

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MASSAYUKI MÁRIO HARA

**CARACTERIZAÇÃO DE ADESIVOS PARA MADEIRA PRODUZIDOS PELA
RECICLAGEM DO POLIESTIRENO**

CURITIBA

2024

MASSAUKI MÁRIO HARA

**CARACTERIZAÇÃO DE ADESIVOS PARA MADEIRA PRODUZIDOS PELA
RECICLAGEM DO POLIESTIRENO**

Characterization of adhesives for wood produced by recycling polystyrene

Tese apresentada como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Prof. Adalberto Matoski

CURITIBA

2024



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



MASSAYUKI MARIO HARA

**CARACTERIZAÇÃO DE ADESIVOS PARA MADEIRA PRODUZIDOS PELA RECICLAGEM DO
POLIESTIRENO**

Trabalho de pesquisa de doutorado apresentado como
requisito para obtenção do título de Doutor Em Engenharia
Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Área de concentração: Construção Civil.

Data de aprovação: 15 de Abril de 2024

Dr. Adalberto Matoski, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Amacin Rodrigues Moreira, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Ana Carolina Virmond Portela Giovannetti, Doutorado - Faculdade Estácio de Curitiba

Dra. Barbara Talamini Villas Boas, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Dr. Rodrigo Eduardo Catai, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 16/04/2024.

Dedico este trabalho a Deus, a minha família
e aos amigos, razão da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Adalberto Matoski pelo coleguismo e orientação para a realização deste trabalho.

Aos membros da banca de qualificação e de defesa: Alfredo Iarozinski Neto, Amacin Rodrigues Moreira, Ana Carolina Virmond Portela Giovannetti, Barbara Talamini Villas Boas, Lidiane Fernanda Jochem, Rodrigo Eduardo Catai, Rosilani Trianoski, pela colaboração com este trabalho.

Ao Professor João Elias Abdalla Filho, Coordenador do PPGEC-CT, pela amizade, atitude e compressão.

Aos Professores do Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal da UFPR que compartilharam seus conhecimentos e participaram na minha formação.

Aos Professores do Curso de Pós-graduação e de Graduação em Engenharia Civil, que me auxiliaram na minha formação.

Aos funcionários do Departamento Acadêmico de Construção Civil, DACOC-CT, que me apoiaram nesta jornada, em especial a secretária, Janete Erika Fujihara, pela dedicação e empenho.

Aos meus Pais, Kasuo Hara e Miyouko Hara (in memoriam), que sempre me orientaram e ajudaram na formação acadêmica, ao meu irmão Kazu, cunhada Débora, irmãs e sobrinha, pelo apoio.

E a todos os amigos que de alguma forma contribuíram para a realização desta pesquisa, principalmente a Sra. Luiza Bernardi, pela cobrança para finalizar esta etapa.

Construa uma vida que faça sentido, que tenha propósito, que te preencha. Viva por tudo aquilo que você acredita. Mantenha-se fiel aos seus valores, aos seus princípios. Honre e orgulhe-se das suas raízes. Não espere ninguém vir te salvar. Não terceirize a sua felicidade. Daqui a alguns anos, ninguém se lembrará das suas escolhas, exceto você.
(LUZ; WANDY, 2021).

RESUMO

Atualmente existem dois conceitos que a humanidade se preocupa em aplicar em todas as suas atividades: reciclagem e sustentabilidade. A reciclagem é o processo de reaproveitamento de resíduos sólidos que reduz a quantidade de materiais enviados a aterros sanitários e reduz a necessidade de extração de matéria-prima da natureza. Sustentabilidade é um conceito que está relacionado com a continuidade dos aspectos econômicos, sociais, culturais e ambientais da sociedade humana, preenchendo as suas necessidades e expressando o seu maior potencial no presente e preservando a biodiversidade e os ecossistemas naturais. Aliando os conceitos de reciclagem e sustentabilidade, o objetivo deste trabalho é obter um adesivo preparado através da dissolução de EPS (pós-consumo) em diferentes solventes como, por exemplo, acetato de etila, acetona, diluente para poliuretano, thinner e d-limoneno (solvente ecológico). No ensaio de solubilidade, estes solventes foram utilizados nas concentrações de 10%, 20%, 30% e 40% e foram anotados os tempos para a dissolução completa. O adesivo preparado para o ensaio de cisalhamento na linha da cola foi de 40% de concentração de EPS. Para os adesivos de EPS foram produzidos 12 corpos de prova para cada quantidade de adesivo: 100, 200, 300 e 400 g/m². Também se utilizou os adesivos comerciais como epoxy, PUR, PVA e Titebond III, na gramatura recomendada pelo fabricante. Após a preparação dos corpos de prova e ensaios de cisalhamento na linha de cola, os resultados foram tabulados e aplicou-se o teste estatístico ANOVA e o teste de Tukey. O melhor resultado foi obtido com o diluente acetato de etila, com a gramatura de 200 g/m², alcançando o valor médio de 4,45 MPa. Comparando a média do resultado do acetato de etila e dos adesivos comerciais, não houve diferença significativa e a maior média foi do adesivo comercial Titebond III, com média de 5,57 MPa. Conclui-se que o adesivo de EPS com diluente de acetato de etila pode substituir os adesivos comerciais para a colagem de madeira.

Palavras-chave: adesivo; resíduos; poliestireno; EPS; reciclagem; adesivo verde.

ABSTRACT

Currently, there are two concepts that humanity is concerned with applying in all its activities: recycling and sustainability. Recycling is the process of reusing solid waste that reduces the amount of materials sent to landfills and reduces the need to extract raw materials from nature. Sustainability is a concept that is related to the continuity of the economic, social, cultural and environmental aspects of human society, meeting its needs and expressing its greatest potential in the present and preserving biodiversity and natural ecosystems. Combining the concepts of recycling and sustainability, the objective of this work is to obtain an adhesive prepared by dissolving EPS (post-consumer) in different solvents such as ethyl acetate, acetone, polyurethane diluent, thinner and D-limonene (ecological solvent). In the solubility test, these solvents were used at concentrations of 10%, 20%, 30% and 40% and the times for complete dissolution were noted. The adhesive prepared for the shear test on the glue line was 40% EPS concentration. For the EPS adhesives, 12 test specimens were produced for each quantity of adhesive: 100, 200, 300 and 400 g/m². Commercial adhesives such as epoxy, PUR, PVA and Titebond III were also used, in the grammage recommended by the manufacturer. After preparing the test specimens and shear tests on the glue line, the results were tabulated and the ANOVA statistical test and Tukey's test were applied. The best result was obtained with the ethyl acetate diluent, with a grammage of 200 g/m², reaching an average value of 4.45 MPa. Comparing the average result of ethyl acetate and commercial adhesives, there was no significant difference and the highest average was for the commercial adhesive Titebond III, with an average of 5.57 MPa. It is concluded that EPS adhesive with ethyl acetate diluent can replace commercial adhesives for wood bonding.

Keywords: adhesive; waste; polystyrene; EPS; recycling; green sticker.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Consumo aparente nacional (CAN) do EPS.....	19
Figura 2 - Poliestireno expandido.....	21
Figura 3 - Reciclagem do poliestireno expandido no Brasil.....	21
Figura 4 - Componentes da celulose.....	26
Figura 5 - Comportamento do adesivo.....	30
Figura 6 - Tempo necessário para dissolver EPS na temperatura ambiente.....	39
Figura 7 - Variação do tempo de dissolução na adição de etanol no solvente d-limoneno.....	39
Figura 8 - Variação da viscosidade na adição de etanol no solvente d-limoneno.....	40
Figura 9 - Esquema de reciclagem do EPS.....	41
Figura 10 - Comparação do processo produção de poliestireno.....	42
Figura 11 - Sistema de reciclagem de EPS.....	43
Figura 12 - Estrutura química de monoterpenos cíclicos /testados.....	47
Figura 13 - Processo de secagem e dissolução de resíduos. a) EPS em processo de dissolução; b) Formação de bolhas após a secagem dos resíduos.....	49
Figura 14 - Amostras de resíduos EPS obtidas com diferentes composições de solventes. a) 100AC0AE; b) 80AC20AE; c) 50AC50AE; d)20AC80AE; e) 0AC100AE.....	50
Figura 15 - Peças de isopor, embalagem de equipamentos, descartada como lixo.....	53
Figura 16 - Pérola de EPS.....	54
Figura 17 - Solventes utilizados como diluentes.....	55
Figura 18 - Adesivos industriais utilizados.....	55
Figura 19 - Esquema de corte para a obtenção dos corpos de provas.....	56
Figura 20 - Dimensão do corpo de prova (mm).....	57
Figura 21 - Aplicação de adesivo nas faces das ripas.....	58
Figura 22 - Prensa hidráulica de 30 toneladas.....	58
Figura 23 - Máquina universal de ensaio, modelo DL 10.000, marca EMIC.....	59
Figura 24 - Ferramenta de ensaio de cisalhamento paralelo às fibras na madeira.....	59
Figura 25 - Reômetro programável Brookfield DVIII.....	60
Figura 26 - Microscópio eletrônico de varredura (MEV).....	60
Figura 27 - Ação da acetona (60%) no EPS.....	64
Figura 28 - Ação do thinner sobre o EPS.....	64
Figura 29 - Superfície do EPS após a ação do solvente thinner.....	65
Figura 30 - Foto dos corpos de provas preparados para o ensaio de cisalhamento.....	66
Figura 31 - Imagens do MEV na linha de cola epoxy.....	68
Figura 32 - Imagens do MEV na linha de cola pva.....	68
Figura 33 - Imagens do MEV na linha de cola pur.....	69
Figura 34 - Imagens do MEV na linha de cola titebond III.....	69
Figura 35 - Imagens do MEV na linha de cola EPS + acetato de etila.....	70
Figura 36 - Imagens do MEV na linha de cola de EPS + thinner.....	70
Figura 37 - Imagens do MEV na linha de cola de EPS + d-limoneno.....	71

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Componentes da madeira.....	25
Quadro 2 - Componentes da madeira – comparação.....	26
Quadro 3 – Linha do tempo sobre os adesivos.....	28
Quadro 4 - Teoria da adesão dos adesivos.....	34
Quadro 5 – Energias de interações de Lifshitz-van der Waals e ligações químicas.....	36
Quadro 6 - Ponto de fulgor dos solventes	38
Quadro 7 - Propriedades de agentes na redução do EPS	38
Quadro 8 - Composição do solvente, com a mistura de acetona e acetato de etila	49
Quadro 9 - Solventes utilizados e códigos dos adesivos obtido	51
Quadro 10 - Tipo de adesivo industrial, gramatura, tempo de montagem e prensagem	56
Quadro 11 - Densidade aparente da madeira de Pinus sp	62
Quadro 12 - Tempo de dissolução de EPS.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise da produção de EPS	42
Tabela 2 - Componentes dos óleos foliares de <i>Abies sachalinensis</i> e <i>Eucalyptus</i>	43
Tabela 3 - Solubilidade de PS em vários monoterpenos a 50°C	44
Tabela 4 - Solubilidade de PS em vários terpenoides contendo oxigênio a 50°C	44
Tabela 5 - Solubilidade de PS em óleos essenciais e terpenos bicíclicos a 50°C	44
Tabela 6 - Parâmetro de solubilidade de alguns terpenos calculado pelo método de Hoftyzer e Krevelen.....	45
Tabela 7 - Tempo de dissolução e ativação aparente de (Ea) para a dissolução de PS nos terpenos.....	46
Tabela 8 - Solubilidade do poliestireno (PS) em monoterpenos cíclicos a 50°C	48
Tabela 9 - valores de solubilidade, viscosidade e teor de umidade dos adesivos derivados de EPS	51
Tabela 10 - Propriedades mecânicas de diferentes adesivos derivados do EPS, comparado com fevicol.	52
Tabela 11 - Umidade de equilíbrio da madeira de Pinus sp utilizado nos ensaios	62
Tabela 12 - Viscosidade do PVA, comparado com adesivos de EPS	65
Tabela 13 - Resultados do cisalhamento na linha de cola.....	67
Tabela 14 - Aplicação de ANOVA e teste de Tukey nos ensaios de cisalhamento na linha da cola, adesivo de EPS + acetato em quatro gramatura	72
Tabela 15 - Tensão de cisalhamento média (MPa) para quatro gramaturas de adesivo EPS + acetato de etila	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CAN	Consumo aparente nacional
CTC	Tetracloroeto de carbono
d.m.s.	Diferença mínima significativa
Ea	Energia de ativação
EPS	Poliestireno expandido
EU	Umidade de equilíbrio
EUA	Estados Unidos da América
MEK	Metiletilcetona
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
MMT	Milhões de toneladas métricas
MPa	Mega Pascal
n-BA	n-butil acetato
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
°C	Grau centigrado
pH	Potencial de hidrogênio
PS	Poliestireno
PVA	Acetato de polivinila
QMR	Quadrado médio do resíduo
THF	Tetrahidrofurano

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	17
1.2	Justificativa.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	18
2.1	Poliestireno expandido (EPS).....	18
2.2	Madeira.....	24
2.2.1	Características químicas da madeira	24
2.2.2	Celulose	25
2.2.3	Hemicelulose	26
2.2.4	Lignina.....	27
2.2.5	Gênero pinus.....	27
2.3	Adesivos: definições e características.....	28
2.3.1	História dos adesivos Erro! Indicador não definido.	
2.3.2	Definição de adesivos	29
2.3.3	Funções dos adesivos.....	33
2.3.4	Classificação de adesivos	33
2.3.5	Teorias da adesão dos adesivos	34
<u>2.3.5.1</u>	<u>Teoria mecânica</u>	<u>34</u>
<u>2.3.5.2</u>	<u>Teoria eletrostática</u>	<u>34</u>
<u>2.3.5.3</u>	<u>Teoria da difusão.....</u>	<u>35</u>
<u>2.3.5.4</u>	<u>Teoria de umedecimento.....</u>	<u>35</u>
<u>2.3.5.5</u>	<u>Ligação química</u>	<u>35</u>
2.3.6	Fatores que influenciam na colagem de madeiras	36
<u>2.3.6.1</u>	<u>Adesivo.....</u>	<u>36</u>
<u>2.3.6.2</u>	<u>Madeira.</u>	<u>36</u>
2.4	Reciclagem de poliestireno (PS) e poliestireno expandido (EPS) ...	37
2.4.1	D-limoneno	37
2.4.2	Terpenos	42
2.4.3	Monoterpenos cíclicos.....	46
2.4.4	Solventes derivado de petróleo	48
2.5	Trabalhos de reciclagem de EPS	50
3	METODOLOGIA	53

3.1	Madeira.....	53
3.2	Poliestireno expandido (EPS).....	53
3.3	Adesivo de EPS	54
3.3.1	Delineamento da pesquisa	55
3.4	Ensaio de cisalhamento da linha de cola	56
3.4.1	O ensaio de cisalhamento da linha de cola foi baseado na norma ASTM D 3110 e NBR 7190/1997.....	56
3.5	Ensaio de viscosidade	60
3.6	Imagem da superfície das amostras.....	60
3.7	Tratamento estatístico	61
4	RESULTADOS.....	62
4.1	Características da madeira utilizada no ensaio	62
4.2	Adesivo de EPS	63
4.2.1	Viscosidade dos adesivos	65
4.3	Cisalhamento na linha de cola	65
4.3.1	Resultados do cisalhamento na linha da cola	66
4.3.2	Análise das imagens do MEV na linha de cola.....	67
4.3.3	ANOVA e teste de Tukey no adesivo EPS + acetato de etila.....	71
4.3.4	ANOVA e teste de Tukey nos adesivos comerciais e EPS + acetato de etila	73
5	CONCLUSÕES	76
	REFERÊNCIAS.....	77

1 INTRODUÇÃO

A humanidade precisa aplicar os conceitos de reciclagem e sustentabilidade em todas as suas atividades, pois os recursos são finitos e a não aplicação destes conceitos poderá selar o seu próprio destino.

A reciclagem é o processo de reaproveitamento de resíduos que reduz a quantidades de materiais enviados a aterros sanitários e reduz a necessidade de extração de matéria prima da natureza.

Sustentabilidade é um conceito que está relacionado com a continuidade dos aspectos econômicos, sociais, culturais e ambientais da sociedade humana, preenchendo as suas necessidades e expressando o seu maior potencial no presente e preservando a biodiversidade e os ecossistemas naturais.

O isopor, poliestireno expandido (EPS), muito utilizado em embalagem de produtos industrializados devido ao seu baixo custo é usada em larga escala e produz um grande volume de resíduos.

O isopor, poliestireno expandido, é um plástico celular e rígido. Por sua vez, o poliestireno é derivado de petróleo que na fabricação usa-se gás para a expansão, formando aglomerado de grânulos, mantendo as suas propriedades químicas inalteradas.

Este material é utilizado principalmente em embalagens de produtos industrializados e não há um planejamento para o descarte destas embalagens.

A reciclagem deste material é dificultada devido à falta de informação, baixo valor e custo de transporte e armazenagem altos devido à baixa densidade do material.

São muitas as cidades do mundo que proibiram embalagens, pratos e copos de isopor, material que é tão atraente para os negócios quanto tóxico ao meio ambiente. Há uma estimativa de que apenas nos Estados Unidos 25 bilhões de copos de café de isopor são jogados no lixo em um ano – para efeito de comparação, 100 bilhões de sacolas plásticas são descartadas anualmente. Em 2006, por exemplo, 135 toneladas de produtos de isopor foram despejadas em lixões em Hong Kong – menos de 5% de todo o lixo plástico descartado no país. Mas mesmo o isopor representando uma parcela pequena do lixo, ambientalistas afirmam que o problema ganha outras dimensões quando ele chega no mar, conforme Colton *et al.* (2020).

A espuma de plástico (poliestireno) é um dos plásticos mais utilizados em todo o mundo. A maioria dos consumidores utilizam produtos de poliestireno todos os dias. O poliestireno é um produto sintético, moldável e de baixo custo, cujo polímero é usado para criar e vários outros produtos de consumo. O poliestireno também pode ser convertido em poliestireno expandido (EPS) - comumente conhecido como Styrofoam® o mesmo que Isopor® que, além de barato, é leve e um bom isolante. Como tal, é frequentemente usado para recipientes de alimentos e bebidas, embalagens e materiais de transporte.

Legisladores e grupos ambientais têm visado o EPS por causa de seus impactos ambientais, pois o EPS não se decompõe em nenhuma taxa significativa. O material leve geralmente sai das latas de lixo ou aterros sanitários e áreas circundantes e vai para o mar. Quando o EPS atinge o oceano pode contribuir para a poluição e com a degradação do habitat da fauna marinha. De acordo com Leblanc (2018), o tempo de decomposição desse tipo de material quando depositado na natureza pode ser de até 800 anos em certas condições.

De acordo com Kelly (2018), a indústria de poliestireno possui uma taxa de reciclagem de cerca 12 por cento e isso inclui sobras de fabricação de EPS, que são imediatamente reutilizadas. O fato é que muitas vezes é mais fácil e barato produzir novo poliestireno do que coletar, transportar e processar o material para reciclagem. Existem muitos métodos sendo testados para reciclagem térmica. Mas sua viabilidade em termos de custo e logística de transporte ainda é um problema.

Nos últimos anos, a gestão sustentável e a necessidade de reciclagem do EPS tornou-se o foco de pesquisas em vários países do mundo. Esse aspecto inclui, entre muitas outras coisas, o desenvolvimento de processos e produtos ecológicos. Contreras e Katherine (2015) citam em sua pesquisa que existem países que modificaram sua legislação para oferecer soluções para o problema de reciclagem do EPS. A presente pesquisa foi realizada na mesma linha, ou seja, para preparar um material adesivo ecologicamente correto e econômico a partir do poliestireno expandido (EPS).

A reciclagem de resíduos de EPS, além de reduzir a poluição ambiental causada por seu descarte, pode oferecer produtos de valor agregado para várias aplicações possíveis e por isso justifica-se o objetivo dessa pesquisa que é desenvolver um adesivo ecologicamente correto a partir de resíduos de EPS. Ainda, Segundo Amianti e Botaro *apud* Ohama (2008), as inovações tecnológicas na

indústria da construção civil têm estão incluindo as pesquisas e desenvolvimento de materiais multifuncionais o que inclui a reciclagem do EPS. Ressalta-se, ainda, que existem estudos e estão disponíveis no desenvolvimento de um material adesivo (cola) a partir de resíduos de EPS para diversas aplicações. No entanto, a análise quantitativa e detalhes de caracterização dos adesivos derivados de EPS são pouco divulgados na literatura.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é obter adesivo para madeira e caracterizá-lo através da reciclagem de poliestireno expandido (EPS) pós-consumo.

Os objetivos específicos são:

- a) Obter o adesivo para madeiras, utilizando vários diluentes;
- b) Identificar os diluentes mais adequados na produção do adesivo para madeiras;
- c) Avaliar a gramatura do adesivo ideal para colar madeiras;
- d) Comparar a eficiência do adesivo desenvolvido a partir de EPS com adesivos comerciais utilizados em madeiras.

1.2 Justificativa

A humanidade tem compromisso muito grande com as gerações futuras de manter o mundo em condições habitáveis, este compromisso instiga a busca de novas alternativas de desenvolvimento e a palavra-chave é sustentabilidade.

Para uma gestão sustentável, os resíduos de material EPS podem ser reciclados para produzir produtos químicos e combustíveis com valor agregado (KUMAR e SINGH, 2010). Narendra *et al.* (2014) estudaram a preparação de material adesivo a partir de resíduos de EPS utilizando vários solventes como gasolina, acetona, tolueno e suas misturas. O estudo revelou que o material adesivo elaborado com gasolina e tolueno oferece melhores propriedades de adesão do que os demais solventes. Kaushal *et al.* (2018) investigaram as aplicações de material adesivo preparado a partir de EPS com gasolina entre outros solventes. O estudo concluiu que o material adesivo desenvolvido pode ser útil na área de construção para ligar diversos materiais como tijolos e mármores. Observa-se assim a viabilidade desse produto para a aplicação na construção civil, produzido com as diversas misturas.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

O poliestireno é resultado da ligação entre os monômeros de estireno e tem uma densidade de 1050 kg/m³. É atacada por muitos solventes orgânicos, os quais dissolvem o polímero. Um dos problemas do isopor é sua composição: 95% de ar e 5% de plástico e eventuais adições. Por isso, quando é derretido, o volume final do poliestireno cai para 10% daquilo que foi coletado. Devido a esses fatores, muitas empresas de reciclagem evitam lidar com esse tipo de material. Além de ocupar grande volume, o que torna seu transporte mais caro e, por consequência, encarece o processo de reciclagem, é necessário um volume muito elevado para que o processo seja economicamente viável. Quando descartado como resíduo comum, pode levar séculos para se decompor. Se incinerado, libera uma quantidade significativa de dióxido de carbono, contribuindo para a poluição e o aquecimento global (TESSARI, 2006).

2.1 Poliestireno expandido (EPS)

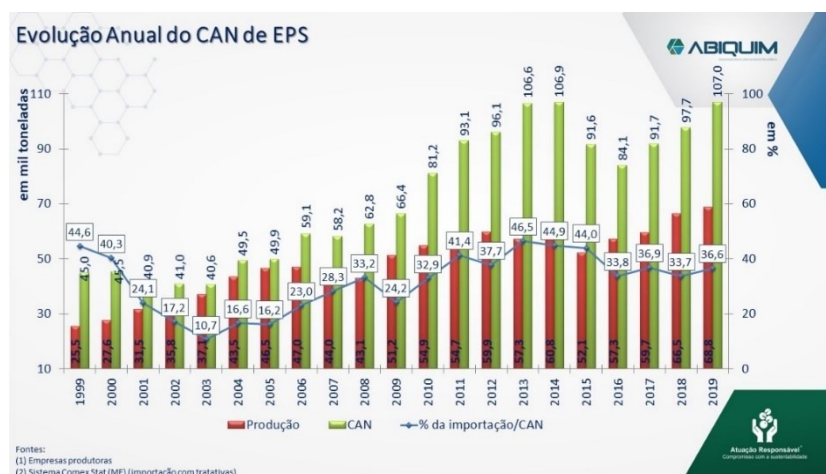
Devido às propriedades de leveza, rigidez e conformabilidade, o EPS tem uma ampla gama de aplicações, como na fabricação de bandejas, pratos, tigelas, caixas, isolamento e materiais de embalagem. A produção mundial de EPS é de cerca de 15 milhões de toneladas métricas (MMT) por ano e a maior parte acaba em um aterro sanitário. Como resultado de sua ampla utilização e baixa taxa de reciclagem, o EPS é visto como um dos principais resíduos pós-consumo (PRABHAKAR *et al.*, 2016). Em outro artigo, esse mesmo autor, mas com outros pesquisadores, afirma que apesar de o plástico ser parte integrante da atividade cotidiana da vida humana com muitas desvantagens do plástico, mas que podem ser reduzidas considerando: a) a maneira mais eficaz de reduzir e mitigar os efeitos nocivos dos detritos marinhos é, em primeiro lugar, evitar que eles entrem no ambiente marinho; b) a reciclagem é uma das práticas mais identificadas e disponíveis para reduzir o impacto dos resíduos em aterros e no meio ambiente por meio do reaproveitamento de materiais; c) a conversão de detritos marinhos em adesivo é uma técnica econômica, ecológica e eficiente.

Com cerca de 95% de ar, o EPS é um excelente isolante. Por isso é usado em refrigeradores de cerveja e isolantes domésticos, e por que o café quente em

uma xícara de poliestireno não queima seus dedos. É ideal para criar fluidez em coletes salva-vidas e jangadas. Sua leveza e maleabilidade o tornam um bom material de embalagem, adicionando amortecimento, mas pouco peso. Além disso, o EPS não reage com outros materiais e é resistente ao calor, por isso encontrou amplo uso na indústria de alimentos em itens como bandejas de carnes e aves e as caixas em que os hambúrgueres de *fast-food* são servidos. No entanto, algumas das mesmas qualidades que tornam o poliestireno útil também podem funcionar contra ele quando se trata de reciclagem. Por ser volumoso, é difícil e caro de coletar e transportar. Existem programas municipais de reciclagem que não aceitam esse tipo de resíduo.

De acordo com Asanuma (2000), no Japão, 86,4% dos 11 milhões de toneladas de plásticos consumidos foram descartados. Ou seja, cerca de 9,5 milhões de toneladas de lixo, criando um enorme passivo ambiental. O crescimento deste mercado é atribuído ao crescimento contínuo na indústria da construção, por ser a maior consumidora de EPS em comparação com as indústrias de embalagens e similares. A produção e consumo de EPS no Brasil pode ser observado pelo gráfico da figura 1.

Figura 1 - Consumo aparente nacional (CAN) do EPS



Fonte: ABIQUIM (2021)

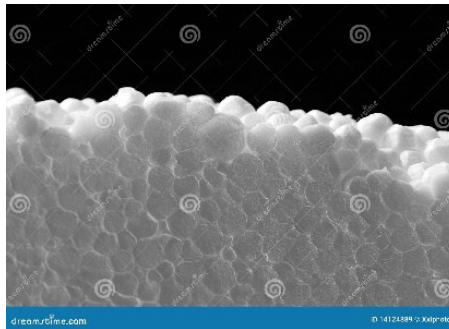
Cabe observar que em algumas economias importantes, como nos EUA, os itens de EPS foram proibidos. Os copos de isopor (EPS) não podem ser reciclados porque já estão expandidos e, para produzi-los, são necessários grânulos de poliestireno virgem. Como os materiais de EPS não são biodegradáveis, alguns consumidores não preferem xícaras de café de EPS de uso único (use e jogue). Os itens proibidos incluem itens de serviço único de espuma de poliestireno, incluindo

xícaras, tigelas, pratos, recipientes para levar, bandejas, embalagens de poliestireno de preenchimento solto, comumente conhecidas como amendoins de embalagem. No entanto, há poucas exceções, como recipientes de EPS usados para alimentos pré-embalados que são cheios e lacrados antes do recebimento pelo estabelecimento de serviço de alimentação; loja de alimentos móvel; e recipientes usados para armazenar carne crua, porco, peixe, frutos do mar ou aves vendidas em uma caixa de açougue ou aparelho similar de varejo ainda estão em uso apesar da dificuldade de reciclar.

O problema da falta de reciclagem é que existe a incineração de resíduos plásticos em lixões e isto é uma importante fonte de poluição do ar. Na maioria das vezes, os resíduos sólidos contendo plásticos são queimados, liberando gases tóxicos como dioxinas, furanos, mercúrio e policlorados que poluem o ar. Além disso, a queima de cloreto de polivinila, eventualmente do EPS libera halogênios perigosos. O poliestireno, por exemplo, é prejudicial ao Sistema Nervoso Central. Os compostos bromados perigosos agem como cancerígenos e mutagênicos. As dioxinas se depositam nas plantações e em cursos de água, onde eventualmente entram em alimentos e, portanto, no sistema corporal. Por isso a queima de resíduos plásticos pode aumentar o risco de doenças cardíacas e respiratórias (VERMA *et al.*, 2016).

Outro problema de toda a reciclagem de plásticos é a necessidade de se reunir os mesmos tipos de materiais e classificá-los. Alguns outros plásticos - como aquele usado para refrigerantes e garrafas de água, sabão em pó e outros recipientes e sacolas plásticas - são mais fáceis de coletar. O poliestireno apresenta mais problemas. Embora as garrafas de água e refrigerante sejam relativamente limpas quando descartadas, o poliestireno usado para alimentos costuma ser misturado com papel, restos de comida e outros tipos de plástico, como o canudo jogado fora com um copo de EPS.

O poliestireno geralmente não pode ser reciclado localmente, mas deve ser transportado para uma planta centralizada, aumentando os custos para a recicladora e reduzindo o incentivo à reciclagem. Além disso, o poliestireno reciclado não pode, na maioria dos casos, ser usado para produtos que entram em contato com alimentos por questões de saúde, embora o material geralmente seja esterilizado pelo processo de reciclagem. O EPS reciclado pode ser usado para criar embalagens ou outros materiais, como o exemplo da figura 2.

Figura 2 - Poliestireno expandido

Fonte: dreamstime.com/royalty-free-stock-images (2024)

De acordo com a Plastivida®, em 2021 o Brasil reciclou 34,5% do EPS (poliestireno expandido, também conhecido como Isopor®) que consumiu conforme se observa no gráfico da figura 3.

Figura 3 - Reciclagem do poliestireno expandido no Brasil

Fonte: Plastivida® (2021)

Observa-se que há uma tendência do crescimento da reciclagem devido, entre outros aspectos, a atuação da mídia. Conforme citado no blog da Plastivida®, observa-se que o volume reciclado do resíduo não doméstico, ou seja, produzido pelas diversas empresas é muito maior.

Dentre os métodos de reciclagem de poliestireno pode se citar que a forma mais direta de os consumidores reciclarem o poliestireno é reutilizá-lo. Esse método não funciona bem com copos de café e outros utensílios plásticos, mas é ideal para materiais de embalagem.

O poliestireno usado também pode ser reprocessado para uso na criação de outros produtos. Esse aspecto justifica a afirmação de Adhikari (2000), cita que um dos problemas para a preservação do meio ambiente é a gestão dos resíduos de materiais derivados de polímeros como o poliestireno por exemplo, pois, geralmente após o consumo, há a geração de quantidade expressiva desse tipo de resíduo. Um uso interessante de EPS reciclado é um produto que pode gerar compósitos que se assemelham à madeira e pode ser usado em bancos de parques e postes de cercas. O material custa menos do que a madeira de lei e pode ser usado no lugar de madeiras como o mogno e a teca, que são colhidas nas florestas tropicais (KOAY *et al.*, 2018). Esse aspecto é ratificado por Pizzi e Mittal (2018) quando cita em sua pesquisa que a madeira também é um produto reciclável e seus processos fabris geram grandes quantidades de resíduos de madeira provenientes (como resíduos de serrarias), bem como madeira de fontes muito diversas (paletes, tambores de cabos, demolição de construções de madeira, móveis antigos e resíduos urbanos).

A produção de poliestireno requer petróleo, que é um recurso não renovável. Assim, a reciclagem do poliestireno reduz a quantidade de óleo necessária para o processo de fabricação. Isso não é um ganho puro, é claro, porque alguma energia ainda deve ser usada para transportar e reprocessar o material.

O benefício mais visível da reciclagem do poliestireno é a redução do lixo tanto na terra quanto no mar. EPS, que não é afetado por oxigênio, luz solar ou água, permanece indefinidamente (PRABHAKAR *et al.*, 2016).

O poliestireno ocupa espaço em aterros, onde permanecerá por centenas de anos. A indústria argumenta que essa não é uma desvantagem real, porque os aterros sanitários modernos são protegidos contra umidade e luz e não têm o objetivo de estimular a biodegradação. Mesmo a matéria orgânica não se decompõe quando chega a um aterro sanitário (TESSARI, 2006).

O poliestireno também representa uma ameaça à vida marinha. À medida que se desgasta com o tempo, o EPS se desintegra em partículas minúsculas, que parecem comida para peixes e podem ser comidas. A espuma obstrui o sistema digestivo dos animais marinhos, matando-os. Estima-se que o EPS constitui de 60 a 80% do lixo marinho, de acordo com Silva *et al.* (2019).

Existem várias maneiras de reciclar o poliestireno expandido e outros tipos de plásticos. Os benefícios e as dificuldades da reciclagem de poliestireno são um

bom exemplo dos problemas complexos que podem surgir quando procuramos maneiras de conservar recursos e proteger o meio ambiente. As soluções, como no caso da reciclagem do poliestireno, nem sempre são fáceis, mas existem várias opções para reciclar materiais plásticos (LERICI *et al.*, 2013).

A reciclagem física ou tratamento simplificado: o plástico é triturado e então reprocessado e composto para produzir um novo componente. Por exemplo, para a construção civil.

Fusão do material: os resíduos são convertidos em diversas formas com diferentes aplicações do plástico original, em um processo evolutivo “cascata” para outros benefícios. Só pode ser realizado em plástico de polímero único, por exemplo: PE, PP, PS.

A reciclagem química como, por exemplo, a transformação em adesivos, busca a utilização integral dos elementos constituintes do plástico, tanto na produção de combustíveis quanto de outros tipos de insumos. Os métodos podem ser catalíticos ou térmicos, dependendo do tipo de polímero. No caso do poliestireno, de acordo com Gutiérrez *et al.* (2011), foi confirmado experimentalmente que o peso molecular não é a variável mais relevante ao contrário de outras propriedades desse polímero (cristalinidade ou polidispersidade).

Devido ao seu alto valor calorífico, os plásticos podem ser uma fonte de energia conveniente. O tratamento quaternário envolve a incineração para recuperar energia e resulta em uma redução de volume de 90% a 99%, o que reduz o volume que é destinado aos aterros sanitários. No entanto, o controle das emissões de gases pode elevar muito o custo desse tipo de tratamento.

Trabalhos sobre aproveitamento do EPS na construção civil foram feitos por Chandru *et al.* (2017) que mostraram que uma das alternativas para a reciclagem desse produto pode ser feita através da produção de blocos de concreto. Por sua vez, Patle *et al.* (2018) estudaram o efeito da mistura nas propriedades, como tempo de pega inicial, tempo de pega final e resistência à compressão da massa de concreto.

A mistura foi preparada misturando o EPS em um solvente mais fino na proporção de 1:9 em peso. O estudo relatou que os tempos de pega do concreto diminuiriam com o aumento da mistura até cerca de 2% em peso da concentração de mistura. Vários estudos estão disponíveis sobre a conversão de EPS em monômero de estireno ou combustível líquido usando técnicas de degradação térmica e/ou

catalítica (UKEI *et al.*, 2000; VILAS *et al.*, 2004; TAE *et al.*, 2004; XIE *et al.*, 2008; RASUL JAN *et al.*, 2008; PANDA *et al.*, 2012; FILIP *et al.*, 2013).

Dentre as várias formas de reciclar esse material pode-se utilizar a pirólise como, por exemplo, os estudos apresentados por Shah *et al.*, (2014) e Nisar *et al.* (2019).

2.2 Madeira

Historicamente a madeira foi explorada para muitas populações. Por ser fácil utilização possui funções que atendem ao ser humano até os dias de hoje. A madeira tem um expressivo valor econômico e auxilia no desenvolvimento de muitos países, sendo comumente utilizada como material de construção (BODIG, JAYNE, 1993). A madeira está relacionada com a humanidade sendo material fundamental, sobretudo numa época de crise energética e preocupação ambiental, pois é um material que consome menor energia durante todo o processo de beneficiamento.

A madeira por ser de origem natural apresenta características singulares. Trata-se de material de natureza complexa, multicomponente, higroscópico, anisotrópico, heterogêneo, descontínuo, inelástico, fibroso, poroso, biodegradável e renovável. A estrutura fibrosa da madeira é a origem de suas características anisotrópicas, pois a madeira possui para esforços aplicados na direção das fibras, elevada resistência à tração e comportamento pobre para esforços aplicados transversalmente.

As espécies de madeira por apresentarem grande variabilidade na sua estrutura anatômica e nas propriedades físicas e químicas, podem exercer influências positivas e negativas na fabricação de produtos colados de madeira. Conforme citado por Marra (1992), as propriedades da madeira possuem forte influência na formação da ligação adesiva e, geralmente, as madeiras de folhosas apresentam mais dificuldades para colagem do que as de coníferas.

2.2.1 Características químicas da madeira

A composição da madeira é de aproximadamente 50% carbono, 44% oxigênio e 6% de hidrogênio contendo no máximo 0,1% de nitrogênio. O quadro 1 mostra o percentual de cada um dos componentes da madeira em função de seu gênero.

Quadro 1 - Componentes da madeira

Madeira	Carbono %	Hidrogênio %	Oxigênio %
Coníferas	63 – 67	5 - 6	27 - 32
Folhosas	59 – 60	6 - 8	33 - 34

Fonte: Bodig e Jayne (1993)

As paredes celulares possuem substâncias que são consideradas como elementos estruturais que servem como indicadores das propriedades físicas da madeira. Pela complexidade da composição molecular da madeira, a análise pode ser feita através dessas substâncias onde as principais substâncias são:

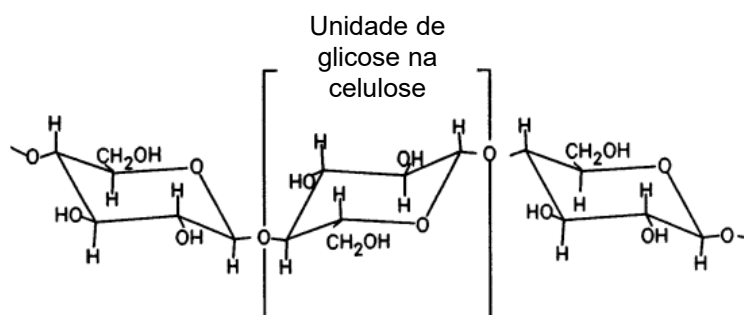
- Celulose
- Hemicelulose
- Lignina
- Extrativos

2.2.2 Celulose

Dentre os componentes da madeira a celulose é o principal que faz parte da parede celular. É uma substância que mantém a mesma estrutura durante os vários processos fabris pelos quais eventualmente possa sofrer.

A celulose é um componente relativamente simples, pois é um polímero linear com unidades de glicose, cujo grau de polimerização da molécula de celulose pode variar chegar a mais de 15.000 unidades (ATALLA, 1992).

A natureza da celulose pode ser caracterizada por sua relação com a água, ou seja: sua estrutura primária é composta por três grupos de hidroxilas e mesmo assim a celulose é insolúvel em água. A figura 4 apresenta um exemplo dessa molécula.

Figura 4 - Componentes da celulose

Fonte: Bodig e Jayne (1993)

Lewngowski *et al.* (2013), apresenta em seu trabalho a cadeia de celulose demonstrando que a mesma possui uma região cristalina e uma região amorfa. Esses autores citaram que sob efeito da temperatura, a cristalinidade da celulose pode ser alterada.

2.2.3 Hemicelulose

Para algumas espécies de madeira a fração da hemicelulose pode chegar a 30% do total sendo composta de polímeros de carboidratos, a xilose e a manose. O conteúdo de hemicelulose varia, dependendo se a madeira é mole ou dura. A hemicelulose está engastada na lignina, enroladas entre si como cordas torcidas. A hemicelulose possui ligações covalentes e pontes de hidrogênio entre seus componentes.

No quadro 2 estão indicadas as principais diferenças entre a celulose e a hemicelulose.

Quadro 2 - Componentes da madeira – comparação

Celulose	Hemicelulose
Constituída por uma única unidade	Constituída por várias unidades
Grau de polimerização elevado	Grau de polimerização baixo
Forma fibras	Não forma fibras
Possui regiões cristalinas e amorfas	Só possui regiões amorfas
É lentamente atacada por ácidos	Sofre ataque rápido por ácidos

Fonte: Bodig e Jayne (2018)

A hemicelulose está mais associada à lignina que à celulose e não possui região cristalina. O estado amorfo da hemicelulose é devido ao fato de não formarem cadeias semelhantes às da celulose. O fato de não formarem cadeias,

possibilita a formação de pontes de hidrogênio o que proporciona alguma resistência ao ataque químico.

2.2.4 Lignina

A Lignina possui estrutura complexa, podendo ser encontradas nas diversas espécies de madeira. Assim como a celulose, a lignina é uma substância abundante. A lignina é um polímero com um arranjo não ordenado constituindo um importante componente da parede celular. A lignina auxilia no aumento da rigidez atuando como agente de ligação entre as células, possibilitando a criação de uma estrutura com excelentes propriedades mecânicas. A lignina é considerada como um produto final do metabolismo da planta, pois ao final do processo de lignificação a célula morre, formando por sua vez um tecido de resistência. Deve-se considerar que a lignina presente nas paredes celulares está sempre associada à hemicelulose através da interação física e química.

2.2.5 Gênero pinus

O *pinus sp* é uma espécie comum no hemisfério norte e mais de um século foi introduzido no Brasil. Existem mais de uma centena de espécies, algumas poucas são plantadas para utilização na indústria, gerando lucro sobretudo nas regiões sul e sudeste do país (EMBRAPA, 2011). O *pinus sp* possui as seguintes características:

- a) A madeira é de cor clara, variando de branca a amarelada;
- b) A espécie é adequada para fabricação de papel de alta resistência;
- c) Existe a possibilidade de extração de resina, aspecto comum na Espanha.
- d) Tem possibilidade de plantio em uma vasta variedade de solos;
- e) Crescimento muito rápido, em algumas regiões tem valor ornamental;
- f) A madeira do *pinus sp* é utilizada, pelas indústrias de madeira serrada e laminada.
- g) A madeira do pinus é versátil, pois além da indústria de papel, serve a indústria moveleira, a indústria de laminados, etc.
- h) Existe uma ampla oferta dessa madeira pois, segundo Embrapa (2011), no sul do país existe uma área aproximada de 1,59 milhão de ha, concentrados, principalmente, nos estados do Paraná e Santa Catarina.

i) É uma das principais espécies/gêneros que fornece matéria prima para a indústria madeireira.

2.3 Adesivos: história, definições e características.

A história dos adesivos iniciou há mais de três bilhões de anos, quando as células primordiais produziram membranas pegajosas para aderir a outras células. Há 200.000 anos, foram encontrados alcatrão de casca de bétula, para colar ponta de pedra nas flechas, 80.000 anos atrás foram encontrados materiais decorativos colados em crânios e 3.500 anos atrás, o homem utilizou sangue e proteína animais para pinturas rupestres. No quadro 3 apresenta-se a linha do tempo sobre os adesivos:

Quadro 3 – Linha do tempo sobre os adesivos

(continua)

Ano	Linha do tempo
8.000 a.C.	Resinas de árvores são usadas para fixar pontas de flecha e ossos
5.000 a.C.	Na Mesopotâmia e Egito, o asfalto é usado como adesivo
3.500 a.C.	No Egito nasceu a profissão de fabricante de cola (Kellopsos)
2.000 a.C.	No oriente, a gelatina é usada para fabrica móveis
1.500 a.C.	O caixão da tumba do rei Tutancâmon utilizou-se cola de madeira
1.000 a.C.	A China utilizou seiva de madeira e derivados de pele de animais
200 a.C.	Primeiras referências para o preparo de cola animal
1 -500	Romanos e Gregos confecção de adesivo a base de animais, peixes e alcatrão e mel de abelha
1.000	Genghis Khan fabricou arcos de limoeiro laminado e colados
1.300	Astecas usavam as propriedades adesivas do sangue
1.500	Espanhóis trouxeram a borracha da América e adesivos foram utilizados na fabricação de móveis
1.700	Inicia a produção em larga escala de colas por fervura
1.750	A primeira patente de cola de peixe foi emitida na Grã-Bretanha
1830	A borracha natural foi usada como matéria prima para adesivos
1841	A vulcanização da borracha foi descoberta (Goodyear)
1905	A Baekeland criou a primeira resina fenólica - baquelite
1920	Hermann Staudinger descobriu os polímeros que permitiu o desenvolvimento de novos adesivos
1922	A BASF concedeu uma patente para fabricar resinas de ureia-formaldeído
1928	Primeira produção de cloreto de polivinila (PVC) e polimetilmetacrilato (PMMA)
1930	Primeira fabricação de acetato de polivinila (PVAC), poliestireno (PS) e poliacrilonitrila (PAN)

(conclusão)

Ano	Linha do tempo
1931	Primeira produção de ésteres de ácido acrílico, acetato de vinil e policloropreno
1936	Invenção da resina epóxi, cura rápida de ésteres insaturados e estireno de peróxidos
1937	Criação dos poliuretanos (PUR)
1940	Criação de adesivo de metacrilato
1941	Produção em larga escala de resinas de poliéster saturadas e insaturadas
1943	Borracha de silicone resistente ao calor, o primeiro uso de resina fenólica e acetato de polivinila em formulação para ligação metal -madeira
1946	Fabricação industrial de epóxi
1953	Adesivos de cura anaeróbia à base de dimetacrilato (loctite)
1958	Primeiros adesivos de cianoacrilato
1967	Adesivos de poliamida resistentes ao calor, até 300°C
1968	Desenvolvimento dos adesivos de poliuretano de cura por umidade
1970	Desenvolvimento de poliuretano de 1 e 2 componentes e acrilato de cura UV
1980	Desenvolvimento de adesivo hot melt
1984	Desenvolvimento de adesivos anisotrópicos condutores
1988	Desenvolvimento de adesivos especiais de resina epóxi 1-C de cura a quente
1988	Desenvolvimento de adesivos especiais de resina epóxi 1-C de cura a quente
1990	Cianoacrilatos curados pelo efeito da umidade
1993	Adesivos de cura aeróbica
1995	Desenvolvimento de pré-polímeros de poliuretano de reticulação de silano (S-PUR)
2000	Desenvolvimento de sistemas adesivos destacáveis para reparação e reciclagem com base na mudança de temperatura, tensão, tensão e/ou pH

Fonte: Fay (2021)

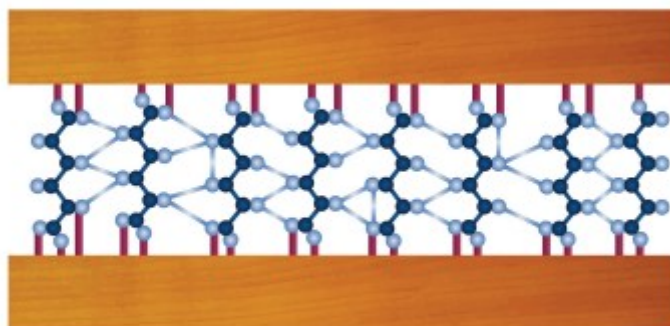
2.3.1 Definição de adesivos

Adesivo é uma substância que é aplicada nas superfícies dos materiais, com a finalidade de unir permanentemente, através de um processo que se chama adesão. Neste processo, há formações de ligações em cada uma das partes dos materiais que se pretende unir, com a aplicação de uma pequena quantidade, em comparação a dimensão do objeto final (HENSLEY, 2000). A importância do adesivo se reflete na sua diversificada aplicação, pois conforme Banerjee *et al.* (2014), o uso de adesivos na pele para cicatrização de feridas está presente desde 1899. Da mesma forma, Everaerts e Clemens (2002) citam que as primeiras referências a materiais adesivos sensíveis à pressão provavelmente datam dos emplastros médicos (ou seja, curativos individuais) inventados nas primeiras décadas de 1800.

O adesivo é uma substância capaz de formar ligações com cada uma das duas partes quando um objeto consiste em duas seções que são ligadas entre si, conforme ASTM D907 (2012). A característica de adesivos é uma quantidade relativamente pequena que são necessárias em comparação com o peso dos objetos finais. Ainda, acordo com Ebnesajjad e Landrock (2009), a função primária dos adesivos é unir peças. Os adesivos atingem esse objetivo transmitindo tensões de um membro para outro de uma maneira que distribui as tensões muito mais uniformemente do que pode ser alcançado com fixadores mecânicos.

Wu (1982) definiu a adesão como o estado em que dois corpos diferentes são mantidos juntos por contato interfacial íntimo, de modo que a força mecânica ou trabalho pode ser transferido pela interface. As forças interfaciais que sustentam as duas fases juntos podem surgir das forças de Van der Waals, ligações químicas ou Atração Eletrostática. De acordo com Feldstein *et. al.* (2015), muitos processos e fenômenos macroscópicos em fases condensadas, na formação de mecanismos de adesão e elasticidade de polímeros, são conduzidos por interações intermoleculares que se estendem além das interações adesivas básicas de pares de grupos funcionais. A resistência mecânica do sistema não é determinada apenas pelas forças interfaciais, mas também pelas propriedades mecânicas da zona interfacial e as duas fases em massa. Existem dois tipos principais de ligação adesiva: estrutural e não estrutural. A ligação adesiva estrutural é uma ligação para aplicações em que os aderentes (os objetos sendo unidos) podem sofrer grandes tensões até seu ponto de rompimento, pois há regiões de adesão e de coesão, conforme figura 5.

Figura 5 - Comportamento do adesivo



Fonte: Ülker (2016)

A colagem estrutural deve ter capacidade de transmitir tensão sem a perda de integridade até o ponto de escoamento do substrato. Os adesivos estruturais devem ter resistência acima de 7 MPa no ensaio de cisalhamento e esta

característica deve durar por toda vida útil da peça. A característica dos adesivos não estruturais é que não suportam cargas substanciais, mas apenas mantém os materiais leves no lugar, também são chamados de adesivos de retenção (EBNESAJJAD, 2008).

As ligações adesivas estruturais devem ser capazes de transmitir estresse sem perda de integridade dentro dos limites do projeto (MITTAL, 2011). Uma ligação estrutural foi definida como tendo uma resistência ao cisalhamento de 0,7 MPa além de resistência significativa ao envelhecimento. Os adesivos não estruturais são utilizados com a finalidade de manter materiais leves em dada posição. Este tipo de adesivo às vezes é chamado de "adesivo de fixação". Fitas sensíveis à pressão e adesivos de embalagem são exemplos de materiais não estruturais adesivos. A distinção entre ligações estruturais e não estruturais nem sempre é clara. Por exemplo, é um adesivo termofusível usado para reter as camadas de um tecido qualquer, pode ser classificado de formas distintas. No entanto, as supercolas (cianoacrilatos) são classificadas como adesivos estruturais, embora tenham pouca resistência a umidade e calor.

Como todo material, os adesivos possuem vantagens e desvantagens:

a) Vantagens de acordo com Petrie (2002):

- Distribuição uniforme de tensão e maior área de suporte de tensão;
- Cola materiais finos ou grossos de qualquer formato;
- Cola materiais semelhantes ou diferentes;
- Minimiza ou evita a corrosão eletroquímica (galvânica) entre diferentes materiais;
- Resiste à fadiga e cargas cíclicas;
- Fornece juntas com contornos suaves;
- Veda as juntas em uma variedade de ambientes;
- Isola contra transferência de calor e condutância elétrica (em alguns casos adesivos são projetados para fornecer tal condutância.);
- O calor necessário para definir a junta é geralmente muito baixo para reduzir a resistência das partes de metal;
- Amortece a vibração e absorve o choque;
- Fornece uma relação força / peso atrativa;
- É uma forma mais rápida e barata do que a fixação mecânica.

b) Desvantagens de acordo com Mittal (2011):

- A ligação não permite o exame visual da área de ligação (a menos que os aderentes sejam transparentes);
- A preparação cuidadosa da superfície é necessária para obter ligações duráveis, muitas vezes com produtos químicos corrosivos;
- Longos tempos de cura podem ser necessários, particularmente onde altas temperaturas de cura não são usados;
- Segurar acessórios, prensas, fornos e autoclaves, geralmente não necessários para outros métodos de fixação, são necessários para a colagem adesiva;
- As temperaturas de serviço superiores são limitadas a aproximadamente 177 °C na maioria dos casos, mas adesivos especiais, geralmente mais caros, estão disponíveis para uso limitado até 371 °C;
- O controle rígido do processo, incluindo ênfase na limpeza, é necessário para a maioria dos adesivos;
- A vida útil da junta adesiva depende do ambiente ao qual está exposto;
- Adesivos de origem natural ou vegetal estão sujeitos ao ataque de bactérias, mofo, roedores ou vermes;
- A exposição a solventes usados na limpeza ou cimentação com solvente pode apresentar problemas de saúde.

Ebnesajjad (2008) cita diversas vantagens significativas no uso do adesivo, tais como:

- A maior vantagem é a distribuição uniforme da tensão em toda região de contato entre os substratos;
- Juntar materiais finos e grossos, semelhantes ou diferentes;
- Minimizar ou prevenir a corrosão eletroquímica;
- Resistente à fadiga e às cargas cíclicas;
- Juntas de vedação em uma variedade de ambientes;
- Amortece e absorve a vibração e o choque;

- A relação da força e peso é atraente;
- Custo baixo comparada com a fixação mecânica.

Há também desvantagens que deverá ser levado em consideração quando se utiliza o adesivo:

- Não permite o exame visual da área de adesão, podendo haver falhas no processo;
- É necessária a preparação cuidadosa da superfície de colagem, para obter uma colagem adequada;
- Necessidade de longo tempo de cura;
- A vida útil da junta adesiva depende de temperatura que estão expostas, e a umidade do ambiente;
- Adesivos naturais ou de origem vegetal estão sujeitas ao ataque de fungos, bactérias e vermes ou roedores;
- A exposição a solventes utilizados na confecção dos elementos e limpeza, que podem prejudicar a saúde (EBNESAJJAD, 2008).

2.3.2 Funções dos adesivos

A principal função dos adesivos é unir as peças, a distribuição de tensões entre os substratos é muito mais uniforme que na fixação mecânica, que criam tensões em torno do fixador mecânico. Na utilização de adesivos, as superfícies são bem acabadas, não são desfiguradas como ocorre com os sistemas de fixação mecânica (EBNESAJJAD, 2008).

2.3.3 Classificação de adesivos

Os adesivos são classificados de diversas maneiras, Ebnesajjad (2008) classificou em dois grupos:

- Naturais: são produtos obtidos da natureza como a caseína, proteínas e borracha natural;
- Sintéticos: são compostos obtidos da manipulação de elementos químicos, que pode ser chamado de compostos industriais, e nesta categoria incluem os acrílicos, epóxis, silicones e outros.

2.3.4 Teorias da adesão dos adesivos

Há várias teorias que são postuladas para descrever o mecanismo de adesão, normalmente não é atribuído a um mecanismo único para a adesão dos materiais. As teorias de adesão são: teoria mecânica, teoria eletrostática, teoria da difusão, teoria de umedecimento, teoria da ligação química e teoria da camada limite fraca (EBNESAJJAD, 2008).

Quadro 4 - Teoria da adesão dos adesivos

Tradicional	Recente	Nível de ação
Intertravamento mecânico	Intertravamento mecânico	Microscópico
Eletrostático	Eletrostático	Macroscópico
Difusão	Difusão	Molecular
Adsorção/ Reação da superfície	Molhabilidade Ligação química Camada limite fraca	Molecular Atômica Molecular

Fonte: Ebnesajjad (2008)

2.3.4.1 Teoria mecânica

A adesão ocorre pela penetração de adesivos em poros, cavidades e irregularidades na superfície do substrato. A resistência da ligação resulta do intertravamento mecânico do adesivo e substrato, frequentemente ocorre em superfícies rugosas e/ou porosas (EBNESAJJAD, 2008). Deve-se considerar ainda que, de acordo com Kowalski e Czech, (2015) os efeitos da energia livre de superfície do substrato e a rugosidade do substrato tem importante efeito no desempenho da aderência. Essa energia livre de superfície pode ser definida como o trabalho necessário para criar uma nova unidade de superfície, enquanto separa duas fases em equilíbrio, em um processo isotérmico reversível. As energias de superfície são tradicionalmente associadas à formação da ligação adesiva. Iwakiri (2005) define a adesão mecânica como a formação de “ganchos” fortemente presos entre os substratos, após a penetração do adesivo nos substratos porosos e sua cura.

2.3.4.2 Teoria eletrostática

Esta teoria propõe que a adesão ocorre devido a formação de duas camadas elétricas que ocorre com a transferência de elétrons entre o adesivo e o substrato. Este mecanismo é mais plausível em ligações de polímero-metal

(FRIHART, 2004). Há que considerar a formação de forças de Wander Waals entre o substrato e o adesivo, que fixam os elementos no fenômeno de adesão.

2.3.4.3 Teoria da difusão

Na teoria da difusão, a adesão se desenvolve por meio da interdifusão de moléculas entre o adesivo e o substrato. Ela é aplicada principalmente quando o adesivo e o aderente são polímeros com moléculas de cadeia relativamente longa. A espessura da camada interfacial difusa tem uma espessura na fixa de 1 a 100 nm. A soldagem a quente, cimentação de termoplásticos ocorre devido à difusão de moléculas (FRIHART, 2004).

2.3.4.4 Teoria de umedecimento

A adesão resulta do contato molecular entre dois materiais e a formação de forças de superfície. O processo de estabelecer contato contínuo entre o adesivo e o aderente é chamando de molhamento, para ocorrer isso, o adesivo deve ter uma tensão superficial menor que a crítica tensão superficial do sólido. O critério para uma boa molhabilidade exige que os adesivos tenham uma tensão superficial menor que o substrato. Normalmente os adesivos orgânicos, como os epóxis, tem excelente adesão a metais, mas têm fraca adesão em substratos poliméricos não tratados como fluoro plásticos, polipropileno e polietileno (EBNESAJJAD, 2008).

2.3.4.5 Ligação química

As ligações químicas atribuem a formação de uma ligação de adesão nas superfícies do substrato e adesivo. As ligações iônicas e covalentes têm interações mais fortes, conforme apresentadas no quadro 5. Normalmente, existem quatro tipos de interações que ocorrem durante as reações químicas:

- Ligações covalentes;
- Ligações de hidrogênio;
- Força de Lifshitz-Van Der Walls;
- Interações ácido-base.

Quadro 5 – Energias de interações de Lifshitz-Van der Waals e ligações químicas

Tipo de Ligação	Exemplo	E (kJ/mol)
Covalente	C - C	350
Íon – íon	Na ⁺ - Cl ⁻	450
Íon – dipolo	Na ⁺ - CF ₃ H	33
Dipolo – dipolo	CF ₃ H - CF ₃ H	2
Dispersão de Londres	CF ₄ - CF ₄	2
Pontes de hidrogênio	H ₂ O - H ₂ O	24

Fonte: Ebnesajjad (2008)

2.3.5 Fatores que influenciam na colagem de madeiras

Há vários fatores que influenciam na colagem de madeira, estes fatores podem ser agrupados em quatro grupos (IWAKIRI, 2005):

- Características físico-químicas do adesivo;
- Composição e características da madeira;
- Procedimentos empregados na colagem;
- Condições de uso do produto colado.

2.3.5.1 Adesivo

A viscosidade do adesivo está relacionada com a fluidez, a baixa fluidez faz que tenha uma maior dificuldade no espalhamento da cola e menor penetração na estrutura capilar da madeira, formando uma linha de cola “faminta”. O tempo de gelatinização é o tempo decorrido entre o preparo do adesivo, até o endurecimento. Normalmente chamam de tempo de “panela” quando o adesivo mantém boa característica de viscosidade e reatividade, que influenciará no período de prensagem. A quantidade de substâncias sólidas presentes nas resinas é importante na ligação entre os substratos. O pH do adesivo podem influenciar na degradação das fibras das madeiras, prejudicando o processo de colagem.

2.3.5.2 Madeira

As ligações adesivas são influenciadas pelas propriedades anatômicas, físicas, químicas e mecânicas. A porosidade é uma propriedade anatômica da madeira, nas madeiras porosas haverá mais penetração de adesivo e resultando numa linha faminta de cola. Com madeira menos porosas, haverá baixa

permeabilidade, criando uma linha de cola mais espessa e menos resistente, pode-se solucionar alterando a viscosidade do adesivo. Outra característica é a umidade, que pode influenciar de forma negativa ou positiva. A umidade vai alterar as dimensões geométricas como encolhimento, inchamento e empenamento. O ideal é a madeira estar no teor de umidade de equilíbrio (EU), em Curitiba, a UE de 16,2%, quando a umidade relativa do ar estiver em 80,2% e temperatura de 16,5 °C.

2.4 Reciclagem de poliestireno (PS) e poliestireno expandido (EPS)

O poliestireno (PS) é um polímero versátil utilizado de forma sólida e expandido que tem sido utilizado para muitas finalidades, principalmente como embalagens. O descarte desses produtos, devido à sua natureza não degradável, cria danos ambientais de grande importância, portanto há atenção dedicada à reciclagem, reutilização e torná-los biodegradáveis por vários meios. A reciclagem do PS pode ser efetuada por processos mecânicos, químicos e métodos térmicos. A reciclagem mecânica é um processo que mantém as propriedades iniciais, sem alterar as características por até nove ciclos (PATEL *et al.*, 2007).

Maharana *et al.* (2007) inventou e registrou uma patente que utiliza o processo mecânico e térmico, comprimido o lixo de EPS e aquecendo com a finalidade de derreter e reduzir o seu volume.

A degradação catalítica do polietileno é um dos processos mais atrativos de reciclagem química. Neste processo, obtém-se o monômero de estireno em baixa temperatura com alta seletividade (KIM, 2003).

O PS reciclado está sendo utilizado para criar um material similar a madeira, com as mesmas características como densidade, aparência, mecânicas e estruturais. Os elementos extrudados são utilizados na produção de móveis, sistemas de janelas, treliças de telhado, pisos, rodapé e outros componentes de construção. O PS expandido pode ser queimado e gerar energia térmica (MAHARA, 2007).

2.4.1 D-limoneno

O maior problema na reciclagem do EPS é o seu volume, dificultando a coleta, armazenamento e transporte do material para as usinas de reciclagem. Noguchi *et al.* (1998) desenvolveram uma técnica que reduz o volume de EPS em

até 5% do volume inicial. A técnica de redução se baseia na utilização de produtos solventes como o acetato de isoamil, butirato de etila, d-limoneno, propionato de benzila, tolueno. No quadro 6 encontra-se o ponto de fulgor de diversos solventes, e o d-limoneno tem o ponto de fulgor mais alto, 47 °C, tornando o produto mais seguro na manipulação.

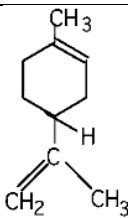
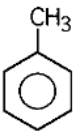
Quadro 6 - Ponto de fulgor dos solventes

Solventes	Ponto de inflamação (°C)	Ponto de ebulição (°C)
Limoneno	47	175
Metil ciclohexano	-3	101
Tolueno	4	110
acetona	-18	56

Fonte: Noguchi *et al.* (1998)

A redução do volume do EPS está na ação de solubilidade dos solventes, e o d-limoneno comparado ao tolueno é bastante próximo (quadro 7).

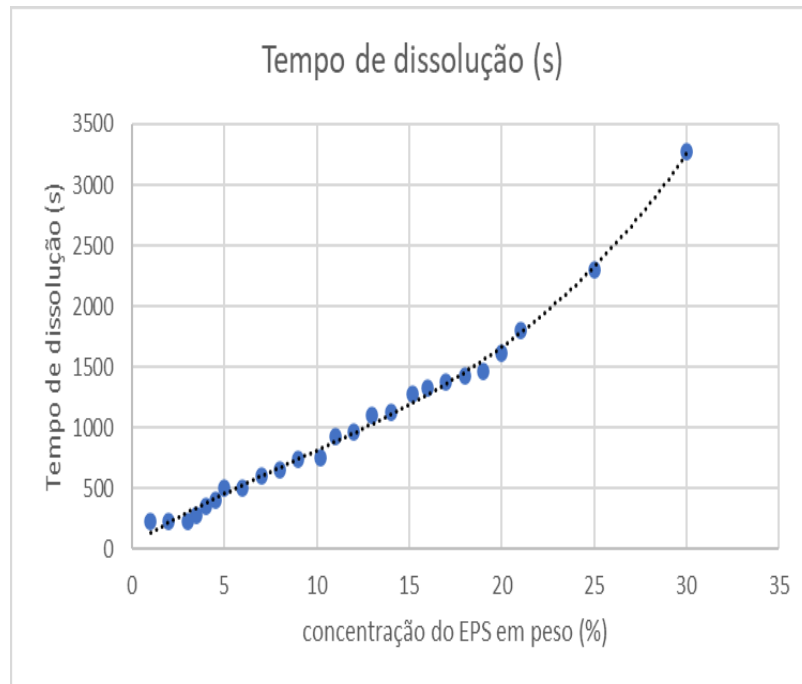
Quadro 7 - Propriedades de agentes na redução do EPS

Produto químico	Estrutura molecular	Solubilidade do EPS (%)
D-limoneno		40
Tolueno		45

Fonte: Noguchi *et al.* (1998)

O tempo de redução do EPS é proporcional à concentração de EPS no solvente. Na figura 6 apresentam-se os valores de concentração e o tempo, por exemplo, na concentração de 20% leva em torno de 26 minutos.

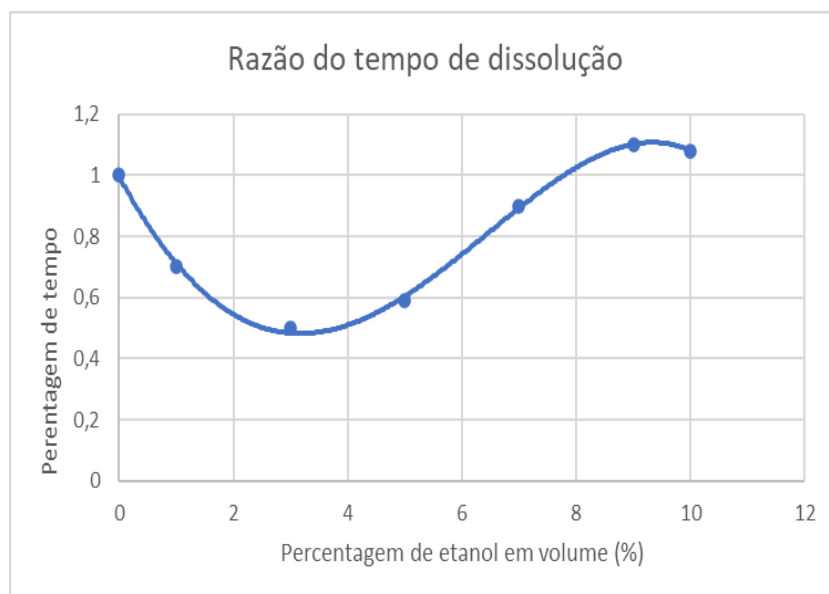
Figura 6 - Tempo necessário para dissolver EPS na temperatura ambiente



Fonte: Adaptado de Noguchi *et al.* (1998)

A adição de etanol no solvente d-limoneno trouxe vantagens em relação a tempo de dissolução, diminuindo em torno de 50% quando a concentração de etanol for em torno de 3% em volume, conforme a figura 7.

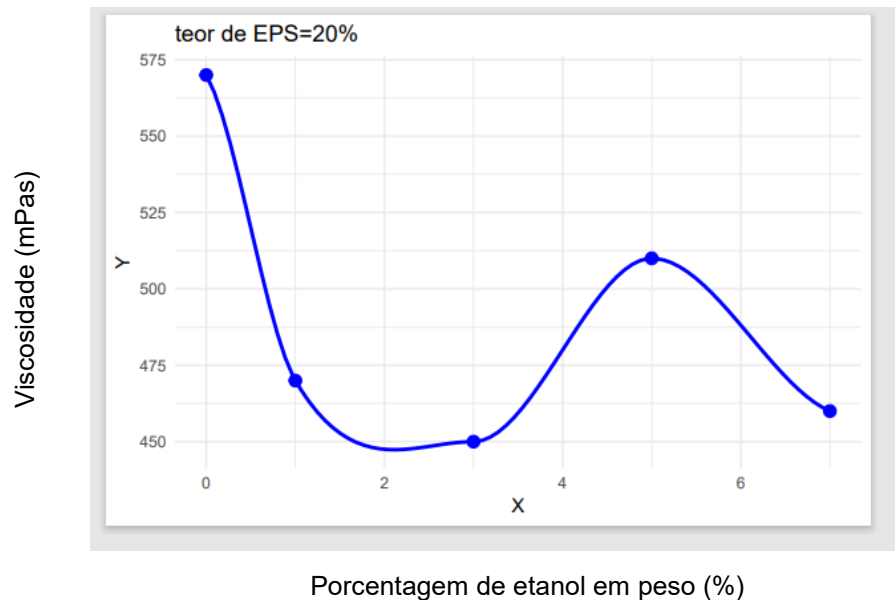
Figura 7 - Variação do tempo de dissolução na adição de etanol no solvente d-limoneno



Fonte: Adaptado de Noguchi *et al.* (1998)

Em relação à viscosidade, houve uma diminuição dos valores até a concentração de 3% em peso. Há um aumento de viscosidade até 5% e depois um decréscimo até a porcentagem de etanol de 7%, como mostra a figura 8.

Figura 8 - Variação da viscosidade na adição de etanol no solvente d-limoneno

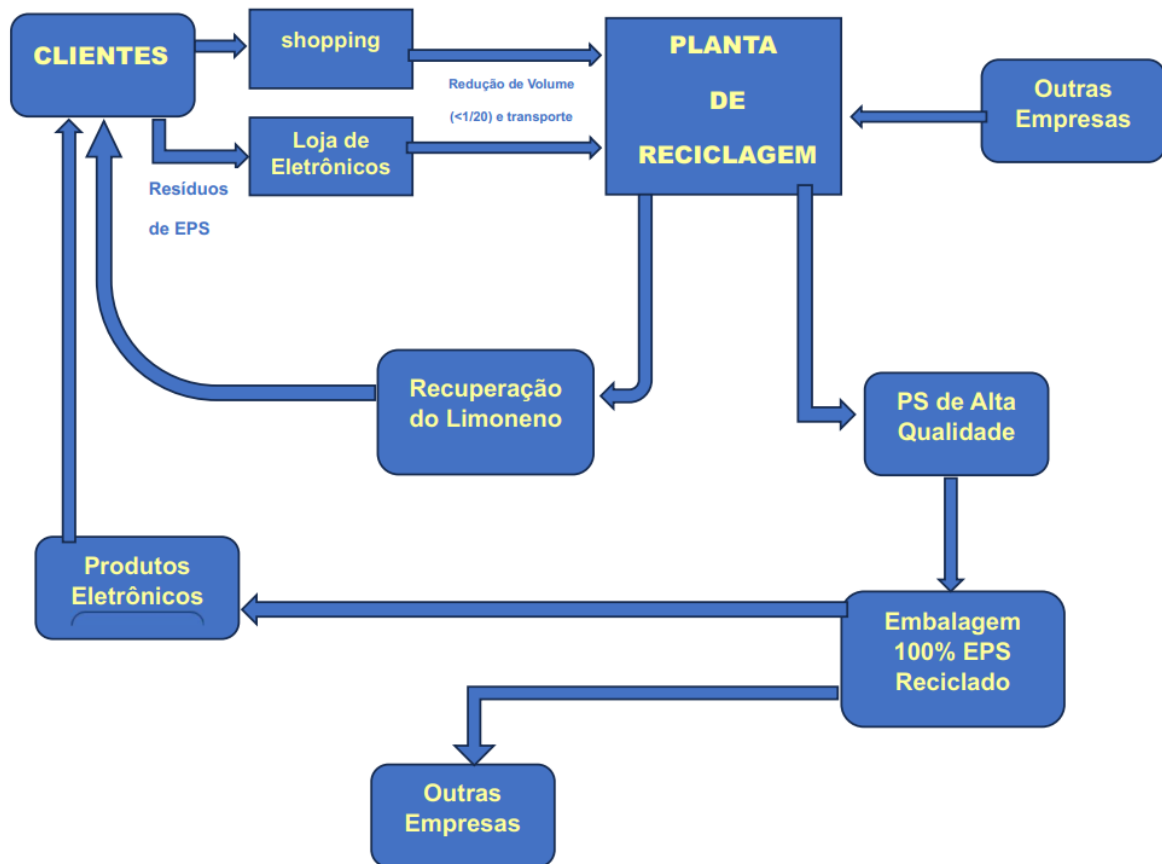


Fonte: Adaptado de Noguchi *et al.* (1998)

O módulo de elasticidade, propriedade mecânica do EPS reciclado, está 10% acima do EPS virgem. Na temperatura de 100 °C há uma transição vítrea que a partir desta temperatura haverá um decréscimo do módulo de elasticidade.

Noguchi *et al.* (1997) propôs a reciclagem do EPS em um circuito fechado onde o produto reciclado será utilizado várias vezes sem perder as características de um EPS virgem.

Figura 9 - Esquema de reciclagem do EPS

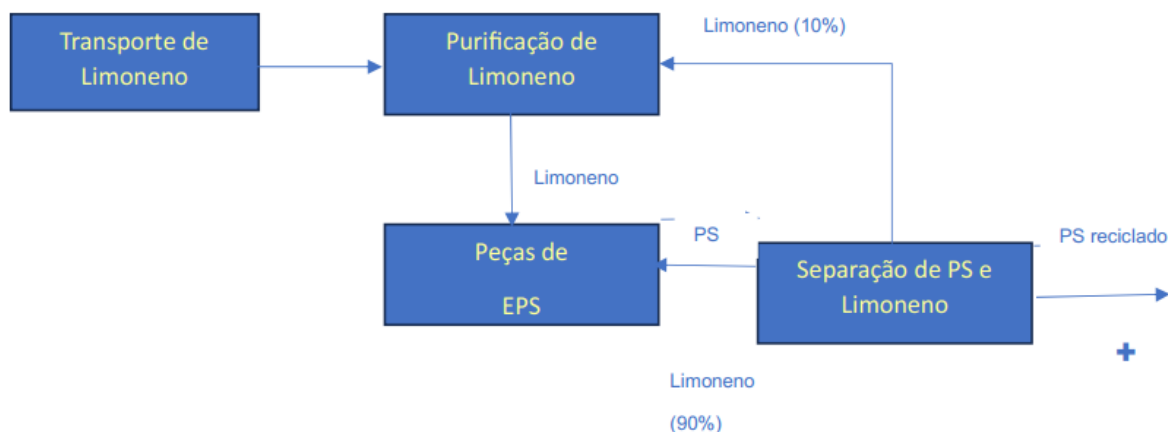


Fonte: Adaptado de Noguchi et al. (1998)

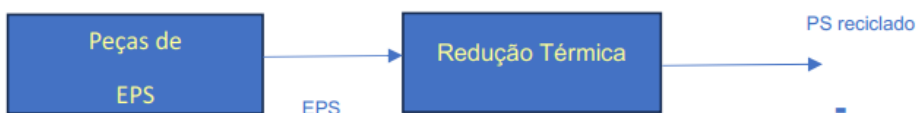
Na comparação dos três processos de obtenção do poliestireno: utilização de material virgem, encolhimento térmico e o método do limoneno; este tem vantagens em relação ao efeito estufa, acidificação e a utilização de energia. Ressalta-se que o processo do limoneno utiliza um solvente ecológico obtido da casca de laranja e são reutilizadas inúmeras vezes. No processo de encolhimento químico e posterior recuperação do solvente, o d-limoneno tem grande vantagem sobre os outros solventes que é o ponto de inflamação (47 °C) e ebulição (175 °C), mais seguro no manuseio do produto químico.

Figura 10 - Comparação do processo produção de poliestireno

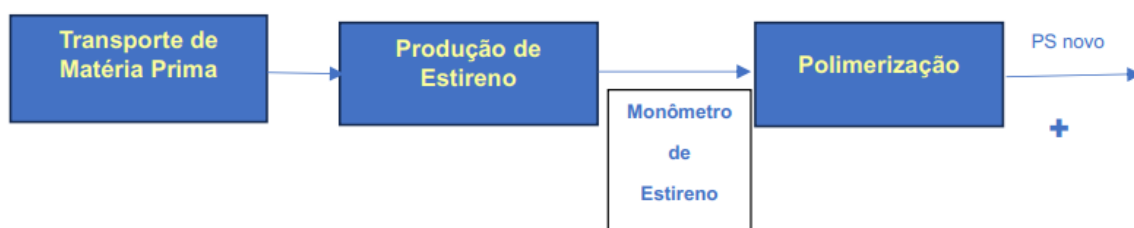
Método Limoneno



Redução Térmica



Produção de PS



Fonte: Adaptado de Noguchi *et al.* (1998)

A reciclagem do poliestireno expandido com d-limoneno comparado com o método de encolhimento pelo calor tem efeito estufa menor (-30%), acidificação (-58%) e consumo de energia menor (-20%), como mostra a tabela 1.

Tabela 1 - Análise da produção de EPS

Método de Produção	Efeito estufa	Acidificação	Consumo de Energia (MJ/kg)	Avaliação do processo
Limoneno	0,79	0,0042	12,8	Alto
Encolhimento pelo calor	1,12	0,01	16,1	Baixa
Com EPS virgem	2,23	0,0056	76,5	Alta

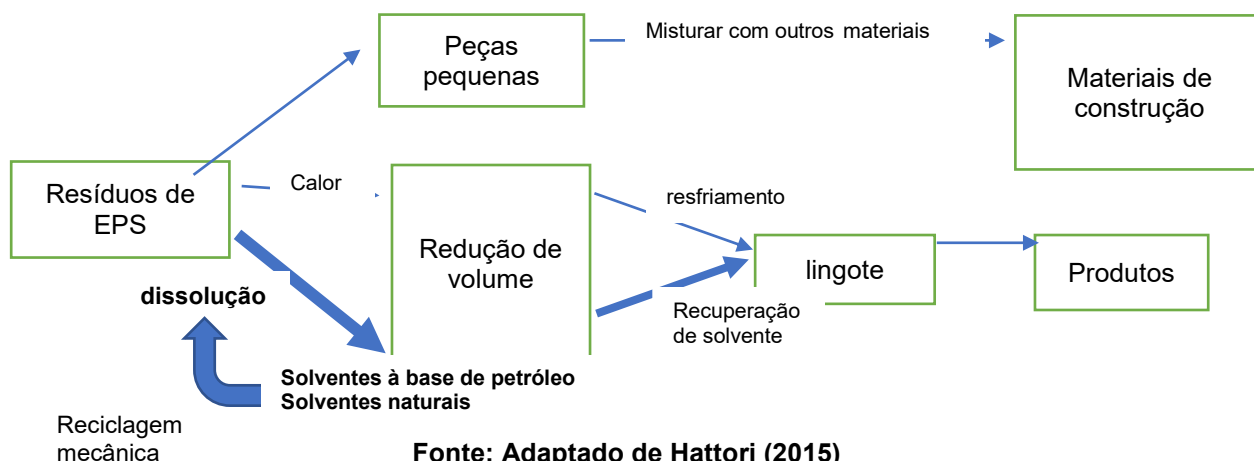
Fonte: Noguchi *et al.* (1998)

2.4.2 Terpenos

Hattori (2015) apresentou trabalho sobre a reciclagem química do EPS, utilizando produtos derivados de folhas de *Eucalyptus* e *Abies sachalinensis*. A

Abies sachalinensis é uma espécie de conífera, da família *Pinaceae*, encontrado na região de Hokkaido, Japão. A reciclagem mecânica é utilizada para a produção de pequenas peças, o processo de fusão é muito simples, mas provoca a degradação química, então o tratamento com solventes é um sistema de reciclagem eficaz e ecológico quando se utiliza solventes naturais (figura 11).

Figura 11 - Sistema de reciclagem de EPS



No processamento das folhas de *Eucalyptus* e *Abies sachalinensis*, obtém-se o óleo que contém diversos monoterpenos e terpenóides, nas folhas de *Abies sachalinensis* estão presentes acetato de bornil (27%), d-Limoneno (22,6%) e β -felandreno (15,6%) e outros componentes em menor porcentagens, em cada 100 ml de óleos das folhas. No óleo das folhas de *Eucalyptus*, há presença significativa de α -Pineno (37,9%) e 1,8-Cineol (29,9%) (tabela 2).

Tabela 2 - Componentes dos óleos foliares de *Abies sachalinensis* e *Eucalyptus*

Terpeno Terpenóide	Porcentagem de produto em 100 ml do óleo (%)	
	<i>Abies sachalinensis</i>	<i>Eucalyptus</i>
Bornyl acetate	27,0	0
d-Limonene	22,6	3,1
β -Phellandrene	15,6	0
α -Pinene	13,3	37,9
β -Pinene	9,7	0,5
Myrcene	1,9	0,4
p-Cymene	0,4	2,9
1,8-Cineole	0	29,9

Fonte: Yatagai e Sato (1986) e Von Rudolf (1975)

Na tabela 3, os resultados de dissolução demonstram que o poder de dissolução dos PS pelos terpenos é muito grande. O autor utilizou o tolueno como solvente referência, solubilizando 117 g para cada 100 g de solvente. O melhor

terpeno é o P-Cimeno que solubilizou 212 g/100 g de solvente, 81% mais solúvel que o tolueno.

Tabela 3 - Solubilidade de PS em vários monoterpenos a 50 °C

Solvente	Solubilidade (g/100 g solvente)
α -Terpinene	130
γ -Terpinene	131
d-Limonene	127
Terpinolene	125
α -Phellandrene	125
β -Phellandrene	122
P-Cymene	212
Toluene (solvente referência)	117

Fonte: Hattori (2008)

A solubilidade de PS em vários terpenoides contendo oxigênio é apresentada na tabela 4. A molécula de PS, apolar, não interage com um solvente polar, Terpinene-4-ol (39 g/100 g de solvente), A-Terpineol (41 g/100 g de solvente) têm uma fração polar tão alta como um grupo hidroxila, portanto tem a solubilidade menor que o α -Terpineno (130 g/100 g de solvente).

Tabela 4 - Solubilidade de PS em vários terpenoides contendo oxigênio a 50 °C

Solvente	Solubilidade (g/100 g solvente)
1,8-Cineole	55
Terpinene-4-ol	39
A-Terpineol	41
2-p-Cymenol	105
Acetato de geranila	174

Fonte: Hattori (2008) e Hattori (2010)

As solubilidades de PS em acetato de bornila (67 g/100 g de solvente), β -Pineno (48 g/100 g de solvente), e α -Pineno (44 g/100 g de solvente) a solubilidade é menos que a metade em limoneno (127 g/100 g de solvente) isto é devido que o acetato de bornila e os pinenos têm uma estrutura bicíclica volumosa que dificultam a penetração no PS (tabela 5).

Tabela 5 - Solubilidade de PS em óleos essenciais e terpenos bicíclicos a 50 °C

Solvente	Solubilidade (g/100 g solvente)
Óleo da folha de <i>Abies</i>	85
Óleo de Eucalyptus	96
Acetato de bornila	67
α -Pinene	44
β -Pinene	48

Fonte: Hattori (2008)

Hoftyzer e Krevelen (1976) desenvolveram a teoria de solubilidade baseado na energia coesiva (forças de dispersão, forças polares e ligações de hidrogênio) e o volume molar da substância (peso molecular e densidade) (tabela 6). A solubilidade dos terpenos não se baseia somente na energia coesiva e o volume molar pode estar em função do efeito esférico da molécula.

Tabela 6 - Parâmetro de solubilidade de alguns terpenos calculado pelo método de Hoftyzer e Krevelen

Terpenos	MW	D (g/cm ³)	δ (MPa ^{1/2})
α -Terpinene	136,24	0,838	14,9
γ-Terpinene	136,24	0,853	15,2
d-Limonene	136,24	0,840	15,2
Terpinolene	136,24	0,863	15,7
α -Phellandrene	136,24	0,846	14,7
β -Phellandrene	136,24	0,850	15,0
p-Cymene	134,22	0,857	14,6
1,8-Cineole	154,25	0,923	15,0
Terpinene-4-ol	154,25	0,927	19,1
α -Terpineol	154,22	0,934	19,2
2-p-Cymenol	150,22	0,976	19,4
Geranyl acetate	196,29	0,909	16,9
Geranyl acetone	194,32	0,873	16,8
Geranyl formate	182,29	0,908	16,9
Citronellyl acetate	198,31	0,890	16,8
Citral	152,24	0,890	17,8
Citronellal	154,25	0,855	17,4
Myrcene	136,24	0,794	15,9
Bornyl acetate	196,29	0,980	15,8
α -Pinene	136,24	0,859	13,6
β -Pinene	136,24	0,874	14,2

Fonte: Hattori (2008)

Na dissolução de PS, há uma relação inversa entre a temperatura e o tempo necessário para, quanto maior a temperatura menor é o tempo para dissolver o PS. O terpeno d-limoneno, na temperatura de 30 °C leva 519 s e, quando se eleva a temperatura para 70 °C, o tempo cai para 200 s (tabela 7).

Em relação à energia de ativação (Ea), é diretamente proporcional, o d-limoneno tem a Ea de 20,7 kJ/mol e o tempo de dissolução é de 519 s à 30 °C, o acetato de bornil com Ea= 69,8 kJ/mol leva 14.900 s para dissolução, 28 vezes o tempo do D-limoneno.

Tabela 7 - Tempo de dissolução e ativação aparente de (Ea) para a dissolução de PS nos terpenos

Terpenos	Tempo de dissolução (s)					Ea (kJ/mol)
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	70 °C	
α -Terpinene	545	401	334	262	208	20,3
γ -Terpinene	496	359	289	240	196	19,7
d-Limonene	519	471	375	283	200	20,7
Terpinolene	525	425	365	301	248	16,0
α -Phellandrene	390	321	235	166	125	25,2
β -Phellandrene	263	191	147	114	90	23,1
p-Cymene	215	149	109	85	66	25,1
1,8-Cineole	4.480	1.390	626	478	302	56,3
Terpinene-4-ol	-	4.430	1.810	950	610	89,0
α -Terpineol	3.025	1.289	715	418	344	47,7
2-p-Cymenol	11.458	3.830	1.991	829	403	71,2
Geranyl acetate	719	543	493	424	269	19,1
Geranyl acetone	748	505	451	323	211	25,7
Geranyl formate	628	527	325	253	152	30,7
Citronellyl acetate	869	507	411	292	265	25,3
Citral	1.168	712	490	347	230	34,3
Citronellal	597	380	290	231	150	28,2
Myrcene	435	297	200	164	117	27,9
Bornyl acetate	14.900	3.660	1.590	862	558	69,8
α -Pinene	-	1.860	852	600	503	38,5
β -Pinene	3.213	690	366	242	142	63,5

Fonte: Hattori (2008)

O poder de dissolução de terpenos para PS depende fortemente da sua estrutura química. A solubilidade dos terpenos acíclicos tem maior poder de dissolução quando comparados com os cíclicos e os terpenos bicíclicos mostram que o poder de dissolução é relativamente baixo.

2.4.3 Monoterpenos cíclicos

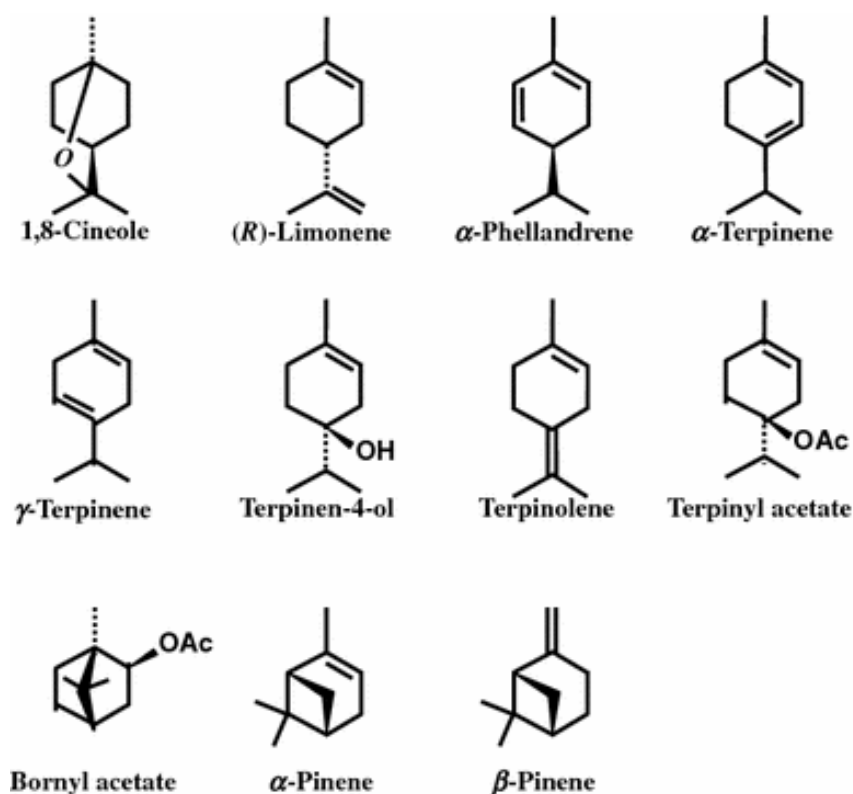
O encolhimento por ar aquecido ou calor friccional é processo mais comumente empregado para a reciclagem do EPS. No processo de encolhimento térmico há a degradação oxidativa do poliestireno. Shikata *et al.* (2011) estudou a dissolução do PS em monoterpenos cíclicos presentes em óleos essenciais de

árvores, com a finalidade de obter um agente de encolhimento, ecologicamente correto para a reciclagem do EPS.

Os monoterpenos estão presentes nos óleos foliares de coníferas e de eucalipto que são extraídos a partir de uma operação unitária simples, utilizando o princípio da volatilidade do óleo que é extraído quando entram em contato com os vapores de água (BRUM *et al.*, 2007). Para a obtenção de 1 dm³ de óleo essencial é necessário 25 kg de folhas frescas de *Abies sachalinensis* (YATAGI e TAKAHASHI, 1985).

Shikata *et al.* (2011) ensaiaram a solubilidade de 13 tipos de monoterpenos cíclicos presentes em folhas de árvores e suas estruturas química de 11 tipos de monoterpenos que está na figura 12. O óleo de *abies* e *eucalipto* foram utilizados em seu estado bruto, conseqüentemente há a presença de outros tipos de produtos químicos.

Figura 12 - Estrutura química de monoterpenos cíclicos /testados



Fonte: Shikata et al. (2011)

Os resultados dos ensaios de solubilidade e tempo de dissolução foram efetuados a uma temperatura de 50 °C. O corpo de prova de PS (filme) foi prensado

sob pressão de 20 MPa a 260 °C por 5 minutos, retirou-se a amostra de diâmetro de 5 mm, com peso médio de $2,30 \pm 0,03$ mg e foi dissolvido em um tubo de ensaio com $0,20 \text{ cm}^3$ de solvente.

Tabela 8 - Solubilidade do poliestireno (PS) em monoterpênos cíclicos a 50 °C

Solvente	Solubilidade (g [100 g solvente] ⁻¹) ^a	Tempo para dissolução (s) para temperatura de 50 °C	Tipo
1,8-Cineole	197.1 ± 0.2	497 ± 3	monocíclico
(R)-Limonene	217.1 ± 0.1	145 ± 1	monocíclico
α -Phellandrene	145.0 ± 0.1	235 ± 3	monocíclico
α -Terpinene	191.4 ± 0.2	147 ± 1	monocíclico
γ -Terpinene	151.1 ± 0.4	147 ± 2	monocíclico
Terpinen-4-ol	126.4 ± 0.4	747 ± 2	monocíclico
Terpinolene	70.2 ± 0.1	134 ± 1	monocíclico
Terpinyl acetate	80.9 ± 0.1	715 ± 3	monocíclico
Bornyl acetate	84.7 ± 0.2	$1,333 \pm 3$	bicíclico
α -Pinene	96.4 ± 0.2	564 ± 4	bicíclico
β -Pinene	197.1 ± 0.2	366 ± 3	bicíclico
Abies oil	217.1 ± 0.1	665 ± 1	óleo essencial bruto
Eucalyptus oil	145.0 ± 0.1	406 ± 2	óleo essencial bruto

Fonte: Shikata *et al.* (2011)

O melhor solvente foi o (R)-Limonene e o Abies oil, com dissolução de 217.1 ± 0.1 grama de PS em 100 grama de solvente, depois vem o 1,8-Cineole e o β -Pinene dissolvendo 197.1 ± 0.2 grama de PS em 100 grama de solvente a uma temperatura de 50 °C.

O menor tempo de dissolução ocorreu com o terpeno Terpinolene com tempo de 134 ± 1 s e o segundo foi o (R)-Limonene com o tempo de 145 ± 1 s, a uma temperatura de 50 °C, sendo os dois solventes monocíclicos. Os autores variaram a temperatura do ensaio nos valores de 30°, 40°, 50°, 60°, 70 °C, obviamente que com o aumento da temperatura houve uma redução do tempo de dissolução.

2.4.4 Solventes derivado de petróleo

Gutierrez-Velasquez *et al.* (2021) apresentaram os resultados da caracterização de resíduos de EPS com mistura de acetato de etila e acetona em diversas proporções (quadro 8) para possível utilização como ligante e material de revestimento.

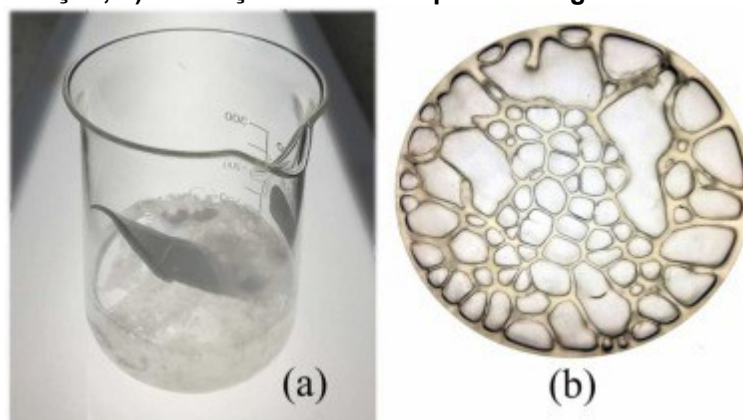
Quadro 8 - Composição do solvente, com a mistura de acetona e acetato de etila

Acetona (%)	Acetato de etila (%)	Designação
0	100	0AC100AE
20	80	20AC80AE
50	50	50AC50AE
80	20	80AC20AE

Fonte: Gutierrez-Velasquez et al. (2021)

Na figura 13 o EPS depositado em um recipiente sofre a dissolução pelos solventes, obtém-se um resíduo pegajoso e depois a retirada do excesso de solventes. Após 6 horas há completo secamento e, na foto da figura 14, pode-se observar a formação de bolhas, resultante da secagem desses resíduos ao ar e da espessura da amostra.

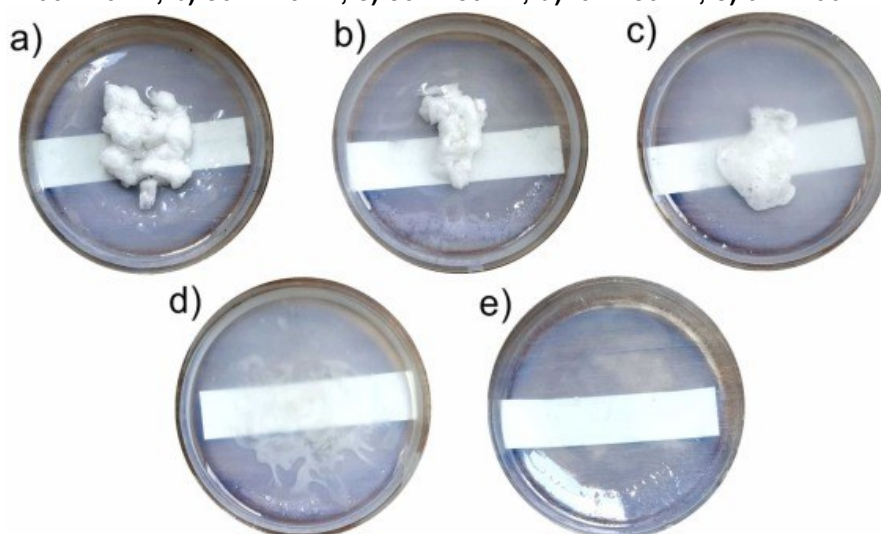
Figura 13 - Processo de secagem e dissolução de resíduos. a) EPS em processo de dissolução; b) Formação de bolhas após a secagem dos resíduos



Fonte: Gutierrez-Velasquez et al. (2021)

Os resultados da mistura de solventes de acetona e acetato de etila são apresentados na figura 15, a viscosidade dos resíduos é bem caracterizada pela proporção de solventes na mistura. Na foto (a), a mistura dos solventes de 100% de acetona e 0% de acetato de etila resulta em uma mistura com alta viscosidade. A foto (e) mostra o resíduo de EPS misturado com 100% de acetato de etila e 0% de acetona, resultando a mistura bem mais fluída, praticamente sem a visualização do resíduo de EPS.

Figura 14 - Amostras de resíduos EPS obtidas com diferentes composições de solventes. a) 100AC0AE; b) 80AC20AE; c) 50AC50AE; d) 20AC80AE; e) 0AC100AE



Fonte: Gutierrez-Velasquez et al. (2021)

Os ensaios realizados por Gutierrez-Velasquez *et al.* (2021) foram: testes de reologia, testes de força de ligação do ligante (BBS), testes de resistência aparente ao cisalhamento (ASS), testes de aderência e análise termogravimétrica. Os resultados demonstraram que os resíduos de EPS, obtidos pela dissolução com misturas de solventes acetona e acetato de etila, tiveram maior resistência mecânica, maior viscosidade variável e um tempo menor de secagem de acordo com o aumento da acetona na mistura.

2.5 Trabalhos de reciclagem de EPS

Castellar *et al.* (2016), produziram um revestimento anticorrosivo, utilizando a reciclagem química, com o diluente ecológico d-limoneno, o ensaio foi executado em uma câmara de névoa salina, onde os resultados foram comparados com o revestimento comercial e tiveram resultados positivos. O corpo de prova revestido com EPS teve apenas 10% de sua superfície corroída, com o revestimento comercial a superfície corroída foi de 50%.

Schneider *et al.* (2015) trabalharam na produção de uma tinta, através da reciclagem do poliestireno expandido. Para facilitar a incorporação de pigmentos, adicionou-se o tensoativo (Texaphor) e o pigmento utilizado para dar coloração da tinta, dióxido de titânio, foi incorporado com o auxílio de agitador mecânico. Os resultados foram positivos em 3 pontos:

- a) Tempo de endurecimento: a tinta originária do EPS tem um tempo de endurecimento de 22% do tempo da tinta comercial;
- b) Boa elasticidade e;
- c) Custo de 39,10% menor que a tinta comercial;

Curiac *et al.* (2017) trabalharam na preparação de vários adesivos utilizando as espumas de poliestireno (EPS), método eficaz para reduzir a poluição ambiental e evitar o desperdício de recursos. Os efeitos do tipo de solvente utilizado, as modificações na dissolução, a reação no tempo, temperatura da reação interfere no desempenho do adesivo EPS reciclado. O resultado do adesivo de EPS reciclado à base de solvente atingiram 3,07 MPa, superando o desempenho de adesivo de PVA comercial utilizado como referência.

Uttaravalli *et al.* (2020) desenvolveram um estudo sobre os adesivos de baixo custo, preparados a partir de um poliestireno (EPS) pós-consumo (resíduo), dissolvendo em seis solventes diferentes (quadro 9).

Quadro 9 - Solventes utilizados e códigos dos adesivos obtido

Nome dos solventes	Códigos dos adesivos
m-xileno	AD-X
Acetato de n-butila (n-BA)	AD-B
Tetrahidrofurano (THF)	AD-T
Metiletilcetona (MEK)	AD-M
Gasolina	AD-G
m-xileno	AD-X

Fonte: Uttaravalli *et al.* (2020)

O solvente metiletilcetona (MEK) obteve a melhor solubilidade dentre os solvente utilizado, 42% em peso, seguido de m-xileno com 40%. A menor viscosidade foi atingida com adesivo preparado com o solvente gasolina, 2296 cP.

Tabela 9 - valores de solubilidade, viscosidade e teor de umidade dos adesivos derivados de EPS

Código do adesivo	Solubilidade a 30 ± 1 °C (% em peso)	viscosidade a 30 ± 1 °C (cP)	Teor de umidade (%)
AD-X	40	4586	2,6
AD-B	37	4206	1,7
AD-T	36	5934	2,9
AD-M	42	6127	1,8
AD-G	28	2296	2,5

Fonte: Uttaravalli *et al.* (2020)

O estudo revelou que os adesivos preparados internamente são adequados para colar papel e substratos à base de madeira. A resistência adesiva dos adesivos também é comparada com adesivos comerciais, como fevisstick e fevicol. A resistência ao cisalhamento dos adesivos estudados para madeira como substrato, o que aproximou dos adesivos comerciais foi o preparado com o solvente metiletilcetona (MEK), com diferença menor que 7% (UTTARAVALLI *et al.* 2020).

Tabela 10 - Propriedades mecânicas de diferentes adesivos derivados do EPS, comparado com fevicol.

Código do adesivo	Carga (N)	Cisalhamento (kPa)	Alongamento (%)	Módulo de cisalhamento (MPa)
AD-X	348,70	1081	0,85	125,90
AD-B	442,60	1372	1,12	122,70
AD-T	1222,90	3791	2,717	175,10
AD-M	1421,80	4407	2,56	172,20
Fevicol	1523,40	4722	14,32	33,0

Fonte: Uttaravalli *et al.* (2020)

O estudo revelou que os adesivos desenvolvidos por Uttaravalli *et al.* (2020) podem ser usados como um substituto adequado para adesivos comerciais para ligar vários materiais.

Uttaravalli *et al.* (2020) desenvolveram pesquisa na qual materiais adesivos de baixo custo foram preparados utilizando o poliestireno expandido (EPS) que foi descartado como resíduo. Esses autores prepararam os adesivos dissolvendo os resíduos de EPS em seis solventes diferentes, nomeadamente n-butil acetato (n-BA), tetrahidrofurano (THF), metiletilcetona (MEK), m-xileno, tetracloreto de carbono (CTC) e gasolina. As propriedades físico-químicas, como solubilidade, teor de umidade, viscosidade, resistência do adesivo (cisalhamento), módulo de cisalhamento, foram caracterizadas em detalhes. Nesse trabalho, substratos à base de papel e madeira foram usados para quantificar a força adesiva dos adesivos desenvolvidos internamente. Esses autores concluíram que os adesivos preparados como EPS são apropriados para colar papel e substratos à base de madeira. A investigação desses autores mostrou que a resistência ao cisalhamento do adesivo produzido é comparável (cerca de 7% menor) com a resistência ao cisalhamento do adesivo comercial utilizado como referência. Esse mesmo trabalho revelou ainda que os adesivos desenvolvidos a base de EPS são adequados para ligar substratos à base de argila e cerâmica.

3 METODOLOGIA

As madeiras utilizadas nos ensaios foram adquiridas nos fornecedores de Curitiba, que são utilizadas para a construção civil entre outras finalidades.

3.1 Madeira

A espécie utilizada é o *pinus spp*, considerando a predominância do cultivo das espécies: *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*.

As superfícies das madeiras coletadas foram cepilhadas, e devidamente aplainadas, com o objetivo de regularizar suas superfícies atendendo às dimensões recomendadas pela norma NBR 7190/2022.

O teor de umidade e densidade, ou seja, a caracterização física dos corpos de provas dessa espécie foi determinada de acordo com a NBR 7190-3/2022.

3.2 Poliestireno expandido (EPS)

O EPS foi coletado nas dependências da UTFPR que teve como origem a embalagem de equipamentos adquiridos pela instituição e que são classificados como lixo reciclável (figura 15).

Figura 15 - Peças de isopor, embalagem de equipamentos, descartada como lixo



Fonte: Autoria própria (2024)

Para o preparo do adesivo, as peças de isopor foram fracionadas mecanicamente e transformadas em pérolas de EPS, com diâmetro em torno de 5mm, tornando maior a superfície de contato entre o EPS e o solvente, diminuindo o tempo de ação do solvente (figura 17).

Figura 16 - Pérola de EPS



Fonte: Autoria própria (2024)

3.3 Adesivo de EPS

Para a obtenção do adesivo de poliestireno utilizou-se a técnica de reciclagem química, ou seja, trata-se do modelo que reprocessa os plásticos e produtos similares para transformá-los em materiais petroquímicos básicos, que servem de matéria prima para a criação de outros. A reciclagem química funciona adequadamente se o solvente cumpre o seu papel na dissolução do EPS.

Para essa pesquisa, utilizaram-se cinco tipos de solventes (figura 18) e várias concentrações de EPS na mistura. As concentrações de EPS variaram de 10%, 20%, 30% e 40% em peso e foi medido o tempo de dissolução de cada mistura. Os solventes utilizados foram:

- Acetato de etila;
- Acetona 60%;
- Diluente para poliuretano;
- D-limoneno,
- Gasolina e;
- Thinner.

Esses solventes são comumente utilizados para essa finalidade, conforme Silva (2023) na dissertação cujo foco da pesquisa foi a revisão sistemática da forma de reaproveitamento desse tipo de material.

Figura 17 - Solventes utilizados como diluentes



Fonte: Autoria própria (2024)

3.3.1 Delineamento da pesquisa

Os adesivos obtidos foram ensaiados e comparados com os adesivos industriais para madeira que são encontrados no comércio. Os ensaios basearam-se no cisalhamento da linha de cola, norma NBR 7190/2020, que determina a caracterização mínima de 12 corpos de prova. Os adesivos comerciais utilizados foram Cascorez (PVA), Titebond III (polímero a base de água), PUR (poliuretano) e Flexobond (epóxi) (figura 19).

Figura 18 - Adesivos industriais utilizados



Fonte: Autoria própria (2024)

Quadro 10 - Tipo de adesivo industrial, gramatura, tempo de montagem e prensagem

Adesivos Industriais	Gramatura (g/m²)	Tempo de Montagem (min)	Tempo de prensagem (h)
Epoxi	350	30	24
PUR	200	30	24
PVA	200	20	3
Titebond III	200	20	24

Fonte: Autoria própria (2024)

A gramatura adotada foi de acordo com os manuais dos fabricantes e também atendendo às normas incluindo nesse caso o tempo de prensagem e o tempo de montagem. O mesmo ocorre com a forma de aplicação do adesivo, ou seja, sempre atendendo às especificações do fabricante.

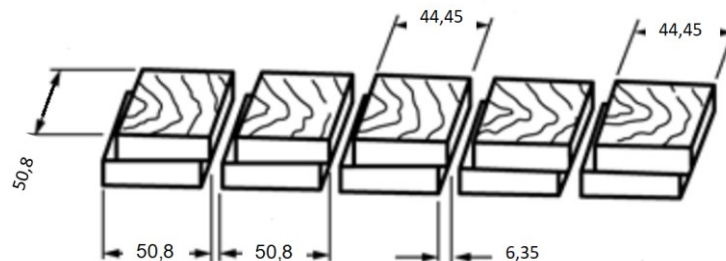
3.4 Ensaios de cisalhamento da linha de cola

Os ensaios foram realizados de acordo com as normas ASTM D 3110 e NBR 7190/1997, nos laboratórios das Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

3.4.1 O ensaio de cisalhamento da linha de cola foi baseado na norma

A madeira foi aplainada e cortada nas dimensões de 19,05 mm de espessura, 50,8 mm de largura e comprimento de 500,00mm, sendo necessária a montagem de duas peças, para a obtenção de 12 corpos de prova (figura 20).

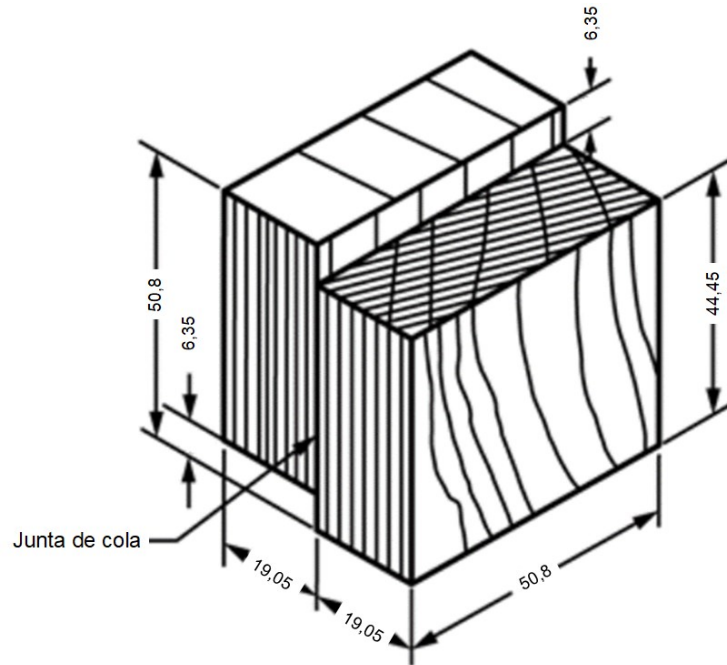
Figura 19 - Esquema de corte para a obtenção dos corpos de provas



Fonte: ASTM D-5751/2019

A figura 20 mostra as dimensões do corpo de prova para o ensaio de cisalhamento na linha de cola.

Figura 20 - Dimensão do corpo de prova (mm)



Fonte: ASTM D-5751/2019

Para os adesivos industriais, os adesivos PUR, PVA e TITEBOND III utilizou-se a gramatura de 200 g/m^2 , para o adesivo epóxi aplicou-se a gramatura de 350 g/m^2 .

No caso de adesivo de EPS, utilizou-se 4 gramaturas para determinar a linha de cola faminta e normal: 100, 200, 300, 400 g/m^2 .

Os adesivos serão aplicados nas duas superfícies da madeira, com pincel de cerdas finas, para que a cola fique distribuídos uniformemente, conforme a figura 22.

Figura 21 - Aplicação de adesivo nas faces das ripas



Fonte: Autoria própria (2024)

Após a distribuição do adesivo nas duas peças de madeiras, serão juntadas e prensados com uma pressão específica de 1,00 MPa, através de uma prensa hidráulica (figura 23) e mantidas por um tempo.

Figura 22 - Prensa hidráulica de 30 toneladas



Fonte: Autoria própria (2024)

O tempo de prensagem será de 24 horas, com exceção do adesivo PVA que será de 3 horas. Após a colagem, foram confeccionados os corpos de prova para ensaios da linha de cola para avaliação da resistência das juntas coladas.

Para aplicar a carga, foi utilizada a máquina universal de ensaio, modelo DL 10.000, marca EMIC (figura 24), através da ferramenta de ensaio de cisalhamento paralelo às fibras na madeira (figura 25).

Figura 23 - Máquina universal de ensaio, modelo DL 10.000, marca EMIC



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 24 - Ferramenta de ensaio de cisalhamento paralelo às fibras na madeira



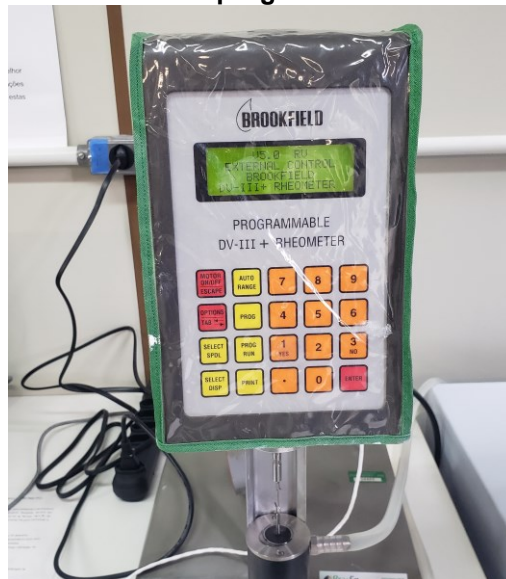
Fonte: Autoria própria (2024)

3.5 Ensaio de viscosidade

A viscosidade é a propriedade física que caracteriza a resistência de um fluido ao escoamento, a certa temperatura. Os adesivos são fluidos não newtonianos, portanto o coeficiente de viscosidade não é constante.

Para caracterizar a viscosidade, utilizou-se um equipamento da Brookfield, modelo DV-III + Rheometer, apresentado na figura 26.

Figura 25 - Reômetro programável Brookfield DVIII



Fonte: Autoria própria (2024)

3.6 Imagem da superfície das amostras

Para a investigação da superfície das amostras foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura (MEV), marca Tescan, modelo vega3, apresentado na figura 27.

Figura 26 - Microscópio eletrônico de varredura (MEV)



Fonte: Autoria própria (2024)

3.7 Tratamento estatístico

Os ensaios de cisalhamento na linha de cola foram tabulados e aplicados no modelo mais simples de ANOVA, que analisa os dados de um delineamento totalmente casualizado.

Aplicando ANOVA: fator único, busca-se o **valor-p**, se este valor for menor que o nível de significância, no caso, 0,05, conclui-se que existem diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos.

Analisa-se os valores de F e $F_{crítico}$, se o F for maior que $F_{crítico}$, $F_{crítico}$, conclui-se que existe diferença nas médias entre os tratamentos e rejeita-se a hipótese da igualdade.

Após a aplicação da ANOVA, buscam-se quais médias são diferentes, para isso aplica o teste de Tukey. Para aplicar o teste, é necessário estabelecer a diferença mínima significante (d.m.s.), que é obtido pela equação:

$$d.m.s. = q (QMR/r)^{0,5} \quad (1)$$

O QMR (quadrado médio do resíduo da análise de variância) obtido dos resultados da ANOVA, o r é o número de repetições de cada tratamento e o q é tabelado, para nível de significância de 5%. O valor de r , obtido pelo cruzamento do número de tratamento pelo grau de liberdade do resíduo (números de tratamentos multiplicados pelos números de repetições menos os números de tratamentos).

Pelo teste de Tukey, quando a diferença absoluta entre as médias for igual ou maior que a d.m.s., as duas médias são estatisticamente diferentes.

4 RESULTADOS

As características físicas e mecânicas das madeiras são influenciadas pela umidade, a norma NBR 7190-1:2022 especifica a umidade da madeira em quatro classes de umidade. A umidade de equilíbrio da madeira está em função da umidade relativa do ambiente onde se encontram esta madeira.

4.1 Características da madeira utilizada no ensaio

Na tabela 11 estão as umidades de equilíbrios da madeira utilizados nos ensaios, a umidade média encontrada é de 13,92%. Este valor de umidade é caracterizado como classe de umidade 2 que são secas ao ar em ambiente com umidade relativa do ar entre 65% e 75% e pode chegar na umidade de equilíbrio máximo de 15%.

Tabela 11 - Umidade de equilíbrio da madeira de Pinus sp utilizado nos ensaios

Amostra	Peso úmido (%)	Peso seco (%)	Umidade (%)
1	11,57	10,17	13,77
2	11,11	9,73	14,18
3	12,00	10,50	14,29
4	13,38	11,74	13,97
5	11,21	9,84	13,92
6	13,38	11,80	13,39
Média	12,11	10,63	13,39

Fonte: Autoria própria (2024)

A densidade média aparente foi de 494,32 kg/m³, comparadas com as classes de resistências definidas na norma NBR 7190-1:2022, esta madeira foi classificada como C35. Estas classes de resistência das madeiras têm a finalidade de padronizar as propriedades mecânicas para elaboração de projetos.

Quadro 11 - Densidade aparente da madeira de Pinus sp

Amostra	Dimensões (mm)			Volume (m ³)	Peso úmido (kg)	Densidade aparente (kg/m ³)
	Largura	Espessura	Comprimento			
1	17,40	29,50	46,80	2,40E-05	11,57	481,63
2	17,90	30,80	45,50	2,51E-05	11,11	442,89
3	17,45	30,50	47,55	2,53E-05	12,00	474,17
4	18,25	29,90	44,20	2,41E-05	13,38	554,75
5	17,95	29,70	46,00	2,45E-05	11,21	457,12
6	17,50	29,45	16,75	2,41E-05	13,38	555,33
Média				2,45E-05	12,11	494,32

Fonte: Autoria própria (2024)

4.2 Adesivo de EPS

A preparação do adesivo a partir do EPS deu-se com a medição de 100 ml de diluente, colocado em recipiente de 1000 ml e adicionado 10 g de EPS em quatro etapas, com agitação manual, até obter a concentração de 40% em peso.

Os diluentes d-limoneno, diluente de poliuretano e acetato de etila tiveram uma ação mais significativa sobre o EPS. O tempo necessário foi de 16, 22 e 28 minutos, respectivamente, para a dissolução total do isopor (quadro 12).

Quadro 12 - Tempo de dissolução de EPS

Diluyente	Tempo de dissolução				
	Concentração de EPS				Obs
	10%	20%	30%	40%	
Acetato de etila	1"	3'	10'	28'	Diluição total, boa viscosidade com 40% de EPS em peso
Acetona	5'	-	-	-	Sem dissolução, houve redução de vazios
Diluente de poliuretano	2'	8"	14"	22'	Diluição total, boa viscosidade com 40% de EPS em peso
D-limoneno	1'	4'	7'	16'	Diluição total, boa viscosidade com 40% de EPS em peso
Gasolina premium	3'	-	-	-	Sem dissolução, houve redução de vazios
Thinner	2'	2'	2'	-	Houve redução de vazios, diluição parcial, consistência pastosa, superfície pegajosa e sobra de diluente

Fonte: Autoria própria (2024)

A acetona, com concentração de 60%, reduziu o volume de EPS, conforme a foto da figura 28, não havendo nenhuma ação sobre a parte sólida. A acetona serviria como um solvente para realização da reciclagem química, podendo ser recuperado no processo de redução de volume.

Figura 27 - Ação da acetona (60%) no EPS



Fonte: Autoria própria (2024).

O thinner teve uma ação de redução do volume e uma dissolução parcial do EPS, com sobra do solvente, conforme foto da figura 29. A consistência do polietileno é pastosa e a sua superfície é pegajosa.

Figura 28 - Ação do thinner sobre o EPS



Fonte: Autoria própria (2024)

A pasta de EPS com o diluente de thinner (figura 30) foi utilizado para verificar a ação adesiva, montou-se seis corpos de prova para ensaio de cisalhamento na linha de cola. A gramatura da cola utilizada foi de 400 gramas por m².

Figura 29 - Superfície do EPS após a ação do solvente thinner

Fonte: Autoria própria (2024)

4.2.1 Viscosidade dos adesivos

A viscosidade influencia na penetração do adesivo na estrutura capilar da madeira, quanto maior a viscosidade há uma menor penetração do adesivo, maior dificuldade de espalhamento. As superfícies da madeira são porosas, os adesivos para a madeira devem ter viscosidade maior, ou seja, a consistência é mais grossa.

A temperatura é um fator determinante na viscosidade da cola, se a temperatura é maior, mais fino é o adesivo e menor a viscosidade. O ensaio de viscosidade foi realizado com temperatura de 25 °C.

Tabela 12 - Viscosidade do PVA, comparado com adesivos de EPS

Adesivo	Viscosidade (mPa.s)	Tensão de Cisalhamento (N/m²)
EPS + Acetato de etila	689,41	3,53
EPS + D-limoneno	3.035,76	16,08
EPS + Diluente de poliuretano	1.373,13	7,77

Fonte: Autoria própria (2024)

Comparativamente, o PVA tem a maior viscosidade, 16.981,19 mPa.s e o menor é EPS com de acetato de etila, assumindo valor de 689,41 mPa.s (tabela 12). A maior tensão de cisalhamento foi de 16,08 Nm⁻² alcançada pelo adesivo de EPS com diluente de d-limoneno.

4.3 Cisalhamento na linha de cola

O cisalhamento na linha de cola é um atributo mais importante na caracterização de um adesivo para madeira.

Para a realização do ensaio, utilizou-se como referência, quatro tipos de adesivos comerciais, PVA, PUR, epoxy e titebond III.

Na montagem dos corpos de provas, as gramaturas utilizadas foram as recomendadas pelos fabricantes.

Os adesivos resultantes da mistura de EPS com diluente, que ficaram na forma líquida, acetato de etila, diluente de poliuretano e d-limoneno, confeccionaram-se corpos de prova de quatro gramaturas: 100, 200, 300 e 400 g/m².

Na figura 31, está a foto dos corpos de provas que foram preparados para o ensaio de cisalhamento.

Analizando a figura 31, chega-se à conclusão que o único adesivo que obteve os doze corpos de prova por tratamento foi o acetato de etila, com corpos de provas nas quatro gramaturas.

Figura 30 - Foto dos corpos de provas preparados para o ensaio de cisalhamento



Fonte: Autoria própria (2024)

4.3.1 Resultados do cisalhamento na linha da cola

Na tabela14 encontra-se os resultados do cisalhamento na linha da cola. Os adesivos de EPS + poliuretano e EPS + d-limoneno tiveram resultados muito baixo, com valores abaixo de 1,00 MPa.

Os resultados de EPS + acetato de etila foram muito significativas, com valores médios de cisalhamento variando de 3,28 MPa a 4,45 MPa, com gramatura de 400 g/m² e 200 g/m² respectivamente.

Tabela 13 - Resultados do cisalhamento na linha de cola

Corpo de Prova	Adesivos comerciais (MPa)				Adesivo obtido pela reciclagem do EPS (MPa)						
	PVA	PUR	Epoxy	Titebond III	Diluyente de PU		Acetato de etila				Thinner
	200g/m2	200/m2	350g/m2	200g/m2	100 g/m2	200 g/m2	100 g/m2	200 g/m2	300g/m2	400 g/m2	400g/m2
1	5,13	5,14	4,88	4,35	0,08	0,64	3,46	4,41	5,23	2,78	5,88
2	4,64	4,77	7,17	6,16	0,13	1,17	3,90	3,53	2,92	2,20	3,70
3	4,86	4,53	4,16	4,32	0,10	0,98	3,42	5,08	4,22	3,18	3,49
4	3,86	4,85	5,82	8,98	0,19	2,27	3,47	4,19	5,08	3,12	3,55
5	6,13	4,32	5,59	6,28	0,15	1,35	6,32	3,10	4,35	3,64	3,70
6	4,88	5,65	4,55	4,42	0,08	2,48	6,29	3,21	3,80	1,69	3,50
7	4,06	5,39	4,04	7,21	-	0,27	3,52	5,62	4,19	1,69	
8	4,64	3,56	4,26	5,41	-	-	3,06	4,39	4,44	4,19	
9	4,30	5,45	4,20	5,77	-	-	2,90	6,05	4,46	5,06	-
10	4,32	4,13	4,00	5,45	-	-	2,30	4,83	4,11	3,13	-
11	5,20	4,41	4,31	4,30	-	-	4,41	5,31	2,93	4,63	-
12	3,86	7,33	4,17	4,21	-	-	3,41	3,69	4,64	4,02	-
Média	4,66	4,96	4,76	5,57	0,12	1,31	3,87	4,45	4,20	3,28	3,97

Fonte: Autoria própria (2024)

A mistura do EPS com diluente thinner formou-se uma massa pastosa (figura 30) que foi utilizada para montar 6 corpos de provas, os resultados alcançaram a média de 3,97 MPa.

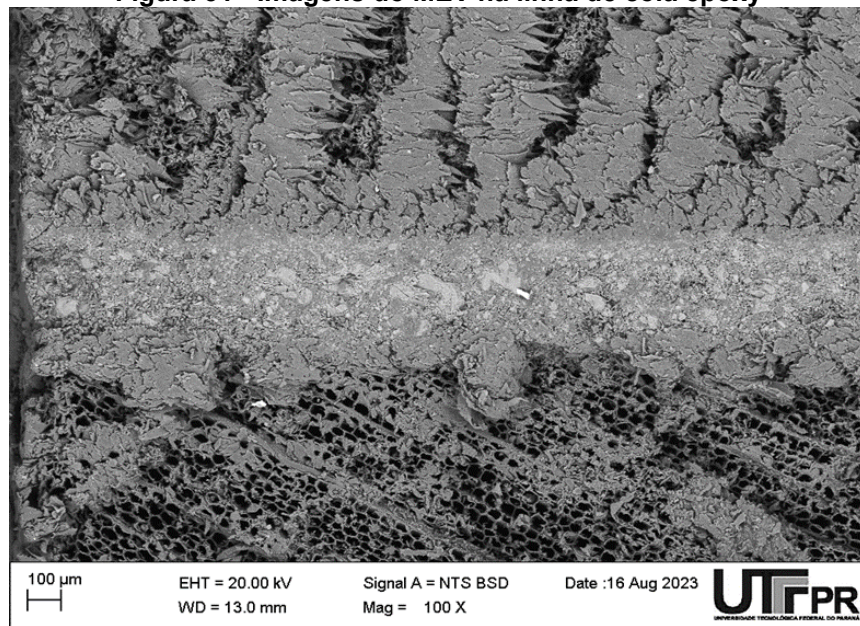
Os resultados dos adesivos comerciais variaram de 5,57 MPa, para o tiltebond III e o menor resultado foi o PVA, alcançando a média de 4,66 MPa.

4.3.2 Análise das imagens do MEV na linha de cola

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é empregada para produzir imagens de alta resolução e são úteis para avaliar a superfície superficial.

Na figura 32 a imagem do MEV na linha de cola epoxy, há uma camada de 250 μm de adesivo, em função da gramatura de 400 g/m^2 e ter a consistência pastosa, apesar da pressão de 1 MPa, na montagem dos corpos de provas, no momento da cura.

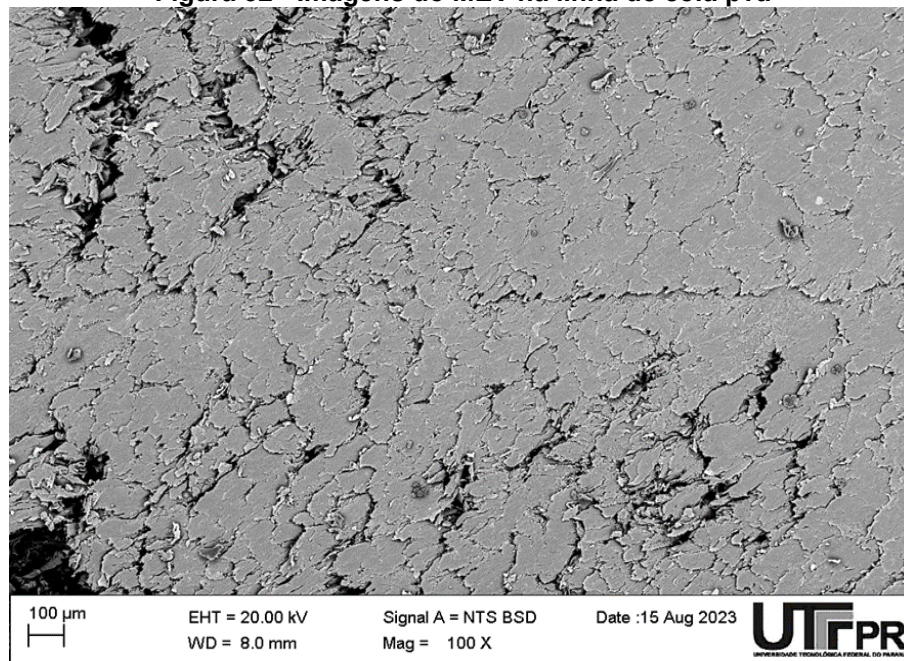
Figura 31 - Imagens do MEV na linha de cola epoxy



Fonte: Autoria própria (2024)

A cola de PVA tem uma maior molhabilidade que as outras colas, há dificuldade de identificar a linha de cola na figura 33.

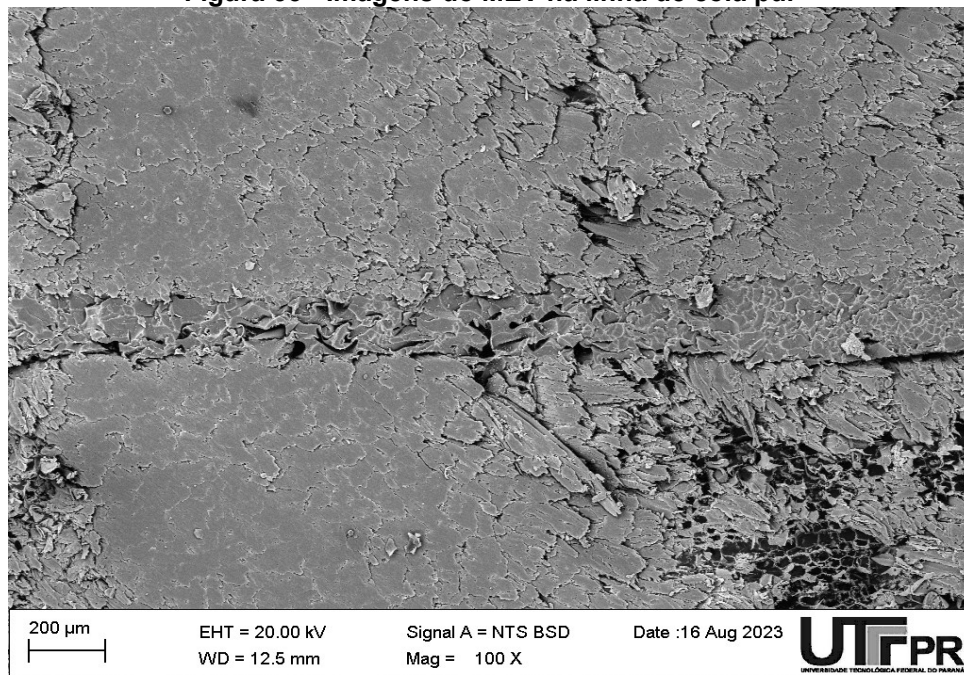
Figura 32 - Imagens do MEV na linha de cola pva



Fonte: Autoria própria (2024)

O adesivo comercial PUR preenche os vazios entre as madeiras, definindo a linha de cola, com espessura de 100 μm (figura 34).

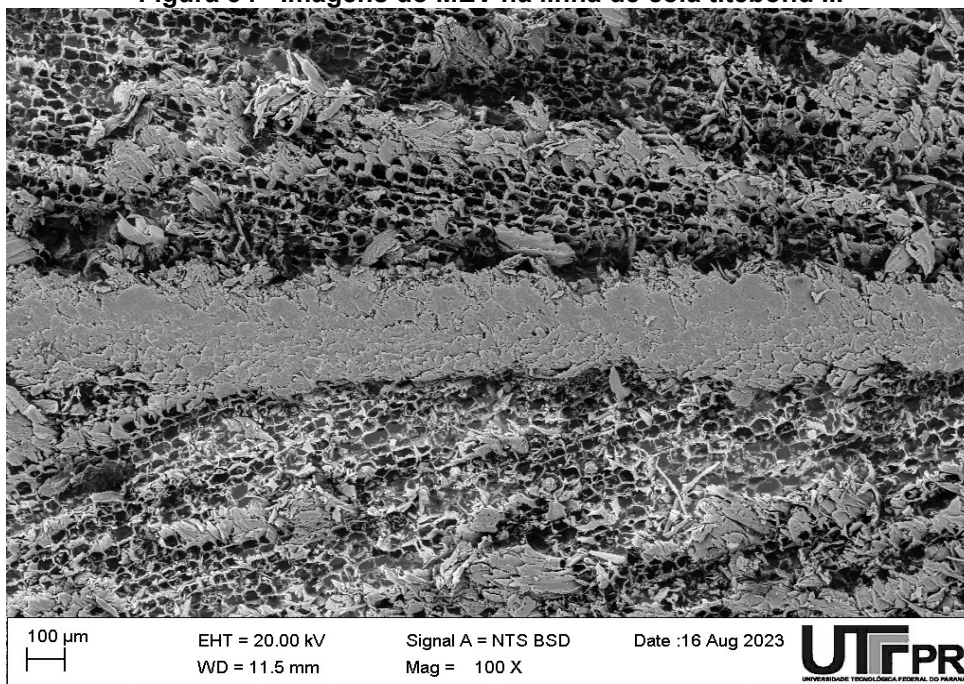
Figura 33 - Imagens do MEV na linha de cola pur



Fonte: Autoria própria (2024)

A imagem da colagem da madeira com tiltebond III é bem característico, ficando bem evidente a linha de cola, preenchendo toda irregularidade superficial da madeira (figura 35).

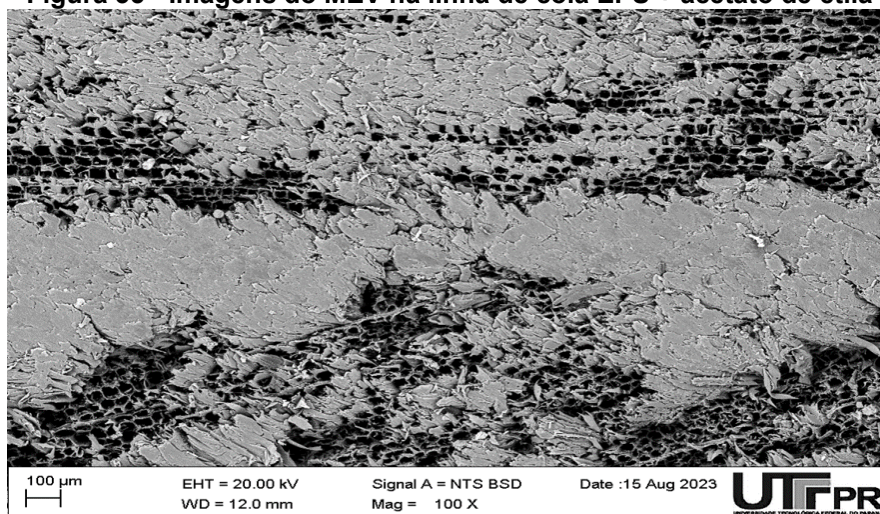
Figura 34 - Imagens do MEV na linha de cola titebond III



Fonte: Autoria própria (2024)

A foto da figura 36 mostra a camada de cola EPS + acetato de etila, parte do adesivo penetrando nos vazios da madeira e aderindo com as partes da madeira.

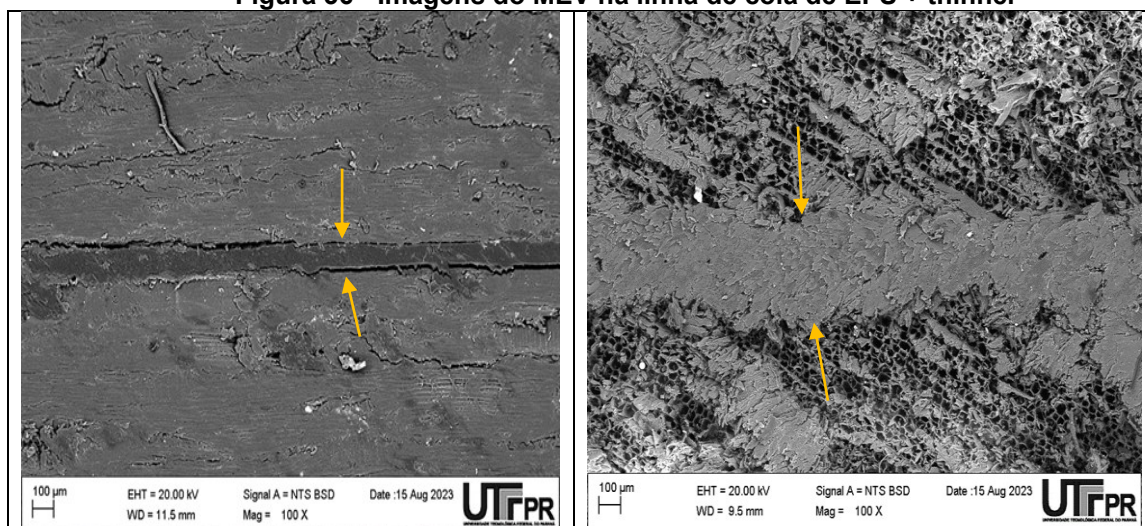
Figura 35 - Imagens do MEV na linha de cola EPS + acetato de etila



Fonte: Autoria própria (2024)

Na figura 37 a imagem do MEV na linha de cola de EPS + thinner mostra a camada de adesivo bem definido, contrastando com as madeiras, com espessura de 100 µm. O adesivo obtido com a mistura de EPS com thinner forma uma pasta grudenta, que foi aplicado nas duas faces dos sarrafos com gramatura de 400 g/m². Este adesivo têm um resultado positivo, alcançando o valor de 3,97 MPa.

Figura 36 - Imagens do MEV na linha de cola de EPS + thinner

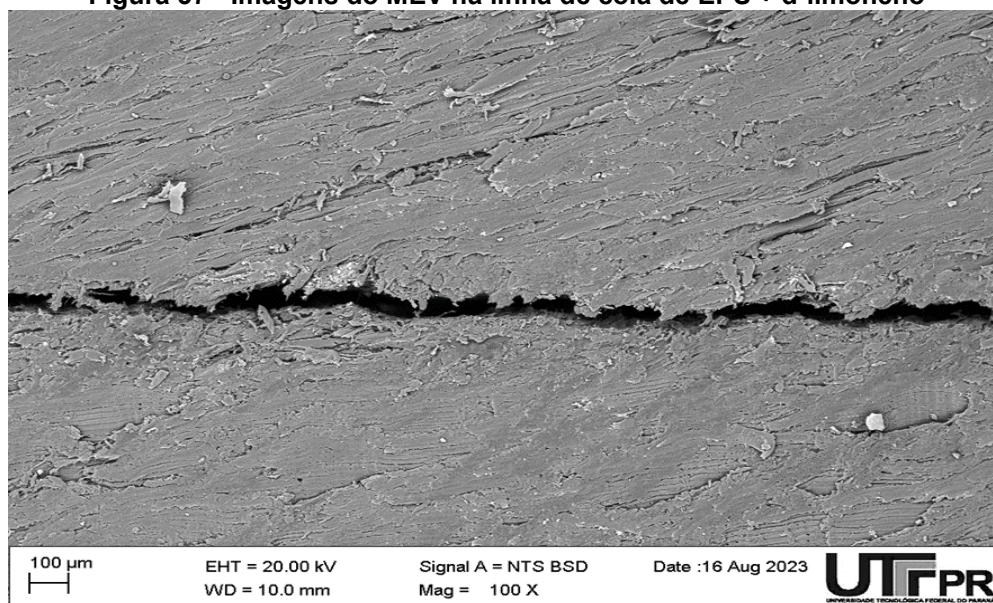


Fonte: Autoria própria (2024)

Na utilização do adesivo de EPS + d-limoneno, não houve a adesão em nenhum dos tratamentos para o ensaio de cisalhamento na linha de coladas, portanto a função de adesivo não foi alcançada.

Analizando a imagem do MEV (figura 38), não há nenhum resquício de adesivo entre os sarrafos de madeira.

Figura 37 - Imagens do MEV na linha de cola de EPS + d-limoneno



Fonte: Autoria própria (2024)

A explicação mais adequada é que o solvente d-limoneno reverte o processo de polimerização do monômero de estireno, processo este para obter o poliestireno (PS), resultando em monômero de estireno, molécula menor que o PS. Estes monômeros de estireno são facilmente absorvidos pelos vazios da madeira, não ficando nada na face da madeira.

4.3.3 ANOVA e teste de Tukey no adesivo EPS + acetato de etila

A análise da variância ANOVA é um método para testar se existe igualdade ou diferença significativa de três ou mais médias. No caso de haver diferença significativa, usa-se o teste de Tukey para identificar quais grupos específicos são diferentes.

Aplicando ANOVA nos ensaios de cisalhamento na linha da cola, para o adesivo EPS + acetato de etila, em quatro tratamentos, a menor média foi de 3,28 MPa para gramatura de 400 g/m², a maior média foi de 4,45 MPa para a gramatura de 200 g/m² (tabela 14).

Comparativamente a menor variância (0,51) está no grupo de gramatura de 300g/m² e maior variância (1,56) se encontra no grupo de gramatura de 100g/m².

A explicação para a maior variância estar nos corpos de prova de gramatura 100 g/m², é que se criou uma linha de cola faminta, aonde há uma dificuldade de aplicar o adesivo uniformemente nos sarrafos, na montagem dos corpos de prova.

Tabela 14 - Aplicação de ANOVA e teste de Tukey nos ensaios de cisalhamento na linha da cola, adesivo de EPS + acetato em quatro gramatura

Corpo de prova	Cisalhamento (MPa)			
	Gramatura (100 g/m ²)	Gramatura (200 g/m ²)	Gramatura (300 g/m ²)	Gramatura (400 g/m ²)
1	3,46	4,41	5,23	2,78
2	3,90	3,53	2,92	2,20
3	3,42	5,08	4,22	3,18
4	3,47	4,19	5,08	3,12
5	6,32	3,10	4,35	3,64
6	6,29	3,21	3,80	1,69
7	3,52	5,62	4,19	1,69
8	3,06	4,39	4,44	4,19
9	2,90	6,05	4,46	5,06
10	2,30	4,83	4,11	3,13
11	4,41	5,31	2,93	4,63
12	3,41	3,69	4,64	4,02
Média	3,87	4,45	4,20	3,28

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
EPS + Acetato = 100g/m ²	12	46,47	3,87	1,56
EPS + Acetato = 200g/m ²	12	53,42	4,45	0,92
EPS + Acetato = 300g/m ²	12	50,37	4,20	0,51
EPS + Acetato = 400g/m ²	12	39,32	3,28	1,18

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	9,26	3	3,09	2,97	0,04	2,82
Dentro dos grupos	45,77	44	1,04			
Total	55,03	47				

Fonte: Autoria própria (2024)

Analisando a aplicação da ANOVA, o F (2,97) é maior que o F_{crítico} (2,82), portanto há uma diferença significativa entre as gramaturas de adesivos.

Outro indicador é quando o valor-P é menor que 0,05, no nosso caso, o valor é de 0,04, que indica que existe diferença significativa entre os tratamentos.

Para aplicar o teste de Tukey, precisa estabelecer a diferença mínima significativa (d.m.s.), a menor diferença de médias de amostras que deve ser

tomada como estatisticamente significativa.

A d.m.s. é dada por:

$$d.m.s. = q (QMR/r)^{0,5} \quad (1)$$

Onde, q é um valor da tabela (3,78), QMR é o quadrado médio do resíduo da ANOVA (1,04) e r é o número de repetições de cada tratamento (12).

O valor calculado da d.m.s. é 1,11

Tabela 15 - Tensão de cisalhamento média (MPa) para quatro gramaturas de adesivo EPS + acetato de etila

Tratamento	Cisalhamento medio MPa		
EPS + Acetato = 200g/m ²	4,45	a	
EPS + Acetato = 300g/m ²	4,20	a	b
EPS + Acetato = 100g/m ²	3,87	a	b
EPS + Acetato = 400g/m ²	3,28		b

Fonte: Autoria própria (2024)

Aplicando o teste de Tukey, baseado na d.m.s. de 1,11, as médias de cisalhamento na linha de cola, de EPS + acetato de etila com gramatura de 200, 300 e 100 g/m², não diferem ao nível de 5% de significância. A melhor média alcançada foi de 200 g/m², com tensão de cisalhamento de 4,45 MPa (tabela 15).

4.3.4 ANOVA e teste de Tukey nos adesivos comerciais e EPS + acetato de etila

Aplicando ANOVA nos ensaios de cisalhamento na linha da cola, para o adesivo comerciais e EPS + acetato de etila, a menor média foi de 4,45 MPa para o adesivo EPS + acetato de etila e a maior média foi de 5,57 MPa para o adesivo comercial Titebond III (tabela 16).

Comparativamente a menor variância (0,42) foi o adesivo comercial PVA e a maior variância (2,10) foi o adesivo comercial Titebond III.

Tabela 16 - Aplicação de ANOVA e teste de Tukey nos ensaios de cisalhamento na linha da cola, adesivos comerciais e EPS + acetato de etila

Corpo de Prova	Cisalhamento (MPa)				
	PVA	PUR	Epoxy	Titebond III	EPS + Acetato de Etila
1	5,13	5,14	4,88	4,35	4,41
2	4,64	4,77	7,17	6,16	3,53
3	4,86	4,53	4,16	4,32	5,08
4	3,86	4,85	5,82	8,98	4,19
5	6,13	4,32	5,59	6,28	3,10
6	4,88	5,65	4,55	4,42	3,21
7	4,06	5,39	4,04	7,21	5,62
8	4,64	3,56	4,26	5,41	4,39
9	4,30	5,45	4,20	5,77	6,05
10	4,32	4,13	4,00	5,45	4,83
11	5,20	4,41	4,31	4,30	5,31
12	3,86	7,33	4,17	4,21	3,69
Média	4,66	4,96	4,76	5,57	4,45

RESUMO

Grupo	Contagem	Soma	Média	Variância
PVA	12	55,89	4,66	0,42
PUR	12	59,51	4,96	0,92
Epoxy	12	57,15	4,76	0,93
Titebond III	12	66,85	5,57	2,10
EPS + Acetato de Etila	12	53,42	4,45	0,92

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GI	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	8,77	4	2,19	2,07	0,10	2,54
Dentro dos grupos	58,19	55	1,06			
Total	66,96	59				

Fonte: Autoria própria (2024)

Aplicando o teste de Tukey, baseado na d.m.s. de 1,19, as médias das colas comerciais e EPS + acetato de etila com gramatura de 200 g/m², não diferem ao nível de 5% de probabilidade. A melhor média alcançada foi da cola comercial Titebond III, com tensão de cisalhamento de 5,57 MPa (tabela 17).

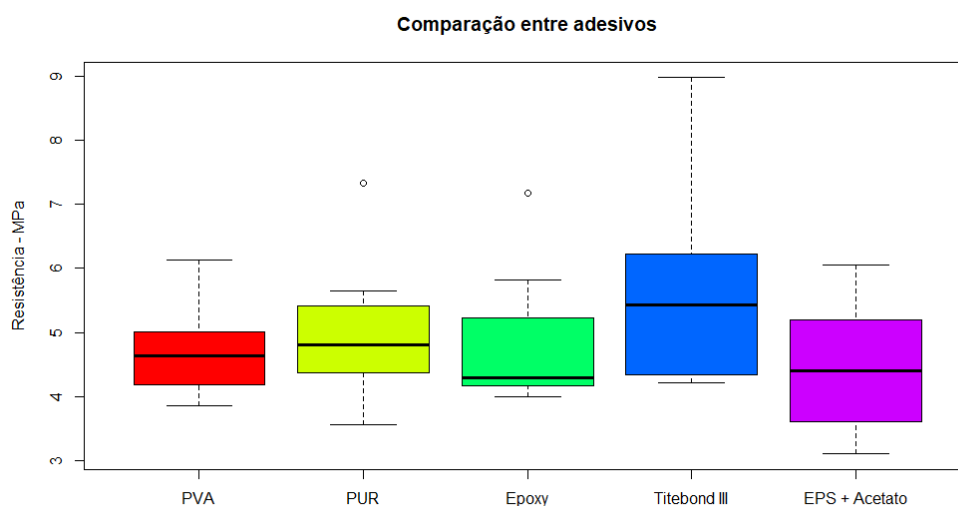
Tabela 17 - Tensão de cisalhamento média (MPa) para adesivos comerciais e EPS + acetato de etila

Tratamento	Cisalhamento Médio MPa
Titebond III	5,57 a
PUR	4,96 a
Epoxy	4,76 a
PVA	4,66 a
EPS + Acetato = 200 g/m ²	4,45 a

Fonte: Autoria própria (2024)

Observa-se através do gráfico apresentado na figura 39 a comparação entre os adesivos comerciais e o adesivo produzido através da dissolução do EPS em acetado de etila.

Figura 39 – Comparação entre adesivos comerciais e o produzido em laboratório.



Fonte: Autoria própria (2024)

Pode-se verificar dessa forma que não há diferença estatística significativa entre os valores encontrados. Ou seja, em termos de resistência ao cisalhamento o adesivo produzido através da dissolução do EPS em acetado de etila produz os mesmos resultados. A mesma largura das caixas apresentada neste gráfico demonstra que a quantidade de corpos de prova foi a mesma para todos os ensaios. Foram encontrados dois pontos fora da curva (*outliers*) para as colas comerciais devido a, possivelmente, variações da constituição da madeira nos corpos de prova. Observa-se ainda que o coeficiente de variação foi semelhante para todos os adesivos mostrando a homogeneidade na realização dos ensaios.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou como resultado a obtenção e caracterização de adesivo para madeira, através da reciclagem de poliestireno expandido pós consumo.

Os diluentes utilizados, o que tornaram a mistura líquida, foram acetato de etila, diluente de poliuretano, d-limoneno. A acetona (60%) e a gasolina premium encolheram o EPS, reduzindo os vazios da massa. O thinner reduziu os vazios, tornou a mistura com consistência pastosa, superfície pegajosa, consumindo a quantidade de diluente necessária e com sobra do diluente.

Nos ensaios dos adesivos derivado do EPS, o adesivo que teve um resultado positivo foi que utilizou o acetato de etila como diluente. No ensaio da gramatura empregando o adesivo de EPS + acetato de etila, a tensão de cisalhamento variou de 3,28 MPa (400 g/m²) a 4,45 MPa (200 g/m²). Após a aplicação do teste de Tukey, a melhor gramatura é a de 200 g/m².

Na comparação do adesivo de EPS + acetato, com gramatura de 200 g/m², com os adesivos comerciais, epoxy, pur, pva e titebond III, estatisticamente não tiveram diferença significativa. Dessa forma conclui-se que o adesivo de EPS + acetato de etila pode substituir os adesivos comerciais, com apelo ecológico e sustentável.

Considerando a quantidade expressiva da produção de resíduos de EPS no mundo todo, considerando a dificuldade de tratar desse resíduo devido às suas características peculiares, considerando a destruição da vida marinha e a contaminação em todo o planeta desses resíduos, qualquer tratamento que possibilite o reaproveitamento desse material tem profundo apelo ecológico.

Considerando que a reciclagem do EPS é muito baixa e o volume muito grande, esgotando os locais para destinos de resíduos sólidos, apresentam-se as sugestões para trabalhos futuros:

- Estudo da aplicabilidade do EPS para a produção de *primers* e tintas;
- Estudo da utilização do adesivo de EPS como adesivo estrutural para madeiras;
- Utilização de adesivo de EPS para produção de vigas de madeira laminada colada;
- Produção de elementos construtivos a partir de adesivo de EPS.

REFERÊNCIAS

- ABIQUM – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA QUÍMICA. **Previsão do consumo do EPS**. Disponível em: <https://abiquim.org.br/>. Acesso em: 03 set. 2021.
- ADHIKARI, B.; DE, D.; MAITI, S. **Reclamation and recycling of waste rubber**. Progress in Polymer Science, v. 25, n. 7, p. 909–948, 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079670000000204>. Acesso em: 03 mar. 2024.
- AMIANI, M.; BOTARO, V. R. Concreto impregnado com polímero (CIP): uso e aplicação do EPS reciclado para redução da permeabilidade de superfícies de concreto. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 4, p. 664-673, 2008.
- ASANUMA, M.; ARIYAMA, T.; SATO, M.; MURAI, R.; NONAKA, T.; OKOCHI, I.; NEMOTO, K. **Development of waste plastics injection process in blast furnace**. ISIJ International, Japan, 2000
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Projeto de estruturas de madeira**. NBR 7190:2022. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ASTM INTERNATIONAL. **Standard test method for thermal endurance of flexible sheet materials**. ASTM D3110-23. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2023.
- ASTM INTERNATIONAL. **Standard test method for adhesion of coatings to plastics**. ASTM D5751-23. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2023.
- ASTM INTERNATIONAL. **Standard terminology of adhesives**. ASTM D907-23. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2023.
- BANERJEE, S.; CHATTOPADHYAY, P.; GHOSH, A.; DATTA, P.; VEER, V. Aspect of adhesives in transdermal drug delivery systems. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 50, p. 10-20, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.01.001>. Acesso em: 03 mar. 2024.
- BODIG, J.; JAYNE, B. A. **Mechanics of wood and wood composites**. Malabar: Krieger Publishing Company, 1993.
- BRUM, L. F. W.; PIANESSO, T.; RODRIGUES, V. M. Extração do óleo essencial de eucalipto. In: **V Simpósio de Alimentos para a Região Sul**, 2007, Passo Fundo. Anais... Passo Fundo: [s.n.], 2007.
- CASTELLAR, P. M.; TOVAR, C. T.; CONTRERAS, I. B.; DIAZ, J. V.; ORTIZ, A. V. Uso de poliestireno expandido reciclado para a obtenção de um recobrimento anticorrosivo. **Scielo Org.**, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.org/>. Acesso em: 03 mar. 2024.
- CHANDRU, G.; VIJAY, N.; VIGNESH, V.; SACHIN, K. V. Study on behaviour of concrete blocks with EPS and partial replacement of flyash and quarry dust. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, 2017. Disponível em: <https://www.neliti.com/publications/237021/study-on-behaviour-of->

concrete-blocks-with-eps-and-partial-replacement-of-fly-as. Acesso em: 03 mar. 2024.

COLTON, J. R.; BURNS, B. R.; KNAPP, F. D. Plastic particles in surface waters of the Northwestern Atlantic: The abundance, distribution, source, and significance of various types of plastics are discussed. **Science**, v. 185, n. 4150, p. 491-497, 1974. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.185.4150.491>. Acesso em: 03 mar. 2024.

CONTRERAS OSORIO, L. K. **Market research applied to the management of expanded polystyrene in the city of Pereira**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colômbia, 2015.

CURIAC, A.; PETRE, A.; STOICA, A.; SANDU, S. Preparation of adhesives from the expandable polystyrene waste. **Journal of Young Scientist**, 2017. Disponível em: https://journalofyoungscientist.usamv.ro/pdf/vol_V_2017/Art3.pdf. Acesso em: 03 mar. 2024.

XXLPHOTO. **Imagem poliestireno expandido**. 1 imagem, color. Disponível em: <https://www.dreamstime.com/royalty-free-stock-images-expanded-polystyrene-sheet-image14124889>. Acesso em: 03 mar. 2024.

EBNESAJJAD, S.; LANDROCK, H. L. **Adhesives technology handbook**. 2. ed. London: Elsevier Inc., 2008.

EMBRAPA. **Programa de melhoramento de pinus da Embrapa Florestas** [recurso eletrônico] / Ananda Virgínia de Aguiar... [et al.]. Colombo: Embrapa Florestas, 2011. (Documentos / Embrapa Florestas, ISSN 1980-3958; 233).

EVERAERTS, A. I.; CLEMENS, L. M. Pressure sensitive adhesives. In: DILLARD, D. A.; POCIUS, A. V.; CHAUDHURY, M. (ed.). **Adhesion Science and Engineering**. London: Elsevier Science, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-044451140-9/50011-1>. Acesso em: 03 mar. 2024.

EVERAERTS, A. I.; CLEMENS, L. M. Pressure sensitive adhesives. In: DILLARD, D. A.; POCIUS, A. V.; CHAUDHURY, M. (ed.). **Adhesion Science and Engineering**. London: Elsevier Science, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-044451140-9/50011-1>. Acesso em: 03 mar. 2024.

FAY, P. A. **A history of adhesive bonding**. 2. ed. Cambridge: Woodhead Publishing, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819954-1.00017-4>. Acesso em: 25 abr. 2024.

FELDSTEIN, M. M.; DORMIDONTOVA, E. E.; KHOKHLOV, A. R. Pressure sensitive adhesives based on interpolymer complexes. **Progress in Polymer Science**, v. 42, p. 1-35, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2014.10.006>. Acesso em: 25 abr. 2024.

FRIHART, C. R. Adhesive interactions with wood. **U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory**, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.2737/fpl-gtr-149>. Acesso em: 25 abr. 2024.

GUTIÉRREZ, C. *et al.* The selective dissolution technique as initial step for polystyrene recycling. **Waste and Biomass Valorization**, v. 4, p. 239-245, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12649-012-9131-9>. Acesso em: 25 abr. 2024.

GUTIÉRREZ-VELASQUEZ, E.; MONTEIRO, S. N.; COLORADO, H. A. Characterization of expanded polystyrene waste as binder and coating material. **Elsevier**, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509521003193>. Acesso em: 25 abr. 2024.

HATTORI, K.; SHIKATA, S.; MAEKAWA, R.; AOYAMA, M. Dissolution of polystyrene into p-Cymene and related substances in tree leaf oils. **Journal of Wood Science**, v. 56, p. 228-234, 2010. Disponível em: <https://jwoodscience.springeropen.com/articles/10.1007/s10086-009-1073-x>. Acesso em: 25 abr. 2024.

HATTORI, K. Recycling of Expanded Polystyrene Using Natural Solvents. **Recycling Materials Based on Environmentally Friendly Techniques**. InTech: 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5772/59156>. Acesso em: 03 mar. 2024.

HATTORI, K.; NAITO, S.; YAMAUCHI, K.; NAKATANI, H.; YOSHIDA, T.; SAITO, S.; AOYAMA, M.; MIYAKOSHI, T. Solubilization of polystyrene into monoterpenes. **Advances in Polymer Technology**. v. 27. p. 35-39, 2008. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adv.20115>. Acesso em: 03 mar. 2024.

HENSLEY, J.; LOPEZ-ANIDO, R.; GARDNER, D. J. Adhesive bonding of wood with vinyl ester resin. In: ANDERSON, G. L. (ed.). **Proc. 23rd Annual Meeting of the Adhesion Society**. Blacksburg: The Adhesion Society, 2000.

HOFTYZER, P. J.; VAN KREVELEN, D. W. Cohesive properties and solubility. In: VAN KREVELEN, D. W. (ed.). **Properties of Polymers**. 2. ed. New York: Elsevier Science Publishers, 1976.

IWAKIRI, S. *et al.* Painéis de madeira aglomerada. In: **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005. p. 137-182.

KAUSHAL, H. *et al.* Adhesive from petrol and thermocol. **International Journal of Trend in Scientific Research and Development**, v. 2, n. 3, 2018. Disponível em: <https://www.ijtsrd.com/engineering/civil-engineering/12760/adhesive-from-petrol-and-thermocol/kaushal-harsola>. Acesso em: 25 abr. 2024.

KELLY, J. "How does polystyrene recycling work?" **How Stuff Works**. Disponível em: <https://science.howstuffworks.com/environmental/green-science/polystyrene-recycling.htm>. Acesso em: 25 abr. 2024.

KIM, J. S. *et al.* Degradation of polystyrene waste over base promoted Fe catalysts. **Catalysis Today**. v. 87, p. 59-68, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2003.10.004>. Acesso em: 25 abr. 2024.

KOAY, S. C. *et al.* Preparation and characterization of wood plastic composite made up of durian husk fiber and recycled polystyrene foam. **MATEC Web of**

Conferences, v. 152, p. 02019, 2018. Disponível em:
<https://doi.org/10.1051/mateconf/201815202019>. Acesso em: 25 abr. 2024.

KOWALSKI, A.; CZECH, Z. The effects of substrate surface properties on tack performance of acrylic pressure-sensitive adhesives (PSAs). **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 60, p. 1-7, 2015. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh>. Acesso em: 25 abr. 2024.

KUMAR, N. **Experimental studies on Conversion of Waste polystyrene to styrene and liquid Fuel**. Tese de Doutorado, 2010.

LEBLANC, R. "How long does it take garbage to decompose?" **The Balance | Sustainability Resources**. Disponível em:
https://www.richlandcenterwi.gov/sites/default/files/fileattachments/parks_amp_recreation/page/2534/howlonggarbagedecomposes.pdf. Acesso em: 02 abr. 2023.

LENGOWSKI, E. C. *et al.* Cellulose acquirement evaluation methods with different degrees of crystallinity. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 98, p. 185-194, 2013. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF), Piracicaba, Brasil.

LERICI, L. C.; RENZINI, M. S.; PIERELLA, L. B. Chemical catalyzed recycling of polymers: Catalytic conversion of PE, PP and PS into fuels and chemicals over H-Y. **Procedia Materials Science**. v. 8. p. 297-303, 2015. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.04.076>. Acesso em: 02 abr. 2023.

LUZ, W. **Textos** [vídeo]. Facebook: Disponível em:
<https://www.facebook.com/wandyluztextos/videos/bom-dia-/4246007975444924/>. Acesso em: 2021.

MAHARANA, T.; NEGI, Y. S.; MOHANTY, B. Review article: Recycling of polystyrene. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, v. 46, n. 7, p. 729-736, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03602550701273963>. Acesso em: 03 mar. 2024.

MARRA, F. S. **Technology of wood bonding: Principles in practice**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 453 p.

JANG, M.; SHIM, W. J.; HAN, G. M.; RANI, M.; SONG, Y. K.; HONG, S. H. Styrofoam debris as a source of hazardous additives for marine organisms. **Environmental Science & Technology**, v. 50, n. 10, p. 4951-4960, 2016. DOI:
<https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05485>.

MITTAL, K. L. **Adhesive joints: formation, characteristics and testing**. New York: Springer, 2011. ISBN 1461297028.

MITTAL, K. L.; PIZZI, L. A. **Wood adhesives**. Boston: Taylor & Francis Group, CRC Press, 2011.

NARENDRA, B. S.; CHAITANYA, V. L.; CHETANKUMAR, G. I. Waste thermocol to adhesive for better environment. **International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering**, 2014.

NOGUCHI, T.; MIYASHITA, M.; INAGAKI, Y.; WATANABE, H. A new recycling system for expanded polystyrene using a natural solvent. Part 1. A new recycling

technique. **Packaging Technology and Science**. v. 11, p. 19-27. 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1522\(199802\)11:1<19:AID-PTS414>3.0.CO;2-5](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1522(199802)11:1<19:AID-PTS414>3.0.CO;2-5). Acesso em: 03 mar. 2024.

PATLE, T. D.; KHEDIKAR, I. P.; DABHEKAR, K. R. An experimental study on use of waste thermocol and thinner waste as an admixture in concrete. **International Journal of Innovations in Engineering and Science**. v. 3, n.5, p. 109-113, 2018. Disponível em: <https://www.ijies.net/finial-docs/finial-pdf/2204183526.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2024.

PETRIE, E. M. **Handbook of adhesives and sealants**. 2. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2007.

PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Handbook of adhesive technology**. 3. ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2018.

PATEL, S.; DIXIT, S.; SUNEJA, K. G.; TIPAN, N. Review of conversion technologies of waste polystyrene into useful products. **Smart Moves Journal Ijoscience**, v. 7, n. 3, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/352241839_Review_of_Conversion_Technologies_of_Waste_Polystyrene_into_useful_Products. Acesso em: 03 mar. 2024.

PLASTIVIDA. **Blog Plastivida**. Disponível em: <http://www.plastivida.org.br/index.php/blog?lang=pt>. Acesso em: 31 jan. 2024.

PRABHAKAR, R. P. *et al.* Impacts of thermocol waste on marine life: a review. **International Multidisciplinary Research**, v. 3, p. 60-68, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/301613331_Impacts_of_Thermocol_waste_on_marine_life_A_Review. Acesso em: 03 mar. 2024.

VERMA, R.; VINODA, K. S.; PAPIREDDY, M.; GOWDA, A. N. S. Toxic pollutants from plastic waste: a review. **Procedia Environmental Sciences**, v. 35, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016>. Acesso em: 03 mar. 2024.

SCHNEIDER, G. O.; SCHWADE, P. V.; ROCHA, T. L. A. C. Reciclagem do poliestireno expandido através da produção de uma tinta. In: Fernanda Camera; Juliana de Araújo Moreira Ribeiro. (org.). Prêmio Odebrecht para o desenvolvimento sustentável: livro comemorativo 2014: compilação dos melhores projetos. São Paulo: Construtora Norberto Odebrecht, 2015, v. 7, p. 46-57.

SHIKATA, S. *et al.* Dissolution of polystyrene into cyclic monoterpenes present in tree essential oils. **Journal of Materials Cycles and Waste Management**, v. 13, p. 332-337, 2011. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10163-011-0005-1>. Acesso em: 03 mar. 2024.

SILVA, M. F. B.; CAMPOS, A.; FERREIRA, D. C.; ROCHA, V. C.; LEMOS, D. A.; GONÇALVES, J. C. S. I.; POLETO, C.; LUZ, M. S. Reciclagem de poliestireno expandido (EPS): um processo ambientalmente favorável para a recuperação do poliestireno usando óleo de soja residual. **Revista HOLOS**, v. 39, n. 5, 2023.

SILVA, M. R. G. **Poluição dos oceanos por plástico: histórico, cienciometria e principais lacunas no conhecimento**. 2019. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Ciências

Biológicas e da Saúde, Programa de Pós-Graduação em Diversidade Biológica e Conservação, Maceió, 2019.

STEVENS, Malcolm P. **Polymer chemistry: an introduction**. 3. ed. New York: Oxford University Press, 1999.

TESSARI, J. **Utilização de poliestireno expandido e potencial de reaproveitamento de seus resíduos na construção civil**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

UKEI, H.; HIROSE, T.; HORIKAWA, S.; TAKAI, Y.; TAKA, M.; AZUMA, N.; UENO, A. Catalytic degradation of polystyrene into styrene and a design of recyclable polystyrene with dispersed catalysts. **Catalysis Today**, v. 62, n. 1, p. 67-75, 2000. Disponível em: 10.1016/S0920-5861(00)00409-0. Acesso em: 03 mar. 2024.

ÜLKER, O. Wood adhesives and bonding theory. In: **ADHESIVES - Applications and properties**. Kirikkale University, Turkey, 2016. Disponível em: 10.5772/65759. Acesso em: 03 mar. 2024.

UTTARAVALLI, A. N. *et al.* Studies on development of adhesive material from post-consumer (waste) expanded polystyrene: a two-edged sword approach. **Elsevier**, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582020316955>. Acesso em: 03 mar. 2024.

WU, S. **Polymer interface and adhesion**. 1. ed. New York: Marcel Dekker, 1982.

YATAGAI, M.; SATO, T. Terpenes of leaf oils from conifers. **Biochemical Systematics and Ecology**, v. 14, p. 101-107, 1986. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0305197886900049>. Acesso em: 03 mar. 2024.

YATAGAI, M.; SATO, T.; TAKAHASHI, T. Terpenes of leaf oils from Cupressaceae. **Biochemical Systematics and Ecology**, v. 13, p. 431-438, 1985. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/030519788590081X>. Acesso em: 03 mar. 2024.