

TECNOLOGIA DOS VIDROS

UMA REVISÃO POR ALUNOS DE
ENGENHARIA DE MATERIAIS
DA UFRPE

VOLUME 1

VINÍCIUS DANTAS DE ARAÚJO
AURELIANO XAVIER DOS SANTOS
ROMILDO MORANT DE HOLANDA

AURELIANO XAVIER DOS SANTOS, ROMILDO MORANT DE HOLANDA E VINÍCIUS DANTAS DE ARAÚJO APRESENTAM O VOLUME I DE "TECNOLOGIA DOS VIDROS: UMA REVISÃO POR ALUNOS DE ENGENHARIA DE MATERIAIS DA UFRPE".

ESTA OBRA ESSENCIAL, FRUTO DE UM RIGOROSO TRABALHO DE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA CONDUZIDO POR ESTUDANTES DA UFRPE, DESVENDA O UNIVERSO DOS MATERIAIS VÍTREOS DE FORMA APROFUNDADA E ACESSÍVEL, EXPLORANDO A COMPLEXIDADE E VERSATILIDADE DO VIDRO, UM MATERIAL ONIPRESENTE EM NOSSO COTIDIANO.

OS AUTORES GUIAM O LEITOR PELOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO E CONTROLE DE QUALIDADE, ESSENCIAIS PARA AS DIVERSAS APLICAÇÕES DO MATERIAL, DESDE EMBALAGENS E CONSTRUÇÕES CIVIS ATÉ UTENSÍLIOS DOMÉSTICOS E COMPONENTES ELETRÔNICOS. SÃO EXPLORADAS AS PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS QUE CONFEREM AO VIDRO SUAS CARACTERÍSTICAS SINGULARES, COMO TRANSPARÊNCIA,

RESISTÊNCIA E DURABILIDADE.

UM DOS PONTOS ALTOS DO VOLUME É A DISCUSSÃO SOBRE A SUSTENTABILIDADE E A RECICLAGEM DO VIDRO SODA-CAL-SÍLICA. OS AUTORES ABORDAM OS DESAFIOS E AS PERSPECTIVAS FUTURAS, INCLUINDO A BUSCA POR VIDROS ECOEFICIENTES E O USO EM TECNOLOGIAS EMERGENTES, COMO OS VIDROS INTELIGENTES.

"TECNOLOGIA DOS VIDROS: UMA REVISÃO POR ALUNOS DE ENGENHARIA DE MATERIAIS DA UFRPE – VOLUME I" É UMA LEITURA INDISPENSÁVEL PARA ESTUDANTES, PESQUISADORES E PROFISSIONAIS DA ÁREA DE MATERIAIS, ENGENHARIA E ÁREAS AFINS, BEM COMO PARA TODOS AQUELES INTERESSADOS EM COMPREENDER A CIÊNCIA POR TRÁS DE UM DOS MATERIAIS MAIS FASCINANTES E TRANSFORMADORES DA HISTÓRIA DA HUMANIDADE.

Aureliano Xavier dos Santos
Romildo Morant de Holanda
Vinícius Dantas de Araújo

**TECNOLOGIA DOS VIDROS: UMA REVISÃO
POR ALUNOS DE ENGENHARIA DE
MATERIAIS DA UFRPE
VOLUME I**

1ª Edição

Recife
UFRPE
2025



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL
DE PERNAMBUCO**

Profa. Maria José de Sena
Reitora

Profa. Maria do Socorro de Lima Oliveira
Vice-Reitora

Renata Valéria Regis de Sousa Gomes
Pró-Reitora de Extensão, Cultura e Cidadania

Rinaldo Aparecido Mota
Pró-Reitor de Pós-Graduação

Danielli Matias de Macedo Dantas
Pró-Reitora de Ensino de Graduação

Rodrigo Gayger Amaro
Pró-Reitor de Planejamento e Administração

Tália de Azevedo Souto Santos
Pró-Reitora de Gestão Estudantil e Inclusão

Thieres George Freire da Silva
Pró-Reitor de Pesquisa

Renata Andrade de Lima e Souza
Pró-Reitora de Gestão de Pessoas

Elisabeth da Silva Araújo
Diretora do Sistema de Bibliotecas da UFRPE



**EDITORA UNIVERSITÁRIA -
EDUFRPE**

**Antão Marcelo Freitas Athayde
Cavalcanti**
Diretor

José Abmael de Araújo
Coordenador Administrativo

Josuel Pereira de Souza
Chefe de Produção Gráfica da Editora da
UFRPE

Diagramação e arte de capa
Janilson Lemos de Araújo Silva

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

S237t Santos, Aureliano Xavier dos.
Tecnologia dos vidros : uma revisão por alunos de Engenharia
de materiais da UFRPE / Aureliano Xavier dos Santos, Romildo
Morant de Holanda, Vinícius Dantas de Araújo. – 1. ed. – Recife :
EDUFRPE, 2025.

v. 1.: il.
Inclui referências.

1. Vidro cerâmico 2. Materiais 3. Material cerâmico I. Holanda,
Romildo Monrat de. II. Araújo, Vinícius Dantas de. III. Título

CDD 620.11

ISBN (físico) 978-85-7946-535-2

ISBN (digital) 978-85-7946-536-9

Conselho Editorial

PORTARIA GR/UFRPE Nº 16/2025, DE 6 DE JANEIRO DE 2025

Presidente do Conselho

Profa. Dra. MARIA DO SOCORRO DE LIMA OLIVEIRA

Diretor da Editora Universitária da UFRPE

ANTÃO MARCELO DE ATHAYDE CAVALCANTI

Conselheiros:

ELISABETH DA SILVA ARAUJO (Diretora do Sistema de Bibliotecas da UFRPE)

Profa. Dra. AMANDA BRANDÃO ARAÚJO MORENO

Profa. Dra. ANA VITÓRIA DE ALMEIDA MACÊDO

Profa. Dra. ANA VIRGÍNIA MARINHO SILVEIRA

Dra. ÉNERY GISLAYNE DE SOUSA MELO

Prof. Dr. GUSTAVO RIBEIRO DE OLIVEIRA

Profa. Dra. IVANDA MARIA MARTINS SILVA

Prof. Dr. JÚLIO CÉZAR DOS SANTOS NASCIMENTO

Prof. Dr. JOSÉ WILTON PINHEIRO JUNIOR

Prof. Dra. JULIA MARIA RAPOSO GONÇALVES DE MELO LARRÉ

Profa. Dra. JULIANA ALVES DE ANDRADE

Prof. Dr. LUIS OTAVIO BRITO DA SILVA

Profa. Dra. MARIA DO ROSÁRIO DE FÁTIMA ANDRADE LEITÃO

Profa. Dra. MONICA LOPES FOLENA ARAÚJO

Profa. Dra. RENATA PIMENTEL TEIXEIRA

Profa. Dra. SORAYA GIOVANETTI EL-DEIR

Profa. Dra. SUZANA FERREIRA PAULINO DOMINGOS

Profa. Dra. TATIANA SIMÕES E LUNA

Profa. Dra. THAIS LUDMILA DA SILVA RANIERI

Prefácio

É com grande satisfação que apresentamos o Volume I da obra "Tecnologia dos Vidros: Uma Revisão por Alunos de Engenharia de Materiais da UFRPE". Este livro representa o culminar de um esforço dedicado e um profundo mergulho no fascinante universo dos materiais vítreos, um campo de estudo que combina ciência fundamental, engenharia avançada e aplicações que permeiam nosso cotidiano.

A escolha do tema "Tecnologia dos Vidros" não é por acaso. O vidro, em suas diversas formas e composições, é um material de versatilidade ímpar, presente desde as mais simples embalagens até as mais complexas tecnologias de ponta. Sua natureza não-cristalina, aliada a propriedades como transparência, resistência química e capacidade de reciclagem infinita, o posiciona como um protagonista essencial no desenvolvimento tecnológico e na busca por soluções mais sustentáveis.

Neste volume, os alunos de Engenharia de Materiais da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) exploram de maneira aprofundada os principais aspectos do vidro soda-cal-sílica, o tipo mais amplamente utilizado na indústria. São abordados temas cruciais como sua composição química e estrutura molecular, os processos de fabricação e controle de qualidade, as propriedades físicas e químicas que o caracterizam, bem como os tratamentos térmicos e superficiais

que aprimoram seu desempenho. Além disso, a obra oferece uma comparação esclarecedora com outros tipos de vidro, destacando suas particularidades e nichos de aplicação.

Um dos pilares deste trabalho é a discussão sobre a sustentabilidade e a reciclagem do vidro soda-cal-sílica. Em um cenário global de crescente conscientização ambiental, a capacidade de reciclagem do vidro é um diferencial fundamental. Os desafios e as perspectivas futuras, incluindo a busca por vidros ecoeficientes e o uso em tecnologias emergentes como os vidros inteligentes, são tratados com a seriedade e a visão que o tema exige.

Este livro não é apenas uma compilação de informações, mas um reflexo da dedicação e do rigor acadêmico de cada estudante envolvido. Através de uma metodologia de revisão bibliográfica abrangente e aprofundada, os autores buscaram sintetizar o conhecimento existente, oferecendo uma base sólida para acadêmicos, profissionais e todos aqueles que desejam compreender a complexidade e o potencial deste material tão singular.

Esperamos que esta obra seja uma fonte valiosa de conhecimento e inspire novas pesquisas e inovações no campo da ciência e engenharia de materiais. Que ela contribua para a formação de profissionais conscientes e capacitados, aptos a enfrentar os desafios do futuro e a desenvolver soluções que harmonizem o avanço tecnológico com a responsabilidade ambiental.

Aos autores, nossos parabéns pelo empenho e pela qualidade deste trabalho. Aos leitores, uma excelente e enriquecedora jornada pelo mundo da tecnologia dos vidros.

Prof. Aureliano Xavier dos Santos

Prof. Romildo Morant de Holanda

Prof. Vinícius Dantas de Araújo

Recife, 2025.

Sumário

1 VIDRO SODA-CAL-SÍLICA	8
1.1 Introdução	9
1.2 Revisão Bibliográfica	11
1.2.1 Composição Química e Estrutura Molecular	11
1.2.2 Processos de Fabricação e Controle de Qualidade	14
1.2.3 Propriedades Físicas e Químicas	16
1.2.4 Tratamentos Térmicos e Superficiais no Vidro soda-cal-sílica	18
1.2.5 Comparação entre Vidro soda-cal-sílica e Outros Tipos de Vidro	20
1.2.6 Aplicações Industriais e Tecnológicas	22
1.2.7 Sustentabilidade e Reciclagem do Vidro soda-cal-sílica	24
1.2.8 Desafios e Perspectivas Futuras	26
1.3 Metodologia	29
1.4 Resultados e Discussão	30
1.5 Conclusões e Perspectivas	35
2 COMPÓSITO DE MATRIZ DE VIDRO - UMA REVISÃO DE LITERATURA	46
2.1 Introdução	47
2.1.1 Processamento e propriedades	48
2.2 Metodologia	52
2.2.1 Estratégia de busca e seleção de artigos	52
2.2.2 Base de dados e critérios adotados	52
2.2.3 Abordagem utilizada para análise das informações	54

2.2.1 Estratégia de busca e seleção de artigos	52
2.2.2 Base de dados e critérios adotados	52
2.2.3 Abordagem utilizada para análise das informações	54
2.3 Resultados e Discussão	55
2.3.1 Compósitos com Matriz de Vidro e Fibra de Basalto	56
2.3.2 Compósitos com Matriz de Vidro metálico/dendrita	58
2.3.3 Revestimentos baseados em compósitos com matriz de vidro zircônio	59
2.3.4 Compósitos com Matriz de Vidro luminescentes	61
2.4 Discussão	62
2.5 Conclusões e Perspectivas	69
3 VIDROS FOTOCRÔMICOS	74
3.1 Introdução	75
3.2.1 Formação e Transição Vítea	77
3.2 Fundamentos dos Vidros	77
3.2.2 Estrutura	78
3.3 Vidros Fotocrômicos	79
3.3.1 Mecanismo de Funcionamento	79
3.3.2 Processos de Fabricação	81
3.3.3 Caracterização e Propriedades	82
3.4 Conclusões e Perspectivas	84

1 VIDRO SODA-CAL-SÍLICA

Daiane Vieira da Silva, Maria Eduarda Silva de Lima

Resumo

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica abrangente sobre o vidro soda-cal-sílica, abordando sua composição, processos de fabricação, propriedades, aplicações e impactos ambientais. O vidro soda-cal-sílica é composto principalmente por sílica (SiO_2), óxido de sódio (Na_2O) e óxido de cálcio (CaO), e por isso é tido como o tipo mais utilizado na indústria vidreira. Suas aplicações são principalmente em embalagens, construção civil, utensílios domésticos e produtos eletrônicos. A fabricação do vidro soda-cal-sílica envolve quatro etapas principais como fusão, conformação, resfriamento e acabamento, sendo este último envolvendo tratamentos térmicos ou aplicação de revestimentos que otimizem suas propriedades mecânicas. Uma das características mais importantes sobre o vidro soda-cal-sílica, dentro de uma indústria que se preocupa com sustentabilidade, é que ele é altamente reciclável, apesar de que esse processo de reciclagem ainda enfrenta algumas dificuldades relacionadas à presença de impurezas e falta de interesse do consumidor em utilizar produtos reciclados. A pesquisa também apresenta o papel futuro do vidro soda-cal-sílica na indústria, que já vem sendo

aprimorado para aplicação em tecnologias específicas, através de modificações na composição e estrutura desse material com a introdução de óxidos modificadores de rede. O uso do vidro soda-cal-sílica também pode ser visto em tecnologias emergentes, como vidros inteligentes, e tem se mostrado promissor, ampliando seu potencial de aplicação e funcionalidade.

Palavras-chave: Embalagens de vidro. Propriedades físicas. Propriedades químicas. Vidro soda-cal-sílica.

1.1 Introdução

O vidro é definido como um produto inorgânico originário da vitrificação de vidro líquido por resfriamento sem cristalização (C14 Committee, [s. d.]). Historicamente, este material já era utilizado desde os primórdios da humanidade para artefatos de corte feitos a partir de obsidiana, sendo ela proveniente do resfriamento rápido de lavas vulcânicas (Ziemath, 2011), e ao longo dos séculos foi sendo adaptado para uso de grandes civilizações, como egípcias e gregas, de diversas formas. Diferentemente dos demais materiais cerâmicos, os vidros possuem uma estrutura não-cristalina, caracterizada pela desordem dos átomos em uma estrutura unitária, sendo este o fator de algumas de suas propriedades singulares, como transparência, dureza e resistência química.

Dentre esta classe de materiais cerâmicos, o vidro de soda-cal-sílica é o de maior destaque, conhecido por ter o maior volume de produção no setor de fabricação de vidro do mundo (Ezra *et al.*, 2024), sendo o tipo mais popular entre os resíduos ricos em sílica e é utilizado em painéis de janelas, garrafas de vidro, produtos de contêineres e entre outras múltiplas aplicações que têm atraído atenção da indústria para o cotidiano básico (Bateni; Hamidon; Matori, 2014; Yasmin *et al.*, 2020). O principal constituinte do vidro de soda-cal-sílica é o SiO_2 (70–75% em peso), seguido por 12–16% em peso de óxido de sódio (Na_2O) e 10–15% em peso de óxido de cálcio (CaO) (Lee *et al.*, 2023), justificando assim o fato do mesmo exibir um baixo custo de produção. Entretanto, apesar da sua popularidade e viabilidade econômica, o vidro soda-cal-sílica ainda enfrenta desafios relacionados às suas propriedades, como fragilidade inerente, levando a esforços extensivos para melhorar a resistência ao impacto, resistência à fratura, dureza e outras propriedades mecânicas, consequentemente fazendo com que a busca pela otimização da composição e estrutura desses materiais seja priorizada (Przepiora *et al.*, 2024), a fim de fortalecê-los e ampliar suas aplicações.

Ademais, atualmente, com a crescente visão quanto a sustentabilidade e meio ambiente pelas indústrias, estudos referentes à reciclagem do vidro soda-cal-sílica também têm sido visadas, levando em consideração a necessidade de minimizar os impactos ambientais provenientes de seu

descarte. Devido à sua característica inerte, o vidro pode ser tecnicamente reciclado infinitamente e refundido para fabricar novos produtos de vidro após sua vida útil (Tran *et al.*, 2024), mas ainda assim essa situação ideal raramente é alcançada devido à contaminação e à mistura de diferentes cores e tipos de vidro no fluxo de resíduos (Guo *et al.*, 2020), levando a reciclagem do vidro a ser uma das suas principais pautas debatidas.

Assim, diante dos contextos citados, este capítulo tem como objetivo apresentar de forma abrangente uma revisão com base na literatura científica sobre o vidro soda-cal, levando em consideração assuntos sobre sua composição e estrutura molecular, processos de fabricação, propriedades físicas e químicas, aplicações industriais, desafios ecológicos e perspectivas futuras no mercado vidreiro. Com essa análise, visa-se expandir o conhecimento sobre esse material e das inovações que impulsionam seu desenvolvimento na indústria.

1.2 Revisão Bibliográfica

A seguir faremos uma revisão bibliográfica sobre os conceitos básicos dos vidros soda-cal-sílica.

1.2.1 Composição Química e Estrutura Molecular

A composição química do vidro soda-cal-sílica é fundamental para entender suas propriedades físicas e mecânicas. Este tipo de material é composto principalmente por sílica (SiO_2), óxido de sódio (Na_2O) e óxido de cálcio (CaO), sendo a base desses elementos determinante para a estrutura e propriedades do material. O SiO_2 atua como o principal formador de rede, conferindo ao vidro sua estrutura tridimensional não-cristalina e alta resistência química. A função do SiO_2 na matriz vítrea é essencial para conferir estabilidade estrutural ao vidro. Sua estrutura tetraédrica de ligações Si-O-Si garante a formação de uma rede tridimensional. No entanto, a alta viscosidade do SiO_2 puro dificulta seu processamento industrial, tornando necessária a adição de modificadores de rede como o Na_2O (Huang; Tomozawa, 2025). O CaO , por sua vez, desempenha o papel de estabilizador, aumentando a resistência mecânica e química do vidro, evitando sua excessiva solubilização em água e garantindo durabilidade estrutural (Huang; Tomozawa, 2025). Na condição do Na_2O de reduzir a energia necessária para fundir o vidro, tornando-o mais maleável para a conformação. Embora a sua adição excessiva pode comprometer a resistência mecânica do material, aumentando sua solubilidade em água.

A contribuição para variações na composição química do vidro influencia diretamente as propriedades do vidro. O aumento do teor de Na_2O reduz a resistência mecânica e eleva a expansão térmica, tornando o material mais suscetível a

fissuras. Já a adição de CaO reforça a coesão estrutural, aumentando a dureza e a estabilidade térmica do vidro (Karacasulu *et al.*, 2025). A presença de impurezas também podem modificar significativamente as propriedades mecânicas do vidro soda-cal-sílica, alterando sua resistência a impactos e fadiga estrutural.

A expansão térmica do vidro soda-cal-sílica é um fator crítico para sua resistência ao choque térmico. Variações na composição química podem aumentar ou reduzir a dilatação térmica do material, influenciando sua estabilidade estrutural sob mudanças bruscas de temperatura. O aumento do teor de Na₂O, por exemplo, reduz a resistência ao choque térmico, tornando o vidro mais propenso a trincas quando submetido a variações de temperatura (Kawamoto; Fujimoto; Asai, 2024). Além disso, modificações na composição do vidro podem influenciar sua resistência mecânica em função da formação de microestruturas mais frágeis ou mais coesas. O ajuste adequado da proporção entre formadores e estabilizadores de rede é essencial para otimizar o desempenho mecânico do vidro em aplicações industriais (Huang; Tomozawa, 2025).

O vidro é caracterizado por uma estrutura não-cristalina, sem a organização cristalina típica de sólidos convencionais. Essa desordem estrutural confere ao vidro propriedades únicas, como transparência óptica e resistência química. Em pesquisas recentes, é relatado que a interação com o ambiente pode modificar sua rede atômica, especialmente na

presença de umidade. O trabalho de Huang e Tomozawa (2025) demonstrou que a entrada de moléculas de água na microestrutura do vidro altera seu módulo elástico, promovendo relaxamento estrutural e possíveis alterações na resistência mecânica ao longo do tempo. A ausência de uma estrutura cristalina no vidro soda-cal-sílica resulta em propriedades físicas únicas, como alta transparência e isotropia mecânica. Diferentemente dos materiais cristalinos, onde há planos de deslizamento bem definidos, a estrutura do vidro dificulta a propagação de defeitos estruturais, tornando-o mecanicamente frágil (Kawamoto; Fujimoto; Asai, 2024). A interação do vidro com elementos externos, como íons alcalinos e moléculas de água, pode alterar suas propriedades estruturais. A incorporação de impurezas pode modificar a conectividade da rede vítrea, alterando seu comportamento mecânico e sua resistência à fratura ao longo do tempo (Karacasulu *et al.*, 2025).

1.2.2 Processos de Fabricação e Controle de Qualidade

A formação do vidro soda-cal-sílica abrange quatro principais etapas: fusão, conformação, resfriamento e acabamento. Compreender o ponto de fusão do mesmo é essencial antes de usá-lo no processo de fabricação, por isso durante a fusão as matérias-primas são aquecidas a

temperaturas superiores a 1500 °C para formar uma massa homogênea. A conformação pode ser realizada por diferentes processos, como flutuação (*float glass*) ou moldagem. O resfriamento controlado, ou recozimento, é essencial para minimizar tensões internas e melhorar a resistência mecânica (Karacasulu *et al.*, 2025). A fusão do vidro ocorre em fornos industriais de alta temperatura, onde os componentes se misturam para formar uma massa vítrea homogênea. A qualidade da fusão depende do controle rigoroso das condições térmicas, evitando a formação de bolhas e heterogeneidades estruturais que possam comprometer as propriedades do produto final (Huang e Tomozawa, 2025).

O efeito de controle de qualidade na produção de vidro soda-cal-sílica é crucial para garantir que as propriedades do material atendam aos padrões exigidos para seus diversos requisitos. Pois durante o processo de fabricação, a composição do vidro é frequentemente inspecionada por meio de técnicas analíticas como espectroscopia e análise térmica. Esses métodos avançados de inspeção óptica e testes mecânicos são utilizados na indústria para detectar defeitos superficiais e estruturais e garantir que o vidro atenda às especificações técnicas exigidas para cada aplicação (Huang; Tomozawa, 2025). Além disso, são realizados rigorosos testes de resistência à tração e compressão e avaliação do comportamento térmico para garantir que o vidro produzido seja adequado para aplicações específicas, como embalagem e construção.

Portanto, o controle de qualidade envolve não apenas o monitoramento das matérias-primas e dos processos de fabricação, mas também a avaliação constante das propriedades finais do vidro, assim garantindo a confiabilidade e desempenho a longo prazo.

1.2.3 *Propriedades Físicas e Químicas*

O vidro soda-cal-sílica apresenta uma resistência mecânica moderada, sendo amplamente utilizado e aplicado em funções ópticas e em estruturas. Sua resistência pode ser melhorada por meio de técnicas de modificação superficial, como as estruturas periódicas induzidas por laser (*Laser-Induced Periodic Surface Structures - LIPSS*), que aumentam a dureza e reduzem a fragilidade do material. Além disso, processos térmicos como têmpera e recozimento afetam a distribuição de tensões internas, proporcionando um material mais resistente a impactos e fraturas (Kumar *et al.*, 2025; Kumar; Singh; Kumar, 2023).

A resistência química do vidro soda-cal-sílica é influenciada pela presença de álcalis solúveis, que podem ser lixiviadas em meios aquosos agressivos. Para melhorar a durabilidade química, tratamentos superficiais como revestimentos protetores são frequentemente aplicados (Huang; Tomozawa, 2025).

A transmissão de luz é uma característica essencial para a indústria óptica, podendo ser ajustada por modificações na superfície do material. Técnicas de texturização a laser têm sido estudadas para reduzir reflexos indesejados e aprimorar a eficiência do vidro em dispositivos ópticos e eletrônicos. A transmissão óptica do vidro depende da pureza dos componentes utilizados na sua fabricação. Impurezas metálicas podem afetar a transparência do material, reduzindo sua eficiência em aplicações ópticas avançadas (Karacasulu *et al.*, 2025).

A estabilidade térmica do vidro também é um fator crítico, já que pode suportar temperaturas elevadas antes da fusão, alcançando até 800 °C, dependendo da formulação e do tratamento térmico aplicado (Kumar; Singh; Kumar, 2023).

Quanto às interações químicas o vidro soda-cal-sílica apresenta uma resistência significativa, no entanto podendo sofrer corrosão em ambientes altamente ácidos, devido à lixiviação de íons da rede vítrea. A exposição prolongada a soluções alcalinas também pode afetar suas propriedades estruturais, levando à degradação da superfície ao longo do tempo. Esse comportamento deve ser considerado em aplicações que envolvem contato com produtos químicos agressivos, como laboratórios e setores industriais (Kumar; Singh; Kumar, 2023).

1.2.4 Tratamentos Térmicos e Superficiais no Vidro soda-cal-sílica

Uma das versatilidades do vidro soda-cal-sílica na indústria vidreira é a capacidade de alterar suas propriedades mecânicas e químicas através de diferentes tipos de tratamentos térmicos e superficiais. Esses processos são adotados ao final do processo de fabricação com o intuito de melhorar a resistência mecânica do produto, podendo ser utilizadas técnicas como a de têmpera térmica ou revestimentos funcionais.

Vidros à base de sílica já são predispostos a tratamentos térmicos em várias temperaturas para serem expostos comercialmente (Maeda; Matsuura, 2024). Naturalmente, o processo de têmpera térmica é o mais popular para o fortalecimento do vidro. Esse tratamento envolve o aquecimento do vidro em temperaturas abaixo do ponto de fusão, normalmente 600-900 °C em média, a depender da composição (Yang, Weixiang *et al.*, 2025), seguido de resfriamento rápido. A têmpera térmica é obtida com uma alta taxa de resfriamento da superfície, que congela a mesma enquanto permite um resfriamento mais lento do núcleo simultaneamente. O resfriamento mais lento no núcleo cria uma tensão crescente que puxa as superfícies para a compressão seguindo uma forma parabólica aproximada através da espessura. O resultado desse processo, o chamado

vidro temperado, é popular entre os consumidores, sendo bastante aplicado em projetos que requerem segurança, pois, quando quebrado, ele se fragmenta em pedaços pouco cortantes (Stewart; Prakash, 2023).

Além do tratamento térmico, os tratamentos de superfície também são linha de frente na indústria vidreira. A aplicação de revestimentos, podendo ser através de materiais metálicos ou por óxidos funcionais, é responsável por alterar as propriedades básicas do vidro soda-cal-sílica. Um exemplo prático disso é o vidro reflexivo, relatado no estudo feito por Mehaoued e Lartigue (2019), que relataram sobre o microclima ao redor de um edifício de vidro reflexivo, tipicamente composto por vidro soda-cal-sílica como base.

Uma técnica também notória na indústria vidreira, além dos tratamentos térmicos e de superfície, é a de laminação do vidro, onde duas ou mais camadas de vidro são alimentadas com uma intercamada polimérica. O vidro laminado oferece resistência superior ao impacto e redução da queda de fragmentos em comparação ao vidro monolítico, levando a uma alta demanda em edifícios modernos, como fachadas de vidro estrutural (Wang *et al.*, 2025). Comumente, o polivinil butiral (PVB) é o material mais solicitado para preencher a camada intermediária devido à sua capacidade de bloquear a radiação ultravioleta, mas também podem ser utilizados os ionoplast ou EVAs (Ahani; Ahani, 2023). A presença do polímero intermediário confere maior resistência ao vidro, pois, em caso

de quebra, os resquícios permanecem presos à essa camada. O vidro laminado, assim como o temperado, também é aplicado em situações que requerem maior segurança do consumidor.

Esses tratamentos são mais aprofundados proporcionalmente aos avanços e necessidades tecnológicas. Essas inovações para melhoria das propriedades dos vidros demonstram a crescente demanda da necessidade na adaptação do vidro em exigências mais modernas e sofisticadas.

1.2.5 Comparação entre Vidro soda-cal-sílica e Outros Tipos de Vidro

Por conta de sua composição simples, baixo custo de produção e versatilidade, o vidro soda-cal-sílica é o tipo de vidro mais utilizado pela indústria. Porém, existem outros tipos de vidros com composições e propriedades específicas, distintas do vidro soda-cal-sílica, que também são apropriados para as demais aplicações. Os mais notórios entre eles, além do soda-cal-sílica, são o vidro borossilicato, o vidro de quartzo e o vidro de chumbo, cada um com propriedades únicas.

O vidro borossilicato é um tipo de vidro resistente ao calor e aos elementos químicos, superando o vidro soda-cal-sílica. O borossilicato possui propriedades notáveis de proteção contra radiação devido à sua elevada transparência e durabilidade, bem como suas características de baixa expansão térmica e alta resistência a forças químicas e térmicas, que

fazem consequentemente os vidros de borossilicato serem um material versátil com considerável potencial de proteção contra radiação, e o compósito de vidro é amplamente empregado em contextos médicos, nucleares e industriais (Ezra *et al.*, 2024). Por esses motivos ele é utilizado em aplicações laboratoriais, utensílios de cozinha e indústrias químicas, onde a resistência a variações de temperatura e agentes corrosivos é essencial.

O vidro de quartzo, composto quase inteiramente por dióxido de silício (SiO_2), é um material não-cristalino resistente à altas temperaturas, quimicamente estável e possui propriedades ópticas excepcionais, amplamente utilizado em aplicações aeroespaciais e de proteção especializada (Longlong; Liang, 2025). A diferença mais notória entre este tipo de vidro é que, comparado ao vidro soda-cal-sílica, que funde em temperaturas próximas de 1500°C , o vidro de quartzo é fundido em temperaturas ainda mais elevadas, o que dificulta mais a sua fabricação (Qiu *et al.*, 2025). Por esta razão, este tipo de vidro é utilizado em ramos muito específicos da indústria, como em óptica, componentes eletrônicos e aplicações aeroespaciais.

O vidro chumbo, conhecido popularmente também como cristal de chumbo por sua aparência, é caracterizado por sua elevada densidade e alto índice de refração. Pela presença do chumbo em sua composição, esse material é comumente apropriado em aplicações nas quais o produto final requeira certo brilho, como em cristais decorativos. Historicamente, já

foram registrados ornamentos de vidro de chumbo datados entre o século X e XIII encontrados na Europa Central e Oriental, em fragmentos de joias (Pankiewicz *et al.*, 2025).

Desta forma, ainda que o vidro soda-cal-sílica apresente limitações quanto a propriedades mecânicas e químicas em comparação aos demais e precise ser incrementado com tratamentos durante a fabricação, a sua facilidade de produção e o baixo custo continuam a trazer enfoque para este material na indústria. De certa forma, sabe-se que a escolha quanto ao tipo de vidro essencial para uma aplicação específica irá depender de exigências específicas que possam ser balanceadas através da composição e propriedades requeridas para o projeto, prezando também pela viabilidade econômica.

1.2.6 Aplicações Industriais e Tecnológicas

Vidros de soda-cal-sílica são bem conhecidos por terem o maior volume de produção no setor de fabricação de vidro do mundo. Sua composição, baseada principalmente por sílica (SiO_2), carbonato de sódio (Na_2CO_3) e cal (CaO), lhe garante grande versatilidade no mercado vidreiro por ser um produto economicamente viável e com ampla de aplicações industriais e tecnológicas.

Popularmente, o vidro soda-cal-sílica é amplamente utilizado na produção de embalagens, principalmente para a indústria alimentícia, como em garrafas de bebida, sendo

preferível por sua aparência transparente e também por preservar a integridade do produto, sendo esta devido a sua característica de inércia química (Yang, Yingqiang; Liu, 2024).

Ademais, além de ser utilizado pela indústria alimentícia nas embalagens, o vidro soda-cal-sílica também é bastante requisitado em projetos de construção civil na forma de vidros planos, para janelas, fachadas e divisórias, também devido à sua transparência e, além disso, pela melhor resistência mecânica quando passado por tratamento térmico ou laminação. As janelas de vidro foram relatadas no estudo feito por Jalaly e Shahabadi (2024), que projetaram uma janela de vidro micropadronizada para reduzir as demandas de energia de um edifício.

Utensílios domésticos também são tipicamente fabricados a partir do vidro soda-cal-sílica, como copos, pratos e tigelas, pela sua durabilidade, facilidade de fabricação e custo relativamente baixo.

O vidro soda-cal-sílica também é usado na indústria eletrônica, especialmente na fabricação de telas de dispositivos, como smartphones, televisores e painéis solares. Sua resistência a choques térmicos e facilidade de processamento são características que favorecem sua aplicação.

Em resumo, o vidro soda-cal-sílica continua a ser um material fundamental em várias indústrias devido às suas propriedades balanceadas de custo e desempenho. No entanto,

alternativas como o vidro borossilicato e o vidro de quartzo têm seu lugar em setores onde características específicas, como resistência térmica e estabilidade química, são prioritárias.

1.2.7 Sustentabilidade e Reciclagem do Vidro soda-cal-sílica

Mediante às demandas atuais, a sustentabilidade tem sido foco da indústria vidreira, principalmente pelo impacto ambiental que a produção e descarte do vidro soda-cal-sílica podem causar à natureza. Uma das grandes preocupações está no processo de fabricação deste material, que precisa passar por um processo de fusão das matérias-primas em temperaturas acima de 1500 °C (Yang, Yingqiang; Liu, 2024), que resulta em alto consumos energéticos e emissões de dióxido de carbono (CO₂). Ademais, outro problema vinculado a esses vidros é quanto a extração de sílica e outras demais matérias-primas, pois acarreta em degradação ambiental, fazendo ser essencial a busca por formas de reduzir esses impactos à natureza.

A reciclagem do vidro soda-cal-sílica surge como uma alternativa viável para reduzir os danos ambientais. A soda-cal-sílica, utilizada para fabricar uma grande variedade de materiais de vidro, é barata, quimicamente estável e moderadamente durável, entretanto ela gera uma quantidade significativa de resíduos de vidro que exige uma abordagem distinta para o gerenciamento de resíduos sólidos. Tornar esses

resíduos sólidos mais úteis, benéficos para a sociedade e ambientalmente benignos é, portanto, uma ideia nova no mundo (Mohd Zaid *et al.*, 2016).

Apesar de seus benefícios, a reciclagem do vidro soda-cal-sílica enfrenta desafios significativos. Esses desafios incluem a composição não uniforme e diferenças na cor e nas propriedades para uma aplicação desejada, e essa não uniformidade resulta no uso de vidro como um componente em cinzas volantes (Kumar *et al.*, 2025).

A segregação adequada do vidro com cores diferentes o torna útil na transformação em garrafas e potes de vidro. Além disso, a segregação fina de diferentes tipos de vidros, dependendo de sua origem, torna-se tediosa, aumentando o custo da reciclagem e dificultando a sustentabilidade (Bristogianni; Oikonomopoulou, 2023).

O custo da reciclagem é maior do que o produto reciclado, e o risco de contaminação com resíduos orgânicos e inorgânicos dificulta o processo. Portanto, são necessárias pesquisas e intervenções aprofundadas em relação ao processo e tratamento necessários para a reciclagem de resíduos de vidro em um produto final de alto valor (Ghinea; Gavrilescu, 2019; Hsieh *et al.*, 2017; Simoes; Lima, 2023).

Novas tecnologias já vêm sendo desenvolvidas com a intenção de otimizar as etapas de reciclagem, envolvendo melhores táticas de separação e design dos produtos originais, como as embalagens, para facilitar a reciclagem. Ainda que a

fusão seja altamente emissora de CO₂, a fusão do vidro em vez de matérias-primas como soda, cal e sílica reduz o consumo de energia na indústria (Padilla *et al.*, 2021). Além disso, Kumar *et al.* (2025) exibiu um método alternativo de reciclagem de vidro soda-cal-sílica através de uma nova formulação sustentável e promissora, capaz de reduzir o impacto ambiental da fabricação primária.

Portanto, em vista dos pontos abordados, a reciclagem do vidro soda-cal-sílica, no geral, depende unicamente de práticas mais viáveis que favoreçam tanto o meio ambiente, quanto os produtores e os consumidores do produto final.

Mesmo com estes desafios, táticas já vêm sendo estudadas para serem postas em prática, afinal a sustentabilidade ainda é um dos pilares de uma indústria bem desenvolvida. Por conseguinte, também é vital que se estabeleçam políticas de influência para que os consumidores adquiram esses produtos provenientes de reciclagem, com o intuito de que a economia circular seja bem estabelecida.

1.2.8 Desafios e Perspectivas Futuras

Devido a alta solicitação nas indústrias e presença em aplicações básicas do cotidiano, o vidro soda-cal-sílica é mantido como alvo de pesquisas e inovações a fim de que suas propriedades sejam aprimoradas, simultaneamente com a preservação dos conceitos de sustentabilidade. A sinergia entre

inovação e sustentabilidade impulsiona o mercado além da mera adaptação, promovendo um equilíbrio dinâmico onde o crescimento econômico e a consciência ambiental estão inextricavelmente interligados (Yang, Yingqiang; Liu, 2024).

As principais pesquisas vinculadas a este material são quanto a modificação da composição química, para lhe conferir maior resistência mecânica e térmica. Atualmente já se encaminham alguns estudos sobre essa composição alterada, dentre eles está envolvida a inserção de óxidos modificadores na matriz do vidro soda-cal-sílica, como o óxido de alumínio (Al_2O_3) e o óxido de boro (B_2O_3), responsáveis por interferir nas propriedades do material-base, melhorando-as (Kumar; Singh; Kumar, 2023; Yoshizawa *et al.*, 2025). Ademais, os vidros soda-cal-sílica também são submetidos a tratamentos térmicos como a têmpera química e térmica, para reduzir a fragilidade e aprimorar as propriedades sem perder as demais benéficas pré-existentes (Suzuki *et al.*, 2017).

Correlacionado à sustentabilidade, busca-se por vidros ecoeficientes, sugeridos como uma tendência promissora no mercado. A ideia é utilizar matérias-primas alternativas ou incorporar resíduos na matriz do vidro, ou vice-versa, como é feito na pesquisa de Khokhar *et al.* (2023), onde foram desenvolvidos modelos de aprendizado de máquina para prever as propriedades mecânicas de tijolos ecoeficientes que incorporam resíduos de vidro em sua composição. Outros estudos recentes também demonstram a busca de

pesquisadores por alterações das propriedades mecânicas básicas do vidro soda-cal-sílica. Chutithanapanon *et al.* (2025) utilizou vidro soda-cal-sílica reciclado para entender a influência da dopagem de óxido de cobre (Cu_2O) e irradiação gama nas propriedades estruturais e elásticas, demonstrando a capacidade de manipular as propriedades do vidro reciclado usando Cu_2O e a importância de considerar fatores ambientais como a irradiação gama.

Urbanização, industrialização e crescimento econômico persistem em estarem vinculados com as propostas ecológicas de contribuir com a economia circular e diminuir a poluição, sem afetar a evolução tecnológica.

Além dessas novas pesquisas, o vidro soda-cal-sílica também é visto como integrante de tecnologias existentes e emergentes, como vidros inteligentes e funcionais.

Diante desse panorama vasto de aplicações em tecnologias emergentes, as perspectivas para o vidro soda-cal-sílica indicam um futuro diverso, abrangendo tanto mudanças na composição, quanto aplicações em novas tecnologias como os vidros inteligentes, ainda mantendo eficiência produtiva e sustentabilidade. Espera-se que com o aprimoramento de processos de fabricação, interligado às alterações de composição e estrutura, seja possível aplicar o vidro soda-cal-sílica em âmbitos da indústria além dos quais ele já é utilizado, fazendo-o uma alternativa economicamente viável e ecológica para o mercado vidreiro.

1.3. Metodologia

A metodologia escolhida para esta pesquisa foi uma revisão bibliográfica abrangente sobre o tema abordado. Para tal tipo de pesquisa, o principal objetivo é focar em explicar conhecimento sobre um determinado assunto, abordando os tópicos essenciais para entendimento do leitor. Portanto, a pesquisa exploratória busca apenas levantar informações sobre um determinado objeto, delimitando assim um campo de trabalho, mapeando as condições de manifestação desse objeto (Severino, 2021).

Sendo assim, com base em literatura de livros de conhecimento e artigos científicos, a revisão bibliográfica da pesquisa exploratória vem com o único intuito de situar o leitor quanto aos assuntos a serem discutidos num provável projeto prático.

Neste estudo exploratório, como relatado, os pontos foram tratados como um estudo teórico, sem aplicação prática, numa abordagem geral e noutra mais precisa. A busca foi principalmente por vidros soda-cal-sílica, pela temática do trabalho, porém para que houvesse maior destrinchamento dos tópicos em pontos específicos, também foram feitas pesquisas envolvendo a ciência dos vidros, as propriedades dos vidros, aplicações e pautas de sustentabilidade. Todos estes materiais

foram obtidos em plataformas confiáveis e verídicas, dentre elas: Periódicos CAPES, PubMed, ScienceDirect e SciELO.

1.4 Resultados e Discussão

Com base na revisão bibliográfica realizada, foi possível constatar alguns dos aspectos fundamentais sobre o vidro soda-cal-sílica, abordando sobre sua composição, processos de fabricação, aplicações, propriedades, impactos ambientais e perspectivas futuras. A partir desses dados, com uma análise minuciosa, é permitido debater sobre os conceitos e desafios enfrentados por esse material na indústria vidreira.

Através desses conhecimentos prévios sobre as propriedades do vidro soda-cal-sílica, foi possível compreender o porquê de sua ampla aplicação no mercado vidreiro. A versatilidade deste material, agregado ao fator econômico e de praticidade, garante que ele seja utilizado em setores distintos da indústria, sejam em embalagens para alimentos e bebidas, em construções civis como vidro plano utilizado em janelas, por exemplo, ou como utensílios domésticos do dia-a-dia pela durabilidade do material e, por fim, até mesmo em produtos eletrônicos. Com o avanço tecnológico, espera-se que a demanda pelo vidro soda-cal-sílica seja maior ainda no futuro.

A revisão destacou conceitos básicos sobre a matriz de composição do vidro soda-cal-sílica, composto principalmente por sílica (SiO_2), óxido de sódio (Na_2O) e óxido de cálcio (CaO),

que conferem algumas características únicas como transparência e inércia química. A estrutura desordenada típica dos vidros também é um fator crucial nessas propriedades. É dito que a disposição tetragonal do SiO_2 na matriz do vidro soda-cal-sílica é o fator responsável pela sua estabilidade estrutural. Sendo assim, entende-se por fim que a forma como o vidro dispõe sua composição e estrutura é o que define suas propriedades.

Em relação aos processos de fabricação, os artigos analisados demonstraram que para ser produzido, o vidro soda-cal-sílica precisa passar por quatro etapas básicas: fusão, conformação, resfriamento e acabamento, após o processo de seleção de matérias-primas. Comumente, essas matérias-primas precisam ser fundidas em temperaturas acima de 1500 °C até que a massa homogênea seja formada, para posteriormente passar por processos distintos de conformação e, em seguida, pelo resfriamento. Alguns estudos destacam a necessidade de tratamentos térmicos com o intuito de otimizar as propriedades mecânicas do vidro soda-cal-sílica e torná-lo mais resistente. Todas essas etapas são acompanhadas rigorosamente, desde a seleção das matérias-primas, e quanto ao produto final, são submetidos a testes mecânicos para evitar falhas posteriores.

As propriedades esperadas pelo vidro soda-cal-sílica são resistência mecânica moderada, considerando sua ampla aplicação, mas, como pôde ser analisado através da revisão

bibliográfica, já são efetuadas técnicas para aprimorá-las, reduzindo a fragilidade deste material. Além disso, as propriedades químicas do vidro soda-cal-sílica foram devidamente justificadas pela presença de álcalis solúveis, podendo ser aprimoradas através de tratamentos superficiais como a inserção de revestimentos protetores, tal qual foi relatado nas referências bibliográficas citadas.

Ainda com propriedades propriamente ditas através da composição química e estrutura molecular, o estudo feito relatou que estas podem ser alteradas através de tratamentos térmicos e de superfície. O vidro soda-cal-sílica pode ter uma maior resistência mecânica quando passado por processos de têmpera térmica ou laminação, por exemplo, para formular o vidro temperado e o vidro laminado, respectivamente. Estas formas são eficazes para aplicar este material em que seja solicitada maior dureza e menor fragilidade, devido às tensões residuais e polímeros agregados à ele, a depender do processo aplicado. As técnicas de revestimento, apesar de serem novas tecnologias, já são empregadas através de vidros reflexivos, por exemplo, dos quais podem compor janelas de edifícios e demais construções modernas.

Vale ressaltar que, apesar dos pontos benéficos envolvendo o vidro soda-cal-sílica, outros tipos de vidros também têm ganhado destaque na indústria vidreira. O vidro borossilicato, comumente aplicado em laboratórios pela sua inércia química proveniente da presença do borossilicato,

apresenta uma melhor aplicabilidade nesta área do que o soda-cal-sílica. Por oposição, o vidro de quartzo, mesmo apresentando ótimas propriedades ópticas, é mais difícil de ser obtido devido ao seu alto ponto de fusão, e por isso não é tão preferível em larga escala quanto o vidro soda-cal-sílica.

Para aplicações que requeiram uma estética mais agradável ao consumidor, o vidro chumbo parece ser promissor de acordo com os artigos referenciados. A presença do chumbo na composição lhe confere um alto índice de refração que torna sua aparência semelhante ao de um cristal, sendo detectado em joias datadas de séculos anteriores através de estudos.

Através desses dados é fácil compreender que nenhum tipo de vidro tende a ser melhor, afinal isso irá depender das exigências requeridas para uma determinada aplicação, mas, no geral, o vidro soda-cal-sílica permanece sendo o mais popular na indústria vidreira justamente por sua facilidade de produção e baixo custo.

Outro ponto importante a ser destacado é que, com o alto consumo de produtos derivados do vidro soda-cal-sílica, o seu descarte é devidamente proporcional. Com a crescente urbanização e industrialização, a necessidade da reestruturação da economia circular na indústria vidreira tornou-se vital. Os artigos demonstraram a preocupação dos pesquisadores não somente sobre o descarte, mas também sobre o alto consumo energético e emissão de gases poluentes durante o processo de fusão das matérias-primas.

Simultaneamente, já tendo o conhecimento prévio de que o vidro é um produto altamente reciclável, os pesquisadores desenvolveram estudos que comprovam que a fusão do vidro é menos poluente do que a de suas matérias-primas. Apesar disso, o processo de reciclagem ainda enfrenta dificuldades quanto a impurezas presentes nos produtos e também pela falta de interesse por parte dos consumidores em utilizar produtos reciclados. Assim, além da otimização do processo de reciclagem, estimula-se também o apoio de órgãos governamentais quanto ao incentivo para o consumo desses produtos reciclados pela população.

A análise dos artigos demonstra que o vidro soda-cal-sílica permanece amplamente presente em embalagens, setores de construção civil e tecnologia. Atualmente, como foi visto, já são feitas pesquisas com o intuito de aprimorar o uso do vidro soda-cal-sílica através de alterações em sua composição, com a inserção de óxidos modificadores de rede. Espera-se que, com esses resultados, o vidro soda-cal-sílica tenha suas propriedades físicas e químicas melhoradas para que sua aplicação seja ainda mais benéfica. Ademais, esse material também já é visto agregado em tecnologias emergentes, como os vidros inteligentes. A inserção do vidro soda-cal-sílica em tecnologias mais avançadas tem se mostrado uma abordagem promissora e capaz de ampliar ainda mais o desenvolvimento de vidros com funcionalidades avançadas.

Dessa maneira, a revisão bibliográfica permitiu um estudo vasto sobre o vidro soda-cal-sílica, analisando os principais pilares desse material na indústria. É evidente que demais análises ainda precisam ser aprimoradas, principalmente nas aplicações e processos de reciclagem, porém, mesmo com estes desafios, o vidro soda-cal-sílica já é considerado um material revolucionário e amplamente utilizado no mercado vidreiro.

1.5 Conclusões e Perspectivas

Através da revisão bibliográfica sobre o vidro soda-cal-sílica, foi possível obter uma visão ampla sobre esse material quanto a sua composição, estrutura, processos de fabricação, propriedades, aplicações, impactos ambientais e perspectivas futuras. A priori, conclui-se que o vidro soda-cal-sílica é o tipo de vidro mais popular e utilizado pelos consumidores da indústria vidreira, e isso se deve a alguns fatores como sua versatilidade, custo acessível e facilidade de produção. Graças a isso, o vidro soda-cal-sílica pode ser aplicado em diversos setores da indústria, como em embalagens para alimentos e bebidas, utensílios domésticos, janelas e vidros planos para construção civil e até mesmo produtos eletrônicos.

Ainda com as dificuldades encontradas quanto às suas propriedades, já existem tecnologias sendo desenvolvidas para melhorá-las. Tratamentos térmicos, laminação e aplicação de

revestimentos já são uma realidade na indústria vidreira, com a proposta de reduzir a fragilidade do vidro e melhorar outras propriedades, como dureza e tenacidade, em sua maioria, para serem aplicados em projetos que exijam maior segurança do consumidor, por exemplo.

Além disso, a reciclagem do vidro soda-cal-sílica é uma pauta já discutida por pesquisadores, mediante a preocupação com a sustentabilidade e o meio ambiente. Sabe-se que o vidro é um material altamente reciclável, porém ainda existem alguns desafios quanto a presença de impurezas e dificuldade de implementação de produtos reciclados entre os consumidores. Ainda que existam outros tipos de vidro com propriedades mais específicas, o vidro soda-cal-sílica continua sendo o mais popular e acessível, mas com o entendimento de que a escolha do tipo de vidro irá depender unicamente das exigências solicitadas pelo projeto de aplicação.

Com o avanço de novas tecnologias e melhorias nas técnicas de reciclagem, espera-se que o vidro soda-cal-sílica se torne ainda mais eficiente e sustentável, ampliando suas aplicações em campos emergentes, como os vidros inteligentes. Assim, o vidro soda-cal-sílica permanece como um pilar central da indústria vidreira, com grande potencial para evoluir e atender às demandas de um mercado cada vez mais exigente e sustentável.

REFERÊNCIAS

AHANI, A.; AHANI, E. An overview for materials and design methods used for enhancement of laminated glass. Hybrid Advances, [s. l.], v. 3, p. 100063, ago. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2023.100063>.

BATENI, N. H.; HAMIDON, M. N.; MATORI, K. A. Effect of soda-lime-silica glass addition on the physical properties of ceramic obtained from white rice husk ash. Journal of the Ceramic Society of Japan, [s. l.], v. 122, n. 1422, p. 161–165, 2014. <https://doi.org/10.2109/jcersj2.122.161>.

BRISTOGIANNI, T.; OIKONOMOPOULOU, F. Glass up-casting: a review on the current challenges in glass recycling and a novel approach for recycling “as-is” glass waste into volumetric glass components. Glass Structures & Engineering, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 255–302, set. 2023. <https://doi.org/10.1007/s40940-022-00206-9>.

C14 COMMITTEE. Terminology of Glass and Glass Products. [S. l.]: ASTM International, [s. d.]. DOI [10.1520/C0162-23](https://doi.org/10.1520/C0162-23). Disponível em: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C162-23>. Acesso em: 25 mar. 2025.

CHUTITHANAPANON, N.; JAIBOON, O.; LAOPAIBOON, R.; LAOPAIBOON, J.; BOOTJOMCHAI, C. Influence of Cu₂O doping and gamma irradiation on the structural and elastic properties of soda-lime glass. *Radiation Physics and Chemistry*, [s. l.], v. 226, p. 112244, jan. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.112244>.

EZRA, N. S.; MUSTAFA, I. S.; SAYYED, M. I.; DAKOK, K. K.; KHAZAALAH, T. H.; EFENJI, G. I.; JAMIL, M.; NAEEM, H. S.; OKE, A. O.; FADHIRUL, I. M. Review of recycled soda-lime-silicate (SLS) glasses for dosimetric applications. *Radiation Physics and Chemistry*, [s. l.], v. 224, p. 112085, nov. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.112085>.

GHINEA, C.; GAVRILESCU, M. Solid Waste Management for Circular Economy: Challenges and Opportunities in Romania – The Case Study of Iasi County. In: FRANCO-GARCÍA, M.-L.; CARPIO-AGUILAR, J. C.; BRESSERS, H. (orgs.). *Towards Zero Waste. Greening of Industry Networks Studies*. Cham: Springer International Publishing, 2019. v. 6, p. 25–60. DOI [10.1007/978-3-319-92931-6_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-92931-6_3). Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-92931-6_3. Acesso em: 25 mar. 2025.

GUO, P.; MENG, W.; NASSIF, H.; GOU, H.; BAO, Y. New perspectives on recycling waste glass in manufacturing

concrete for sustainable civil infrastructure. *Construction and Building Materials*, [s. l.], v. 257, p. 119579, out. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119579>.

HSIEH, Y.-C.; LIN, K.-Y.; LU, C.; RONG, K. Governing a Sustainable Business Ecosystem in Taiwan's Circular Economy: The Story of Spring Pool Glass. *Sustainability*, [s. l.], v. 9, n. 6, p. 1068, 20 jun. 2017. <https://doi.org/10.3390/su9061068>.

HUANG, Z.; TOMOZAWA, M. Internal friction at crack tip of soda-lime silicate glass. *Journal of Non-Crystalline Solids: X*, [s. l.], v. 25, p. 100219, jul. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.nocx.2025.100219>.

JALALY, S.; SHAHABADI, M. Micro-patterned glass for energy-efficient windows. *Results in Engineering*, [s. l.], v. 21, p. 101762, mar. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101762>.

KARACASULU, L.; BIESUZ, M.; PASTORELLI, V.; VAKIFAHMETOGLU, C.; SGLAVO, V. M.; FERRARIS, M.; SORARÙ, G. D. Pressureless joining of soda lime silicate glass using polysilazane-derived silica at near-room temperature. *Ceramics International*, [s. l.], v. 51, n. 5, p. 5747–5753, fev. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.12.020>.

KAWAMOTO, H.; FUJIMOTO, Y.; ASAI, K. Radiophotoluminescence from Au-doped soda-lime silicate glass. *Radiation Measurements*, [s. l.], v. 179, p. 107320, dez. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2024.107320>.

KHOKHAR, S. A.; KHAN, A.; SIDDIQUE, A.; KHUSHNOOD, R. A.; MALIK, U. J. A predictive mimicker for mechanical properties of eco-efficient and sustainable bricks incorporating waste glass using machine learning. *Case Studies in Construction Materials*, [s. l.], v. 19, p. e02424, dez. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02424>.

KUMAR, S.; BANSAL, N.; VERMA, S.; KUMAR, P.; KUMAR, D.; SINGH, K. Role of NaCl on structural, optical and mechanical properties of recycled photovoltaic glasses. *Ceramics International*, [s. l.], , p. S0272884225003840, jan. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.01.344>.

KUMAR, S.; SINGH, K.; KUMAR, D. SiO₂/B₂O₃ glass formers effect on transparency and mechanical properties of soda-lime borosilicate glasses for automobile applications. *Journal of Non-Crystalline Solids*, [s. l.], v. 618, p. 122530, out. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2023.122530>.

LEE, J. E.; KIM, E.; HWANG, J. B.; CHOI, J. C.; LEE, J. K. Flake formation and composition in soda-lime-silica and borosilicate

glasses. Heliyon, [s. l.], v. 9, n. 6, p. e16333, jun. 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16333>.

LONGLONG, L.; LIANG, G. Research on the optimization and preparation of negative Poisson's ratio structure of quartz glass. Materials Letters, [s. l.], v. 384, p. 138105, abr. 2025.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2025.138105>.

MAEDA, H.; MATSUURA, F. Effects of heat treatment of silica-based glasses on their static and dynamic wettability. Materials Chemistry and Physics, [s. l.], v. 314, p. 128871, fev. 2024.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128871>.

MEHAOUED, K.; LARTIGUE, B. Influence of a reflective glass façade on surrounding microclimate and building cooling load: Case of an office building in Algiers. Sustainable Cities and Society, [s. l.], v. 46, p. 101443, abr. 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101443>.

MOHD ZAID, M. H.; AMIN MATORI, K.; ABDUL AZIZ, S. Hj.; KAMARI, H. M.; MAT YUNUS, W. M.; ABDUL WAHAB, Z.; SAMSUDIN, N. F. Fabrication and Crystallization of ZnO-SLS Glass Derived Willemite Glass-Ceramics as a Potential Material for Optics Applications. Journal of Spectroscopy, [s. l.], v. 2016, p. 1–7, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/8084301>.

PADILLA, I.; ROMERO, M.; ROBLA, J. I.; LÓPEZ-DELGADO, A. Waste and Solar Energy: An Eco-Friendly Way for Glass Melting. ChemEngineering, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 16, 8 abr. 2021. <https://doi.org/10.3390/chemengineering5020016>.

PANKIEWICZ, A.; MIŚTA-JAKUBOWSKA, E.; SIEMIANOWSKA, S.; CZECH-BŁOŃSKA, R.; BŁOŃSKI, M.; MATHUR, R.; KARASIŃSKI, J.; SIUDA, R.; ŻABIŃSKI, G.; GÓJSKA, A. Origins of medieval lead glass ornaments in Central Europe in the light of lead isotopic analysis of finds from Wrocław and Sypniewo (Poland). Journal of Archaeological Science, [s. l.], v. 176, p. 106168, abr. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2025.106168>.

PRZEPIORA, K.; ZANOTTO, E. D.; KRISHNAN, N.; RAGOEN, C.; GODET, S. Mechanical properties and deformation mechanisms of phase-separated soda-lime-silica glass. Materialia, [s. l.], v. 39, p. 102349, mar. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2025.102349>.

PRZEPIORA, K.; ZANOTTO, E. D.; RAGOEN, C.; GODET, S. Nanostructural ordering in phase-separated soda-lime-silica glass. Journal of Non-Crystalline Solids, [s. l.], v. 639, p. 123109, set. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2024.123109>.

QIU, Y.; YANG, T.; ZHU, H.; HAN, W.; SUGIOKA, K.; KONG, L. Dynamic behavior and defect control in LPBF of quartz glass:

Insights from VOF model simulations. Powder Technology, [s. l.], v. 451, p. 120450, fev. 2025.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.120450>.

SAYYED, M. I.; HAMAD, M. K.; MHAREB, M. H. A. Radiation shielding properties for a borosilicate glass: Role of varying PbO. Optical Materials, [s. l.], v. 159, p. 116602, fev. 2025.
<https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.116602>.

SEVERINO, A. J. Metodologia do trabalho científico. [S. l.]: Cortez Editora, 2021.

SIMÕES, S. G.; LIMA, A. T. M. Materials, resources, and CO₂ impacts of building new renewable power plants to reach EU's goals of carbon neutrality. Journal of Cleaner Production, [s. l.], v. 418, p. 138138, set. 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138138>.

STEWART, R. J.; PRAKASH, N. Modeling dynamic fragmentation of tempered glass. Engineering Fracture Mechanics, [s. l.], v. 289, p. 109422, set. 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109422>.

SUZUKI, T.; SEKINE, T.; YAMAMOTO, K.; FUKUTANI, K. Change in the surface OH group on soda lime silicate glass and silica glass after heat treatment in nitrogen atmosphere.

Journal of Non-Crystalline Solids, [s. l.], v. 464, p. 89–91, maio 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.03.014>.

TRAN, N. P.; WANG, T.; NGUYEN, T. N.; JIN, H.; NGO, T. D. High-volume recycled glass cementitious and geopolymer composites incorporating graphene oxide. Construction and Building Materials, [s. l.], v. 450, p. 138476, nov. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138476>.

WANG, Y.; ZHOU, L.; RUSH, D.; BISBY, L. Interaction between glass thermal breakage and interlayer combustion in laminated glass with different thicknesses of glass panels and interlayers. Journal of Building Engineering, [s. l.], v. 103, p. 112132, jun. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.112132>.

YANG, W.; REN, J.; TANG, Y.; WANG, Y.; YANG, Y. Effect of heat treatment on microstructure and oxidation resistance of SiO₂-B₄C-glass coating on alumina-carbon refractories. Ceramics International, [s. l.], v. 51, n. 6, p. 7825–7839, mar. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.12.219>.

YANG, Y.; LIU, Z. A novel probabilistic approach for driving the sustainable energy circular economy: Innovating efficiency in renewable resource markets. Sustainable Cities and Society, [s. l.], v. 108, p. 105461, ago. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105461>.

YASMIN, S.; KHANDAKER, M. U.; ROZAILA, Z. S.; RASHID, M. A.; BRADLEY, D. A.; SANI, S. F. A. Thermoluminescence features of commercial glass and retrospective accident dosimetry. *Radiation Physics and Chemistry*, [s. l.], v. 168, p. 108528, mar. 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108528>.

YOSHIZAWA, F. T.; GAREL-LAURIN, A.-C.; BUROV, E.; TOPLIS, M. J. Diffusive dissolution of α -alumina in industrial soda-lime silica glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*, [s. l.], v. 650, p. 123351, fev. 2025.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2024.123351>.

ZIEMATH, E. C. Noções sobre as propriedades físicas do vidro. 1a ed. Rio Claro - SP: [s. n.], 2011.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao professor Vinícius Dantas, por lecionar a disciplina de Tecnologia de Vidros de maneira didática e compreensiva, e também aos autores que disponibilizaram os artigos para este capítulo de revisão bibliográfica.

2 COMPÓSITO DE MATRIZ DE VIDRO – UMA REVISÃO DE LITERATURA

Edson Wesley Souza da Silva, Vitória Silva Cavalcanti de Siqueira

Resumo

Este capítulo observa e relaciona o desenvolvimento de compósitos de matriz de vidro, com foco nas suas diferentes aplicações nos mais variados setores como o aeroespacial e automotivo, onde a alta resistência e tenacidade são cruciais. Através de uma revisão de artigos qualificados, foram analisadas as propriedades mecânicas, ópticas, térmicas e químicas desses materiais, evidenciando que a matriz de vidro proporciona características superiores, como resistência à corrosão, elevadas propriedades mecânicas, excelentes propriedades óticas e estabilidade térmica. Os resultados destacam a eficácia de compósitos luminescentes, demonstrando que a sinterização viscosa pode ser utilizada para produzir materiais com boa compatibilidade entre partículas e matriz vítrea. Além disso, a pesquisa identificou a importância da disposição das fibras de reforço e da adesão entre matriz e reforço, que influenciam diretamente a microestrutura do material e consequentemente o melhoramento de propriedades mecânicas. A consolidação dessas informações oferece uma revisão de diferentes estudos

que podem ser utilizados para futuras pesquisas e otimizações, ampliando as aplicações e a eficiência dos compósitos de matriz de vidro.

Palavras-chave: Aplicações-industriais; Compósitos; Matriz-vidro; Propriedades-físicas.

2.1 Introdução

Compósitos a base de matriz de vidro costumam ser utilizadas em diferentes contextos a depender dos componentes utilizados. Quando reforçados com materiais metálicos, podem ser utilizados em aplicações militares e espaciais, aplicações funcionais cuja propriedades relacionadas a condutividade, resistividade, propriedades elétricas e ópticas são requeridas (Boccaccini *et al.*, 1997). Ainda, apresentam melhor resistência à corrosão, sem sacrificar outras propriedades, podendo ser aplicados como revestimentos protetores (Fernandes *et al.*, 2024).

Outra variação da matriz de vidro metálica, consiste em compósitos in-situ de dendrito/matriz de vidro metálico (*metal glass matrix - MGM*), que são materiais que combinam as propriedades de vidros metálicos com a ductilidade de dendritos. Além de propriedades semelhantes, aos compósitos de matriz de vidro, esses apresentam uma aplicabilidade um pouco mais ampla, podendo ser utilizados como materiais

estruturais em diversas condições complexas, incluindo carregamento dinâmico e temperaturas extremas (Qiao, 2013).

Além disso, os compósitos de matriz de vidro podem ser fabricados a partir de resíduos, no caso das *Fly ash* (cinza volante) de usinas de carvão e *Cullet glass* (resíduo de vidro) da produção de *float glass*, e reforçados com plaquetas de alumina. Graças ao melhoramento das propriedades mecânicas podem ser utilizados como ladrilhos, componentes de máquinas, e ferramentas da indústria química (Qiao; Jia; Liaw, 2016).

Ainda, são desenvolvidos compósitos translúcidos de matriz de vidro luminescente persistente (Pel-Compósitos com matriz de vidro), que combinam a falta de interação da matriz de vidro as micropartículas de Pel (Pel-Mps) garantindo translucidez e luminescência prolongada, apesar do processo de sinterização. Permitindo, aplicações em arquitetura sustentável, iluminação paisagística externa e marcação rodoviária, devido à resistência do vidro soda cálcico a condições ambientais adversas e à erosão (Hu *et al.*, 2025).

2.1.1 *Processamento e propriedades*

É sabido que, as aplicações dos materiais, dependem das suas propriedades. E essas, estão completamente relacionadas a maneira como eles foram processados. No caso dos compósitos a base de matriz de vidro, não é diferente. Embora, fatores como a adesão, propriedades dos constituintes,

dispersão na matriz e geometria dos dispersantes também influenciam as propriedades dos compósitos.

Tratando-se dos compósitos de matriz de vidro fabricados a partir de cinzas volantes e resíduos de vidros, as técnicas de sinterização por pó a baixas temperaturas (650 °C) permitem a obtenção de materiais mais densos com teores de até 20% em peso de cinza de volantes. Além disso, frações volumétricas maiores de plaquetas de alumina nesses compósitos, contribuem com o melhoramento das propriedades mecânicas, tais como, resistência à flexão pelo aumento do módulo de Young, dureza, tenacidade à fratura e até mesmo a redução do índice de fragilidade. Tornando esses compósitos fabricados a partir de resíduos de vidros, potenciais competidores dos vidros convencionais e vitrocerâmicas (Kageyama; Enoki; Kishi, 1995).

No caso de compósitos de matriz de vidro metálico, utilizados como revestimentos protetores, a melhor resistência à corrosão está associada ao processamento de refusão a laser. Processo em que ocorre o derretimento e ressolidificação da superfície do material, modificando toda microestrutura. A refusão a laser, aumenta a fração da fase amorfa e dificulta a formação da fase cristalina do Cobre (Cu), promovendo ao material uma distribuição mais uniforme dos elementos na superfície e maior resistência à corrosão (Li *et al.*, 2013).

Para a síntese de compósitos de matriz de vidro metálicas com reforços dendríticos, a técnica mais inovadora

consiste na solidificação controlada da região de duas fases líquido-sólido para produzir partículas cristalinas esféricas homogeneamente dispersas na matriz amorfa, processamento semi-sólido. Seguida da esferoidização dos cristais, a fim de se obter maior tenacidade e resistência à propagação de fissuras. No entanto, é preciso ter maior controle do tamanho e da fração volumétrica da fase cristalina, por isso são aplicadas técnicas que controlam a taxa de resfriamento e portanto, a taxa de cristalização permitindo obter índices de dureza desejáveis (Drehman; Greer; Turnbull, 1982).

De tal modo, o processamento de materiais compósitos translúcidos de matriz de vidro luminescente ocorre por sinterização viscosa sem pressão. Esse processo consiste no tratamento térmico de pós compactados sem aplicação de pressão externa. A escolha de vidros de silicato de sódio e cal permite obter materiais translúcidos com luminescência persistente prolongada, mantendo a compatibilidade entre a matriz de vidro e as micropartículas luminescentes (Donald, 1995).

Neste presente trabalho, buscou-se efetuar um levantamento bibliográfico acerca do desenvolvimento recente e utilização de compósitos de matriz de vidro. Ainda, é proposto identificar as principais utilizações deste tipo de compósito como materiais estruturais, principalmente por fornecerem um excelente potencial com vasta gama de

aplicações e possuírem boas características e propriedades mecânicas.

A revisão busca sintetizar o conhecimento através das literaturas disponíveis sobre esses materiais, através do destaque das suas vantagens e os principais desafios de processamento em comparação com outros tipos de matrizes utilizadas em materiais compósitos. Pretende-se compreender como a matriz de vidro influencia as propriedades finais e quais os fatores determinam o seu desempenho nas vastas aplicações seja no campo científico na área de pesquisa, seja no ramo industrial, como no setor aeroespacial, automotivo e biomédico.

Pretende-se ser objeto de escopo deste trabalho efetuar uma correlação entre o processamento da matriz de vidro e as propriedades mecânicas, térmicas e químicas obtidas, podendo descrever as técnicas de fabricação utilizadas nas literaturas abordadas e explicitar quais fatores causam impacto na resistência, durabilidade e estabilidade térmica do material compósito com matriz de vidro.

A relação entre os constituintes, incluindo a disposição das fibras de reforço e a adesão entre matriz e reforço, e sua influência no comportamento estrutural do material compósito, será correlacionada. Dessa forma, busca-se consolidar as informações para que seja possível contribuir com futuras pesquisas e otimizações no desenvolvimento acerca de

materiais compósitos compostos por matriz de vidro de modo a ampliar suas aplicações e eficiência do material.

2.2 Metodologia

Este capítulo de revisão teve o intuito de identificar e analisar artigos relevantes que abordam o tema central objeto de estudo, compósitos de matriz de vidro, para que fosse possível ter o conhecimento acerca de como está se desenvolvendo as pesquisas sobre e/ou entorno do tema central, podendo ser considerado um norteador de novos desenvolvimentos e inovação acerca dos compósitos que utilizam matriz de vidro.

2.2.1 Estratégia de busca e seleção de artigos

Para garantir que fosse possível realizar uma revisão de maneira mais abrangente e atualizada sobre os compósitos com matriz de vidro, a estratégia de busca e seleção foi conduzida de maneira sistemática, revisando os artigos mais citados e/ou mais recentes sobre os compósitos com matriz de vidro disponíveis em bases de dados acadêmicos amplamente reconhecida na área de ciência de materiais e engenharia.

2.2.2 Base de dados e critérios adotados

A pesquisa teve o propósito de ser realizada em bases de dados científicas de alto impacto, com possibilidade de fornecimento para acesso a publicações com possibilidades de serem revisadas por pares, portanto, as bases de dados selecionadas foram a *Scopus* e *Web of Science*.

Essas bases foram escolhidas por conterem uma maior relevância e serem mais abrangentes na cobertura do tema objeto central deste trabalho, podendo assim ter uma maior contribuição com as análises desta pesquisa.

De maneira geral, para ter uma abordagem abrangente com literaturas com relevância sobre o tema de compósitos de matriz de vidro, foi adotado combinações de palavras-chave em inglês e português, adicionalmente também foram utilizados operadores booleanos com o intuito de promover o refinamento dos resultados, operadores estes como *AND* e *OR*.

As palavras-chaves utilizadas foram: Compósito de matriz de vidro *OR* compósito de matriz vítrea, *Glass-Matrix Composites AND Mechanical Properties*, *Glass matrix composites AND Manufacturing, technology AND Glass-Matrix Composites, Microstructures glass composites*.

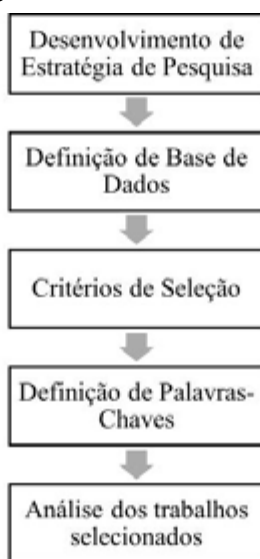
Após utilização das palavras-chaves, para as literaturas resultantes da pesquisa realizada, foi feita uma verificação com a finalidade de assegurar sua relevância com o tema de compósito de matriz de vidro e com o desenvolvimento do presente estudo.

Os trabalhos quando disponíveis foram lidos, a princípio foi verificado o título para identificar a correta abordagem com o tema, posteriormente os resumos e conclusões foram lidos para que fosse possível observar a relevância com a temática, partindo desta análise, foi tomada a decisão de incluí-los ou não neste estudo e por fim, foram lidos integralmente para que pudesse servir de fomento para desenvolvimento deste presente trabalho.

2.2.3 Abordagem utilizada para análise das informações

Afim de estabelecer uma avaliação crítica de maneira estruturada, a abordagem utilizada buscou sistematizar as informações, com objetivos de identificar padrões, tendências e/ou direcionadores tecnológicos ou de inovações acerca do objeto de central de estudo, de modo em que fosse possível obter uma síntese de maneira geral e coerente sobre o conhecimento existente. Na abordagem, buscou-se identificar se os trabalhos tinham um ramo de abrangência sobre estudos experimentais, revisões sistemáticas ou até estudos computacionais ou modelos de previsões de desenvolvimento acerca de compósito de matriz de vidro. Observando a Figura 1 é possível identificar a estrutura e método de levantamento realizado para o presente estudo.

Figura 1 – Fluxograma de Estrutura do Levantamento.



Fonte: Autor (2025)

2.3 Resultados e Discussão

Os compósitos com matriz de vidro têm atraído grande interesse devido às suas propriedades mecânicas, térmicas e químicas. De modo geral os materiais utilizam de combinações de uma matriz vítrea com reforços de diferentes tipos, como fibras cerâmicas, metálicas ou poliméricas, resultando em melhorias significativas na resistência mecânica, estabilidade térmica e durabilidade. O presente estudo tem caráter de capítulo de revisão com o intuito de comparar diferentes abordagens na fabricação e caracterização de compósitos com matriz de vidro, com base em literatura recente.

2.3.1 *Compósitos com Matriz de Vidro e Fibra de Basalto*

A adição de fibras de basalto em uma matriz de vidro resulta em um material com baixa expansão térmica e alta resistência mecânica, essa adição aumentou de forma significativa a resistência à flexão em 14,7%, chegando a uma magnitude de 104,85 MPa. Ainda, com uma baixa adição de fibras em torno de 1% da massa é possível obter um material compósito com propriedades superiores em relação ao material vidro isoladamente (Liu *et al.*, 2025).

A análise de microscopia eletrônica revelou uma distribuição homogênea das fibras dentro da matriz vítrea, com boa adesão interfacial, impedindo a propagação de trincas e aumentando a resistência mecânica do compósito. Além disso, testes de dureza *Vickers* demonstraram que a adição das fibras aumentou a resistência superficial do material. Observando a Tabela 1 é possível identificar as propriedades para as diferentes amostras realizadas no estudo.

Tabela 1 – Propriedades para diferentes amostras e % em peso da fibra

Composição de amostra	Conteúdo sólido de lama	Morfologia	Resistência à flexão
29% em peso de β -Eucryptita; 1% em peso de BF; 70% em peso de vidro	50%	Maior quantidade de poros	99,56 MPa
45% em peso de β -Eucryptita; 1% em peso de BF; 54% em peso de vidro	62,5%	Menor quantidade de poros	104,85 MPa

Fonte: Autor (2025)

Os pesquisadores efetuaram análises acerca da expansão térmica do material e constatou que a combinação de compósito com matriz de vidro e fibra de basalto reduz o coeficiente de expansão térmica, tornando viável a aplicação deste tipo de compósito em solicitações em que sejam requeridas estabilidade térmica em elevadas temperaturas (Liu *et al.*, 2025).

2.3.2 Compósitos com Matriz de Vidro metálico/dendrítica

No presente trabalho os autores estudaram compósitos dendríticos de matriz vítrea metálica, que apresentaram resistência à tração superior a 1640 MPa, devido à formação de bandas de cisalhamento que aumentam a tenacidade do material. Para o processamento deste tipo de material, foi utilizado uma combinação de *Bridgman Solidification* e *Semi-solid Processing*, esta combinação gerou resultados que culminaram na formação de dendritos metálicos dispersos uniformemente dentro da matriz de vidro (Qiao, 2013).

A microscopia eletrônica revelou que a interface entre os dendritos e a matriz desempenha um papel essencial na dissipação da energia mecânica, proporcionando uma combinação favorável entre resistência e ductilidade. Os ensaios de microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura (MEV) que caracterizaram a microestrutura, puderam evidenciar a presença de dendritos metálicos bem distribuídos e com as suas interfaces nítidas (Qiao, 2013).

Ensaio de resistência à fadiga indicaram que esses compósitos possuem maior resistência a ciclos de carregamento em comparação com compósitos com matriz de vidro puro, tornando-os promissores para aplicações em engenharia estrutural e automotiva, de modo que modificações acerca das matrizes e fibras possam ser realizadas com o intuito

de melhoria das propriedades do material. Esse comportamento é bastante diferente dos compósitos com matriz de vidro reforçados com fibras, nos quais a matriz tem papel predominante na resistência mecânica (Qiao, 2013).

Este trabalho é particularmente relevante para aplicações estruturais em setores como aeroespacial e automotivo, onde a combinação de alta resistência e tenacidade é essencial. A revisão também discute o comportamento dos compósitos em condições extremas, como em temperaturas criogênicas ou na região de líquido super-resfriado, demonstrando que esses materiais mantêm suas propriedades mecânicas mesmo em ambientes desafiadores (Qiao, 2013).

2.3.3 Revestimentos baseados em compósitos com matriz de vidro zircônio

Os autores neste estudo fizeram a investigação do comportamento de compósitos com matriz de vidro à base de zircônio utilizando um método inovador de *laser remelting*. Através da utilização deste método inovador, com seu processamento foi possível obter uma modificação na microestrutura do material, aumentando a fração de fase amorfa na superfície do revestimento, consequentemente promovendo a melhoria da sua resistência à corrosão e desgaste. Em uma solução de NaCl a 3,5%, o compósito tratado

por laser apresentou uma densidade de corrente de corrosão de $5,84 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$, a mais baixa já relatada para esse tipo de material (Hu *et al.*, 2025).

A análise por MEV revelou que a camada tratada a laser apresenta grãos refinados e uma interface mais homogênea entre a matriz e o reforço. Ensaio eletroquímico foram conduzidos para avaliar a taxa de corrosão, demonstrando que os Compósitos com matriz de vidro tratados a laser apresentaram uma redução significativa na degradação em meio ácido em comparação com os compósitos com matriz de vidro não tratados. Na Tabela 2 estão resumidos os resultados dos testes de corrosão, destacando a redução significativa na densidade de corrente de corrosão após o tratamento térmico. Além disso, testes de desgaste por deslizamento mostraram um aumento na resistência ao atrito, tornando esses materiais adequados para aplicações em ambientes agressivos (Hu *et al.*, 2025).

Tabela 2 – Resumo dos resultados dos testes de corrosão

Amostra	Densidade de Corrente de Corrosão (A/cm ²)	Potencial de Corrosão (mV)
As-cladded	2.15×10^{-6}	-361
LR1000	3.01×10^{-9}	-269

Fonte: Autor (2025)

Este trabalho é particularmente relevante para aplicações em ambientes corrosivos, como na indústria química ou em componentes expostos à água do mar. A técnica de laser remelting mostrou-se eficaz não apenas na melhoria da resistência à corrosão, mas também na supressão da segregação de fases cristalinas ricas em cobre, que são conhecidas por prejudicar a estabilidade do filme passivo. A análise por MEV e espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios X (*X-ray photoelectron spectroscopy - XPS*) confirmou a formação de um filme passivo composto principalmente por ZrO_2 e Al_2O_3 , que é responsável pela alta resistência à corrosão observada (Hu *et al.*, 2025).

2.3.4 Compósitos com Matriz de Vidro luminescentes

Explora a síntese de compósitos luminescentes de compósitos de matriz de vidro utilizando partículas luminescentes de $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$, Dy^{3+} . O método de sinterização viscosa sem pressão foi utilizado para incorporar as partículas luminescentes em uma matriz de vidro soda-cal-sílica. O compósito resultante apresentou translucidez e luminescência persistente por até 12 minutos após a excitação com luz ultravioleta (UV) (Fernandes *et al.*, 2024).

Este estudo é inovador ao demonstrar que a sinterização viscosa pode ser utilizada para produzir compósitos luminescentes com boa compatibilidade entre as partículas e a

matriz vítrea. A análise por microscopia óptica e MEV mostrou que as partículas luminescentes permanecem intactas após o processamento, sem evidências de reações químicas ou transformações de fase (Fernandes *et al.*, 2024).

Ensaio de durabilidade térmica indicaram que o material mantém sua luminescência mesmo após exposição prolongada a temperaturas superiores a 400 °C. Além disso, testes de resistência química demonstraram que os GMCs luminescentes possuem alta estabilidade em ambientes ácidos e alcalinos, ampliando suas aplicações em setores exigentes como sensores ópticos e dispositivos de iluminação de emergência (Fernandes *et al.*, 2024).

Além disso, a luminescência persistente do compósito foi mantida, indicando que o processo de sinterização não afeta significativamente as propriedades ópticas das partículas. Este trabalho abre novas possibilidades para a aplicação de compósitos luminescentes em iluminação de segurança, sinalização e displays (Fernandes *et al.*, 2024).

2.4 Discussão

A comparação entre os diferentes tipos de compósitos com matriz de vidro revela que a escolha dos constituintes e do método de processamento influencia significativamente suas propriedades finais e aplicações. De maneira geral as vantagens

e desvantagens dos diferentes Compósitos com matriz de vidro estudados podem ser correlacionadas.

Os compósitos com matriz de vidro reforçados com fibras de basalto apresentaram resistência à flexão relativamente alta e estabilidade térmica, mas menor resistência à tração em comparação com compósitos com matriz de vidro vidros metálicos. Estes últimos, por sua vez, mostraram excelente tenacidade devido à formação de bandas de cisalhamento, sendo ideais para aplicações automotivas e aeroespaciais.

Os compósitos com matriz de vidro revestidos zircônio destacam-se pela resistência química e térmica, enquanto os compósitos com matriz de vidro luminescentes possuem propriedades ópticas únicas, com alta estabilidade de luminescência em temperaturas elevadas.

Os métodos de *slip casting* e *bridgman solidification* permitem controle preciso da microestrutura, mas o primeiro é mais adequado para compósitos com matriz de vidro reforçados com fibras, enquanto o segundo é essencial para compósitos vidros metálicos. O *remelting* a laser melhora a resistência química e térmica, enquanto a sinterização viscosa sem pressão preserva propriedades ópticas sem comprometer a matriz vítrea.

Os compósitos com matriz de vidro reforçados com fibras de basalto são indicados para aplicações estruturais e aeroespaciais, enquanto os compósitos com matriz de vidro

metálico-vítreos são ideais para componentes sujeitos a alto impacto. Os compósitos com matriz de vidro zircônio são amplamente utilizados na indústria biomédica, devido à resistência à corrosão, e os compósitos com matriz de vidro luminescentes encontram aplicação em dispositivos ópticos e iluminação de segurança.

A Tabela 3 é apresenta uma visão comparativa das principais características dos diferentes compósitos com matriz de vidro analisados nos estudos revisados:

Tabela 3 – Comparação entre os dados estudados

Tipos de compósitos com matriz de vidro	Processamento	Propriedades mecânicas	Propriedades térmicas / ópticas	Aplicações
Reforçado com fibra de basalto (Liu <i>et al.</i> , 2025)	<i>Slip Casting</i>	Resistência à flexão de 104,85 MPa, boa adesão interfacial	Baixo coeficiente de expansão térmica	Aeroespacial, Estruturas de alta estabilidade
Metálico-vítreo dendrítico (Qiao <i>et al.</i> , 2013)	<i>Bridgman Solidification & Semi-solid Processing</i>	Resistência à tração de 1385 MPa, alta tenacidade	Boa resistência ao impacto e fadiga	Automotivo, Estruturas de alto impacto
Baseado em Zr com revestimento (Hu <i>et al.</i> , 2024)	<i>Remelting a Laser</i>	Alta resistência à corrosão, desgaste reduzido	Estabilidade térmica elevada, boa aderência ao substrato	Biomédico, Aeroespacial
Luminescente (Fernandes <i>et al.</i> , 2024)	Sinterização Viscosa Sem Pressão	Propriedades mecânicas limitadas, estável sob calor	Luminescência persistente por >12 min, resistência térmica > 300 °C	Dispositivos ópticos, Iluminação de segurança

Fonte: Autor (2025)

Os compósitos de matriz de vidro são materiais altamente versáteis que encontram aplicações em diversos setores, graças à sua combinação única de propriedades mecânicas, térmicas, ópticas e de resistência à corrosão. Dependendo de sua composição e método de fabricação, esses materiais são utilizados em áreas que vão desde a indústria

aeroespacial até dispositivos biomédicos e ópticos, destacando-se por sua capacidade de atender a demandas específicas de cada setor.

No setor aeroespacial, os compósitos de matriz de vidro são amplamente empregados devido à sua alta resistência térmica e mecânica, especialmente quando reforçados com fibras cerâmicas ou de basalto. Esses materiais são ideais para componentes que exigem leveza, durabilidade e capacidade de suportar condições extremas, como variações térmicas e exposição a ambientes agressivos. Por exemplo, compósitos de matriz vítrea reforçados com fibras de basalto são utilizados em estruturas de satélites, revestimentos térmicos e componentes de motores a jato, onde a baixa expansão térmica e a alta resistência mecânica são críticas (Liu *et al.*, 2025).

Além disso, a capacidade desses materiais de manter suas propriedades em temperaturas elevadas os torna adequados para aplicações em turbinas e sistemas de propulsão, onde a resistência ao desgaste e à corrosão é essencial (Hu *et al.*, 2025).

No setor automotivo, os compósitos de matriz de vidro têm sido explorados para a fabricação de peças estruturais e componentes de alta performance. Compósitos metálico-vítreos, em particular, são valorizados por sua elevada resistência ao impacto e capacidade de absorção de energia, tornando-os ideais para componentes como chassis, painéis de carroceria e sistemas de suspensão (Qiao, 2013).

Esses materiais contribuem para a redução do peso dos veículos, melhorando a eficiência energética sem comprometer a segurança. Além disso, a resistência à corrosão dos compósitos de matriz de vidro os torna adequados para peças expostas a ambientes úmidos ou salinos, como componentes de sistemas de escapamento e suspensão. A combinação de leveza, durabilidade e resistência mecânica faz dos compósitos de matriz de vidro uma escolha promissora para a indústria automotiva, que busca constantemente inovações em materiais para veículos mais eficientes e sustentáveis (Fernandes *et al.*, 2024).

No campo biomédico, os compósitos de matriz de vidro à base de vidro bioativo têm sido amplamente estudados para aplicações em implantes e recobrimentos. Esses materiais são projetados para interagir de forma positiva com tecidos biológicos, promovendo a regeneração óssea e a integração com o organismo. Compósitos de matriz vítrea bioativa são utilizados em implantes dentários, próteses ósseas e recobrimentos para dispositivos médicos, onde a resistência à corrosão e a biocompatibilidade são essenciais (Massera *et al.*, 2015).

Além disso, a capacidade desses materiais de liberar íons benéficos, como cálcio e fósforo, contribui para a regeneração tecidual e a prevenção de infecções. A versatilidade dos compósitos de matriz de vidro no setor biomédico abre caminho para o desenvolvimento de novos

dispositivos médicos e tratamentos inovadores, especialmente em áreas como ortopedia e odontologia (Ojha *et al.*, 2019).

Os compósitos de matriz de vidro também têm aplicações promissoras no campo dos dispositivos ópticos, especialmente quando incorporam partículas luminescentes ou propriedades fotônicas. Compósitos de matriz vítrea luminescentes, como os que utilizam partículas de $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$, são investigados para aplicações em iluminação de segurança, sinalização e displays. Esses materiais combinam alta estabilidade térmica com luminescência persistente, tornando-os ideais para ambientes onde a confiabilidade e a durabilidade são críticas (Van Der Heggen *et al.*, 2022).

Além disso, a transparência e a capacidade de controle das propriedades ópticas dos compósitos de matriz de vidro os tornam adequados para aplicações em fibras ópticas, sensores e lentes avançadas. A sinterização viscosa, por exemplo, permite a fabricação de compósitos translúcidos com propriedades ópticas ajustáveis, abrindo novas possibilidades para o desenvolvimento de dispositivos fotônicos inovadores (Loryuenyong; Buasri, 2021).

Além dos setores mencionados, os compósitos de matriz de vidro também têm potencial para aplicações em energia, construção civil e eletrônica. Por exemplo, compósitos de matriz vítrea com alta condutividade térmica são investigados para uso em sistemas de dissipação de calor em

dispositivos eletrônicos. Na construção civil, esses materiais são explorados para revestimentos resistentes ao fogo e estruturas leves, onde a combinação de resistência mecânica e térmica é essencial (Boccaccini *et al.*, 1997).

Em resumo, os compósitos de matriz vítrea são materiais altamente versáteis, com aplicações que abrangem desde setores tradicionais, como aeroespacial e automotivo, até áreas emergentes, como biomedicina e dispositivos ópticos. Sua capacidade de combinar propriedades mecânicas, térmicas, ópticas e de resistência à corrosão os torna ideais para uma ampla gama de aplicações. No entanto, o sucesso desses materiais depende da otimização de sua composição e métodos de processamento, bem como da exploração contínua de novas aplicações em setores inovadores.

2.5 Conclusões e Perspectivas

Os compósitos com matriz de vidro demonstram uma ampla gama de aplicações e propriedades ajustáveis, sendo uma alternativa promissora para diversos setores industriais. A evolução dos métodos de processamento permitiu o desenvolvimento de materiais cada vez mais sofisticados, com maior resistência mecânica, térmica e química. A utilização de técnicas como sinterização viscosa, solidificação controlada e remelting a laser tem possibilitado avanços na durabilidade e eficiência desses compósitos.

Além disso, a pesquisa contínua sobre a interação entre a matriz vítrea e os reforços tem permitido aprimoramentos na adesão interfacial e na estabilidade estrutural dos compósitos com matriz de vidro. Esses avanços sugerem que, no futuro, novas formulações e técnicas de fabricação poderão ampliar ainda mais suas aplicações, tornando-os materiais essenciais para a engenharia de alto desempenho.

REFERÊNCIAS

BOCCACCINI, A. R.; BÜCKER, M.; BOSSERT, J.; MARSZALEK, K. Glass matrix composites from coal flyash and waste glass. **Waste Management**, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 39–45, jan. 1997. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(97\)00035-4](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(97)00035-4).

DONALD, I. W. Preparation, Properties and Applications of Glass and Glass-Ceramic Matrix Composites. **Key Engineering Materials**, [s. l.], v. 108–110, p. 123–144, jul. 1995. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.108-110.123>.

DREHMAN, A. J.; GREER, A. L.; TURNBULL, D. Bulk formation of a metallic glass: Pd₄₀Ni₄₀P₂₀. **Applied Physics Letters**, [s. l.], v. 41, n. 8, p. 716–717, 15 out. 1982. <https://doi.org/10.1063/1.93645>.

FERNANDES, R. G.; MATTOS, E. D. A.; DA SILVA, V. M. P.; VAN DER HEGGEN, D.; SMET, P. F.; MANZANI, D.; TEIXEIRA, V. D. C.; RODRIGUES, L. C. V. Translucent persistent luminescence glass matrix composite obtained by pressureless viscous sintering. **Materialia**, [s. l.], v. 38, p. 102222, dez. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2024.102222>.

HU, L.; ZHAO, L.; WANG, G.; LIU, Y.; LIU, X. Microstructure and corrosion behavior of laser-remelted Zr-based metallic glass matrix composite coatings. **Journal of Alloys and Compounds**, [s. l.], v. 1010, p. 178299, jan. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.178299>.

KAGEYAMA, K.; ENOKI, M.; KISHI, T. Mechanical Properties of Alumina Particulate and Platelet-Reinforced Glass Composites with a Crystalline Phase at the Interface. **Journal of the Ceramic Society of Japan**, [s. l.], v. 103, n. 1195, p. 205–210, 1995. <https://doi.org/10.2109/jcersj.103.205>.

LI, R.; LI, Z.; ZHU, Y.; QI, K. Structure and corrosion resistance properties of Ni–Fe–B–Si–Nb amorphous composite coatings fabricated by laser processing. **Journal of Alloys and Compounds**, [s. l.], v. 580, p. 327–331, dez. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.06.111>.

LIU, Y.; CUI, X.; JIANG, Y.; XU, Y.; ZUO, T.; SHE, S.; HOU, C.; GUO, H. Basalt fiber reinforced glass matrix composites with low expansion and high mechanical properties. **Ceramics International**, [s. l.], , p. S0272884225009836, fev. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.02.300>.

LORYUENYONG, V.; BUASRI, A. Preparation of Luminescent Glass Aggregates from Soda-Lime Waste Glass. **International Journal of Photoenergy**, [s. l.], v. 2021, p. 1–6, 8 nov. 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/5951258>.

MASSERA, J.; GŁUCHOWSKI, P.; LASTUSAARI, M.; RODRIGUES, L. C. V.; PETIT, L.; HÖLSÄ, J.; HUPA, L.; HUPA, M. New alternative route for the preparation of phosphate glasses with persistent luminescence properties. **Journal of the European Ceramic Society**, [s. l.], v. 35, n. 4, p. 1255–1261, abr. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2014.11.007>.

OJHA, N.; TRAUTVETTER, T.; NORRBO, I.; KALIDE, A.; LASTUSAARI, M.; MUELLER, R.; PETIT, L. Sintered silica bodies with persistent luminescence. **Scripta Materialia**, [s. l.], v. 166, p. 15–18, jun. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.02.044>.

QIAO, J. **In-situ Dendrite/Metallic Glass Matrix Composites: A Review.** *J. Mater. Sci. Technol.* [S. l.: s. n.], 2013.

QIAO, J.; JIA, H.; LIAW, P. K. Metallic glass matrix composites. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, [s. l.], v. 100, p. 1–69, fev. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2015.12.001>.

VAN DER HEGGEN, D.; JOOS, J. J.; FENG, A.; FRITZ, V.; DELGADO, T.; GARTMANN, N.; WALFORT, B.; RYTZ, D.; HAGEMANN, H.; POELMAN, D.; VIANA, B.; SMET, P. F. Persistent Luminescence in Strontium Aluminate: A Roadmap to a Brighter Future. **Advanced Functional Materials**, [s. l.], v. 32, n. 52, p. 2208809, dez. 2022. <https://doi.org/10.1002/adfm.202208809>.

3 VIDROS FOTOCRÔMICOS

*Kallyandra M^a S. de S. Amorim, Maria Eduarda Cavalcanti
Torres*

Resumo

Os vidros fotocromicos são materiais inovadores com ampla aplicação no setor óptico, capazes de alterar sua transparência de forma reversível em resposta à radiação ultravioleta. Este capítulo de revisão aborda os fundamentos, os mecanismos de funcionamento e os avanços na composição química desses materiais, com especial atenção à incorporação de nanopartículas para otimizar a eficiência e a durabilidade. Técnicas avançadas de caracterização, como a espectroscopia de absorção no UV-visível e a microscopia eletrônica, são discutidas como ferramentas essenciais para a compreensão dos mecanismos de ativação e desativação, auxiliando no desenvolvimento de vidros mais eficazes. Adicionalmente, explora-se como a nanotecnologia tem viabilizado novas abordagens para aprimorar a resposta fotocromica, ampliando o uso desses materiais em aplicações como janelas inteligentes e vidros automotivos. As perspectivas futuras incluem o desenvolvimento de vidros com controle ativo de transparência, integrando-se a tecnologias eletrônicas para promover maior eficiência energética.

Palavras-chave: Materiais-ópticos. Nanopartículas. Vidros-fotocrômicos.

3.1 Introdução

Os materiais cerâmicos, com destaque para os vidros, são amplamente utilizados em diversas áreas da indústria e do design devido às suas propriedades singulares e versatilidade. O vidro, especificamente, é um material transparente e com notável flexibilidade em suas aplicações, sendo produzido a partir do resfriamento rápido de um líquido, processo que impede a cristalização completa e resulta em um sólido amorfo (Zarzycki, 1991).

Seu processo de fabricação envolve diversas técnicas, como fusão, moldagem e têmpera, o que permite que o material seja utilizado em uma vasta gama de produtos. Ele é fundamental em setores como o de embalagens, fibras ópticas, lentes oftálmicas, telas de dispositivos eletrônicos e revestimentos arquitetônicos (Bristogianni; Oikonomopoulou, 2023; Donald, 1995; Doremus, 1994; Padilla *et al.*, 2021; Scholze, 2012; Shelby, 2005; Zarzycki, 1991).

De acordo com (Callister; Rethwisch, 2014), os materiais vítreos são sólidos amorfos, caracterizados pela ausência de uma estrutura cristalina ordenada de longo alcance. Essa estrutura desordenada confere aos vidros

características notáveis, como a transparência, a ausência de um ponto de fusão definido (substituído por uma faixa de transição vítrea) e um baixo coeficiente de expansão térmica. Embora possuam alta resistência química, são inerentemente frágeis, com tendência a fraturar sem sofrer deformação plástica, o que pode limitar sua aplicação em ambientes de alta pressão ou impacto (Shelby, 2005).

Existem diferentes tipos de vidros, cada um com composições e aplicações específicas. Os vidros à base de sílica (SiO_2), por exemplo, são amplamente utilizados em aplicações ópticas e laboratoriais devido à sua alta pureza e transparência. Os vidros de borossilicato, por sua vez, são conhecidos pela elevada resistência a choques térmicos, sendo frequentemente empregados em utensílios de laboratório que necessitam suportar mudanças bruscas de temperatura (Doremus, 1994; Scholze, 2012; Shelby, 2005; Zarzycki, 1991). Um tipo mais inovador e com crescente popularidade é o vidro fotocrômico, que será o foco desta revisão.

Neste capítulo, serão abordados os fundamentos, mecanismos e avanços recentes no desenvolvimento de vidros fotocrômicos. Serão considerados os principais desafios enfrentados pela indústria, bem como as tendências tecnológicas para aprimorar sua durabilidade e eficiência, explorando como esses materiais podem impactar diversos setores e abrir caminho para novas aplicações tecnológicas.

3.2 FUNDAMENTOS DOS VIDROS

3.2.1 *Formação e Transição Vítre*

O vidro é um material obtido a partir do resfriamento de uma substância fundida em uma velocidade suficientemente alta para impedir a sua cristalização, resultando em uma estrutura não cristalina, ou amorfa (Zarzycki, 1991). Isso significa que seus átomos e moléculas não estão organizados de forma periódica e ordenada como em um cristal.

Uma característica central dos vidros é o fenômeno da transição vítre. Diferente dos materiais cristalinos que possuem uma temperatura de fusão (T_f) definida, os vidros exibem uma faixa de temperatura na qual suas propriedades mudam drasticamente. Ao ser aquecido, o vidro passa de um estado sólido e rígido para um estado "super-resfriado" e viscoso, sem uma mudança de fase abrupta. A temperatura em que essa transição se torna mais acentuada é conhecida como temperatura de transição vítre (T_g) (Varshneya, 1994). Essa propriedade é fundamental, pois permite que o vidro seja moldado em diversas formas enquanto se encontra nesse estado viscoso.

Além disso, a modificação da composição química do vidro permite criar materiais com características específicas para interagir com uma vasta gama de radiações eletromagnéticas, abrangendo desde o ultravioleta (UV) até o

infravermelho (IR). A capacidade de controlar a transmitância em diferentes comprimentos de onda torna os vidros essenciais em tecnologias avançadas, como fibras ópticas, lentes de alta precisão e dispositivos de comunicação (Nalin *et al.*, 2016).

3.2.2 Estrutura

Os vidros mais comuns, os silicatos, não são constituídos por moléculas isoladas, mas por uma rede tridimensional contínua. A unidade estrutural fundamental dessa rede é o tetraedro de sílica ($[\text{SiO}_4]^{4-}$), no qual um átomo de silício (Si) se conecta a quatro átomos de oxigênio (O) (Varshneya, 1994). Na sílica vítrea pura, esses tetraedros estão interligados pelos vértices, com cada átomo de oxigênio sendo compartilhado por dois tetraedros, formando as chamadas "ligações ponteantes".

Devido a essa estrutura em rede, a composição química de um vidro não pode ser expressa por uma única fórmula molecular. Convencionalmente, sua composição é descrita em termos das porcentagens em peso ou molares dos óxidos que compõem a sua formulação (ex: 70% SiO_2 , 15% Na_2O , 10% CaO). Essa representação é prática para o controle de qualidade industrial e para prever as propriedades do material final (Shelby, 2005).

3.3 Vidros Fotocrômicos

O fotocromismo é a propriedade que certos materiais apresentam de mudar de cor de forma reversível ao serem expostos a uma radiação eletromagnética, geralmente luz ultravioleta (UV). Ao cessar a irradiação, o material retorna à sua coloração original. Esse fenômeno é a base para o funcionamento dos vidros fotocrômicos, popularmente conhecidos por seu uso em lentes de óculos que escurecem sob o sol (Dotsenko; Glebov; Tšèkhomskii, 1998).

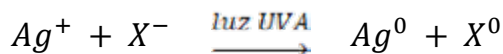
3.3.1 Mecanismo de Funcionamento

O efeito fotocrômico nos vidros comerciais é majoritariamente obtido pela dispersão de nanocristais de haletos de prata (AgX , onde $\text{X} = \text{Cl}, \text{Br}, \text{I}$) na matriz vítrea durante o processo de fabricação. Esses nanocristais são os centros ativos responsáveis pela mudança de cor (ARMISTEAD; STOOKEY, 1964).

O processo pode ser descrito em duas etapas principais: escurecimento e clareamento.

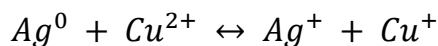
1. Escurecimento (Ativação): Quando a luz UV atinge o vidro, sua energia é suficiente para excitar um elétron de um íon haleto (X^-), que é transferido para um íon de prata

adjacente (Ag^+). Isso resulta na formação de um átomo de prata metálica (Ag^0) e um átomo de halogênio (X^0):



Os átomos de prata metálica se aglomeram, formando coloides de prata em escala nanométrica. Essas nanopartículas de prata absorvem fortemente a luz visível, fazendo com que o vidro escureça. A intensidade da cor depende do tamanho e da concentração dessas partículas (Takatohi, 1996).

2. Clareamento (Desativação): Na ausência de luz UV, a reação se inverte. O processo de reversão é termicamente ativado e pode ser auxiliado pela presença de íons de cobre(I) (Cu^+), que atuam como sensibilizadores. O Cu^+ captura o átomo de halogênio, evitando que ele escape da vizinhança do cristal, e facilita a recombinação dos íons, restaurando a transparência do vidro (Dotsenko; Glebov; Tšèkhomskii, 1998). A reação simplificada é:



Essa reversibilidade é crucial e só é possível porque os produtos da reação fotoquímica ficam confinados dentro da matriz vítrea rígida, o que permite sua recombinação.

3.3.2 Processos de Fabricação

A fabricação de vidros fotocrômicos é um processo delicado que exige controle rigoroso. A etapa inicial é similar à de vidros convencionais, envolvendo a fusão de matérias-primas como sílica (SiO_2), óxidos alcalinos e alcalino-terrosos em temperaturas entre 1400 e 1600 °C. O diferencial está na adição controlada dos compostos fotossensíveis (haletos de prata e cobre (I)) à mistura fundida (Armistead; Stookey, 1964).

Após a fusão e homogeneização, o vidro é moldado e resfriado. Em seguida, ele passa por um tratamento térmico crucial, geralmente entre 500 e 700 °C. Durante essa etapa, os íons de prata e halogênio, que estavam dissolvidos na matriz vítrea, precipitam-se para formar os nanocristais de haleto de prata com o tamanho e a distribuição ideais. O controle preciso do tempo e da temperatura deste tratamento é vital para o desempenho fotocrômico do vidro:

- Partículas muito pequenas (< 5 nm): Não exibem fotocromismo eficiente.
- Partículas muito grandes (> 30 nm): Dispersam a luz visível, tornando o vidro opalescente ou turvo mesmo no estado claro (Takatohi, 1996).

A nanotecnologia tem permitido o desenvolvimento de métodos alternativos, como a técnica sol-gel, para produzir vidros fotocrômicos em temperaturas mais baixas, oferecendo

um controle ainda maior sobre a estrutura e a dispersão das nanopartículas (Kaufman; Levy; Avnir, 1986).

3.3.3 Caracterização e Propriedades

A fim de avaliar e otimizar o desempenho dos vidros fotocromicos, diversas técnicas de caracterização são empregadas:

- Espectroscopia de Absorção no UV-visível (UV-Vis): É a técnica fundamental para quantificar o efeito fotocromico. Mede-se a transmitância do vidro antes, durante e após a exposição à luz UV. A partir desses dados, pode-se determinar a velocidade de escurecimento, a velocidade de clareamento e a resistência à fadiga (perda de eficiência após múltiplos ciclos).
- Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET): Permite visualizar diretamente os nanocristais de haleto de prata na matriz vítrea, fornecendo informações sobre seu tamanho, forma e distribuição, que são cruciais para correlacionar a nanoestrutura com as propriedades ópticas.
- Difração de raios X (DRX): Utilizada para confirmar a natureza cristalina das nanopartículas de haleto de prata e garantir que a matriz de vidro permaneça amorfa.

- Calorimetria Exploratória Diferencial (*Differential Scanning Calorimetry - DSC*): Fornece informações sobre a estabilidade térmica do vidro, como a temperatura de transição vítrea (T_g), que é importante para definir os parâmetros do tratamento térmico.

A eficiência fotocromica dos vidros é influenciada por uma série de fatores interligados. A composição da matriz vítrea, o tipo e a concentração dos halogênios, e as condições do tratamento térmico determinam as propriedades finais do material (Dotsenko; Glebov; Tšèkhomskii, 1998).

Estudos demonstram que a sensibilidade espectral do vidro (a faixa de comprimentos de onda que ativa o escurecimento) depende do tipo de halogênio. Vidros contendo brometos (AgBr) e iodetos (AgI) são sensíveis a comprimentos de onda mais longos (mais próximos da luz visível) do que aqueles contendo apenas cloretos (AgCl), o que lhes permite escurecer mais eficazmente mesmo em dias nublados (Takatohi, 1996).

A adição de dopantes também desempenha um papel importante. Íons como o cério (Ce^{3+}) e o európio (Eu^{2+}) podem atuar como absorvedores de UV, protegendo a matriz vítrea da degradação causada pela radiação e melhorando a resistência à fadiga óptica do material. Isso aumenta a vida útil do produto, um fator essencial para aplicações comerciais (Pavel *et al.*, 1998).

A nanotecnologia tem sido uma força motriz para a inovação neste campo. Pesquisas recentes focam na incorporação de outros tipos de nanopartículas, como as de óxido de tungstênio (WO_3), para desenvolver vidros com propriedades eletrocromicas, cuja transparência pode ser controlada ativamente pela aplicação de uma voltagem elétrica. Esses "vidros inteligentes" são extremamente promissores para janelas em edifícios sustentáveis e tetos solares automotivos, pois permitem um controle dinâmico da entrada de luz e calor, resultando em significativa economia de energia com climatização (Nath *et al.*, 2025).

3.4 Conclusões e Perspectivas

Os vidros fotocromicos representam uma classe de materiais inteligentes cuja funcionalidade deriva de um controle preciso da sua nanoestrutura. A compreensão dos mecanismos de precipitação de nanocristais de haletos de prata e da sua interação com a luz UV permitiu o desenvolvimento de produtos comerciais de grande sucesso, como as lentes oftálmicas adaptáveis.

As técnicas de caracterização avançadas são indispensáveis para correlacionar a composição, a estrutura e o desempenho óptico, guiando o desenvolvimento de materiais com resposta mais rápida, maior durabilidade e cores mais estáveis.

As perspectivas futuras são promissoras e se movem em direção a materiais multifuncionais. A integração do fotocromismo com outras propriedades, como o eletrocromismo e o termocromismo, abrirá portas para aplicações inovadoras. O desenvolvimento de "janelas inteligentes" que se ajustam automaticamente não apenas à luz solar, mas também à temperatura ou a um comando elétrico, é um dos campos de pesquisa mais ativos. Essas tecnologias têm o potencial de revolucionar a eficiência energética de edifícios e veículos, contribuindo para um futuro mais sustentável. A contínua exploração de novos sistemas de nanopartículas e matrizes vítreas certamente garantirá que os vidros fotocromáticos continuem a ser uma área de grande interesse científico e tecnológico.

REFERÊNCIAS

ARMISTEAD, W. H.; STOOKEY, S. D. Photochromic Silicate Glasses Sensitized by Silver Halides: Their characteristic of changing color reversibly, in combination with other properties, suggests many uses. **Science**, [s. l.], v. 144, n. 3615, p. 150–154, 10 abr. 1964.
<https://doi.org/10.1126/science.144.3615.150>.

BRISTOGIANNI, T.; OIKONOMOPOULOU, F. Glass up-casting: a review on the current challenges in glass recycling and a novel approach for recycling “as-is” glass waste into volumetric glass components. **Glass Structures & Engineering**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 255–302, set. 2023. <https://doi.org/10.1007/s40940-022-00206-9>.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering: an introduction**. 9. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2014.

DONALD, I. W. Preparation, Properties and Applications of Glass and Glass-Ceramic Matrix Composites. **Key Engineering Materials**, [s. l.], v. 108–110, p. 123–144, jul. 1995. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.108-110.123>.

DOREMUS, R. H. **Glass science**. 2nd ed. New York: Wiley, 1994.

DOTSENKO, A. V.; GLEBOV, L. B.; TŠÈKHOMSKII, V. A. **Physics and chemistry of photochromic glasses**. Boca

Raton: CRC Press, 1998(The CRC Press laser and optical science and technology series).

KAUFMAN, V. R.; LEVY, D.; AVNIR, D. A photophysical study of the sol/gel transition in silica: Structural dynamics and oscillations, room-temperature phosphorescence and photochromic gel glasses. **Journal of Non-Crystalline Solids**, [s. l.], v. 82, n. 1-3, p. 103-109, jun. 1986. [https://doi.org/10.1016/0022-3093\(86\)90117-1](https://doi.org/10.1016/0022-3093(86)90117-1).

NALIN, M.; RIBEIRO, S. J. L.; MANZANI, D.; GONÇALVES, R. R.; POIRIER, G.; CASSANGES, F. C.; MATOS, C. J. S. D.; MENDONÇA, C. R.; BONI, L. D.; MISOGUTI, L.; MALTA, O.; LEDEMI, Y.; MESSADDEQ, S.; MESSADDEQ, Y. GLASSY MATERIALS AND LIGHT: PART 1. **Química Nova**, [s. l.], 2016. DOI [10.5935/0100-4042.20160016](https://doi.org/10.5935/0100-4042.20160016). Disponível em: https://quimicanova.sbq.org.br/audiencia_pdf.asp?aid2=6370&nomeArquivo=v39n3a11.pdf. Acesso em: 23 abr. 2025.

NATH, H.; KUMAR, A.; SINGH, S.; KULKARNI, G. U.; GUPTA, R. Strategic Synthesis of Mixed-Phase Tungsten Oxide for

Electrochromic Smart Windows. **ACS Applied Materials & Interfaces**, [s. l.], v. 17, n. 9, p. 14147–14156, 5 mar. 2025.
<https://doi.org/10.1021/acsami.4c15176>.

PADILLA, I.; ROMERO, M.; ROBLA, J. I.; LÓPEZ-DELGADO, A. Waste and Solar Energy: An Eco-Friendly Way for Glass Melting. **ChemEngineering**, [s. l.], v. 5, n. 2, p. 16, 8 abr. 2021.
<https://doi.org/10.3390/chemengineering5020016>.

PAVEL, E.; MIHAILESCU, I. N.; HENING, A.; VLAD, V. I.; TUGULEA, L.; DIAMANDESCU, L.; BIBICU, I.; CHIPARA, M. Three-dimensional memory effect in fluorescent photosensitive glass activated by europium and cerium. **Optics Letters**, [s. l.], v. 23, n. 16, p. 1304, 15 ago. 1998.
<https://doi.org/10.1364/OL.23.001304>.

SCHOLZE, H. **Glass: nature, structure, and properties**. Place of publication not identified: Springer, 2012.

SHELBY, J. E. **Introduction to glass science and technology**. 2nd ed. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2005.

TAKATOHI, U. E. **Preparação e Propriedades de Vidros Fotocrômicos Dopados com Cloreto de Prata**. 1996. Doutorado em Física Nuclear – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996. DOI [10.11606/T.43.1996.tde-15082012-154441](https://doi.org/10.11606/T.43.1996.tde-15082012-154441). Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/43/43131/tde-15082012-154441/>. Acesso em: 6 ago. 2025.

VARSHNEYA, A. K. **Fundamentals of inorganic glasses: Arun K. Varshneya**. Boston: Academic Press, 1994.

ZARZYCKI, J. **Glasses and the vitreous state**. Cambridge : New York: Cambridge University Press, 1991(Cambridge solid state science series).

"TECNOLOGIA DOS VIDROS: UMA REVISÃO POR ALUNOS DE ENGENHARIA DE MATERIAIS DA UFRPE - VOLUME I" É UMA IMERSÃO COMPLETA NO UNIVERSO DOS MATERIAIS VÍTREOS. FRUTO DO TRABALHO DOS ESTUDANTES DA UFRPE, ESTA OBRA EXPLORA OS MATERIAIS VÍTREOS. O LIVRO ABORDA DESDE A ESTRUTURA MOLECULAR E OS PROCESSOS DE CONTROLE DE QUALIDADE ATÉ OS TRATAMENTOS TÉRMICOS E SUPERFICIAIS QUE APRIMORAM O MATERIAL. COM UMA ANÁLISE COMPARATIVA A OUTROS TIPOS DE VIDRO, ESTE VOLUME OFERECE UMA VISÃO ABRANGENTE E ATUALIZADA DO SETOR. INDISPENSÁVEL PARA ACADÊMICOS, PROFISSIONAIS E ENTUSIASTAS, A OBRA DESTACA O POTENCIAL INOVADOR DO VIDRO PARA UM FUTURO MAIS TECNOLÓGICO E CONSCIENTE.

