

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE BELAS ARTES  
CURSO DE CONSERVAÇÃO E RESTAURAÇÃO DE BENS CULTURAIS MÓVEIS

Valerie Midori Koga Takeda

**CONSOLIDAÇÃO DE PLÁSTICOS EM BENS CULTURAIS**  
**Adesivos sintéticos aplicados a termoplásticos, termofixos e elastômeros vulcanizados**

Belo Horizonte  
2025

Valerie Midori Koga Takeda

## **CONSOLIDAÇÃO DE PLÁSTICOS EM BENS CULTURAIS**

**Adesivos sintéticos aplicados a termoplásticos, termofixos e elastômeros vulcanizados**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Curso de Graduação em Conservação e  
Restauração de Bens Culturais Móveis da  
Escola de Belas Artes da Universidade Federal  
de Minas Gerais, como requisito parcial para a  
obtenção do grau de Bacharel em Conservação  
e Restauração de Bens Culturais Móveis.

Orientador(a): Prof.<sup>a</sup> Dra. Camilla Henriques  
Maia de Camargos

Belo Horizonte

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

## ESCOLA DE BELAS ARTES

### COLEGIADO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM CONSERVAÇÃO E RESTAURAÇÃO DE BENS CULTURAIS MÓVEIS

#### FOLHA DE APROVAÇÃO

**"Consolidação de plásticos em bens culturais: adesivos sintéticos aplicados a termoplásticos, termofixos e elastômeros vulcanizados"**

**Valerie Midori Koga Takeda**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Graduação em Conservação e Restauração de Bens Culturais Móveis, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Conservação e Restauração de Bens Culturais Móveis, aprovado em 09/07/2025 pela banca constituída pelos membros:

Profa. **CAMILLA HENRIQUES MAIA DE CAMARGOS**  
Orientadora

Prof. **LUIZ ANTÔNIO CRUZ SOUZA**  
Examinador

Belo Horizonte, 09 de julho de 2025.



Documento assinado eletronicamente por **Camilla Henriques Maia de Camargos, Coordenador(a) de curso**, em 11/07/2025, às 14:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Antonio Cruz Souza, Professor do Magistério Superior**, em 24/10/2025, às 15:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site  
[https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?  
acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador  
**4358103** e o código CRC **41AD088A**.

---

Referência: Processo nº 23072.241754/2025-36

SEI nº 4358103

Dedico este trabalho aos meus pais, Celi e Paulo,  
por sempre apoiarem e incentivarem meus estudos.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha orientadora, Professora Doutora Camilla Henriques Maia de Camargos, por todo incentivo, paciência e disponibilidade. Agradeço imensamente pela oportunidade de ter sido orientada de forma tão inspiradora, acadêmica e pessoalmente.

Aos meus pais por todo o apoio, amor e incentivo ao longo da vida.

À minha amiga Patrícia, por todo o amor, amizade e apoio em todos os momentos.

Aos queridos Caio, Natália, Larissa, Nilo, Bella, Alícia, Alice, Iuri e Luís, por tornarem Belo Horizonte também meu lar.

Aos colegas João Vitor e Viviane, pela generosidade e companhia no laboratório.

Aos professores do Curso de Conservação e Restauração de Bens Culturais Móveis por todos os aprendizados valiosos ao longo dos últimos anos.

À UFMG por todas as oportunidades e ensino de qualidade.

À Escola de Belas Artes pelo auxílio financeiro.

Ao LACICOR, pela disponibilidade para utilização do equipamento de FTIR.

A todos que de alguma forma contribuíram com este trabalho e com a minha jornada até aqui.

## RESUMO

A presença de objetos plásticos em acervos culturais, incluindo obras de arte contemporânea, é emergente desde o século XX e traz desafios relevantes às práticas consolidadas de conservação-restauração no século XXI, especialmente em procedimentos de consolidação de fraturas e adesão de fragmentos poliméricos. Este projeto teve por objetivo avaliar o desempenho de adesivos amplamente utilizados na conservação de bens culturais, como o poli(álcool vinílico) (PVA), o poli(acetato de vinila) (PVAc), o copolímero de etil e metil metacrilato (comercialmente conhecido como Paraloid® B-72), o etil cianoacrilato (ECA) e a resina epóxi Araldite®, na adesão de diferentes plásticos representativos de coleções museológicas. Os plásticos selecionados incluíram quatro termoplásticos (polietileno (PE), poliestireno (PS), poli(1-cloroeteno) (PVC) e poli(metil metacrilato) (PMMA), conhecido como acrílico), um termorrígido (melamina) e um elastômero vulcanizado (borracha natural). A escolha foi fundamentada em revisão bibliográfica sobre sua frequência em acervos e nas propriedades importantes para sua conservação. Os métodos analíticos aplicados envolveram ensaios de tração adaptados com massas determinadas para o estudo qualitativo da resistência em junta adesiva, além de envelhecimento artificial dos adesivos a 80 °C e 75% de umidade relativa por 13 dias. A estabilidade dos adesivos foi avaliada por análises colorimétricas e espectroscopia de absorção no infravermelho em modo de reflectância total atenuada (ATR-FTIR). Todos os adesivos investigados apresentaram alterações nos parâmetros colorimétricos após o envelhecimento artificial, especialmente o PVAc. No entanto, não foram observadas modificações significativas no pH e no perfil químico das formulações adesivas envelhecidas. A performance dos adesivos variou significativamente de acordo com o tipo de plástico, refletindo as diferenças de interações intermoleculares e textura interfacial dos materiais. Os melhores resultados, combinando maior compatibilidade, retratabilidade, estabilidade e adequada resistência adesiva, foram obtidos para o poli(álcool vinílico) com polietileno de alta densidade e Paraloid® B72 com poli(1-cloroeteno), poliestireno e poli(metil metacrilato). O presente trabalho pode fornecer subsídios técnico-científicos relevantes para guiar decisões fundamentadas na conservação-restauração de objetos plásticos, promovendo a identificação de combinações adesivo-substrato mais eficazes e compatíveis com os critérios de estabilidade, compatibilidade e retratabilidade exigidos na área.

**Palavras-chave:** conservação-restauração; plásticos; polímeros; análises; adesivos.

## ABSTRACT

The presence of plastic objects in cultural heritage collections, including works of contemporary art, has been emerging since the twentieth century and brings challenges to consolidated conservation-restoration practices in the twenty-first century, especially in procedures for consolidation of fractures and adhesion of polymeric fragments. This project aimed to evaluate the performance of adhesives widely used in conservation of cultural heritage, such as poly(vinyl alcohol) (PVA), poly(vinyl acetate) (PVAc), ethyl methyl methacrylate (commercially known as Paraloid® B-72), ethyl cyanoacrylate (ECA) and epoxy resin Araldite®, in the adhesion of different types of plastics, representative in museum collections. The selected plastics included four thermoplastics (polyethylene (PE), polystyrene (PS), poly(1-chloroethene) (PVC) and poly(methyl methacrylate) (PMMA), known as acrylic), a thermosetting material (melamine) and a vulcanized elastomer (natural rubber).

The materials selection was based on literature review about its frequency in collections and important properties for its conservation. The applied analytical methods involved tensile tests adapted with determined masses for qualitative study of strength in adhesive joint, as well as artificial aging of adhesives at 80 °C and 75% relative humidity for 13 days. The stability of the adhesives was evaluated by colorimetric analyses and absorption spectroscopy in the infrared in attenuated total reflectance mode (ATR-FTIR). All the investigated adhesives showed changes in colorimetric parameters after artificial aging, especially PVAc. However, no significant changes were observed in the pH and chemical profile of aged adhesive formulations. The performance of the adhesives varied significantly according to the type of plastic, reflecting the differences in intermolecular interactions and interfacial texture of the materials. The best results, combining greater compatibility, stability and adequate adhesive resistance, were obtained for poly(vinyl alcohol) with high density polyethylene and Paraloid® B72 with poly(1-chloroethene), polystyrene and poly(methyl methacrylate). This research can provide relevant technical and scientific subsidies to guide decision making processes in the conservation-restoration of plastic objects, promoting the identification of more effective adhesive-substrate combinations compatible with stability criteria, compatibility and retractability required in the conservation field.

**Keywords:** conservation-restoration; plastics; polymers; analysis; adhesives.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> – Obras de arte em celuloide.....	13
<b>Figura 2</b> – Obras de arte em plástico de artistas brasileiros.....	13
<b>Figura 3</b> – Bola de bilhar feita em celuloide.....	17
<b>Figura 4</b> - Telefone usado pelo Imperador, instalado no Paço de São Cristóvão no Rio de Janeiro.....	18
<b>Figura 5</b> – Obra “Acessão II” de Eva Hesse, 1967.....	21
<b>Figura 6</b> - Busca por objetos com suporte plástico na ferramenta Google Arts & Culture....	21
<b>Figura 7</b> – Fórmula estrutural do polietileno.....	22
<b>Figura 8</b> – Fórmula estrutural do etileno vinil-acetato.....	23
<b>Figura 9</b> – Polímero linear.....	23
<b>Figura 10</b> – Polímero ramificado.....	24
<b>Figura 11</b> – Polímero reticulado.....	24
<b>Figura 12</b> - Máquina extrusora.....	27
<b>Figura 13</b> - Esquema de moldagem por injeção.....	28
<b>Figura 14</b> - Esquema de moldagem por sopro.....	28
<b>Figura 15</b> – Esquema da termoformagem.....	29
<b>Figura 16</b> - Esquema de moldagem com compressão.....	29
<b>Figura 17</b> - Esquema de moldagem por imersão.....	30
<b>Figura 18</b> – Esquema de rotomoldagem.....	30
<b>Figura 19</b> - Tubo de PVC plastificado armazenado a 30% de UR (esquerda) e 90% de UR (direita). ....	31
<b>Figura 20</b> - Aplicação dos adesivos com pincel sobre tapete antiaderente.....	40
<b>Figura 21</b> - Despejamento de adesivo em ponto fixo.....	40
<b>Figura 22</b> - Filmes de adesivo colocados em câmara de envelhecimento artificial.....	41
<b>Figura 23</b> - Corte dos corpos de prova.....	42
<b>Figura 24</b> – Adesão dos corpos de prova na junta adesiva de sobreposição (lap joint). ....	43
<b>Figura 25</b> - Corpos de prova para teste de força de adesão.....	43
<b>Figura 26</b> - Teste de força de adesão com pesos de 50g e 100g.....	44
<b>Figura 27</b> - Filmes dos adesivos secos.....	46
<b>Figura 28</b> - Adesivos despejados em ponto único, secos.....	47
<b>Figura 29</b> - Filmes submetidos à T e UR extremas.....	48
<b>Figura 30</b> - Comparativo entre filmes adesivos envelhecidos e controle.....	49
<b>Figura 31</b> - Filmes de resina epóxi, controle e envelhecido, respectivamente.....	49

<b>Figura 32</b> - Espectros de FTIR dos adesivos antes (preto) e após (vermelho) envelhecimento acelerado.....	52
<b>Figura 33</b> - Aferição do peso de 50 g.....	67
<b>Figura 34</b> - Aferição do peso de 100 g.....	67
<b>Figura 35</b> - Pesos utilizados nos testes de força de adesão.....	68

## LISTA DE TABELAS E GRÁFICOS

<b>Tabela 1</b> - Aditivos mais frequentes em composições de plásticos.....	26
<b>Tabela 2</b> - Plásticos mais frequentes em acervos de bens culturais.....	36
<b>Tabela 3</b> – Seleção dos materiais e características de interesse.....	37
<b>Tabela 4</b> – Adesivos selecionados para as análises e características de interesse .....	38
<b>Tabela 5</b> – Seleção final de plásticos, adesivos e análises.....	39
<b>Tabela 6</b> - Parâmetros colorimétricos das amostras de adesivos.....	50
<b>Tabela 7</b> - Medidas de pH dos adesivos. ....	51
<b>Tabela 8</b> - Teste de forças coesivas dos substratos poliméricos.....	54
<b>Tabela 9</b> - Força adesiva em fraturasaderidas em junta adesiva de topo (sem sobreposição). .....	58
<b>Tabela 10</b> – Resultados dos testes de força de adesão com massas determinadas. ....	69
<b>Gráfico 1</b> – Espectro de FTIR do PVA – Surgimento de uma banda a $1142\text{ cm}^{-1}$ .	53
<b>Gráfico 2</b> – Comparativo dos resultados dos testes de forças adesivas.	54
<b>Gráfico 3</b> - Gráfico de forças adesivas dos testes com Polietileno.	55
<b>Gráfico 4</b> - Gráfico das forças adesivas dos testes com borracha.	56
<b>Gráfico 5</b> - Gráfico de forças adesivas dos testes com poliestireno.	56
<b>Gráfico 6</b> - Gráfico de forças adesivas de testes com acrílico.	57
<b>Gráfico 7</b> - Gráfico de forças adesivas de testes com PVC.	57
<b>Gráfico 8</b> - Gráfico de forças adesivas de testes com melamina.	58
<b>Gráfico 9</b> – Espectro de FTIR Acrílico.	64
<b>Gráfico 10</b> – Espectro de FTIR Borracha vulcanizada.	64
<b>Gráfico 11</b> – Espectro de FTIR melamina.	65
<b>Gráfico 12</b> – Espectro de FTIR PEAD.	65
<b>Gráfico 13</b> – Espectro de FTIR poliestireno.	66
<b>Gráfico 14</b> – Espectro de FTIR PVC.	66

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
CA	Acetato de celulose
CN	Nitrato de celulose
EBA	Escola de Belas Artes
ECA	Etil-cianoacrilato
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier
MF	Melamina formaldeído
PA	Poliamidas
PC	Policarbonato
PE	Polietileno
PET	Politereftalato de etileno
PMMA	Polimetilmetacrilato
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PTFE	Poli-tetra-flúor-etileno
PUR	Poliuretano
PVA	Poli(álcool vinílico)
PVAc	Poli(acetato de vinila)
PVC	Policloreto de vinila
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. MATERIAIS POLIMÉRICOS.....	16
2.1. Panorama histórico do desenvolvimento de plásticos .....	16
2.2. Plásticos em obras de arte.....	20
2.3. Propriedades de materiais poliméricos .....	21
2.4. Processamento de plásticos .....	25
2.5. Degradção de plásticos .....	30
3. ADESIVOS UTILIZADOS EM PROCESSOS DE CONSOLIDAÇÃO .....	33
3.1. Poli(álcool vinílico) .....	34
3.2. Etil cianoacrilato.....	34
3.3. Paraloid B-72.....	34
3.4. Poli(vinil acetato) .....	35
3.5. Resina epóxi .....	35
4. METODOLOGIA PARA A ANÁLISE DE ADESIVOS APLICADOS À CONSOLIDAÇÃO DE PLÁSTICOS .....	36
4.1. Seleção dos materiais a serem estudados e panorama da metodologia de análise .....	36
4.2. Preparo de filmes de adesivo e ensaio de estabilidade hidrotérmica.....	39
4.3. Análise colorimétrica.....	41
4.4. Espectroscopia de absorção no Infravermelho em modo de refletância total atenuada (ATR-FTIR) .....	42
4.5. Ensaio mecânico de tração adaptado para análise qualitativa da força adesiva .....	42
4.6. Mensuração de pH .....	45
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	46
5.1. Análise organoléptica dos filmes de adesivos .....	46
5.2. Avaliação organoléptica e colorimétrica da estabilidade hidrotérmica dos adesivos .....	48
5.3. Avaliação físico-química dos adesivos após envelhecimento acelerado.....	51
5.4. Resistência mecânica à tração de juntas adesivas relativas à consolidação de plásticos ..	53
6. CONCLUSÃO.....	60
REFERÊNCIAS .....	61
ANEXO A – FTIR substratos poliméricos.....	64
ANEXO B – Aferição dos pesos utilizados.....	67
ANEXO C - Resultados completos dos testes de força de adesão. ....	69

## 1. INTRODUÇÃO

Desde o início da sua criação em 1846, os materiais sintéticos e semissintéticos conhecidos popularmente como plásticos vêm crescendo em variedade, aplicações e quantidade. O termo plástico deriva do grego *πλαστικός* (*plastikos*), utilizado para classificar um material capaz de ser moldado. No entanto, de acordo com Shashoua (2008), os plásticos como conhecemos atualmente são macromoléculas ou polímeros modificados com aditivos, como cargas e plastificantes, que os transformam em materiais compósitos com uma forma dimensionalmente estável. Estes materiais apresentam uma ampla gama de composições químicas, características físicas e propriedades mecânicas que possibilitam a sua utilização em praticamente todos os âmbitos da vida cotidiana contemporânea, sendo aplicados em tecidos, embalagens, eletrodomésticos, veículos automotivos, aviões, materiais médicos, etc. Existem hoje aproximadamente 50 tipos básicos de polímeros inclusos em cerca de 60.000 formulações de plásticos (Shashoua, 2008). De acordo com Simões (2021), a produção de plásticos cresceu exponencialmente nos últimos anos aumentando cerca de vinte vezes de 1964 a 2014. A estimativa apresentada pela organização Plastics Europe no encontro anual do The World Economic Forum de 2016, foi de 311 milhões de toneladas de plásticos produzidas no mundo em 2014<sup>1</sup>. Já em 2023 a estimativa feita pela mesma organização foi de 413.8 milhões de toneladas produzidas mundialmente<sup>2</sup>. Frente aos números massivos apresentados, a relevância material e econômica dos plásticos é evidente, servindo inclusive como alerta em relação ao seu uso, tendo em vista o ritmo acelerado de produção e velocidade rápida de consumo.

Naturalmente, um material tão versátil e abundante, rapidamente passou a integrar os ateliês de artistas, exposições de arte e acervos institucionais e privados. Em acervos históricos, aparece em telefones, pentes, brinquedos, botões, eletrodomésticos, entre outros objetos do cotidiano, nos mais diversos tipos de composições, como é o caso da Bakelite ou fenol-formaldeído, o primeiro plástico sintético criado em 1907. Apesar da relativa novidade de plásticos em acervos, pelo menos desde 1920 com a criação dos filmes em acetato de celulose, polímeros semissintéticos se apresentam como suporte de bens culturais (Shashoua, 2008).

A partir das primeiras décadas do século XX artistas como Antoine Pevsner, em 1923, com a obra *Head* e Naum Gabo, em 1927, com a obra *Model for ‘Construction in Space’ Two*

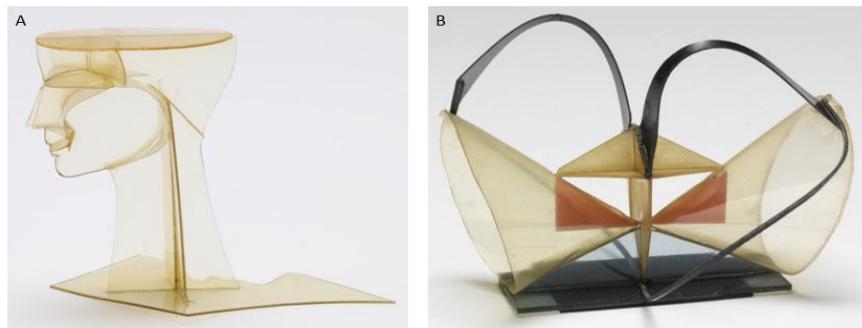
---

<sup>1</sup> <https://www.weforum.org/publications/the-new-plastics-economy-rethinking-the-future-of-plastics/>

<sup>2</sup> <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2024/>

*Cones*'', ambas em celuloide<sup>3</sup>, o plástico passa a aparecer como material artístico (figura 1).

**Figura 1** – Obras de arte em celuloide.

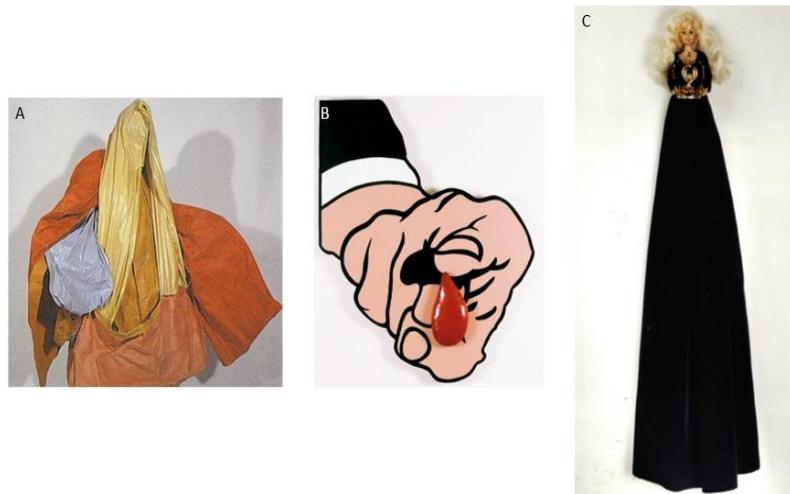


Fonte: TATE IMAGES, 2020/2025.

Legenda: (A) Antoine Pevsner, *Head*, 1923, celuloide. (B) Naum Gabo, *Model for 'Construction in Space 'Two Cones'*, 1927, celuloide.

No Brasil, alguns dos primeiros artistas a também incluírem o material em suas obras são Hélio Oiticica com Parangolé P1, Marcello Nitsche com sua obra Eu quero você e Márcia X com sua obra Miracle, apresentadas na figura 2 (Simões, 2021).

**Figura 2** – Obras de arte em plástico de artistas brasileiros.



Fonte: ENCICLOPÉDIA Itaú Cultural de Arte e Cultura Brasileira, 2023. Google Arts & Culture, 2025.

Legenda: (A) Hélio Oiticica, Parangolé P1, Capa 1, 1964, plástico e tecido.; (B) Marcello Nitsche, Eu quero você, 1966, plástico estofado de algodão e acrílica sobre PVC. Dimensões físicas: 1060 x 1270 cm. Direitos: Museu de Arte Moderna de São Paulo. (C) Márcia X, Miracle, 1997, boneca de plástico, veludo e mecanismo eletrônico. Dimensões: 76 x 22 x 11 cm. Direitos: Gilberto Chateaubriand MAM Rio Collection.

---

<sup>3</sup> Material criado por John Wesley Hyatt proveniente da mistura de nitrato de celulose e cânfora, aquecidos sob pressão.

A partir do momento em que objetos com suporte em plástico passam a fazer parte de acervos artísticos e históricos, começam a se apresentar questões referentes à sua conservação. A rápida progressão da desintegração destes objetos tem sido um grave problema para museus e galerias de arte.

Os materiais poliméricos sintéticos e semissintéticos são muito diversos e apresentam rotas de degradação muito complexas, relacionadas à sua natureza e características físico-químicas. Podemos classificar os polímeros em três classes principais: termoplásticos, elastômeros ou termorrígidos. Cada um deles apresenta diferentes tipos de cadeias poliméricas, pouco ou muito reticuladas, que determinam as características do material e sua forma degradação (Shashoua, 2008). Pesquisar e entender sobre esses processos é essencial para garantir a salvaguarda do patrimônio cultural, dos objetos e seus significados.

Por estar muito entranhado no cotidiano e ser associado à um material de baixo custo, resistente e durável, muitas vezes os plásticos podem ser considerados materiais banais. É comum que objetos feitos com materiais populares sejam associados a um significado de menor valor, mas essa visão apaga os valores histórico, artístico e social dos artefatos a serem considerados. Conservar esses materiais, é também conservar a memória e os significados das comunidades e expressões associadas a eles.

Do mesmo modo que entender os processos de degradação do suporte de bens culturais, pesquisar sobre materiais de conservação seguros para intervenções nestes objetos se faz igualmente importante, visto que, intervenções inadequadas são um frequente agente de degradação de bens culturais e podem inclusive acelerar os processos intrínsecos de deterioração dos materiais.

Quando pensamos em restaurações ou processos de conservação curativa, uma das primeiras etapas a serem seguidas é a consolidação do suporte, que visa reestabelecer a integridade do material desagregado ou periclitante. Nesses procedimentos o material mais importante, além da obra, é o adesivo a ser utilizado, às vezes também chamado de consolidante. Existem, hoje, diversos estudos e pesquisas sobre adesivos no campo da conservação-restauração para aplicação nos suportes mais tradicionais, como têxteis, madeira, pinturas e papéis, mas a compatibilidade com materiais poliméricos sintéticos e semissintéticos ainda é pouco conhecida e registrada.

Estudos controlados, com testes científicos e registro sistemático dos resultados são essenciais para sustentar intervenções seguras de conservação-restauração. O presente Trabalho

de Conclusão de Curso (TCC) foi pensado visando gerar um arcabouço teórico-prático sobre a compatibilidade e aplicabilidade de adesivos sintéticos tradicionais utilizados em rotinas de conservação-restauração, com alguns tipos de polímeros (termoplásticos, termorrígidos e elastômeros) encontrados em acervos culturais.

No segundo capítulo deste trabalho, são apresentados o panorama histórico do desenvolvimento dos plásticos, o plástico como material artístico, suas principais propriedades físico-químicas, principais formas de processamento e formas de degradação. No terceiro capítulo são abordados os principais fenômenos envolvidos na adesão de materiais e as principais características dos adesivos selecionados para as análises teórico-práticas. No capítulo quatro, são apresentados os materiais e métodos de análise selecionados para avaliação das interações entre os plásticos e adesivos. Na sequência, os resultados das análises são apresentados no capítulo cinco e as conclusões no capítulo 6.

## 2. MATERIAIS POLIMÉRICOS

Os polímeros são macromoléculas formadas pela união de vários monômeros repetíveis e ocorrem naturalmente em plantas, insetos e animais, na forma de látex, proteínas, resinas, etc. São materiais utilizados pelos seres humanos desde as primeiras civilizações e continuam fazendo parte do nosso cotidiano até os dias atuais (Simões, 2021).

### 2.1. Panorama histórico do desenvolvimento de plásticos

O primeiro material derivado da modificação química de um polímero natural foi a borracha vulcanizada, tendo a descoberta atribuída a Charles Goodyear e Thomas Hancock em 1839 e 1840. Eles descobriram que o aquecimento da borracha natural (*cis*-1,4-poliisopreno) com enxofre alterava suas propriedades mecânicas. Enquanto uma pequena quantidade de enxofre mantinha a elasticidade da borracha a uma ampla variação de temperaturas e solventes, grandes quantidades de enxofre produziam uma borracha dura também conhecida como ebonite ou vulcanite, amplamente utilizada na fabricação de botões, bijuterias e caixas (Shashoua, 2008).

É interessante ressaltar que o povo da civilização Olmeca que viveu no sul do México no período de 1800 a 150 AEC, já utilizava a borracha natural misturada ao enxofre, realizando um processo semelhante à vulcanização. A borracha vulcanizada é um grande marco na história dos polímeros e sua manipulação pelos seres humanos (Lima, 2023).

Em 1846 o químico suíço, Christian Friedrich Schönbein, accidentalmente criou o primeiro polímero semissintético conhecido como nitrato de celulose, derivado do processamento da celulose presente no papel, com os ácidos nítrico e sulfúrico. O resultado foi um material solúvel em solventes orgânicos e sensível ao calor, altamente inflamável que recebeu o nome de algodão-pólvora sendo utilizado como explosivo (Rossell, 2003).

Pouco depois, o metalurgista Alexander Parkes descobriu que a cânfora funcionava como plastificante quando adicionada ao nitrato de celulose, tornando possível moldar o material sem o encolhimento observado no material puro. O produto foi lançado no mercado em 1864 sob o nome de Parkesine, sendo vendido como um substituto para borracha, ebonite e guta percha (Shashoua, 2008).

Em 1870 uma empresa nos Estados Unidos ofereceu uma recompensa de 10.000 dólares a quem encontrasse um material substituto ao marfim para produção de bolas de bilhar. Tentando concorrer ao prêmio, o americano John Wesley Hyatt desenvolveu o material

conhecido como celuloide (figura 3), proveniente da mistura de nitrato de celulose com cânfora, aquecida sob pressão (Shashoua, 2008).

**Figura 3** – Bola de bilhar feita em celuloide.



Fonte: Google Arts & Culture, 2025.

O material podia ser prensado em blocos, receber corantes e depois ser moldado com o calor. Também era capaz de imitar a aparência de materiais naturais como marfim, madre pérola e casco de tartaruga sendo utilizado na fabricação de objetos variados como caixas, abotoadeiras e pentes. Hyatt desenvolveu concomitantemente uma série de máquinas para trabalhar o material, sendo precursor da moldagem por injeção (Shashoua, 2008).

Em 1889 Eastman Kodak, passou a utilizar o nitrato de celulose na produção de películas de filme e rapidamente este se tornou seu uso comercial mais importante. De acordo com Shashoua (2008), por volta de 1920 a indústria de cinema já era dependente dos filmes em nitrato de celulose, mas por ser altamente inflamável seu uso foi substituído pelo acetato de celulose. O responsável pela descoberta do material, foi o químico Paul Schutzenberger, trocando o ácido nítrico pelo ácido acético. Além de películas cinematográficas seu uso se estendeu à produção de objetos variados e tecidos. Atualmente películas de filme e alguns tipos de embalagens e objetos ainda são produzidos em acetato de celulose (Shashoua, 2008).

No mesmo período, por volta de 1897, Adolph Spitteler desenvolveu a caseína formaldeído, um plástico semissintético utilizado na produção de objetos que necessitassem de maior dureza/rigidez e cores brilhantes. A patente foi gerada em 1899, mas a produção industrial só iniciou em 1904. No entanto, durante a Segunda Guerra Mundial a dificuldade de acesso à caseína proveniente do leite gerou barreiras na produção do material (Shashoua, 2008).

Em 1907, foi registrada a patente da Bakelite, o primeiro plástico sintético produzido no mundo. Leo Baekeland, um químico belga radicado nos Estados Unidos, descobriu este

material ao aquecer fenol e formaldeído sob pressão. O resultado foi um plástico duro, insolúvel, resistente ao calor, ácidos e líquidos orgânicos além de apresentar propriedades isolantes. A Bakelite revolucionou a indústria dos plásticos e foi amplamente utilizada na produção de bolas de boliche, discos, eletrodomésticos (figura 4), utensílios de cozinha, entre outros. A limitação do material se dava em relação à coloração escura, que restringia a gama de cores ao preto, vermelho e alguns tons de marrom (Shashoua, 2008).

**Figura 4** - Telefone usado pelo Imperador, instalado no Paço de São Cristóvão no Rio de Janeiro.



Fonte: Google Arts & Culture, 2025.

Telefone em madeira, metal, baquelite e porcelana, 1801 – 1900. Dimensões físicas: 21,7 x h37,5 cm (maior medida). Procedência: Museu Imperial/Ibram/Minc.

Por volta de 1920 a ureia formaldeído foi explorada em alguns países como Áustria e Alemanha. A empresa British Cyanides Company investigou a condensação da tioureia com formaldeído, que combinada com cargas e corantes possibilitou pela primeira vez a produção de plásticos brancos e com cores vibrantes. O material foi empregado na produção de bandejas, copos, artigos de cozinha e decoração, além da aplicação na composição de vernizes, laminados e adesivos. Pouco depois, por volta dos anos 1930 a melamina formaldeído, um termorrígido de condensação, foi desenvolvida. O material apresenta características similares às da ureia formaldeído, mas passou a ser preferencialmente utilizada na produção de artigos de cozinha devido à sua aparência similar à cerâmica e maior resistência ao calor, umidade e detergentes (Shashoua, 2008).

A três resinas provenientes de reações com formaldeído (fenol formaldeído, ureia formaldeído e melamina formaldeído) passam pelo mesmo processo de polimerização em duas

etapas. O primeiro estágio é a formação de oligômeros de fenol, ureia ou melamina solúveis em água. Esse material é então colocado em moldes, onde passam pelo segundo estágio de polimerização, com a formação de ligações cruzadas pela ação de calor ou catálise ácida (Horie, 1987).

O poli(1-cloroeteno), também conhecido como poli(cloreto de vinila) (PVC), foi descoberto em 1872, mas passou por grandes mudanças até ser, de fato, incorporado ao mercado por volta de 1928. Nas primeiras tentativas de aplicação do material, a sua degradação ocorreu ainda durante a fabricação, devido à temperatura de processamento que variava entre 160°C a 180°C. A solução mais relevante encontrada para este problema, foi a adição de plastificantes que conferiam maior resistência térmica, flexibilidade e estabilidade ao material. As características citadas anteriormente, somadas à facilidade de produção tornaram o PVC um excelente substituto da borracha. Em 1937 Benjamin Franklin Goodrich desenvolveu laminados e adesivos de PVC. Durante a Segunda Guerra Mundial foi amplamente utilizado devido à sua resistência à ácidos, mas após o fim da guerra, a grande quantidade do material disponível no mercado foi convertida em embalagens, roupas e sapatos (Shashoua, 2008).

Por volta de 1930 o desenvolvimento da moldagem por injeção traz à tona um material pouco valorizado até então, o poliestireno (PS). Sua descoberta é atribuída a Eduard Simon em 1839, mas o interesse comercial surgiu somente por volta de 1911. O material apresenta boas propriedades isolantes, resistência à ácidos e bases e podia ser copolimerizado com butadieno para formar borracha sintética (Shashoua, 2008).

O polietileno (PE), por sua vez, foi sintetizado em 1933 por um grupo de químicos na Alkali Division of Imperial Chemical Industries (ICI). É um plástico com boa resistência muito utilizado na fabricação de itens de mesa, como é o caso dos potes e utensílios da marca Tupperware®. Esse mesmo grupo desenvolveu também o poli(metil metacrilato) ou acrílico como uma alternativa para o vidro (Shashoua, 2008).

Polímeros como o nylon, o politetrafluoretileno (PTFE) conhecido como Teflon, os silicones e epóxides, também foram desenvolvidos nesse período de 1930 a 1945. A Segunda Guerra Mundial gerou a necessidade de desenvolvimento de diversos materiais, entre eles, os plásticos. Até então os plásticos desenvolvidos eram em sua maioria baseados no empiricismo, ou seja, tentativa e erro, mas após 1940 o conhecimento científico sobre polímeros foi muito desenvolvido sendo utilizado na criação e produção industrial de plásticos. Após a guerra muitos deles já eram fabricados em larga escala e com baixo custo, como o PVC, o PS e o PE.

Nesse período a indústria petroquímica já fornecia matéria prima para produção de plásticos, tendo aumentado desde então (Shashoua, 2008).

Em 1953 foi desenvolvido o policarbonato (PC), sendo produzido em escala industrial somente em 1959. Foi empregado na substituição do alumínio, na indústria elétrica e eletrônica como na produção de CDs e DVDs (Shashoua, 2008).

Conforme Shashoua (2008), um estudo desenvolvido pela empresa DuPont em 1942 mostrou que, naquele ano, 120 peças diferentes em plástico já eram utilizadas na fabricação de carros. De acordo com a pesquisa apresentada por Champeau (2023), na Plástico Brasil Xperience 2023<sup>4</sup>, feita em parceria pela Prometeon e a Universidade Federal do ABC, atualmente, cerca de 10.000 peças em plástico podem ser utilizadas na fabricação de carros modernos, representando aproximadamente 1/3 do número total de componentes. Na construção civil é empregado em encanamentos, revestimentos, telhas e isolamento. É utilizado nas áreas da saúde em dispositivos descartáveis como luvas, seringas e almofolias, além de próteses de articulação, implantes de silicone e tecidos artificiais. Em equipamentos eletrônicos podem ser empregados desde os circuitos internos até as carcaças e cabos. Compõe tecidos para confecção de roupas e calçados, utensílios domésticos, mobiliário, brinquedos, acessórios, capacetes, embalagens, etc.

## **2.2. Plásticos em obras de arte**

Nos últimos anos, materiais artísticos compostos por polímeros também têm se popularizado, como as tintas acrílicas, resinas termoplásticas, vernizes, aglutinantes, adesivos sintéticos, massas, chapas plásticas etc. Os plásticos estão em todos os lugares e a tendência é que aumentem também dentro dos acervos históricos e artísticos, como é o caso da escultura “Acessão II” de Eva Hesse, exposta na 24<sup>a</sup> edição da Bienal de São Paulo em 1998. Na figura 8, podemos observar uma caixa em metal galvanizado com seu interior repleto de cerdas plásticas.

---

<sup>4</sup> <https://app.informamarkets.com.br/event/plastico-brasil-xperience-2025/planning/UGxhbm5pbmdfMTgwODQ3Mg>

**Figura 5 – Obra “Acesso II” de Eva Hesse, 1967.**



Fonte: Google Arts & Culture, 2025.

Com a ferramenta *Google Arts & Culture*, buscando pelo termo “*plastics*” (figura 6) são encontrados ao menos 6.751 resultados para obras de arte compostas por plásticos, sendo possível, inclusive, realizar uma busca mais refinada por tipo de plástico.

**Figura 6 - Busca por objetos com suporte plástico na ferramenta Google Arts & Culture.**

Fonte: *Google Arts & Culture*.

Fica claro que aumento do número de bens culturais em plástico, acompanha o aumento da produção do material no mundo, com uma tendência natural de aumentar a quantidade em intervalos cada vez menores de tempo. Aprender a conservar e restaurar estes objetos é uma tarefa necessária aos conservadores-restauradores contemporâneos.

### 2.3. Propriedades de materiais poliméricos

Para compreender as propriedades dos plásticos devemos entender a sua estrutura química, pois as características químicas e físicas dos materiais são amplamente influenciadas por essas conformações. Conforme Sanfelice et al. (2022):

A estrutura química dos polímeros engloba diversos aspectos, por exemplo uma dispersão em sua massa molar (comprimento de cadeia), ramificações, isomerismo e tacticidade. As macromoléculas que compõem um material polimérico adotam uma gama de conformações físicas. Essas conformações macromoleculares transitam entre

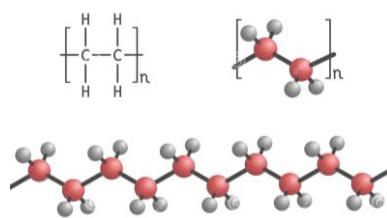
estados completamente desordenados e estados ordenados. Assim, as propriedades de qualquer material polimérico representam a contribuição de todas as suas características físicas e químicas. (Sanfelice et al., 2022, p. 53).

Os polímeros são estruturas complexas formadas pela união de várias unidades repetidas de monômeros. Essa união ocorre por meio de uma reação química chamada de polimerização, que define as características mecânicas do material e é controlada por alguns fatores como temperatura, pressão e adição de catalisadores. Devido às longas cadeias formadas na polimerização, polímeros tendem a ter altas massas moleculares, mas o tamanho da cadeia é variável gerando algumas diferenças entre eles. De forma geral, quanto maior a massa molecular, menor é a propensão à solubilização e maior a resistência à tração (Shashoua, 2008).

A polimerização pode ocorrer de três modos: por meio de adição, quando os monômeros de uma única espécie se ligam diretamente por uma ou várias ligações duplas, que se tornam simples; por meio da condensação, quando os monômeros de espécies diferentes reagem gerando não só as ligações, mas também a eliminação de pequenas moléculas ou subprodutos como a água; ou por rearranjo, quando a polimerização por condensação gera um rearranjo na estrutura molecular (Simões, 2021).

Nos casos em que a polimerização ocorre entre os monômeros de uma única espécie temos um homopolímero, como é o caso do polietileno (figura 7), proveniente da polimerização por adição do monômero etileno.

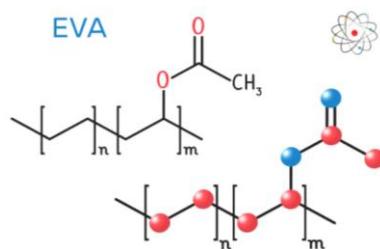
**Figura 7** – Fórmula estrutural do polietileno.



Fonte: dreamstime.com

Quando a polimerização ocorre entre duas ou mais espécies de monômeros, temos um copolímero, como é o caso da polimerização do etileno com acetato de vinila, formando etileno vinil-acetato (EVA), mostrado na figura 8.

**Figura 8** – Fórmula estrutural do etileno vinil-acetato.

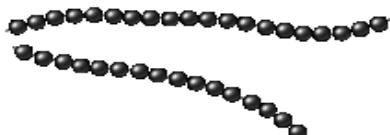


Fonte: istockphoto.com

Os polímeros por condensação podem se organizar em estruturas lineares, ramificadas ou reticuladas. Um mesmo tipo de polímero pode ser arranjado de diferentes formas, gerando propriedades mecânicas distintas mesmo que partindo de uma mesma matéria prima (Shashoua, 2008; Simões, 2021).

Os polímeros lineares (figura 9) são aqueles em que a cadeia polimérica se arranja de forma contínua e reta, sem ramificações ou ligações cruzadas.

**Figura 9** – Polímero linear.



Fonte: researchgate.net

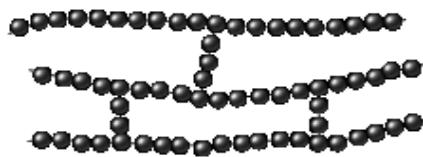
Esse arranjo permite que as cadeias de polímeros deslizem entre si e formem interações intermoleculares fortes pela proximidade entre uma cadeia e outra em uma espécie de “empilhamento”, gerando materiais mais resistentes mecanicamente (Shashoua, 2008).

Os polímeros ramificados (figura 10), por sua vez, apresentam ramificações que partem da cadeia principal dificultando as interações e o deslizamento entre diferentes cadeias poliméricas. Com isso, as forças intermoleculares tendem a ser mais fracas, gerando materiais com maior flexibilidade (Shashoua, 2008).

**Figura 10 – Polímero ramificado.**

Fonte: researchgate.net

Por fim, os polímeros reticulados (figura 11) são aqueles que apresentam ligações covalentes entre as cadeias lineares, formando estruturas tridimensionais. A existência de ligações químicas entre as cadeias gera materiais altamente insolúveis e infusíveis (Shashoua, 2008).

**Figura 11 – Polímero reticulado.**

Fonte: www.researchgate.net

Vale ressaltar que dificilmente um polímero apresenta um único tipo de arranjo, mas é a predominância de um tipo de cadeia que se manifesta nas características do material. Polímeros predominantemente lineares formam mais áreas cristalinas, enquanto polímeros reticulados formam áreas amorfas. Apesar do nome cristalino, essa característica se deve à formação de cristais microscópicos que refratam a luz na estrutura do material, resultando em opacidade. Plásticos transparentes como o acrílico (poli(metil metacrilato)), policarbonato e poliestireno são predominantemente amorfos. Há algumas exceções quando os cristais formados são tão pequenos a ponto de não interferirem na refração da luz, como é o caso do plástico presente nas garrafas PET (poli(tereftalato de etileno)) (Shashoua, 2008).

Uma das formas mais usuais para classificar os plásticos é separando os materiais de acordo com as suas características de fusibilidade e solubilidade. Essa separação é feita em: termoplásticos, termorrígidos ou termofixos e elastômeros.

Os termoplásticos apresentam maleabilidade ou se tornam líquidos quando aquecidos. Podem ser derretidos ou dissolvidos repetidas vezes sem perder suas propriedades. Estes compreendem a maior parcela dos plásticos produzidos e utilizados atualmente (Simões, 2021).

Os elastômeros são polímeros com alta elasticidade, possuindo grande capacidade de deformação, de acordo com Sanfelice et al. (2022), podendo ser alongados até pelo menos 200% do seu tamanho original. Sua estrutura molecular é reticulada, semelhante à dos termorrígidos, porém com menor número de ligações cruzadas, conferindo ao material a elasticidade característica.

Os termorrígidos ou termofixos são polímeros que em estágio intermediário de polimerização se apresentam macios ou viscosos, tornando-se irreversivelmente rígidos após a cura com a formação de ligações cruzadas (reticulação intensa). Ao serem submetidos ao aquecimento repetidas vezes, não amolecem e iniciam o processo de degradação (Shashoua, 2008).

#### **2.4. Processamento de plásticos**

Além da polimerização, o processamento de plásticos envolve a adição de aditivos e a escolha do método de moldagem.

Os aditivos podem ser adicionados para modificar a dureza, resistência mecânica, coloração, longevidade, entre outras características. Uma das formas de classificá-los envolve quatro grupos principais, sendo eles: auxiliares de polimerização, aditivos de processo, aditivos protetores e aditivos modificadores (Soares, 2020).

Auxiliares de polimerização são aditivos como catalisadores, agentes de iniciação e agentes de catalização, que geralmente diminuem o tempo da síntese dos plásticos e consequentemente seu custo de produção. Já os aditivos de processo, são utilizados para auxiliar e facilitar algumas das etapas de produção do plástico, mas não fazem parte da composição final do objeto, entre eles podemos citar os lubrificantes e os solventes. Os aditivos protetores, por sua vez, são aqueles que protegem o material de algum agente de degradação como a temperatura e os raios ultravioleta (UV). E, por fim, os aditivos modificadores são os que alteram as características finais do material, como cor, resistência a chamas, dureza, resistência à impacto, etc. É comum que mais de um tipo de aditivo seja adicionado à um plástico e que desempenhe diferentes funções dependendo da composição em que é colocado, podendo também agir em diferentes funções no mesmo plástico (Soares, 2020).

Conforme tabela 1, extraída do livro *Conservation of Plastics* de Yvone Shashoua (2008), em tradução livre, podemos observar os aditivos que aparecem com maior frequência em composições de polímeros.

**Tabela 1** - Aditivos mais frequentes em composições de plásticos.

<b>Aditivos</b>	<b>Funções principais</b>	<b>Ação</b>	<b>Exemplos</b>
plastificante	reduzir a dureza do polímero; reduzir a Tg	separa cadeias poliméricas entre si	éster ftálico, diester alifático, óleos epoxidados, ester fosfato, poliéster
carga	conferir opacidade; aumentar a dureza; redução no custo; reforço do polímero	altera i índice de refração e propriedades refletivas; adição de volume/massa; distribui as forças de estresse pelo material	carbonato de cálcio; carbonato de magnésio; sulfato de bário; fibras de vidro, carbono ou nylon
lubrificante	prevenir a adesão do polímero nos equipamentos de processamento	é exsudado devido à baixa compatibilidade com o polímero	estearato de cálcio; estearato de chumbo
modificador de impacto	aumentar a resistência a impactos	endurece o material	estireno acrilonitrila; copolímero de etileno vinil acetato
antioxidante	retardar degradações por oxidação	interrompe reações de radicais livres pela captura de oxigênio ou produtos de degradação impossibilitando outras reações	aminas aromáticas; fenólicos (hidroxitolueno butilado); organofosfato, desativador de metais; negro de fumo
estabilizador de calor	proteção contra degradação térmica	inibe degradações; estabiliza produtos da degradação térmica	bário-zinco; bário-cádmio e éster de chumbo; naftenatos e benzoatos; óleos epoxidados de soja e linhaça
estabilizador de luz	proteção contra degradações causadas por radiação UV	absorve radiação UV; impede reações de degradação	negro de fumo; benzofenonas; benzotriazóis; salicilatos; estabilizadores de luz de amina
retardante de chamas	inibição de combustão, emissão de fumaça e taxa de combustão	minimiza o acesso ao polímero, calor ou oxigênio	alumínio tri hidratado; hidróxido de magnésio; fosfatos; parafinas cloradas
agente de expansão	inserção de gás no polímero para produção de espumas	gera CO, CO2 ou N2 pela ação de gás, evaporação de solvente ou reação química	CO2; N2; hidrocarbonetos alifáticos e halogenados; azodicarbonamida
corantes	estética; proteção contra radiação	adiciona cor e opacidade às superfícies ou ao material	negro de fumo; pigmentos inorgânicos; corantes orgânicos; antraquinona

Fonte: Shashoua, 2008 (tradução livre).

Em relação à moldagem, os principais métodos utilizados são: extrusão, moldagem por injeção, moldagem por sopro, termoformagem, moldagem por compressão e moldagem rotacional (Shashoua, 2008; Simões, 2021).

No processo de extrusão, *pellets* de plástico (granulado ou pó) são colocados na máquina extrusora, que aquece o material dentro de um tubo contendo uma rosca espiral rotativa. O material fundido passa por uma tela que filtra e uniformiza a massa viscosa que é forçada através de uma matriz com o formato desejado (Shashoua, 2008; Simões, 2021). Na figura 12, podemos observar um exemplo de máquina extrusora, onde o processo descrito anteriormente ocorre da esquerda para direita.

**Figura 12 - Máquina extrusora.**

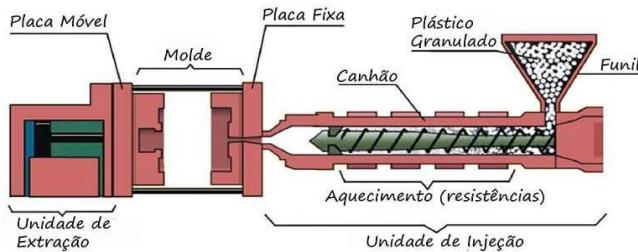


Fonte: <https://www.collab.ind.br/blog/maquina-extrusora-o-que-e-e-como-funciona/>

Após a saída da máquina, o plástico moldado passa por um processo de resfriamento, geralmente com água, para que volte ao estado sólido. Esse método permite a fabricação de filmes, placas, tubos, embalagens, além de peças em borracha como pneus e vedações (Shashoua, 2008).

O processo de moldagem por injeção ocorre de maneira semelhante ao processo de extrusão com a fundição do plástico em um tubo com espiral rotativa aquecido. A diferença ocorre no final do processo, quando ao invés de ser forçada por uma matriz, a massa viscosa é injetada para dentro do molde pela pressão de um pistão. Após o total preenchimento, o molde é resfriado e o plástico já endurecido é expulsado com o formato final (Shashoua, 2008; Simões, 2021). Um esquema da moldagem por injeção pode ser observado na figura 13.

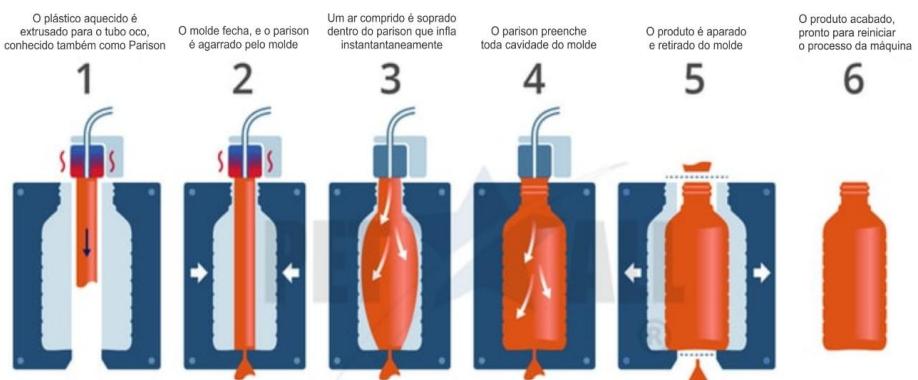
**Figura 13 - Esquema de moldagem por injeção.**



Fonte: <https://madeiplast.com.br/blog/injecao-plastica/injetora-de-plastico/>

A moldagem por sopro ocorre em conjunto com outra técnica. Após o plástico ser aquecido e moldado em forma de tubo, também chamado de parison, pelo método de extrusão, o material é posicionado dentro de um molde e soprado com ar comprimido e quente. Após a moldagem o plástico é resfriado e aparado nas rebarbas, conforme figura 14. Essa técnica é muito aplicada na confecção de garrafas e frascos (Shashoua, 2008; Simões, 2021).

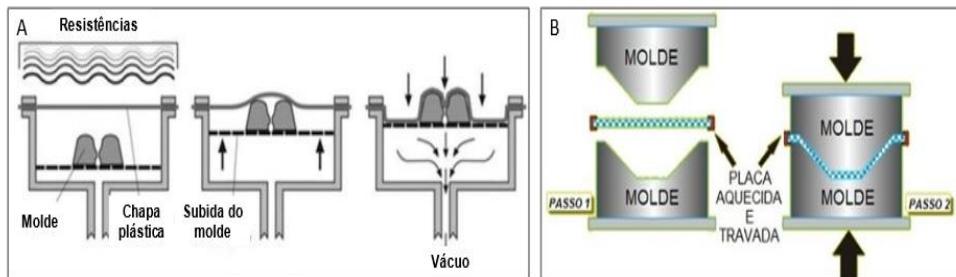
**Figura 14 - Esquema de moldagem por sopro.**



Fonte: <https://www2.starkferramentaria.com.br/entendendo-o-processo-de-modelagem-por-sopro-plastico>.

A técnica de termoformagem também depende de produtos extrudados, nesse caso folhas ou placas plásticas. É uma técnica que utiliza calor e pressão para que a fina camada de plástico adote a forma desejada. A técnica apresenta algumas variações, mas as mais comuns são: por vácuo sugando a folha plástica contra o molde, ou entre duas matrizes, uma positiva e outra negativa, onde o plástico é pressionado (figura 15). No método à vácuo ainda pode ocorrer uma etapa de esticamento do plástico com ar quente comprimido, em que a folha é assoprada no sentido oposto ao molde e em seguida sugada em direção ao mesmo. Essa técnica é muito utilizada para confecção de embalagens alimentícias, como potes de margarina e descartáveis (Shashoua, 2008).

**Figura 15 – Esquema da termoformagem.**

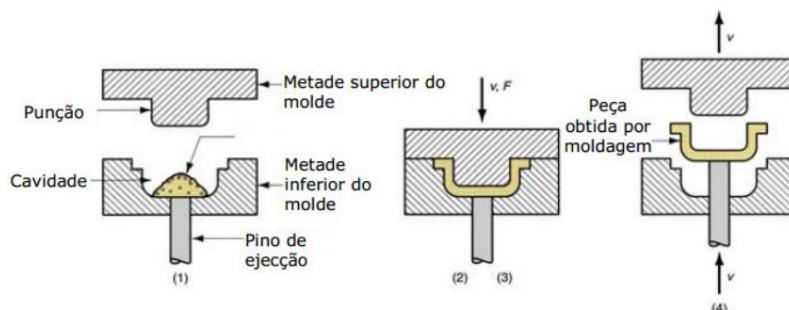


Fonte figura (A): <https://c2lab.com.br/blog-vacuum-forming-o-que-e-e-como-funciona/> Fonte figura (B): [https://www.tudosobreplasticos.com/processo/termoformagem.asp?fb\\_comment\\_id=548412938597401\\_906245576147467](https://www.tudosobreplasticos.com/processo/termoformagem.asp?fb_comment_id=548412938597401_906245576147467)

Legenda: (A) Termoformagem à vácuo. (B) Termoformagem por moldagem combinada.

A moldagem por compressão ocorre, assim como na termoformagem por moldagem combinada, com o polímero sendo aquecido e comprimido entre duas metades de um molde. A diferença está principalmente na forma em que o polímero é colocado no molde, sendo neste caso, granulado ou em pó. Esse método de moldagem é mais utilizado para o processamento de materiais termofixos e elastômeros sintéticos (Shashoua, 2008; Simões, 2021). Na figura 16 podemos observar um esquema de como ocorre a moldagem por compressão.

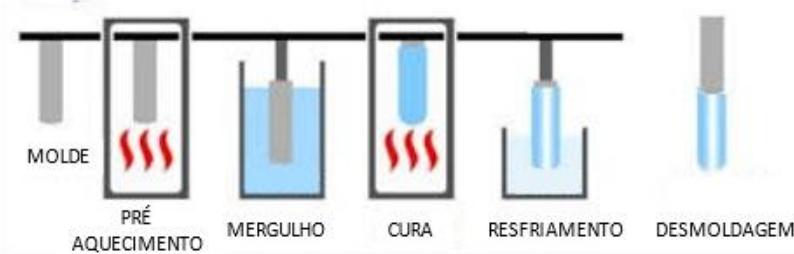
**Figura 16 - Esquema de moldagem com compressão.**



Fonte: Melani, 2012.

A moldagem por imersão é feita pela imersão de um molde rígido em uma dispersão do polímero desejado, como o plastisol, ou no polímero puro em estado líquido, como o látex. Ao sair da imersão o molde fica revestido com uma fina camada do material que forma o objeto desejado, como balões de festa e luvas descartáveis (figura 17) (Shashoua, 2008).

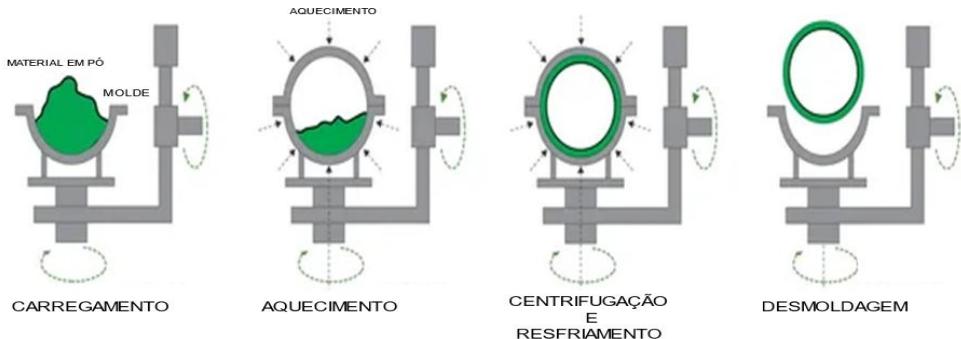
**Figura 17 -** Esquema de moldagem por imersão.



Fonte: <https://www.thermoplasticcoating.com/pt/dip-molding-technology-and-its-application-in-automobile/>

Por fim, a moldagem rotacional ou rotomoldagem, ocorre por meio de um molde que é carregado com grânulos de plástico, lacrado e submetido ao aquecimento e rotação simultâneos. Os grânulos derretem em contato com as paredes do molde e a rotação distribui o material uniformemente por toda a sua extensão. Após o resfriamento o molde é aberto e o plástico moldado recebe acabamento de rebarbas. Na figura 18, podemos observar um esquema da rotomoldagem (Shashoua, 2008).

**Figura 18 –** Esquema de rotomoldagem.



Fonte: <https://hongjusilicone.com/pt/plastic-molding-techniques/>

Esse método é ideal para objetos de grandes formatos que não precisem de extrema precisão, como galões, barris e caixas d'água, mas também pode ser utilizado na confecção de brinquedos etc. (Shashoua, 2008).

## 2.5. Degradação de plásticos

A degradação de plásticos compreende qualquer mudança que afete negativamente as propriedades ou função do material. Conforme Shashoua (2008), no campo patrimonial, a degradação abrange mudanças químicas, físicas, perda da função, forma ou significado do

objeto. Pode estar associada à fatores físicos, químicos ou biológicos.

Os danos atribuídos a fatores físicos podem ocorrer de forma mecânica pelo uso do objeto antes da musealização ou por manuseio inadequado, gerando riscos, arranhões, fraturas, abrasão etc. O contato direto entre materiais distintos também pode ser causa de degradações físicas devido à sensibilidade de um dos materiais a gases, vapores ou exsudação de aditivos presente no outro material. Esse tipo de interação pode gerar esmaecimento de pigmentos, amarelecimento, alterações visuais e táteis dos materiais (Shashoua, 2008).

Assim como para maior parte dos materiais presentes em acervos, a temperatura e umidade relativa inadequadas são causas relevantes de degradação de polímeros. Quando expostos a temperaturas abaixo da temperatura de transição vítreia ( $T_g$ ), os plásticos tentam a contrair ficando rígidos e quebradiços. Quando expostos a temperaturas acima da  $T_g$ , ficam mais flexíveis e suscetíveis a deformações. Em objetos compostos por combinações de polímeros ou diferentes materiais a atenção deve ser redobrada, pois as diferentes temperaturas de transição vítreia podem entrar em conflito e causar degradações como o desprendimento da gelatina em filmes fotográficos ou, em casos mais graves, o colapso do material devido a tensões internas (Shashoua, 2008).

A água age como plastificante em alguns tipos de plástico devido à higroscopidez dos materiais, como é o caso da caseína e das poliamidas. O PVC plastificado, por exemplo, pode mudar drasticamente de coloração quando armazenado sob condições de alta umidade relativa (UR), ficando opaco, como mostrado na figura 19. Essa condição pode ser revertida diminuindo-se a UR (Shashoua, 2008).

**Figura 19** - Tubo de PVC plastificado armazenado a 30% de UR (esquerda) e 90% de UR (direita).



Fonte: Shashoua, Conservation of Plastics, 2008, p159.

Cargas feitas de materiais higroscópicos, como fibras de madeira ou celulose também interagem com a água, inchando e causando fissuras e rachaduras em plásticos nos quais estejam presentes (Shashoua, 2008).

A migração de aditivos, por sua vez, é um tipo de degradação física que pode levar à degradação química. Em alguns casos, o aditivo utilizado sublima em temperatura ambiente, como é o caso da cânfora utilizada no nitrato de celulose e acetato de celulose, causando encolhimento e enrijecimento do material. Esses vapores expelidos pelo plástico também podem afetar outros materiais acondicionados juntos. Outros tipos de aditivos, com altos pontos de ebulação, tendem a formar uma camada na superfície do plástico, criando um filme pegajoso que altera a aparência do material e adere sujidades. A umidade e os poluentes contidos nessas partículas podem, a posteriori, iniciar reações de degradação química (Shashoua, 2008).

A degradações químicas ocorrem, no geral, pela quebra ou formação de ligações químicas, por consequência da interação do material com luz, radiação UV, calor, água, oxigênio etc., que fornecem energia suficiente para iniciarem as reações. As reações mais comuns em plásticos são: quebra de cadeias moleculares, formação de ligações cruzadas, formação de grupos cromóforos e formação de grupos polares (Shashoua 2008; Mariano, 2012). A quebra de cadeias moleculares é a degradação química mais comum em plásticos, causando perda de coesão e resistência no material. Isso ocorre devido à diminuição do peso molecular com a quebra das longas cadeias poliméricas (Shashoua, 2008). A formação de ligações cruzadas, por outro lado, ocorre aumentando a massa molecular dos plásticos com a junção de diferentes cadeias poliméricas, que se reticulam, tornando o material mais rígido, quebradiço e menos solúvel (Shashoua, 2008). Ademais, os grupos cromóforos podem ser formados por ação da oxidação ou hidrólise, como é o caso das carbonilas ( $\text{C}=\text{O}$ ) e ligações de carbono insaturadas ( $\text{C}=\text{C}$ ). Esses grupos causam amarelecimento em plásticos transparentes e perda da cor em plásticos coloridos (Shashoua, 2008). Finalmente, a formação de grupos polares, como as hidroxilas ( $\text{O}-\text{H}$ ), pode ocorrer em decorrência de oxidação, hidrólise ou outras reações de degradação química, afetando as propriedades do plástico de solubilidade, estabilidade química e interação com a água (Shashoua, 2008).

A degradação de plásticos causada por fatores biológicos é menos comum, mas pode ocorrer em decorrência do acúmulo de sujidades sobre as superfícies. Alguns tipos específicos de plásticos são mais suscetíveis à ataques microbiológicos, como o PVC, devido a alguns plastificantes presentes nesse plástico, tintas acrílicas e poli(vinil acetato) (Shashoua, 2008).

### **3. ADESIVOS UTILIZADOS EM PROCESSOS DE CONSOLIDAÇÃO**

Adesivos são materiais capazes de unir partes separadas de um substrato, agindo na interface entre elas. De acordo com Figueiredo Junior (2012), a adesão é um fenômeno complexo e nenhuma teoria sozinha é capaz de explicá-lo bem. Para compreender a ação dos adesivos, podemos considerar três teorias principais. A teoria mecânica afirma que substratos mais rugosos, com textura na escala de micrômetros, são mais suscetíveis à adesão devido ao melhor encaixe dos substratos. A teoria da difusão considera que o líquido adesivo é capaz de entrar nos poros do material (capilaridade), se difundindo e formando uma ponte entre as partes separadas, de modo que a interface entre o filme e os substratos não fica bem definida. E por fim, a teoria da absorção física e química leva em consideração as interações intermoleculares, que por via de regra, quanto mais polares forem as substâncias, maior será a atração entre elas. Os fenômenos citados nas três teorias agem concomitantemente na adesão de substratos, em maior ou menor intensidade, dependendo da situação (Figueiredo Junior, 2012).

Outros fatores importantes na adesão de materiais são os valores de tensão superficial e viscosidade dos adesivos. Quando um adesivo apresenta alta tensão superficial, as suas forças intermoleculares são mais fortes do que as forças de atração entre o adesivo e a superfície, ou seja, apresenta baixa molhabilidade (Newey et al., 1992). Nesse caso, a interação adesivo-substrato pode não ser favorecida. A viscosidade, por sua vez, é a propriedade de resistência de um líquido ao escoamento. Quanto maior a resistência, maior a viscosidade (Figueiredo Junior, 2012). Essas duas características influenciam diretamente no poder de penetração do adesivo e na sua capacidade de criar uma boa junta adesiva.

Para penetrar no substrato, o adesivo precisa estar na forma líquida e para formar a junta adesiva precisa tornar-se sólido. Existem três formas principais de ação dos adesivos: adesivos que fundem/derretem com calor e endurecem na ausência dele (*melt-freeze adhesives*), adesivos em solução ou dispersão que endurecem pela evaporação do solvente e adesivos de reação que endurecem por reações químicas (Newey et al., 1992).

No presente trabalho, os adesivos em solução/dispersão e os adesivos de reação são mais relevantes por terem sido escolhidos para avaliações de compatibilidade com plásticos, em especial o álcool polivinílico (PVA), o etil cianoacrilato (ECA), o copolímero de etil e metilmacrilato (Paraloid B-72), o poli(vinil acetato) (PVAc) e a resina epóxi (Araldite®).

### **3.1. Poli(álcool vinílico)**

O PVA é uma resina termoplástica, sendo um polímero preparado a partir de acetatos de polivinila pela substituição dos grupos acetato por hidroxila. É resistente à tração e flexível, sendo estável ao calor com diminuição da sensibilidade à água quando submetido ao tratamento com formol ou temperatura acima de 150 °C. Apresenta viscosidades variadas de acordo com diferentes quantidades de grupos acetila. Sua massa molecular influencia na sua solubilidade, mas é solúvel em água e resistente a óleo, solventes orgânicos e ácidos fracos. O PVA com baixo grau de polimerização pode ser dissolvido em água em temperatura ambiente, enquanto o PVA com elevado grau de polimerização e hidrólise dissolvem somente em água quente (80 °C-90 °C). A temperatura de transição vítreia pode variar entre 75°C a 85°C, de acordo com a sua viscosidade (Slaibi et al., 2011). A solubilidade em água tende a diminuir com o tempo, devido às ligações cruzadas que se formam. Exposição à sais inorgânicos, polialdeídos e poliácidos pode causar reações que tornam o adesivo insolúvel, especialmente quando exposto à luz. Meios ácidos ou alcalinos também afetam sua solubilidade (Slaibi et al., 2011).

### **3.2. Etil cianoacrilato**

O ECA é um adesivo incolor, sintético, compatível com variados tipos de substratos. É um adesivo de difícil remoção, em alguns casos “irreversível”/não retratável. A temperatura de transição vítreia é aproximadamente 121 °C,<sup>5</sup> podendo variar entre um fabricante e outro. Este adesivo se degrada em contato com água, exposição prolongada à luz, e meios alcalinos. Suscetível à formação de ligações cruzadas e perda da força pela interação com radiação UV (Horie, 1987).

### **3.3. Paraloid B-72**

Este copolímero de etil e metilmetacrilato é uma resina estável, durável, compatível com diversos materiais que formam filmes, podendo ser combinado com vinílicos, derivados de celulose, silicones e borrachas cloradas para diferentes resultados. Solúvel em xileno, tolueno, misturas tolueno/etanol, metilcetona, dimetilformamida, acetona, diacetona álcool e cloreto de metileno. A Tg é aproximadamente 40 °C, podendo ser usado como verniz ou adesivo (Slaibi et al., 2011). Ele é bastante estável em relação à cor, pH e solubilidade com o passar do tempo

---

<sup>5</sup> <https://renoma.com.br/fichastecnicas/loctite-401-dados.pdf>

(Slaibi et al., 2011).

### **3.4. Poli(vinil acetato)**

O PVAc é uma resina termoplástica, não-tóxica, polar, incolor, solúvel em água, ácidos, bases e soluções salinas. A solubilidade varia com o grau de polimerização do material, que com o passar do tempo pode tornar-se insolúvel em água devido às ligações cruzadas que se formam com o envelhecimento do material (Slaibi et al., 2011). Pode ser encontrado em forma de solução ou dispersão. Enquanto as soluções apresentam maior viscosidade, dispersões apresentam menor viscosidade. A massa molecular do adesivo influencia diretamente nas suas propriedades físicas, o que gera uma grande variabilidade entre as marcas encontradas no mercado. A temperatura de transição vítreia pode variar de 16 °C a 30 °C, dependendo da formulação (Slaibi et al., 2011). Este adesivo é resistente à deterioração em temperatura ambiente, mas quando contém aditivos, comuns em dispersões, pode apresentar craquelamento, migração de plastificante, insolubilidade e escurecimento da cor. Dispersões de PVA são suscetíveis à degradação por temperatura e podem gerar ácido acético como produto de degradação (Slaibi et al., 2011).

### **3.5. Resina epóxi**

A resina epoxídica de dois componentes é compatível com diversos materiais, apresentando grande poder de adesão. A temperatura de transição vítreia pode variar de 70 °C a 80 °C (Horie, 1987). É suscetível ao amarelecimento por exposição prolongada à radiação UV, sensibilidade à água e tendência à formação de ligações cruzadas ao longo do tempo. Pode causar amarelecimento no substrato em que é aplicado (Horie, 1987).

## 4. METODOLOGIA PARA A ANÁLISE DE ADESIVOS APLICADOS À CONSOLIDAÇÃO DE PLÁSTICOS

### 4.1. Seleção dos materiais a serem estudados e panorama da metodologia de análise

A seleção dos polímeros para este estudo foi realizada considerando alguns fatores. A primeira parte consistiu em um levantamento bibliográfico sobre os tipos de plásticos presentes em acervos, onde foram considerados principalmente os dados encontrados no livro de Yvone Shashoua, *Conservation of Plastics*, no Trabalho de Conclusão de Curso de Diana Bulcão Simões, Desafios da Conservação de Objetos Culturais Plásticos em Museus, na Dissertação de Mestrado de Camilla Vitti Mariano, Materiais Plásticos no Acervo da Pinacoteca do Estado de São Paulo: a fonte de Niki de Saint Phalle, e na Dissertação de Mestrado de Conceição Linda de França, Acervos de Obras de Arte em Plástico: perfil das coleções e propostas para conservação destes bens. Por meio da análise cruzada dos dados, foi possível chegar à seleção apresentada na Tabela 2.

**Tabela 2 - Plásticos mais frequentes em acervos de bens culturais.**

PLÁSTICOS FREQUENTES EM ACERVOS	ABREVIAÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
Acetato de celulose	CA	termoplástico
Acrilonitrila butadieno estireno	ABS	termoplástico
Borracha Natural	NR	elastômero
Epóxi	EP	termorrígido
Fenol-formaldeído	PF	termorrígido
Melamina formaldeído	MF	termorrígido
Nitrato de celulose	CN	termoplástico
Poliamidas	PA	termoplástico
Policarbonato	PC	termoplástico
Policloreto de vinila	PVC	termoplástico
Poliéster	PES	termoplástico
Poliestireno	PS	termoplástico
Polietileno	PE	termoplástico
Polimetilmetacrilato	PMMA	termoplástico
Polipropileno	PP	termoplástico
Politetraflúoretileno	PTFE	termoplástico
Poliuretano	PUR	termoplástico
Politereftalato de etileno	PET	termoplástico

Fonte: Tabela de plásticos frequentes em acervos culturais, citados nos trabalhos de França (2019), Mariano (2012), Simões (2021) e Shashoua (2008).

Após esse primeiro levantamento bibliográfico, a seleção dos materiais para as análises experimentais foi realizada inicialmente pela classe de fusibilidade e solubilidade de cada um deles, visando escolher pelo menos um termoplástico, um termorrígido e um elastômero, de forma a abranger a maior variabilidade de características físico-químicas possível em relação à confecção de protótipos e análise dos resultados, com um número razoável de amostras de materiais poliméricos. Também foram consideradas a acessibilidade do material (preço e facilidade de compra), a transparência ou opacidade e importância histórica ou quantitativa em acervos.

Para incluir um material envelhecido naturalmente, foram incluídos corpos de prova retirados de uma bacia de polietileno de alta densidade (PEAD) com mais de 10 anos de uso e que era previamente utilizada em tratamentos de conservação e restauração de papel. Com isso, a seleção final dos plásticos para os ensaios experimentais está descrita na Tabela 3.

**Tabela 3** – Seleção dos materiais e características de interesse.

MATERIAL	CARACTERÍSTICAS DE INTERESSE
Borracha vulcanizada (NR)	Elastômero/ primeiro material polimérico derivado de modificação química de um polímero natural (importância histórica)
Poli(cloreto de vinila) (PVC)	Termoplástico opaco/abundância no mundo
Poliestireno (PS)	Termoplástico transparente
Poli(metilmetacrilato) (PMMA)	Termoplástico considerado nobre
Melamina (MF)	Termorrígido
Polietileno de alta densidade (PEAD)	Termoplástico/plástico envelhecido naturalmente

Fonte: Valerie Takeda, 2025.

Para a escolha dos adesivos a serem testados, por sua vez, a pesquisa bibliográfica foi realizada considerando principalmente o livro da ABRACOR, Materiais Empregados em Conservação Restauração de Bens Culturais e *Materials for Conservation* de C. V. Horie, onde estão listados os principais adesivos utilizados no campo da Conservação-Restauração e suas características. A busca por adesivos possivelmente compatíveis com plásticos foi limitada a materiais sintéticos, devido à maior chance de compatibilidade físico-química. Foram também consideradas a força de adesão, aplicações comuns e acessibilidade (preço e facilidade de compra). Com isso, foram selecionados os seguintes adesivos para os testes, apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4** – Adesivos selecionados para as análises e características de interesse.

ADESIVOS	CARACTERÍSTICAS DE INTERESSE
Acetato de polivinila	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baixo custo;</li> <li>- Ampla variabilidade de produtores;</li> <li>- Amplamente utilizado na conservação restauração de bens culturais;</li> <li>- Resina termoplástica compatível com diversos polímeros;</li> <li>- Atóxico;</li> </ul>
Álcool polivinílico	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ampla variabilidade de marcas;</li> <li>- Amplamente utilizado na conservação restauração de bens culturais;</li> <li>- Resina termoplástica;</li> <li>- Atóxico;</li> <li>- Transparência;</li> </ul>
Araldite	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Resina epoxídica compatível com plásticos;</li> <li>- Alto poder adesivo;</li> <li>- Transparência;</li> </ul>
Cianoacrilato	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto poder adesivo;</li> <li>- Compatibilidade com plásticos;</li> <li>- Transparência;</li> </ul>
Paraloid B72	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Amplamente utilizado na conservação restauração de bens culturais;</li> <li>- Copolímero de etilmetacrilato e metilacrilato, compatível com plásticos;</li> <li>- Transparência;</li> <li>- Estabilidade química;</li> </ul>

Fonte: Valerie Takeda, 2025.

Após a escolha dos materiais, foram desenvolvidos métodos para ensaios de avaliação das características dos adesivos e a sua interação com os plásticos. A análise organoléptica foi escolhida para avaliar a transparência, as características físicas e o manuseio dos adesivos. O ensaio de envelhecimento acelerado com condições severas de umidade relativa e temperatura foi escolhido a fim de averiguar a estabilidade hidrotérmica dos adesivos. Para a avaliação do perfil químico dos materiais foi escolhida a espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier em modo de refletância total atenuada (ATR-FTIR). Para a avaliação qualitativa da

intensidade da interação entre os materiais foi escolhido o ensaio mecânico de tração adaptado para se estimar a força de adesão (junta adesiva), considerando a ruptura de corpos de prova aderidos devido a sujeição a massas determinadas. Para avaliação de possíveis alterações de pH antes e depois do envelhecimento, foi escolhido o teste com fitas indicadoras de pH e com medidor de pH (pHmetro) de superfície (eletrodo plano); em ambos os casos, as medidas foram realizadas por contato. Com isso, um panorama dos materiais e métodos empregados neste TCC estão elencados na Tabela 5.

**Tabela 5** – Seleção final de plásticos, adesivos e análises.

PLÁSTICOS	ADESIVOS	ANÁLISES
Borracha vulcanizada (NR)	Acetato de polivinila	Análise organoléptica
Policloreto de vinila (PVC)	Álcool polivinílico	Análise colorimétrica
Poliestireno (PS)	Epóxi	Ensaio de estabilidade hidrotérmica
Polietileno de alta densidade (PEAD)	Etil cianoacrilato	FTIR
Polimetilmetacrilato (PMMA)	Paraloid B72	Força de adesão
Melamina (MF)		Mensuração de pH

Fonte: Valerie Takeda, 2025.

#### 4.2. Preparo de filmes de adesivo e ensaio de estabilidade hidrotérmica

Cada um dos adesivos foi aplicado de duas maneiras, com pincel e despejado em ponto fixo, sobre um tapete de silicone antiaderente, para análise organoléptica das características físicas e de manuseio. Os aspectos observados nesta etapa foram: cor, viscosidade, facilidade de manuseio e tempo de secagem/polimerização. Após a secagem foram observados: cor, transparência, encolhimento, aspectos visuais, plasticidade e elasticidade.

Alguns dos adesivos selecionados são comercializados prontos (PVAc e etil cianoacrilato), mas a resina epóxi, o álcool polivinílico e o Paraloid B-72 devem ser preparados antes do uso. O álcool polivinílico foi preparado a uma concentração de 10% (m/m) em água deionizada. O Paraloid B-72 foi preparado a uma concentração de 20% (m/m) em acetona para confecção dos filmes e a 20% (m/m) em etanol para confecção dos corpos de prova, devido à sensibilidade de alguns plásticos à acetona. A resina epóxi foi preparada conforme instruções do fabricante, misturando partes iguais dos dois componentes presentes na embalagem.

A aplicação com pincel foi escolhida para a confecção de um filme delgado, exceto pela

resina epóxi (Araldite®), que foi aplicada com a espátula enviada pelo fabricante devido à sua alta viscosidade. O etil cianoacrilato não formou filme como os demais adesivos, grudando no tapete de silicone ou danificando o mesmo. Foram feitos quadrados de 5 x 5 cm com fita adesiva, para demarcação das bordas. Na figura 20, é possível observar o resultado imediatamente após a aplicação dos adesivos com um pincel para a obtenção dos filmes.

**Figura 20** - Aplicação dos adesivos com pincel sobre tapete antiaderente.



Fonte: Valerie Takeda, 2025.

O despejamento em um ponto fixo do tapete foi escolhido para análise do espalhamento do adesivo, viscosidade e encolhimento após a secagem. Todos os adesivos foram despejados na mesma quantidade de 2,5 ml. Na figura 21, podem ser observados os adesivos imediatamente após o despejamento. A deformação visível nos adesivos etil cianoacrilato e Paraloid B-72 se deve à interação dos componentes químicos dos adesivos com o silicone.

**Figura 21** - Despejamento de adesivo em ponto fixo.



Fonte: Valerie Takeda, 2025.

Os filmes delgados foram feitos em duplicata e uma das amostras foi submetida ao ensaio de envelhecimento acelerado para análise da estabilidade hidrotérmica dos adesivos em condições extremas de temperatura e umidade. Para isso, foi utilizada uma estufa de esterilização com circulação de ar da marca Vulcan, modelo Etna 651, configurada na temperatura de 80 °C (variação: 1 °C), onde foram colocadas as amostras suspensas por um

barbante de algodão dentro de um recipiente hermético com uma solução de glicerol em uma concentração de 58% (m/m) em água deionizada, com a finalidade de manter a umidade relativa de equilíbrio a 75% dentro do recipiente (Camargos et al., 2022). Na figura 22, podemos observar o recipiente hermético no momento em que foi colocado na estufa. As amostras foram mantidas na estufa pelo período de 28/05/2025 a 10/06/2025, totalizando 13 dias ou 312 horas.

**Figura 22** - Filmes de adesivo colocados em câmara de envelhecimento artificial.



Fonte: Valerie Takeda, 2025.

#### 4.3. Análise colorimétrica

A coleta de dados colorimétricos foi realizada com um colorímetro portátil da marca Alan, modelo JDY-1A, nas amostras de filmes de adesivos que passaram e não passaram pelo ensaio de envelhecimento acelerado, a fim de verificar a alteração de cor após o envelhecimento. Os filmes foram colocados sobre um papel branco, onde foram medidos os parâmetros em três pontos distintos da amostra. Para controle, os parâmetros do papel também foram medidos. Os dados de alteração de cor foram tratados pela aplicação dos valores de L\*, a\*, b\* médios na fórmula Delta E 76 (diferença de cor), criada pela Comissão Internacional de Iluminação (CIE), sendo:  $\Delta E = \sqrt{((L1 - L2)^2 + (a1 - a2)^2 + (b1 - b2)^2)}$ . Quanto mais próximos de zero forem os resultados da equação, menor é a diferença de cor entre a amostra envelhecida e a não envelhecida, isto é, menor é a alteração de cor decorrente do envelhecimento.

#### **4.4. Espectroscopia de absorção no Infravermelho em modo de refletância total atenuada (ATR-FTIR)**

As análises de ATR-FTIR foram realizadas em um aparelho compacto da marca Bruker, modelo Alpha. As amostras de plásticos e borracha foram submetidas ao teste somente para conferência da natureza química dos materiais, enquanto as amostras de filmes dos adesivos foram submetidas à análise para verificação de possíveis alterações químicas após o envelhecimento artificial. Os espectros foram coletados na faixa espectral de 4000 a 600 cm<sup>-1</sup>, com resolução espacial de 4 cm<sup>-1</sup> e 24 varreduras por espectro.

#### **4.5. Ensaio mecânico de tração adaptado para análise qualitativa da força adesiva**

Para os testes de força de adesão foram confeccionados 30 corpos de prova com dimensões de 4 x 2 cm de cada tipo de plástico (15 pares, sendo 3 por tipo adesivo). Para o corte dos plásticos, foi utilizada uma microrretífica com disco diamantado (figura 22) exceto pela borracha, que foi cortada com auxílio de um estilete.

**Figura 23 - Corte dos corpos de prova.**



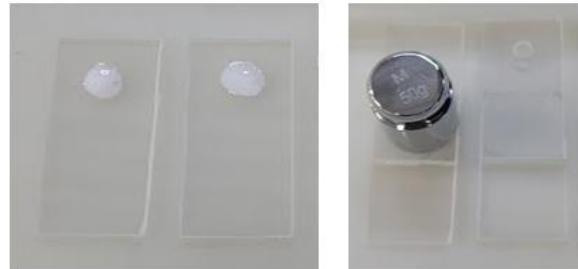
Fonte: Valerie Takeda, 2025.

Essas amostras foram fixadas em pares, com os adesivos em uma área de 2 x 2 cm (metade da altura total da amostra x largura). No total, foram feitos três exemplares de cada combinação plástico/adesivo, de modo que o resultado final apresentado é a média dos resultados dos três testes.

Os adesivos foram aplicados em quantidade aproximada de uma gota por amostra, conforme figura 24. Após a aplicação do adesivo, a segunda parte do corpo de prova foi posicionada sobre a primeira, sendo aplicada pressão com as mãos e um pequeno peso de 50 g

por alguns segundos.

**Figura 24** – Adesão dos corpos de prova na junta adesiva de sobreposição (*lap joint*).



Fonte: Valerie Takeda, 2025.

Cada uma das amostras foi etiquetada com o nome do material e tipo de adesivo para identificação (Figura 25). Ao final da aplicação de todos os adesivos, os corpos de prova foram deixados em repouso por um período de sete dias ou 168 horas.

**Figura 25** - Corpos de prova para teste de força de adesão.



Fonte: Valerie Takeda, 2025.

Para análise qualitativa da força de adesão nas juntas adesivas, os corpos de prova foram submetidos ao teste de tração adaptado com massas determinadas. O primeiro teste foi realizado

com as amostras fixadas em uma das pontas, sendo colocados pesos de 50 g e 100 g<sup>6</sup> na ponta oposta. Na figura 26 podemos observar como foi realizado o teste de pesos, para uma avaliação qualitativa da tração normal ou de arrancamento (*pull-off*), com aplicação de uma pequena força perpendicularmente ao plano da junta adesiva.

**Figura 26** - Teste de força de adesão com pesos de 50g e 100g.



Fonte: Valerie Takeda, 2025.

As amostras que suportaram os pesos de 50 e 100 g (força de cerca de 0,5 e 1 N) foram submetidas à segunda etapa do teste, realizada com a fixação das amostras a uma superfície imóvel, e aplicação de pesos em uma bolsa de tecido na ponta oposta. Neste caso, têm-se a tração de cisalhamento até a ruptura. Como carga, foram escolhidos pesos de pedra utilizados para tratamentos de restauração de papel. Cada peso de pedra foi pesado em uma balança digital, procurando selecionar pesos com aumento gradativo mais próximo de 100 g entre um e outro. O peso da bolsa utilizada foi igual a 67,8 g.

Para delimitar um parâmetro limite de força adesiva desejada, foi realizado o teste de resistência dos plásticos, onde as amostras foram fixadas em uma ponta enquanto pesos foram adicionados na outra de maneira crescente, até a falha do material. O teste foi realizado em triplicata e a média do peso máximo aguentado pelo material nos três testes antes do rompimento foi considerada o peso máximo na ruptura, correspondente à força adesiva. Devido à plasticidade de alguns dos plásticos, a bolsa com pesos foi presa ao corpo de prova por um pequeno sargento de metal.

Os melhores resultados de cada adesivo foram selecionados e testados em juntas adesivas de topo (*butt joint*) em corpos de prova fraturados, a fim de analisar a aplicabilidade

---

<sup>6</sup> As imagens de aferição dos pesos utilizados nos testes de força de adesão encontram-se no Anexo B, figuras 33 e 34.

em uma condição mais próxima da realidade de objetos que necessitam de procedimentos de conservação-restauração. Os testes foram feitos em duplicata e os resultados apresentados são a representação da média e desvio padrão dos valores alcançados.

#### **4.6. Mensuração de pH**

Para aferição do pH das amostras de adesivos antes e depois do envelhecimento, foram utilizadas fitas indicadoras de pH da marca Merck e aparelho aferidor de pH Fieldscout SoilStik com eletrodo plano (de superfície ou contato). Em ambos os tipos de mensuração, foi aplicada uma gota de água destilada (pH 7) como interface entre o adesivo e o medidor.

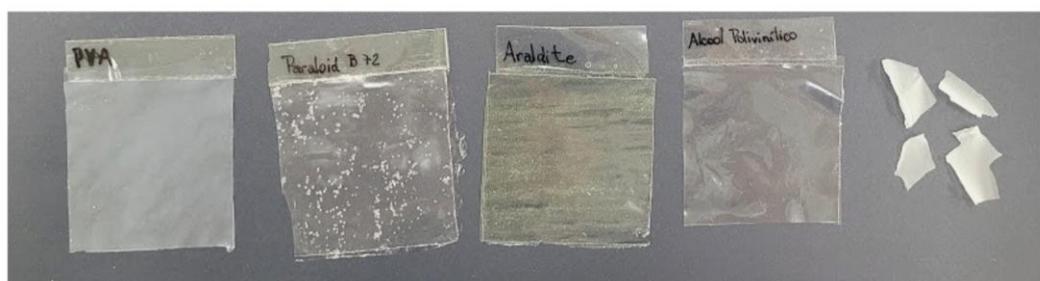
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Análise organoléptica dos filmes de adesivos

Visualmente os únicos adesivos que apresentam coloração no estado líquido são o poli(acetato de vinila) (PVAc) e a resina epóxi (Araudite®), sendo branco e esverdeado, respectivamente. Os demais adesivos apresentam-se completamente translúcidos e incolores. A coloração branca do PVAc torna-se parcialmente translúcida após a secagem, enquanto a coloração da resina epóxi se mantém a mesma. O etil cianoacrilato apresenta-se transparente enquanto líquido, mas em alguns casos torna-se esbranquiçado após a cura. Esse efeito se deve à reação entre o adesivo e a umidade do ar, sendo difícil de controlar e prever. O Paraloid B-72, copolímero acrílico, em acetona também pode ficar esbranquiçado após a secagem devido à formação de pequenas bolhas, em grande quantidade, durante a evaporação do solvente que ficam presas no filme adesivo. Nesse caso, a aplicação com pincel resultou em maior quantidade de bolhas do que com despejamento. Outros tipos de solvente, como etanol e xileno, causam menos bolhas.

Os filmes após a secagem ou cura dos adesivos podem ser observados na figura 27. Os fragmentos soltos no lado direito da imagem foram as únicas partes íntegras do filme de etil cianoacrilato, utilizadas nos experimentos descritos anteriormente.

**Figura 27** - Filmes dos adesivos secos.



Fonte: Valerie Takeda, 2025.

Entre os adesivos testados a escala de viscosidade crescente foi: etil cianoacrilato < Paraloid B72 a 20% em acetona < álcool polivinílico a 10% em água < poli(vinil acetato) < resina epóxi. Conforme é possível observar na figura 28, quanto mais viscoso, menor o espalhamento do adesivo e maior é a regularidade das bordas quando despejados sobre uma manta de silicone.

**Figura 28** - Adesivos despejados em ponto único, secos.

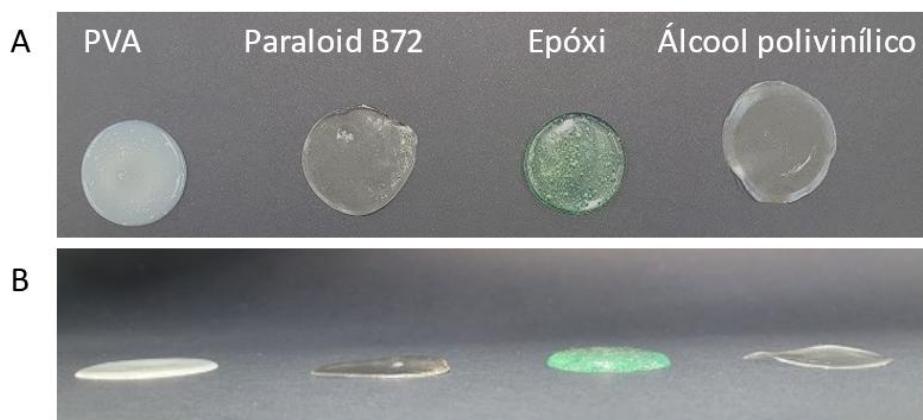


Figura (A): vista superior. Figura (B): vista lateral.

Fonte: Valerie Takeda, 2025.

A viscosidade afeta diretamente a trabalhabilidade do adesivo, sendo dificultada nos dois extremos. O etil cianoacrilato, devido à baixa viscosidade e tensão superficial, espalha rapidamente pelo substrato, dificultando o controle da área de aplicação. Em contrapartida, a resina epóxi, devido à alta viscosidade, permite maior controle sobre a área de aplicação do adesivo, mas dificulta a aplicação de camadas finas, resultando em um acabamento pouco refinado e excesso de produto. Os outros três adesivos de viscosidade intermediária, PVA, PVAc e Paraloid B-72, se mostraram mais fáceis de manusear, com um bom equilíbrio entre controle da área de aplicação e espessura de material aplicado.

O tempo de secagem dos adesivos em ordem crescente foi: Paraloid B-72 em acetona < epóxi < álcool polivinílico < PVAc < etil cianoacrilato. O etil ciano acrilato reage rapidamente quando aplicado entre duas superfícies, endurecendo em alguns segundos, no entanto, quando aplicado somente sobre a superfície de silicone, este demorou a secar e não formou um filme contínuo, mas fragmentos quebradiços. O PVAc e o PVA demoraram mais de 12 horas para secagem total dos filmes, o que pode ocasionar em movimentação indesejada dos substratos quando aplicados como adesivos. A resina epóxi reage rapidamente, endurecendo em alguns minutos, mas a cura total ocorre em algumas horas, podendo apresentar áreas pegajosas durante alguns dias caso a mistura dos componentes não tenha sido homogênea. O Paraloid B-72 a 20% (m/m) em acetona endurece em poucos minutos devido à rápida evaporação do solvente, permitindo ajustes em um tempo razoável.

## 5.2. Avaliação organoléptica e colorimétrica da estabilidade hidrotérmica dos adesivos

Os filmes imediatamente após a retirada da estufa podem ser observados na figura 29. O poli(álcool vinílico) não apresentou grandes mudanças a olho nu, exceto pela deformação causada pela fita adesiva utilizada para identificação da amostra. A deformação observada no filme de PVAc ocorreu no próprio adesivo, que amoleceu e dobrou sobre si próprio. Após o envelhecimento, os filmes de PVAc e PVA mostraram drástica diminuição da solubilidade em água, podendo significar perda da característica de retratabilidade, ainda que possam ser removidos com outros solventes, mas que, no caso dos plásticos a serem consolidados, poderiam sensibilizar os suportes. O etil ciano acrilato e a resina epóxi são adesivos não retratáveis na maioria dos substratos por esse mesmo motivo.

**Figura 29** - Filmes submetidos à T e UR extremas.

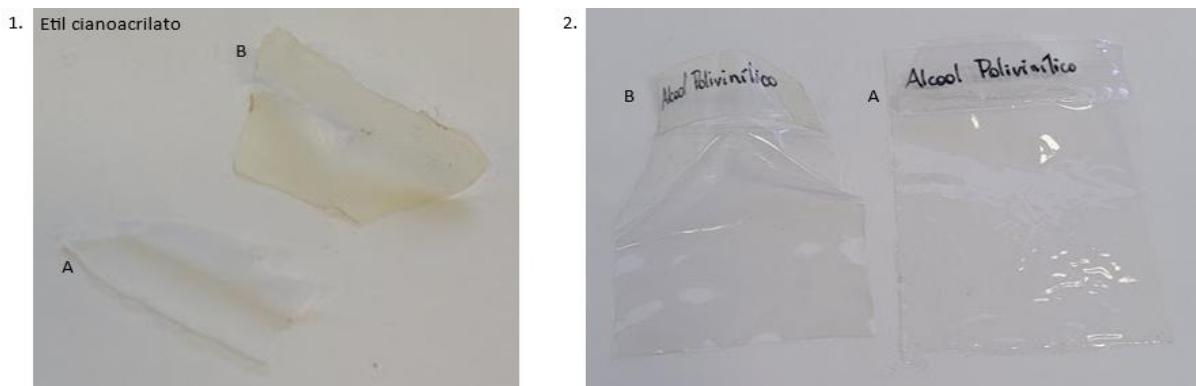


Fonte: Valerie Takeda, 2025.

O etil cianoacrilato apresentou amarelecimento sutil, conforme figura 30 (1). O Paraloid B-72, escorreu completamente e se contraiu, sendo um resultado esperado devido à sua Tg de 40 °C. O filme de poli(vinil álcool) não apresentou alteração visual perceptível (figura 30(2)). O filme de resina epóxi ficou com sua metade inferior em contato direto com o filme de PVAc antes do período na estufa, ocorrendo a adesão superficial dos dois filmes. A separação dos filmes foi realizada mecanicamente e a olho nu eram imperceptíveis quaisquer resquícios de PVAc na amostra de resina epóxi. No entanto, após o ensaio de envelhecimento acelerado, foi notável uma grande alteração entre a área que teve contato com PVAc e a área sem contato, conforme figura 31. O resultado observado indica intensa transferência de compostos do PVAc para a amostra de resina epóxi, sendo um grave problema no caso de aplicações em bens culturais, que podem ter sua coloração irreversivelmente alterada pelo adesivo envelhecido. Com base nos resultados da análise organoléptica, é possível afirmar que entre os adesivos testados, os melhores resultados que indicam estabilidade hidrotérmica foram aqueles para o

poli(álcool vinílico) e o etil cianoacrilato.

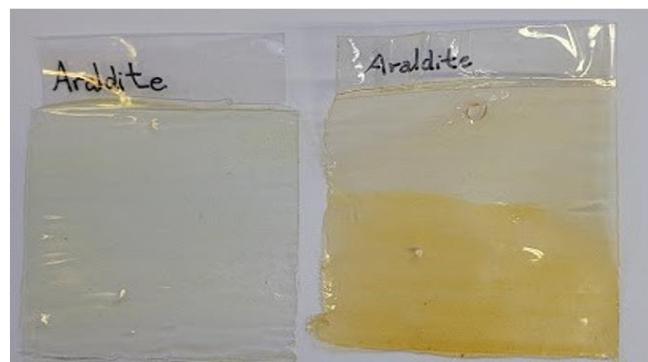
**Figura 30 - Comparativo entre filmes adesivos envelhecidos e controle.**



(A): filme controle. (B): filme envelhecido.

Fonte: Valerie Takeda, 2025.

**Figura 31 - Filmes de resina epóxi, controle e envelhecido, respectivamente.**



Fonte: Valerie Takeda, 2025.

Por sua vez, considerando os valores de delta E das amostras, o único adesivo com valor menor do que 1, ou seja, que não apresentou qualquer mudança nos parâmetros colorimétricos iniciais, foi o poli(álcool vinílico). Todas as demais amostras tiveram alterações colorimétricas relevantes, em especial o PVAc, conforme exposto na tabela 6.

Observando os valores de delta E, nota-se que a resina epóxi (pura) e o etil cianoacrilato apresentaram amarelecimento moderado, enquanto o PVAc e o Paraloid B-72 apresentaram amarelecimento intenso. O Paraloid B72 pode ter sofrido um aumento desproporcional nas medidas do delta E devido ao seu derretimento e endurecimento em uma espessura maior que a dos demais filmes, porém, ainda que alterados os valores colorimétricos, o amarelecimento é visível a olho nu. Nesse sentido, os melhores resultados de estabilidade colorimétrica após o

envelhecimento hidrotérmico foram verificados para o poli(álcool vinílico).

**Tabela 6** - Parâmetros colorimétricos das amostras de adesivos.

AMOSTRA	TESTE DE COLORIMETRIA			MÉDIAS (L A B)		$\Delta E$
	L	A	B			
<b>Araldite</b>						
controle	89,9	-2,7	1,7			
	89,9	-2,5	1,5	90	-2,7	1,7
	90,2	-2,9	1,9			
envelhecida	87,4	-1,7	6			6,54
	85,9	-1,4	7,5	86,6	-1,7	7,2
	86,7	-2,0	8,1			
envelhecida com PVAc	81,3	0,6	27,1			25,81
	80,6	0,9	25,8	81,1	0,6	25,7
	81,6	0,3	24,2			
<b>Paraloid B72</b>						
controle	90,9	-0,4	-4,2			
	89,7	-0,4	-3,7	89,9	-0,3	-3,8
	89,3	-0,3	-3,5			
envelhecida	80,2	-0,8	0,8			10,74
	81,9	-0,5	0,9	80,2	-0,5	0,8
	78,5	-0,3	0,7			
<b>PVAc</b>						
controle	92	-0,4	-4,3			
	92,4	-0,5	-4,5	92,1	-0,4	-4,3
	92,1	-0,5	-4,3			
envelhecida	87,3	-2,2	11,5			13,82
	85,9	-0,4	5,6	86,5	-1,3	8,3
	86,3	-1,3	8			
<b>PVA</b>						
controle	92,2	-0,2	-4,2			
	91,9	-0,2	-4,3	92,2	-0,2	-4,3
	92,7	-0,2	-4,5			
envelhecida	92,8	-0,3	-3,7			0,88
	93,1	-0,3	-3,8	92,6	-0,7	-3,7
	92,1	-0,1	-3,7			
<b>Etil cianoacrilato</b>						
controle	92,5	-0,5	-3,7			
	92,5	-0,3	-3,9	92,4	-0,3	-3,9
	92,3	-0,3	-4,0			
envelhecida	90,2	-1,6	0,9			5,59
	90,5	-1,2	0,3	90,1	-1,3	1,1
	89,8	-1,3	2,1			

Fonte: Valerie Takeda, 2025.

### 5.3. Avaliação físico-química dos adesivos após envelhecimento acelerado

Os testes com fitas indicadoras de pH ficaram entre 5 e 6 em todas as amostras, não apresentando diferenças entre as amostras envelhecidas e controle, exceto pela amostra de resina epóxi (Araldite) que teve contato prolongado com PVAc. Com o aparelho medidor de pH, os resultados foram numericamente diferentes (entre 4,4 e 7,5), mas de modo geral mantiveram a mesma tendência de não alteração entre amostras controle e envelhecidas. Os resultados de todas as amostras encontram-se descritos na tabela 7.

**Tabela 7** - Medidas de pH dos adesivos.

ADESIVO	FITAS INDICADORAS DE pH	
	CONTROLE	ENVELHECIDO
Acetato de polivinila	5	5
Álcool polivinílico	6	6
Epóxi	6	5 (puro)/6 (com PVAc)
Etil cianoacrilato	5	5
Paraloid B72	6	6
pH da água = 5		
ADESIVO	pHMETRO	
	CONTROLE	ENVELHECIDO
Acetato de polivinila	4,4	5,3
Álcool polivinílico	7,5	7,2
Epóxi	6,7	7,4 (puro)/6,6 (com PVAc)
Etil cianoacrilato	6,9	6,1
Paraloid B72	6,8	6,5
pH da água = 7,6		

Fonte: Valerie Takeda, 2025.

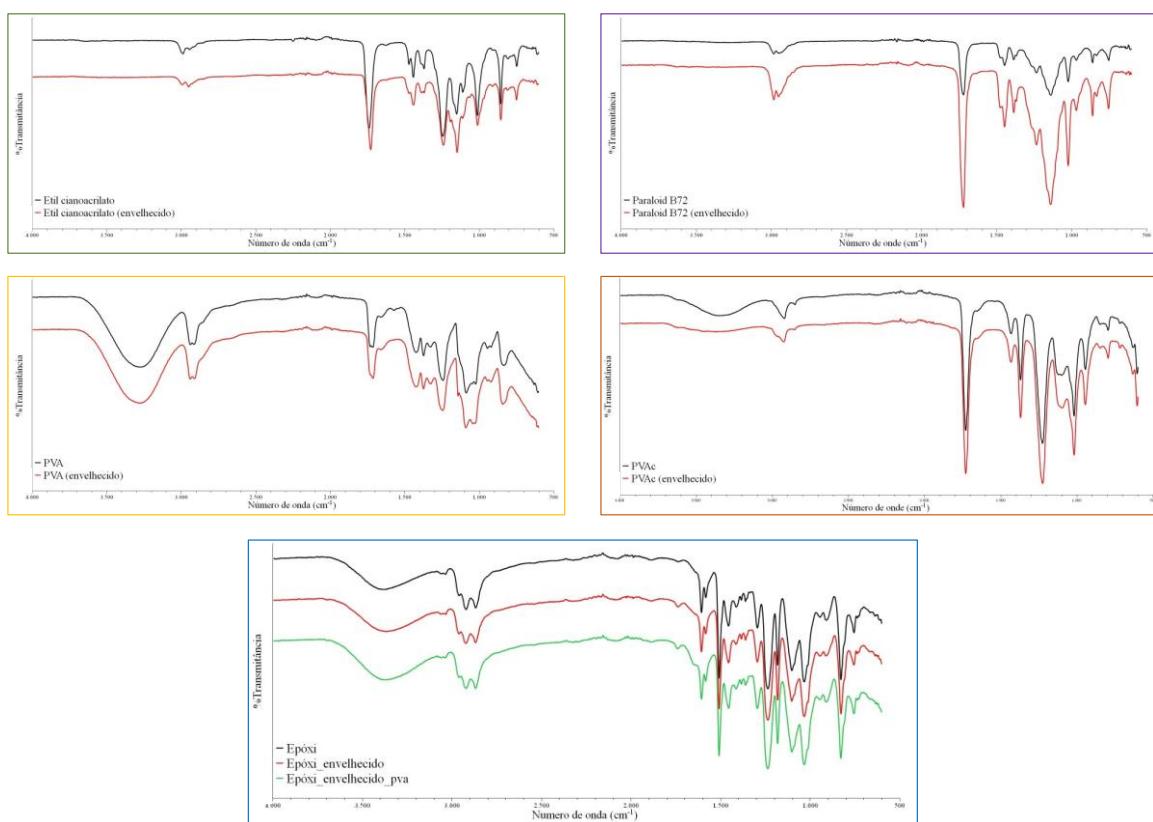
A amostras com PVAc, puro e em contato com epóxi, foram as únicas a apresentarem alteração relevante de pH entre o grupo controle e envelhecido. A instabilidade química desse adesivo é amplamente conhecida na literatura, no entanto, a amostra de resina epóxi em contato com PVA apresentou resultado diferente entre os dois tipos de medição, aumentando no primeiro método e diminuindo no segundo. Entretanto, o fator humano deve ser considerado em relação à medição com fitas indicadoras de pH, visto que a interpretação do resultado depende da análise visual de alteração de cor da fita.

Finalmente, foram realizadas análise de ATR-FTIR para a caracterização química dos plásticos dos corpos de prova e dos adesivos antes e após o envelhecimento acelerado. Os resultados para as amostras dos polímeros utilizados como substrato para os corpos de prova

confirmaram a natureza química dos materiais, atestando a identificação dada pelos fabricantes<sup>7</sup>.

Quanto aos adesivos, não houve alterações drásticas no perfil químico das amostras controle e envelhecidas, demonstrando que os parâmetros altos de UR e temperatura não causaram, no tempo do envelhecimento acelerado empregado neste estudo, grandes mudanças químicas nos materiais. Na figura 32, é possível observar que os espectros de ATR-FTIR para as amostras de adesivos não envelhecidas e envelhecidas apresentaram as mesmas bandas de absorção, sem que, de modo geral, bandas fossem suprimidas ou novas bandas surgissem. Até mesmo a intensidade relativa das bandas de interesse, como em  $\sim 1720\text{ cm}^{-1}$  (grupo funcional carbonila, C=O), que poderia ser um indício de formação de mais grupos oxidados nos adesivos permaneceu inalterada.

**Figura 32** - Espectros de FTIR dos adesivos antes (preto) e após (vermelho) envelhecimento acelerado.

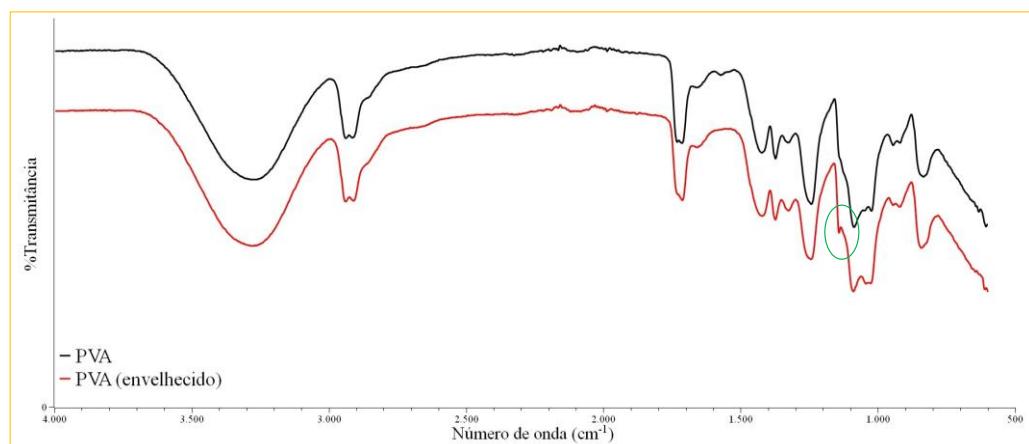


Fonte: Valerie Takeda, 2025.

<sup>7</sup> Resultados das análises no Anexo A (figuras 9 a 14).

O poli(álcool vinílico) apresentou uma nova banda sutil centrada no número de onda de  $1142\text{ cm}^{-1}$ , indicando uma pequena mudança química no adesivo (gráfico 1). Essa alteração pode indicar que o adesivo ficou mais cristalino (Wang et al., 2024), significando que a longo prazo pode ter sua flexibilidade diminuída e ficar mais quebradiço.

**Gráfico 1 – Espectro de FTIR do PVA – Surgimento de uma banda a  $1142\text{ cm}^{-1}$ .**



Fonte: Valerie Takeda, 2025.

#### 5.4. Resistência mecânica à tração de juntas adesivas relativas à consolidação de plásticos

Inicialmente, realizou-se um teste de forças coesivas dos plásticos e da borracha vulcanizada. Isto é, corpos de prova íntegros foram submetidos ao ensaio qualitativo com pesos definidos até que atingissem a falha. Os materiais poliméricos (substratos) exibiram os resultados apresentados na tabela 8, representando os valores máximos desejados para as forças adesivas. Isto pois forças adesivas excessivamente superiores às forças coesivas do substrato em si poderiam gerar tensões internas e levar ao surgimento de novas fraturas vicinais à junta adesiva em plásticos consolidados. Na tabela, os materiais com a marcação “\*\*\*” foram testados até a máxima deformação capaz de suportar pesos, com massa de 14 kg, mas não romperam. Os corpos de prova suportaram, até a ruptura, massas máximas médias que variaram de  $6,5 \pm 2,7$  kg (ou cerca de 65 N de força peso) no caso da melamina (amostra menos espessa) a  $12,4 \pm 2,6$  kg (ou cerca de 124 N) no caso do polietileno. Posteriormente, nos testes de ensaio mecânico de tração para estimativa qualitativa da força adesiva, todos os adesivos se romperam antes de que os valores-limite fossem atingidos.<sup>8</sup>

<sup>8</sup> Tabela com todos os valores do teste de força adesiva presente no Anexo C (Tabela 10).

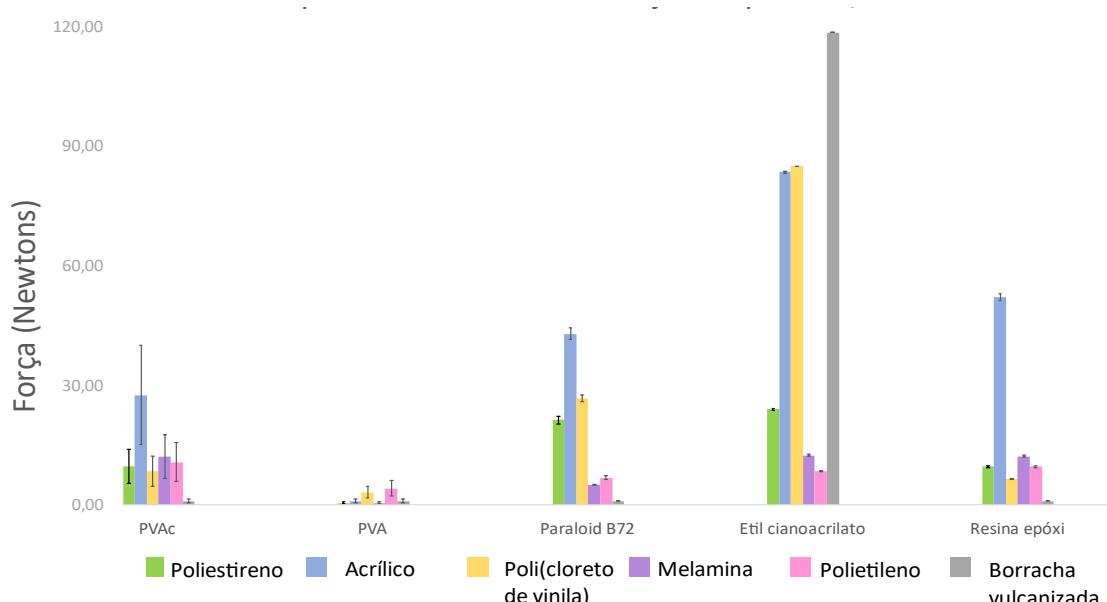
**Tabela 8** - Teste de forças coesivas dos substratos poliméricos.

PLÁSTICO	PESO SUPORTADO (KG)		
	1	2	3
Poliestireno	7,43		
	10,26	9,6 ± 1,9	
	11,01		
Melamina	9,19		
	6,6	6,5 ± 2,7	
	3,81		
Polietileno	9,53		
	14**	12,4 ± 2,6	
	14**		
PVC	14**		
	14**	14**	
	14**		
Acrílico	14**		
	14**	14**	
	14**		

\*\* = deformação do material

Fonte: Valerie Takeda, 2025.

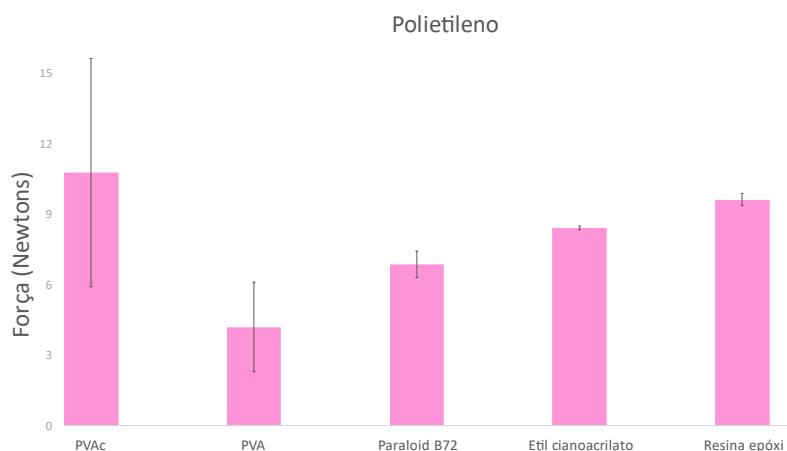
Os resultados dos testes de força de adesão, por sua vez, apresentaram grande variabilidade entre os tipos de adesivo e plásticos. No gráfico 2, é possível observar, de modo geral, essas diferenças.

**Gráfico 2** – Comparativo dos resultados dos testes de forças adesivas.

Fonte: Valerie Takeda, 2025.

Em relação à força, o PVA apresentou os menores resultados gerais, tendo seu maior resultado com o polietileno de alta densidade, resistindo a uma média de cerca de 4 N de força peso (ou 400 g de massa). O PEAD apresentou valores relativamente uniformes em relação à força de adesão, variando entre 7 e 11 N com os demais adesivos (Gráfico 3). As amostras de polietileno, como explicitado no capítulo 4.1. deste trabalho, foram retiradas de um objeto naturalmente envelhecido. As ranhuras e riscos provenientes do uso, podem ter influenciado na interação da superfície com os adesivos.

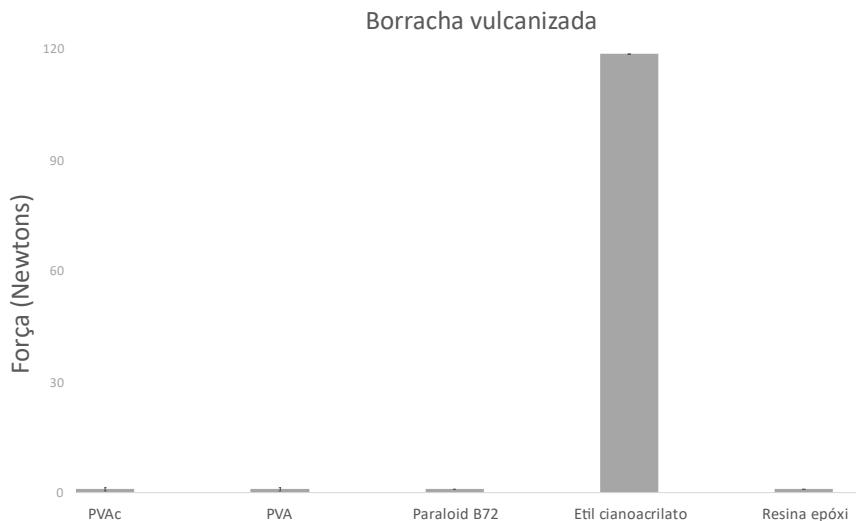
**Gráfico 3 - Gráfico de forças adesivas dos testes com Polietileno.**



Fonte: Valerie Takeda, 2025.

Em contrapartida, o etil cianoacrilato, apresentou os maiores resultados, suportando, com a borracha vulcanizada, mais de 100 N de força peso. O teste com pesos determinados para este material foi encerrado em 11 kg, sem que o adesivo falhasse, devido ao início da falha da borracha. Também foi perceptível que, na junta adesiva, a borracha apresentou rigidez e perda parcial da flexibilidade. Adicionalmente, este material elastômero apresentou baixa compatibilidade com os demais adesivos, com resultados médios de força de adesão de 1 N. A grande discrepância é visível no gráfico 4.

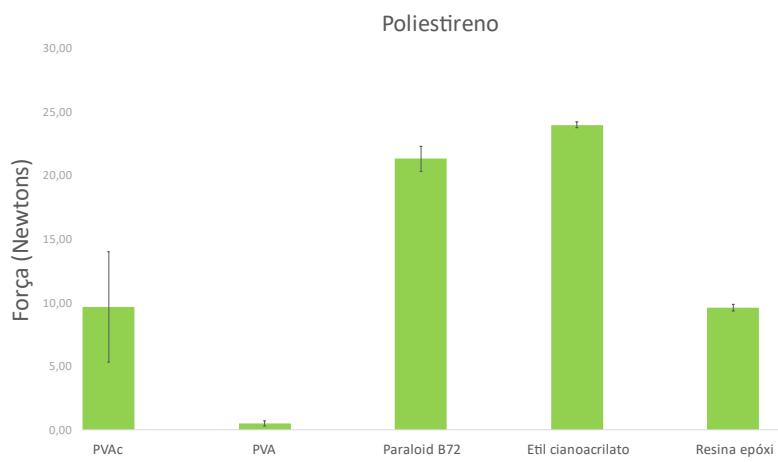
**Gráfico 4 - Gráfico das forças adesivas dos testes com borracha.**



Fonte: Valerie Takeda, 2025.

O poliestireno apresentou maiores resultados de força de adesão com o Paraloid B-72 e com o etil cianoacrilato, suportando 21 e 24 N de peso força, respectivamente, até a ruptura. Com o PVAc e a resina epóxi, o resultado médio caiu aproximadamente pela metade, sendo cerca de 9 N para os dois adesivos (gráfico 5).

**Gráfico 5 - Gráfico de forças adesivas dos testes com poliestireno.**

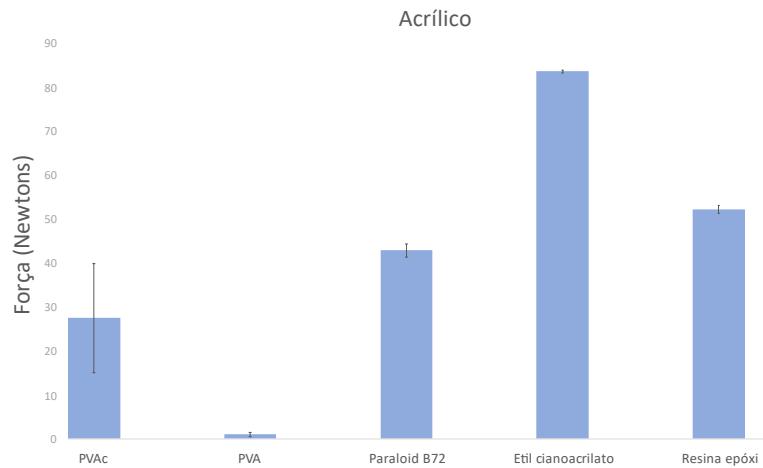


Fonte: Valerie Takeda, 2025.

O acrílico apresentou resultados variados para cada adesivo, tendo maiores resultados de força adesiva com o etil cianoacrilato e a resina epóxi, respectivamente 52 e 84 N de força peso na ruptura. Com o PVAc e o Paraloid B-72, apresentou resultados médios de adesão,

suportando entre 28 e 43 N (gráfico 6).

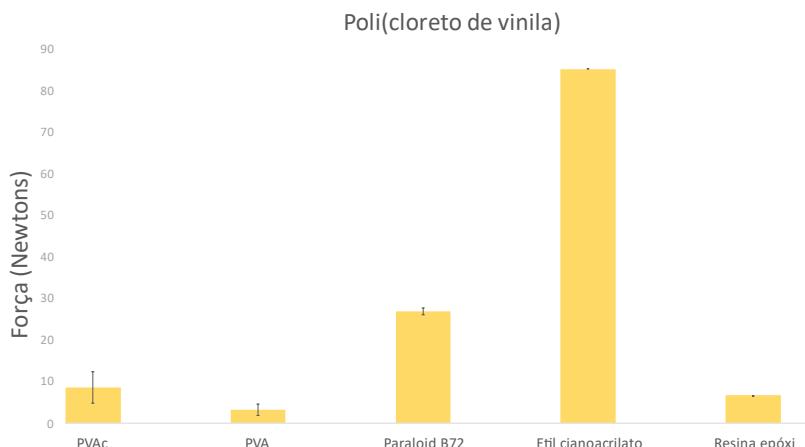
**Gráfico 6 - Gráfico de forças adesivas de testes com acrílico.**



Fonte: Valerie Takeda, 2025.

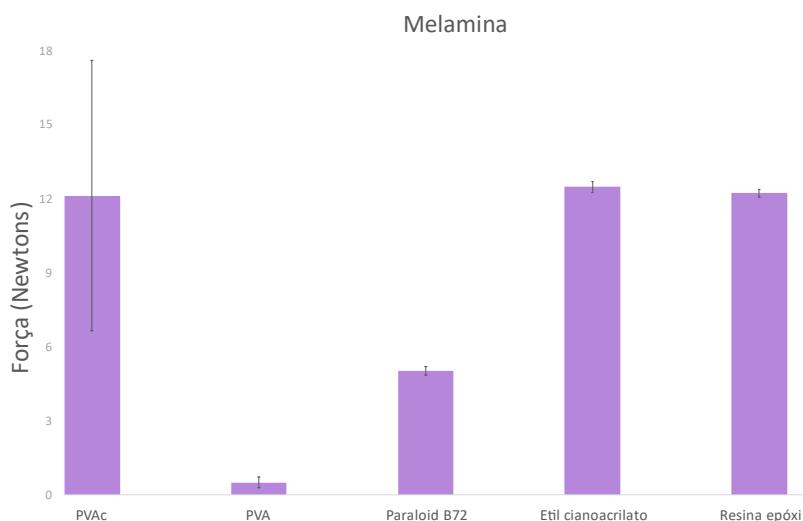
O PVC apresentou resultados médios entre 10 e 20 N, exceto pelo etil cianoacrilato que suportou cerca de 85 N até a ruptura da junta adesiva. Os resultados com o PVA foram, em média, melhores com o PVC e com o PEAD do que com os outros plásticos (gráfico 7).

**Gráfico 7 - Gráfico de forças adesivas de testes com PVC.**



Fonte: Valerie Takeda, 2025.

A melamina formaldeído, suportou, em média, 12 N com o PVAc, etil cianoacrilato e resina epóxi. Com o Paraloid B-72 suportou aproximadamente metade da força, 5 N, e com o PVA 1 N (figura 40).

**Gráfico 8** - Gráfico de forças adesivas de testes com melamina.

Fonte: Valerie Takeda, 2025.

Com os melhores resultados de cada interação adesivo/plástico, foram feitos os testes de força de adesão com juntas de topo (sem sobreposição) em amostras fraturadas, sendo poli(vinil álcool) com PVC e PEAD, Paraloid B-72 com PS, PMMA e PVC, etil cianoacrilato com PS, PMMA, MF e borracha vulcanizada e resina epóxi com MF. Os resultados estão expostos na tabela 9, a seguir:

**Tabela 9** - Força adesiva em fraturas aderidas em junta adesiva de topo (sem sobreposição).

FORÇA ADESIVA EM AMOSTRAS FRATURADAS			
Amostra	Máxima (g)	Ruptura (g)	Força peso na ruptura (N)
PEAD + PVA	103	103	1
PVC + PVA	321	321	3
PVC + Paraloid B72	951	951	10
PS + Paraloid B72	1099	1099	11
PMMA + Paraloid B72	262	262	3
MF + ECA	1002	1002	10
PMMA + ECA	3190	3190	32
PS + ECA	2975	2975	30
Borracha + ECA	+5000	+5000	+50
MF + epóxi	952	952	10

Fonte: Valerie Takeda, 2025.

De modo geral, a força adesiva nas juntas de topo, utilizada para consolidar amostras fraturadas, demonstrou resultados proporcionais, considerando a diminuição da área de contato e quantidade de adesivo. A aplicação de peso na amostra de borracha com etil cianoacrilato foi

encerrada em 5 kg ou 50 N de força peso, pelo início da falha do material elastomérico.

Apesar dos resultados indicarem compatibilidade adesiva entre os adesivos sintéticos e os plásticos, os demais testes indicaram alterações de cor e instabilidade a altas temperaturas muito significativas para aplicação em bens culturais, especialmente no caso dos adesivos com melhores performances nos ensaios mecânicos de tração qualitativos. No entanto, esses resultados indicam, ainda assim, um caminho para a pesquisa de adesivos possivelmente mais estáveis, que tenham a mesma natureza química ou composição similar para aplicação no campo da Conservação-Restauração.

## 6. CONCLUSÃO

Análises acerca das características visuais, de manuseio, aplicabilidade, estabilidade físico-química e compatibilidade de adesivos sintéticos selecionados, foram realizadas com o intuito de aplicação à consolidação de polímeros sintéticos e borracha vulcanizada. Os resultados dos ensaios de ATR-FTIR após envelhecimento hidrotérmico demonstraram que altas temperaturas e UR não causaram alterações químicas significativas que pudessem ser detectadas pela técnica nos adesivos no período analisado, assim como, nos valores de pH. No entanto, a análise de parâmetros colorimétricos evidenciou valores significativos de diferença de cor ( $\Delta E$ ) para a maior parte dos adesivos aplicados em consolidação de bens culturais, exceto pelo poli(vinil álcool) que se mostrou estável em relação a alterações de cor.

Os testes de força de adesão indicaram baixa compatibilidade entre adesivos sintéticos e borracha vulcanizada, mas demonstraram compatibilidade satisfatória entre as amostras de plásticos e adesivos, variando bastante em relação à força suportada até a ruptura, critério utilizado para se analisar qualitativamente a resistência mecânica à tração de juntas adesivas com ou sem sobreposição. Esses valores alcançados podem ser aplicados na escolha de adesivos de acordo com o procedimento a ser realizado, possibilitando a escolha de adesivos hora mais fracos, hora mais fortes. A metodologia adaptada introduzida neste estudo pode ser uma estratégia factível para conservadores-restauradores que queiram avaliar a performance de juntas adesivas e não tenham, à sua disposição, equipamentos de teste universal para a realização de ensaios mecânicos.

As combinações mais eficazes entre plásticos e adesivos, obtidos nas amostras de poli(álcool vinílico) com polietileno de alta densidade e Paraloid® B-72 com poli(1-cloroeteno), poliestireno e poli(metil metacrilato), também pode ser um guia para a pesquisa de adesivos similares quimicamente, mas que apresentem maior estabilidade em relação à cor e resistência à condições severas de temperatura e umidade relativa.

## REFERÊNCIAS

CAMARGOS, Camilla H.M.; POGGI, Giovanna; CHELAZZI, David; BAGLIONI, Piero; REZENDE, Camila A. **Protective Coatings Based on Cellulose Nanofibrils, Cellulose Nanocrystals, and Lignin Nanoparticles for the Conservation of Cellulosic Artifacts.** 2022. Artigo. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acsanm.2c02968>. Acesso em 19 jun. 2025.

CHAMPEAU, Mathilde; PEREIRA, Renata. **Uso do plástico na indústria automotiva.** Palestra proferida na Plásticos Brasil Xperience 2023. São Paulo. Disponível em: <https://app.informamarkets.com.br/event/plastico-brasil-xperience-2025/planning/UGxhbm5pbmdfMTgwODQ3Mg>. Acesso em 33 de maio de 2025.

FIGUEIREDO JUNIOR, João C. D. **Química Aplicada à Conservação e Restauração de Bens Culturais Móveis.** 1. ed. Belo Horizonte: São Jerônimo, 2012.

FRANÇA, C. L. de. CONGRESO IBEROAMERICANO Y VIII JORNADA “TÉCNICAS DE RESTAURACIÓN Y CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO, 1er., 2009, Buenos Aires, Argentina. **Obras de plástico em meu acervo - E agora, o que fazer? [...].** Buenos Aires, Argentina: [s. n.], 2009. 13 p.

GARDISE, P.; RICHARDSON, E. **Conservation Science: Heritage Materials.** The Royal Society of Chemistry, 2 ed, 2022, p. 388-430.

HORIE, Velson. **Materials for conservation: organic consolidants, adhesives and coatings.** Londres: Butterworths, 1987.

LEOTTA, Thea. **Exploring the Efficacy of Adhesives in Plastic Bonding: A Comprehensive Experimental Analysis with Emphasis on PVC-P Conservation.** 2024. Dissertação (Mestrado em Ciências com especialização em Conservação) - Universidade de Gotemburgo, Gotemburgo, 2024.

LIMA, Daniele Rosendo de. **Influência do tipo de ligações cruzadas na biodegradação da borracha natural.** 2023. Tese (Doutorado em Química) – Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

MARIANO, Camilla Vitti. **MATERIAIS PLÁSTICOS NO ACERVO DA PINACOTECA DO ESTADO DE SÃO PAULO: A FONTE DAS NANÁS DE NIKI DE SAINT PHALLE.** 2012. Dissertação (Mestrado em Artes Visuais) - Escola de Belas Artes, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

MELANI, A. H. A.; PEREIRA, T. S. **DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA CNC PARA PRODUÇÃO DE PEÇAS DE MATERIAIS COMPÓSITOS POR ENROLAMENTO FILAMENTAR.** Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos. São Paulo, 2012.

NEWHEY, C.; BOFF, R.; DANIELS, V.; PASCOE, M.; TENNANT, N. **Science for**

**Conservators Volume 3 - Adhesives and Coatings.** 2. ed. London: The Conservation Unit of the Museums & Galleries Commission; Routledge, 1992.

Plastics Europe. **Plastics – the fast facts 2024.** Disponível em: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2024/>. Acesso em: 30 de junho de 2025.

Quem Inventou o Plástico? Qual Jogo motivou sua criação? Produção por William Ismael Schmitz. 1 vídeo (10 min). Publicado no canal Invenções na História no YouTube. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=QGlFO8GVok4&list=PLYqarRbQcoBdBUOA-oeWvdnN646RXhSDW&index=4>. Acesso em: 30 de julho de 2025.

ROSSEL, Deac. **Exploding Teeth, Unbreakable Sheets and Continuous Casting: Nitrocellulose from Gun-cotton to Early Cinema.** 2003. *This Film is Dangerous: A Celebration of Nitrate*, edited by Carol Sobiezek and Roger Smither, 1–20. Brussels: FIAF.

SANFELICE, R. C.; PAVINATTO, A.; CORRÊA, D. S. **NANOTECNOLOGIA APLICADA A POLÍMEROS.** São Paulo: Blucher, 2022.

SIMARRO, Cristina Castro. **An investigation into adhesives to consolidate distemper paintings on canvas.** Ge-conservation, n.18. p.123-135. 2020.

SIMÕES, Diana Bulcão Duarte. **Desafios da Conservação de objetos culturais plásticos em museus.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Conservação e Restauração) - Escola de Belas Artes, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

SHASHOUA, Yvonne. **Conservation of plastics.** 1. ed. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2008.

SHASHOUA, Yvonne. **Conservation Science Heritage Materials;** May, E., Jones, M., Eds.; RSC Publishing: Cambridge, 2006.

SHASHOUA, Yvonne. **Degradation of plasticized PVC Inhibiting the deterioration of plasticized poly(vinyl chloride)-a museum perspective Contents.** Macromolecular Symposia, 2008.

SLAIBI et al. **Materiais Empregados em Conservação-Restauração de Bens Culturais.** 2. ed. Rio de Janeiro: ABRACOR, 2011.

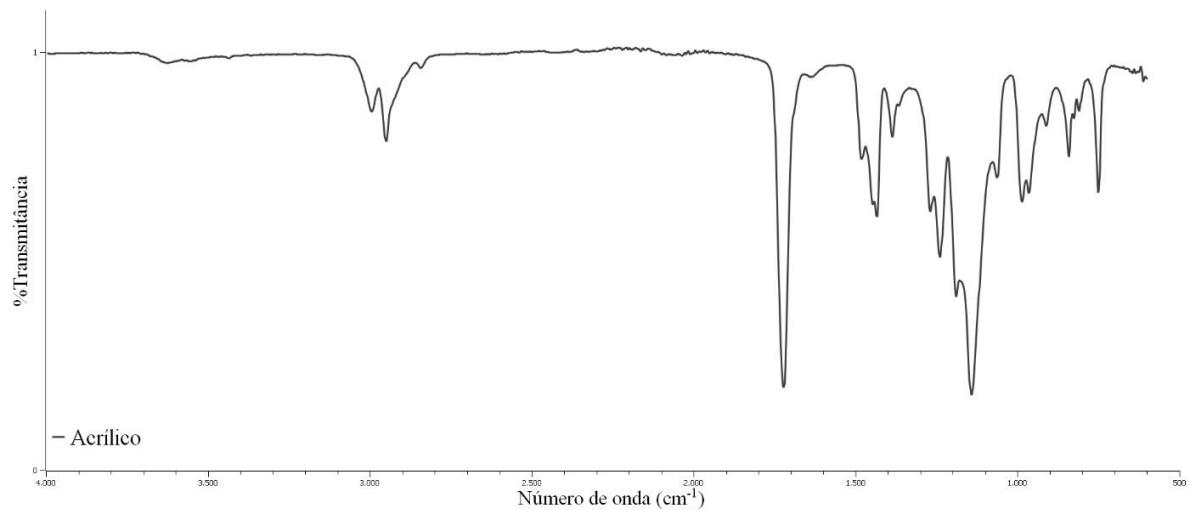
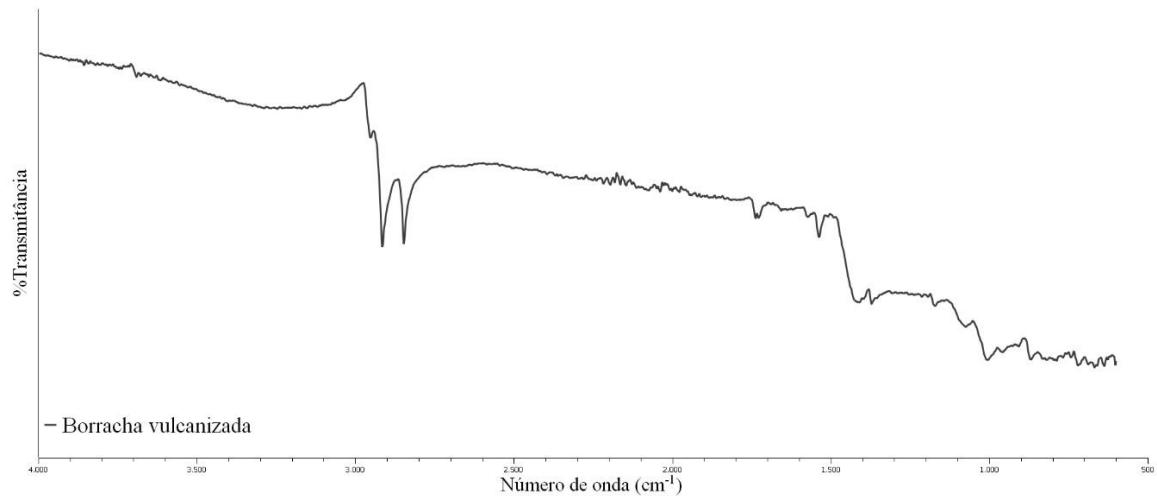
SOARES, E. A. F. **O que são aditivos?** UP – Universo Plástico, São Bernardo do Campo, 10 ago 2020. Polímeros. Disponível em: <https://uniplastico.wordpress.com/2020/08/10/o-que-sao-aditivos/>. Acesso em: 30 de junho de 2025.

SUPERCOLA + bicarbonato: qual o segredo? Produção por Iberê Thenório. São Paulo: Manual do Mundo Comunicação LTDA, 2020. 1 vídeo (11:19 min). Publicado pelo canal Manual do Mundo no YouTube. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=LCoIt-ydIMY>. Acesso em: 20 jan. 2025.

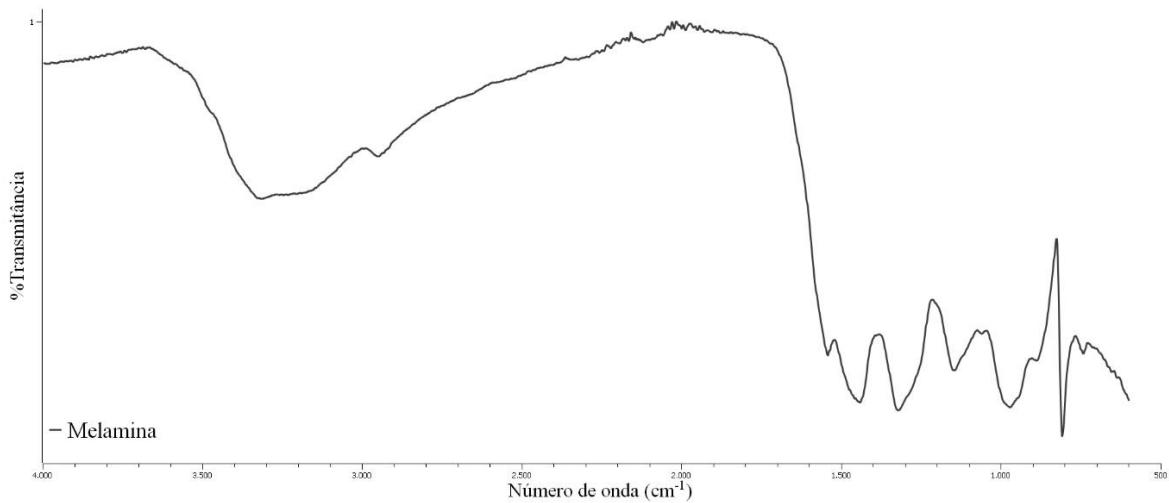
WANG, Chi; TSAI, Cheng-Wei; HASHIMOTO, Takeji; et al. **Poly(vinyl alcohol) fibrils with highly oriented amorphous chains developed in electrospun nanofibers.** *Macromolecules*, v. 57, n. 5, p. 2191–2204, 2024. DOI: 10.1021/acs.macromol.3c02047.

WINTHER et al. **Adhesives for adhering polystyrene plastic and their long-term effect.** *Studies in Conservation*, v. 60, n. 2, p. 107-120, 2013.

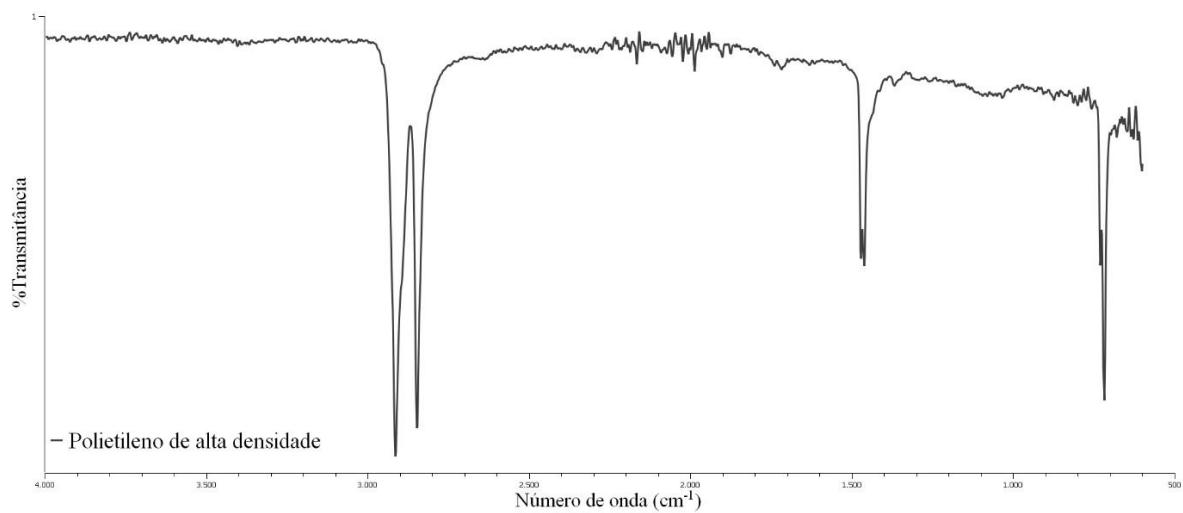
World Economic Forum. **The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics.** 2016. Acesso em: 06 de junho de 2025. Disponível em: <https://www.weforum.org/publications/the-new-plastics-economy-rethinking-the-future-of-plastics/>

**ANEXO A – FTIR substratos poliméricos****Gráfico 9 – Espectro de FTIR Acrílico.****Gráfico 10 – Espectro de FTIR Borracha vulcanizada.**

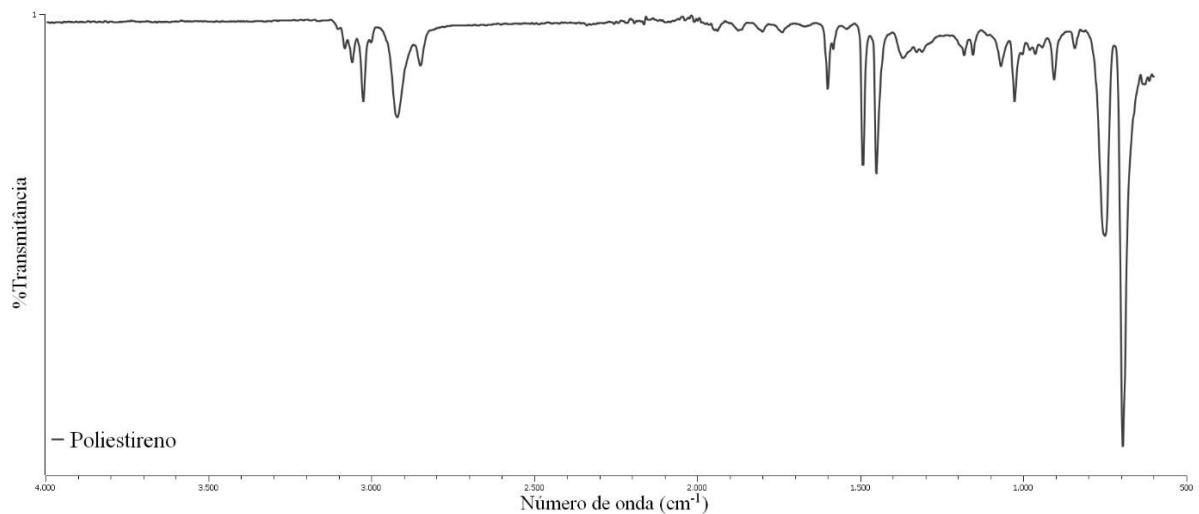
**Gráfico 11 – Espectro de FTIR melamina.**



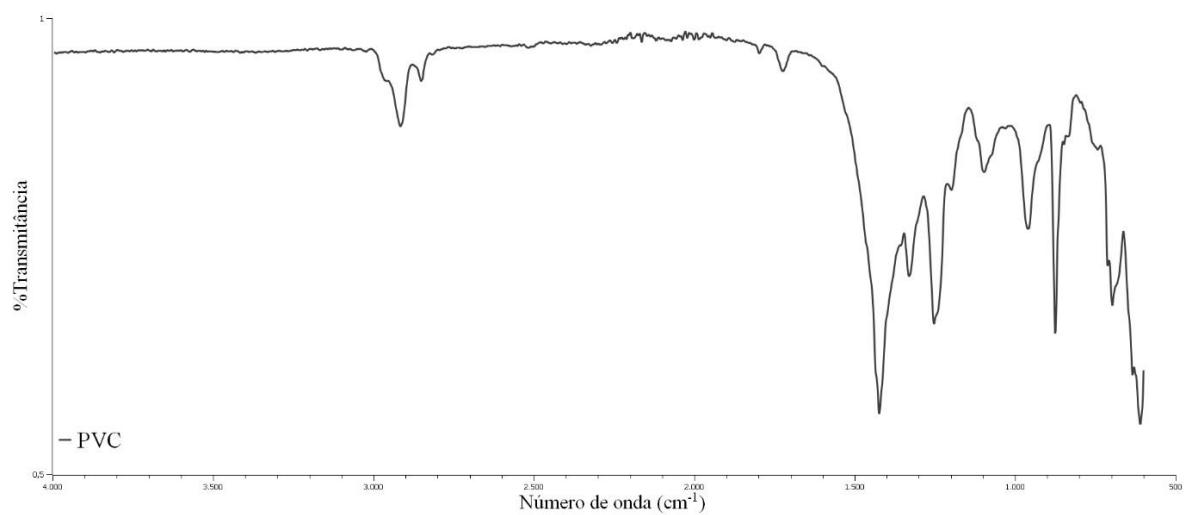
**Gráfico 12 – Espectro de FTIR PEAD.**

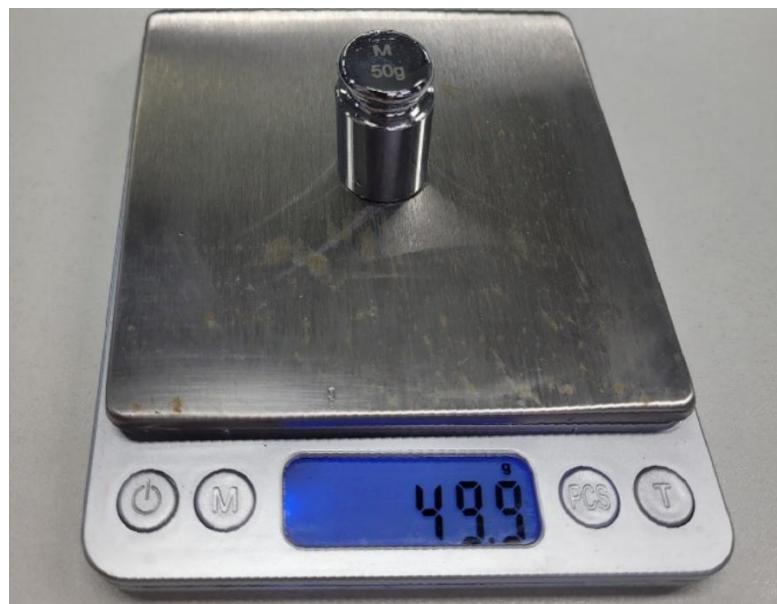


**Gráfico 13 – Espectro de FTIR poliestireno.**



**Gráfico 14 – Espectro de FTIR PVC.**



**ANEXO B – Aferição dos pesos utilizados.****Figura 33 - Aferição do peso de 50 g.**

Fonte: Valerie Takeda, 2025.

**Figura 34 - Aferição do peso de 100 g.**

Fonte: Valerie Takeda, 2025.

**Figura 35** - Pesos utilizados nos testes de força de adesão.



Fonte: Valerie Takeda, 2025.

## ANEXO C - Resultados completos dos testes de força de adesão.

**Tabela 10** – Resultados dos testes de força de adesão com massas determinadas.

TESTE DE FORÇA DE ADESÃO RESULTADOS														
ADESIVO	PLÁSTICO	Nº	MÁXIMA (g)	RUPTURA (g)	ADESIVO	PLÁSTICO	Nº	MÁXIMA (g)	RUPTURA (g)					
PVA	Poliestireno	1	1105	967,7	1387	1141,0	PVOH	Poliestireno	1	50				
		2	890		986				2	50				
		3	908		1050				3	50				
	Acrílico	1	1649	2756,7	1745		Acrílico	1	100					
		2	3272		3371				2	100				
		3	3349		3405				3	100				
	PVC	1	700	850,7	807	957,7	PVC	1	405					
		2	1045		1117				2	238				
		3	807		949				3	310				
	Melamina	1	1606	1211,7	1688	1292,3	Melamina	1	50					
		2	405		501				2	50				
		3	1624		1688				3	50				
Polietileno	Poliestireno	1	1510	1076,7	1606	1184,3	Polietileno	1	615					
		2	615		700				2	501				
		3	1105		1247				3	142				
	Borracha	1	100	100,0	142		Borracha	1	100					
		2	100		142				2	100				
		3	100		142				3	100				
ECA	PLÁSTICO	Nº	MÁXIMA (g)	RUPTURA (g)	ADESIVO	PLÁSTICO	Nº	MÁXIMA (g)	RUPTURA (g)					
	Poliestireno	1	2317	2399,7	2413	2510,7	EPÓXI	Poliestireno	1	748				
		2	2222		2317				2	1247				
		3	2660		2802				3	890				
	Acrílico	1	8069	8365,7	8069		Acrílico	1	5552					
		2	8514		8514				2	4194				
		3	8514		8514				3	5909				
	PVC	1	8514	8514,0	8514		PVC	1	748					
		2	8514		8514				2	615				
		3	8514		8514				3	615				
	Melamina	1	1415	1248,0	1550	1332,7	Melamina	1	1058					
		2	1343		1343				2	1363				
		3	986		1105				3	1249				
PARALOID	Poliestireno	1	890	842,7	1105	1033,3	Polietileno	1	748					
		2	890		1105				2	1249				
		3	748		890				3	890				
	Borracha	1	11864	11864	11864		Borracha	1	100					
		2	11864		11864				2	100				
		3	11864		11864				3	100				
falha do material envergadura do material	PLÁSTICO	Nº	MÁXIMA (g)	RUPTURA (g)	4708,7	2776,0								
	Poliestireno	1	1308	2134,7	1390									
		2	3243		3275									
		3	1853		1912									
	Acrílico	1	5416	4295,7	5488									
		2	2598		3670									
		3	4873		4968									
	PVC	1	2317	2680,3	2413									
		2	3670		3765									
		3	2054		2150									
	Melamina	1	405	503,33	501	583,3								
		2	700		748									
		3	405		501									
	Poliestireno	1	405	686	501	773,7								
		2	310		405									
		3	1343		1415									
	Borracha	1	100	100	142	142,0								
		2	100		142									
		3	100		142									