



**WIARA APARECIDA BATISTA**

**COMPARAÇÃO ENTRE PELÍCULAS DE POLIVINIL  
BUTIRAL PROVENIENTES DE PARA-BRISAS  
AUTOMOTIVOS EM FIM DE VIDA APÓS REMOÇÃO DO  
VIDRO**

**LAVRAS – MG  
2023**

**WIARA APARECIDA BATISTA**

**COMPARAÇÃO ENTRE PELÍCULAS DE POLIVINIL BUTIRAL PROVENIENTES  
DE PARA-BRISAS AUTOMOTIVOS EM FIM DE VIDA APÓS REMOÇÃO DO  
VIDRO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Federal de Lavras, como parte  
das exigências do curso de Engenharia de  
Materiais, para a obtenção do título de  
Bacharel.

Prof (a). Dra. Jéssica de Oliveira Notório Ribeiro  
Orientadora

**LAVRAS – MG**

**2023**

**WIARA APARECIDA BATISTA**

**COMPARAÇÃO ENTRE PELÍCULAS DE POLIVINIL BUTIRAL PROVENIENTES DE PARA-BRISAS AUTOMOTIVOS EM FIM DE VIDA APÓS REMOÇÃO DO VIDRO**

**COMPARISON BETWEEN POLYVINYL BUTYRAL FILMS FROM AUTOMOTIVE WINDSHIELDS AT THE END OF LIFE AFTER GLASS REMOVAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do curso de Engenharia de Materiais, para a obtenção do título de Bacharel.

Aprovada em 03 de março de 2023.

Dr. Alfredo Rodrigues de Sena Neto UFLA

Dr. Leonardo Sant Ana Gallo UFLA

Prof (a). Dra. Jéssica de Oliveira Notório Ribeiro  
Orientadora

**LAVRAS – MG**

**2023**

À minha mãe Marina pelo carinho, apoio e dedicação  
em todas as etapas e por ser o meu maior exemplo de vida.  
Com toda a gratidão,  
dedico este trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por me guiar, me abençoar e me dar força em toda a minha etapa de graduação. À minha mãe Marina, que fora fonte inesgotável de apoio, suporte e fortaleza em todos os momentos que precisei e que não mediu esforços para que essa conquista acontecesse. Ao meu pai Ronaldo (in memoriam), que infelizmente não pode estar presente nesse momento tão importante da minha vida, mas sei que está feliz por mim.

Ao meu noivo Thiago por trilhar esse caminho comigo e por me apoiar em todos os momentos. Aos meus irmãos Daniela, Wanderson e Débora por toda torcida pelo meu sucesso. Aos meus sobrinhos Leonardo, João Gabriel e Maria Juliana, por me motivarem a ser uma pessoa melhor. Aos meus amigos que tornaram essa caminhada mais leve e contribuíram para que este momento fosse possível.

Agradeço imensamente à Universidade Federal de Lavras, por ser a minha casa durante estes anos. Ao Departamento de Engenharia por tantas oportunidades de crescimento, que fizeram diferença na minha formação, assim como todos os recursos e apoio que foram fornecidos. Por fim, agradeço à minha orientadora Jéssica, pela paciência e por ser parte de todo aprendizado que essa etapa me proporcionou.

## RESUMO

Empresas de reciclagem e a sociedade em geral estão cada vez mais focados na reciclagem e recuperação de materiais de veículos em fim de vida (VFV). No entanto, ela tem sido orientada preferencialmente para materiais como aço e alumínio e não para resíduos menos atraentes, como os para-brisas. A reciclagem de para-brisas possui como fator limitante a dificuldade em separar o vidro da película de polivinil butiral (PVB) sem que ocorra degradação da película e contaminação do vidro em sua composição. Existem poucas pesquisas sendo desenvolvidas com foco na reciclagem do para-brisas, de modo que o objetivo deste estudo foi avaliar películas de PVB proveniente de diferentes para-brisas automotivos em fim de vida, após o processo de separação mecanoquímica, com o intuito de comparar a influência do tratamento em cada um afim de conhecer suas propriedades e facilitar suas reutilizações. A metodologia aplicada, determinada em estudos prévios do autor, foi a separação mecânica aplicada nos para-brisas com auxílio de um martelo, para retirar o vidro do polivinil butiral, seguida por ataque químico com ácido clorídrico 0,05% p/v por 1 hora, afim de retirar os vidros remanescentes, lavagem e por fim secagem ao ar das películas durante 7 dias. Foram realizadas análises estatísticas utilizando o software SISVAR como realização do teste Tukey com significância  $p < 0,05$ . Além disso, foram realizadas caracterizações de espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e microscopia óptica. Constatou-se pelas análises realizadas que a eficiência da separação mecanoquímica é influenciada pela variabilidade dos para-brisas. Logo, o ataque químico deve ser ajustado em para-brisas que apresentem maior aderência. Nestes, deve ser aplicado um ataque químico mais agressivo. Outro ponto observado foi que o fato de os para-brisas estarem descartados há muito tempo em contato com gases e o sol contribui para diminuir a conexão entre o vidro e o PVB e reduzir os plastificantes. Constatou-se que pelo aumento na redução percentual de massa e pela quantidade de vidro retirada visualmente, que ao realizar uma separação mecânica mais rápida e potente, as películas se mantiveram mais integras e limpas. Um fator comum foi que a secagem ao ar foi efetiva para todos os experimentos, pois leva a uma menor degradação e minimiza a união entre as películas. Mesmo com as dificuldades encontradas, as películas podem ser utilizadas em aplicações como em suspensões cerâmicas e em blendas. Logo o processo de separação mecanoquímica em para-brisas de VFV é altamente viável para contribuir com a problemática ambiental que existe atualmente, facilitando a reciclagem.

Palavras-chave: Reciclagem. Reutilização. Ácido clorídrico. Separação mecânica. Ataque químico.

## ABSTRACT

Recycling companies and society in general are increasingly focused on recycling and recovering end-of-life vehicle (ELV) materials. However, it has been preferentially oriented towards materials such as steel and aluminum and not towards less attractive residues, such as windshields. Windshield recycling has as a limiting factor the difficulty in separating the glass from the polyvinyl butyral (PVB) film without degradation of the film and contamination of the glass in its composition. There is little research being developed with a focus on windshield recycling, so the objective of this study was to evaluate PVB films from different end-of-life automotive windshields, after the mechanochemical separation process, in order to compare the influence of the treatment on each one in order to know its properties and facilitate its reuse. The applied methodology, determined in previous studies by the author, was the mechanical separation applied to the windshields with the aid of a hammer, to remove the polyvinyl butyral glass, followed by chemical attack with 0.05% p/v hydrochloric acid for 1 hour, in order to removing the remaining glass, washing and finally drying the films in air for 7 days. Statistical analyzes were performed using the SISVAR software with the Tukey test with significance  $p < 0.05$ . In addition, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and optical microscopy characterizations were performed. It was verified by the analyzes carried out that the efficiency of the mechanochemical separation is influenced by the variability of the windshields. Therefore, the chemical attack must be adjusted on windshields that have greater adherence. In these, a more aggressive chemical attack should be applied. Another point observed was that the fact that windshields have been discarded for a long time in contact with gases and the sun contributes to reducing the connection between the glass and the PVB and reducing plasticizers. It was found that due to the increase in the percentage reduction of mass and the amount of glass removed visually, that by performing a faster and more powerful mechanical separation, the films remained more intact and cleaner. A common factor was that air drying was effective for all experiments, as it leads to less degradation and minimizes the bonding between the films. Even with the difficulties encountered, the films can be used in applications such as ceramic suspensions and blends. Therefore, the mechanochemical separation process in ELV windshields is highly feasible to contribute to the current environmental problem, facilitating recycling.

Keywords: Recycling. Reuse. Hydrochloric acid. Mechanical separation. Chemical attack

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do vidro laminado.....	6
Figura 2 - Monômeros de etileno formando cadeias poliméricas .....	7
Figura 3 - Estrutura química de um segmento de cadeia de PVB.....	8
Figura 4 - Adesão entre o vidro e o PVB .....	9
Figura 5 – Para-brisa 1 .....	12
Figura 6 – Fluxograma da separação mecânica.....	13
Figura 7 – Fluxograma do ataque químico.....	14
Figura 8 – Para-brisa 2 .....	16
Figura 9 – Espectrômetro FTIR.....	17
Figura 10 - Microscópio (lupa) estereoscópio.....	18
Figura 11 – Amostras de para-brisas a) PB18 b) PB19 c) PB20.....	18
Figura 12 - Corpos de prova PB01 .....	20
Figura 13 – Resultado dos corpos de prova PB02.....	21
Figura 14 - Resultados dos corpos de prova: a) PB03 b) PB04 c) PB05 d) PB06 e) PB07 .....	21
Figura 15 - Resultado da amostra 2.....	23
Figura 16 – Resultado de PB08.....	24
Figura 17 – Resultados de a) PB09 b) PB10 c) PB11 d) PB12.....	24
Figura 18 – Resultado da terceira amostra após separação mecânica.....	27
Figura 19 - Resultado do experimento PB13 .....	27
Figura 20 - Resultados dos corpos de prova: a) PB14 b) PB15 c) PB16 d) PB17 .....	28
Figura 21 – Análises FTIR para PB13, PB14, PB15, PB16 e PB17 .....	29
Figura 22 – Microscopias ópticas de polivinil butiral em microscópio lupa (35x).....	31
Figura 23 - Resultados das amostras de para-brisas a) PB18 b) PB19 c) PB20.....	32
Figura 24 – Películas de PB18 a PB20 sem vidro.....	33
Figura 25 – Resultado de PB18, PB19 e PB20 .....	33
Figura 26 – FTIR para películas de PVB dos experimentos PB18, PB19 e PB20.....	34

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrições das rotas químicas .....	14
Tabela 2 – Experimentos para determinação das condições ideais.....	15
Tabela 3 – Secagem das películas .....	17
Tabela 4 - Comparação entre para-brisas .....	18
Tabela 5 - Comparação entre reagentes .....	21
Tabela 6 - Reduções de massa e eficiências de PB9, PB10, PB11 e PB12.....	25
Tabela 7 - Reduções de massa e eficiências de PB14, PB15, PB16 e PB17.....	28
Tabela 8 - Picos encontrados para o PVB nos experimentos PB13, PB14, PB15, PB16 e PB17 .....	30
Tabela 9 – Separação mecânica de PB18, PB19 e PB20 .....	32
Tabela 10 – Redução de massa e eficiência do processo .....	33
Tabela 11 – Picos encontrados para películas de PVB dos experimentos PB18, PB19 e PB20 .....	35

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
2	OBJETIVOS.....	3
2.1	Objetivo Geral .....	3
2.2	Objetivos Específicos .....	3
3	REVISÃO DE LITERATURA .....	4
3.1	Indústria automobilística .....	4
3.2	Legislação.....	4
3.3	Vidro.....	5
3.3.1	Vidro Laminado.....	6
3.4	Polímeros.....	7
3.4.1	Polivinil butiral.....	7
3.4.2	Filmes de polivinil butiral.....	8
3.4.3	Força adesiva .....	9
3.4.4	Reciclagem de polivinil butiral.....	10
3.5	Métodos de separação de para-brisas .....	11
4	MATERIAL E MÉTODOS .....	12
4.1	Rotas de separação do vidro das películas de PVB .....	12
4.2	Determinação das condições ideais para o ataque químico.....	15
4.3	Ataque químico com as condições ideais, variando a forma de secagem .....	16
4.4	Comparação do tratamento em diferentes para-brisas.....	18
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	20
5.1	Rota química mais efetiva .....	20
5.2	Condições do ataque químico.....	23
5.3	Influência da forma de secagem .....	26
5.4	Variabilidade das películas.....	32
6	CONCLUSÃO .....	36
	REFERÊNCIAS .....	37

## 1 INTRODUÇÃO

A redução ou prevenção de poluentes provenientes de resíduos industriais tem sido um fator preocupante há décadas. Logo, a importância da reciclagem de resíduos está aumentando em termos de reutilização de recursos, desenvolvimento sustentável e proteção ambiental (GUNER; BULBUL; DILSIZ, 2022).

Sendo assim, empresas de reciclagem e a sociedade em geral estão cada vez mais focados na reciclagem e recuperação de materiais de veículos em fim de vida (VFV). No entanto, a reciclagem de materiais geralmente tem sido orientada para os componentes metálicos considerando os valores do metal e o uso bem-sucedido das tecnologias metalúrgicas existentes. O para-brisa do VVV é negligenciado devido à falta de tecnologia (ANTHONY; CHEUNG, 2017).

De acordo com Choi, Jhae e Dong (2018), os para-brisas são feitos de vidro laminado, o qual é composto por duas camadas de vidro unidos por uma camada de polivinil butiral entre eles. Eles são produzidos sob alta pressão e temperatura em autoclave, onde dois planos de vidro são unidos por um filme com uma forte ligação adesiva.

Resíduos de pós-produção de polivinil butiral (PVB) coletados dos para-brisas de veículos em fim de vida útil e vidro laminado de construção pós-consumo são materiais poliméricos valiosos que podem ser reutilizados. Todos os anos, grandes quantidades de resíduos de PVB ainda são enterradas em aterros devido à falta de técnicas de reciclagem apropriadas. Antes da reutilização, o PVB deve ser totalmente limpo de contaminantes sólidos, como poeira de vidro, fios de aquecimento fundidos e outros resíduos de polímeros, metais e cerâmicas (KRÓLIKOWSKI; ŻACH; KALESTYŃSKI, 2022).

Estudos sobre a reutilização do PVB têm avançado em vários campos. Wang et al. (2013), relataram a regeneração de filmes de PVB através de um método seletivo de dissolução e evaporação. Zanjanijam et al. (2016), conseguiram reutilizar o PVB como um agente de endurecimento para mistura de polímeros, no qual 15% em peso de PVB é adicionado para reduzir a temperatura de transição da fase de polipropileno (PP) durante a fabricação de misturas de PP/PVB reciclado.

A possível utilização do PVB reciclado também foi relatada como ânodo de carbono para baterias de íons de lítio, onde nanofibras de carbono dopadas com nitrogênio com canais abertos são formadas através da mistura de poliácridonitrila com PVB reciclado, cujas propriedades voláteis ajudam a abrir o poros (PARK et al., 2017).

Brito et al. (2007), estudaram a influência de PVB como aditivo na estabilidade de dispersões cerâmicas à base de produtos cerâmicos à base de alumina ( $Al_2O_3$ ), zircônia ( $ZrO_2$ ) e/ou carbeto de silício (SiC). Eles concluíram que ele foi absorvido por todas as cerâmicas utilizadas, mas que essa absorção é maior em partículas carregadas positivamente.

Farias (2018), utilizaram resíduos de PVB reciclado provenientes de laminados juntamente com poli(cloreto de vinila) (PVC), para produção de blendas poliméricas. Mesmo exigindo grande trabalho, encontraram-se nesse estudo interações em termos de miscibilidade e compatibilidade.

Os estudos anteriores nos inspiraram a estender a reutilização do PVB reciclado. Portanto, o foco do trabalho consistiu na comparação da influência do tratamento mecanoquímico em películas de diferentes para-brisas afim de conhecer suas propriedades e facilitar suas reutilizações.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Esta pesquisa teve como objetivo geral comparar a influência do tratamento de remoção mecanoquímica do vidro em películas de polivinil butiral provenientes de diferentes para-brisas automotivos em fim de vida.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Analisar os processos de degradação e contaminação das películas em diferentes para-brisas.
- Facilitar a reutilização das películas.

### **3 REVISÃO DE LITERATURA**

#### **3.1 Indústria automobilística**

Em 1956, foi fundada no Brasil a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores – ANFAVEA. Essa instituição reúne empresas fabricantes de auto veículos, máquinas agrícolas e rodoviárias autopropulsadas que possuem instalações industriais e produção no país, sendo uma das principais atribuições da organização a compilação e divulgação de dados de desempenho do setor. De acordo com esta associação, a frota de automóveis em 2021 foi de 37.910.819 veículos, sendo 1.558.467 veículos novos (ANFAVEA, 2022).

O ramo automobilístico tem considerável relevância para a economia mundial e para as economias nacionais onde está presente, por conta do seu efeito de arrasto multiplicador sobre as demais cadeias produtivas e por ser um dos segmentos mais dinâmicos da indústria de transformação (JUNIOR; SANTOS; 2020). Fora da cadeia automobilística, alguns setores relacionados a ela também têm grande destaque, como máquinas e equipamentos, materiais eletrônicos, produtos de metal e artigos de borracha e plástico, indústria do aço e derivados, setor de alumínio e petroquímico e vidros.

Devido à grande utilização de veículos automotores, ocorrem os intensos problemas ambientais, como: o aquecimento global, a poluição do solo, ar e água, aumento nas emissões de gases, esgotamento de recursos naturais e, de um modo geral, os problemas do pós-consumo, como a insuficiência de espaço para o descarte dos bens obsoletos. Além disso, há o problema da mobilidade urbana, pois as cidades não estão conseguindo comportar esse número expressivo de veículos (MARIOTTI; OSÓRIO; CALGARO, 2017).

#### **3.2 Legislação**

Ainda não há no país um regulamento específico que aponte precisamente a responsabilização sobre a destinação final de VFV. Porém, existem algumas legislações, tais como a Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010 – Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e a Lei 12.977, de 20 de maio de 2014 – Lei do Desmonte que, se bem implementadas, podem contribuir para resolução desta problemática.

Com a PNRS a responsabilidade pelo lixo passa a ser compartilhada entre os cidadãos, empresas, prefeituras e os governos de âmbito estadual e federal. A Lei também evidencia a preocupação com a logística reversa, com o gerenciamento, que envolve etapas que vão desde

a coleta até a destinação final adequada dos resíduos sólidos e rejeitos (REIS; FRIEDE; LOPES, 2017).

De acordo com Tonarque e Vital (2020), a logística reversa citada na PNRS visa orientar as particularidades logísticas do retorno dos bens ao ciclo produtivo ou de negócios por meio de canais de distribuição reversos de pós venda e de pós consumo. Com isso os bens possuem valor econômico, ecológico e legal. Ela auxilia no processo de recuperação das partes dos veículos para que possam ser transportadas aos centros especializados e sejam recicladas, reutilizadas ou direcionadas para os aterros sanitários adequados e não apenas para os lixões (MELQUIADES et al, 2020).

A segunda lei é a Lei Federal nº 12.977 de 2014, chamada Lei do Desmonte, mas popularmente conhecida como Lei do Desmanche. Ela traz determinações mais severas sobre o desmanche e destruição de veículos, bem como sobre a destinação das peças veiculares. Com este decreto, a atividade de desmontagem poderá ser realizada apenas por empresas de desmontagens registrada e que se dedique às atividades legalmente definidas (SILVA, 2015).

### **3.3 Vidro**

A Sociedade Americana para Testes e Materiais (ASTM), define vidro como um produto inorgânico de fusão que foi resfriado até uma condição rígida sem cristalização. Em seu livro, Carter e Norton (2007), trazem três definições alternativas para vidro. A primeira diz que o vidro é um material sólido que não apresenta ordem de longo alcance. Esta definição é condizente com observações experimentais, mas é um pouco arbitrária.

A segunda definição diz que o vidro é um líquido que perdeu sua capacidade de fluir. Esta definição é mais ampla do que a dada pela ASTM e usa uma propriedade mecânica para descrever o vidro. A última definição diz que o vidro consiste de uma montagem sólida de compartilhamento de vértices tetraedros sem ordem de longo alcance (CARTER, NORTON, 2007).

De acordo com Setz e Silva (2019), “existem inúmeras histórias a respeito do surgimento do vidro.” Sabe-se que existe a hipótese de que os vidros possam ter sido formados de forma acidental, por meio de fogueiras que eram acesas na beira do rio, e que seriam provenientes da união de minerais alcalinos com areia.

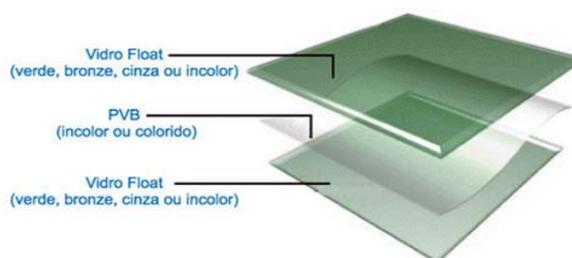
Para Lomasso et al., (2015) a utilização do vidro é ampla, abrangendo desde garrafas, produtos farmacêuticos, partes de eletrodomésticos e eletroeletrônicos, entre outros. Em aspectos de reciclagem, existem muitas vantagens em reciclar o vidro, como a redução de lixo

em aterros sanitários e o reaproveitamento do vidro em até 100%. Estima-se que para cada tonelada de vidro reciclado, gasta-se menos 70% do que se gastaria para originar um novo vidro e economiza-se 1,2 toneladas de matéria-prima (CHAPARRO et al., 2021).

### 3.3.1 Vidro Laminado

De acordo com Martin et al (2020), o vidro laminado (Figura 1) é obtido pela união de duas ou mais camadas de vidro usando uma camada intermediária polimérica (interlayer), este conjunto é levado à autoclave e submetido a pressões e temperaturas adequadas. Polímeros como polivinil butiral (PVB), ionômeros, etileno acetato de vinila (EVA) e poliuretano termoplástico (TPU) são utilizados como materiais intercalares em vidro laminado.

Figura 1 - Representação do vidro laminado



Fonte: ANAVIDRO (2013)

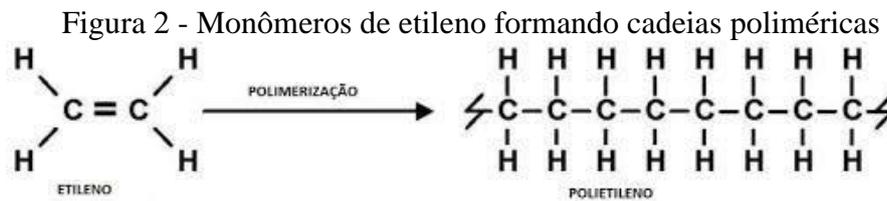
O Polivinil Butiral (PVB) é o material interlayer mais utilizado nos laminados. A utilização da camada polimérica entre as placas de vidro tem o propósito de aumentar a segurança em caso de acidentes. Em caso de choque mecânico, não há risco de quebra ou laceração, pois o material absorve o impacto e não oferece risco de cortes ou penetração (CHEN et al., 2017).

Os elementos de vidro laminado são atualmente utilizados em muitas aplicações mecânicas e estruturais, principalmente em para-brisas automotivos e em edificações, devido às suas vantagens em relação ao vidro monolítico padrão, como isolamento de vibração e ruído, transmissão de luz, proteção UV, melhoria de segurança, resistência ao impacto (LÓPEZ; NORIEGA; PELAYO, 2019).

Os vidros laminados advindos dos para-brisas após passarem pelo processo de separação da camada de PVB podem ser utilizados em diversas aplicações. Farzana e Sahajwalla (2016), estudaram a reciclagem de resíduos de vidro e polivinil butiral na produção de carbeto de silício (SiC). Neste estudo, o  $\beta$ -SiC cúbico foi formado, e a intensidade da fase foi maior nas amostras com óxido de ferro.

### 3.4 Polímeros

A palavra polímero origina-se do grego poli (muitos) e mero (unidade de repetição). Assim, um polímero é uma macromolécula composta por muitas (dezenas de milhares) de unidades de repetição denominadas meros, ligadas por ligação covalente. A matéria-prima para a produção de um polímero é o monômero, isto é, uma molécula com uma (mono) unidade de repetição. Dependendo do tipo do monômero (estrutura química), do número médio de meros por cadeia e do tipo de ligação covalente, poderemos dividir os polímeros em três grandes classes: Plásticos, Borrachas e Fibras (CANEVAROLO, 2002).



Fonte: SANTOS (2014)

Os polímeros têm se destacado por suas propriedades como: maior resistência a corrosão, flexibilidade, elasticidade, transparência, baixa densidade, baixa temperatura de processamento, baixa reatividade, entre outras propriedades. Os materiais poliméricos vêm substituindo outros materiais (couro, vidro, madeira, papéis e metais), com eficácia e vantagem (SILVA; RABELO, 2017).

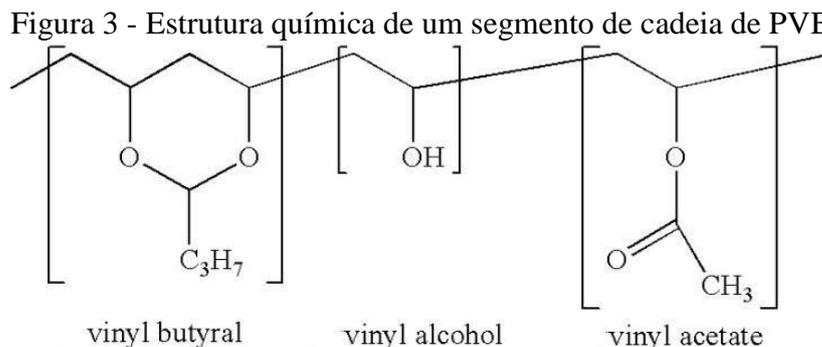
De acordo com Filho e Sanfelice (2018), quando esses materiais são extraídos de fontes naturais, como a celulose, o amido, a quitina, a quitosana, dentre outros, recebem o nome de polímeros naturais. Quando apresentam monômeros com origem em derivados do petróleo e são sintetizados em laboratório, eles recebem o nome de polímeros artificiais ou sintéticos, como o polipropileno (PP), o poli(tereftalato de etileno) (PET), o polietileno (PE) e o poli(cloreto de vinila) (PVC).

Tanto os polímeros naturais quanto os sintéticos estão envolvidos no conforto e facilitação da vida humana e são responsáveis pela própria vida, pela medicação, nutrição, comunicação, transporte, irrigação, recipiente, vestuário, registro histórico, edifícios, rodovias. Eles podem ser encontrados na forma de polímeros inorgânicos e orgânicos; revestimentos, elastômeros, adesivos, blendas, plásticos, fibras, calafetagens, polímeros em conjunto com cerâmicas, como ocorre com os laminados e compósitos (NAMAZI, 2017).

#### 3.4.1 Polivinil butiral

O polivinil butiral é um dos representantes mais importantes dos polivinil acetais e pertence ao grupo dos polímeros termoplásticos. A produção de PVB é baseada no álcool

polivinílico (PVA). Ele é originado pela condensação do PVA com n-butiral aldeído na presença de um catalisador ácido, levando a um terpolímero aleatório contendo butiral e grupos laterais hidroxila com uma pequena quantidade de unidades de acetato, Figura 3. A estrutura do PVB é composta por aproximadamente 81% de polivinil butiral, 18 a 23% de álcool polivinílico e 1 a 2% de polivinil acetato (BRENDGEN et al., 2021).



Fonte: HOEPFNER; LOOS; PEZZIN (2019)

De acordo com Suwen, Xing e Xiquiang (2018), o polivinil butiral (PVB) é um polímero com excelentes propriedades, que incluem sua boa claridade óptica, alta resistência à adesão, alta ductilidade. Ele tem sido utilizado como material primário de camada intermediária para aplicações industriais, onde se destaca a produção de vidro laminado na construção civil para fachadas arquitetônicas e em para-brisas automotivos.

O Poli (vinil butiral), PVB, foi descoberto em meados de 1927, de acordo com a patente registrada nos Estados Unidos, de número 1.725.362 em 15 de agosto de 1927, pelos químicos canadenses Howard W. Matheson e Frederick W. Skirrow.

De acordo com Carrot, Bendaoud e Pillow (2015), o PVB se tornou um grande promissor no mercado de vidro laminado a partir da década de 1930, quando passou a ser preparado com butiraldeído (BA). O mais importante, contudo, é constatar que desde então o PVB foi considerado superior aos outros polímeros de vinil acetal, pois tinha características excelentes, como a tenacidade em ampla faixa de temperaturas, como também um custo mais baixo.

### 3.4.2 Filmes de polivinil butiral

O filme de PVB é estabelecido como películas ou filmes de polivinil butiral (PVB), que, quando sujeitados a calor e pressão, aderem ao vidro (ABNT - NBR 14697), abrangendo várias funções no laminado, como: controle de porcentagem de UV, redução acústica, proteção e segurança.

Os plastificantes devem ser incorporados para melhorar a elasticidade do material, sendo responsáveis pelo caráter borrachoso do filme de PVB. Dhaliwal et al. (2002), estudaram o PVB comercial determinando que ele contém entre 20% e 25% de plastificante.

Segundo Thambiratnam e Perera (2016), o plastificante não deve afetar a adesão ao vidro, migrar para fora da matriz polimérica durante o processamento, nem afetar as propriedades ópticas (ou seja, gerar neblina ou amarelecimento). Outros plastificantes utilizados são: adipatos (adipato de dialquilo, adipato dioctil), os citratos (citrato de trietilo e, citrato de tributilo) e óleo de rícino bruto (JESUS, 2016).

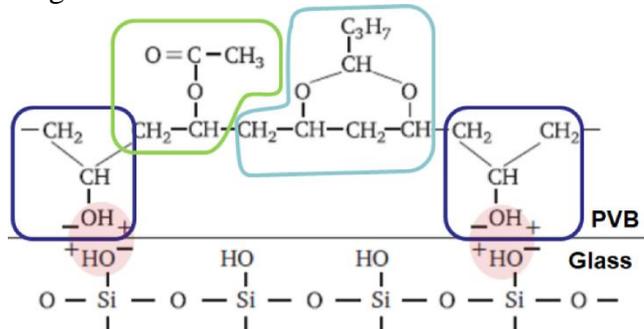
De acordo com Martín et al. (2020), a película de PVB para vidro laminado é atualmente fabricada e comercializada por poucas empresas em todo o mundo, resultando em um mercado muito concentrado e dominado, por Eastman (EUA), Kuraray Group (Trosifol e DuPont) e Sekisui (Japão). Já o vidro laminado é fabricado por muitas pequenas indústrias. O processo de laminação ideal, que garante uma adesão adequada entre o vidro e o interlayer, depende de muitos fatores (incluindo material do interlayer, número de camadas de vidro, tamanho do painel de vidro, entre outros).

### 3.4.3 Força adesiva

A adesão entre o vidro e o PVB é um destaque importante quando se trata de para-brisas, pois fornece o que mais se exige de vidros laminados, a segurança, além de ser determinante em relação à durabilidade.

A Figura 4, demonstra as ligações existentes entre o PVB e o vidro. Elas são caracterizadas por densas ligações de hidrogênio reversíveis entre o álcool polivinílico no PVB e o grupo silanol no vidro, representados pelos grupos químicos circutados na Figura 4.

Figura 4 - Adesão entre o vidro e o PVB



Fonte: KUTSCHE (2015)

O grau de adesão pode ser controlado através da composição do filme, por exemplo, o teor de álcool polivinílico, a presença de aditivos reguladores de adesão ou o teor de umidade intercamada. Em Ensslen (2005) é fornecido o teor de umidade ideal de  $0,45\% \pm 0,07\%$  no

filme à base de PVB. Esta faixa permanece em grande parte constante a uma umidade relativa de 30%. Em uma umidade relativa entre 50 e 70%, o teor de água no filme aumenta linearmente. A partir de um teor de água de 1%, a ligação adesiva se deteriora enormemente e de 2% o filme torna-se leitoso e turvo.

Além das propriedades do filme, outros fatores também têm uma influência considerável na adesão. Se os vidros não forem limpos adequadamente, pode haver graxa e calcário na superfície e, assim, impedir a ligação de hidrogênio. Kuraray (2012), recomenda água de lavagem destilada ou totalmente dessalinizada, uma vez que os íons alcalino-terrosos ( $\text{Ca}^{++}$  e  $\text{Mg}^{++}$ ) reduzem a adesão do vidro mesmo em pequenas quantidades.

Na etapa de fabricação do vidro ele passa pelo banho de estanho, afim de reduzir a rugosidade na superfície. Nessa etapa, devido a diferença de densidade entre o estanho e a massa, há um paralelismo entre as duas superfícies, fazendo com que o vidro flutue sobre o estanho. A face com estanho do vidro tem uma estrutura de superfície mais lisa e pode apresentar íons  $\text{Sn}^{++}$ , logo, geralmente observa-se uma adesão um pouco menor. Finalmente, erros no processo de laminação podem resultar em bolhas de ar entre o interlayer e o vidro, que impedem o contato plano entre o vidro e o filme e, portanto, levam a níveis de adesão insuficientes (Schuster, Schneider e Nguyen, 2020).

#### **3.4.4 Reciclagem de polivinil butiral**

Segundo Santo (2019), as rebarbas de PVB provenientes do processo de laminação dos vidros e bobinas de filmes de PVB são inviáveis para serem reinseridas no processo de fabricação e acabam sendo descartadas em aterros sanitários. Apenas em São Paulo, são descartadas cerca de 150 toneladas/mês para esse tipo de resíduo.

As diretrizes para reaproveitamento de resíduos, juntamente com o aumento do custo da matéria-prima e abundância de resíduos PVB de boa e constante qualidade, provenientes de vidros de segurança, tornam o PVB muito interessante para fabricantes que almejam uma possível segunda vida para os produtos (BENDAOU et al., 2013).

Park et al. (2017), investigaram a aplicação para os resíduos de PVB provenientes de veículos em fim de vida. Eles utilizaram silício revestido de carbono (CCSi) como um ânodo para baterias de íon de lítio sintetizado, usando o PVB como fonte de carbono. Tal uso aprimorou o desempenho eletroquímico das baterias.

Outra aplicação para os resíduos de PVB foi combiná-los com poliamida reforçada com fibra de vidro (PA-GF). Os polímeros reforçados com fibras, devido à sua alta resistência

específica são comumente usados em aplicações tribológicas, e lubrificantes sólidos são adicionados a eles para aumentar ainda mais sua resistência ao desgaste (CERVANTES et al., 2022).

### **3.5 Métodos de separação de para-brisas**

Segundo Gomes (2018), a principal dificuldade para reciclar para-brisas e vidros laminados é a separação entre o filme e o vidro. O método de separação entre o PVB e o vidro mais utilizado no mundo é o método da trituração. Nesse processo os para-brisas são triturados, moídos e, através do processo de pulverização e peneiramento, é feita a desunião entre o PVB e o vidro. No entanto, após esse processo é gerado um resíduo que contém PVB e fragmentos de vidro que ficaram aderidos ao filme.

Tupy et al. (2014), relataram a separação mecanoquímica do vidro do para-brisa da camada intermediária por meio da tecnologia de delaminação com alteração mínima da propriedade do PVB. A separação mecanoquímica do vidro do para-brisa foi realizada em escala laboratorial, logo, segundo os autores, a reprodutibilidade em escala industrial pode ser um desafio, pois as partículas de vidro podem ser facilmente incorporadas ao PVB, o que complica ainda mais o problema da separação mecânica.

Outro método de separação mecanoquímica foi realizada por Swain et al. (2015). Eles desenvolveram em laboratório um processo químico-mecânico de separação entre o PVB e o vidro. Nesse processo eles realizaram etapas de moagem e trituração dos para-brisas. A composição média de vidro e PVB encontrada nos resíduos foi de aproximadamente 75% de PVB e 25% de vidro. Ainda de acordo com os autores, os pedaços de PVB residuais foram mecanicamente agitados no meio surfactante não iônico (D201) por um determinado período de tempo, seguido por uma separação por um filtro de tela de malha de aço inoxidável.

Soos et al. (2021), desenvolveram um método para manter o filme de PVB compacto após a decomposição. Para isso, eles primeiramente fizeram um teste de quebra do vidro laminado, para adequar o formato da ferramenta de modo que o vidro se rachasse em tamanhos idênticos. Posteriormente eles fizeram testes de vibração utilizando vibração mecânica para moagem das amostras de vidro laminado. A próxima etapa foi lavar o filme interlayer para remover fragmentos remanescentes de vidro, combinando temperatura e uma solução aquosa de  $\text{CaCl}_2$ . Esta técnica garantiu o princípio da “integridade” obtendo um teor de vidro aderente de até 100 ppm. Esta quantidade residual de vidro é aceitável para a reciclagem industrial de folhas de PVB.

Desta forma, com base nos métodos vistos na literatura, a autora notou a importância de se combinar uma etapa de separação mecânica seguida por uma etapa química com o objetivo de reduzir ao máximo o percentual de vidro nas películas mantendo suas integridades.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Rotas de separação do vidro das películas de PVB

Em todos os experimentos deste estudo, foram utilizados para-brisas provenientes de veículos em fim de vida cedidos pela empresa CNR automotiva localizada na cidade de Lavras. O primeiro para-brisa utilizado está representado na Figura 5. Não haviam informações suficientes de seu modelo e fabricante.

Figura 5 – Para-brisa 1



Fonte: Autor (2021)

Para realização da separação mecânica, inicialmente seriam utilizados trituradores da empresa que cedeu os para-brisas, mas eles se encontravam indisponíveis. Portanto, o para-brisa foi colocado sob uma lona e martelado com um martelo Tramontina de 327,47g, até ser possível separar uma amostra de aproximadamente 50x40 cm. A massa da seção foi pesada com uma balança eletrônica modelo B-200AS-BI de sensibilidade 0,01g, para controle da massa inicial da seção.

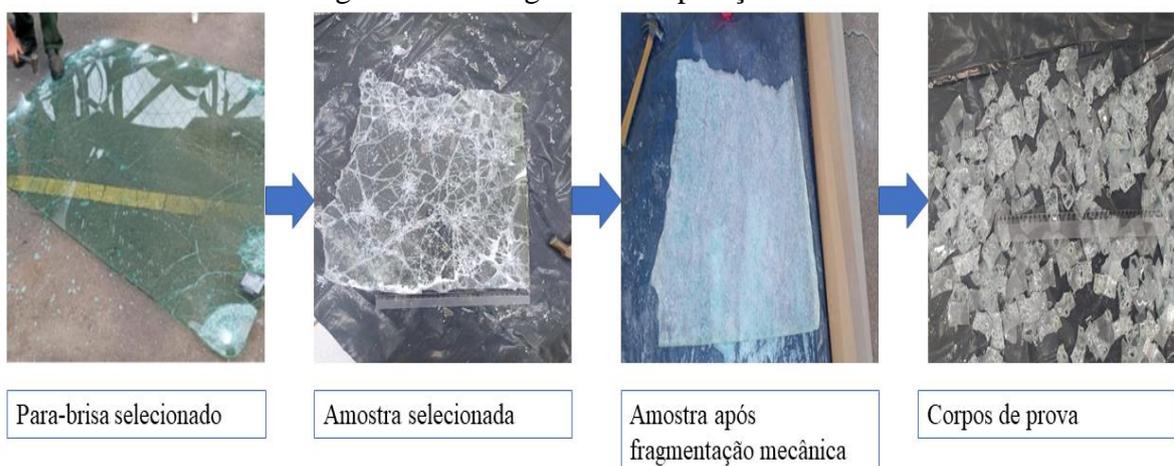
Com o intuito de fragmentar o vidro e realizar o corte das películas, a amostra de para-brisa foi martelada novamente, por aproximadamente 60 minutos. Após esse processo, ela foi pesada novamente e a redução percentual de massa foi calculada a partir da Equação (1). A quantidade de vidro também foi pesada para conferência da massa final da seção, empregando a Equação (2).

$$\text{Redução percentual de massa} = \frac{\text{massa inicial} - \text{massa final}}{\text{massa inicial}} * 100 \quad (1)$$

$$\text{Massa final} = \text{Massa inicial} - \text{massa de vidro} \quad (2)$$

Foram confeccionados 160 corpos de prova utilizando estilete e tesoura. Eles possuíam dimensões aproximadas de 2x4 cm, medidas com paquímetro King Tools. Uma vez que a presença dos fragmentos de vidro dificultam o processo de corte do filme, é difícil controlar os formatos e dimensões das películas. O processo de separação mecânica foi nomeado de PB01. A Figura 6 apresenta um fluxograma das etapas realizadas na separação mecânica.

Figura 6 – Fluxograma da separação mecânica



Fonte: Autor (2021)

Dez corpos de prova foram selecionados, e nomeados de PB02. Eles foram pesados na balança eletrônica. Em seguida tiveram todo seu vidro retirado manualmente com o auxílio de uma pinça e foram pesados novamente. A redução percentual de massa para o conjunto foi calculada por meio da Equação (1) e o valor encontrado foi adotado como 100% de eficiência do processo de retirada de vidro das películas.

Para continuidade da remoção do vidro no filme de PVB, foram realizados ataques químicos com diversos reagentes, a fim de analisar qual deles possui maior potencial para remoção do vidro das películas de PVB. Para cada rota foram utilizadas 10 películas em triplicata, ou seja, foram utilizadas 30 películas em cada rota química. As películas foram pesadas, afim de calcular as reduções percentuais ao final dos ataques químicos. Na Tabela 1 estão indicadas as rotas utilizadas nos ataques químicos.

Tabela 1 – Descrições das rotas químicas

Experimento	Reagente	Marca	Concentração
PB03	Hidróxido de sódio 97%	Neon	0,5% (p/v)
PB04	Ácido cítrico 99%	Isofar	0,5% (p/v)
PB05	Água	-	-
PB06	Surfactante	Detergente	0,5% (v/v)
PB07	Ácido clorídrico 37%	Anidrol	0,5% (p/v)

Fonte: Autor (2021)

Com o auxílio de provetas, foram preparadas para cada rota uma solução de 750 ml em água de torneira e adicionados os respectivos reagentes indicados na Tabela 1. O pH foi medido com uma fita de pH, afim de garantir o caráter ácido ou básico. Após o preparo, ela foi dividida em 3 béqueres, cada um contendo 250 ml de solução, para realização dos testes em triplicata.

Cada solução foi aquecida em chapa aquecedora SL-91 e teve sua temperatura medida por um termômetro laboratorial até entrar em ebulição, que ocorria em média entre 91-98°C. Para cada rota foram pesados em balança eletrônica, 30 películas aleatórias, para posterior cálculo da redução percentual de massa. Elas foram divididos nos 3 béqueres e adicionadas à cada solução. Todos os ataques químicos foram realizados na cabine de exaustão modelo CI1500 marca Buzatto's, afim de garantir a segurança do operador. A Figura 7 apresenta um fluxograma das etapas realizadas na separação mecânica.

Figura 7 – Fluxograma do ataque químico



Fonte: Autor (2021)

Após um período de ação de 2 horas para cada rota, com o auxílio de uma pinça e peneira, os fragmentos foram separados das soluções, lavados em água corrente e foram levados para secagem em estufa modelo SL-100 marca SOLAB a 60°C por um período de 7 dias. Tal temperatura foi escolhida, pois de acordo com Khurma, Rohindra, Devi (2005), a temperatura

de transição vítrea do polivinil butiral é de 71°C, logo, com o emprego de uma temperatura menor, teoricamente não haverá perda de massa por degradação térmica.

Posteriormente, as amostras foram novamente pesadas para calcular as reduções percentuais de massa por meio da Equação (1) e a eficiência do processo que foi calculada tomando como base o experimento PB02. A partir da eficiência em cada processo, foi possível identificar qual dos reagentes tem maior potencial na separação do vidro das películas. Para comparar se o desempenho de cada reagente influenciou nas eficiências dos processos foi realizada a análise estatística com Teste Tukey de significância ( $p < 0,05$ ).

#### 4.2 Determinação das condições ideais para o ataque químico

Conforme será mostrado no tópico 5.1, o reagente adotado como o com maior potencial para eficiência da separação do vidro da película de PVB foi o ácido clorídrico. O próximo passo foi variar composição, temperatura e tempo de ação do ácido nas películas afim de determinar condições ideais para uma maior eficiência do ataque químico, potencializando a retirada de vidro.

Para isto foi utilizado o mesmo para-brisa do experimento anterior, onde foi separada uma nova amostra também de dimensões aproximadas de 50x40 cm. A separação mecânica ocorreu conforme PB01 e o fluxograma da Figura 6, com a diferença de que foram confeccionadas 130 películas para os experimentos.

O mesmo procedimento de PB02 foi realizado e foi nomeado de PB08. Os passos do ataque químico e secagem também ocorreram conforme o estudo das rotas químicas e o fluxograma da Figura 7, com as diferenças apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Experimentos para determinação das condições ideais

Experimento	Concentração de HCl (%p/v)	Temperatura	Tempo de ação (horas)	Água (ml)
PB09	<b>0,5</b>	<b>Ebulição estática</b>	<b>2</b>	1500
PB10	<b>0,05</b>	Ebulição estática	2	750
PB11	0,5	<b>Temperatura ambiente</b>	2	1500
PB12	0,5	Ebulição estática	<b>1</b>	1500

Fonte: Autor (2022)

Neste estudo, teve-se a cautela de variar apenas um parâmetro por vez em cada experimento. As comparações foram feitas após o período de secagem de 7 dias. Elas foram feitas entre PB09 e PB10 para verificar o efeito de concentrações diferentes de ácido clorídrico,

PB09 e PB11 para comparação entre o efeito de temperatura ambiente e de ebulição, entre os experimentos PB09 e PB12 para comparação do tempo sob ação da solução de 2 horas e 1 hora. Para comparar o efeito de cada variação na eficiência dos processos, foi realizada a análise estatística com o software SISVAR, utilizando os mesmos parâmetros de 4.1.

### **4.3 Ataque químico com as condições ideais, variando a forma de secagem**

Após a determinação das condições ideais determinadas em 4.2, uma nova separação mecanoquímica foi realizada. Utilizou-se nesta etapa um para-brisa de VFV fabricado pela empresa Pilkington, indicado na Figura 8.

Figura 8 – Para-brisa 2



Fonte: Autor (2022)

A separação mecânica seguiu PB01 e o fluxograma da Figura 6, com a diferença de que foram utilizadas para este estudo uma amostra de 60x40 cm, e 50 películas de dimensões 8x4 cm. As películas foram confeccionadas em dimensões maiores com o intuito de realizar testes de tração, que posteriormente não foram realizados devido à fragilidade das películas. As 10 películas sem vidro utilizadas como eficiência do processo neste estudo foram nomeadas de PB13.

O ataque químico ocorreu similarmente ao fluxograma da Figura 7, com as diferenças que neste experimento foi preparada uma solução de 1600 ml de ácido clorídrico 0,05% p/v em água de torneira. Essa solução foi dividida em 4 béqueres de 400 ml cada, levadas a temperatura de ebulição e as películas ficaram em solução por 1 hora. A secagem das películas ocorreu por métodos distintos, conforme indicado na Tabela 3.

Tabela 3 – Secagem das películas

Experimento	Secagem
PB14	Secagem com ácido em estufa
PB15	Secagem com ácido ao ar
PB16	Secagem sem ácido em estufa
PB17	Secagem sem ácido ao ar

Fonte: Autor (2022)

Observações:

- Os corpos de prova sem ácido foram lavados com água corrente antes da secagem.
- As películas secas ao ar sem ácido ficaram em bancadas no laboratório e a secagem ocorreu em aproximadamente 22°C.
- As películas secas ao ar com ácido ficaram dentro da cabine de exaustão para que o ácido não fosse evaporado.
- A estufa empregada na etapa de secagem estava em 60°C.
- Todo o processo de secagem foi realizado por um período de 7 dias.

Após a secagem foram calculadas as reduções percentuais e eficiência do processo, afim de verificar qual método é menos agressivo para as películas. Além disso para este estudo foram realizadas análises de espectroscopia vibracional no infravermelho, empregando um espectrômetro FT-IR Varian 600-IR com transformada de Fourier (FTIR), com acessório GladiATR da Pike Technologies acoplado para medidas por reflectância total atenuada (ATR) a 45° com cristal de seleneto de zinco. A faixa espectral analisada foi de 400 a 4.000  $\text{cm}^{-1}$  com resolução de 2  $\text{cm}^{-1}$ . Tais análises foram realizadas nas películas para identificar os componentes da amostra, afim de identificar a presença de vidro. A Figura 9 mostra o equipamento utilizado.

Figura 9 – Espectrômetro FTIR



Fonte: Autor (2022)

Afim de observar as amostras de maneira aumentada para verificá-las com mais detalhes, selecionou-se uma película de cada secagem e elas foram analisadas em microscópio (lupa) estereoscópio binocular Even (Figura 10), com iluminação de LED, utilizando um aumento de 35 vezes.

Figura 10 - Microscópio (lupa) estereoscópio



Fonte: Autor (2022)

#### 4.4 Comparação do tratamento em diferentes para-brisas

Conforme será mostrado no tópico 5.3, o ataque químico estabelecido para o primeiro para-brisas não foi tão eficiente para o segundo para-brisas. Tal fato evidenciou a importância de estudar a variabilidade de películas de diferentes para-brisas. Portanto, a separação mecanoquímica foi realizada em 3 para-brisas distintos, afim de comparar a influência do tratamento em películas de polivinil butiral distintas. As características dos para-brisas utilizados estão indicadas na Tabela 4.

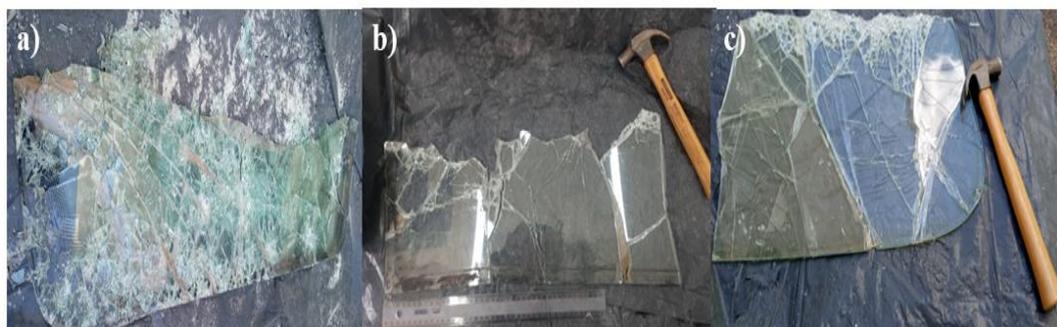
Tabela 4 - Comparação entre para-brisas

Para-brisa	Experimento	Fabricante	Dimensão (cm)
3	PB18	Saint Gobain	60x16
4	PB19	-	57x19
5	PB20	-	45x27

Fonte: Autor (2023)

Até a realização deste estudo, a maioria das películas estudadas apresentaram rasgos provenientes da separação mecânica. Neste tópico, as amostras foram cortadas em dimensões menores, para que fosse necessário um tempo menor de separação mecânica, afim de agredir menos as películas. As amostras utilizadas estão dispostas na Figura 11.

Figura 11 – Amostras de para-brisas a) PB18 b) PB19 c) PB20



Fonte: Autor (2023)

As 10 películas sem vidro utilizadas como eficiência do processo neste estudo foram nomeadas de PB18-1 a PB20-1. O restante da etapa de separação mecânica seguiu o mesmo processo de PB01 e o fluxograma da Figura 6, respectivamente. Os ataques químicos foram nomeados respectivamente de PB18-2 a PB20-2, seguindo o fluxograma da Figura 7 e os procedimentos de PB17.

Após a secagem das películas e os cálculos de redução e eficiência, a estatística foi feita seguindo os processos anteriores, para analisar a eficiência em para-brisas de modelos distintos. Além disso, uma película de cada tratamento foi examinada por FTIR, afim de verificar as ligações existentes, bem como a presença de vidro e plastificantes nas películas e a contaminação das películas com gases, pois vale salientar que se tratam de para-brisas VFV. O FTIR seguiu os mesmos parâmetros do teste realizado na etapa 4.3.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Rota química mais efetiva

Com a etapa de separação mecânica, aplicando-se (1) encontrou-se uma redução percentual de massa de 59,75% e com o emprego de (2), encontrou-se uma massa final de 648,46g da amostra de para-brisa. Com a redução encontrada confirmou-se que para o reaproveitamento da película de PVB, ainda se faz necessário a etapa de ataque químico para o descolamento dos vidros residuais da película. A Figura 12 apresenta o resultado de alguns corpos de prova após passarem pela etapa de separação mecânica.

Figura 12 - Corpos de prova PB01



Fonte: Autor (2021)

Os fragmentos de cor mais escura representam amostras da borda do para-brisa e os mais claros representam amostras do meio do para-brisa. No processo de martelar as amostras observou-se que as bordas demandaram mais tempo para serem quebradas e que quanto mais intenso o processo, mais rápido o vidro se desgrudava do PVB, logo, em um triturador esse processo deve ser facilitado.

A aderência é maior nas bordas dos para-brisas porque nelas geralmente há a presença de degradê ou de detalhes impressos no vidro, o que faz com que a transparência não atinja 100% nesses locais. Dessa forma, as bordas são atingidas de forma menos intensa pelos raios ultravioleta e a ligação do vidro ao PVB é conservada em maior grau.

No experimento PB02, encontrou-se com o emprego de (1), uma redução percentual de massa de 80,55%. Tal redução foi considerada como 100% de eficiência do processo, ou seja, os 19,45% de massa restantes se devem a massa das películas. A Figura 13, mostra o resultado das películas de PB02 sem vidro.

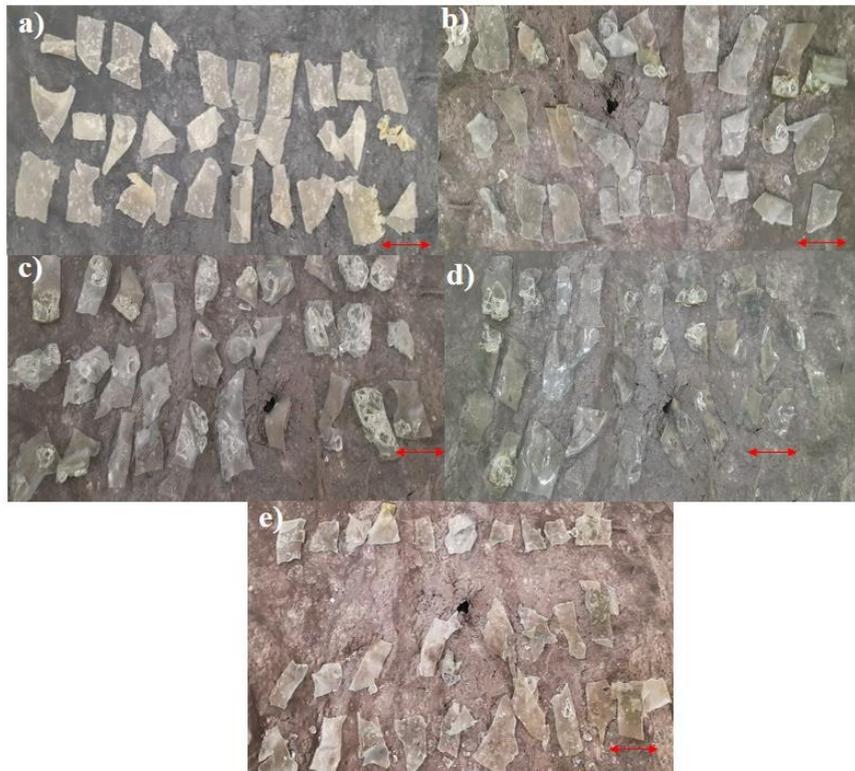
Figura 13 – Resultado dos corpos de prova PB02



Fonte: Autor (2021)

Os resultados de PB03 a PB07 estão dispostos na Figura 14. Em todos os experimentos as películas ficaram amolecidas e aderiram umas às outras após o período de secagem. Tal fator resultou em rasgos nas mesmas, no processo de forçar as separações entre elas.

Figura 14 - Resultados dos corpos de prova: a) PB03 b) PB04 c) PB05 d) PB06 e) PB07



Fonte: Autor (2021)

Após o ataque químico, os corpos de prova da borda continuaram com vidro, mas apenas pedaços maiores e majoritariamente das bordas. Os fragmentos menores se soltaram totalmente ou apenas ao encostar com a pinça eles se desprenderam do PVB. O que permitiu à autora concluir que a etapa de separação mecânica é de extrema importância e o vidro deve ser reduzido ao máximo nessa etapa para que o ataque químico seja satisfatório. Na tabela 5 encontram-se os resultados de redução de massa e eficiência encontrados de PB03 a PB07.

Tabela 5 - Comparação entre reagentes

Experimento	Reagente	Redução de massa (%)	Eficiência (%)
PB03	Hidróxido de sódio 97%	45,7 ± 2,3	56,8 ± 2,8
PB04	Ácido cítrico	75,1 ± 11,2	93,3 ± 14,0
PB05	Água	27,7 ± 1,8	34,4 ± 2,2
PB06	Surfactante	53,1 ± 10,0	65,9 ± 12,4
PB07	Ácido clorídrico 37%	80,6 ± 8,6	100 ± 10,6

Fonte: Autor (2021)

A utilização de NaOH no ataque químico veio do estudo de Gomes (2018), onde ele preparou soluções básicas em concentrações de 0,125mol/l e 0,250mol/l. Para o experimento PB03, observou-se que restaram grandes fragmentos de vidro o meio básico não foi efetivo para o ataque químico. Estes resultados foram surpreendentes, uma vez que pelo caráter químico do vidro esperava-se uma redução de massa maior para este experimento do que para os que foram realizados em meio ácido.

Assim como em PB03, em PB04 os cacos de vidro remanescentes eram de granulometria maiores. Porém, o percentual de eficiência teve um aumento significativo, levando a uma hipótese muito importante, de que talvez a reação seja mais eficiente em meio ácido, onde o pH é menor. A escolha do ácido cítrico para o ataque químico provém do fato dele não ser capaz de solubilizar o PVB, segundo Pinaço (2021).

Observou-se realizando o experimento apenas com água, em PB05 que a integridade das películas se manteve, porém elas ainda permaneceram com muitos fragmentos de vidro. A presença do vidro em grandes quantidades dificulta a reutilização da película de PVB.

A eficiência encontrada foi muito pequena, confirmando a hipótese de que a separação usando somente água em estado de ebulição não é eficaz para separação, sendo necessário um reagente para potencializar o efeito do ataque químico.

A utilização do detergente como surfactante veio do estudo de Swain et al. (2015), onde eles utilizaram um surfactante não identificado para potencializar o ataque químico. No trabalho, eles obtiveram um resultado significativo de mais de 75% de eficiência.

Em PB06, a integridade se manteve para a maioria das películas, mas assim como em PB05, muitos cacos de vidro permaneceram nas películas. A eficiência encontrada foi próxima a do experimento PB03, o que era não esperado, pois o pH da solução foi de 6, o que conferiu

a ela um caráter ácido. Esperava-se uma eficiência próxima às encontradas para os ácidos utilizados. Embora a utilização do detergente tenha sido mais efetiva que a de água e hidróxido de sódio, variáveis como marca do detergente, componentes presentes na composição podem dificultar o processo, se aplicado em grande escala.

A utilização do ácido clorídrico para os ataques também adveio de Pinaço (2021). Com este ataque, visivelmente não se encontraram vidro nas películas. Por meio dos cálculos, a eficiência do processo chegou a 100%. Tal fato confirmou a ideia de que a reação é mais eficiente em meio ácido, onde o pH é menor.

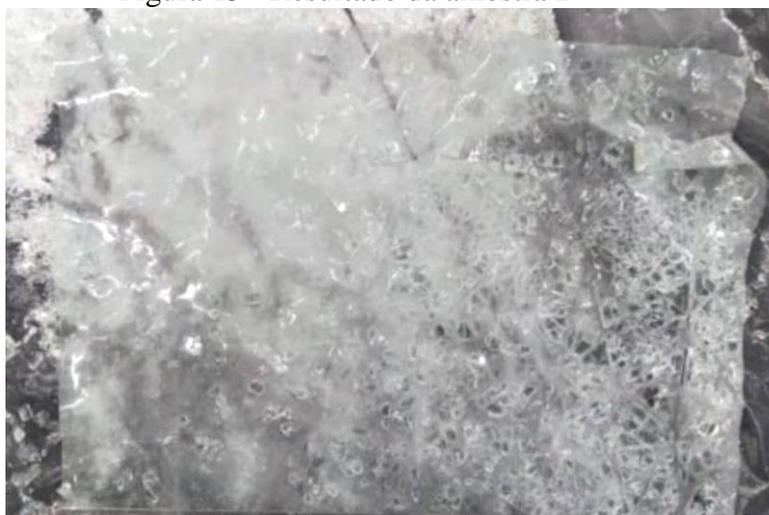
Com o teste estatístico Tuckey de significância ( $p < 0,05$ ), encontrou-se um valor de  $p = 0,0003$ . Isto mostra que estatisticamente o reagente utilizado ocasionou diferenças significativas na eficiência do processo. Concluiu-se que o ácido clorídrico ocasionou maior redução de vidro nas películas.

## 5.2 Condições do ataque químico

Com a definição de que o ácido clorídrico funciona de forma mais eficiente para o ataque químico, o próximo passo foi variar concentração, temperatura e tempo de ação do ácido nas películas, como alternativas para manter a integridade das películas.

A Figura 15 apresenta o resultado da amostra confeccionada para determinação das condições ideais após a separação mecânica. A redução de percentual de massa com o emprego de (1) foi de 71,72%, ou seja, apenas com a primeira etapa foi possível diminuir consideravelmente a quantidade de fragmentos de vidro presentes no filme de PVB. A massa final encontrada para a amostra com o emprego de (2) foi de 526,41g.

Figura 15 - Resultado da amostra 2



Fonte: Autor (2022)

No experimento PB08, encontrou-se com o emprego de (1), uma redução percentual de massa de 73,45%. Tal redução foi considerada como 100% de eficiência do processo. Observou-se que mesmo utilizando o mesmo para-brisa da etapa anterior, o peso das películas foi alterado utilizando amostras de locais diferentes. Isso ocorre devido à dificuldade em produzir corpos de prova de mesmas dimensões. A Figura 16 mostra os corpos de prova sem vidro.

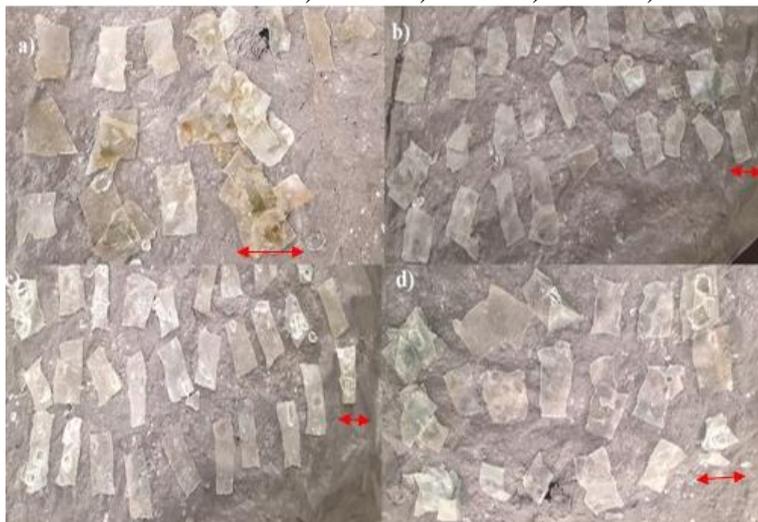
Figura 16 – Resultado de PB08



Fonte: Autor (2022)

Na Figura 17 está o resultado de PB09 a PB12. Em PB09, visivelmente não se encontraram vidro nas películas, exceto alguns vidros de grande granulometria, que como vistos anteriormente, são mais difíceis para serem removidos.

Figura 17 – Resultados de a) PB09 b) PB10 c) PB11 d) PB12



Fonte: Autor (2022)

Pela análise das imagens constatou-se que a integridade das películas foi comprometida. Houve uma aderência muito grande entre as películas, não sendo possível as separar e além disso elas apresentaram um aspecto amarelado. Tal aspecto é um indicativo de degradação, que

pode ser explicado pelo tempo de estufa prolongado e pelo ataque extremamente ácido, já que o pH da solução ficou entre 1 e 2. Na tabela 6 estão apresentados as eficiências e reduções de massas dos experimentos.

Tabela 6 - Reduções de massa e eficiências de PB09, PB10, PB11 e PB12.

Experimento	Condições	Redução de massa (%)	Eficiência (%)
PB09	0,5% de HCl em ebulição estática por 2 horas	66,5 ± 7,1	92,8 ± 9,9
PB10	0,05% de HCl em ebulição estática por 2 horas	68,0 ± 1,1	94,8 ± 1,5
PB11	0,5% de HCl em temperatura ambiente por 2 horas	11,5 ± 9,9	15,6 ± 13,5
PB12	0,5% de HCl em ebulição estática por 1 hora.	73,1 ± 0,01	99,5 ± 0,01

Fonte: Autor (2022)

Para PB09 esperava-se uma eficiência maior, visto que o ataque químico foi realizado replicando PB07. A divergência nos resultados ocorreu devido à presença de alguns fragmentos grandes de vidro, que deveriam ter sido retirados na separação mecânica e tiveram a remoção dificultada no ataque químico.

Para o experimento PB10, visualmente notou-se que muitos cacos de vidro foram retirados e que ocorreu a união entre algumas películas. Notou-se que PB09 e PB10 apresentaram reduções e eficiências muito similares. No entanto, PB10 teve uma eficiência superior em 2%. Portanto, a concentração de ácido clorídrico não influenciou de forma significativa na eficiência da reação.

Pelo teste Tuckey ( $p < 0,05$ ), encontrou-se  $p = 0,7804$ , de forma que se confirmou que a concentração de ácido não influenciou significativamente na eficiência do processo químico. Porém resolveu-se adotar a menor concentração utilizada visando a integridade das películas.

Para PB11, notou-se que poucos filmes se desprenderam da solução. Visualmente, percebeu-se que a ação da solução em temperatura ambiente, que ocorreu em 23°C, não foi eficiente. A superioridade em eficiência de PB09 foi de 77,2% demonstrando que o experimento quando realizado em ebulição estática é muito superior à temperatura ambiente.

Pelo teste Tuckey ( $p < 0,05$ ), encontrou-se  $p = 0.0010$ . Deste modo confirmou-se que a temperatura influencia na eficiência do processo. De forma que a temperatura de ebulição estática foi adotada como condição ideal para os próximos experimentos.

Para PB12, visualmente notou-se que houve uma redução significativa de vidro, pois muitos cacos se desprenderam das películas, exceto em algumas. Notou-se uma elevada aderência entre as películas, que como já visto anteriormente é comum após a secagem.

Comparando PB09 com PB12, o último foi mais eficiente em 6,8%. Esperava-se uma eficiência maior para PB12, uma vez que o tempo de ação foi maior, logo mais vidro deveria ter sido desprendido. Por meio da comparação visual percebeu-se que um tempo de ação mais prolongado degrada de forma mais agressiva as películas.

Pelo teste Tuckey ( $p < 0,05$ ), encontrou-se  $p = 0.3585$ . Desta forma o tempo de ação não influenciou de forma significativa nos testes. Porém, visando pela menor degradação das películas, a autora optou por realizar os próximos experimentos utilizando 1 hora, assim as películas ficariam menos tempo expostas à ação do ácido.

### **5.3 Influência da forma de secagem**

Para confecção da terceira amostra, no processo de beneficiamento mecânico, observou-se que a seção se rasgou em vários lugares devido aos golpes com martelo. Esses rasgos também ocorreram porque a adesão do vidro no PVB estava alta, logo, houve uma dificuldade muito grande para conseguir retirar o vidro da seção.

De acordo com Mohammad et al. (2019), se houver muita adesão, pode haver pouca descolagem o que pode resultar em rasgo precoce da camada intermediária. Este rasgo precoce ocorre porque o interlayer não é capaz de se deformar muito.

No entanto, mesmo com a dificuldade encontrada, nesta etapa conseguiu-se reduzir significativamente a massa da seção empregada. Com o emprego da Equação (1) encontrou-se uma redução percentual de massa de 69,28% e massa final de 741,24g. A amostra após a separação mecânica está apresentada na Figura 18.

Figura 18 – Resultado da terceira amostra após separação mecânica



Fonte: Autor (2022)

Na figura 19 estão apresentados o resultado do experimento PB13. Encontrou-se uma redução percentual de massa com o emprego de (1) de 64,74%. Este valor foi considerado como 100% de eficiência do processo de retirada de vidro das películas.

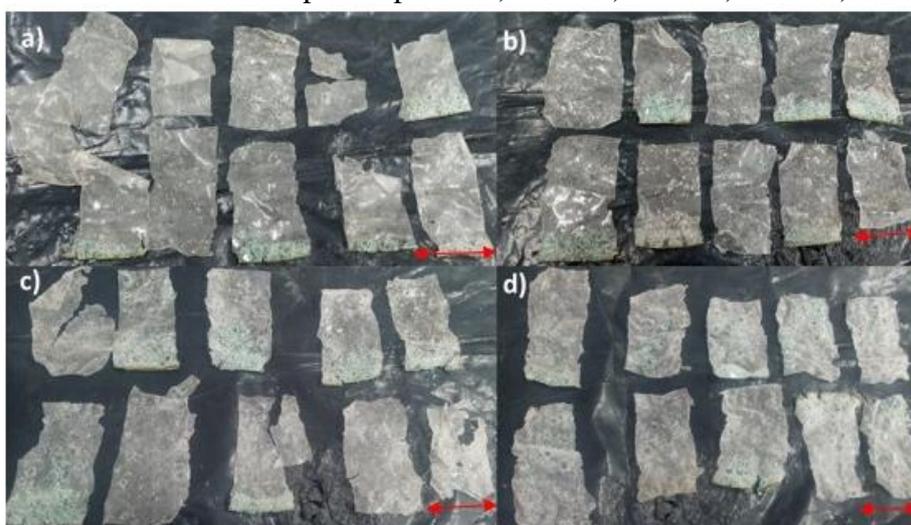
Figura 19 - Resultado do experimento PB13



Fonte: Autor (2022)

As películas ficaram com muitas marcas, de tamanhos e profundidades distintas que são influenciadas diretamente pela força e frequência das marteladas. Isto ocorreu porque com o uso do martelo é impossível replicar as mesmas condições de operação em todas as partes do para-brisa. Gomes (2018), usou em seus estudos uma calandra automática para aplicar as mesmas condições de testes para todos os copos de prova, com menor tempo de operação. Ele identificou que podem ser realizados no máximo 3 passes sem danificar o filme. Na Figura 20 estão os resultados dos corpos de prova após o período de secagem de 7 dias.

Figura 20 - Resultados dos corpos de prova: a) PB14 b) PB15 c) PB16 d) PB17



Fonte: Autor (2022)

Visualmente e pela quantidade de vidro que se despreendeu das películas, notou-se que as mesmas ainda ficaram com muitos fragmentos de vidro, o que demonstrou que o filme de PVB estava com maior aderência para este para-brisa. Como não se sabem as origens deles, não há como prever se eles possuem a mesma formulação. Logo, supõe-se que os parâmetros do tratamento químico devem ser ajustados de acordo com a variabilidade dos para-brisas, Na Tabela 7 estão apresentados os resultados de reduções de massa e eficiências do processo de PB14 a PB17.

Tabela 7 - Reduções de massa e eficiências de PB14, PB15, PB16 e PB17

Experimento	Secagem	Redução (%)	Eficiência (%)
PB14	Secagem com ácido em estufa	53,5 ± 10,8	82,6 ± 16,7
PB15	Secagem com ácido ao ar	43,3 ± 10,8	67,0 ± 16,7
PB16	Secagem sem ácido em estufa	33,2 ± 10,8	51,3 ± 16,7
PB17	Secagem sem ácido ao ar	29,4 ± 10,8	45,4 ± 16,7

Fonte: Autor (2022)

Observou-se que nos experimentos PB14 e PB16, as películas ficaram amolecidas e se conglutinaram após o período de secagem o que resultou em rasgos nas mesmas, no processo de forçar as separações.

As colorações permaneceram iguais antes e após o ataque químico para PB14. Já para o experimento PB15 as películas ficaram com uma coloração esbranquiçada e com um aspecto endurecido. Essa diferença de coloração pode ter sido ocasionada pela interferência na cabine, ou seja, durante o período de secagem ela pode ter sido aberta fazendo com que o ácido evaporasse.

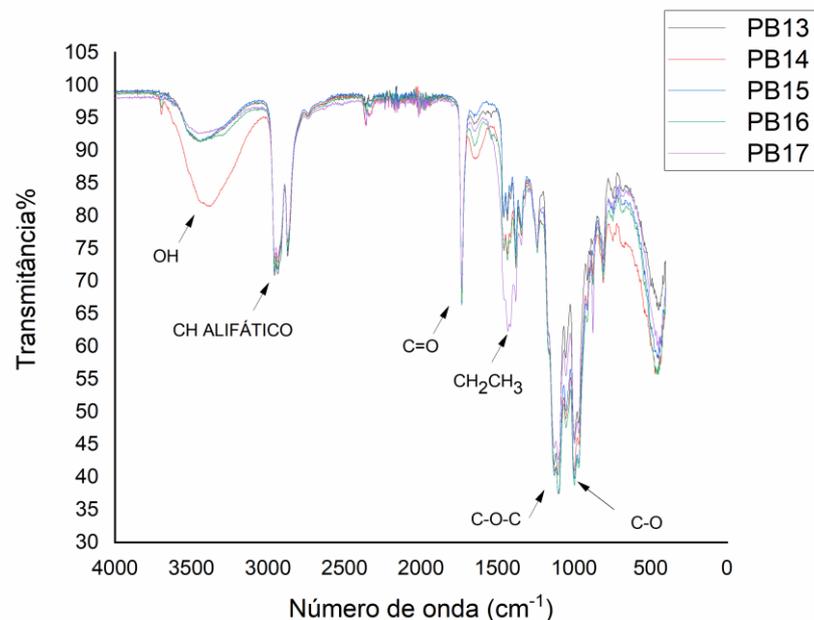
Nas secagens ao ar livre as películas não se aderiram, o que evitou suas deteriorações e pode facilitar possíveis aplicações das mesmas. Os experimentos que passaram pela secagem em estufa também apresentaram maior redução de massa quando comparados com os secos ao ar. Tais reduções superiores podem indicar uma degradação maior da película e não necessariamente quantidade considerável de vidro retirada. Por isso, análises microscópicas foram realizadas.

Concluiu-se também que o experimento PB14 foi o que mais danificou as películas, pois elas ficaram mais quebradiças, se grudaram, sendo difícil as separar sem que ocorressem rasgos, o que as tornaram inutilizáveis, além de terem adquirido um aspecto mais amarelado, possivelmente pela presença de ácido. Enquanto o experimento PB17 deixou as películas mais intactas, e com aspecto mais claro, com uma integridade maior, embora tenha tido uma eficiência menor.

Com relação à análise de FTIR, a comparação entre os espectros para as amostras de PVB, permitiu identificar se os modos de vibração dos grupos químicos do PVB são modificados devido à presença de vidro, plastificantes ou influência do tratamento químico empregado.

A estrutura do PVB foi confirmada por espectroscopia de infravermelho. O espectro FT-IR das películas de PVB é apresentado na Figura 21. Os resultados encontrados estão de acordo com Carrot, Bendaoud e Pillon (2015).

Figura 21 – Análises FTIR para PB13, PB14, PB15, PB16 e PB17



Fonte: Autor (2022)

No experimento PB14 o modo vibracional de OH foi afetado. Isso pode ter ocorrido devido à presença de vidro na película analisada. As vibrações de deformação axial de OH do grupo SiOH ocorrem na mesma região dos álcoois, 3700–3200  $\text{cm}^{-1}$ . No experimento PB16, houve um pico em 876  $\text{cm}^{-1}$ . Bandas intensas atribuídas a Si-O ocorrem em 830–1110  $\text{cm}^{-1}$  (SILVESRSTEIN et al., 2019).

Em PB17 o grupo  $\text{CH}_2\text{CH}_3$  foi afetado. De acordo com Kohol, Asgari e Shakur (2016), podem haver outras funções de carbonila, pois plastificantes normalmente são adicionados ao PVB em concentrações de até 25%. Estes compostos são frequentemente ésteres voláteis como adipatos ou sebacatos. A Tabela 8 dispõe dos resultados numéricos para o FTIR de PB13 a PB17.

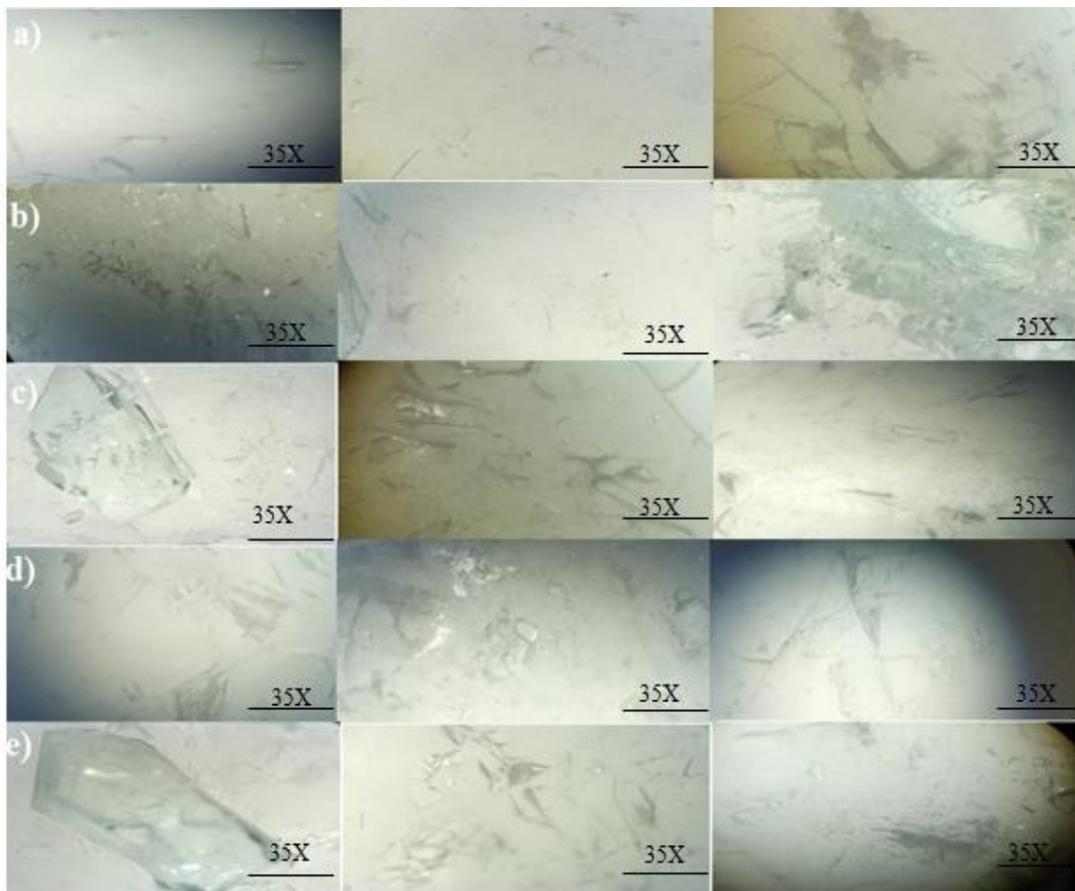
Tabela 8 - Picos encontrados para o PVB nos experimentos PB13, PB14, PB15, PB16 e PB17

Grupos	Número de onda ( $\text{cm}^{-1}$ )				
	PB13	PB14	PB15	PB16	PB17
OH	3430	3438	3438	3413	3410
$\text{CH}_3, \text{CH}_2,$ CH	2956-2871	2941-2873	2951-2874	2940-2870	2960–2870
Alquinos	1437–1381	1430-1379	1440-1380	1415-1375	1438-1378
C=O	1731	1734	1734	1731	1735
Éster	1241	1238	1238	1236	1236
C-O-C	1108	1099	1105	1099	1095
Acetal	997	994	1000	992	995

Fonte: Autor (2022)

Para realização das microscopias foi escolhida 1 película de cada tratamento e elas foram analisadas por 3 ângulos diferentes. A Figura 22 mostra o resultado da microscopia para os experimentos PB13 a PB17.

Figura 22 – Microscopias ópticas de polivinil butiral em microscópio lupa (35x): a) PB13 b) PB14 c) PB15 d) PB16 e) PB17



Fonte: Autor (2022)

Pela análise microscópica constatou-se que a película de PB13 ainda continha alguns cacos de vidros, que a olho nu não foram detectados. Eles podem ser provenientes do pó de vidro que se mantém nas películas na etapa de fragmentação do vidro. Além disso observou-se que a película continha muitas marcas provenientes da separação mecânica.

Observou-se um efeito muito pronunciado da presença de marcas em todas as películas, provenientes da separação mecânica e a presença de vidro. As películas de PB14 apresentaram um aspecto mais escuro, possivelmente pela presença de ácido, combinada com secagem em estufa, que danificou as películas. O experimento PB14 que teoricamente foi o que mais apresentou eficiência, foi o que mais apresentou fragmentos de vidro, comprovando que a eficiência do processo não pode ser comprovada pela redução de percentual de massa.

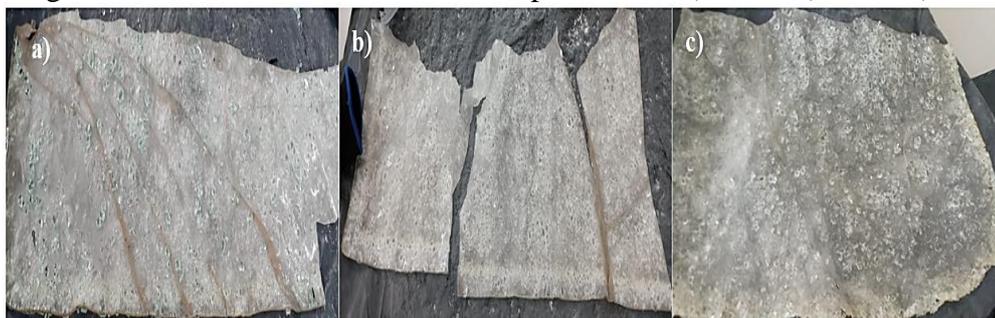
Nos experimentos PB15 e PB17 a visualização de fragmentos maiores e mais detalhes foi mais pronunciada. Na visualização do experimento PB16 observou-se além das marcas do martelo, algumas manchas que provavelmente são da degradação da película que ocorre na estufa. Visualmente e por meio da microscopia óptica foi possível concluir que a secagem ao

ar é mais efetiva, pois garante uma maior integridade das películas, não sendo necessário para este conjunto de experimentos a análise estatística.

#### 5.4 Variabilidade das películas

Na Figura 23 estão as amostras dos três experimentos após a etapa de separação mecânica. Com o emprego de amostras de dimensões menores, o tempo de marteladas diminuiu, mas a frequência delas ao longo da seção aumentou, o que potencializou a separação mecânica.

Figura 23 - Resultados das amostras de para-brisas a) PB18 b) PB19 c) PB20



Fonte: Autor (2023)

Na tabela 9 estão indicadas a redução de massa das amostras, bem com suas massas finais. A separação mecânica foi muito eficiente, indicando que a aderência do vidro na película estava menor, o que pode ser explicado pelo tempo prolongado dos para-brisas em contato com sol e outros gases, que pode influenciar diminuindo a aderência. Para fins de aplicações, essa menor aderência facilita o ataque químico e é benéfica para a reciclagem, pois espera-se que os vidros de baixas granulometrias sejam facilmente removidos.

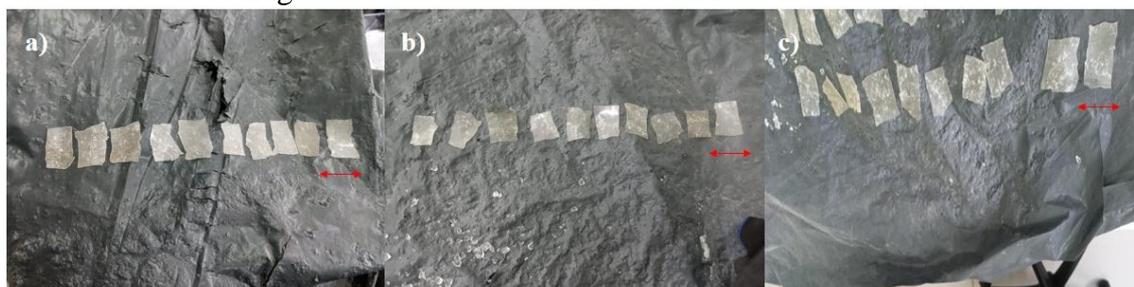
Tabela 9 – Separação mecânica de PB18, PB19 e PB20

Experimento	Redução de massa (%)	Massa final (g)
PB18	87,06	145,32
PB19	92,30	123,42
PB20	93,25	106,22

Fonte: Autor (2023)

Na Figura 24 estão as películas sem vidro dos experimentos realizados. As reduções adotadas como 100% de eficiência da separação mecânica foram 42,02%, 48,54% e 31,92% para PB18-1, PB19-1 e PB20-1, respectivamente. Foram encontradas baixas reduções de massa, pois grande parte do vidro como já mencionado foi retirado na etapa de separação mecânica.

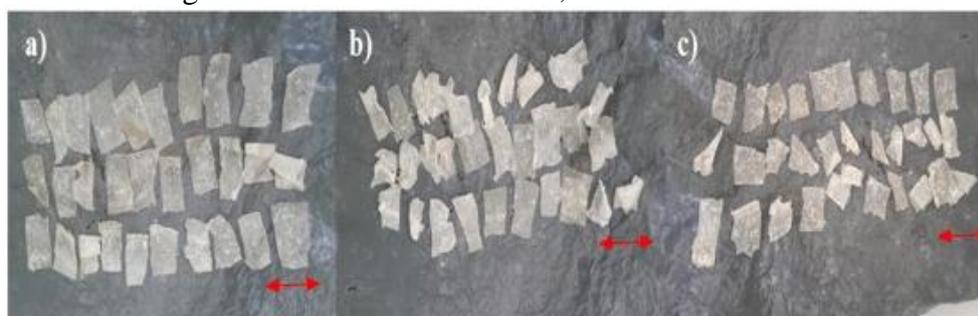
Figura 24 – Películas de PB18 a PB20 sem vidro



Fonte: Autor (2023)

A Figura 25 mostra os resultados das películas após a secagem. Observou-se pelos aspectos visuais que a secagem ao ar realmente agride menos as películas e que os cacos de vidro presentes na película advém da borda dos para-brisas, onde a aderência é maior.

Figura 25 – Resultado de PB18, PB19 e PB20



Fonte: Autor (2023)

A Tabela 10 mostra os resultados de redução de massa e eficiência do processo empregando 0,05% de HCl, em ebulição estática pelo período de ação de 1 hora e secagem por 7 dias realizado em três para-brisas distintos. Observou-se que mesmo sem ter informações sobre cada para-brisa, a diferença é notória, principalmente ao comparar PB18 e PB19 com PB20. Tal fator evidencia a importância em avaliar a variabilidade de películas de polivinil butiral.

Tabela 10 – Redução de massa e eficiência do processo

Experimento	Redução de massa (%)	Eficiência do processo (%)
PB18	$32,7 \pm 5,9$	$77,7 \pm 14,0$
PB19	$36,3 \pm 8,0$	$74,9 \pm 16,5$
PB20	$11,5 \pm 3,9$	$36,2 \pm 12,1$

Fonte: Autor (2023)

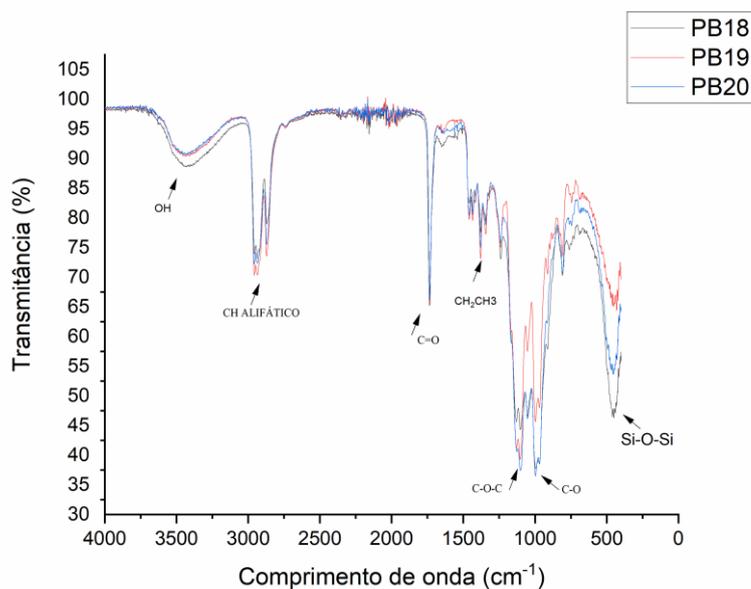
Esperava-se uma eficiência maior, uma vez que a separação mecânica foi satisfatória para os três experimentos. Além disso, após esta etapa restaram apenas pequenos fragmentos de vidro que poderiam ser facilmente removidos no ataque químico, uma vez que como

observado nos experimentos anteriores, ele possui maior potencial para retirada de vidros de baixas granulometrias.

Para verificar se a variabilidade de para-brisas influenciou no tratamento realizado, utilizou-se a análise estatística com o teste Tuckey ( $p < 0,05$ ). Encontrou-se  $p=0,0324$ , ou seja, o teste teve significância e a variabilidade dos para-brisas afeta na eficiência do processo mecanoquímico.

Com relação à análise de FTIR, representada na Figura 26, a comparação entre os espectros para as amostras de PVB, permitiu identificar se os modos de vibração dos grupos químicos do PVB são modificados devido à presença de vidro, plastificantes ou influência do tratamento químico empregado. Assim como nos experimentos anteriores, a estrutura do PVB foi confirmada e os resultados encontrados estão de acordo com Carrot, Bendaoud e Pillon (2015).

Figura 26 – FTIR para películas de PVB dos experimentos PB18, PB19 e PB20



Fonte: Autor (2023)

Nos experimento, houveram bandas intensas atribuídas a Si-O-Si, indicando a presença de vidro nas películas. De acordo com Li et al. (2014), picos em  $\sim 458-802$  podem ser atribuídas a de assimetria vibração de alongamento ou vibração de flexão de ligações Si-O-Si.

Assim como ocorreu em PB16, em PB19, houve um pico atribuído a Si-O em  $1049 \text{ cm}^{-1}$ , indicando que os modos vibracionais são modificados com a presença de vidro. Como visto em Silverstein et al. (2019), bandas intensas atribuídas a Si-O ocorrem em  $830-1110 \text{ cm}^{-1}$ . Na Tabela 11 estão representados os picos encontrados para os experimentos.

Tabela 11 – Picos encontrados para películas de PVB dos experimentos PB18, PB19 e PB20

Grupos	Número de onda (cm <sup>-1</sup> )		
	PB18	PB19	PB20
OH	3426	3464	3409
CH <sub>3</sub> , CH <sub>2</sub> , CH	2934-2858	2953-2866	2943-2871
Alquinos	1430–1378	1458-1381	1458-1380
C=O	1738	1733	1730
Éster	1239	1244	1238
C-O-C	1104	1099	1108
Acetal	999	1002	969
Si-O-Si	453	460	462

Fonte: Autor (2023)

## 6 CONCLUSÃO

Com a realização dos experimentos concluiu-se que estudar a variabilidade dos para-brisas empregados na separação mecanoquímica é extremamente importante e que o ataque químico deve ser ajustado em para-brisas que apresentem maior aderência.

De forma geral, quanto menor a aderência do vidro nas películas, mais possibilidades de reciclagem existem e que o fato dos para-brisas estarem descartados há muito tempo em contato com gases e o sol contribui para diminuir a aderência entre o vidro e o PVB e reduzir os plastificantes. Logo, o processo de separação mecanoquímica em para-brisas de VFV é altamente viável para contribuir com a problemática ambiental que existe atualmente.

A aderência das películas sempre é maior em pedaços das bordas dos para-brisas. Este fator pode advir do fato de se tratarem de vidros de segurança, que passam por algum procedimento para aumentar a aderência nas bordas. Concluiu-se que em relação à integridade das películas quanto menor o tempo de separação mecânica, maior a integridade. Além disso, quanto mais potentes as marteladas, mais rápido o vidro se desprende da película.

A secagem ao ar foi mais efetiva, pois as películas apresentaram menores contaminação e degradação, mantendo-se mais integras. A aderência das películas foi um fator presente em basicamente todos os testes, de forma que mesmo que se tente ela não pode ser totalmente evitada.

Pelo alto grau de resíduos de vidro encontrados para grande parte das películas, concluiu-se que com as condições utilizadas neste trabalho, a reutilização do PVB não será possível em para-brisas, mas em outras aplicações. Uma alternativa é solubilizar o PVB e utilizá-lo como aditivo em suspensões cerâmicas.

Uma outra alternativa seria moer o PVB após retirar os fragmentos maiores de vidro e utiliza-lo em blendas com polímeros semelhantes como o PVC. O desenvolvimento de blendas poliméricas é comercialmente atrativo, pois raramente um único polímero reúne todas as propriedades necessárias para aplicação final da maioria dos produtos.

## REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14697**: vidro laminado: Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. Anuário da Indústria Automobilística Brasileira 2022. São Paulo: Editora ANFAVEA, 2022. Disponível em: <https://acervo.anfavea.com.br/paginas/acervo.aspx?ID=591>. Acesso em: 11 fev. 2023.

ANTHONY, C.; CHEUNG, W. Avaliação de custos em projeto para fim de vida de componentes automotivos. **Jornal Remanufatura**, v. 7, p. 97-111, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13243-017-0035-5>. Acesso em: 31 ago. 2022.

ASTM – Sociedade Americana para Testes e Materiais. **ASTM C162** Terminologia padrão de vidro e produtos de vidro.

BENDAOU, A. et al. Misturas de Polivinil Butiral Plastificado e Policloreto de Vinila: Análise Morfológica em Visão da Reciclagem. **Materiais e Engenharia Macromolecular**, v.298, n.12, p.1259- 1268. Disponível em: <https://onlinelibrary-wiley.ez26.periodicos.capes.gov.br/doi/full/10.1002/mame.201200420>. Acesso em: 11 fev. 2023.

BRASÍLIA. **Lei n. 12.305 de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605 de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF, 3 de agosto de 2010, p. 2. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=636>. Acesso em: 19 dez. 2017.

BRASÍLIA. **Lei n. 12.977 de 20 de maio de 2014**. Regula e disciplina a atividade de desmontagem de veículos automotores terrestres; altera o art. 126 da Lei no 9.503, de 23 de setembro de 1997 Código de Trânsito Brasileiro; e dá outras providências. Brasília, DF, 21 maio 2014, Seção 1, p. 1. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2014/lei/112977.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2014/lei/112977.htm). Acesso em: 19 dez. 2021.

BRENDGEN, R. et al. Revestimentos com polivinilbutiral reciclado em poliéster e poliamida fios mono e multifilamento. **Jornal de Tecnologia e Pesquisa de Revestimentos**, v.18, n.3, p. 819–829, 2021 <https://link.springer.com/article/10.1007/s11998-020-00445-x>. Acesso em 07 de abril de 2022.

BRITO, S. et al. Avaliação do comportamento eletrocinético de suspensões cerâmicas não-aquosas contendo PVB como aditivo. **Cerâmica**, v.53, p.104-110, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/vTZMcZzk8npMNLxcvHkbYJB/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 19 dez. 2021.

CANEVAROLO, S. Ciência dos polímeros: um teste básico para tecnólogos e engenheiros. São Paulo: Artliber Editora, 2002.

CARROT, C.; BENDAOU, A.; PILLOW, C. **Manual de Termoplásticos**, 2. ed. 2016.

CARTER, C.; NORTON, M. Materiais cerâmicos: Ciência e Engenharia. Springer, 2013.

CERVANTES, I. et al. Comportamento tribológico de misturas de poliamida reforçada com fibra de vidro (PA-GF) e polivinilbutiral reciclado (r-PVB). **Cartas Materiais**, v.319, jul. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132261>. Acesso em: 11 fev. 2023.

CHAPARRO, M. et al. A importância da reciclagem do vidro para a natureza. Revista Brasileira de Desenvolvimento, Curitiba, v.7, n.5, p.50239-50246, mai. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv.v7i5.3003>. Acesso em 04 jan. 2023.

CHEN, S. et al. Análise numérica da falha por impacto de vidros laminados automotivos: uma revisão. **Compósitos Parte B: Engenharia**, v. 122, p. 47 – 60, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.04.007>. Acesso em: 11 fev. 2023.

CHOI, M.; KIM, J.; DONG, K. Resíduos de nanocompósitos de silício/carbono derivados de pára-brisas como ânodos de bateria de íon de lítio de alto desempenho. **Relatórios científicos**, v. 8, n.960, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19529-1>. Acesso em: 08 jul. 2022.

DHALIWAL, A.; HAY, J. **Ação Termoquímica**. 2002, v. 391, n. 245. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez26.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0040603102001879?via%3Dihub>. Acesso em: 11 fev. 023.

ENSSLEN, F. **Sobre o comportamento de carga do vidro laminado de segurança, levando em consideração o envelhecimento do filme de polivinilbutiral**. Tese (Doutorado em Engenharia) - University Bochum Ruhr, 2005.

FARIAS, I. Estudo da influência da radiação gamas nas propriedades mecânicas e térmicas de “elastômeros termoplásticos” blendas de poli(cloreto de vinila) com poli(vinil butiral). Dissertação (Mestre em Ciências) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2018.

FARIAS, Kalyne. **Reciclagem de para-brisas**. TCC (Engenharia Metalúrgica) – Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2022. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/64664>. Acesso em: 31 ago. 2022

FARZANA, R.; SAHAJWALLA, V. Reciclagem de Resíduos Automotivos de Vidro e Plástico: uma Abordagem Inovadora. **Procedimentos do oitavo Congresso de Materiais Avançados e Processamento**, p. 2267 – 2276, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9781118792148.ch282>. Acesso em: 11 fev. 2023.

FILHO, A.; SANFELICE, R. Estudo bibliográfico sobre polímeros ambientalmente sustentáveis. **Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação**, Uberaba, v.3, n. 2, p. 131-148, jul./dez. 2018. Disponível em: <https://seer.uftm.edu.br/revistaeletronica/index.php/rbcti/article/view/3347/3355>. Acesso em: 11 fev. 2023.

GOMES, D.; MEDINA, H. Gestão ambiental na indústria automobilística: o caso da reciclagem de materiais. **CIMM (Centro de Informação Metal Mecânica)**, Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <http://www.limpezapublica.com.br/textos/ct2002-014-00.pdf>. Acesso em: 01 novembro 2021.

GOMES, R. **Reciclagem de para-brisas automotivos: separação entre o filme de pvb e o vidro**. Orientador: Nunes R. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Materiais, CEFET-MG, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: 10.13140/RG.2.2.20079.05283. Acesso em: 16 out. 2021.

GUNER, B.; BULBUL, E.; DILSIZ, N. Reciclagem de polivinil butiral de resíduos de para-brisa automotivo e fabricação de seus materiais fibrosos eletrofiados. **Jornal do Instituto de Engenheiros Químicos de Taiwan**, v.132, p. 104-136, mar. 2022. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876107021006246> . Acesso em: 02 jul. 2022.

HOEPFNER, J.; LOOS, M.; PEZZIN, S. Influência do óxido de grafeno na preparação 'in situ' de nanocompósitos com polivinil butiral, **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v.24, n.3.

Disponível em:

[https://www.researchgate.net/publication/335823340\\_Influence\\_of\\_graphene\\_oxide\\_on\\_'in\\_situ'\\_preparation\\_of\\_nanocomposites\\_with\\_polyvinyl\\_butyrals](https://www.researchgate.net/publication/335823340_Influence_of_graphene_oxide_on_'in_situ'_preparation_of_nanocomposites_with_polyvinyl_butyrals). Acesso em: 11 fev. 2023.

JESUS, S. **Filmes de Base Polimérica Reforçados com Fibras Celulósicas para Aplicações na Indústria Alimentar**. Orientador: PORTUGAL, A.; GIL, M. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Química, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10316/81514>. Acesso em: 11 fev. 2023.

JUNIOR, J.; SANTOS, L. Estado e indústria automobilística no brasil: análise das políticas inovar-auto e rota 2030. **Entre-lugar**, v.11, n. 21, p.101-127, 2020. Disponível em:

<https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/entre-lugar/article/view/12051/5729>. Acesso em: 11 fev. 2023.

KHURMA, J.; ROHINDRA, D.; DEVI, R. Estudo de miscibilidade de blendas fundidas em solução de poli(ácido lático) e poli(vinil butiral). *Jornal de ciências naturais e aplicadas*, v.23, 2005. Disponível em: DOI: 10.1071/SP05004. Acesso: 09 mar. 2023.

KOHOL, M.; ASGARI, M.; SHAKUR, H. Uma investigação detalhada dos efeitos da radiação gama nas propriedades ópticas do filme de polivinil butiral. **Óptica**, v.127, n.19, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.05.076>. Acesso em: 16 set. 2022.

KRÓLIKOWSKI, M.; ŻACH, P.; KALESTYŃSKI, M. Seleção de condições no processo de dissolução de polímero PVB para aplicações de reciclagem de vidro laminado. **Polímeros**, v. 14, n.23, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym14235119>. Acesso em 10 jan. 2023.

KUNTSCHKE, J. **Comportamento mecânico de vidros laminados sob tensão dependente do tempo e tensão de explosão**. 2015. Tese de Doutorado - Universidade Técnica de Darmstadt.

Kuraray: **Processamento manual do filme TROSIFOL® PVB** (2012)

LI, K. et al. Influência dos tipos de sílica na síntese e desempenho de materiais híbridos de amina-sílica usados para captura de CO<sub>2</sub>. **O jornal de Química Física**, v.118, p.2454-2462. Disponível em: [dx.doi.org/10.1021/jp408354](https://doi.org/10.1021/jp408354). Acesso em: 16 fev. 2023.

LOMASSO, A. et al. Benefícios e desafios na implementação da reciclagem: um estudo de caso no centro mineiro de referência em resíduos (CMRR). **Pensar Gestão e Administração**, v. 3, n. 2, jan. 2015. Disponível em: <https://docplayer.com.br/6379231-Beneficios-e-desafios-na-implementacao-da-reciclagem-um-estudo-de-caso-no-centro-mineiro-de-referencia-em-residuos-cmrr.html>. Acesso em: 08 nov. 2022.

LÓPEZ, M.; NORIEGA, A.; PELAYO, F. Caracterização mecânica de polivinil butiral a partir de ensaios estáticos e modais em vigas de vidro laminado. **Compósitos Parte B: Engenharia**, vol. 169, p.9-18, jul. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.03.077>. Acesso em: 11 jul. 2022.

MARIOTTI, A.; OSÓRIO, F.; CALGARO, C. Cidades sustentáveis: o hiperconsumo de automóveis e a mobilidade urbana por ciclovias e ciclofaixas. **Paradigma**, Ribeirão Preto, v. 26, n.1, p. 249-267, jan/jun. 2017. Disponível em: <https://revistas.unaerp.br/paradigma/article/view/858/pdf>. Acesso em 11 fev. 2023.

MARTIN, M. et al. Materiais poliméricos intercalares para vidro laminado: uma revisão. **Construção e materiais de construção**, v.230, jan.2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116897>. Acesso em: 11 jul. 2022.

MATHESON, H.; SKIRROW, F. **Polivinil butiral**. Patente:725.362. Depósito: 15 de agosto de 1927.

MELQUIADES, J. et al. Logística reversa de veículos no fim de vida: a realidade com vistas à sustentabilidade ambiental. **XXV**. V. 25, n. 29, p. 113-126, jan./jun. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.24265/campus.2020.v25n29.08>. Acesso em 03 setembro 2021.

MOHAMMAD, S. et al. Sobre a ligação entre vidro e PVB em vidro laminado. **Engenharia Mecânica de Fraturas**, v. 214, p. 504-519, 2019. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.04.006>. Acesso em: 05 set. 2022

NAMAZI, H. Polímeros no nosso dia a dia. **Bioimpactos**, v.7, n.2, p. 73-74.

<https://doi.org/10.15171/bi.2017.09jun.2017>. Disponível em: Acesso em: 11 jul. 2022.

PARK, S. et al. Armazenamento superior de lítio em nanofibras de carbono dopadas com nitrogênio com canais abertos. **Revista de Engenharia Química**. v. 315, p. 1-9, 2017.

Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.01.005>. Acesso em: 05 set. 2022.

PINAÇO, C. Métodos de reciclagem de vidros laminados por remoção química do pvb. Monografia (Tecnólogo em Materiais) – Faculdade de Tecnologia de São Paulo, 2021.

Disponível em:

[http://ric.cps.sp.gov.br/bitstream/123456789/6346/1/materiais\\_2021\\_1\\_carinalumamilanpinaco\\_o\\_metodosdereciclagemdevidros%20%281%29.pdf](http://ric.cps.sp.gov.br/bitstream/123456789/6346/1/materiais_2021_1_carinalumamilanpinaco_o_metodosdereciclagemdevidros%20%281%29.pdf). Acesso em: 09 marr. 2023.

REIS, D.; FRIEDE, R.; LOPES, F. Política nacional de resíduos sólidos (Lei nº 12.305/2010) e educação ambiental. **Revista Interdisciplinar de Direito**, v.14, n.1, p.99-111 jan./jun.

2017. Disponível em: <https://revistas.faa.edu.br/FDV/article/view/251>. Acesso em: 04 jan. 2023.

SANTO, Fernando. O que é PVB (Polivinil Butiral)? **LinkedIn**. São Bernardo do Campo, 25 jul. 2019. Disponível em: [https://pt.linkedin.com/pulse/o-que-%C3%A9-pvb-polivinilbutiral-fernando-espirito-santo#:~:text=Fernando%20Espirito%20Santo,-](https://pt.linkedin.com/pulse/o-que-%C3%A9-pvb-polivinilbutiral-fernando-espirito-santo#:~:text=Fernando%20Espirito%20Santo,-Lean%20manufacturing%20%7C%20Green&text=PVB%2C%20Poli%20(vinilbutiral)%2C,e)

[Lean%20manufacturing%20%7C%20Green&text=PVB%2C%20Poli%20\(vinilbutiral\)%2C,e](https://pt.linkedin.com/pulse/o-que-%C3%A9-pvb-polivinilbutiral-fernando-espirito-santo#:~:text=Fernando%20Espirito%20Santo,-Lean%20manufacturing%20%7C%20Green&text=PVB%2C%20Poli%20(vinilbutiral)%2C,e)  
[strutural%20apresentada%20na%20figura%201..](https://pt.linkedin.com/pulse/o-que-%C3%A9-pvb-polivinilbutiral-fernando-espirito-santo#:~:text=Fernando%20Espirito%20Santo,-Lean%20manufacturing%20%7C%20Green&text=PVB%2C%20Poli%20(vinilbutiral)%2C,e) Acesso em: 11 jul. 2022.

SANTOS, Z. **Tecnologia dos materiais não metálicos** - classificação, estruturas, propriedades, processos de fabricação e aplicações. 1ª edição. São Paulo: Érika, 2014.

SCHUSTER, M.; SCHNEIDER, J.; Nguyen, T. Investigações sobre a execução e avaliação do teste Pummel para interlayers à base de polivinilbutiral. **Estrutura de vidro Eng**,

v. 5, p.371-396, 2020. <https://doi.org/10.1007/s40940-020-00120-y>. Acesso em: 11 jul. 2022.

SETZ, L.; DA SILVA, A. **O processamento cerâmico sem mistérios**. 1. ed. Editora Blucher, 2019.

SILVA, M. Lei nº 12.977/2104 (Lei do desmanche): minimização das ocorrências relativas a roubos, furtos e receptações de veículos para desmanche. **Jus Navigandi**, ano 20, n. 4390, 9 jul. 2015. Disponível em: <https://jus.com.br/artigos/33123>. Acesso em: 10 jan. 2023.

SILVA, F.; RABELO, D. O Uso Sustentável de Polímeros. **Processos químicos**, v.16, n.21, p. 9 – 16, 2017. Disponível em: [http://ojs.rpqsenai.org.br/index.php/rpq\\_n1/article/view/387/376](http://ojs.rpqsenai.org.br/index.php/rpq_n1/article/view/387/376). Acesso em: 11 fev. 2023.

SILVERSTEIN, R. et al. **Identificação espectrométrica de compostos orgânicos**. 8. ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2019.

SOOS, L. et al. A reciclagem de resíduos de vidro laminado por meio de tecnologias de decomposição. **Reciclagem**, v.6, n.2, p.26, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/recycling6020026>. Acesso em: 11 fev. 2023

SUWEN, C.; XING, C.; XIQIANG, W. O comportamento mecânico do polivinilbutiral em tensão intermediária taxas e temperaturas diferentes. **Construção e Materiais de Construção**, v.182, set.2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.080>. Acesso em: 11 jul. 2022.

SWAIN, B. et al. Reciclagem de resíduos de vidro laminado automotivo e valorização do polivinilbutiral através da separação mecanoquímica. **Pesquisa Ambiental**. v. 142, p. 615-623, out. 2015. Disponível em: <https://www-sciencedirect.ez26.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S001393511530061X#bib3>. Acesso: 10 novembro 2021.

THAMBIRATNAM, D.; PERERA, N. Influência das propriedades intercamadas no desempenho de jateamento de painéis de vidro laminado. **Construção e materiais de construção**, v. 98, p.502-518, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.129>. Acesso em: 11 fev. 2023.

TONARQUE, R.; VITAL, J. Logística reversa: fim de vida útil de veículos e seus destinos. **Revista Tecnológica da Fatec Americana**, v. 08, n. 02, julho/dezembro de 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.47283/244670492020080259>. Acesso em: 04 jan. 2023.

TUPY, M. et al. Reciclagem de para-brisa com foco na separação eficaz de folha de PVB. **Jornal de ciência aplicada de polímeros**, v.131, n.4, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/app.39879>. Acesso: 03 set. 2022.

Você sabia que os para-brisas podem ser reciclados? **ANAVIDRO**, 2013. Disponível em: <https://www.anavidro.com.br/voce-sabia-que-os-para-brisas-podem-ser-reciclados/>. Acesso em: 25 mar. 2022.

WANG, H. et al. Método combinado eficiente de dissolução seletiva e evaporação para reciclagem de resíduos de filmes de polivinilbutiral. **Plástico, Borrachas e Compósitos**, v. 41, p. 8 – 12, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1179/1743289811Y.0000000016>. Acesso em 04 set. 2022.

ZANJANIJAM, A.; HAKIM, S.; AZIZI, H. Propriedades morfológicas, mecânicas dinâmicas, reológicas e de resistência ao impacto das blendas PP/PVB: o efeito do PVB residual como endurecedor. **Avanços RSC**, v. 6, p. 44673 – 44686, 2016. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/ra/c6ra04143d>. Acesso em: 05 set. 2022.