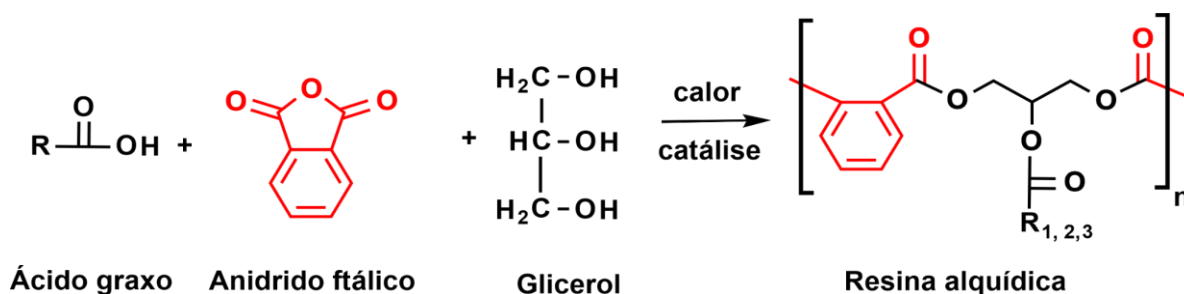
Fonte: adaptado de PLOTKOWSKI (2022).

### 3.2.2 Obtenção e classificação das resinas alquídicas

A síntese envolve uma reação de policondensação entre um poliálcool (glicerol ou pentaeritritol), um anidrido, predominantemente o anidrido ftálico, e ácidos graxos provenientes de um óleo vegetal, como o óleo de soja utilizado neste trabalho<sup>7,12</sup>. No caso do óleo de soja, os ácidos graxos predominantes são o linoleico (C18:2) e linolênico (C18:3), além do oleico (C18:1) em menor proporção<sup>9,20</sup>.

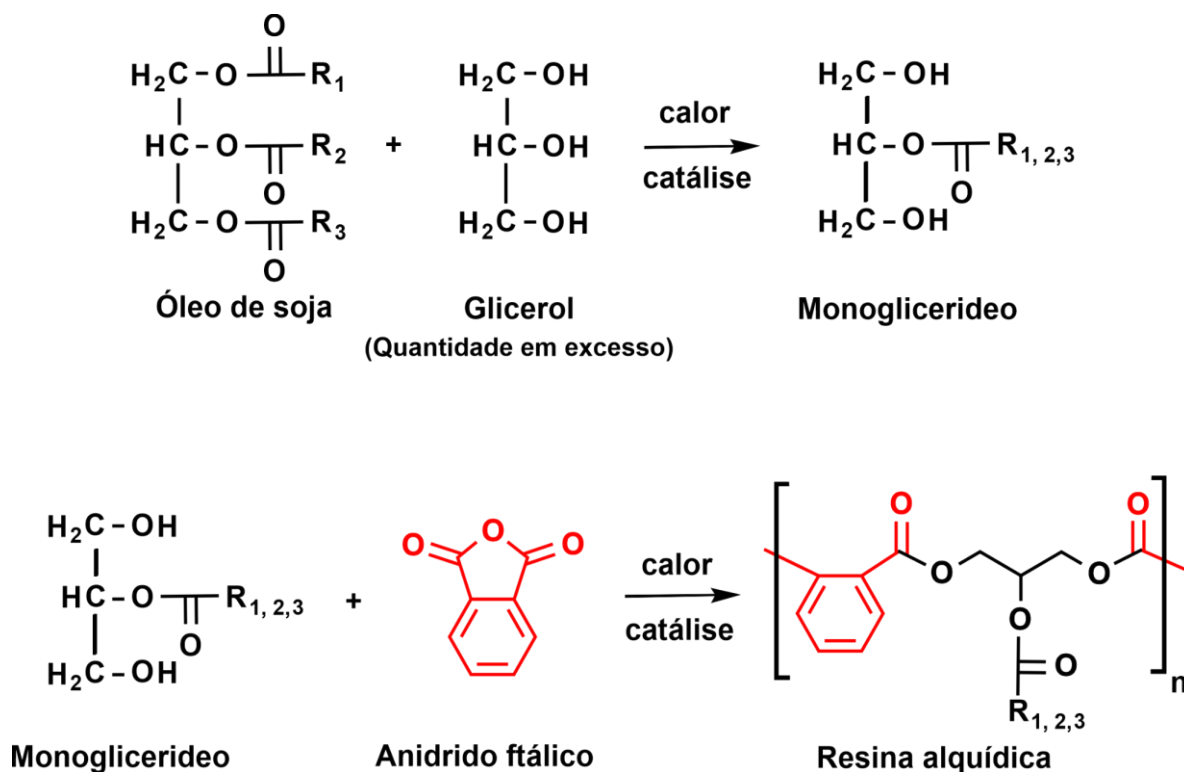
A reação pode seguir por duas rotas principais: o *processo dos ácidos graxos*, conduzido em etapa única (Figura 3), no qual os ácidos graxos livres, o poliálcool e o anidrido reagem simultaneamente para formar a resina; e o *processo do monoglicerídeo*, conduzido em duas etapas (Figura 4), no qual o óleo é inicialmente transesterificado com excesso de poliálcool a 220–240 °C, essa etapa é denominada *alcoólise*, gerando mono e diglicerídeos que, em seguida, reagem com o anidrido ftálico em uma segunda etapa de *acidólise* (ou poliesterificação) para formar a resina alquídica. Embora o processo dos ácidos graxos forneça resinas com distribuição molecular mais homogênea e maior controle composicional, é o processo do monoglicerídeo o mais utilizado industrialmente, principalmente por partir diretamente do óleo bruto e não exigir a etapa adicional de extração e purificação dos ácidos graxos, o que reduz significativamente o custo da matéria-prima<sup>7,25</sup>.

Figura 3 – Rota em etapa única para síntese de resinas alquídicas



Fonte: Adaptado de Dizman e Cerrahoğlu Kaçakgil (2023).

Figura 4 – Rota em duas etapas para síntese de resinas alquídicas



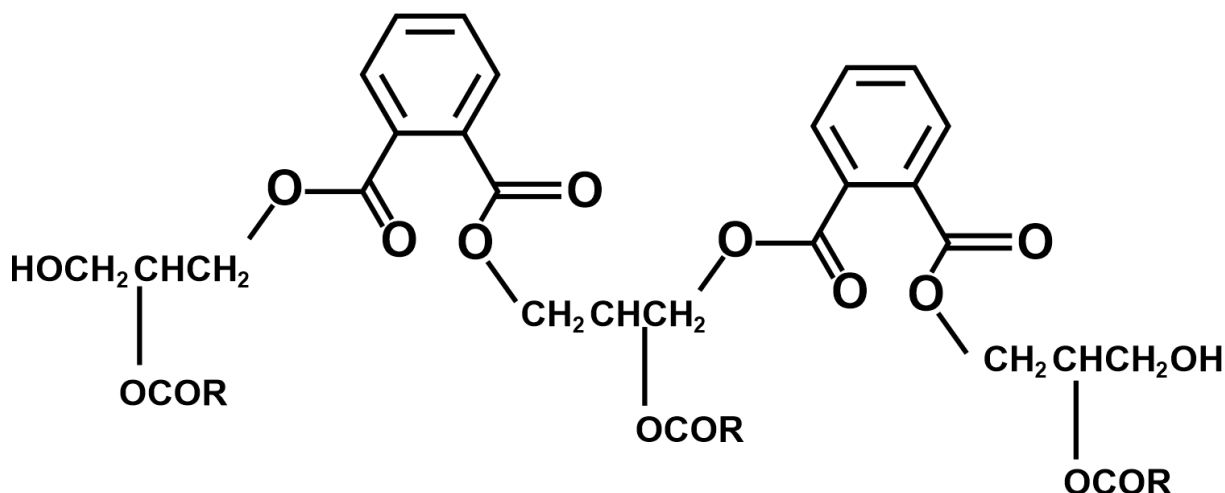
Fonte: Adaptado de Dizman e Cerrahoğlu Kaçakgil (2023).

A proporção em massa dos ácidos graxos em relação ao total da formulação define o comprimento em óleo, principal parâmetro de classificação das resinas alquídicas. Um comprimento maior de óleo significa maior quantidade de cadeias graxas na estrutura, mais sítios de reticulação, maior flexibilidade e secagem mais lenta. Quanto ao menor comprimento em óleo, maior a proporção de anidrido ftálico, resultando em filmes mais rígidos e duros<sup>7,12</sup>.

### 3.2.3 Estrutura das resinas alquídicas

A cadeia polimérica é formada por uma espinha dorsal de poliéster resultante da policondensação entre o poliálcool e o anidrido ftálico, com ligações éster ao longo da cadeia e por cadeias laterais de ácidos graxos esterificados nos grupos hidroxila do poliálcool<sup>7</sup>. O anel aromático do anidrido ftálico confere rigidez à cadeia principal e torna-se um fator determinante na dureza do filme. As cadeias laterais ficam pendentes à cadeia principal e são os sítios reativos da auto-oxidação. A Figura 5 ilustra essa estrutura.

Figura 5 – Estrutura básica de uma resina alquídica



Resina alquídica básica

Fonte: Adaptado de Elba et al. (2018).

Os hidrogênios na posição bis-álílica do ácido linoleico, entre duas duplas ligações, são mais reativos com o oxigênio por formarem radicais estabilizados por ressonância, sendo os primeiros a reagir durante a cura. Após a cura, a reticulação transforma o polímero líquido em uma rede tridimensional insolúvel.

### 3.2.4 Mecanismo de cura das resinas alquídicas

A cura das resinas alquídicas ocorre por auto-oxidação radicalar em quatro etapas sequenciais<sup>7,9,19</sup>, como na Figura 6.

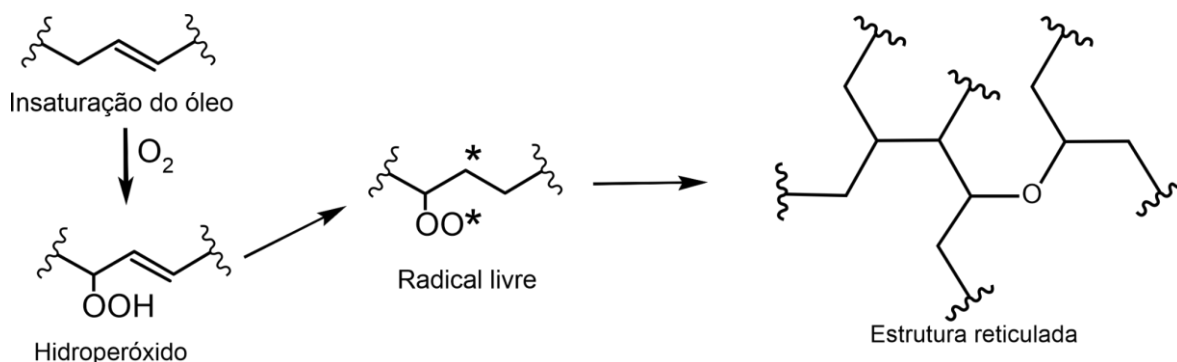
Na fase de indução, o oxigênio atmosférico difunde-se no filme e abstrai homoliticamente os hidrogênios alílicos das cadeias graxas insaturadas gerando radicais carbono ( $R^*$ ).

Na fase de peroxidação, os radicais  $R$  reagem com o  $O_2$  formando radicais peroxila ( $ROO^*$ ), que abstraem novos hidrogênios de cadeias vizinhas, produzindo hidroperóxidos ( $R-OOH$ ) e propagando a cadeia reacional de forma autocatalítica.

Na etapa de decomposição, os hidroperóxidos sofrem ruptura homolítica gerando radicais alcóxila ( $RO^*$ ) e hidroxila ( $HO^*$ ). E na etapa de reticulação (*crosslinking*), radicais de cadeias adjacentes se recombinaem, estabelecendo ligações

covalentes C-C e pontes éter C-O-C que constroem a rede macromolecular tridimensional, responsável pela solidificação do filme<sup>7,9,19</sup>.

Figura 6 – Reações do mecanismo de cura de resinas alquídicas



Fonte: Adaptado de Dizman e Cerrahoğlu Kaçakgil (2023).

### 3.3 Parâmetros cinéticos

Os parâmetros cinéticos de uma reação química como constante de velocidade, ordem de reação, fator pré exponencial e energia de ativação quantificam tanto a rapidez do processo quanto sua dependência com a temperatura, permitindo comparar formulações e condições experimentais distintas em um mesmo referencial. Em resinas alquídicas, essa abordagem tem sido empregada para avaliar a reatividade do material durante a cura oxidativa e prever seu comportamento ao longo da secagem<sup>9,11,19</sup>.

A velocidade de uma reação é definida como a variação da concentração de reagentes ou produtos no tempo. Para uma reação genérica entre dois reagentes A e B,  $A + B \rightarrow \text{produtos}$ , a lei de velocidade pode ser escrita como apresentado na equação 1:

$$v = k' [A]^m [B]^n \quad (\text{Equação 1})$$

em que  $k'$  é a constante de velocidade e  $m$  e  $n$  são as ordens parciais em relação a cada reagente, determinadas experimentalmente e a soma de  $m + n$  resulta na ordem global da reação<sup>21</sup>. Na cura oxidativa de resinas alquídicas, os reagentes envolvidos são as insaturações C=C presentes nas cadeias dos ácidos graxos e o oxigênio

molecular, de modo que sem simplificações, a expressão é de segunda ordem, como mostra a equação 2:

$$v = k' [A][O_2] \quad (\text{Equação 2})$$

em que [A] representa a concentração de duplas ligações reativas. Quando um dos reagentes está em concentração muito superior à do outro, ou quando sua concentração permanece praticamente constante ao longo da reação, o termo correspondente pode ser incorporado à constante de velocidade, reduzindo a ordem aparente da reação, tornando-se uma reação de pseudo-ordem<sup>21</sup>. No caso de filmes finos curados em contato com o ar atmosférico, a interface filme-ar é continuamente reabastecido de O<sub>2</sub>, de forma que a concentração na região reativa pode ser tratada como aproximadamente constante e em excesso. Após esta consideração, a equação (2) reduz-se a  $v = k[A]$ , com  $k = k'[O_2]$ , caracterizando uma cinética de pseudo-primeira ordem em relação as insaturações<sup>9, 19</sup>. Integrando  $v = k[A]$  obtém-se (equação 3):

$$\ln ([A]_t / [A]_0) = -k \cdot t \quad (\text{Equação 3})$$

de modo que o gráfico de  $\ln [A]$  versus  $t$  apresenta comportamento linear, com coeficiente angular igual a  $-k$ . Como a área de uma banda de absorção no infravermelho é proporcional à concentração da espécie absorvedora pela lei de *Lambert-Beer*, é comum em estudos de cura oxidativa de resinas alquídicas empregar diretamente a área do pico associado às ligações duplas dos ácidos graxos como variável proporcional à [A], dispensando a normalização pelo valor inicial<sup>9,11,19</sup>. Sob essa abordagem, o coeficiente linear do ajuste, que corresponde a  $\ln [A]_0$ , não é utilizado para fins científicos, e a constante de velocidade  $k$  (em h<sup>-1</sup>) é obtida diretamente do coeficiente angular do ajuste linear de  $\ln [A]$  versus  $t$  para cada temperatura estudada.

Depolo et al.<sup>19</sup> ilustra bem a aplicação dessa abordagem em sistema correlato, inclusive em relação ao tratamento do ponto inicial da medida. Os autores acompanharam por ATR-FTIR resolvida no tempo a cura de cinco óleos secativos (linhaça, cártamo, nozes, papoula e stand oil), monitorando a banda em 3010 cm<sup>-1</sup> atribuída ao estiramento  $\nu(C-H)$  das duplas ligações dos ácidos graxos, e tratam o consumo dessas insaturações como processo de primeira ordem. Em razão do período da indução associado aos antioxidantes naturalmente presentes nos óleos, os autores redefiniram  $t = 0$  como o início efetivo do consumo das ligações C=C, descartando os pontos iniciais do experimento no ajuste cinético, estratégia em concordância com a adotada no presente estudo.

A dependência da constante de velocidade com a temperatura é descrita pela equação de *Arrhenius*  $k = A \cdot e^{-E_a/RT}$ , ou sua forma linearizada (equação 4):

$$\ln k = \ln A - E_a/RT \quad (\text{Equação 4})$$

em que  $A$  é o fator pré-exponencial, associado à frequência de colisões com orientação e energia favorável à reação,  $E_a$  é a energia de ativação (J/mol) interpretada como a barreira energética mínima para que a reação ocorra,  $R$  é a constante universal dos gases ( $8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) e  $T$  é a temperatura absoluta (K).

Experimentalmente, a  $E_a$  é obtida medindo-se  $k$  em diferentes temperaturas e construindo o gráfico de  $\ln k$  versus  $1/T$ , e a inclinação corresponde a  $-E_a/R$ , e o coeficiente linear fornece o valor de  $\ln A$ <sup>21</sup>. Esse tipo de comportamento já foi aplicado a diversos sistemas lipídicos para acompanhar reações de oxidação, como na degradação térmica de óleos vegetais e na auto-oxidação do biodiesel, fornecendo valores de  $E_a$  úteis para comparação entre matérias-primas e condições de processamento<sup>16,18</sup>.

### 3.4 Parâmetros termodinâmicos

Para obter informações sobre o estado de transição da reação de cura, os dados cinéticos podem ser tratados pela equação de *Eyring*, derivada da Teoria do Estado de Transição (TST). Segundo a TST, os reagentes só se convertem em produtos após passar por um complexo ativado, sendo a configuração máxima de energia ao longo da coordenada de reação, de modo que qualquer fator que estabilize ou desestabilize esse estado afeta diretamente a velocidade da reação<sup>16,17,21</sup>. Em sua forma linearizada, da equação de Eyring é escrita como (equação 5):

$$\ln (k/T) = - (\Delta H^\ddagger/R) \cdot (1/T) + \ln (k_B/h) + \Delta S^\ddagger/R \quad (\text{Equação 5})$$

em que  $k_B = 1,381 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$  é a constante de *Boltzmann*,  $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  é a constante de *Planck*,  $\Delta H^\ddagger$  é a entalpia de ativação e  $\Delta S^\ddagger$  é a entropia de ativação. O gráfico de  $\ln (k/T)$  versus  $1/T$  fornece uma reta em que o coeficiente angular corresponde a  $-\Delta H^\ddagger/R$  e o coeficiente linear corresponde a  $\ln(k_B/h) + \Delta S^\ddagger/R$ , permitindo obter de forma simultânea os valores de  $\Delta H^\ddagger$  e  $\Delta S^\ddagger$  a partir de um único ajuste<sup>16,17</sup>. A energia livre de Gibbs de ativação pode ser calculada, para cada temperatura, pela relação (equação 6):

$$\Delta G^\ddagger = \Delta H^\ddagger - T \cdot \Delta S^\ddagger \quad (\text{Equação 6})$$

A entalpia de ativação corresponde à variação de energia associada à reorganização de ligações na passagem dos reagentes ao estado de transição. Na auto-oxidação de resinas alquídicas, o valor de  $\Delta H^\ddagger$  está associado à etapa de abstração do hidrogênio alílico das cadeias de ácidos graxos insaturados, etapa limitante do processo. Essa grandeza relaciona-se com a energia de ativação experimental obtida pela equação de Arrhenius por (equação 7):

$$E_a = \Delta H^\ddagger + RT \quad (\text{Equação 7})$$

de modo que, em reações conduzidas em fase condensada, o termo  $RT$  ( $\approx 2,5 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$  a 298 K) é, em geral, pequeno frente a  $E_a$ , resultando em  $E_a \approx \Delta H^\ddagger$ <sup>16,17</sup>.

A entropia de ativação reflete a variação de ordem do sistema ao formar o complexo ativado. Valores negativos de  $\Delta S^\ddagger$  são característicos de mecanismo associativos, em que os reagentes precisam de uma orientação espacial específica para que a reação ocorra. No caso da cura auto-oxidativa, para que a adição do  $O_2$  ao radical alílico ocorra, há perda de graus de liberdade translacional e rotacional e resulta em um complexo ativado mais organizado que os reagentes isolados. Quanto mais negativo o valor de  $\Delta S^\ddagger$  mais restrito geometricamente é o estado de transição<sup>11,16,17</sup>.

E a energia livre de *Gibbs* de ativação corresponde a barreira termodinâmica efetiva que o sistema precisa superar, combinando em uma única grandeza as contribuições entálpica e entrópica. Valores positivos de  $\Delta G^\ddagger$  indicam que a cura não é espontânea em condições ambientes, exigindo aporte de energia térmica ou redução da barreira por catálise para que a reticulação avance.

### 3.5 Espectroscopia de infravermelho

A espectroscopia de absorção no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) identifica grupos funcionais a partir da absorção seletiva de radiação na região do infravermelho ( $400 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ ) pelas vibrações moleculares, gerando um espectro que funciona como uma impressão digital do material analisado. No modo de refletância total atenuada (ATR), o feixe é direcionado para um cristal de alto índice de refração, usualmente diamante, seleneto de zinco (ZnSe) ou germânio, em ângulo

superior ao ângulo crítico, condição que produz uma reflexão interna total e gera, na interface cristal-amostra, uma onda evanescente que penetra na amostra por aproximadamente 0,5 a 2 micrometros. Essa onda é absorvida seletivamente pelas ligações químicas presentes nessa fina camada superficial, dispensando a preparação química exigida pela FTIR de transmissão como a maceração da amostra e sua diluição em KBr para confecção de pastilhas. A ATR permite, assim, a análise direta de micro amostras da ordem de poucos microgramas, frequentemente recuperáveis ao final da medida, essa característica torna a técnica especialmente útil na investigação de materiais artísticos e de bens culturais, em que se busca minimizar a remoção de material do objeto original<sup>1,10</sup>.

No acompanhamento da cura oxidativa de resinas alquídicas formuladas a partir do óleo de soja, diferentes regiões do espectro fornecem informações complementares sobre o avanço da reação. A banda em torno de  $3008\text{ cm}^{-1}$ , atribuída ao estiramento  $\text{=C-H}$  dos grupos vinílicos presentes nos ácidos linoleico e linolênico, é o marcador cinético do processo, pois seu decréscimo progressivo reflete diretamente o consumo das ligações duplas  $\text{C=C}$  pela auto-oxidação e o avanço da reticulação<sup>9</sup>.

A banda da carbonila, em  $1720\text{--}1740\text{ cm}^{-1}$ , sofre alargamento ao longo da cura em decorrência da formação de novas espécies carbonílicas, aldeídos, cetonas e ácidos carboxílicos, geradas pela decomposição dos hidroperóxidos formados na etapa de propagação da auto-oxidação. De maneira concomitante, observa-se o surgimento de uma banda larga na região de  $3200\text{--}3500\text{ cm}^{-1}$ , atribuída a estiramentos  $\text{O-H}$  e consistente com a presença de hidroperóxidos e álcoois oriundos da mesma rota oxidativa. Por fim, o crescimento de bandas na região de  $1050\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$ , atribuídas a estiramentos de ligações éter ( $\text{C-O-C}$ ), tem sido associado à formação das pontes de reticulação que estruturam a rede polimérica final<sup>11</sup>.

O conjunto dessas variações espectrais permite, simultaneamente, acompanhar a cinética de consumo das insaturações e caracterizar qualitativamente os produtos formados ao longo do processo de reticulação e envelhecimento, o que justifica o uso amplo da espectroscopia ATR-FTIR em estudos de cura e degradação de pinturas alquídicas.

## 4 OBJETIVOS

### 4.1 Objetivo geral

Avaliar a influência do comprimento da cadeia de óleo (curta, média e longa) na cinética de cura e nos parâmetros termodinâmicos de resinas alquídicas à base de óleo de soja, monitorando a fase inicial do processo de cura por auto-oxidação, para subsidiar ações de conservação, restauro e uso artísticos de resinas alquídicas em obras de arte.

### 4.2 Objetivos específicos

- Realizar ensaios cinéticos de cura utilizando resinas alquídicas de cadeia curta, média e longa, submetidas a uma faixa de temperatura entre 20 e 50 °C durante um período de 72 horas;
- Monitorar o avanço da reticulação por meio de espectroscopia de infravermelho (ATR-FTIR), calculando a área integrada da banda espectral com foco no consumo do grupo vinílico  $\text{CH}=\text{CH}$  ( $3008\text{ cm}^{-1}$ );
- Determinar as constantes cinéticas ( $k$ ) e os tempos de meia-vida ( $t_{1/2}$ ) associados ao processo de cura de cada variação da resina;
- Aplicar os modelos matemáticos de *Arrhenius* e *Eyring* para calcular a energia de ativação ( $E_a$ ) e os parâmetros termodinâmicos (entalpia, entropia de ativação) do processo;
- Interpretar os parâmetros físico-químicos obtidos e relacioná-los diretamente com as estruturas químicas;
- Comparar os valores cinéticos e termodinâmicos obtidos experimentalmente com os dados já estabelecidos na literatura para resinas e aglutinantes derivados de óleos vegetais.

## 5 METODOLOGIA

### 5.1 Materiais

Os experimentos foram realizados utilizando resinas alquídicas à base de óleo de soja com diferentes comprimentos de cadeia (curta, média e longa). As amostras foram doadas pela WEG® Tintas e as propriedades físico-químicas estão descritas na Tabela 1. O linho de alta pureza foi adquirido comercialmente e utilizado sem tratamento prévio. Para limpeza dos pincéis, após a aplicação da resina, foi utilizado xileno da *Merck*.

Tabela 1 – Propriedades físico-químicas das resinas utilizadas neste trabalho

| Resina alquídica | Comprimento do óleo (%) | Viscosidade (cP) | Anidrido ftálico (%) | Tipo de cura        | Dureza   |
|------------------|-------------------------|------------------|----------------------|---------------------|----------|
| Curta            | 35                      | 800–1400         | 38–50                | Física ou oxidativa | Alta     |
| Média            | 40                      | 1000–2000        | 30–38                | Oxidativa rápida    | Moderada |
| Longa            | 50                      | 5000–7500        | 10–30                | Oxidativa lenta     | Baixa    |

Fonte: Autoria própria (2026).

### 5.2 Preparo da amostra

A resina alquídica foi aplicada diretamente em corpos de prova de linho, material tradicionalmente utilizado em telas para pintura. A escolha do suporte têxtil em detrimento de placas de vidro visa simular a real interface entre o aglutinante sintético e a fibra natural, pois a porosidade do linho influencia na retenção do material e na difusão do oxigênio durante a secagem<sup>1,8</sup>. A aplicação foi realizada de forma manual com o auxílio de pincel de cerdas macias, formando um filme contínuo e homogêneo. A espessura do filme foi mantida aproximadamente constante para todas as amostras para garantir reprodutibilidade analítica e permitir a comparação direta do comportamento cinético entre as resinas de curta, média e longa.

### 5.3 Ensaio cinético de cura

O processo de envelhecimento acelerado foi conduzido em uma estufa com controle térmico, operando com umidade relativa média de 65% e na ausência de luz, a fim de isolar a degradação fotoquímica<sup>13</sup>.

Inicialmente, o delineamento experimental tinha como objetivo estudar a cinética de cura no intervalo de 40 a 80 °C. Contudo, ensaios preliminares conduzidos a 80 °C revelaram, após verificação e tratamento do espectro, que o consumo das ligações duplas ocorria de maneira demasiadamente abrupta. Conforme, observado por Ploeger et al.<sup>14</sup>, o envelhecimento térmico em temperaturas elevadas fornece energia de ativação suficiente para que o processo de cura a partir da oxidação e reticulação seja quase instantâneo, impossibilitando a coleta de dados cinéticos dentro dos intervalos de tempo propostos.

Diante disso, a temperatura final do ensaio foi reduzida para 50 °C. O monitoramento nesta nova condição indicou que a resina de cadeia curta atingia uma cura quase completa no intervalo entre 53 e 72 h, caracterizando uma janela de tempo ideal para o mapeamento da reação. Desta forma, o estudo cinético definitivo restringiu-se a faixa de temperatura de 20 a 50 °C assegurando o monitoramento da cura das resinas durante toda a faixa de temperatura estudada e foram coletados pontos nos intervalos de 5, 24, 29, 48, 53 e 72 h.

### 5.4 Análise por ATR-FTIR

As análises químicas de superfície foram realizadas por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) em um espectrômetro JASCO, modelo FTIR-4100. O equipamento operou acoplado a um acessório de refletância total atenuada equipado com um cristal de seleneto de zinco (ZnSe). Os espectros foram coletados no modo transmitância, com resolução espectral de 4 cm<sup>-1</sup> e acúmulo de 32 varreduras por espectro. A técnica ATR-FTIR foi selecionada por não ser destrutiva e permitir a análise direta das alterações químicas na superfície do filme da resina sobre o linho conforme descrito por Depolo et al.<sup>19</sup> e Bartolozzi et al.<sup>9</sup>. Para garantir a reprodutibilidade e evitar contaminação, entre cada leitura de amostra, o cristal de ZnSe foi higienizado utilizando algodão embebido em acetona.

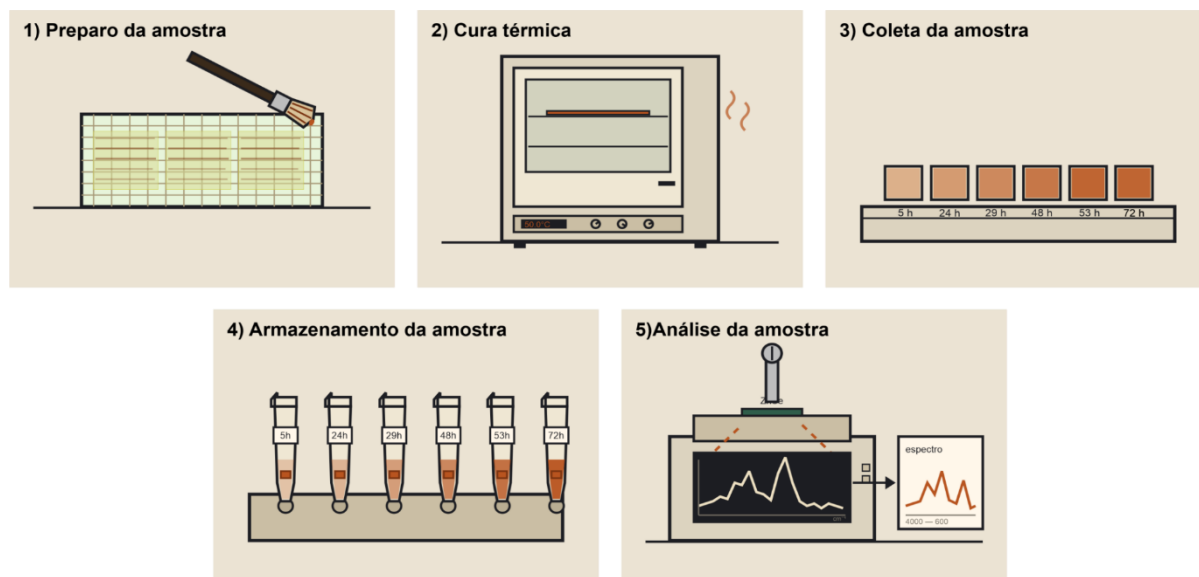
## 5.5 Monitoramento espectroscópico e tratamento dos dados

O acompanhamento da cura oxidativa das três resinas (curta, média e longa) foi realizado monitorando as variações de intensidade nas bandas de absorção características do polímero. Os dados experimentais foram focados na região espectral de  $3040\text{--}2980\text{ cm}^{-1}$ . Nesta região, destaca-se a banda em aproximadamente  $3008\text{ cm}^{-1}$ , atribuída ao estiramento da ligação carbono-hidrogênio dos grupos vinílicos presentes nos ácidos graxos insaturados do óleo de soja<sup>9,11,12</sup>.

A cura de resinas alquídicas é um processo de auto-oxidação em que o oxigênio atmosférico reage com essas insaturações para formar hidroperóxidos, que posteriormente geram ligações cruzadas. Portanto, o decréscimo contínuo da banda em  $3008\text{ cm}^{-1}$  atua como um marcador quantitativo direto do consumo de ligações duplas e do avanço da reticulação tridimensional da matriz polimérica. Segundo Depolo *et al.*<sup>19</sup>, a ausência completa dessa banda marca o término da fase inicial de cura da resina, ponto em que praticamente todas as duplas ligações  $\text{C}=\text{C}$  foram consumidas durante o processo oxidativo.

Todos os espectros coletados foram tratados por meio da correção da linha base e normalização. Valores discrepantes (*outliers*) foram identificados e removidos utilizando o método de Tukey<sup>15</sup>. Em cada ponto foi coletado no mínimo cinco espectros.

Figura 7– Diagrama do fluxo de trabalho



Fonte: Autoria própria (2026).

## **5.6 Segurança no laboratório e tratamento de resíduos**

Durante todas as etapas experimentais do estágio, foram seguidas as normas de segurança laboratorial. O manuseio das resinas alquídicas e dos solventes exigiu o uso de equipamentos de proteção individual, incluindo jaleco de algodão e luvas de procedimento. Atenção especial foi dada ao uso de acetona, um solvente volátil e inflamável utilizado na limpeza do cristal do equipamento FTIR, cuja manipulação ocorreu em ambiente com ventilação adequada para evitar inalação de vapores.

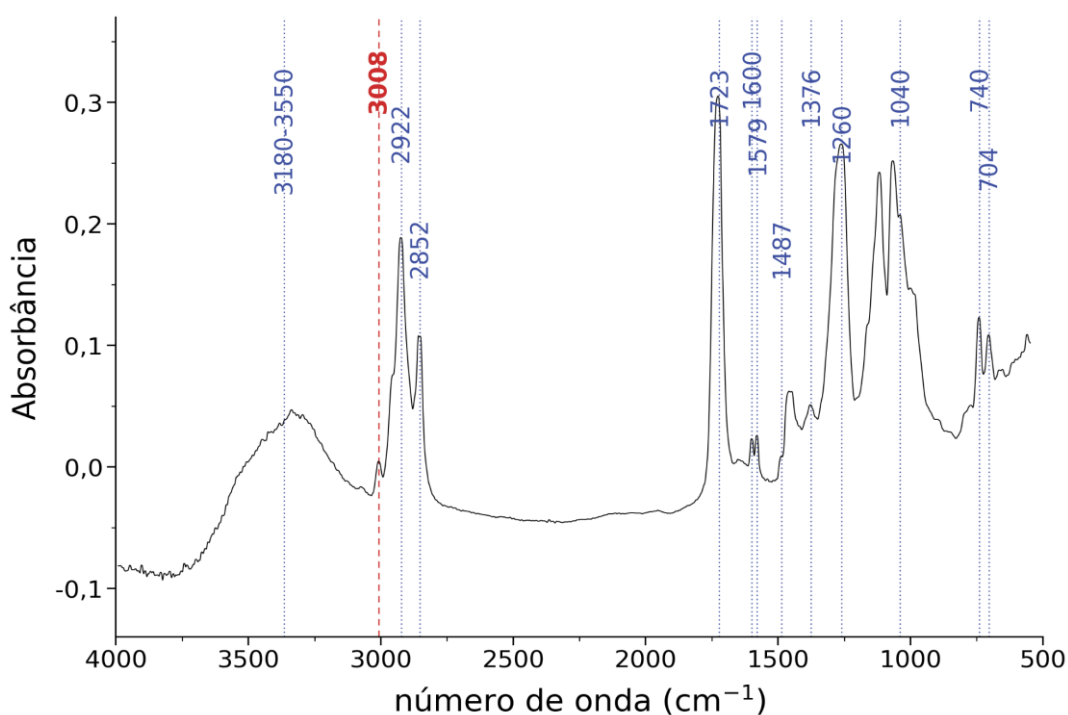
Em relação à gestão ambiental e ao descarte de materiais, estabelece-se um protocolo para evitar a contaminação orgânica comum. Todos os resíduos gerados no processo, incluindo as amostras de linho com resina curada após as análises, as luvas de procedimento utilizadas e os algodões com acetona, foram descartados em coletores sólidos. Esse material foi então destinado para tratamento e descarte de acordo com as normas de gestão de resíduos adotadas pelo laboratório.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 Caracterização inicial da resina alquídica

A caracterização química das resinas alquídicas antes da cura foi realizada utilizando a técnica de ATR-FTIR, permitindo identificar os grupos funcionais característicos da estrutura polimérica. Destacando-se a banda em  $3008\text{ cm}^{-1}$ , atribuída ao estiramento C-H das ligações C=C dos ácidos graxos. O espectro inicial de uma das resinas estudadas é apresentado na Figura 8 e a Tabela 2 apresenta as principais bandas identificadas.

Figura 8 – Espectro do ATR-FTIR de uma das resinas alquídicas antes da cura



Fonte: Autoria própria (2026).

Tabela 2 – Atribuições das bandas de absorção características da resina alquídica de óleo de soja

| Frequência ( $\text{cm}^{-1}$ ) | Atribuição     |
|---------------------------------|----------------|
| 3180-3550                       | vO-H           |
| 3008                            | Olefínico vC-H |
| 2922                            | Alifático vC-H |

| Frequência (cm <sup>-1</sup> ) | Atribuição                          |
|--------------------------------|-------------------------------------|
| 2852                           | Alifático νC-H                      |
| 1723                           | ν C=O éster                         |
| 1600                           | ν C=C anel aromático ftálico        |
| 1579                           | ν C=C anel aromático ftálico        |
| 1487                           | δ C-H grupos metila                 |
| 1376                           | δ C-H grupos metila                 |
| 1260                           | νC-O-C fração alifática e aromática |
| 1040                           | νC-O-C fração alifática e aromática |
| 740                            | Fora do plano aromático δ C-H       |
| 704                            | Fora do plano aromático δ C-H       |

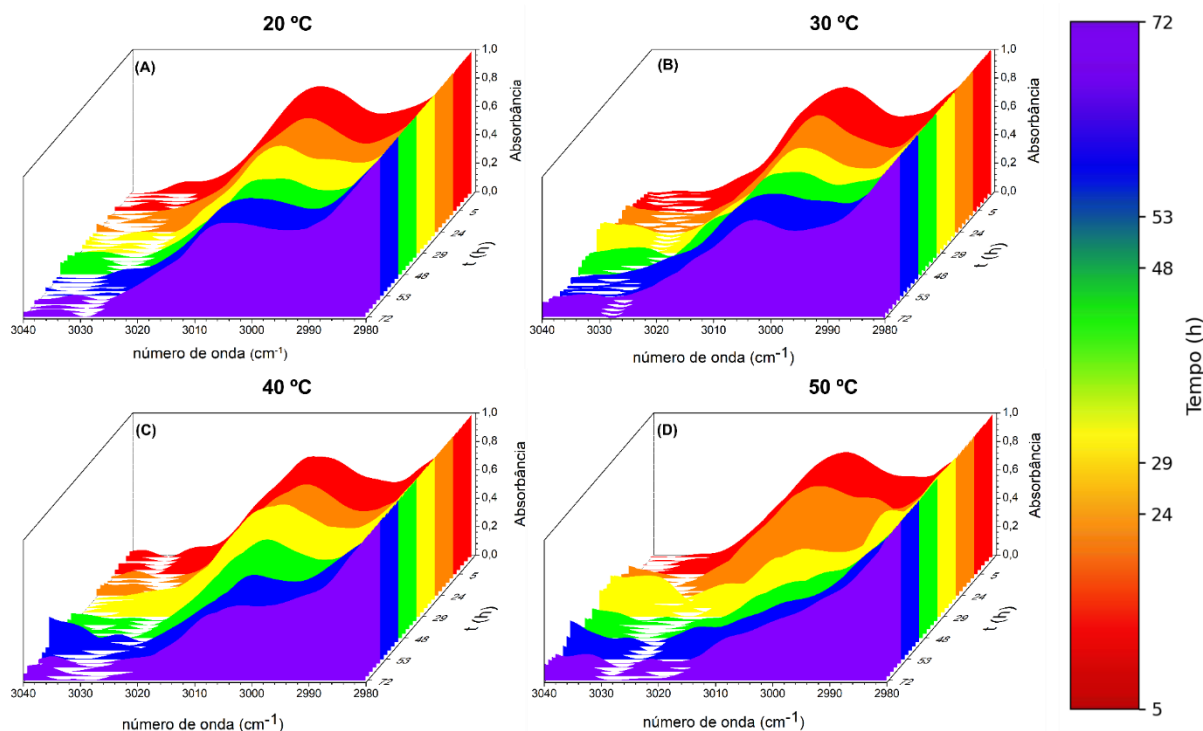
Fonte: Adaptado de Elba et al. (2018)

## 6.2 Monitoramento da cura por ATR-FTIR

O processo de reticulação das resinas alquídicas foi monitorado, acompanhando-se a variação da banda em 3008 cm<sup>-1</sup> ao longo do tempo de cada temperatura estudada. Os espectros obtidos em diferentes intervalos de tempos, apresentados nas Figuras 9, 10 e 11, referentes, respectivamente, às resinas alquídicas de cadeia curta, média e longa.

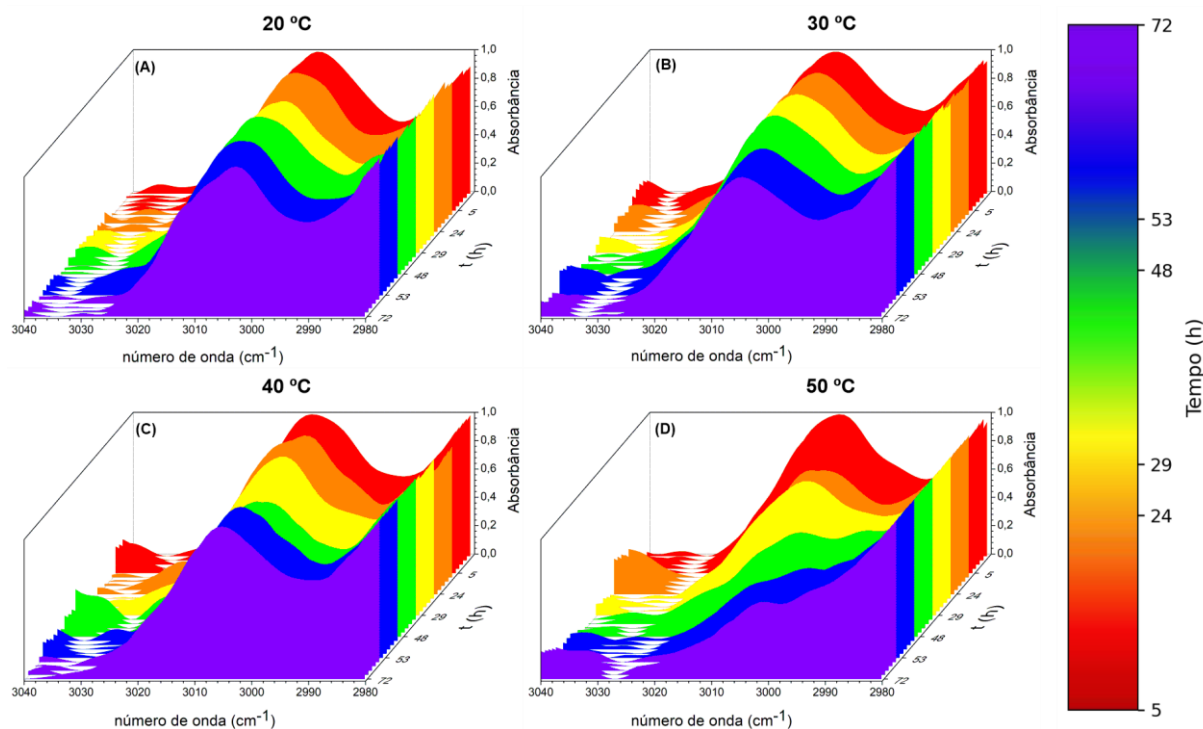
Cada figura é composta por quatro gráficos, correspondentes às temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C, permitindo acompanhar a evolução dos espectros em função do tempo para cada temperatura. Dessa forma, é possível analisar de forma direta a redução progressiva da intensidade da banda em 3008 cm<sup>-1</sup>, evidenciando o avanço da reticulação em cada sistema e o efeito da temperatura sobre a cinética do sistema. E o conjunto das três resinas possibilita avaliar a influência do comprimento da cadeia sobre a velocidade e o consumo das insaturações originais do óleo de soja durante o processo de reticulação.

Figura 9 – Espectros ATR-FTIR da resina alquílica de cadeia curta em diferentes intervalos de tempo, nas temperaturas de (A) 20 °C, (B) 30 °C, (C) 40 °C e (D) 50 °C



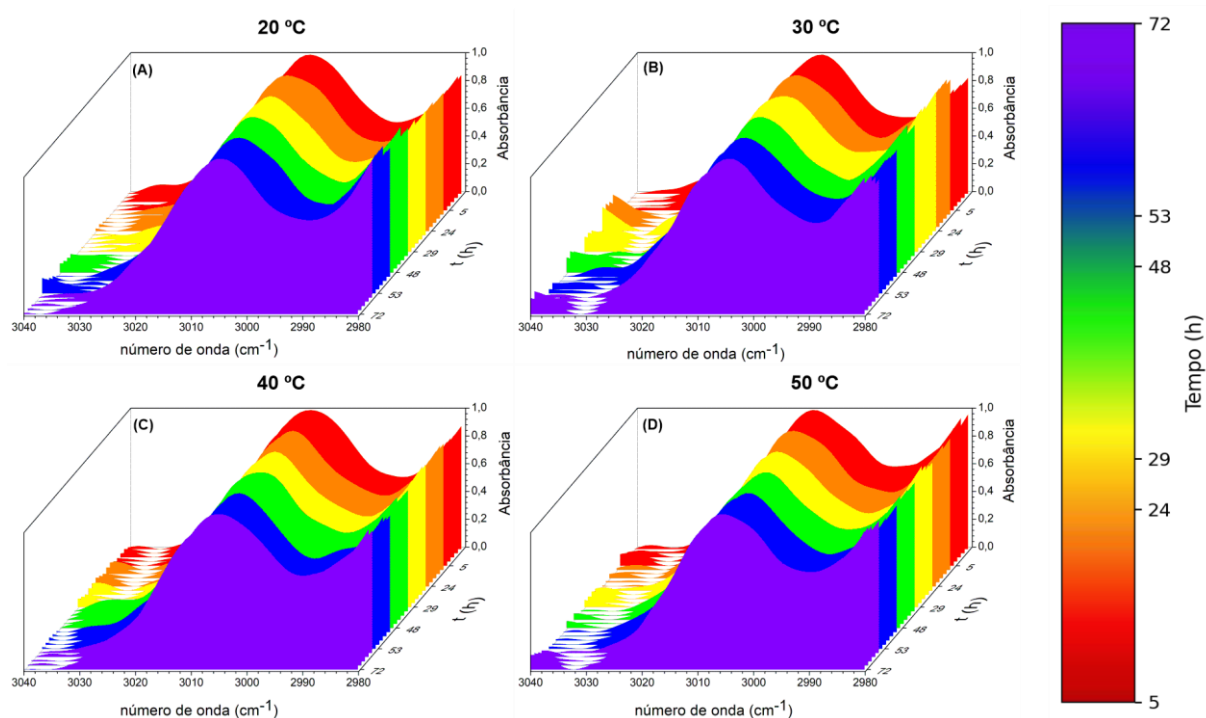
Fonte: Autoria própria (2026).

Figura 10 – Espectros ATR-FTIR da resina alquílica de cadeia média em diferentes intervalos de tempo, nas temperaturas de (A) 20 °C, (B) 30 °C, (C) 40 °C e (D) 50 °C



Fonte: Autoria própria (2026).

Figura 11 – Espectros ATR-FTIR da resina alquílica de cadeia longa em diferentes intervalos de tempo, nas temperaturas de (A) 20 °C, (B) 30 °C, (C) 40 °C e (D) 50 °C



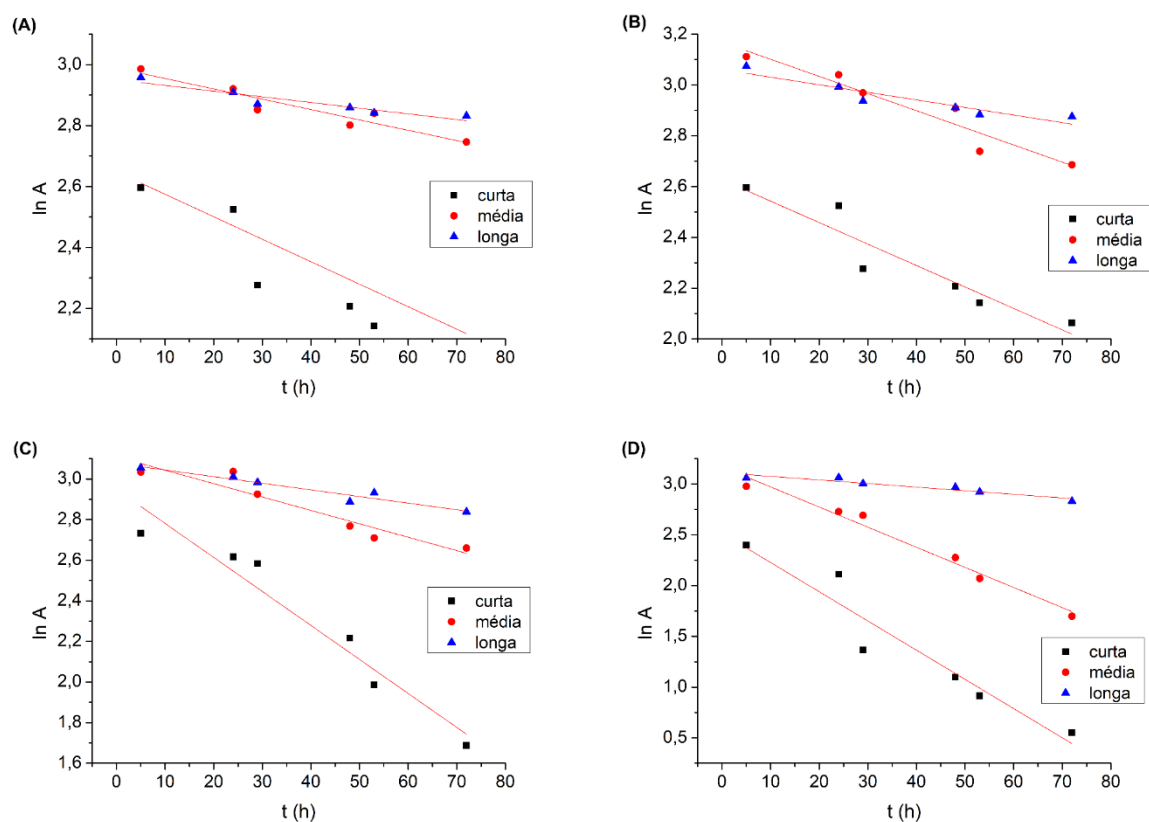
Fonte: Autoria própria (2026).

### 6.3 Determinação dos parâmetros cinéticos

A cinética da cura foi quantificada integrando a área da banda em  $3008\text{ cm}^{-1}$  nos espectros obtidos em cada tempo de análise (5, 24, 29, 48, 53 e 72 h) para as quatro temperaturas estudadas 20, 30, 40 e 50 °C. Os valores experimentais de  $\ln A$  foram plotados em função do tempo e ajustados por regressão linear, conforme a equação (3). A partir desses ajustes foram extraídas as constantes de velocidade de pseudo-primeira ordem, correspondentes a inclinação da reta, e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), e foi possível calcular o tempo de meia-vida ( $t_{1/2} = \ln 2 / k$ ).

Os gráficos resultantes estão apresentados na Figura 12, que reúne quatro gráficos, um para cada temperatura 20, 30, 40 e 50 °C, e cada gráfico contempla as três resinas alquílicas de cadeia curta, média e longa.

Figura 12 – Gráfico de  $\ln A$  em função do tempo para resina alquídica de cadeia curta, média e longa nas temperaturas de (A) 20 °C, (B) 30 °C, (C) 40 °C e (D) 50 °C



Fonte: Autoria própria (2026).

Os parâmetros cinéticos obtidos a partir dos ajustes lineares estão compilados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores da constante de velocidade, tempo de meia-vida para resina alquídica de cadeia curta, média e longa

| T / °C                                                             | 20     | 30     | 40     | 50     |
|--------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| <b>Curta</b>                                                       |        |        |        |        |
| Inclinação( $10^{-3} \text{ h}^{-1}$ )                             | - 7,38 | -8,45  | -16,74 | -28,76 |
| $k_{\text{pseudo-primeira ordem}}$<br>( $10^{-3} \text{ h}^{-1}$ ) | 7,38   | 8,45   | 16,74  | 28,76  |
| $t_{1/2}$ (h)                                                      | 93,92  | 82,03  | 41,40  | 24,10  |
| $R^2$                                                              | 0,843  | 0,890  | 0,940  | 0,922  |
| <b>Média</b>                                                       |        |        |        |        |
| Inclinação( $10^{-3} \text{ h}^{-1}$ )                             | -3,40  | -6,75  | -6,59  | -19,80 |
| $k_{\text{pseudo-primeira ordem}}$<br>( $10^{-3} \text{ h}^{-1}$ ) | 3,40   | 6,75   | 6,59   | 19,80  |
| $t_{1/2}$ (h)                                                      | 203,86 | 102,68 | 105,18 | 35,00  |
| $R^2$                                                              | 0,905  | 0,921  | 0,905  | 0,974  |
| <b>Longa</b>                                                       |        |        |        |        |
| Inclinação( $10^{-3} \text{ h}^{-1}$ )                             | -1,86  | -2,98  | -3,26  | -3,53  |
| $k_{\text{pseudo-primeira ordem}}$<br>( $10^{-3} \text{ h}^{-1}$ ) | 1,86   | 2,98   | 3,26   | 3,53   |
| $t_{1/2}$ (h)                                                      | 372,66 | 232,60 | 212,62 | 196,36 |
| $R^2$                                                              | 0,882  | 0,880  | 0,937  | 0,904  |

Fonte: Autoria própria (2026).

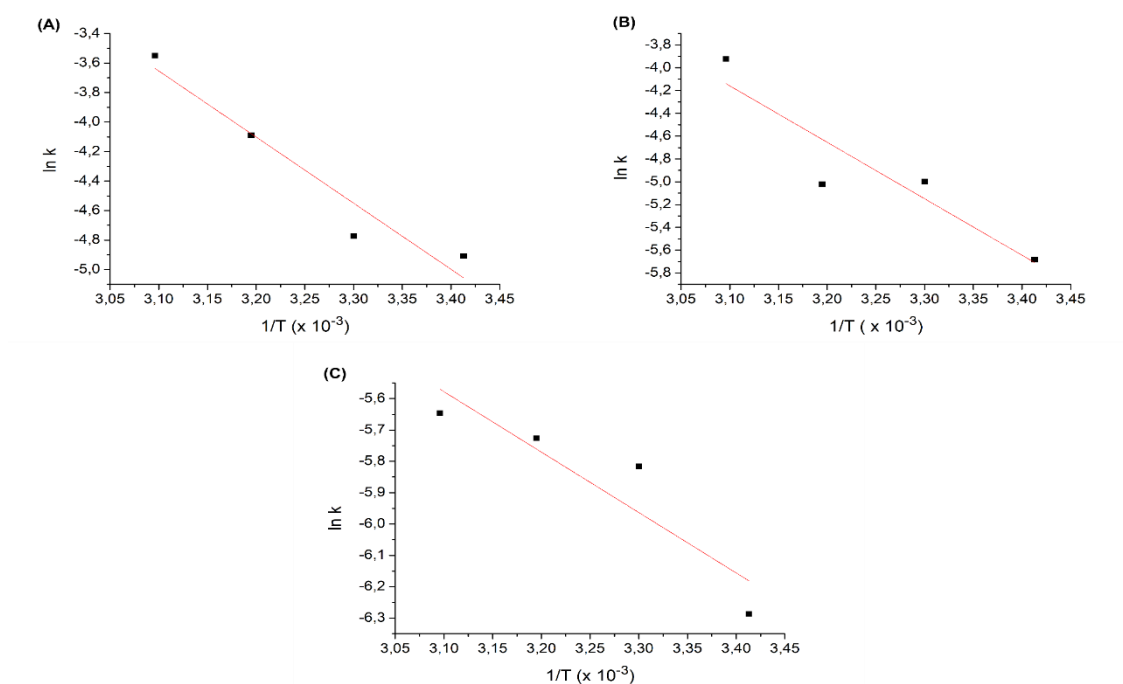
Os resultados da Tabela 3 indicaram, para os três comprimentos de cadeia, que o aumento da temperatura conduz para o aumento da constante de velocidade e à redução do tempo de meia-vida, confirmando a dependência térmica do processo de cura da resina alquídica. Comparando as três resinas em uma mesma temperatura, é possível observar que a resina curta apresenta os maiores valores de  $k$ , seguida da resina média e da longa. Esse comportamento está relacionado ao teor de anidrido

ftálico de cada formulação, a resina alquílica de cadeia curta por conter um percentual maior de anidrido ftálico, possui uma cadeia principal mais rígida e compacta, o que resulta em menor mobilidade conformacional das cadeias graxas e maior impedimento estérico ao redor dos sítios reativos. Apesar dessa rigidez dificultar a aproximação inicial do oxigênio, uma vez que a barreira energética é superada, a maior densidade da rede aproxima espacialmente os radicais gerados na propagação, favorecendo a recombinação e a reticulação e contribuindo para os maiores valores de  $k$ , sobretudo em temperaturas mais altas<sup>12,14</sup>.

O contraste entre os extremos é mais evidente em 50 °C, condição em que a resina curta atinge o menor tempo de meia-vida de todo o conjunto (24,10 h), enquanto a resina longa exibe uma pequena variação no valor de  $k$  entre 40 e 50 °C, indicando sensibilidade térmica reduzida. Uma hipótese para esse comportamento, com base no regime cinético descrito por Depolo et al.<sup>19</sup>, é que a maior fração de óleo e a maior flexibilidade das cadeias graxas levem esse sistema a ingressar mais cedo em um regime controlado por difusão, no qual o efeito da temperatura sobre a constante de velocidade é atenuado. Cabe ressaltar, que no presente estudo foi ajustada uma única constante de pseudo-primeira ordem por temperatura, de modo que essa associação é interpretativa.

Para determinar a energia necessária para iniciar o processo de reticulação, os valores de  $k$  foram tratados pela linearização da equação de Arrhenius ( $\ln k$  versus  $1/T$ ), cujos gráficos estão representados na Figura 13, individualmente para as resinas de cadeia curta (A), média (B) e longa (C). Os parâmetros extraídos estão compilados na Tabela 4.

Figura 13 – Linearização de Arrhenius (ln K versus 1/T) das resinas (A) curta; (B) média e (C) longa



Fonte: Autoria própria (2026).

Tabela 4 – Parâmetros de Arrhenius para as resinas alquídicas de cadeia curta, média e longa

|                               | Curta    | Média    | Longa    |
|-------------------------------|----------|----------|----------|
| Inclinação (K <sup>-1</sup> ) | -4480,65 | -4952,13 | -1927,19 |
| Intercepto                    | 10,24    | 11,19    | 0,39     |
| Ea (kJ/mol)                   | 37,25    | 41,17    | 16,02    |
| R <sup>2</sup>                | 0,934    | 0,858    | 0,837    |

Fonte: Autoria própria (2026).

Os resultados da Tabela 4 confirmam que a resina de cadeia curta apresenta uma energia de ativação significativamente superior (37,25 kJ/mol) à da resina longa (16,02 kJ/mol). Essa diferença pode ser interpretada a partir da composição de cada resina, a resina curta possui entre 38 - 50 % de anidrido ftálico em sua cadeia principal,

enquanto que a resina longa possui apenas 10 - 30 % desse componente<sup>12,17</sup>. O anel aromático do anidrido ftálico é uma estrutura planar e rígida que não possui graus de liberdade rotacional. Consequentemente, quanto maior a porção de anidrido ftálico, menor a mobilidade segmental do polímero e maior o impedimento estérico ao redor dos sítios reativos, as duplas ligações de ácido linoleico e linolênico<sup>12,14</sup>.

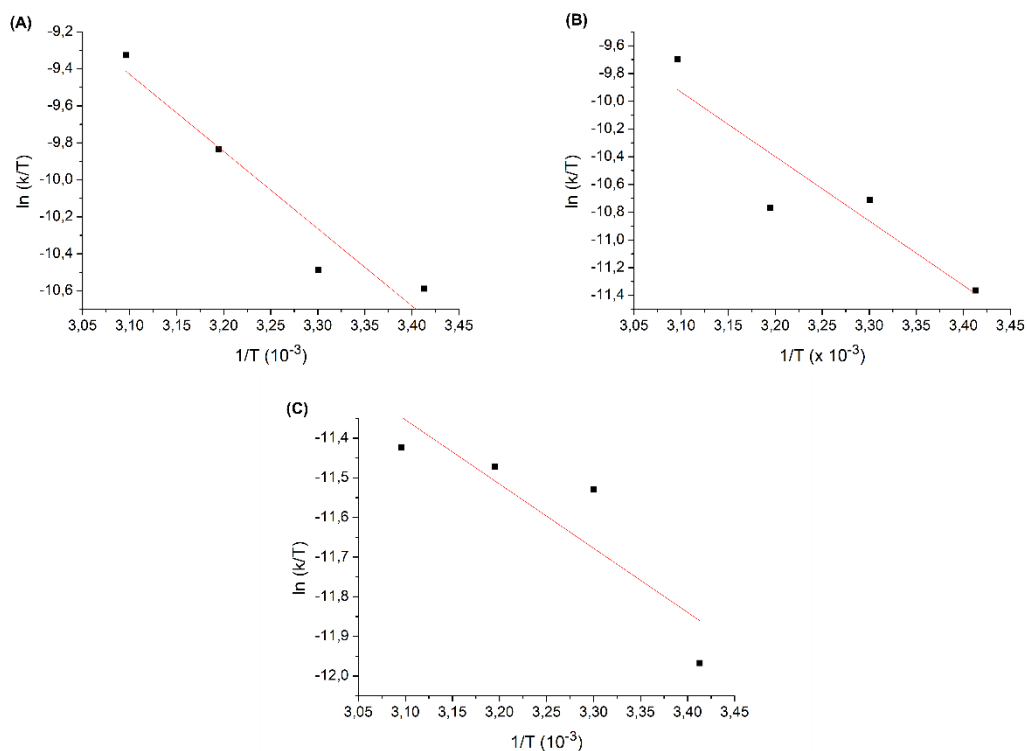
Esse impedimento estérico tem um efeito duplo sobre a cinética. Por um lado, dificulta a aproximação do oxigênio atmosférico aos hidrogênios alílicos, reduzindo a frequência de colisões efetivas entre os reagentes.

As energias de ativação das resinas curta e média apresentaram valores próximos entre si, com a média apresentando 41,17 kJ/mol, configurando a ordem média > curta > longa. O ajuste de Arrhenius da resina média mostrou-se particularmente sensível ao ponto obtido a 50 °C, uma vez que os valores de  $k$  a 30 e 40 °C resultaram praticamente coincidentes, enquanto o ensaio em 50 °C precisou ser repetido. Como a inclinação do ajuste é influenciada pelo valor de  $k$  na temperatura mais elevada da série, esse ponto foi significativo na determinação do coeficiente angular e em consequência no valor de energia de ativação.

#### **6.4 Determinação dos parâmetros termodinâmicos**

A investigação do estado de transição foi realizada pela aplicação da equação de *Eyring*, por meio dos gráficos de  $\ln(k/T)$  em função de  $1/T$ , apresentados na Figura 14, individualmente para as resinas de cadeia curta (A), média (B) e longa (C). Os parâmetros extraídos estão compilados na Tabela 5.

Figura 14 – Gráficos de  $\ln(k/T)$  em função de  $1/T$  das resinas (A) curta; (B) média e (C) longa



Fonte: Autoria própria (2026).

Tabela 5 – Parâmetros termodinâmicos para as resinas alquídicas de cadeia curta, média e longa

|                                | Curta    | Média    | Longa    |
|--------------------------------|----------|----------|----------|
| Inclinação( $K^{-1}$ )         | -4173,23 | -4644,70 | -1619,76 |
| Intercepto                     | 3,50     | 4,46     | -6,33    |
| $\Delta H^\ddagger$ (kJ/mol)   | 34,67    | 38,61    | 13,47    |
| $\Delta S^\ddagger$ (kJ/K·mol) | - 0,168  | -0,160   | -0,250   |
| $R^2$                          | 0,925    | 0,842    | 0,786    |

Fonte: Autoria própria (2026).

Os resultados da Tabela 5 mostram, em primeiro lugar, que as três formulações apresentam valores positivos de entalpia de ativação e negativos de entropia de ativação, comportamento característico de processos cuja etapa limitante envolve a formação de um complexo ativado mais organizado do que os reagentes de partida. Esse padrão é consistente com o mecanismo de auto-oxidação proposto para resina

alquídica, na qual a abstração do hidrogênio bis-álíco pelo oxigênio molecular e a posterior adição do O<sub>2</sub> ao radical de carbono exigem uma orientação espacial específica entre as espécies reagentes, com consequente perda de graus de liberdade na formação do estado de transição<sup>11,17,18</sup>. Os valores de  $\Delta H^\ddagger$  obtidos são muito próximos das energias de ativação determinadas pela equação de Arrhenius (Tabela 4). Essa proximidade é coerente com a relação  $E_a = \Delta H^\ddagger + RT$ , prevista pela Teoria do Estado de Transição para reações em fase condensada na qual o termo  $RT$  (aproximadamente 2,50 kJ/mol à 298 K) é pequeno frente à barreira entálpica<sup>21</sup>. A mesma proximidade entre  $E_a$  e  $\Delta H^\ddagger$  tem sido relatada em estudos de oxidação lipídica que aplicam conjuntamente as equações de Arrhenius e Eyring<sup>18,17</sup>.

Comparando as resinas de cadeia curta e longa, observa-se que a entalpia de ativação da resina curta (34,67 kJ/mol) é cerca de duas vezes e meia superior à da resina longa (13,47 kJ/mol). Essa diferença tem a mesma origem estrutural discutida para a energia de ativação, a rigidez conferida pelo anidrido ftálico eleva a barreira entálpica da etapa limitante, a abstração do hidrogênio bis-álíco na resina curta ao passo que a maior flexibilidade das cadeias graxas a reduz na resina longa<sup>12,14</sup>.

A análise dos valores de entropia de ativação não acompanha a mesma ordem observada para a energia de ativação e a entalpia de ativação. A resina longa apresenta a entropia de ativação mais negativa do conjunto (-0,250 kJ/mol·K), seguida da curta (-0,168 kJ/mol·K) e da média (-0,160 kJ/mol·K).

Entre as resinas curta e média, a diferença é coerente com o gradiente de rigidez estrutural discutido anteriormente: o maior teor de anidrido ftálico na curta restringe a mobilidade da cadeia principal, exigindo um arranjo geométrico mais específico entre o hidrogênio bis-álíco e a molécula de oxigênio, o que se traduz em um estado de transição um pouco mais organizado que o da resina média<sup>11,16,17</sup>.

O valor mais negativo observado para a resina longa, entretanto, não segue essa tendência e sugere que outro fator, além da rigidez conferida pelo anidrido ftálico, esteja governando a entropia de ativação nesse sistema. Uma hipótese é que a maior extensão e flexibilidade das cadeias graxas da resina longa, embora reduzam a barreira entálpica da reação (menor  $\Delta H^\ddagger$ ), exijam ao mesmo tempo uma reorganização conformacional mais ampla para que o hidrogênio bis-álíco e o oxigênio molecular atinjam a orientação favorável à reação. Enquanto na resina curta a rigidez do anel aromático já restringe boa parte dos graus de liberdade desde o estado fundamental, limitando a perda adicional de entropia ao formar o complexo ativado, na resina longa

a cadeia graxa parte de um estado com maior liberdade conformacional, o que pode ampliar a variação entrópica necessária para alcançar o estado de transição.

## 7 CONCLUSÃO

A conservação de pinturas modernas com aglutinantes alquídicos depende da compreensão de como essas resinas curam e envelhecem ao longo do tempo. Os objetivos propostos para o estudo foram atingidos. Estudou-se a cinética de cura térmica de três resinas alquídicas à base de óleo de soja, diferindo pelo percentual em ácido graxo, entre 20 e 50 °C ao longo de 72 h, acompanhando o consumo das insaturações dos ácidos graxos por ATR-FTIR pela banda em 3008 cm<sup>-1</sup>.

A partir dos dados das constantes de velocidade de pseudo-primeira ordem e dos tempos de meia-vida obtidos, constatou-se a ordem  $k_{\text{curta}} > k_{\text{média}} > k_{\text{longa}}$  e a redução sistemática do  $t_{1/2}$  em função da temperatura. Os ajustes de Arrhenius e de Eyring forneceram os dados cinéticos e termodinâmicos como as energias, entalpias e entropias de ativação das três resinas. A resina longa, por sua vez, apresentou os menores valores para os parâmetros ( $E_a = 16,02$  kJ/mol,  $\Delta H^\ddagger = 13,47$  kJ/mol) refletindo a maior proporção de cadeias graxas flexíveis na formulação.

No conjunto, os dados indicam que o comprimento da cadeia de óleo influencia diretamente na cinética e termodinâmica da fase inicial da cura da resina alquídica. Os dados obtidos são úteis para previsão da estabilidade físico-química em pinturas alquídicas e para o suporte técnico das ações de conservação preventiva.

Como perspectivas para continuidade do estudo, pretende-se ampliar a coleta de amostras em intervalos de tempo mais variados para mapear com maior resolução a evolução da cura. Planeja-se avaliar a banda da carbonila por ATR-FTIR e estender o estudo a outras faixas de temperatura. A resina média necessita de um estudo inicial para verificar o percentual de óleo em sua composição.

## **8 CONTRIBUIÇÃO DO ESTÁGIO À FORMAÇÃO PROFISSIONAL**

O estágio supervisionado realizado no Ateliê de Conservação e Restauração de Bens Culturais Móveis representou uma etapa importante para a consolidação da formação acadêmica e para o amadurecimento profissional, ao proporcionar a vivência em um ambiente de trabalho científico aplicado a uma área pouco explorada durante a graduação em Química Tecnológica. O contato com a interface entre química, conservação e patrimônio cultural revelou um campo de atuação que era desconhecido e despertou interesse pela pesquisa na área de conservação.

Do ponto de vista técnico, o estágio possibilitou o primeiro contato com a espectroscopia de infravermelho. A familiarização com o equipamento, com os procedimentos de preparo e leitura das amostras, com a interpretação das bandas espectrais e com o tratamento dos dados incluindo correção de baseline, normalização de dados, integração de áreas para avaliação dos dados, agregou um conhecimento técnico analítico para o perfil profissional.

## REFERÊNCIAS

- <sup>1</sup>STUART, B. H. Conservation materials. In: STUART, B. H. **Analytical techniques in materials conservation**. Sydney: John Wiley & Sons, 2007. cap. 1, p. 1-37.
- <sup>2</sup>OLENDER, M. "O abismo da história é grande o suficiente para todos": os primórdios da Carta de Atenas de 1931 e a afirmação da noção de patrimônio da humanidade. *Locus: Revista de História, Juiz de Fora*, v. 26, p. 291-313, 2020.
- <sup>3</sup>MOTTA, L. A conquista do conceito de patrimônio cultural na Constituição de 1988. **Anais do Museu Paulista: História e Cultura Material**, São Paulo, v. 31, p. 1-37, 2023.
- <sup>4</sup>COSTA, T. G.; ALTHOFF, F. R. Implantação de um Laboratório de Materiais destinado à conservação-restauração de bens culturais: uma abordagem interdisciplinar. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE INTERDISCIPLINARIDADE NO ENSINO, NA PESQUISA E NA EXTENSÃO – REGIÃO SUL, 2013, Florianópolis. **Anais**. Florianópolis: EGC/UFSC, 2013.
- <sup>5</sup>PLOEGER, R. et al. The characterization of commercial artists' alkyd paints. **Journal of Cultural Heritage**, v. 9, n. 4, p. 412-419, 2008.
- <sup>6</sup>PLOTKOWSKI, M. C. M. **Pintura acrílica**: da crise da representação artística que favoreceu sua implantação no século XX às peculiaridades de sua conservação-restauração. 2022. 87 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) – Escola de Belas Artes, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.
- <sup>7</sup>DIZMAN, C.; CERRAHOGLU KACAKGIL, E. Alkyd resins produced from bio-based resources for coating applications: a review. **Coatings**, v. 13, n. 2, p. 400, 2023.
- <sup>8</sup>ETXEBERRIA, I. et al. Novel bio-based formulations for alkyd wood coatings: effects on biodegradation and technical performance. **Coatings**, v. 15, n. 4, p. 400, 2025.
- <sup>9</sup>BARTOLOZZI, G. et al. Chemical curing in alkyd paints: an evaluation via FT-IR and NMR spectroscopies. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 123, p. 324-331, 2014.
- <sup>10</sup>DERRICK, M. R.; STULIK, D.; LANDRY, J. M. **Infrared spectroscopy in conservation science**. Los Angeles: The Getty Conservation Institute, 1999. (Scientific Tools for Conservation).
- <sup>11</sup>DUCE, C. et al. FTIR study of ageing of fast drying oil colour (FDOC) alkyd paint replicas. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 130, p. 214-221, 2014.
- <sup>12</sup>HOFLAND, A. Alkyd resins: from down and out to alive and kicking. **Progress in Organic Coatings**, v. 73, n. 4, p. 274-282, 2012.
- <sup>13</sup>FELLER, R. L. **Accelerated aging**: photochemical and thermal aspects. Marina del Rey: The Getty Conservation Institute, 1994.
- <sup>14</sup>PLOEGER, R.; SCALARONE, D.; CHIANTORE, O. Thermal analytical study of the oxidative stability of artists' alkyd paints. **Polymer Degradation and Stability**, v. 94, n. 11, p. 2036-2041, 2009.

- <sup>15</sup>DALLAH, D. et al. Empirical evaluation of the relative range for detecting outliers. **Entropy**, v. 27, p. 731, 2025.
- <sup>16</sup>ANGILELLI, K. G. et al. Evaluation of the kinetic and thermodynamic parameters of oxidation reaction in biodiesel from a quaternary mixture of raw material. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, v. 39, n. 2, p. 241-248, 2017.
- <sup>17</sup>ZHENG, L. et al. Kinetic and thermodynamic studies of tocopherol thermal degradation in lipid systems with various degrees of unsaturation. **LWT - Food Science and Technology**, v. 160, p. 113230, 2022.
- <sup>18</sup>KURTULBAŞ, E.; BILGIN, M.; ŞAHİN, S. Assessment of lipid oxidation in cottonseed oil treated with phytonutrients: kinetic and thermodynamic studies. **Industrial Crops & Products**, v. 124, p. 593-599, 2018.
- <sup>19</sup>DEPOLO, G. et al. Comprehensive characterization of drying oil oxidation and polymerization using time-resolved infrared spectroscopy. **Macromolecules**, v. 57, p. 8263-8276, 2024.
- <sup>20</sup>ELBA, M. E.; ABDEL REHIM, E. M.; ASHERY, R. E. Synthesis and characterization of alkyd resin based on soybean oil and glycerin using zirconium octoate as catalyst. **International Journal of Chemistry and Technology**, [s. l.], 2018.
- <sup>21</sup>ATKINS, P. W.; DE PAULA, J. **Físico-química**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017. v. 2.
- <sup>22</sup>CURY, I. (org.). **Cartas patrimoniais**. 3. ed. rev. e aum. Rio de Janeiro: IPHAN, 2004.
- <sup>23</sup>BRASIL. Decreto-Lei nº 25, de 30 de novembro de 1937. Organiza a proteção do patrimônio histórico e artístico nacional. **Diário Oficial da União**: Rio de Janeiro, 6 dez. 1937.
- <sup>24</sup>BRASIL. Decreto nº 3.551, de 4 de agosto de 2000. Institui o Registro de Bens Culturais de Natureza Imaterial. **Diário Oficial da União**: Brasília, 7 ago. 2000.
- <sup>25</sup>HADZICH, A. et al. NMR and GPC analysis of alkyd resins: influence of synthesis method, vegetable oil and polyol content. **Polymers**, v. 15, n. 9, p. 1993, 2023.

## ANEXOS

## ANEXO A – Declaração de cumprimento de estágio obrigatório

Fundação Catarinense de Cultura  
Ateliê de Conservação e Restauro de Bens Culturais  
Laboratório de Materiais



Fundação Catarinense de Cultura  
Av. Gov. Irineu Bornhausen, nº 5600  
Florianópolis – SC, CEP: 88025-202– Brasil  
Dr. Thiago Guimarães Costa  
e-mail: thiagocosta@fcc.sc.gov.br  
atecor@fcc.sc.gov.br  
fone: (+55) 48 3664-2617

Florianópolis, 26 de junho de 2026

## DECLARAÇÃO DE ESTÁGIO OBRIGATÓRIO

O **Ateliê de Conservação e Restauração de Bens Culturais Móveis** vinculado à Fundação Catarinense de Cultura, inscrita sobre o CNPJ **83.722.462/0001-40**, localizado na Avenida **Gov. Irineu Bomhausen**, número **5600**, bairro **Agronômica**, na cidade de **Florianópolis/SC**, declara que a aluna **Paula de [REDACTED]**, número de matrícula **[REDACTED]**, realizou estágio **OBRIGATÓRIO** referente a disciplina **Estágio Supervisionado (QMC 5533)** no **Ateliê de Conservação e Restauração de Bens Culturais Móveis** entre o período de **20/01/2026** a **30/06/2026**, totalizando 450 horas.

A Instituição de Ensino (UFSC) em que a aluna estuda possui vínculo com esta **instituição ou órgão** e a aluna tem seu projeto de estágio de conclusão de curso supervisionado pelo **Químico Dr. Thiago Guimarães Costa**.

Atenciosamente,

<assinado digitalmente>  
**Dr. Thiago Guimarães Costa**



## Assinaturas do documento



Código para verificação: **822NI7LI**

Este documento foi assinado digitalmente pelos seguintes signatários nas datas indicadas:



**THIAGO GUIMARÃES COSTA** (CPF: 050.XXX.189-XX) em 26/05/2026 às 16:57:23

Emitido por: "SGP-e", emitido em 13/07/2018 - 15:12:02 e válido até 13/07/2118 - 15:12:02.

(Assinatura do sistema)

Para verificar a autenticidade desta cópia, acesse o link <https://portal.sgpe.sea.sc.gov.br/portal-externo/conferencia-documento/RkNDXzQyNzRfMDAwMDE0ODBfMTQ4MF8yMDI2XzgyMk5JN0xJ> ou o site <https://portal.sgpe.sea.sc.gov.br/portal-externo> e informe o processo **FCC 00001480/2026** e o código **822NI7LI** ou aponte a câmera para o QR Code presente nesta página para realizar a conferência.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A – Áreas integradas da banda em 3008 cm<sup>-1</sup> e tratamento estatístico da resina alquílica de cadeia curta nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C

| Resina alquílica curta 20 °C |        |        |        |        |        |        | Resina alquílica curta 30 °C |        |        |         |        |        |        |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------------------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| AMOSTRA                      | 5h     | 24h    | 29h    | 48h    | 53h    | 72h    | AMOSTRA                      | 5h     | 24h    | 29h     | 48h    | 53h    | 72h    |
| A1 - 3008                    | 14,47  | 13,19  | 12,95  | 9,936  | 8,929  | 8,578  | A1 - 3008                    | 13,69  | 12,68  | 10,34   | 9,21   | 8,981  | 7,998  |
| A2 - 3008                    | 13,35  | 12,53  | 12,9   | 9,531  | 9,057  | 9,318  | A2 - 3008                    | 13,6   | 12,4   | 10,12   | 8,973  | 8,592  | 7,749  |
| A3 - 3008                    | 13,26  | 12,28  | 11,85  | 9,135  | 8,692  | 9,035  | A3 - 3008                    | 13,5   | 12,26  | 9,6     | 9,218  | 8,797  | 7,474  |
| A4 - 3008                    | 12,99  | 12,67  | 11,38  | 9,558  | 8,197  | 8,635  | A4 - 3008                    | 13,1   | 12,27  | 9,593   | 9,023  | 8,164  | 7,842  |
| A5 - 3008                    | 12,54  | 11,55  | 12,01  | 9,352  | 8,249  | 8,740  | A5 - 3008                    | 13,17  | 12,82  | 9,053   | 9,013  | 8,067  | 7,905  |
| Média                        | 13,322 | 12,444 | 12,218 | 9,5024 | 8,6248 | 8,8612 | Média                        | 13,412 | 12,486 | 9,7412  | 9,0874 | 8,5202 | 7,7936 |
| Desvio                       | 0,7149 | 0,6002 | 0,6859 | 0,2956 | 0,3899 | 0,3102 | Desvio                       | 0,2628 | 0,2522 | 0,5044  | 0,1171 | 0,3957 | 0,2004 |
| Q1                           | 12,99  | 12,28  | 11,85  | 9,352  | 8,249  | 8,635  | Q1                           | 13,17  | 12,27  | 9,593   | 9,013  | 8,164  | 7,749  |
| Q3                           | 13,35  | 12,67  | 12,9   | 9,558  | 8,929  | 9,035  | Q3                           | 13,6   | 12,68  | 10,12   | 9,21   | 8,797  | 7,905  |
| IQR                          | 0,36   | 0,39   | 1,05   | 0,206  | 0,68   | 0,4    | IQR                          | 0,43   | 0,41   | 0,527   | 0,197  | 0,633  | 0,156  |
| L-inf                        | 12,45  | 11,695 | 10,275 | 9,043  | 7,229  | 8,035  | L-inf                        | 12,525 | 11,655 | 8,8025  | 8,7175 | 7,2145 | 7,515  |
| L-sup                        | 13,89  | 13,255 | 14,475 | 9,867  | 9,949  | 9,635  | L-sup                        | 14,245 | 13,295 | 10,9105 | 9,5055 | 9,7465 | 8,139  |

| Resina alquílica curta 40 °C |        |        |        |        |        |        | Resina alquílica curta 50 °C |        |        |        |        |        |        |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| AMOSTRA                      | 5h     | 24h    | 29h    | 48h    | 53h    | 72h    | AMOSTRA                      | 5h     | 24h    | 29h    | 48h    | 53h    | 72h    |
| A1 - 3008                    | 15,23  | 13,34  | 12,21  | 8,921  | 5,541  | 4,921  | A1 - 3008                    | 11,01  | 7,871  | 4,319  | 2,75   | 2,501  | 1,824  |
| A2 - 3008                    | 15,6   | 13,41  | 12,88  | 9,319  | 7,19   | 5,974  | A2 - 3008                    | 10,98  | 8,362  | 4,26   | 2,915  | 1,938  | 1,793  |
| A3 - 3008                    | 15,45  | 14,06  | 13,9   | 9,207  | 4,499  | 6,008  | A3 - 3008                    | 11,24  | 8,276  | 4,512  | 3,11   | 2,469  | 1,662  |
| A4 - 3008                    | 15,05  | 13,77  | 13,98  | 9,46   | 7,273  | 5,085  | A4 - 3008                    | 11,05  | 8,738  | 3,016  | 2,959  | 2,522  | 1,085  |
| A5 - 3008                    | 15,53  | 13,84  | 13,23  | 8,959  | 7,399  | 5,038  | A5 - 3008                    | 11     | 8,053  | 3,526  | 3,012  | 2,626  | 1,652  |
| Média                        | 15,372 | 13,684 | 13,24  | 9,1732 | 6,3804 | 5,4052 | Média                        | 11,056 | 8,26   | 3,9266 | 2,9492 | 2,4112 | 1,6032 |
| Desvio                       | 0,2274 | 0,3027 | 0,7372 | 0,2314 | 1,2975 | 0,5382 | Desvio                       | 0,106  | 0,3291 | 0,632  | 0,133  | 0,271  | 0,2996 |
| Q1                           | 15,23  | 13,41  | 12,88  | 8,959  | 5,541  | 5,038  | Q1                           | 11     | 8,053  | 3,526  | 2,915  | 2,469  | 1,652  |
| Q3                           | 15,53  | 13,84  | 13,9   | 9,319  | 7,273  | 5,974  | Q3                           | 11,05  | 8,362  | 4,319  | 3,012  | 2,522  | 1,793  |
| IQR                          | 0,3    | 0,43   | 1,02   | 0,36   | 1,732  | 0,936  | IQR                          | 0,05   | 0,309  | 0,793  | 0,097  | 0,053  | 0,141  |
| L-inf                        | 14,78  | 12,765 | 11,35  | 8,419  | 2,943  | 3,634  | L-inf                        | 10,925 | 7,5895 | 2,3365 | 2,7695 | 2,3895 | 1,4405 |
| L-sup                        | 15,98  | 14,485 | 15,43  | 9,859  | 9,871  | 7,378  | L-sup                        | 11,125 | 8,8255 | 5,5085 | 3,1575 | 2,6015 | 2,0045 |

Fonte: Autoria própria (2026).

**APÊNDICE B – Áreas integradas da banda em 3008 cm<sup>-1</sup> e tratamento estatístico da resina alquídica de cadeia média nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C**

| Resina alquídica média 20 °C |        |        |        |        |        |        | Resina alquídica média 30 °C |        |        |        |        |        |        |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| AMOSTRA                      | 5h     | 24h    | 29h    | 48h    | 53h    | 72h    | AMOSTRA                      | 5h     | 24h    | 29h    | 48h    | 53h    | 72h    |
| A1 - 3008                    | 19,89  | 19,01  | 16,92  | 16,5   | 16,89  | 15,91  | A1 - 3008                    | 22,44  | 20,97  | 19,97  | 18,36  | 17,19  | 14,91  |
| A2 - 3008                    | 19,63  | 18,61  | 16,85  | 16,39  | 17,74  | 15,83  | A2 - 3008                    | 22,62  | 20,53  | 19,48  | 18,46  | 15,47  | 15,1   |
| A3 - 3008                    | 20,11  | 18,66  | 17,7   | 16,71  | 16,85  | 15,44  | A3 - 3008                    | 22,83  | 20,78  | 19,46  | 18,26  | 15,7   | 15,06  |
| A4 - 3008                    | 19,67  | 18,44  | 17,54  | 16,55  | 16,88  | 15,08  | A4 - 3008                    | 22,06  | 20,94  | 19,48  | 18,05  | 15,49  | 14,44  |
| A5 - 3008                    | 19,75  | 18,49  | 17,61  | 16,46  | 17,26  | 15,66  | A5 - 3008                    | 22,32  | 20,94  | 19,4   | 18,26  | 15,2   | 13,83  |
| Média                        | 19,81  | 18,642 | 17,324 | 16,522 | 17,124 | 15,584 | Média                        | 22,454 | 20,832 | 19,558 | 18,278 | 15,81  | 14,668 |
| Desvio                       | 0,1949 | 0,224  | 0,4055 | 0,1203 | 0,3832 | 0,3344 | Desvio                       | 0,2925 | 0,1846 | 0,2326 | 0,1521 | 0,7916 | 0,5369 |
| Q1                           | 19,67  | 18,49  | 16,92  | 16,46  | 16,88  | 15,44  | Q1                           | 22,32  | 20,78  | 19,46  | 18,26  | 15,47  | 14,44  |
| Q3                           | 19,89  | 18,66  | 17,61  | 16,55  | 17,26  | 15,83  | Q3                           | 22,62  | 20,94  | 19,48  | 18,36  | 15,7   | 15,06  |
| IQR                          | 0,22   | 0,17   | 0,69   | 0,09   | 0,38   | 0,39   | IQR                          | 0,3    | 0,16   | 0,02   | 0,1    | 0,23   | 0,62   |
| L-inf                        | 19,34  | 18,235 | 15,885 | 16,325 | 16,31  | 14,855 | L-inf                        | 21,87  | 20,54  | 19,43  | 18,11  | 15,125 | 13,51  |
| L-sup                        | 20,22  | 18,915 | 18,645 | 16,685 | 17,83  | 16,415 | L-sup                        | 23,07  | 21,18  | 19,51  | 18,51  | 16,045 | 15,99  |

| Resina alquídica média 40 °C |        |        |        |        |        |        | Resina alquídica média 50 °C |        |        |        |        |        |        |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| AMOSTRA                      | 5h     | 24h    | 29h    | 48h    | 53h    | 72h    | AMOSTRA                      | 5h     | 24h    | 29h    | 48h    | 53h    | 72h    |
| A1 - 3008                    | 21,64  | 20,66  | 18,63  | 14,79  | 14,73  | 13,82  | A1 - 3008                    | 19,91  | 15,54  | 14,76  | 10,05  | 8,019  | 5,583  |
| A2 - 3008                    | 20,97  | 21,03  | 18,57  | 16,06  | 15,85  | 14,67  | A2 - 3008                    | 19,69  | 15,45  | 14,86  | 9,794  | 8,165  | 5,164  |
| A3 - 3008                    | 20,75  | 21,3   | 18,63  | 15,74  | 14,62  | 14,21  | A3 - 3008                    | 19,5   | 15,03  | 14,63  | 9,392  | 7,801  | 5,519  |
| A4 - 3008                    | 20,16  | 20,08  | 18,43  | 16,62  | 15,11  | 14,1   | A4 - 3008                    | 19,45  | 15,2   | 14,76  | 9,494  | 7,693  | 5,652  |
| A5 - 3008                    | 20,34  | 21,05  | 18,65  | 16,38  | 14,78  | 14,61  | A5 - 3008                    | 19,65  | 15,29  | 15,15  | 9,908  | 7,991  | 5,399  |
| Média                        | 20,772 | 20,824 | 18,582 | 15,918 | 15,018 | 14,282 | Média                        | 19,64  | 15,302 | 14,832 | 9,7276 | 7,9338 | 5,4634 |
| Desvio                       | 0,5819 | 0,4745 | 0,0901 | 0,7125 | 0,4997 | 0,357  | Desvio                       | 0,1811 | 0,2019 | 0,1956 | 0,2775 | 0,1868 | 0,1915 |
| Q1                           | 20,34  | 20,66  | 18,57  | 15,74  | 14,73  | 14,1   | Q1                           | 19,5   | 15,2   | 14,76  | 9,494  | 7,801  | 5,399  |
| Q3                           | 20,97  | 21,05  | 18,63  | 16,38  | 15,11  | 14,61  | Q3                           | 19,69  | 15,45  | 14,86  | 9,908  | 8,019  | 5,583  |
| IQR                          | 0,63   | 0,39   | 0,06   | 0,64   | 0,38   | 0,51   | IQR                          | 0,19   | 0,25   | 0,1    | 0,414  | 0,218  | 0,184  |
| L-inf                        | 19,395 | 20,075 | 18,48  | 14,78  | 14,16  | 13,335 | L-inf                        | 19,215 | 14,825 | 14,61  | 8,873  | 7,474  | 5,123  |
| L-sup                        | 21,915 | 21,635 | 18,72  | 17,34  | 15,68  | 15,375 | L-sup                        | 19,975 | 15,825 | 15,01  | 10,529 | 8,346  | 5,859  |

Fonte: Autoria própria (2026).

**APÊNDICE C – Áreas integradas da banda em 3008 cm<sup>-1</sup> e tratamento estatístico da resina alquídica de cadeia longa nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C**

| Resina alquídica longa 20 °C |        |        |        |        |        |        | Resina alquídica longa 30 °C |        |        |        |        |        |        |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| AMOSTRA                      | 5h     | 24h    | 29h    | 48h    | 53h    | 72h    | AMOSTRA                      | 5h     | 24h    | 29h    | 48h    | 53h    | 72h    |
| A1 - 3008                    | 19,32  | 18,39  | 17,44  | 17,52  | 17,68  | 16,77  | A1 - 3008                    | 21,72  | 21,56  | 19,6   | 18,99  | 18,08  | 17,9   |
| A2 - 3008                    | 19,37  | 18,52  | 17,81  | 17,57  | 17,33  | 16,98  | A2 - 3008                    | 20,9   | 20,29  | 19,03  | 18,41  | 17,95  | 17,75  |
| A3 - 3008                    | 19,17  | 18,23  | 17,58  | 17,64  | 17,13  | 16,96  | A3 - 3008                    | 21,62  | 19,74  | 18,98  | 18,88  | 17,83  | 17,71  |
| A4 - 3008                    | 18,92  | 18,38  | 17,61  | 17,39  | 16,74  | 17,08  | A4 - 3008                    | 21,53  | 19,12  | 18,78  | 17,74  | 17,87  | 17,73  |
| A5 - 3008                    | 19,2   | 18,22  | 17,61  | 17,17  | 16,88  | 17     | A5 - 3008                    | 21,66  | 19,01  | 18,66  | 17,93  | 17,87  | 17,59  |
| Média                        | 19,196 | 18,348 | 17,61  | 17,458 | 17,152 | 16,958 | Média                        | 21,486 | 19,944 | 19,01  | 18,39  | 17,92  | 17,736 |
| Desvio                       | 0,175  | 0,1252 | 0,1321 | 0,1851 | 0,3724 | 0,1145 | Desvio                       | 0,3348 | 1,0397 | 0,3622 | 0,5556 | 0,0995 | 0,1108 |
| Q1                           | 19,17  | 18,23  | 17,58  | 17,39  | 16,88  | 16,96  | Q1                           | 21,53  | 19,12  | 18,78  | 17,93  | 17,87  | 17,71  |
| Q3                           | 19,32  | 18,39  | 17,61  | 17,57  | 17,33  | 17     | Q3                           | 21,66  | 20,29  | 19,03  | 18,88  | 17,95  | 17,75  |
| IQR                          | 0,15   | 0,16   | 0,03   | 0,18   | 0,45   | 0,04   | IQR                          | 0,13   | 1,17   | 0,25   | 0,95   | 0,08   | 0,04   |
| L-inf                        | 18,945 | 17,99  | 17,535 | 17,12  | 16,205 | 16,9   | L-inf                        | 21,335 | 17,365 | 18,405 | 16,505 | 17,75  | 17,65  |
| L-sup                        | 19,545 | 18,63  | 17,655 | 17,84  | 18,005 | 17,06  | L-sup                        | 21,855 | 22,045 | 19,405 | 20,305 | 18,07  | 17,81  |

| Resina alquídica longa 40 °C |        |        |       |       |        |        | Resina alquídica longa 50 °C |        |        |        |        |        |        |
|------------------------------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| AMOSTRA                      | 5h     | 24h    | 29h   | 48h   | 53h    | 72h    | AMOSTRA                      | 5h     | 24h    | 29h    | 48h    | 53h    | 72h    |
| A1 - 3008                    | 21,56  | 20,24  | 19,79 | 18,24 | 18,75  | 15,9   | A1 - 3008                    | 21,77  | 21,71  | 20,56  | 19,53  | 18,44  | 16,94  |
| A2 - 3008                    | 21,19  | 20,32  | 19,65 | 17,99 | 19,06  | 17,1   | A2 - 3008                    | 21,6   | 21,61  | 20,28  | 19,71  | 18,8   | 17,02  |
| A3 - 3008                    | 21,21  | 20,3   | 19,86 | 17,75 | 18,86  | 17,02  | A3 - 3008                    | 21,08  | 21,57  | 19,97  | 19,31  | 18,26  | 16,93  |
| A4 - 3008                    | 20,89  | 19,92  | 19,78 | 17,89 | 18,82  | 17,08  | A4 - 3008                    | 20,98  | 21     | 20,19  | 19,03  | 18,76  | 17,16  |
| A5 - 3008                    | 21,25  | 20,28  | 19,67 | 17,98 | 18,64  | 17,16  | A5 - 3008                    | 21,25  | 21     | 19,91  | 19,65  | 18,71  | 16,95  |
| Média                        | 21,22  | 20,212 | 19,75 | 17,97 | 18,826 | 16,852 | Média                        | 21,336 | 21,378 | 20,182 | 19,446 | 18,594 | 17     |
| Desvio                       | 0,2379 | 0,1659 | 0,088 | 0,179 | 0,1552 | 0,5345 | Desvio                       | 0,3383 | 0,3488 | 0,2605 | 0,2784 | 0,2338 | 0,0962 |
| Q1                           | 21,19  | 20,24  | 19,67 | 17,89 | 18,75  | 17,02  | Q1                           | 21,08  | 21     | 19,97  | 19,31  | 18,44  | 16,94  |
| Q3                           | 21,25  | 20,3   | 19,79 | 17,99 | 18,86  | 17,1   | Q3                           | 21,6   | 21,61  | 20,28  | 19,65  | 18,76  | 17,02  |
| IQR                          | 0,06   | 0,06   | 0,12  | 0,1   | 0,11   | 0,08   | IQR                          | 0,52   | 0,61   | 0,31   | 0,34   | 0,32   | 0,08   |
| L-inf                        | 21,1   | 20,15  | 19,49 | 17,74 | 18,585 | 16,9   | L-inf                        | 20,3   | 20,085 | 19,505 | 18,8   | 17,96  | 16,82  |
| L-sup                        | 21,34  | 20,39  | 19,97 | 18,14 | 19,025 | 17,22  | L-sup                        | 22,38  | 22,525 | 20,745 | 20,16  | 19,24  | 17,14  |

Fonte: Autoria própria (2026).