

Sistema FIEB



PELO FUTURO DA INOVAÇÃO

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC
PROGRAMA DE POS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU
EM GESTÃO E TECNOLOGIA INDUSTRIAL

GISLANA SANTANA MACHADO

CARACTERIZAÇÃO DE PELÍCULAS COMERCIAIS UTILIZADAS COMO
INTERCAMADAS EM VIDROS LAMINADOS

Salvador, 2024

Gislana Santana Machado

**CARACTERIZAÇÃO DE PELÍCULAS COMERCIAIS UTILIZADAS COMO
INTERCAMADAS EM VIDROS LAMINADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Tecnologia Industrial do SENAI CIMATEC, como requisito final para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial.

Orientadora: Profa. Dra. Josiane D. V. Barbosa

Coorientador: Prof. Dr. Willams Teles Barbosa

Salvador, 2024

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

M149c Machado, Gislana Santana

Caracterização de películas comerciais utilizadas como intercamadas em vidros laminados / Gislana Santana Machado. – Salvador, 2024.

65 f. : il. color.

Orientadora: Prof.^a Dra. Josiane Dantas Viana Barbosa.

Coorientador: Prof. Dr. Willams Teles Barbosa.

Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2024.

Inclui referências.

1. Vidro laminado. 2. Polímeros. 3. Polivinil butiral. 4. Sentryglas®. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Barbosa, Josiane Dantas Viana. III. Barbosa, Willams Teles. IV. Título.

CDD 620.11

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC**Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia Industrial**

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, aprova a Defesa de Mestrado, intitulada **“CARACTERIZAÇÃO DE PELÍCULAS COMERCIAIS UTILIZADAS COMO INTERCAMADAS EM VIDROS LAMINADOS”** apresentada no dia 28 de maio de 2024, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial.

Assinado eletronicamente por:
Josiane Dantas Viana Barbosa
CPF: ***.515.704-**
Data: 30/05/2024 17:13:48 -03:00

Orientadora:

Prof.^a Josiane Dantas Viana Barbosa, Dr.^a
SENAI CIMATEC

Assinado eletronicamente por:
Willams Teles Barbosa
CPF: ***.257.364-**
Data: 31/05/2024 09:24:02 -03:00

Coorientador:

Prof. Willams Teles Barbosa, Dr.
FIEB

Assinado eletronicamente por:
Joyce Batista Azevedo
CPF: ***.178.424-**
Data: 01/06/2024 11:09:40 -03:00

Membro Interno:

Prof.^a Joyce Batista Azevedo, Dr.^a
SENAI CIMATEC

Assinado eletronicamente por:
Imarally Vitor de Souza Ribeiro Nascimento
CPF: ***.834.164-**
Data: 31/05/2024 16:29:35 -03:00

Membro Externo:

Prof.^a Imarally Vitor de Souza Ribeiro Nascimento, Dr.^a
UFRB

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus que proporcionou a força e coragem de prosseguir adiante, mesmo com todas dificuldades que surgiram. O mestrado é a realização de um sonho, que para alcançar foi necessário a participação de várias pessoas, que de forma direta ou indireta ajudaram na construção dessa dissertação. Portanto, agradeço a minha orientadora Josiane Dantas e coorientador Willams Barbosa pela compreensão, dedicação, atenção, disponibilidade e paciência, que colaboraram para o meu desenvolvimento, tanto quanto pessoa como profissional.

Durante o período de estudo do mestrado, principalmente na escrita da dissertação, os encontros com familiares e as reuniões com os amigos tornaram-se escassas, mas nada disso levou ao distanciamento dos mesmos, pois houve a complacência e o apoio de todos para ajudar da melhor forma possível, seja com palavras acolhedoras ou simplesmente com um abraço.

A palavra que define os meus sentimentos é gratidão por todos que estiveram ao meu lado, para suportar tantas batalhas e chegar até aqui. Logo, agradeço aos meus pais, meu irmão, meu esposo, amigas e amigos, os professores e colegas que fizeram parte dessa trajetória, e também aqueles que auxiliaram de alguma forma nessa etapa.

Salvador, Brasil

Julho de 2024

Gislana Santana Machado

Resumo

O processo de laminação consiste no beneficiamento do vidro, com duas ou mais chapas desse material intercaladas com películas, que eleva a resistência desse produto, sendo conhecidos como vidros laminados ou de segurança. Após ruptura do vidro, os fragmentos ficam retidos na película evitando assim possíveis acidentes. Portanto, esse trabalho tem como objetivo analisar as propriedades físico-químicas, morfológicas, térmicas e mecânicas de dois tipos de películas comerciais, Polivinil Butiral (PVB) e Sentryglas® (SGA), com caracterização de cada uma, em prol de auxiliar os fabricantes de vidro laminado sobre os fatores que podem influenciar na qualidade do seu produto. Além da análise de suas propriedades, também foi avaliada, a influência do armazenamento das películas de PVB, com películas armazenadas em ambiente controlado (temperatura e umidade) e não controlado denominadas como PVB A e PVB NA, respectivamente. A mesma análise não foi realizada para o SGA visto que a película não precisa ficar armazenada em ambiente controlado por não perder propriedades. As películas foram caracterizadas por Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR); Análise Termogravimétrica (TGA); Ensaio de Resistência à Tração; Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV); Ângulo de Contato; Rugosidade; Umidade e Encolhimento. Foi verificado que houve alteração na estrutura molecular dos filmes de PVB devido à absorção de água do filme PVB NA. A película SGA apresentou bandas características do material. O PVB NA apresentou maior perda de massa inicial devido à absorção de água do ambiente ao qual foi exposto. Os testes de tração indicaram uma diminuição na resistência do PVB NA em comparação ao PVB A, confirmando que a absorção de água fez com que o material perdesse resistência. As análises de microscopia eletrônica de varredura evidenciaram uma maior porosidade das películas de SGA comparado ao PVB, corroborando com os resultados de rugosidade. Os resultados do ângulo de contato e absorção demonstraram que o PVB apresenta característica hidrofílica e o SGA hidrofóbico. Como esperado, o SGA apresentou maior resistência à tração entre as películas, por ser um ionômero. Conforme os dados obtidos nesse trabalho, os fabricantes do vidro laminado poderão analisar os fatores que podem interferir no seu processo produtivo, desde o armazenamento adequado do material, até as etapas de aquecimento e entrega de um produto final sem possíveis avarias.

Palavras-chave: Vidro Laminado; Polímeros; Polivinil Butiral; Sentryglas®.

Abstract

The lamination process consists of processing glass with two or more sheets of this material interspersed with films, which increase the strength of the product and are known as laminated or safety glass. Therefore, the aim of this work is to analyze the physicochemical, morphological, thermal and mechanical properties of two types of commercial film, Polyvinyl Butyral (PVB) and Sentryglas® (SGA), characterizing each one, in order to help laminated glass manufacturers understand the factors that can influence the quality of their product. In addition to their properties, the influence of PVB film storage was analyzed, with films stored in a controlled (temperature and humidity) and uncontrolled environment called PVB A and PVB NA, respectively. The same analysis was not carried out for SGA since the film does not need to be stored in a controlled environment as it does not lose properties. The films were characterized by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR); Thermogravimetric Analysis (TGA); Tensile Strength Test; Scanning Electron Microscopy (SEM); Contact Angle; Roughness; Humidity and Shrinkage. It was found that there was a change in the molecular structure of the PVB films due to the absorption of water from the PVB NA film. The SGA film showed bands characteristic of the material. PVB NA showed greater initial mass loss due to water absorption from the environment to which it was exposed. The tensile tests indicated a decrease in the strength of PVB NA compared to PVB A, confirming that water absorption caused the material to lose strength. Scanning electron microscopy analysis showed greater porosity of the SGA films compared to PVB, corroborating the roughness results. The contact angle and absorption results showed that PVB is hydrophilic and SGA hydrophobic. As expected, SGA showed the highest tensile strength among the films, as it is an ionomer. According to the data obtained in this study, laminated glass manufacturers will be able to analyze the factors that can interfere in their production process, from the proper storage of the material, to the heating stages and the delivery of a final product without possible damage.

Keywords: Laminated Glass; Polymers; Polyvinyl Butyral; Sentryglas®.

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Propriedades do vidro.....	199
Tabela 2 – Propriedades Físicas e Mecânicas do PVB.....	31
Tabela 3 – Propriedades Físicas e Mecânicas do SGA	34
Tabela 4 – Nomenclatura das amostras.....	38
Tabela 5 – Descrição dos resultados de FTIR do PVB A e PVB NA.....	43
Tabela 6 – Descrição dos resultados de FTIR do SGA.....	44
Tabela 7 – Rugosidade do PVB NA e do SGA.....	49
Tabela 8 – Tensões e deformações médias das películas.....	54

Listas de Figuras

Figura 1 – Processo de fabricação do vidro plano.	17
Figura 2 - Esquema bidimensional para a estrutura: (A) Dióxido de silício (SiO_2) cristalino e (B) SiO_2 não cristalino.	18
Figura 3 - Fluxograma de controle dos processos de uma empresa de vidro laminado.	20
Figura 4 - Processo de produção do vidro laminado.	21
Figura 5 - Processo de produção do vidro temperado laminado.	24
Figura 6 - Vidro temperado laminado com SGA.	25
Figura 7 - Porcentagem de peças avariadas do vidro temperado laminado com SGA.	26
Figura 8 – Síntese de polivinil butiral a partir de álcool polivinílico e butiraldeído.	30
Figura 9 – Fórmula química do PVB.	31
Figura 10 – Fachada da Loja Apple Retail Store, na Quinta Avenida, Localizada no Centro Comercial de Nova Iorque.	33
Figura 11 – Fórmula química do SGA.	34
Figura 12 - Adesão ao vidro devido interações de hidroxilas com grupo silanol, sendo (a) Grupos interativos; (b) Ligação de hidrogênio e (c) Ligação covalente.	36
Figura 13 - PVB acondicionado na sala fria.	37
Figura 14 - Dimensões das amostras de tração, com base no padrão ASTM D638	40
Figura 15 - Fotografia da amostra da película PVB.	41
Figura 16 - Fotografia da amostra da película SGA.	41
Figura 17 - Espectros de FTIR do PVB A, PVB NA e SGA.	43
Figura 18 - Curvas TG e DTG da Película de PVB A.	45
Figura 19 - Curvas TG e DTG da película PVB NA	46
Figura 20 - Curvas TG e DTG da película SGA.	47
Figura 21 - Microscopia eletrônica de varredura de 40X do PVB NA (A); de 1000X do PVB NA (B); de 40X do SGA (C); e de 1000X do SGA (D)	48
Figura 22 - Resultados do ângulo de contato da película PVB NA e do SGA.	50
Figura 23 - Absorção de umidade do PVB NA e do SGA.	51
Figura 24 - Curvas tensão-deformação das películas de PVB e SGA.	52

Figura 25 - Ensaio de tração (A), corpo de prova de PVB antes do ensaio (B) e após o ensaio de tração uniaxial (C).....	53
Figura 26 - Corpo de prova de SGA antes do ensaio (A) e após o ensaio de tração uniaxial (B).	53
Figura 27 - Registro fotográfico da película PVB NA antes (A) e após (B) o ensaio de encolhimento; e da película SGA antes (C) e após (D) o ensaio de encolhimento.....	55
Figura 28 – Encolhimento do PVB NA e do SGA.....	56

Lista de Siglas

TGA - Análise Termogravimétrica

TG - Termogravimetria

DTG - Termogravimetria Derivada

FTIR - Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

PVB – Polivinil Butiral

PVB A – Polivinil Butiral Acondicionado

PVB A H – Polivinil Butiral Acondicionado Horizontal

PVB A V – Polivinil Butiral Acondicionado Vertical

PVB NA – Polivinil Butiral Não Acondicionado

PVB NA H – Polivinil Butiral Não Acondicionado Horizontal

PVB NA V – Polivinil Butiral Não Acondicionado Vertical

SGA - Sentryglas®

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	16
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
3.1 VIDROS	16
3.1.1 Características e Processos de Fabricação dos Vidros	16
3.1.2 Propriedades Físicas e Mecânicas do Vidro.....	18
3.1.3 Processo de Fabricação do Vidro Laminado.....	20
3.1.4 Vidros de Segurança.....	26
3.1.4.1 Vidro Laminado.....	26
3.1.4.2 Vidro Temperado e Temperado Laminado	28
3.2 PELÍCULAS COMERCIAIS.....	28
3.2.1 História das Películas de Vidro Laminado	28
3.2.2 Polivinil Butiral (PVB)	29
3.2.2.1 Propriedades Físicas e Mecânicas do PVB.....	31
3.2.3 Sentryglas® (SGA).....	32
3.2.3.1 Propriedades Físicas e Mecânicas do SGA.....	33
3.3 PROCESSO DE ADESÃO PELÍCULA/VIDRO	35
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	36

4.1 MATERIAIS.....	36
4.1.1 Película Polivinil Butiral (PVB).....	36
4.1.2 Película Sentryglas® (SGA).....	37
4.1.3 Nomenclatura Das Amostras	38
4.2 MÉTODOS.....	38
4.2.1 Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier - FTIR.....	38
4.2.2 Análise Termogravimétrica – TGA.....	38
4.2.3 Microscopia Eletrônica De Varredura - MEV.....	38
4.2.4 Rugosidade	39
4.2.5 Ângulo de contato	39
4.2.6 Umidade.....	39
4.2.7 Resistência à Tração	40
4.2.8 Encolhimento.....	41
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER – FTIR	42
5.2 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA - TGA	44
5.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA – MEV	47
5.4 RUGOSIDADE.....	48

5.5	ÂNGULO DE CONTATO	49
5.6	UMIDADE.....	50
5.7	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	51
5.8	ENCOLHIMENTO.....	54
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	56
	REFERÊNCIAS.....	57

1 INTRODUÇÃO

O vidro laminado, também conhecido como “sanduíche de vidro”, consiste na composição de duas ou mais camadas de vidro conectadas por um polímero como, por exemplo, PVB ou SGA. No processo de laminação, o vidro passa por uma lavagem, montagem da composição solicitada pelo cliente, prensagem com aquecimento do material em fornos e posteriormente em um ciclo de autoclave, com alta temperatura e pressão, a fim de fazer a junção final do vidro a película. Esse produto é desejável para diversas aplicações em engenharia, por proporcionar segurança (UDI et al., 2023). Os vidros laminados são considerados de segurança, devido que em caso de quebra os fragmentos ficarão retidos na película, mantendo o vidro fixo até ser possível a sua substituição. É importante que eles não apresentem bolhas sob sua superfície ao término da laminação, para evitar reprocessos, atrasos na entrega do produto e elevação nos custos.

O vidro é um material sólido amorfo, que é formado por uma mistura de materiais como a sílica da areia, óxido de alumínio, óxido de cálcio e outros (ARATANI et al., 2020). Apesar do vidro estar associado a um material frágil, com baixa resistência à tração, ele possui boas propriedades mecânicas em relação a compressão e, ao passar pelo processo de laminação, torna-se resistente aos esforços de tração (NIKOLAIDIS, 2022; SJÖSTRÖM et al., 2020). A película utilizada na camada intermediária suportará as tensões de tração, evitando que os fragmentos de vidro se desprendem, o que eleva sua resistência.

O PVB é um material viscoelástico não linear com deformabilidade e sensibilidade à temperatura (CHEN; CHEN; LI, 2021). Ele é uma das películas mais utilizadas, principalmente pela indústria automotiva nos para-brisas de carro, em prol de proteção ao condutor no caso de um acidente (SHAHRIARI; SAEIDI GOOGARCHIN, 2020). E o SGA, também conhecido como película estrutural, é um ionômero hidrofóbico com baixa deformabilidade e elevada resistência à temperatura, que foi desenvolvido pela Dupont para ser utilizado em fachadas de prédios localizados em áreas suscetíveis a furacões nos Estados Unidos (HÁNA et al., 2020; LU; CHEN; SHAO, 2021; OLIVEIRA, 2018).

A aderência entre o vidro e a película é possível devido à ligação química entre o grupo hidroxila (polímero), constituído pela ligação covalente entre átomos de oxigênio e de hidrogênio (OH), e o grupo silanol (vidro), correspondente a um átomo de silício (Si) ligado a uma hidroxila (OH) (MARTÍN et al., 2020). Garantir a aderência da película ao vidro é essencial para evitar a

delaminação do produto ao longo do tempo. É importante considerar que as estruturas de vidro estarão expostas a várias forças estáticas, pressão do vento, mudanças térmicas e outros fatores que afetam a sua durabilidade (BORNEMANN et al., 2022).

Os vidros laminados podem evitar acidentes, principalmente quando instalados em guarda-corpos, portas, janelas, vitrines e coberturas, pois não terá fragmentos afiados soltos que poderiam causar grandes danos, bem como possuem resistência a carga de explosão (OSNES; BØRVIK; HOPPERSTAD, 2018). Eles são produtos que proporcionam segurança, mas há uma certa resistência de utilização pela população em suas residências, devido ao preço e pela falta de conhecimento do produto, apesar de ser normatizado, como a NBR 7199/2016, que estabelece as regras para utilização dos vidros na construção civil; a NBR 14207/2009, que especifica os requisitos mínimos para os materiais a serem utilizados na instalação de boxes de banheiro em prol da segurança; e a NBR 14697/2001, que fala sobre o vidro laminado, dentre outras (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001a, 2009, 2016). Há uma certa normalidade no mercado da região de ofertar para a maioria dos empreendimentos o vidro temperado ou monolítico, sem uma análise aprofundada e conforme normas técnicas do que deveria de fato ser recomendado.

O processo de adesão entre o vidro e a película exige um conhecimento aprofundado das películas utilizadas no processo de produção do vidro laminado, garantindo um produto com maior durabilidade. Cada tipo de película possui suas especificações e propriedades que interfere na forma como deve ser realizada a laminação. Além disso, é importante ressaltar que até o momento, nenhum estudo disponível na literatura científica comparou as propriedades das películas de PVB e SGA, o que significa que estudos como este são considerados novos e crucial para o histórico da tecnologia. Portanto, esse trabalho teve como objetivo analisar as propriedades físicas-químicas, morfológicas, térmicas e mecânicas das películas comerciais PVB e SGA.

O estudo das propriedades das películas é um fator importante para obter melhorias no processo produtivo como: armazenamento adequado; as faixas de temperaturas ideais durante a laminação, para ocorrer o mínimo de peças avariadas possível; e uma melhor análise de como o material comporta-se ao ser submetido a reprocessos, no caso de peças com bolhas após a laminação.

2 OBJETIVOS

Objetivo Geral

Caracterizar e avaliar as propriedades das películas de vidro comerciais, PVB e SGA.

Objetivos Específicos

- Correlacionar as propriedades de películas comerciais com o mecanismo de adesão película/vidro;
- Estabelecer parâmetros de laminação baseado nas condições de armazenamento das películas e propriedades físico-químicas, morfológicas, térmicas e mecânicas das películas.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 VIDROS

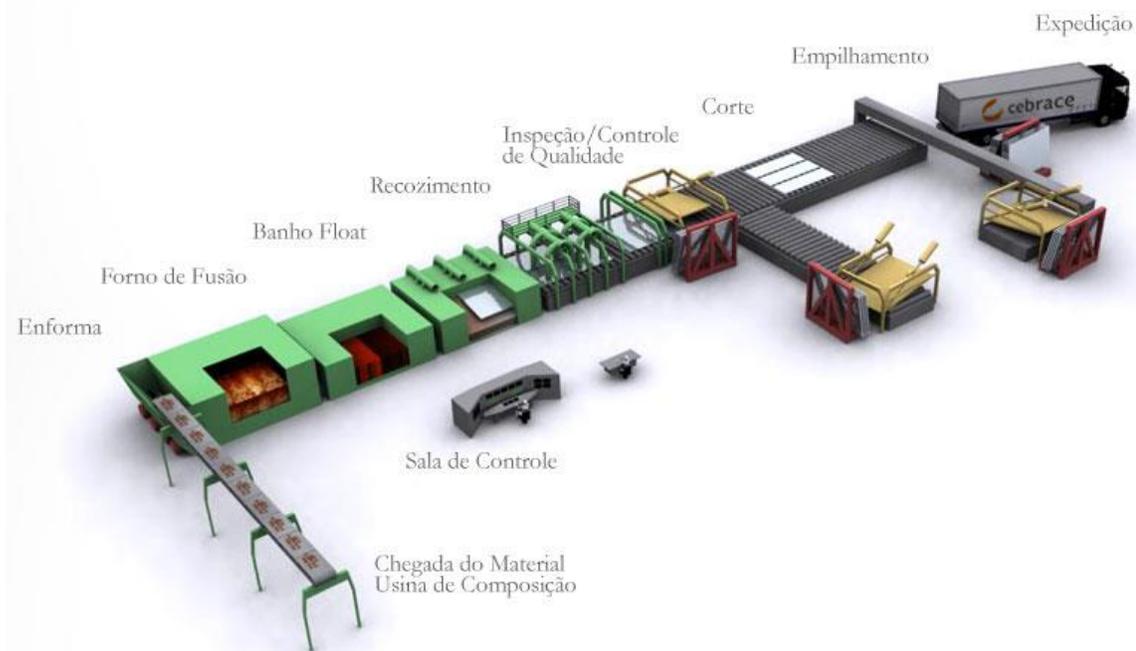
3.1.1 Características e Processos de Fabricação dos Vidros

O processo de fabricação do vidro plano utilizado atualmente foi desenvolvido por Alister Pilkington, em 19 de janeiro de 1956, que teve a ideia de produzir um vidro sem irregularidades na superfície ao flutuar uma massa de vidro em um banho de estanho, o que revolucionou a indústria do vidro (SLAVICH, 2021).

O vidro pode ser definido conforme o seu processo de fabricação, sendo considerado um material amorfo, transparente, na cor incolor ou colorido, frágil, liso e brilhante, com características que variam conforme a composição utilizada para sua produção. A forma de produzi-lo consiste na fusão de pedras vitrificáveis e/ou terras de substâncias salinas, alcalinas e de cal metálica levadas a altas temperaturas e com resfriamento controlado (RICHET, 2021). Independente de como surgiu o vidro, é nítido que houve evolução ao longo dos anos, com desenvolvimento de tecnologias que aprimoraram a sua qualidade e benefícios.

A produção do vidro começa com a extração dos minerais (sílica da areia, barrilha, calcário, óxido de ferro, corantes para vidros coloridos, dentre outros, variando conforme o tipo de vidro), para o abastecimento das usinas. Em seguida realiza-se a mistura dos materiais para compor o vidro, sendo encaminhados para o forno de fusão a uma elevada temperatura, com cerca de 1600°C, formando uma massa homogênea. Essa massa de vidro fundida segue para uma piscina de estanho com temperatura de 650°C, e com isso o vidro flutua nesse líquido por possuir uma densidade menor, formando uma lâmina de vidro que passa pelo resfriamento controlado (recozimento) e por fim o corte, no caso do vidro float, em chapas com dimensões padronizadas por lotes. As demais variações passam por algum ajuste no processo, seja ele na composição ou tipo de acabamento final, como por exemplo, o vidro impresso que recebe uma textura em sua superfície no processo de fabricação. As fábricas produzem chapas planas em diferentes cores (incolor, verde, cinza e bronze) e espessuras que variam de 2 a 19 mm, podendo-se produzir chapas de até 25 mm (MUSGRAVES, 2019; WESTPHAL, 2016). Na Figura 1 é possível observar uma representação esquemática de como ocorre o processo de fabricação do vidro.

Figura 1 - Processo de fabricação do vidro plano.



Fonte: LASARO, 2017.

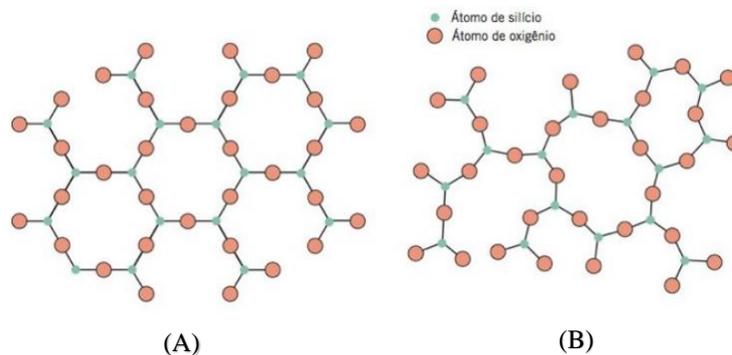
A qualidade do vidro está diretamente ligada aos precursores utilizados na mistura da massa vítrea, pois cada tipo como, por exemplo, o óxido, o carbonato, ou nitrato, possuem influência

diferente sobre o processo de fusão do vidro (MUSGRAVES, 2019).

3.1.2 Propriedades Físicas e Mecânicas do Vidro

O vidro *float*, também conhecido como plano ou monolítico, na cor incolor, e tendo espessuras variáveis, apresenta uma estrutura com ausência de simetrias e periodicidade (ASKELAND, 2023). O vidro é formado pelo resfriamento de uma massa fundida, que ao adquirir rigidez, não há uma ordenação no arranjo dos átomos, o que o classifica como um material amorfo. Ele é inorgânico possuindo sílica, encontrada em areia, como substância principal na sua composição (RICHET, 2021). É um material resistente a substâncias agressivas e, portanto, é suficientemente durável para a construção civil. Existem vários tipos de vidro, que podem ser classificados de acordo com sua composição e processamento: vidro plano, vidro temperado, vidro laminado, vidro insulado, vidro aramado, dentre outros (BONILHA, 2021). A Figura 2, que representa uma estrutura de um material amorfo, demonstra um arranjo bidimensional simétrico, como pode ser observado na imagem (A) e o do vidro que é assimétrico, demonstrado na imagem (B).

Figura 2 - Esquema bidimensional para a estrutura: (A) Dióxido de silício (SiO_2) cristalino e (B) SiO_2 não cristalino.



Fonte: CALLISTER JR, 2012.

O vidro possui uma elasticidade linear perfeita, não adquirindo deformação permanente. E ao ser submetido a um impacto, que supere a sua resistência mecânica, fragmenta-se em pedaços sem aviso, devido a sua fragilidade. Ele tem uma maior resistência à compressão do que à tração (BONILHA, 2021). Conforme a NBR 7199 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016), as propriedades do vidro estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades do vidro.

Propriedades	Valores
Densidade (Kg/m ³)	2500
Dureza (Mohs)	6
Modulo de Young (MPa)	70000
Resistência à Flexão (MPa)	40 ± 5
Coefficiente de Dilatação (°C ⁻¹)	9 x 10 ⁻¹
Calor Específico (J/Kg°C)	720

Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016.

É essencial conhecer as possíveis aplicações com relação aos diversos vidros existentes. O projetista precisa consultar normas e distribuidores de vidro para obter informações quanto a melhor solução em relação ao tipo de vidro e suas aplicações, para auxiliar no desenvolvimento do projeto de cada cliente. A norma NBR 7199 traz informações quanto ao tipo de beneficiamento adequado, visando instalações seguras (WESTPHAL, 2016).

A resistência à tração do vidro é relativamente pequena. Devido às rachaduras distribuídas aleatoriamente na superfície, o vidro está sujeito a quebras instantâneas. Como esse risco limita o uso de vidro em aplicações estruturais, os pesquisadores desse campo estão cada vez mais focados no uso de vidro laminado que pode controlar a quebra e limitar a falha. Para o efeito, vários estudos centraram-se na investigação experimental do vidro laminado, no comportamento do *interlayer* e na sua resposta viscoelástica, bem como na análise experimental dos fenômenos de encurvadura provocados pela flexão e efeitos de torção (CASTORI; SPERANZINI, 2019).

O vidro laminado foi criado com a união entre as lâminas que são resistentes a compressão e o polímero que é resistente a tração, em prol de conseguir um equilíbrio entre os materiais e elevar a resistência aos esforços mecânicos. As películas possuem a função de transferirem a tensão de cisalhamento entre superfícies de vidro opostas e evitarem que cacos de vidro se espalhem em caso de quebra acidental. Em termos de comportamento mecânico, os vidros são quebradiços e linearmente elásticos, enquanto que os *interlayers* poliméricos são mais dúcteis e viscoelásticos, o que significa que sua rigidez depende do histórico de carga e da temperatura de operação

qualidade do produto a ser entregue ao cliente. Enquanto que o vidro temperado pode ser entregue pelo fornecedor com avarias que interferem na qualidade do produto final, como desalinhamento, ondulações na superfície, dimensões e tonalidades diferentes do projeto, sendo que em relação ao desalinhamento e as ondulações o fabricante é coberto pela NBR 14698 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001b), que especifica os limites aceitáveis na peça desses itens, determinando a importância do responsável pelo setor de qualidade verificar o que foi encontrado com o descrito na norma e avaliar a possibilidade de uso ou devolução do produto. É possível observar as etapas do processo de produção do vidro laminado de uma fábrica localizada na Bahia, que permitiu a utilização das fotos, como demonstrado na Figura 4.

Figura 4 - Processo de produção do vidro laminado.



Fonte: Autora, 2024.

Ressalta-se que, no caso do vidro laminado, por ser mais econômico e produtivo, primeiro ocorre o beneficiamento das chapas para posterior corte e acabamentos, mas sendo possível laminar peças de vidro monolítico, só que não há viabilidade econômica, por ter um maior risco de quebras e avarias no produto.

A seguir está a descrição do passo a passo para cada etapa do processo de produção, considerando a laminação das chapas com PVB, como exemplo.

1 - Alimentação da linha de produção

Alimenta a linha com chapas de vidro, nas cores, dimensões e espessuras solicitadas pelo cliente.

2 - Lavagem do vidro

Os vidros passam por duas lavagens e dois enxágues, que estão descritos a seguir:

- 1º Lavagem com água a uma temperatura de 55°C a 70°C;
- 2º Lavagem com água natural;
- 3º Enxágue com água natural;
- 4º Enxágue com água desmineralizada.

A água utilizada em todo processo é oriunda da coleta de água pluvial.

3 - Montagem da Composição

Na sala fria as chapas de vidro chegam para montagem da composição, sendo duas lâminas de vidro monolítico, intercaladas com a película que deve ter 2 mm ultrapassando a borda do vidro, de acordo com a especificação do fornecedor. A película polivinil butiral fica acondicionada na sala limpa com temperatura constante entre 17°C e 21°C, e umidade de 21% a 28%, pois a película de PVB não pode ficar exposta a temperatura ambiente, o que é solicitado, também, pelo seu fornecedor.

4 - Prensagem e Aquecimento das Peças

A peça de vidro passa por 2 fornos, estando o primeiro forno operando a 140°C e o segundo a 240°C, para remoção do ar da interface entre o vidro e a película, com uma prensagem do vidro através das calandras. O aquecimento ocorre por meio das resistências que distribui o calor uniformemente pela superfície do vidro, sendo controlado a espessura da prensagem, a temperatura e a velocidade pela qual a peça vai seguindo ao longo dos fornos. Ao sair do segundo forno, a peça ainda se mantém com aspecto opaco, o que é normal, pois ainda não ocorreu a aderência completa entre o vidro e a película.

5 - Transporte das peças até a autoclave

A chapa é encaminhada para autoclave por intermédio de uma ventosa ligada a ponte rolante.

6 - Autoclavagem do material

As chapas são separadas, a cada 4 unidades, por ventosas de silicone, estando posicionada nos suportes da autoclave de maneira padronizada, sendo fechada em seguida para iniciar o ciclo, que pode durar de quatro a cinco horas e meia. O equipamento suporta até 11 toneladas de material. A autoclave opera de forma automática, utilizando uma receita pré-estabelecida, com a temperatura limite de 135°C e pressão de 11 a 12 bar, e as peças/chapas inseridas passam pelas seguintes fases: fase 1- aquecimento; fase 2 -pressurização; fase 3 – estabilização; fase 4 – resfriamento; fase 5 – resfriamento 2; e fase 6 – depressurização, tendo um controle de tempo para cada etapa. Esse processo garante, com alta pressão e temperatura interna, a adesão da película ao vidro.

7 – Corte

A chapa é posicionada na mesa de corte, sendo que o cortador faz as medições das peças conforme o plano de corte que recebe, marca as dimensões e corta com uma caneta diamante, ou uma régua com diamante, dos dois lados do vidro. Em seguida, utiliza-se álcool isopropílico para dissolver a película no destacamento das peças de vidro, já que não é possível cortar a película de forma manual.

8 – Lapidação

As peças passam pelo processo de lapidação, com o acabamento das bordas e reduzindo riscos de trincas, já que o vidro possui bordas cortantes que são pontos frágeis.

9 – Limpeza das Peças

As peças são limpas e inspecionadas para posterior envio para a expedição.

10 – Expedição

As peças são enviadas ao cliente.

A Figura 5 a seguir corresponde as etapas de laminação de um vidro temperado laminado, de uma empresa, que autorizou a utilização das imagens.

Figura 5 - Processo de produção do vidro temperado laminado.



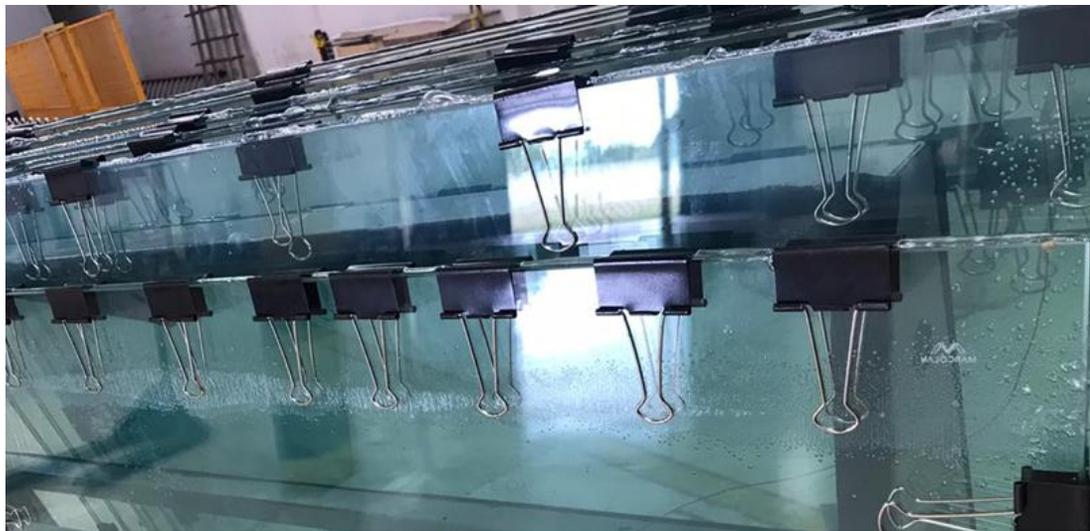
Fonte: Autora, 2024.

O vidro temperado laminado passa por um processo de fabricação diferente do vidro laminado, devido que as peças já chegam prontas para laminação, com as dimensões conforme as especificadas no projeto do cliente, e essas etapas do processo de produção na empresa são demonstradas na Figura 5. Além disso, o vidro temperado laminado, após o processo na autoclave, só precisa da limpeza das bordas, para em seguida ser encaminhado para expedição.

O processo de produção do vidro temperado laminado exige uma maior atenção em relação as chapas, já que pode vir com avarias, como desalinhamentos ou empenamento, e com uma superfície ondulada. Diante do processo de fabricação do vidro temperado essas irregularidades podem estar dentro do limite estabelecido pela NBR 14698, que seria ± 2 mm para o desalinhamento e de 3 mm por metro linear para o empenamento, não sendo possível a devolução ao fornecedor (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001b). Mas é necessário levar em

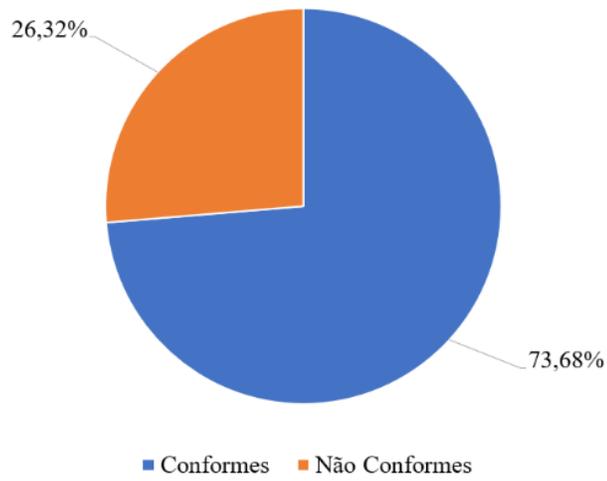
consideração que a espessura máxima da película trabalhada na empresa era de 1,52 mm, que a depender do empenamento do vidro, pode ter vazios e o surgimento de bolhas. Outro fator que pode interferir no processo de fabricação desse material é a velocidade na linha de laminação, a prensagem das calandras nos fornos e a temperatura utilizada nos fornos e na autoclave. A empresa fabricava diferentes produtos, mas sem possuir uma padronização por material, tendo ajustes conforme especificações dos manuais disponibilizados pelos fornecedores das películas, que são do Sul do Brasil e exterior, e aspecto visual da peça, o que implicava em perda de material, retrabalho, elevação dos custos, e atrasos na entrega de material ao cliente. Na Figura 6 é possível identificar avarias nos vidros temperado laminado com película SGA, que ao saírem da autoclave foi identificada as bolhas.

Figura 6 - Vidro temperado laminado com SGA.



Após levantamento de dados obtidos em uma fábrica localizada na Bahia, foi observado nos resultados de uma produção, na qual do total de 38 peças laminadas, 28 ficaram conformes para serem entregues ao cliente e 10 tiveram avarias, com aparecimento de bolhas. Na Figura 7 é possível verificar a porcentagem em peças conformes e não conformes desse material.

Figura 7 - Porcentagem de peças avariadas do vidro temperado laminado com SGA.



Em relação aos resultados da Figura 7, foi sinalizado pela fábrica que as peças não conformes foram reprocessadas em uma outra produção, e nem todas ficaram conformes. Há ainda uma outra situação a considerar, sobre a quantidade de vezes que uma película pode ser submetida a alta pressão e temperatura para expulsão de possíveis bolhas, de forma a não interferir na sua qualidade e resistência.

3.1.4 Vidros de Segurança

3.1.4.1 Vidro Laminado

O vidro é um material utilizado com certa frequência nos projetos arquitetônicos, graças à sua visibilidade e apelo estético. O vidro pode ser usado na criação de vários edifícios graças aos recentes avanços tecnológicos na indústria de fabricação de vidro. Ele é considerado um dos materiais mais duráveis da Terra, no entanto, pode quebrar facilmente devido à sua fragilidade. Para combater isso, foi criado o vidro laminado, composto de várias camadas de vidro e camadas intermediárias de materiais poliméricos, como o Polivinil Butiral e o Sentryglas®. Esta forma de vidro provou ser muito mais eficaz e resistente do que o vidro monolítico, e tem sido usado em muitas aplicações distintas, incluindo em elementos estruturais (ZHANG et al., 2020). Ao ganhar popularidade no mercado, tendo um design sofisticado e moderno, mas sem perder a segurança, o vidro laminado passou a ser inserido em estruturas de muitos empreendimentos como, por

exemplo, nas lojas Apple (WANG et al., 2021).

Um vidro usado como medida de segurança deve ser resistente a impactos de alta velocidade e não quebrar com força extrema, afim de evitar ferimentos significativos em caso de explosão, como ocorre no caso de quebra de um vidro monolítico, também conhecido como float. O vidro laminado é uma opção melhor para segurança, resistindo ao impacto de explosão e evitando a projeção de fragmentos. Isso é possível através da camada intermediária entre as peças de vidro, formando uma composição tipo sanduíche (ELBELBISI et al., 2023).

Os fragmentos ficarão fixados na camada intermediária e evitará que o vidro estilhasse em fragmentos projetados em diversas direções (GY, 2021). Este fenômeno é crucial para entender o comportamento dinâmico do vidro laminado, sujeito a cargas explosivas; também é importante na tentativa de desenvolver um design de vidro mais seguro, que suporte explosões e outros impactos, sejam eles intencionais ou acidentais (CHEN; CHEN; LI, 2021).

Os polímeros utilizados na camada intermediária do vidro laminado podem ser viscoelástico ou ionoplástico. Para além da colagem de um vidro ao outro, a camada adesiva, possui entre outras funções: i) Em caso de rotura de uma das peças, não afeta o outro vidro e cola os fragmentos à camada adesiva garantindo segurança; ii) transfere a tensão de uma peça para outra e aumenta a rigidez do conjunto. Existem vários tipos de polímeros e o mais comum é o PVB por causa de sua relação custo-benefício. Existem outros materiais no mercado, como o SentryGlas® (SGA), da DuPont, que oferece melhor desempenho para o vidro laminado pois influencia no comportamento elástico, apresentando módulo de Young e módulo de cisalhamento maiores que o PVB, porém, ele possui um custo mais elevado (BONILHA, 2021).

A aderência entre o vidro e a película é possível devido à ligação química entre o grupo hidroxila (polímero) e o grupo silanol (vidro) (MARTÍN et al., 2020). O processo de laminação ideal para garantir uma ligação adequada entre o vidro e o *interlayer* depende de muitos fatores, incluindo o tipo de película utilizada, a espessura da película, quantidade de camadas do polímero, número de camadas de vidro, tamanho das peças de vidro, aquecimento ideal da composição (vidro e película), entre outros. A forma como ocorre o beneficiamento do vidro, com a laminação, pode ter um impacto no desempenho geral dos elementos de vidro laminado.

A adesão entre o vidro e a película influi no desempenho do vidro laminado em vários níveis, a depender de como foi o processo de produção. Um vidro laminado que teve falhas durante o seu processamento, pode ter sua transparência afetada, com surgimento de bolhas, sofrer delaminação,

ter redução ou danificação do *interlayer* devido à penetração de vapor e outros elementos e até ter projeção de fragmentos em uma possível quebra do vidro, se não estiverem totalmente aderidos a película (MARTÍN et al., 2020).

Globalmente, a indústria automotiva produz mais de 90 milhões de veículos por ano que utilizam vidro laminado no para-brisa para fins de segurança (ŠOOŠ et al., 2021). E na construção civil, por exemplo, o vidro temperado laminado com SGA é um produto que foi desenvolvido para fachadas de prédios em prol de suportar furacões e vem conquistado o mercado pelos seus benefícios como: segurança, conforto térmico e acústico, e outros.

3.1.4.2 Vidro Temperado e Temperado Laminado

No processo de têmpera o vidro, após ser cortado, lapidado e lavado, passa pelo forno operando a cerca de 700°C por meio de rolos que vai deixando ondulações irregulares sob a sua superfície, tendo em seguida um resfriamento controlado e brusco, de maneira a dar um choque térmico na peça. É com o resfriamento que o vidro adquire resistência, estando na parte central da superfície sob tensões de tração e as bordas sob tensão de compressão (HUSSAIN; MOIZ, 2022). No caso de uma das bordas sofrer algum dano, o vidro temperado irá estourar, pois as trincas atingem a área de compressão, sendo seu ponto de fragilidade. No entanto, os fragmentos de vidro temperado, caso ocorra o estouro de peça, são pequenos e não cortantes, o que pode evitar risco de acidentes graves. Vale ressaltar que uma vez o vidro sendo temperado não é recomendado o corte ou lapidação, pois poderá perder a peça.

O vidro temperado laminado consiste na junção de duas peças de vidro temperadas ou mais, intercaladas com uma película ou mais, que além de elevar sua resistência, garante que os fragmentos fiquem retidos no polímero, o que pode impedir a ocorrência de acidentes graves.

3.2 PELÍCULAS COMERCIAIS

3.2.1 História das Películas de Vidro Laminado

A descoberta do vidro laminado ocorreu no início do século XX, quando um cientista

francês, Edouard Benedictus, estava realizando mais uma de suas experiências quando derrubou acidentalmente um frasco de vidro de reagente de nitrato de celulose no chão, e observou que o frasco ficou todo trincado, mas seus estilhaços se mantiveram unidos. A fabricação do vidro laminado só ocorreu 30 anos depois da descoberta de Benedictus, e até 1935 o único *interlayer* utilizado era nitrato de celulose (denominado Piralina). Foram muitos estudos até chegar ao polímero polivinil butiral, que teve o seu desenvolvimento, inicialmente, com a indústria automobilística, diante da necessidade de utilização de vidros de segurança no para-brisa dos automóveis (CARROT; BENDAOU; PILLON, 2015).

Os químicos canadenses Howard W. Matheson e Frederico W. Skirow foram os responsáveis pela criação do PVB, em 1927 (BEHÚNOVÁ et al., 2021). Esse polímero é uma das películas mais comercializadas, tendo espessuras de 0,38 mm; 0,76 mm; 1,14 mm; 1,52 mm; e 2,28 mm, que são utilizadas conforme o projeto e suas exigências técnicas (AHANI; AHANI, 2023; LÓPEZ-AENLLE; NORIEGA; PELAYO, 2019).

Com o avanço das tecnologias e diante da necessidade de um vidro com uma maior resistência mecânica, o SGA foi desenvolvido pela Dupont nos EUA, em 1998, e foi introduzido no mercado, em prol de atender as exigências de vidros estruturais com capacidade de suportar furacões (ELKILANI et al., 2024). Ele possui espessuras de 0,76 mm; 0,89 mm; 1,52 mm; e 2,28 mm, para venda, e está ganhando o mercado diante das suas propriedades mecânicas e durabilidade (AHANI; AHANI, 2023).

3.2.2 Polivinil Butiral (PVB)

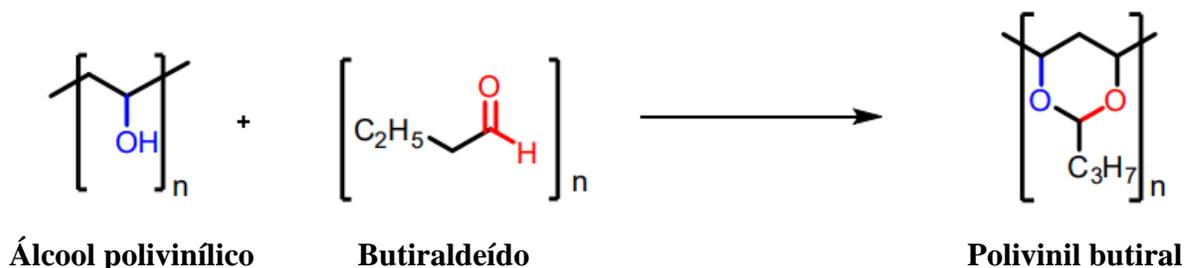
Há mais de 70 anos que o PVB é utilizado como camada intermediária do vidro laminado. Foi em 1938 que essa película começou a ser produzida, mediante inúmeros métodos investigativos, que buscaram aperfeiçoar esse material, afim de reduzir os custos com sua produção, facilitar o seu manuseio, e diminuir riscos de apresentar defeitos no vidro no processo de laminação. O PVB passou por melhorias ao longo dos anos, com o desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias, garantindo uma maior aderência, isolamento acústico, isolamento térmico, função estrutural, segurança, e grandes possibilidades para fins decorativos (JÓŻWIK, 2022).

O PVB é amplamente utilizado na indústria automotiva, para a segurança e proteção humana, na produção de para-brisas de veículos, devido à sua resistência ao impacto e os fragmentos

de vidro ficarem fixados na película, em um possível acidente (SHAHRIARI; SAEIDI GOOGARCHIN, 2020). E vem ganhando o mercado ao ser utilizado em diversas aplicações como portas, janelas, guarda-corpos e outros, devido a segurança que proporciona.

MARTÍN et al., (2020) cita que o processo sintético de produção do PVB pode ser dividido em três etapas principais, que consiste em: Polimerização do acetato de vinila em cadeias de poli (acetato de vinila); a cadeia de poli (acetato de vinila) é hidrolisada, resultando na formação do poli (álcool vinílico); o poli (álcool vinílico) reage com o butiraldeído para formar o composto cíclico butiraldeído, como observado na Figura 8. Essa película possui uma estrutura poliactal que resulta do processo de condensação do álcool polivinílico e n-butiraldeído na presença de um catalisador ácido (SYAQIRA S et al., 2020).

Figura 8 – Síntese de polivinil butiral a partir de álcool polivinílico e butiraldeído.



Fonte: KUMAR; KHAN; KUMAR, 2016.

O PVB é considerado um polímero amorfo, possuindo uma transição lenta do estado líquido para o sólido, com um comportamento viscoso, e sem o calor latente das transições de fase. A viscoelasticidade desse material depende diretamente da temperatura a qual está submetido, estando elástico, tipo borracha, quando em temperatura ambiente. Por isso, caso o vidro laminado sofra uma ruptura, pode ocorrer um ligamento de ponte entre os fragmentos do vidro e a película, o que garante a segurança desse vidro (MARTÍN et al., 2020).

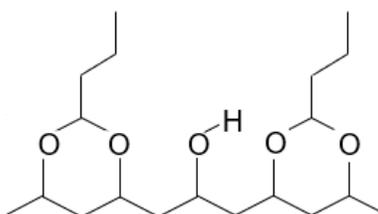
Atualmente o PVB é fabricado e comercializado por uma pequena quantidade de empresas em todo o mundo, o que resulta em um mercado concentrado e dominado, e seus fornecedores são: Eastman (EUA), Kuraray Grupo (Tosifol e DuPont), e Sekisui (Japão). Apesar do PVB ser produzido por poucas indústrias, a laminação do vidro é ofertada por diversas empresas, sejam elas de pequeno, médio ou grande porte.

3.2.2.1 Propriedades Físicas e Mecânicas do PVB

O PVB é um terpolímero aleatório amorfo composto por três monômeros distintos que são: (i) o vinil butiral (76-80% em peso) que não absorve água, possui elasticidade e fornece boa processabilidade e compatibilidade com muitos plastificantes; (ii) álcool vinílico (18-22% em peso) e (iii) acetato de vinila (1-2% em peso), que possuem boa aderência a materiais inorgânicos, como vidro, e afinidade com água. Embora a estrutura do fio seja a mesma, as propriedades específicas de cada folha do PVB dependem do tipo, do fabricante e da composição da folha desse polímero. Cadeias de PVB com peso molecular superior conferem resistência ao *interlayer*, portanto, plastificantes devem ser incorporados para aumentar a elasticidade do material (MARTÍN et al., 2020).

A fórmula química desse polímero está descrita na Figura 9 a seguir.

Figura 9 - Fórmula química do PVB.



Fonte: KURARAY, 2014.

A resposta mecânica dessa película é altamente dependente do tempo e pode estender várias vezes seu comprimento inicial (NAWAR et al., 2021). Ele é um material não linear com deformabilidade e sensibilidade à temperatura, e na Tabela 2 estão descritas as propriedades da película PVB disponibilizada pela KURARAY.

Tabela 2 – Propriedades Físicas e Mecânicas do PVB.

Propriedades	Valores
Densidade (g/cm ³)	1,065
Resistência a Tração (MPa)	>23
Alongamento de Tração (%)	>280

Fonte: Adaptado da KURARAY, 2017.

Alguns tipos de polímeros não devem ser expostos a temperatura ambiente, devido que a umidade, ciclos de temperatura e radiação solar são fatores que afetam as propriedades físicas e mecânicas desses materiais durante sua vida útil. A película PVB fornece vidro laminado com excelentes propriedades ópticas e mecânicas, possuindo alta resistência aos esforços mecânicos; elevada deformação antes da fratura; boa adesão ao vidro, após o processo de beneficiamento do vidro com a laminação; e alta transmissão de luz. No entanto, é importante ressaltar que as condições climáticas degradam o PVB: a umidade ambiente leva a uma má adesão ao vidro e a radiação ultravioleta reduz suas propriedades mecânicas (CHEN et al., 2023).

3.2.3 Sentryglas® (SGA)

A empresa multinacional americana DuPont desenvolveu um polímero ionômero, conhecido como Sentryglas®, que muda os horizontes do setor de plataforma de vidro ao ser utilizado entre camadas de vidro no processo de laminação, tendo laminados mais finos e com maior resistência aos esforços mecânicos, podendo ser empregado como função estrutural. Adicionar laminados mais finos à linha de produtos da DuPont aumenta o número de aplicações para o produto, disse Hayati Yarkadas, diretor global da divisão avançada de *interlayer* da DuPont. Seguindo a filosofia "menos é mais", a introdução do SGA na montagem da composição do vidro laminado para ofertar ao mercado com uma espessura menor e com maior resistência, abre a possibilidade desse material ser utilizado na produção de energia solar com menor custo e podendo desenvolver aquecedores mais leves e duráveis. O ionômero SGA pode suportar esforços mecânicos significativos, o que dá aos engenheiros e arquitetos muito mais liberdade para criar e desenvolver fachadas de vidro com o mínimo de exposição das partes metálicas (OLIVEIRA, 2018).

A película SGA fornece melhor desempenho do que o PVB em termos de rigidez, força de aderência e capacidade de alongamento (ZHAO et al., 2019). O vidro laminado com SGA possui boa estabilidade de borda e são menos suscetíveis à umidade ou influências climáticas. Ele é usado para vidro plano ou curvo, incluindo vidro recozido, temperado, semi-temperado, colorido, aramado, impresso e serigrafado. Além disso, consegue manter-se translúcido e com boa claridade mesmo após muitos anos de uso (OLIVEIRA, 2018).

A tecnologia proporcionada pelo SGA tornou-se uma opção atrativa para alguns dos projetos

de vidro laminado mais famosos do mundo, como lojas de eletrônicos de ponta (Apple) em todo o mundo, grades no terraço do Marina Bay Sands em Cingapura e estruturas de vidro especiais, como Willis Tower em Chicago e Lincoln em New York Center Alice Tully Hall. A resistência desse material é de grande importância para aplicação em locais que necessitam de uma segurança, como fachadas, coberturas, pontes, e outros, principalmente para zonas de vento extremo (LU; CHEN; SHAO, 2021). Na Figura 10 é possível observar uma das lojas Apple, com estrutura toda em vidro, em formato de cubo.

Figura 10 - Fachada da Loja Apple Retail Store, na Quinta Avenida, Localizada no Centro Comercial de Nova Iorque.



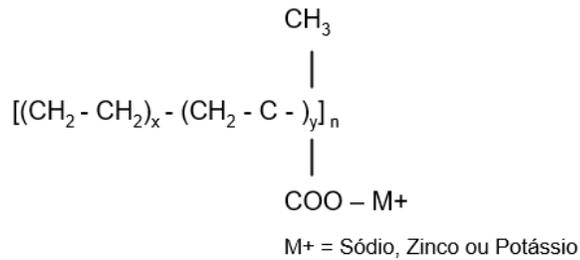
Fonte: ANAVIDRO, 2013.

3.2.3.1 Propriedades Físicas e Mecânicas do SGA

Em 1964, o termo "ionômero" foi registrado pela primeira vez como marca comercial pela DuPont. Um ionômero é um polímero iônico com um teor de íons de até 10 mol% em um polímero apolar. Em geral, a estrutura dos ionômeros consiste em um esqueleto de hidrocarboneto com grupos laterais ácidos parcialmente ou totalmente neutralizados, podendo ser classificado como do grupo de termoplásticos. Esses grupos ácidos incluem grupos carboxila, ácido sulfônico, tioglicolato e ácido fosfônico. No caso da espinha dorsal, estes incluem, mas não estão limitados a polibutadieno, poliestireno, polietileno, polioximetileno e polipenteno. A síntese de ionômeros é obtida pela copolimerização de monômeros funcionais (ácido acrílico, ácido p-estirenosulfônico ou ácido metacrílico) e olefinas (etileno, butadieno ou estireno) (MARTÍN et al., 2020).

O SGA contém cadeias principais hidrofóbicas, com boas propriedades físico-mecânicas (OLIVEIRA, 2018), e sua fórmula química está representada na Figura 11.

Figura 11 - Fórmula química do SGA.



Fonte: KURARAY, 2014.

O SGA possui alta rigidez e alta transparência em uma ampla faixa de temperatura. Por ser um material viscoelástico, sua rigidez depende da duração da carga e da temperatura de operação, porém é mais resistente que outras películas como o PVB (MARTÍN et al., 2020). Ele foi fabricado para ser utilizado em fachadas de vidro nos Estados Unidos, em prol de resistir a furacões. O uso e aplicação deste material aumentou consideravelmente nos últimos anos em regiões não sujeitas a furacões, devido às suas vantagens mecânicas e de durabilidade. Diante da sua ampla gama de aplicações, as propriedades mecânicas do material são de interesse prático. Uma das principais propriedades dele é o baixo módulo de deformação, uma vez que essa película atua como uma ponte entre os painéis de vidro para transmitir forças de cisalhamento (LU; CHEN; SHAO, 2021).

A Tabela 3 apresenta as propriedades da película SGA disponibilizada pela KURARAY.

Tabela 3 – Propriedades Físicas e Mecânicas do SGA.

Propriedades	Valores
Densidade (g/cm ³)	0,95
Modulo de Young (MPa)	300
Resistência a Tração (MPa)	34,5
Alongamento (%)	400
Modulo de Flexão a 23°C (MPa)	345
Temperatura de Deflexão Térmica a 0,46 MPa (°C)	43

Fonte: Adaptado da KURARAY, 2023.

Esse material é uma película estrutural cinco vezes mais resistente e até 100 vezes mais

rígido que materiais convencionais e com baixa vulnerabilidade à exposição à umidade (KURARAY, 2023).

3.3 PROCESSO DE ADESÃO PELÍCULA/VIDRO

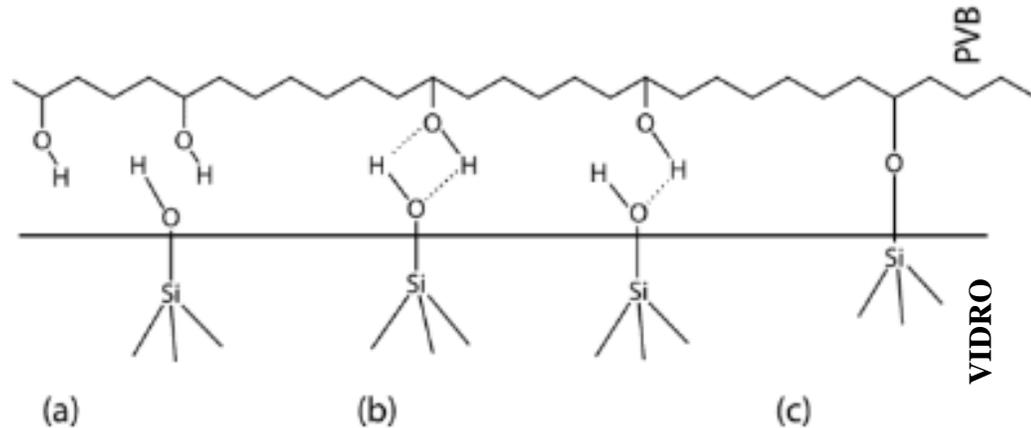
O vidro laminado consiste na composição de duas ou mais camadas de vidro conectadas por um polímero como, por exemplo, PVB ou SGA. A composição, também conhecida como sanduíche de vidro, passa por fornos para seu aquecimento e posteriormente em um ciclo de autoclave, com alta temperatura e pressão, afim de fazer a junção final do vidro a película. Esse produto é desejável para diversas aplicações em engenharia, e melhora o desempenho do vidro, durante seu uso e, posteriormente, no caso de uma ruptura, pois proporciona segurança (UDI et al., 2023).

O processo de adesão da película ao vidro é de fundamental importância para garantir que não ocorra delaminação do produto ao longo do tempo, pois é necessário levar em consideração que estruturas de vidro estarão constantemente submetidas a várias forças estáticas, pressão do vento, ambiente térmico variável, e outros fatores determinantes que influenciarão na sua durabilidade (BORNEMANN et al., 2022).

O comportamento estrutural do vidro laminado depende da camada intermediária utilizada para manter os vidros unidos. O *interlayer* possui como funções: acoplamento de cisalhamento de painéis de vidro, garantindo a fixação; controle térmico e/ou acústico; além de ser utilizado de forma estética no empreendimento (HÁNA et al., 2019).

O PVB à temperatura ambiente comporta-se como um material elástico, portanto, em caso de quebra os fragmentos de vidro ficarão retidos na película, pois em uma possível fratura do vidro não ocorre propagação desse efeito no polímero, com atuação da fragmentação apenas na superfície dos vidros, e o *interlayer* funciona como uma ponte que mantém os vidros unidos (ANDREOZZI et al., 2014). A ligação entre o vidro e o PVB ocorre devido a interações moleculares. Os grupos hidroxila do PVB são responsáveis por proporcionar a adesão dessa película ao vidro, por meio de ligações químicas e ligações de hidrogênio com silanóis de vidro (CARROT; BENDAOU; PILLON, 2015). Na Figura 12 é possível verifica as interações de hidroxilas do PVB com grupo silanol do vidro.

Figura 12 – Adesão ao vidro devido interações de hidroxilas com grupo silanol, sendo (a) Grupos interativos; (b) Ligação de hidrogênio e (c) Ligação covalente.



Fonte: CARROT; BENDAOU; PILLON, 2015.

O SGA oferece elevado potencial de ligação entre as camadas de vidro, com maior rigidez e resistência que outros materiais, tendo boa adesão ao vidro e ao aço (CENTELLES; CASTRO; CABEZA, 2019). Inicialmente o SGA foi desenvolvido para proteger contra furacões e assaltos, garantindo uma ligação de alta resistência. A camada intermediária SGA apresenta resistência ao cisalhamento e rigidez suficientes para transferir as forças entre o vidro e o reforço, permitindo que os fragmentos de vidro fiquem retidos na película em um possível acidente, que leve a quebra do vidro (LOUTER et al., 2012).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Película Polivinil Butiral (PVB)

A película PVB utilizada como amostra e na laminação das peças de vidro foi adquirida comercialmente por exportação, pela KURARAY LTDA, que é uma empresa japonesa, sendo um produto fabricado fora do país, como na República Tcheca, Europa, e outros locais.

Foram recortadas duas películas de PVB no tamanho de 280 x 200 mm, com 1,52 mm de espessura, para recorte de amostras menores a serem submetidas aos ensaios de caracterização. Sendo que uma película estava acondicionada hermeticamente em papel alumínio (nomeada como PVB A) e outra estava exposta a ambiente não controlado (nomeada como PVB NA).

Na Figura 13 é possível verificar o PVB acondicionado em uma sala, com controle de temperatura e umidade. Além disso, o PVB fica envolto em uma manta metálica, na qual vem acondicionado no transporte do fornecedor até a empresa, e só deixa a manta durante o processo de fabricação.

Figura 13 - PVB acondicionado na sala fria.



4.1.2 Película Sentryglas® (SGA)

O intercalário SGA utilizado como amostra e na laminação das peças de vidro foi obtido comercialmente por exportação, pela KURARAY, que é uma empresa japonesa, sendo um produto fabricado fora do país, como nos Estados Unidos, e outros locais.

Foi recortada uma película de SGA no tamanho de 280 x 200 mm, com 0,76 mm de espessura, para recorte de amostras menores a serem submetidas aos ensaios de caracterização dessa película. Não houve necessidade de manter os filmes SGA em ambiente com temperatura e umidade controladas, pois esses parâmetros não afetam as propriedades físico-químicas do material.

4.1.3 Nomenclatura das amostras

Na tabela 4 está a descrição das amostras de películas, com sua respectiva abreviatura.

Tabela 4 - Nomenclatura das amostras.

Amostras das Películas	Sigla
Polivinil Butiral Acondicionado	PVB A
Polivinil Butiral Não Acondicionado	PVB NA
Sentryglas®	SGA

4.2 MÉTODOS

4.2.1 Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier - FTIR

As análises de FTIR das amostras de PVB e SGA foram realizadas em um equipamento Nicole iS 10 (Thermo Scientific, USA) com faixa espectral de 4000 a 400 cm^{-1} , resolução 4 cm^{-1} e 32 scans.

4.2.2 Análise Termogravimétrica – TGA

O equipamento utilizado para o ensaio foi um analisador termogravimétrico TGA Q50 V20.13 Build 39 (TA Instruments, New Castle, USA). As amostras de PVB e SGA com cerca de 8 mg, aproximadamente, foram analisadas numa faixa térmica de 25°C a 700 °C, e taxa de aquecimento 10°C/min, sob atmosfera de nitrogênio.

4.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

A morfologia das películas foi investigada por MEV usando um microscópio eletrônico de varredura da JEOL, modelo Carry Scopy JSM-6510LV (JEOL, Tóquio, no Japão) com uma tensão

de aceleração de 20kV. As 5 amostras recortadas de cada película foram recobertas com ouro por um equipamento de metalização por evaporação marca Denton Vacuum, modelo DESK V. É importante ressaltar que a análise do PVB somente foi realizada para a amostra PVB NA, devido a indisponibilidade da amostra acondicionada (PVB A).

4.2.4 Rugosidade

Utilizou-se o instrumento Rugosímetro Mitutoyo SJ-210 (Mitutoyo, São Paulo, Brasil), para analisar a rugosidade das amostras, realizando 3 medições ao longo da superfície (nas extremidades e no centro), com uma distância entre a seção da amostra e o equipamento de 4 mm. É importante ressaltar que a análise do PVB somente foi realizada para a amostra PVB NA, devido a indisponibilidade da amostra acondicionada (PVB A).

4.2.5 Ângulo de Contato

A molhabilidade superficial dos polímeros, PVB e SGA, foram avaliadas pelo ângulo de contato com a água utilizando um Goniômetro, modelo DSA-25 (Kruss, Hamburgo, Alemanha). A análise foi realizada com volume de gota 5 μ l, em diferentes pontos da superfície, com seis medições no total. É importante ressaltar que a análise do PVB somente foi realizada para a amostra PVB NA, devido a indisponibilidade da amostra acondicionada (PVB A).

4.2.6 Umidade

A absorção de umidade pelas películas (PVB NA e SGA), foi medida conforme o seguinte procedimento: Uma amostra de cada material foi seca em uma estufa, a uma temperatura de 80 °C, durante 1 hora, e pesadas para obter a massa seca (M_{seca}). Em seguida, essas amostras foram imersas em água deionizada à temperatura ambiente, no período de 24 horas, para posteriormente realizar a secagem ao retirar o excesso de umidade com papel absorvente. E, por fim, foram pesadas novamente para obtenção da massa úmida ($M_{úmida}$) (XU et al., 2019). Com o aumento de massa percentual das películas umidificadas, em relação à seca, a uma dada temperatura, obteve-se o valor em percentual da absorção de umidade de cada película. A absorção de umidade foi calculada de

acordo com a Equação 1.

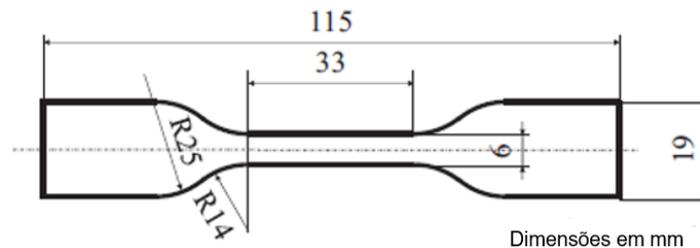
$$U (\%) = \frac{M_{úmida} - M_{seca}}{M_{seca}} \times 100 \quad (1)$$

É importante ressaltar que a análise do PVB somente foi realizada para a amostra PVB NA, devido a indisponibilidade da amostra acondicionada (PVB A).

4.2.7 Resistência à Tração

Os testes de tração uniaxial foram realizados conforme a norma ASTM D638 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2012), utilizando amostras em forma de gravata (tipo IV^B), como pode-se observar na Figura 14. Foram recortadas 5 amostras de cada tipo de película, afim de garantir uma repetibilidade e ter uma curva bem definida (CENTELLES et al., 2020).

Figura 14 - Dimensões das amostras de tração, com base no padrão ASTM D638.



Fonte: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2014.

Os experimentos foram conduzidos em uma máquina universal de ensaios Emic Modelo DL 2000 (Instron Brasil Equipamentos Científicos Ltda, São Paulo, Brasil) sob taxa de deslocamento constante de 50 mm/min, sendo que essa velocidade foi de acordo com o recomendado pela norma ISO 527-1 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2012).

Destaca-se que o PVB foi analisado em duas direções devido ele possuir linhas de fluxo tanto na direção vertical quanto na horizontal, como pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 – Fotografia da amostra da película PVB.



O SGA foi investigado apenas em uma direção, por não ter sido observado a mesma característica do PVB como demonstra a Figura 16.

Figura 16 – Fotografia da amostra da película SGA.



4.2.8 Encolhimento

O encolhimento térmico dos polímeros, PVB e SGA, foi realizado pela sua mudança 2D após o tratamento térmico em um forno sob diferentes temperaturas (25, 120, 150 e 200°C), com tempo de permanência de 30 minutos, posteriormente a amostra era retirada do forno e realizado a medição com um paquímetro digital, após registros as amostras retornavam para o forno (XU et al., 2019). Foram utilizadas 5 amostras de cada película para análise. É importante ressaltar que a análise do PVB somente foi realizada para a amostra PVB NA, devido a indisponibilidade da amostra acondicionada (PVB A). E para obter o valor em porcentagem do encolhimento foi utilizada a Equação 2.

$$E (\%) = \frac{(AI-AF)}{AF} \times 100 \quad (2)$$

Sendo AI a área inicial da amostra, antes do tratamento térmico, e AF a área final após tratamento térmico.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER – FTIR

A Figura 17 apresenta os espectros FTIR do PVB A, PVB NA e SGA. Os espectros, tanto do PVB A quanto do PVB NA, apresentaram comportamentos semelhantes, corroborando com os resultados vistos pelos autores HUANG; LIN; FANG, (2018) e WANG et al., (2023), tendo a descrição das bandas para o PVB A e do PVB NA na Tabela 5. No entanto, houve uma leve diferença entre os resultados do PVB A e os dos PVB NA, na banda vinil butiral, podendo ser devido a uma maior quantidade de moléculas de água no PVB NA, já que este não estava acondicionado.

A partir de dados é possível afirmar que o material que compõe o PVB está conforme o descrito na literatura (MARTÍN et al., 2020; SILVA, 2017), considerando que o PVB é um termopolímero aleatório amorfo, composto por 80% de vinil butiral, que possui propriedade elástica e não absorve água, e aproximadamente 22% de álcool vinílico e 2% de acetato de vinil, que são materiais que absorvem água e permitem uma melhor adesão a materiais inorgânicos como o vidro.

O comportamento do espectro de FTIR da película SGA (Figura 17) corrobora com os estudos realizados por OLIVEIRA, (2018). O espectro da amostra de SGA apresenta as bandas com características semelhantes à do polietileno e do ácido metacrílico, como descritos na Tabela 6. Diante dos resultados de FTIR (Tabela 6) confirma-se que o SGA, que é um polímero ionômero, possui em sua composição o polietileno e ácido metacrílico (MARX; CAULFIELD; COOPER, 1973; OLIVEIRA, 2018).

Figura 17 - Espectros de FTIR do PVB A, PVB NA e SGA.

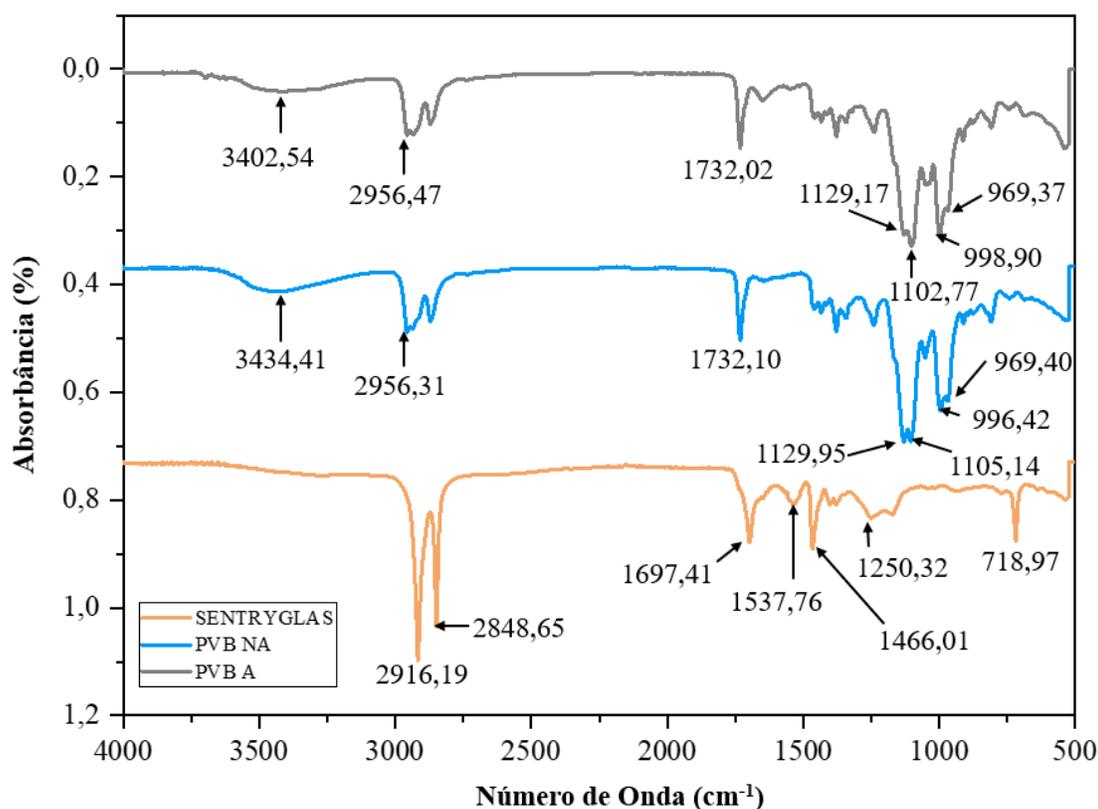


Tabela 5 - Descrição dos resultados de FTIR do PVB A e PVB NA.

Número de Onda (cm ⁻¹)		Características	Material com Banda Semelhante
PVB A	PVB NA		
3402,54	3434,41	Vibração de alongamento de OH (Hidroxila)	Vinil álcool
2956,47	2956,31	Vibração de alongamento de C-H (Hidrocarboneto)	-
1732,02	1732,1	Vibração de alongamento de C=O (Carbonila)	Vinil acetato
1129,17	1129,95	Vibração de flexão em tesoura do grupo CH ₂ (Hidrocarboneto)	Vinil butiral
1102,77	1105,14	Vibração de flexão em tesoura do grupo CH ₃ (Metil)	Vinil butiral
998,90	996,42	Vibração de estiramento C-O-C (Éter)	-
969,37	969,4	Vibração de estiramento C-O (Monóxido de Carbono)	-

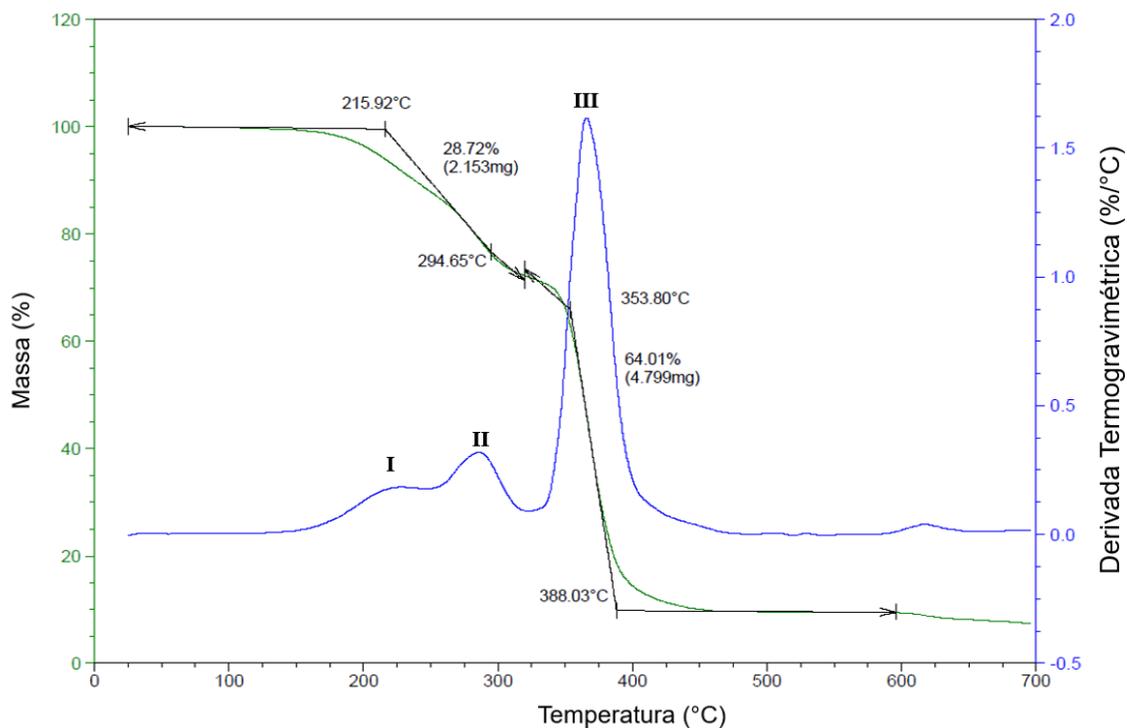
Tabela 6 - Descrição dos resultados de FTIR do SGA.

Número de Onda (cm⁻¹)	Características	Material com Banda Semelhante
2916,19	Absorção de estiramento assimétrico de CH ₂ (Hidrocarboneto)	Polietileno e ácido metacrílico
2848,65	Absorção de estiramento simétrico de CH ₂ (Hidrocarboneto)	Polietileno e ácido metacrílico
1697,41	Absorção de estiramento simétrico de C=O (Carbonila) de ácido carboxílico	Ácido metacrílico
1537,76	Absorção de estiramento assimétrico do RCOO - (grupo carboxilato)	Ácido metacrílico
1466,01	Sobreposição da absorção com vibração de flexão assimétrica do grupo CH ₃ (Metil) e flexão tipo tesoura de CH ₂ (Hidrocarboneto)	Polietileno e ácido metacrílico
1250,32	Absorção de estiramento de O-C(=O)-C (Éster)	Ácido metacrílico
718,97	Absorção de flexão tipo balanço dos grupos CH ₂ (Hidrocarboneto) quando ligados em uma sequência de 4 ou mais	Polietileno e ácido metacrílico

5.2 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA - TGA

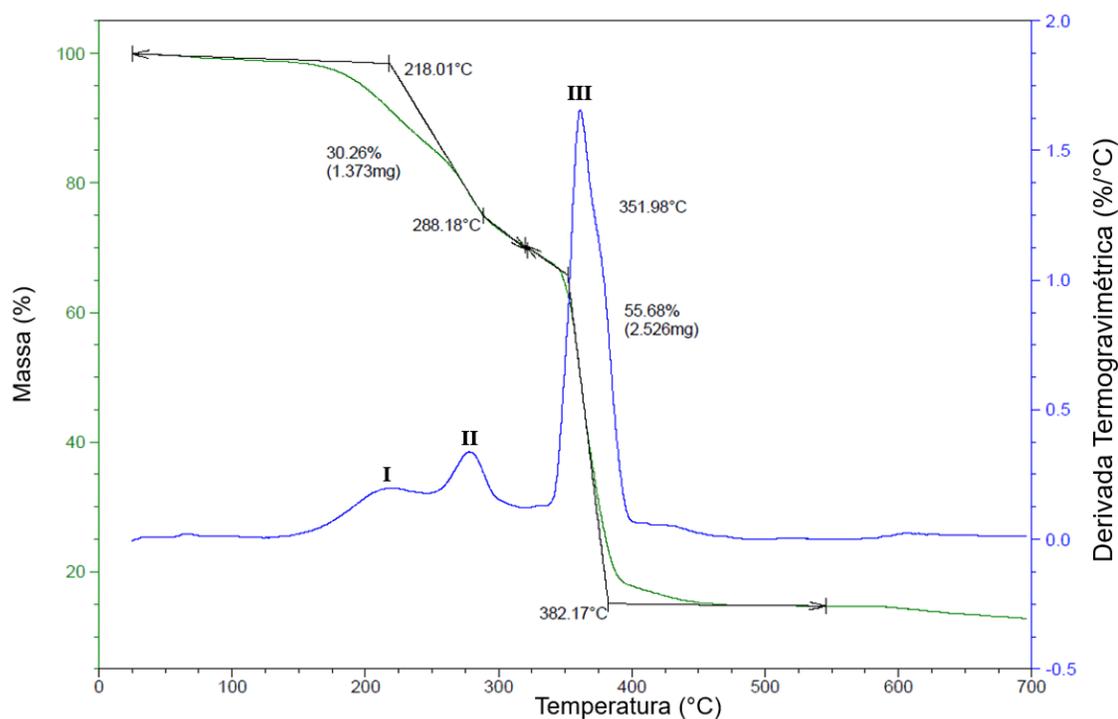
A Figura 18 apresenta as curvas TG e DTG da amostra da película de PVB A. Analisando a curva DTG é possível identificar três eventos de perda da massa, sendo a primeira a 215,92°C, o segundo a 294,65°C e o terceiro a 388,03°C, neste último houve uma perda de massa de 64,01%, mantendo-se constante.

Figura 18 - Curvas TG e DTG da Película de PVB A.



A Figura 19 apresenta as curvas TG e DTG da película de PVB NA. O PVB NA apresentou comportamento térmico semelhante ao PVB A da Figura 18. É possível observar três eventos de perda de massa, sendo o primeiro a 218,01°C, o segundo a 288,18°C, e o terceiro a 382,17°C, verificando nesta última que o material perde 55,68% de massa e mantém-se constante.

Figura 19 - Curvas TG e DTG da película PVB NA.



As curvas de TGA das películas de PVB A e PVB NA (Figura 18 e Figura 19), demonstraram um comportamento semelhante ao observado por HUANG; LIN; FANG, (2018), e a redução da massa nos dois primeiros eventos está relacionada ao grupo OH (Hidroxila), tendo ocorrido perda de água, já no terceiro evento ocorre a degradação do grupo butiral ($C_8H_{14}O_2$)n.

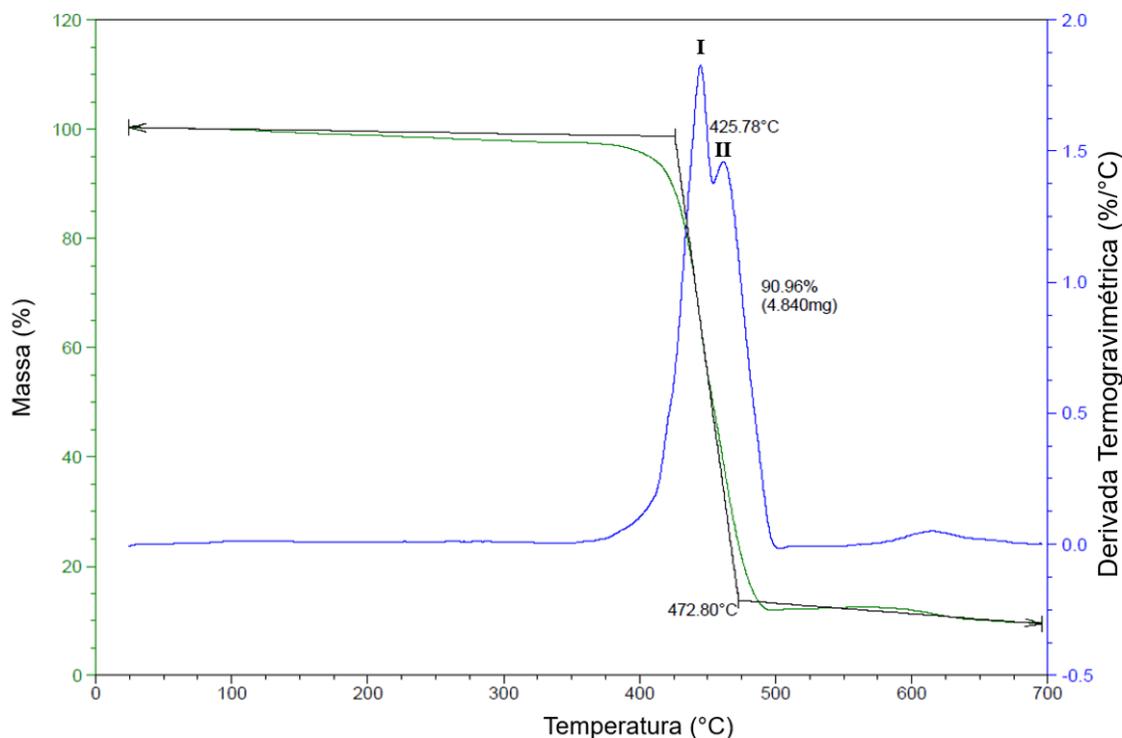
Comparando os resultados de TGA das películas PVB A (Figura 18) e PVB NA (Figura 19), observa-se que no segundo evento houve uma maior perda de massa para a película PVB NA (30,26%), superior ao PVB A que registrou uma perda de 28,72%. Essa maior perda de massa pode ser justificada pela absorção de água, já que o material não foi acondicionado em ambiente com temperatura e umidade controlada, sendo que o sugerido pelo fornecedor é de 17 °C de temperatura e 21% de umidade. O PVB quando exposto à temperatura ambiente, por ser um material hidrofílico, absorve água e assim sua ligação adesiva com o vidro é reduzida, além de ter alteração na cor com o envelhecimento, o que afeta, também, as propriedades ópticas do vidro laminado (MARTÍN et al., 2020).

A Figura 20 apresenta as curvas TG e DTG da película SGA. Na Figura 20 observa-se dois eventos de perda de massa, o primeiro em 425,78°C e o segundo em 472,80°C. No SGA, observa-se que ocorreu uma perda de massa considerável de 90,96% nos dois eventos, que pode vim a gerar

bolhas no produto acabado, alteração da cor, possível delaminação ou interferir na resistência do vidro laminado.

O SGA apresenta comportamento térmico semelhante ao observado por SU et al., (2022) em seus estudos, com perda de massa acentuada acima de 400°C, relacionada a volatilização da cadeia polimérica decomposta.

Figura 20 - Curvas TG e DTG da película SGA.



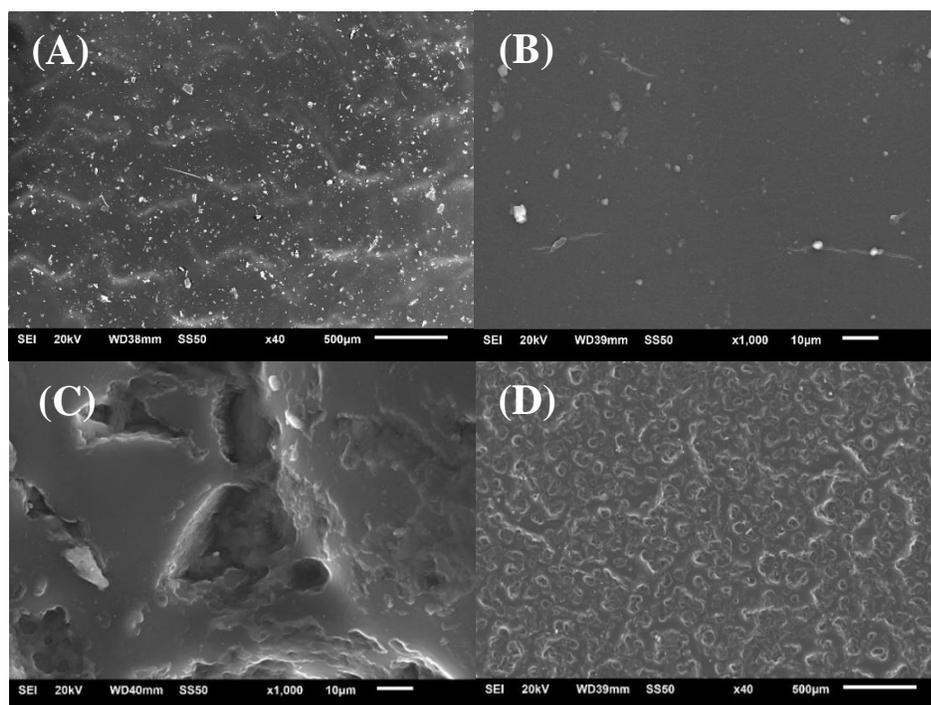
Comparando as curvas TG/DTG das amostras de PVB com a amostra de SGA, é possível verificar que o SGA tem uma maior resistência térmica, não apresentando perda de massa na faixa de temperatura de 25 a 400°C, enquanto que nessa mesma faixa o PVB passa por três eventos de perda de massa, corroborando com o que descreve KOZŁOWSKI, (2018). Isso ocorre devido o grupo COONa (Ácido Carboxílico) fornecer uma força iônica adicional ao SGA em relação ao PVB (SU et al., 2022).

5.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA – MEV

A Figura 21 apresenta as micrografias de MEV das amostras PVB NA e SGA. Observar-se

na Figura 21 (A) que o PVB NA apresenta superfície com baixa rugosidade e presença de algumas partículas provenientes do ambiente, visto que essa amostra não estava acondicionada adequadamente conforme solicitado pelo fornecedor. Analisando com mais detalhes sua superfície (Figura 21 (B)), nota-se uma superfície lisa. Já o SGA apresentou uma superfície rugosa, como pode ser observado na Figura 21 (C e D).

Figura 21 – Microscopia eletrônica de varredura do PVB NA com ampliações de 40 x(A) e 1000X (B); E do SGA com aplicações de 40X (C) e 1000X (D).



5.4 RUGOSIDADE

A Tabela 7 apresenta os resultados da análise de rugosidade das películas PVB NA e SGA. É possível observar que a película de SGA possui uma maior rugosidade ao longo da sua superfície em comparação a de PVB NA, corroborando com os resultados de MEV (Figura 21).

A rugosidade da superfície da película pode contribuir para uma melhor adesão do vidro ao polímero, o que interfere no fato do SGA ter uma melhor durabilidade em relação ao PVB, estando menos suscetível a delaminação do vidro laminado.

Tabela 7 – Rugosidade do PVB NA e do SGA

Películas	Resultados		
	Superfície Inferior	Superfície Central	Superfície Superior
PVB NA	2.544 Ra	4.469 Ra	3.863 Ra
SGA	7.979 Ra	8.889 Ra	8.547 Ra

5.5 ÂNGULO DE CONTATO

A Figura 22 apresenta os resultados de molhabilidade das películas de PVB NA e SGA. É importante ressaltar que para o PVB, só foi possível obter resultados para o não acondicionado, já que não havia mais amostras do acondicionado.

Com os resultados do ângulo de contato é possível obter informações do grau de molhabilidade das películas. Em geral os materiais são classificados em: super hidrofílico, quando $\theta < 5^\circ$; hidrofílico, sendo $\theta < 90^\circ$; hidrofóbico com θ entre 90° e 150° ; e super hidrofóbico com θ entre 150° e 180° (NURAJE et al., 2013; ROSHNI et al., 2017).

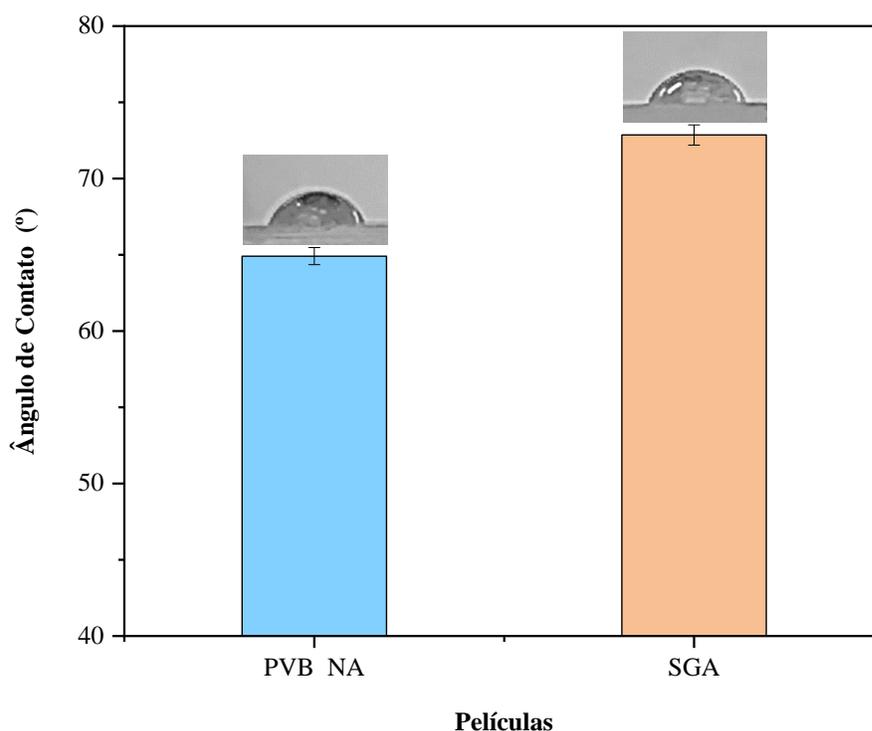
Ao analisar os dados do PVB NA da Figura 22, o PVB é considerado um material hidrofílico, com valores menores que 90° . Ao comparar com os resultados obtidos por ZHANG et al., (2010), que teve valores do ângulo de contato variando entre 47° e 53° , pode-se constatar uma pequena diferença com relação aos valores obtidos no presente trabalho que foi de $64,91^\circ$, que pode ser explicado quanto a rugosidade do material, pois quanto mais rugosa for uma superfície, ocorrerá uma redução do ângulo de contato (ZHANG et al., 2010). Portanto, essa diferença de resultados pode ser em virtude das películas serem de fabricantes diferentes, pois cada um possui determinada composição e rugosidade superficial, o que interfere nas características do produto.

O ângulo de contato encontrado para a película SGA foi, em média, de $72,86^\circ$. Esse resultado apresenta uma variação considerável quando comparado a literatura, como os encontrados no estudo de SULEIMAN et al., (2017) e WANG et al., (2023), que foram superiores a 90° , que classifica esse material como hidrofóbico, e essa diferença pode estar relacionada a superfície do material, por serem de fabricantes diferentes. Comparando os resultados deste estudo, observa-se que o SGA possui um ângulo de contato mais próximo de 90° , sendo menos hidrofílico que o PVB (ZHANG et al., 2011).

De acordo com ZHANG et al., (2010) o ângulo de contato é inversamente proporcional a rugosidade do material, portanto, quanto maior a rugosidade, menor será o ângulo de contato.

Os resultados do ângulo de contato mostram que o PVB possui características mais hidrofílicas que o SGA. Por este motivo, é importante que o PVB esteja armazenado em condições de temperatura e umidade controladas, devido a sua maior capacidade de absorção de água, o que pode provocar uma má adesão entre película/vidro (CHEN et al., 2023; MARTÍN et al., 2020).

Figura 22 – Resultados do ângulo de contato da película PVB NA e do SGA.



5.6 Umidade

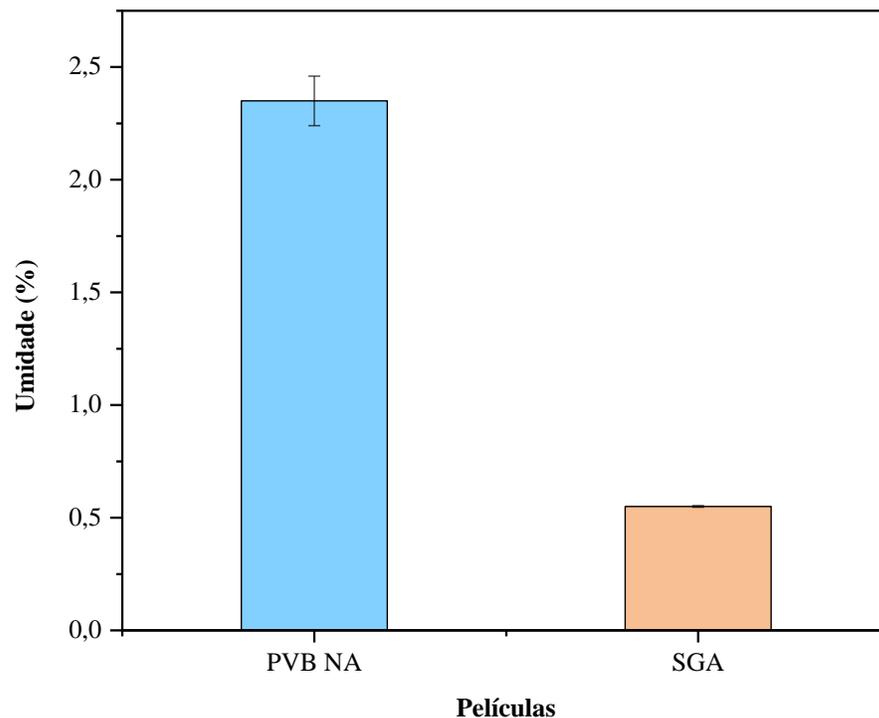
Na Figura 23 são apresentados os resultados da análise de absorção de umidade das películas de PVB e SGA. É possível observar que o SGA apresentou menor absorção de umidade (0,55%) comparado ao PVB (2,35%), com uma diferença de 1,8%. Absorção de umidade pelo PVB está associada à sua maior afinidade com a água, como observado nos resultados de molhabilidade (Figura 22).

De acordo com JIN et al., (2018) a molhabilidade de um polímero está associada a estrutura e composição do mesmo, o que explica a diferença entre os resultados, por serem duas películas com propriedades distintas, visto que o PVB é mais hidrofílico que o SGA, por este motivo o PVB

tende a ter uma maior absorção de água comparado ao SGA.

Em relação a composição química, esse comportamento está relacionado ao álcool vinílico presente no PVB que possui afinidade com água, facilitando a absorção de água por esse polímero (SARAVANAN et al., 2016). E em relação ao SGA, sua menor absorção de umidade está relacionada a presença do polietileno na sua composição, que é uma resina termoplástica, com absorção de água próxima a zero (WU et al., 2018).

Figura 23 – Absorção de umidade do PVB NA e do SGA.



Conforme análise dos resultados de TGA e de resistência à tração, que demonstra a importância do armazenamento da película PVB, para não ter interferências nas suas propriedades, foi verificado que há uma maior facilidade de absorção de água por essa película, tendo redução da sua resistência e maior perda de massa ao ser exposto à temperatura ambiente, que pode influenciar na qualidade do vidro laminado se o PVB for utilizado na laminação do produto, como aparecimento de bolhas, delaminação, redução do *interlayer*, transparência afetada, entre outros (MARTÍN et al., 2020).

5.7 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

A Figura 24 corresponde as curvas tensão-deformação representativas de cada uma das

películas. Analisando as curvas de tensão-deformação das películas de PVB (Figura 24) observa-se uma pequena área não linear elástica, e uma região na qual sua rigidez aumenta gradualmente até a ruptura (Figura 25 (C)), comportamento semelhante a de um elastómero (CENTELLES et al., 2020; VALIO, 2020). O PVB é considerado um material hiperelástico, no qual o estiramento da rede torna-se cada vez mais difícil à medida que vai sendo tracionado, o que resulta no seu enrijecimento (ELZIÈRE et al., 2019). Além disso, por ser um polímero higroscópico, possui facilidade em absorver água, o que pode interferir nas suas propriedades mecânicas (MARTÍN et al., 2020).

O SGA possui uma curva tensão-deformação (Figura 25) com uma pequena região não linear inicial, seguida por uma zona elástica, uma segunda região com menor rigidez que a inicial, com um comportamento plástico, e posteriormente vai aumentando a rigidez até a estricção do corpo de prova, também conhecida como empescoamento (Figura 26 (B)), semelhante ao comportamento de um material plástico (CENTELLES et al., 2020).

Figura 24 - Curvas tensão-deformação das películas de PVB e SGA.

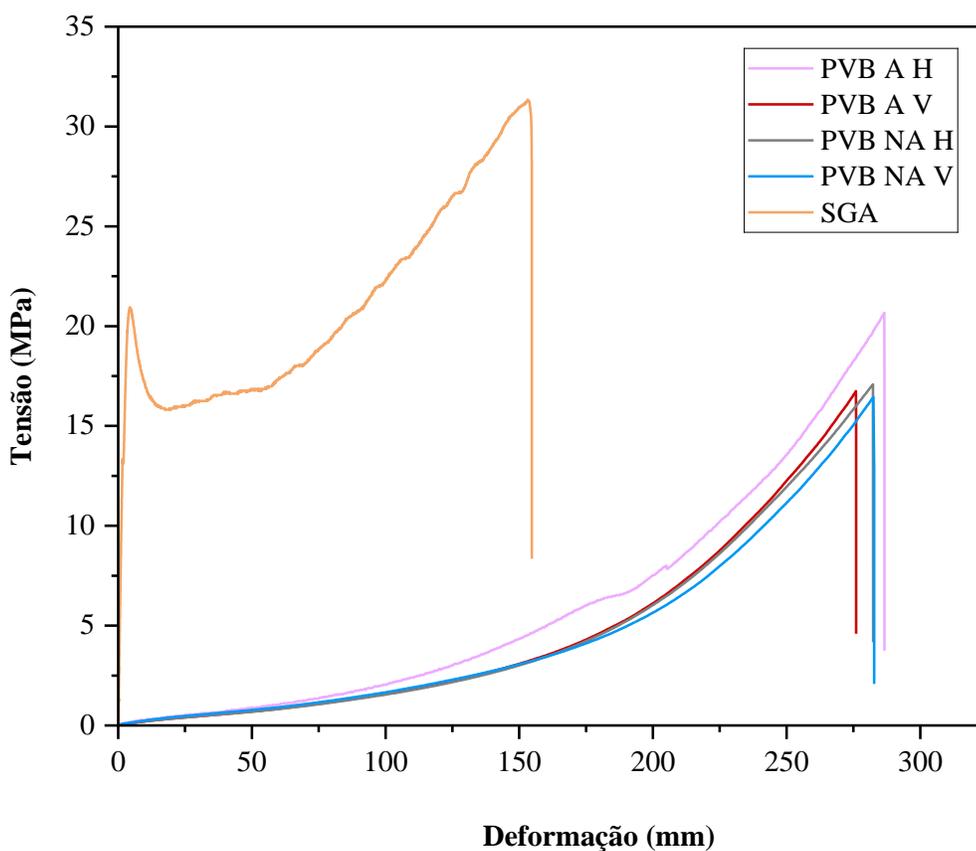


Figura 25 - Ensaio de tração (A), corpo de prova de PVB antes do ensaio (B) e após o ensaio de tração uniaxial (C).

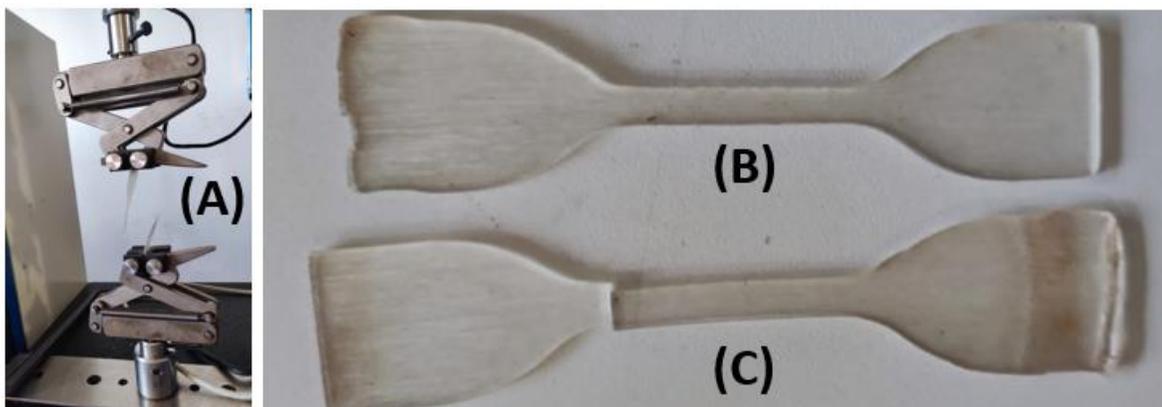
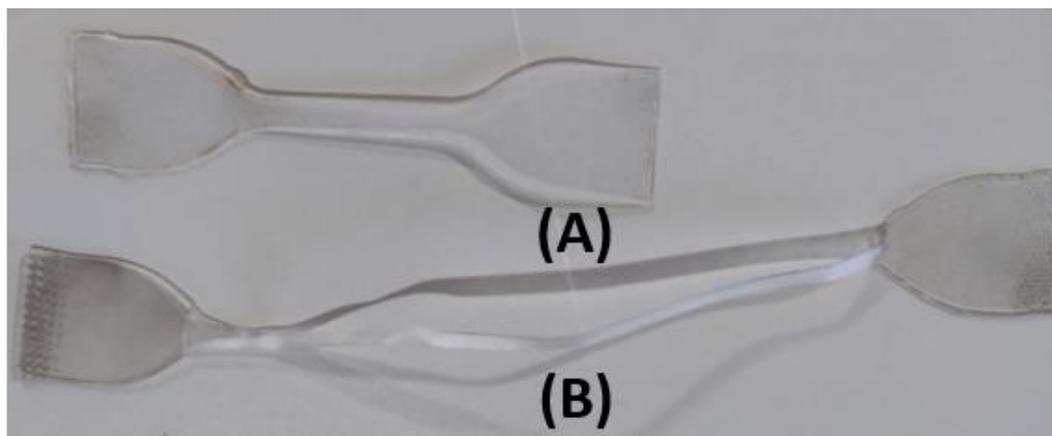


Figura 26 - Corpo de prova de SGA antes do ensaio (A) e após o ensaio de tração uniaxial (B).



Na Tabela 8 estão descritos os valores médios dos ensaios de tração uniaxial das películas de PVB e SGA.

Analisando os valores do ensaio de tração das películas (Tabela 8) observa-se que o PVB A apresentou tensão máxima de 20,69 MPa, superior ao PVB NA com uma tensão de 17,08 MPa, considerando os resultados na direção horizontal para comparação. Essa perda de resistência da película PVB NA está relacionada principalmente a absorção de água, ocorrendo a degradação do material com interferência nas suas propriedades mecânicas, com perda de resistência, e na sua adesão ao vidro (CENTELLES et al., 2020; CHEN et al., 2023). Com isso pode ser observado a importância dessa película precisar estar em um ambiente com controle de temperatura e umidade, para não interferir na sua qualidade, pois utilizar um PVB em contato com a temperatura ambiente na laminação pode levar a um vidro laminado com uma resistência menor, apresentando avarias como bolhas, e suscetível a ter delaminação com pouco tempo de instalação no empreendimento, já

que ocorre redução da resistência adesiva entre a película e o vidro.

A resistência à tração do SGA (33,17 MPa) é maior do que a do PVB A e PVB NA, 20,69 e 17,08 MPa, respectivamente. Devido a estrutura química semicristalina e reticulação do SGA, que não absorve água, ele possui uma resistência maior do que o PVB (HÁNA et al., 2020; KURARAY, 2023; LU; CHEN; SHAO, 2021; SU et al., 2022).

As películas de PVB A e PVB NA tiveram resultados inferiores aos estipulados pelo fabricante, que é de 23 MPa (Tabela 2) (KURARAY, 2017). O SGA também apresentou resistência à tração inferior (33,17 MPa) ao especificado pelo fabricante, que é de 34,5 MPa (Tabela 3) (KURARAY, 2023). Os valores de resistência à tração das películas podem variar de acordo com o método aplicado, bem como com o equipamento utilizado para os ensaios.

Tabela 8 – Tensões e deformações médias das películas.

Película	Direção das Cadeias Poliméricas	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Específ. Máxima (%)	Deformação Específ. de Ruptura (%)	Tensão de Escoam. (MPa)	Deformação Específ. de Escoam. (%)
PVB A	Horizontal	20,69	286,89	286,89	17,62	284,81
	Vertical	16,75	275,98	275,56	16,65	275,98
PVB NA	Horizontal	17,08	276,14	275,72	17,00	276,15
	Vertical	16,87	274,55	274,14	16,66	274,57
SGA	-	33,17	371,74	371,74	8,23	153,00

5.8 ENCOLHIMENTO

A Figura 27 apresenta o antes (Figura 27 (A e C)) e depois (Figura 27 (B e D)) das películas submetidas ao tratamento térmico. Já a Figura 28 corresponde aos resultados do ensaio de encolhimento das películas PVB NA e SGA nas diferentes temperaturas. Observa-se que a película PVB NA teve pequenas alterações nas medidas (Figura 27 (B)), com redução de tamanho, não passando de 4% a 200°C (Figura 28). Enquanto que o SGA reduziu significativamente de tamanho

entre 25 e 120°C (Figura 27 (D)), com uma redução de 34%, atingindo 38% na temperatura de 200°C (Figura 28).

O PVB possui comportamento semelhante ao observado por HONG et al., (2009), que estudou sobre o comportamento térmico do PVC, por serem da mesma família de termoplásticos. Tanto o PVB quanto o PVC são polímeros amorfos com estrutura reticulada, semelhante à borracha. Ao aumentar a temperatura, o encolhimento do PVB aumenta gradualmente. Em temperaturas muito mais altas do que as analisadas neste estudo, o polímero tende ao aumento da quantidade e perfeição dos cristalitos na estrutura, bloqueando o alinhamento da cadeia amorfa.

O comportamento da película do SGA pode ser explicado pelo do poliestireno, que consiste na redução da orientação das cadeias poliméricas com o aumento da temperatura até manter-se constante, com pequenas alterações dimensionais (ITO; HORIE; KOBAYASHI, 1978). Além disso, pelas propriedades do polietileno, presente no SGA, após uma determinada temperatura ele não retorna ao seu estado inicial (WU et al., 2018).

Figura 27 – Registro fotográfico da película PVB NA antes (A) e após (B) o ensaio de encolhimento; e da película SGA antes (C) e após (D) o ensaio de encolhimento.

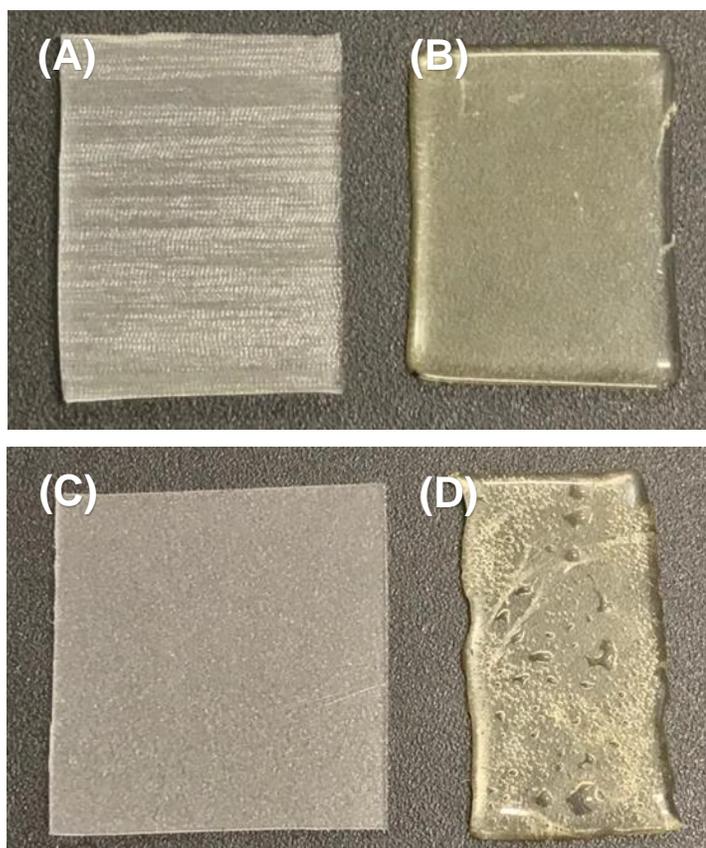
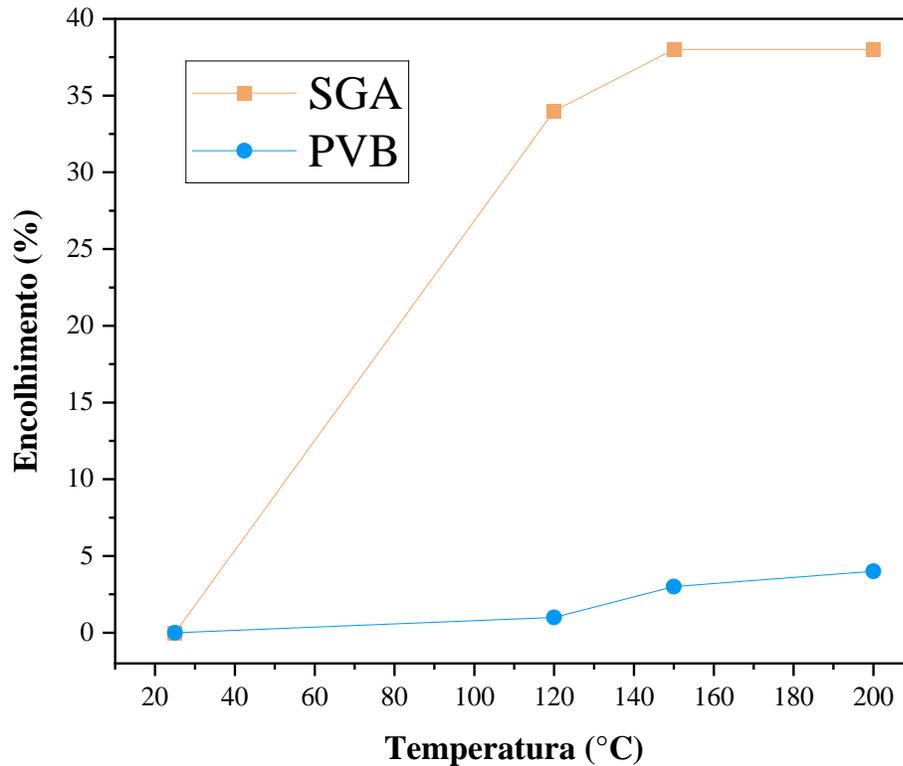


Figura 28 – Encolhimento do PVB NA e do SGA



No ensaio de encolhimento, o SGA vai reduzindo de tamanho até manter constância nas dimensões, e não volta ao seu tamanho original. Isso pode interferir na qualidade do vidro laminado, no caso de peças avariadas com bolhas, que precisa de reprocesso para expulsão dos bolsões de ar, pois o encolhimento da película pode levar a aumento das bolhas e delaminação do produto a curto tempo. Já em relação ao PVB, observa-se que essa película teve pequenas alterações nas suas dimensões. Portanto, no caso de reprocesso de um produto com bolhas, o PVB não terá alterações consideráveis nas suas dimensões, podendo ser reprocessado sem riscos de formar novas avarias no produto, mas perderá massa caso a temperatura ultrapasse os 200 °C, conforme observado no ensaio de TGA.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo comparativo entre as películas comerciais, PVB e SGA, revelou diferenças significativas em suas propriedades físicas, químicas, morfológicas, térmicas e mecânicas,

importantes para o processo de produção dos vidros laminados. Com a análise de FTIR, foi verificado que a composição química das películas estão em conformidade com os vistos na literatura.

A película PVB NA perdeu uma maior massa inicial comparado ao PVB A e, também, teve uma menor resistência à tração, devido à umidade absorvida. A absorção de água implica que o PVB deve ser armazenado em uma sala com controle de temperatura (17 °C) e umidade (21%), sendo recomendações do fornecedor, para manter suas propriedades adesivas, mecânicas e ópticas. Por outro lado, o polímero SGA demonstrou suportar tensões mais elevadas do que o PVB e resistência a temperaturas maiores, não necessitando estar em ambiente controlado.

A película de SGA apresentou maior rugosidade, o que pode proporcionar uma melhor adesão da película ao vidro. Em relação a molhabilidade e absorção de umidade, a película de PVB NA foi o que teve maior absorção de água. Com isso, é necessário um controle rigoroso de armazenamento do PVB, para evitar sua degradação, e conseqüentemente não interferir na qualidade do vidro laminado, como redução da adesão entre o vidro e a película. Termicamente, a película de PVB apresenta maior estabilidade dimensional, sendo uma das propriedades de maior interesse em casos de reprocessamento de laminação de vidros com avarias, como bolhas nas laterais.

Na etapa de aquecimento do vidro com a película, na autoclave, recomenda-se não ultrapassar a temperatura de 150 °C, em prol de preservar as propriedades das películas, para fornecer um produto com qualidade e durabilidade.

REFERÊNCIAS

AHANI, A.; AHANI, E. An overview for materials and design methods used for enhancement of laminated glass. **Hybrid Advances**, v. 3, p. 100063, ago. 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D638 – 14. Standard test method for tensile properties of plastics**. West Conshohocken, 2014.

ANAVIDRO. **Apple Retail Store, um cubo de vidro no meio de Nova Iorque**. Disponível em:

<<https://www.anavidro.com.br/apple-retail-store-um-cubo-de-vidro-no-meio-de-nova-iorque/>>.

Acesso em: 9 nov. 2022.

ANDREOZZI, L. et al. Dynamic torsion tests to characterize the thermo-viscoelastic properties of polymeric interlayers for laminated glass. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 1–13, ago. 2014.

ARATANI, S. et al. Fracture phenomena of float glass measured by the quasi-static method. **Strength, Fracture and Complexity**, v. 13, n. 2, p. 91–104, 13 out. 2020.

ASKELAND, D. R. ; W. W. J. **Ciência e engenharia dos materiais**. Cengage Learning. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14697. Vidro Laminado**. Rio de Janeiro, 2001a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14698. Vidro Temperado**. Rio de Janeiro, 2001b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14207. Boxes de Banheiro Fabricados com Vidros de Segurança**. Rio de Janeiro, , 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7199. Vidros Na Construção Civil**. Rio de Janeiro, 2016.

BEHÚNOVÁ, A. et al. Intelligent Designing and Increasing the Variability of Healthy Residential Buildings by Customizing Recycled Polyvinyl Butyral. **Sustainability**, v. 13, n. 16, p. 9073, 13 ago. 2021.

BONILHA, P. C. R. P. A. R. D. **Ensaio laboratoriais de lajes em vidro estrutural: estudo comparativo com normas internacionais de referência**. Dissertação de Mestrado. Instituto Politecnico do Porto (Portugal). 2019.

BORNEMANN, S. et al. Strength analysis of laminated glass/EVA interfaces: Microstructure, peel force and energy of adhesion. **Composite Structures**, v. 297, p. 115940, out. 2022.

CALLISTER JR, W. D. ; R. D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: p. 84-85. 2016.

CARROT, C.; BENDAOU, A.; PILLON, C. **Polyvinyl Butyral**. Londres. p. 89–137. 2015.

CASTORI, G.; SPERANZINI, E. Fracture strength prediction of float glass: The Coaxial Double Ring test method. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 1064–1076, nov. 2019.

CENTELLES, X. et al. Tensile test on interlayer materials for laminated glass under diverse ageing conditions and strain rates. **Construction and Building Materials**, v. 243, p. 118230, maio 2020.

CENTELLES, X. et al. Long-term loading and recovery of a laminated glass slab with three different interlayers. **Construction and Building Materials**, v. 287, p. 122991, jun. 2021.

CENTELLES, X.; CASTRO, J. R.; CABEZA, L. F. Experimental results of mechanical, adhesive, and laminated connections for laminated glass elements – A review. **Engineering Structures**, v. 180, p. 192–204, fev. 2019.

CHEN, X. et al. Effect of moisture on the delamination properties of fractured PVB-laminated glass: A joint experimental and numerical study. **Composite Structures**, v. 322, p. 117381, out. 2023.

CHEN, X.; CHEN, S.; LI, G.-Q. Experimental investigation on the blast resistance of framed PVB-laminated glass. **International Journal of Impact Engineering**, v. 149, p. 103788, mar. 2021.

ELBELBISI, A. et al. Influence of interlayer types and thicknesses on the blast performance of laminated glass panels. **Structures**, v. 57, p. 105231, nov. 2023.

ELKILANI, A. et al. The Influence of Strain Rate Behavior on Laminated Glass Interlayer Types

for Cured and Uncured Polymers. **Polymers**, v. 16, n. 6, p. 730, 7 mar. 2024.

ELZIÈRE, P. et al. Supramolecular Structure for Large Strain Dissipation and Outstanding Impact Resistance in Polyvinylbutyral. **Macromolecules**, v. 52, n. 20, p. 7821–7830, 22 out. 2019.

GY, R. Tempered and Laminated Glazing for Cars. Em: **Encyclopedia of Glass Science, Technology, History, and Culture**. Wiley. p. 1091–1102. 2021.

HÁNA, T. et al. Experimental and Numerical Study of Viscoelastic Properties of Polymeric Interlayers Used for Laminated Glass: Determination of Material Parameters. **Materials**, v. 12, n. 14, p. 2241, 11 jul. 2019.

HÁNA, T. et al. Experimental investigation of temperature and loading rate effects on the initial shear stiffness of polymeric interlayers. **Engineering Structures**, v. 223, p. 110728, nov. 2020.

HONG, C. K. et al. Thermal behaviors of heat shrinkable poly(vinyl chloride) film. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 112, n. 2, p. 886–895, 15 abr. 2009.

HUANG, X.; LIN, Y.; FANG, G. Thermal properties of polyvinyl butyral/graphene composites as encapsulation materials for solar cells. **Solar Energy**, v. 161, p. 187–193, fev. 2018.

HUSSAIN, S.; MOIZ, S. An Overview of Tempered Glass Load Bearing Capability and Mechanical Behavior. **ENG Transactions**, v. 3, n. 1, p. 1–9, 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 527-1: Plastics - Determination of tensile properties - Part 1: General principles**. , 2012.

ITO, E.; HORIE, T.; KOBAYASHI, Y. Thermal shrinkage of drawn polystyrene. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 22, n. 11, p. 3193–3201, 9 nov. 1978.

JIN, H. et al. Strong Graphene 3D Assemblies with High Elastic Recovery and Hardness. **Advanced**

Materials, v. 30, n. 36, 19 set. 2018.

JÓŹWIK, A. Application of Glass Structures in Architectural Shaping of All-Glass Pavilions, Extensions, and Links. **Buildings**, v. 12, n. 8, p. 1254, 16 ago. 2022.

KOŹŁOWSKI, M. L. P. D. M. H. D. S. J. Structural considerations on timber-glass composites at fire scenarios. **Challenging Glass Conference Proceedings**, p. 229–240, 2018.

KUMAR, P.; KHAN, N.; KUMAR, D. POLYVINYL BUTYRAL (PVB), VERSETILE TEMPLATE FOR DESIGNING NANOCOMPOSITE/COMPOSITE MATERIALS:A REVIEW. **Green Chemistry & Technology Letters**, v. 2, n. 4, p. 185–194, 14 dez. 2016.

KURARAY. **SENTRYGLAS® IONOPLAST INTERLAYER TECHNICAL MANUAL FOR STRUCTURAL ENGINEERS**. Disponível em: <https://www.specifiedby.com/kuraray-europe-gmbh/sentryglas-interlayer-1/sentryglas-technical-manual-exgls_b25e720c.pdf>. Acesso em: 3 mar. 2024.

KURARAY. **Kuraray Trosifol™ – Trosifol® Architectural Laminated Glass Interlayers**. Disponível em: <<https://stargrup.com.tr/wp-content/uploads/2019/02/Trosifol-PVB-Data-Sheet.pdf>>. Acesso em: 25 ago. 2022.

KURARAY. **Product Portfolio Sentryglass**. Disponível em: <https://www.trosifol.com/fileadmin/user_upload/TROSIFOL/support/downloads/product_brochures/pdf_documents/sentryglas/SentryGlas_8_2019_engl_web.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2022.

LASARO, A. ET AL. **Sistema de Produção-Empresa Cebrace**. Disponível em: <[em:https://prezi.com/w95avje1cvxu/sistema-de-producao-empresa-cebrace/](https://prezi.com/w95avje1cvxu/sistema-de-producao-empresa-cebrace/)>. Acesso em: 10 fev. 2024.

LÓPEZ-AENLLE, M.; NORIEGA, A.; PELAYO, F. Mechanical characterization of polyvinil butyral from static and modal tests on laminated glass beams. **Composites Part B: Engineering**,

v. 169, p. 9–18, jul. 2019.

LOUTER, C. et al. Durability of SG-laminated reinforced glass beams: Effects of temperature, thermal cycling, humidity and load-duration. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 280–292, fev. 2012.

LU, Y.; CHEN, S.; SHAO, X. Shear modulus of ionomer interlayer: Effects of time, temperature and strain rate. **Construction and Building Materials**, v. 302, p. 124224, out. 2021.

MARTÍN, M. et al. Polymeric interlayer materials for laminated glass: A review. **Construction and Building Materials**, v. 230, p. 116897, jan. 2020.

MARX, C. L.; CAULFIELD, D. F.; COOPER, S. L. Morphology of Ionomers. **Macromolecules**, v. 6, n. 3, p. 344–353, 1 maio 1973.

MUSGRAVES, J. D. H. J. C. L. (ED.). **Springer Handbook of Glass**. Cham: Springer International Publishing, 2019.

NAWAR, M. et al. High strain rate response of laminated glass interlayer materials. **Construction and Building Materials**, v. 299, p. 123934, set. 2021.

NIKOLAIDIS, T. P. S. ; B. C. C. **Structural stability study and design of steel-glass composite structures under earthquake actions**. CESARE'22 3rd Coordinating Engineering for Sustainability And Resilience, May 6th- 68 9th, 2022, Conference proceedings. **Anais...**Jordânia: Jordan University of Science and Technology, 2022.

NURAJE, N. et al. Superhydrophobic electrospun nanofibers. **J. Mater. Chem. A**, v. 1, n. 6, p. 1929–1946, 2013.

OLIVEIRA, F. R. **Efeito da Incorporação de Aparas do Ionômero Sentryglas nas Propriedades de Engenharia do PEAD e do PEBD**. Dissertação de Mestrado—São Bernardo do Campo: Centro

Universitário FEI, 2018.

OSNES, K.; BØRVIK, T.; HOPPERSTAD, O. S. Testing and modelling of annealed float glass under quasi-static and dynamic loading. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 201, p. 107–129, out. 2018.

RICHET, P. A History of Glass Science. Em: **Encyclopedia of Glass Science, Technology, History, and Culture**. Wiley, 2021. p. 1413–1440.

ROSHNI, S. B. et al. Design and fabrication of an E-shaped wearable textile antenna on PVB-coated hydrophobic polyester fabric. **Smart Materials and Structures**, v. 26, n. 10, p. 105011, 1 out. 2017.

SARAVANAN, S. et al. Influence of Mesoporous Silica and Butyral Content on the Mechanical, Water Absorption, and Permeability Properties of in situ Synthesized Silica/PVB Nanocomposite Films. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, v. 55, n. 12, p. 1220–1230, 12 ago. 2016.

SHAHRIARI, M.; SAEIDI GOOGARCHIN, H. Prediction of vehicle impact speed based on the post-cracking behavior of automotive PVB laminated glass: Analytical modeling and numerical cohesive zone modeling. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 240, p. 107352, dez. 2020.

SILVA, M. L. P. G. DA. **Definição de práticas operacionais padrão em polímeros para fins de importação**. Dissertação de Mestrado—Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2017.

SJÖSTRÖM, J. et al. Fire Resistance Testing of a Timber-Glass Composite Beam. **International Journal of Structural Glass and Advanced Materials Research**, v. 4, n. 1, p. 24–40, 1 jan. 2020.

SLAVICH, ALAN. **Reflections of a Glass Maker**. Page Publishing Inc, 2021.

ŠOOŠ, L. et al. The Recycling of Waste Laminated Glass through Decomposition Technologies. **Recycling**, v. 6, n. 2, p. 26, 15 abr. 2021.

SU, Y. et al. Surlyn resin ionic interlayer-based laminated glass: preparation and property analysis. **Advanced Composites and Hybrid Materials**, v. 5, n. 1, p. 229–237, 31 mar. 2022.

SULEIMAN, R. et al. Assessing the Anticorrosion and Antifouling Performances of a Sol–Gel Coating Mixed with Corrosion Inhibitors and Immobilised Bacterial Endospores. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 42, n. 10, p. 4327–4338, 31 out. 2017.

SYAQIRA S, S. N. et al. Tensile Strength and Moisture Absorption of Sugar Palm-Polyvinyl Butyral Laminated Composites. **Polymers**, v. 12, n. 9, p. 1923, 26 ago. 2020.

UDI, U. J. et al. Analysis of Environmental Stresses on the Mechanical Properties of Laminated Glass Composites: A Review of Experimental Results and Outlook. **Pertanika Journal of Science and Technology**, v. 31, n. 5, p. 2339–2359, 21 jul. 2023.

VALIO, G. T. **Estudo termodinâmico, microrreológico e de propriedades mecânicas de blendas poliméricas ternárias com matriz de PCL**. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2020.

WANG, C. et al. Synthesis, solvent interactions and Hansen solubility parameters of polyvinyl butyral. **Polymer Bulletin**, v. 80, n. 6, p. 6363–6383, 15 jun. 2023.

WANG, H. et al. Superhydrophobic and superoleophilic graphene aerogel for adsorption of oil pollutants from water. **RSC Advances**, v. 9, n. 15, p. 8569–8574, 2019.

WANG, X. et al. Experimental and analytical study on the pre-crack impact response of thick multi-layered laminated glass under hard body impact. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 206, p. 106613, set. 2021.

WESTPHAL, F. S. **Manual Técnico do Vidro Plano para Edificações**. São Paulo, 2016.

WU, Y. et al. Water-resistant hemp fiber-reinforced composites: In-situ surface protection by polyethylene film. **Industrial Crops and Products**, v. 112, p. 210–216, fev. 2018.

XU, Z. et al. Chemically Modified Polyvinyl Butyral Polymer Membrane as a Gel Electrolyte for Lithium Ion Battery Applications. **Macromolecular Materials and Engineering**, v. 304, n. 1, 26 jan. 2019.

ZHANG, P. et al. Preparation of poly (vinyl butyral) hollow fiber ultrafiltration membrane via wet-spinning method using PVP as additive. **Desalination**, v. 278, n. 1–3, p. 186–193, set. 2011.

ZHANG, X. et al. Preparation and characterization of polyvinyl butyral/silica hybrid antireflective coating: effect of PVB on moisture-resistance and hydrophobicity. **Journal of Sol-Gel Science and Technology**, v. 53, n. 1, p. 79–84, 13 jan. 2010.

ZHANG, X. et al. Impact response of laminated glass with varying interlayer materials. **International Journal of Impact Engineering**, v. 139, p. 103505, maio 2020.

ZHAO, C. et al. Experimental investigation into the post-breakage performance of pre-cracked laminated glass plates. **Construction and Building Materials**, v. 224, p. 996–1006, nov. 2019.