

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

GUSTAVO SAKAYANAGI TEIXEIRA

**APLICAÇÃO DOS SENSORES FBG (FIBER BRAGG GRATING) EM ANÁLISE
ESTRUTURAL COM FOCO EM VIDROS ESTRUTURAIIS**

Guaratinguetá

2025



GUSTAVO SAKAYANAGI TEIXEIRA

**APLICAÇÃO DOS SENSORES FBG (FIBER BRAGG GRATING) EM ANÁLISE
ESTRUTURAL COM FOCO EM VIDROS ESTRUTURAIS**

Monografia apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências – Câmpus de Guaratinguetá, para obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração:

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio
Martins

Guaratinguetá

2025

T266a	<p>Teixeira, Gustavo Sakayanagi</p> <p>Aplicação dos sensores <i>FBG (Fiber Bragg Grating)</i> em análise estrutural com foco em vidros estruturais / Lucas Duarte Lima - Guaratinguetá, 2025.</p> <p>46 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 41-46</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2025.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins</p> <p>1. Detectores. 2. Microestrutura. 3. Fibras óticas. 4. Sustentabilidade. I. Título.</p> <p>CDU 681.586</p>
-------	--

Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8 3595


GUSTAVO SAKAYANAGI TEIXEIRA

**APLICAÇÃO DOS SENSORES FBG (FIBER BRAGG GRATING) EM
ANÁLISE ESTRUTURAL COM FOCO EM VIDROS ESTRUTURAIS**

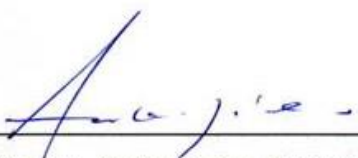
Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Data da defesa: 14 / 11 / 2025

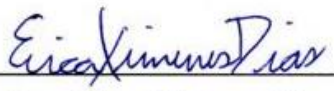
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins
UNESP - Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá



Prof. Dr. Antonio dos Reis de Faria Neto
UNESP - Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá



Prof. Dra. Erica Ximenes Dias
UNESP - Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá

Aos meus pais, Laryssa, Lucas e Miekeo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Daisaku Ikeda e a Soka Gakkai Internacional.

Aos meus pais, irmã, cunhado e avó pelo apoio constante e por sempre me incentivarem nos meus estudos.

Ao professor Dr. Marcelo Sampaio Martins, pela excelente orientação, paciência e dinâmica no andamento do trabalho e pela confiança dada a mim pela realização do projeto.

Ao professor Engenheiro Walter e à discente Eduarda, pelo suporte na parte de instrumentação.

Aos amigos Guilherme Castilho, Henrique Amon e Douglas Agenor pelas discussões e aprimoramentos sugeridos para este trabalho.

Às bandas musicais Taiyo Ongakutai, Soka Gloria Wind Orchestra e Soka Renaissance Vanguard, por levarem, através da música, a esperança nos momentos mais difíceis.

Se você sempre fizer o que faz nunca será
mais do que é hoje
(Mestre Shifu, *Kung Fu Panda 3*, 2016).

RESUMO

Este trabalho explorou a teoria e a prática do uso do sensor FBG – Fiber Bragg Grating, dando mais enfoque em sua área de instrumentação. Nesta parte procurou-se detalhar como foi feita tal metodologia, bem como sua utilização em outras superfícies em forma de viga de materiais distintos. Mostrou-se como um feixe de raio laser pôde ser relacionado matematicamente com o índice de refração do núcleo da fibra e com a determinação de seu comprimento de onda específico. Juntamente ao interrogador ótico, é possível se obter valores de deformação. Esta pesquisa também mostrou um breve histórico do vidro sua composição mecânica e química, softwares de simulação. Foi discutido o quão esse material é sustentável e sua grande tendência de ser o elemento do futuro. Evidenciou-se os fatores que o habilitam para ser utilizado onde há situações que exigem maiores cargas, transformando-os em vidros estruturais. Nesse sentido, observou-se que a camada intermediária de PVB é a mais utilizada em termos gerais. É válido reiterar que não há normas brasileiras que cobrem por completo todo conteúdo sobre vidros estruturais, por isso utilizou-se o apoio de diretrizes internacionais e manuais específicos.

Palavras-chave: sensores FBG; instrumentação; vidros estruturais; sustentável.

ABSTRACT

This study explored the theory and practice of using the FBG sensor, with greater emphasis on its instrumentation aspect. In this section, the methodology used was detailed, as well as its application on other beam-shaped surfaces made of different materials. It was shown how a laser beam can be mathematically related to the refractive index of the fiber core and to the determination of its specific wavelength. Together with the optical interrogator, it is possible to obtain strain values. This research also presented a brief history of glass, its mechanical and chemical composition, and simulation software. It discussed how sustainable this material is and its strong potential to become the material of the future. The factors that enable it to be used in situations requiring higher loads were highlighted, turning it into structural glass. In this regard, it was observed that the PVB interlayer is the most commonly used overall. It is worth reiterating that there are no Brazilian standards that fully cover all aspects related to structural glass; therefore, international guidelines and specific manuals were used as references.

Keywords: FBG sensor; instrumentation; structural glass; sustainable.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Quebra do vidro temperado	18
Figura 2 – Vidro laminado mostrando camada central de PVB	19
Figura 3 – Quebra do vidro laminado	20
Figura 4 – Comparação visual entre SGP e PVB	20
Figura 5 – Exemplo de vidro borossilicato	23
Figura 6 – Software RFEM5 com módulo RF-GLASS	24
Figura 7 – Sampa Sky	24
Figura 8 – Aplicação do vidro na construção civil	25
Figura 9 – Funcionamento simplificado do FBG	27
Figura 10 – Interrogador ótico	30
Figura 11 – Instalação do sensor	32
Figura 12 – Interrogador HBM FS22	35
Figura 13 – Área limpa da barra	36
Figura 14 – Fixação parcial	37
Figura 15 – Roseta FS62PSR	38
Figura 16 – Sensor de temperatura	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSYS	Analysis Systems Incorporated
CSM-3	Produto CSM-3 Degreaser
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMTA	Dynamic mechanical thermal analysis
DSC	Differential scanning calorimetry
EVA	Etileno Vinil Acetato
FBG	Fiber Bragg Grating
HBM	Hottinger Baldwin Messtechnik
ISO	International Organization for Standardization
JISC	Japanese Industrial Standards Committee
LS-DYNA	Livermore Software - DYNAmic Analysis
MAT GLASS	Material / Modelo em vidro
MPE	Poliéster modificado
NBR	Norma Brasileira
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
OSA	Optical Spectrum Analyzer
PCT-2M	Positive Temperature Coefficient de 2 metros
PVB	Polivinil Butiral
RFEM	R-Programm Finite Element Method
SPD	Smart Peak Detection
SGP	Sentry Glass Plus
TDM	Time Division Multiplexing
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
VPG	Vishay Precision Group, Inc.

LISTA DE SÍMBOLOS

λ_b	Comprimento de onda de Bragg
n_{ef}	Índice de refração do núcleo
Λ	Período da microestrutura
β_e	Sensibilidade à deformação do sensor
ρ_e	Constante fotoelástica
β_t	Sensibilidade térmica do sensor
α	Coefficiente de expansão da fibra
ζ	Coefficiente termo ótico
ΔT	Variação de temperatura
$\Delta \epsilon$	Variação de deformação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	12
1.2	OBJETIVOS GERAIS	13
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.4	JUSTIFICATIVAS	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	APRESENTAÇÃO INICIAL.....	14
2.2	BREVE HISTÓRICO.....	14
2.3	COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MECÂNICA	15
2.4	NORMAS TÉCNICAS.....	17
2.5	TIPOS DE VIDRO.....	17
2.6	CAMADA INTERMEDIÁRIA	20
2.7	SOFTWARES DE SIMULAÇÃO.....	23
2.8	APLICAÇÕES DO VIDRO EM ESTRUTURAS.....	24
2.9	USO DOS SENSORES E INTERROGADOR.....	26
2.10	EQUAÇÕES PRINCIPAIS	28
2.11	INSTALAÇÃO DO STRAIN GAUGE.....	29
3	MATERIAIS E MÉTODO.....	32
3.1	PRECAUÇÕES DURANTE A INSTALAÇÃO	33
3.2	CORREÇÕES DAS SENSIBILIDADES.....	34
3.3	INTERROGADORES.....	34
3.4	CALIBRAÇÃO.....	35
4	ESTUDO DE CASO: INSTRUMENTAÇÃO COM SENSORES FBG.....	36
4.1	SENSOR DE DEFORMAÇÃO	36
4.2	SENSOR DE TEMPERATURA.....	38
5	CONCLUSÕES	40
5.1	VERIFICAÇÃO DOS OBJETIVOS.....	40
	REFERÊNCIAS.....	41
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	46

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Os sensores FBG (*Fiber Bragg Grating*) têm ganhado destaque no campo da engenharia estrutural devido à sua capacidade de monitoramento em tempo real. Esses dispositivos consistem em microestruturas formadas por variações periódicas no índice de refração do germânio presente no núcleo de uma fibra ótica. Quando a fibra é exposta à incidência de raios laser, ocorre uma alteração no índice de refração, criando uma Rede de Bragg, que reflete um comprimento de onda específico, enquanto o restante continua seu percurso. Esse fenômeno possibilita a medição precisa de parâmetros como temperatura e deformação (Biazoli, 2022).

A aplicação de sensores FBG na análise estrutural oferece uma solução eficaz para monitorar tensões e deformações em materiais e componentes. Quando utilizados em vidros, materiais que possuem “um aproveitamento possível de 100% em sua reciclagem, não possuindo limites de ciclos de reciclagem” (Vettorato, et al., 2021, p.33), esses sensores conseguem identificar variações mínimas instantaneamente, o que é essencial para garantir a segurança das construções. Por ser um componente sensível e propenso a falhas, exige um acompanhamento detalhado de seu comportamento para evitar danos, especialmente em grandes edificações como fachadas e passarelas de vidro.

Com os sensores FBG, é possível medir as variações nas tensões e deformações do vidro de maneira contínua e específica, facilitando a detecção antecipada de problemas (Liu et. al., 2019). Isso é especialmente relevante em situações de impacto ou sob condições de carga dinâmica, que são comuns em projetos arquitetônicos modernos (Alhussein et al., 2025). Essa tecnologia permite uma abordagem mais precisa e eficaz para avaliar a integridade do vidro em estruturas (Liu et. al., 2019; Alhussein et al., 2025).

Estudar o comportamento dos vidros estruturais é fundamental para garantir que atendam às normas como a NBR 7199, de segurança e desempenho, como resistência e durabilidade (ABNT NBR 7199, 2016). O avanço tecnológico trouxe novos tipos de vidro, como ultrafino, inteligente e de alto desempenho, que reagem a estímulos como temperatura e luz (Barakat & Faragallah, 2024). Compreender essas inovações permite aos engenheiros utilizá-los de forma eficiente em projetos modernos, assegurando conformidade com os requisitos legais e

otimizando o desempenho estrutural (Pradeep et al., 2019). Esse conhecimento é essencial para criar soluções arquitetônicas seguras e sustentáveis, promovendo a evolução dos materiais na engenharia.

1.2 Objetivos Gerais

Compreender na teoria e, principalmente, na prática o uso dos sensores FBG em estudos de análise estrutural. O foco é aprimorar a metodologia de instrumentação baseando-se na utilização do vidro estrutural e aprender o funcionamento desses tipos de sensores na engenharia.

1.3 Objetivos específicos

Neste caso, serão avaliadas deformações e possíveis tensões em armações de vidro para fins estruturais. Deseja-se também aprender como instalar, ler e interpretar os dados obtidos e analisar o comportamento dos sensores em diferentes configurações estruturais do vidro, montando-os em forma de vigas, bem como adquirir maiores conhecimentos desse material.

1.4 Justificativas

Por se tratar de um tema ainda pouco explorado, esse projeto poderá servir como base para novos estudos dentro do ambiente acadêmico. E, tendo em vista que a faculdade já possui acesso aos vidros, sensores, interrogadores e computadores, o projeto ficará muito rico em sua parte experimental.

Além disso, a robustez e longevidade dos sensores FBG, que podem ser incorporados diretamente à estrutura do vidro, tornam sua instalação menos invasiva. Esses dispositivos são ideais para ambientes desafiadores, como altas temperaturas e condições corrosivas, características típicas de grandes construções. Dessa forma, deve-se saber que os principais problemas da indústria do vidro, principalmente estrutural, é a questão da fratura devido a aquecimento e resfriamento. Assim, em locais onde há um gradiente térmico grande (Nordeste, por exemplo) fazem com que o vidro trinque e se rompa. Neste caso, a fibra ótica ajuda a obter a temperatura. Por isso, o uso de sensores FBG em vidros estruturais oferece não apenas maior segurança, mas também um monitoramento mais confiável, o que pode revolucionar a maneira como as construções contemporâneas são estudadas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Apresentação Inicial

Neste capítulo foram apresentados alguns conceitos sobre o material vidro, bem como seu breve histórico, sua composição química e mecânica, algumas normas, aplicações estruturais, softwares de simulação e o uso de sensores FBG para uma análise mais detalhada. Discutiu-se também a importância das camadas intermediárias dos vidros e como elas funcionam quando submetidas a maiores esforços.

2.2 BREVE HISTÓRICO

O vidro é um material milenar e muito importante na história da Humanidade, haja visto que é amplamente utilizado na vida cotidiana e, até os dias atuais, se torna objeto de estudo (Silva e Filgueiras, 2023). A origem do vidro remonta a Antiguidade, quando os povos egípcios e mesopotâmicos começaram a produzir vidro sintético por meio da fusão de sílica com componentes que os fundiam, como a soda ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) (Silva e Filgueiras, 2023). O surgimento das cores nos vidros se deu pela adição de sais de cobalto, mas outros sais também são utilizados para tal finalidade. “Um dos mais importantes e famoso é o cloreto de ouro, ou púrpura de Cássio, que produz vidro de uma bela cor vermelha” (Silva e Filgueiras, 2023, p.492).

As técnicas de confecção do vidro foram evoluindo ao longo do tempo e isso permitiu a obtenção de diferentes tipos com propriedades específicas (Salama, 2019). No Egito Antigo, por exemplo, existia a técnica da formação por núcleo, que consistia em modelar estruturas ocas, como um vaso, através de um molde colocado internamente e, dessa forma, ir modelando externamente conforme o vidro ainda estivesse quente (Salama, 2029). A moldagem traduz-se em derramar o vidro quente em um molde e, após sua solidificação já numa temperatura mais amena, fazia-se sua lapidação. Os romanos introduziram a técnica do vidro soprado que é utilizada até os dias atuais (Salama, 2019).

Foi no século XIX que a indústria de vidro científico se consolidou em cidades como Jena, na Alemanha, com a fundação da empresa Schott & Genossen em 1884, que se tornou referência mundial na fabricação desses vidros especiais. A produção em massa de vidros científicos começou, como as pipetas, Erlenmeyers,

béquers, estimulada por novidades tecnológicas e pela crescente demanda por instrumentos laboratoriais (Silva e Filgueiras, 2023).

2.3 COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MECÂNICA

A composição química do vidro é baseada majoritariamente no dióxido de silício (SiO_2), que compõe cerca de 70% da estrutura básica do material, podendo vir acompanhado de óxido de sódio (Na_2O) e óxido de cálcio (CaO), sendo este último representando 10% da massa total (Lee et al., 2023). O Na_2O reduz a temperatura de fusão e com isso aumenta a solubilidade do vidro em água, por isso o CaO é introduzido para melhorar a resistência química (Lee et al., 2023). Atualmente, o vidro continua a ter um papel fundamental em diversas áreas como na óptica, na ciência dos materiais, nos utensílios domésticos, na construção civil e na indústria automotiva (Ravinder et al., 2021). Seu contínuo estudo e desenvolvimento são primordiais para atender às solicitações tecnológicas e ambientais da sociedade moderna.

Segundo Mendonça (2020), o vidro possui uma densidade superficial de aproximadamente $2,5 \text{ kg/m}^2$, levando em conta sua espessura, e uma massa volumétrica de 2500 kg/m^3 . Ao se analisar sua dureza na Escala Mohs, vidros a base de soda-cal costumam atingir índices entre 5,4 e 5,8 e estes valores significam que representa um material impenetrável e com resistência comparável com a do aço, portanto essa característica é crucial para seu comportamento diante de esforços mecânicos (Mendonça, 2020). Além disso, estudos indicam que o vidro pode ser até 16 vezes mais resistente que o granito, o que favorece sua aplicação em projetos com elevada exigência estrutural, tais como fachadas esbeltas (Barros, 2010 *apud* Mendonça, 2020). Outro item importante é seu módulo de elasticidade, estimado em 70 GPa, valor próximo ao do concreto (65 GPa), o que indica boa capacidade de deformação elástica. O coeficiente de Poisson, adotado como 0,22, também reforça sua aplicabilidade em estruturas (Mendonça, 2020). No tocante à flexão, isso irá depender do tipo de vidro: no polido recozido, é de aproximadamente 40 MPa, enquanto no vidro temperado varia entre 120 e 200 MPa, de acordo com sua espessura e qualidade dos acabamentos (Mendonça, 2020). De acordo com o Manual do Vidro (2000, *apud* Mendonça, 2020), apesar dessas vantagens, o vidro não apresenta sinais prévios de ruptura, fraturando-se abruptamente ao atingir seu limite resistivo, o que torna seu dimensionamento um aspecto crítico no projeto.

Segundo o que diz Andrade (2021), a resistência à tração do vidro está entre 30 a 80 MPa, sendo estes os valores considerados na realidade, pois como há defeitos atuantes na superfície e como o vidro é considerado um material frágil, os dados teóricos não se aplicam. Quanto à resistência à compressão, o material atinge cerca de 900 MPa, o que é considerado como excelente nesse quesito (Andrade, 2021). Outro importante parâmetro é seu coeficiente de dilatação térmica, estimado em cerca de $9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, o que demonstra sua estabilidade dimensional quando submetido às variações de temperatura (Andrade, 2021).

No Brasil, as referências bibliográficas sobre o tema ainda não são abrangentes, mesmo sabendo que a produção e utilização do vidro no território nacional são grandes. Porém, entre as poucas publicações brasileiras, pode-se destacar a obra do professor Samuel Brag Maia, da UFRJ, que trata bastante dos aspectos como a história, composição, aplicação e fabricação (Silva e Filgueiras, 2021). A origem da produção vidreira no Brasil ainda não é totalmente afirmativa, mas sabe-se que há relações com às rotas do comércio marítimo que ocorreram no período colonial (Silva e Filgueiras, 2021). Nessa época, maioria dos vidros existente no país vinham de oficinas portuguesas, de cidades como Lisboa, Abrantes e Coimbra. Um episódio ocorrido entre 1637 a 1644 foi um diferencial nisso: Maurício de Nassau, durante a ocupação holandesa no Nordeste, trouxe especialistas em técnicas de produção de vidro, incluindo artesão que confeccionavam vidros planos para janelas e recipientes para as bebidas (Silva e Filgueiras, 2021).

Trazendo mais para os tempos atuais, a indústria vidreira cresceu e, em 2020, atingiu uma produção de 7530 toneladas diárias de vidro plano, com um faturamento em cerca de R\$ 4,5 bilhões (Silva e Filgueiras, 2021). Um levantamento das principais fábricas instaladas no Brasil desde 1810 mostra a atuação do setor em quatro grandes categorias: vidros planos, embalagens, utensílios domésticos e vidros para área científica (Silva e Filgueiras, 2021). Outro dado aponta que de 47 empresas mapeadas, apenas nove se dedicam ou se dedicaram à produção vidreira científica, o que significa uma baixa participação os vidros especiais na produção nacional (5,5% em 2011) (Silva e Filgueiras, 2021). Tal fato pode ser explicado por conta da falta de profissionais qualificados, que é resultado da falta de centros de formação em hialotecnia no país (Silva e Filgueiras, 2021).

2.4 NORMAS TÉCNICAS

Segundo Mendonça (2020), no Brasil, ainda não há normas técnicas que tratem o vidro como um elemento estrutural, especificamente. Os projetos ainda se baseiam em normas como a ABNT NBR 7199 e a ABNT NBR 11706, as quais abordam as aplicações de forma limitada, mas vale ressaltar que a indústria vidreira já tenha à disposição produtos com desempenho técnico adequado para aplicações estruturais (Mendonça, 2020).

Para criação de projetos estruturais mais seguros e com maiores detalhes, será preciso recorrer as normas internacionais, sendo a *International Organization for Standardization* (ISO) uma das mais consultadas, pois esta procura fazer a padronização entre os países (Mendonça, 2020). Entretanto, como muitos desses membros da ISO também não tem normas específicas sobre essas estruturas vítreas à disposição, os critérios estabelecidos acabam ficando restritos (Mendonça, 2020). Dessa forma, os projetistas utilizam as normas estrangeiras com mais frequência, como a DIN (Alemanha), a NEMA (EUA) e a JISC (Japão), ou mesmo regionais, que têm origem de blocos econômicos ou acordos comerciais (Mendonça, 2020).

2.5 TIPOS DE VIDRO

Os dois tipos mais conhecidos de vidro são os temperados e os laminados. O primeiro é muito utilizado na área civil e em até aparelhos eletrodomésticos e possuem uma alta resistência ao impacto e é muito recomendável para locais de alto tráfego, segundo o site da empresa TBK Metal (2025). O processo de têmpera é o principal responsável pelo aumento dessas resistências, mas deve-se levar em consideração a composição química do material que é fundamental para garantir sua eficiência.

O vidro temperado possui em sua composição elementos como areia, cálcio, sódio, alumina, potássio e magnésio e é produzido partindo-se de uma versão chamada de cristal, proveniente de um vidro comum (Metalúrgica Amaral, 2022). Esses compostos formam uma base química que permite se obter vidros com alta resistência, além de outros tipos. No processo de têmpera, as placas são aquecidas a elevadas temperaturas, de cerca de 600°C, e em seguida sofrem um resfriamento súbito, provocando compressão nas superfícies externas e expansão interna (Metalúrgica Amaral, 2022). Essa transformação na estrutura fornece uma resistência mecânica de até cinco vezes maior que a do vidro comum. Existe também a têmpera

química que utiliza o método da troca iônica, onde o vidro é imerso em um banho de nitrato de potássio (KNO_3) derretido, concedendo a substituição de íons de sódio por íons de potássio na superfície do material, de acordo com Yanik, Arslan e Sireli (2024). Essa troca iônica gera uma camada superficial mais densa e resistente. A verdade é que, quaisquer que sejam os métodos utilizados, o vidro temperado é classificado como vidro de segurança conforme a ABNT (Metalúrgica Amaral, 2022).

Entende-se que o processo de têmpera térmica altera a estrutura física do vidro e não modifica seus compostos químicos e o fornece uma característica peculiar na sua maneira de quebrar. Diferente do vidro comum, o temperado se fragmenta em pedaços menores, não em cacos grandes que podem causar ferimentos mais graves quando entra em contato com a pele humana. Tem-se o exemplo da Figura 1.

Figura 1 – Quebra do vidro temperado



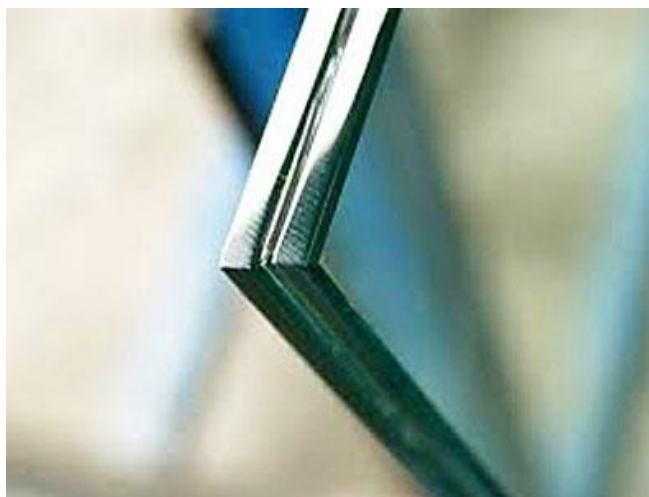
Fonte: Vidro Novo (20--)

Talvez a maior vantagem desse vidro é justamente o fato de sua quebra resultar em pequenos fragmentos arredondados que evitam lesões mais sérias. Este também suporta uma variação térmica de até $200^{\circ}C$, portanto é muito aplicado onde há um tráfego intenso de pessoas como portas, janelas, boxes de banheiros e fachadas (Divinal Vidros, 2022).

Já o vidro laminado é extensamente utilizado em inúmeras aplicações onde se exigem altos padrões de segurança, como em para-brisas de automóveis. Sendo assim, “o vidro laminado é composto por duas ou mais lâminas de vidro unidas por uma camada intermediária de material plástico, geralmente polivinil butiral (PVB)” (SILVA, 2017). Ainda de acordo com Silva (2017), a Figura 2 mostra as camadas de

filme plástico que vão no centro das lâminas unidas, são fixas por meio de calor e pressão, então dessa maneira, sua camada intermediária é capaz de reter os fragmentos após a quebra e, além de oferecer maior proteção aos usuários, se torna mais recomendável à aplicações estruturais.

Figura 2 – Vidro laminado mostrando camada central de PVB



Fonte: Digicom Glass Roof (2024)

A fabricação se realiza em cinco etapas: preparação das chapas de vidro, montagem do conjunto, pré-aquecimento, remoção de ar e passagem por autoclave (Silva, 2017). Na primeira parte, o vidro tem a forma de grandes lâminas retangulares que são cortadas, lavadas e secas, dessa forma remove-se toda impureza que comprometer a aderência da camada central (Silva, 2017). Posteriormente, o conjunto é colocado em um local limpo e coloca-se a camada de PVB. Na terceira fase, este é levado a uma estufa onde é sujeito a um aquecimento inicial, promovendo uma aderência preliminar entre o vidro e o PVB (Silva, 2017). Depois, faz-se o processo de calandragem para comprimir o laminado, retirando todo ar residual entre as camadas e garantindo uma união homogênea (Silva, 2017). Por último, o conjunto é colocado a altas pressões de 10 a 15 atmosferas, e temperaturas superiores a 100°C, por 4 a 7 horas (Silva, 2017). Esse processo propicia a completa fusão da camada intermediária com as lâminas de vidro, dando origem ao produto coeso e firme (Silva, 2017). A Figura 3 mostra um exemplo de fratura. Destaca-se como os pedaços são pequenos e como eles são presos pela camada central.

Figura 3 – Quebra do vidro laminado



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

2.6 CAMADA INTERMEDIÁRIA

O PVB é o tipo de película central mais comum e seu comportamento é mais sensível à temperatura e ao tempo de carregamento, por outro lado também destacam-se os inoplásticos como o *Sentry Glass*, representado na Figura 4, que apresentam maior resistência comparada ao PVB, portanto são mais recomendadas para lugares onde as exigências com seguranças são as maiores (Hänig et al. 2019).

Figura 4 – Comparação visual entre SGP e PVB



Fonte: Migoglass (2024)

Libos (2017) afirma que, embora o PVB seja o componente mais preferencialmente usado, este apresenta restrições por conta da sua sensibilidade à

temperatura e ao tempo de emprego das cargas. Somado a isso, apresenta um módulo de cisalhamento pequeno e, em alguns casos, levam os projetistas a desprezarem a interação entre as placas vítreas. Em comparação com o SGP, o PVB apresenta módulo de *Young* de 11 MPa contra 300 MPa, mostrando que o SGP precisaria de mais tensão para se deformar (Libos, 2017). Outros dados importantes são as tensões de tração (28,1 MPa do PVB; 34,5 MPa do SGP) e o coeficiente de dilatação térmica, que apresenta $41,2 \cdot 10^{-5}$ para o PVB e 10 a $15 \cdot 10^{-5}$ (Libos, 2017). Dessa maneira, mesmo que o SGP também sofra com algumas variações térmicas e de carregamento por se tratar de um material polímero, apresenta uma melhor performance e assim permite que o laminado se comporte de forma semelhante a uma peça onde não haja escorregamento ou movimento relativo entre as camadas, mesmo tendo um custo maior (Libos, 2017).

Ao se fazer um estudo de ação das cargas e deformações causadas quando se varia as membranas intermediárias, observa-se uma forte coesão entre as lâminas, quando se utiliza o SGP como intercalante (Libos, 2017). Isso resulta em deformações ainda menores do que previstas para as peças monolíticas. Libos (2017) ainda destaca que, com base em Benninson, Qin e Davies (2008), o uso do material inoplástico *Sentry Glass Plus* pode oferecer vantagens como economia de material, melhoria do desempenho estrutural e ampliação das possibilidades de design comparado ao PVB.

Segundo Peres (informação verbal, 2025), existem três espessuras da camada PVB comum. A primeira de 0,38 mm, a segunda de 0,76 mm e a última com 1,14 mm. É de se reparar que a terceira tem o dobro de tamanho que a segunda, portanto é quatro vezes maior que a primeira. Para o *Sentry Glass*, as dimensões são: 0,89 mm; 1,14 mm e 1,52 mm; sendo este também um dos motivos que fazem o SGP ser utilizado para uma ocasião que exija maior rigidez estrutural, ou até blindagem de automóveis, mesmo não sendo a intercamada mais comum para esses casos (Peres, informação verbal, 2025).

O comportamento mecânico desse material é extremamente dependente das propriedades da película intermediária (Fleckenstein et al., 2024). O tempo de carga aplicada e a temperatura incidida nele são fatores que influenciam diretamente na sua rigidez ao cisalhamento (Fleckenstein et al., 2024). Em condições normais, o chamado *interlayer* (camada média) promove a junção entre as placas de vidro e possibilita que o impacto recebido seja suportado e evita que os estilhaços se espalhem em caso de

ruptura. Contudo, tais individualidades tendem a se danificar através de elevadas temperaturas, diminuindo a precisão do laminado após a fratura (Fleckenstein et al., 2024).

Levando essa indagação à frente, uma solução possível para esse problema é a implementação de uma película multicamada composta por etileno-vinilacetato (EVA) com um núcleo rígido de poliéster modificado (MPE) (Fleckenstein et al., 2024). Os testes resultaram numa maior rigidez, menor dependência térmica e melhor desempenho em situações de impacto e pós quebra, para esse tipo de arranjo (Fleckenstein et al., 2024). A proposta procura atender aos pedidos por uma estrutura mais leve, ou seja, de espessuras mais finas, também sustentáveis, sempre respeitando os requisitos de segurança mesmo com essas espessuras menos robustas (Fleckenstein et al., 2024). Os ensaios experimentais tinham objetivo de saber qual era o grau de resistência ao impacto, fazer análises térmicas (DSC e DMTA) e testes de tração e cisalhamento (Fleckenstein et al., 2024). Ao inserir um filme de MPE entre as camadas de EVA, notou-se que houve maior capacidade de carga e firmeza, mesmo no pós-quebra, o que significa um importante avanço no desempenho dos laminados estruturais (Fleckenstein et al., 2024).

Os vidros estruturais também são materiais que exercem funções, principalmente na área civil, de vedação e participam ativamente da estabilidade das edificações. No que diz respeito a sua composição química, os vidros “borossilicatos”, como mostrados na Figura 5, apresentam uma rede molecular mais resistente e estável que os vidros comuns (Brandt-Slowik, 2023). Por conta dos chamados “óxidos formadores de rede”, como a sílica (SiO_2) e o óxido de boro (B_2O_3), estes culminam numa estrutura tridimensional mais unida e, segundo o estudo de Brandt-Slowik (2023), os testes resultaram numa maior resistência ao risco, térmica e química. Mas não significa que essa é uma regra para todos os vidros laminados.

Figura 5 – Exemplo de vidro borossilicato



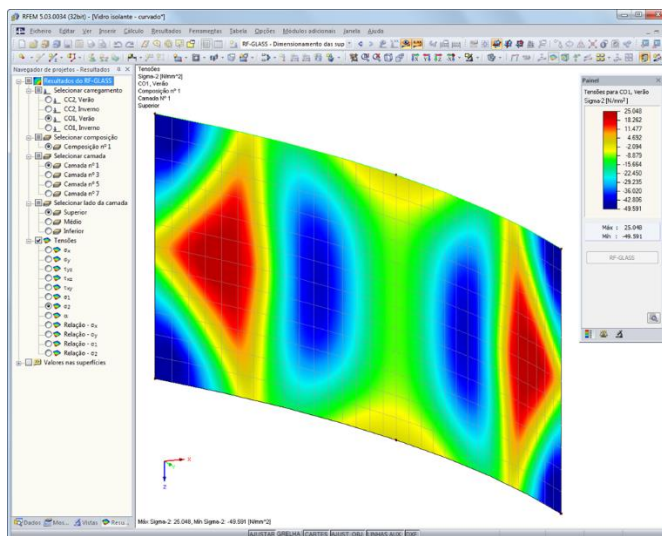
Fonte: Vilabo (2020)

No tocante às propriedades mecânicas desse material, pode-se afirmar que apresenta alta resistência à compressão e baixa resistência à tração, tornando-o limitado para aplicação em situações que há esforços de tração (Zemanová, Schmidt e Sejnoha, 2019). O que Libos (2017) ressalta é que a utilização dos vidros laminados, que apresentam várias folhas finas de vidro unidos por resinas como o PVB (polivinil butiral), aprimoram a performance do vidro em fachadas. Esse gênero em especial, apresenta maior firmeza ao choque em caso de quebra. O que ocorre nos vidros temperados é que, ao serem submetidos ao tratamento térmico, transformam-se num vidro mais resistente mecanicamente e mais termicamente estável, já que a têmpera objetiva induzir altas tensões compressivas nas superfícies, acompanhadas por tensões de tração em sua região central (Libos, 2017).

2.7 SOFTWARES DE SIMULAÇÃO

As aplicações dos vidros estruturais na engenharia mecânica representam uma fronteira inovadora, uma vez que demanda amplo conhecimento técnico e o uso de ferramentas computacionais progressistas que asseguram a viabilidade e a segurança dos projetos. Nesses termos, Libos (2017) destaca que a utilização de softwares especializados, como mostrado na Figura 6, o RFEM 5 e seu módulo RF-GLASS, acata a execução de análises estruturais que consideram as tensões internas nos painéis de vidro e as deformações, promovendo a metodologia de projeto e certificando a segurança das estruturas. Dessa forma, os desafios de empregos desses vidros englobam a necessidade de cálculos precisos capazes de sustentar variações térmicas e cargas dinâmicas, como impacto e vento (Libos, 2017).

Figura 6 – Software RFEM 5 com módulo RF-GLASS



Fonte: Dlubal (2024)

2.8 APLICAÇÕES DO VIDRO EM ESTRUTURAS

Os vidros estão sendo bastante utilizados na arquitetura contemporânea, tanto que “o uso do vidro como material estrutural dentro dos edifícios, tem-se tornado bastante comum nos últimos 25 anos” (O’Regan *apud* Silva, 2017, p.17). De posse dessa informação, “o vidro laminado de segurança é um componente essencial das fachadas modernas quando se exigem requisitos de segurança mais elevados” (FLECKENSTEIN et al., 2024, n.p., parágrafo 1, tradução nossa). A Figura 7 representa o vidro estrutural talvez sendo submetido ao maior esforço. Nota-se que, diferentemente das aplicações de cargas com ele na vertical, agora mais esforços são realizados, uma vez que está sendo utilizado como piso e está sob os efeitos térmicos e eólicos.

Figura 7 – Sampa Sky



Fonte: Abravidro (2022)

No Brasil, o reconhecimento do vidro na arquitetura moderna está em ascensão e isto se dá não apenas pela estética futurista que proporciona, mas

também pelas qualidades que oferece comparado a outros materiais mais tradicionais, como madeira e alvenaria (Martino, 2023). A Figura 8 mostra um exemplo de aplicação.

Atualmente, o vidro plano compõe uma importante classe de materiais utilizados em diferentes segmentos. Estima-se que cerca de 70% da produção total de vidros é usada na construção civil no Brasil, principalmente em novos edifícios ou renovação de fachadas (ABIVIDRO, 2020, p.11).

Figura 8 – Aplicação do vidro na construção civil



Fonte: Canal doserralheiro (2021)

Mendonça (2020) discorre sobre variados conjuntos de fachadas de vidro estrutural, tendo cada uma delas suas aplicações próprias e características específicas. Segundo ele, “as mais utilizadas no Brasil são as fachadas com grid, fachadas do tipo *spider*, fachadas com *stick* e fachadas do tipo unitizado” (Mendonça, 2020, p. 22). A fachada Grid, ou fachada de cortina, apresenta perfis visíveis de alumínio em linhas verticais e horizontais (Mendonça, 2020). É recomendada para ambientes térreos e pequenos estabelecimentos e sua instalação é feita com estrutura de alumínio ancorada na edificação, com vidros presos externamente, exigindo o uso de balcanins, uma vez que é montada pelo lado de fora (Mendonça, 2020). A fachada *Spider*, amplamente usada em lobbies, permite a fixação dos vidros por meio de ferragens articuladas exteriormente, o que lembra exatamente pernas de aranha (Mendonça, 2020). A fixação é feita pontualmente por furos, o que demanda uma estrutura robusta. A vedação ocorre entre as peças de vidro e é de grande importância assegurar que estejam alinhados para assim evitar possíveis quebras ou outras avarias (Mendonça, 2020).

A fachada *Stick*, ou pele de vidro, é mais geral, sendo utilizada para obras de todos os tamanhos (Mendonça, 2020). Os vidros são unidos nos perfis de alumínio, escondendo a estrutura e tentando evitar ao máximo que os aparelhos metálicos apareçam (Mendonça, 2020). A instalação requer o encaixe dos quadros

independentes fixados nas colunas e vigas de concreto, fazendo o uso de silicone para a vedação (Mendonça, 2020). Assim como a fachada *Girds*, essa também precisa que se utilize balcanins devido a sua montagem ser externa. Já o perfil chamado de Unitizado é indicado para grandes construções e projetos onde as formas não são tão usuais (Mendonça, 2020). Os módulos complexos, compostos por colunas, travessas e vidros colados com silicone estrutural ou fita adesiva especial, são montados previamente num ambiente monitorado (Mendonça, 2020). Os módulos são guindados e encaixados verticalmente na estrutura, o que permite agilidade na montagem e maior liberdade de formas arquitetônicas (Mendonça, 2020).

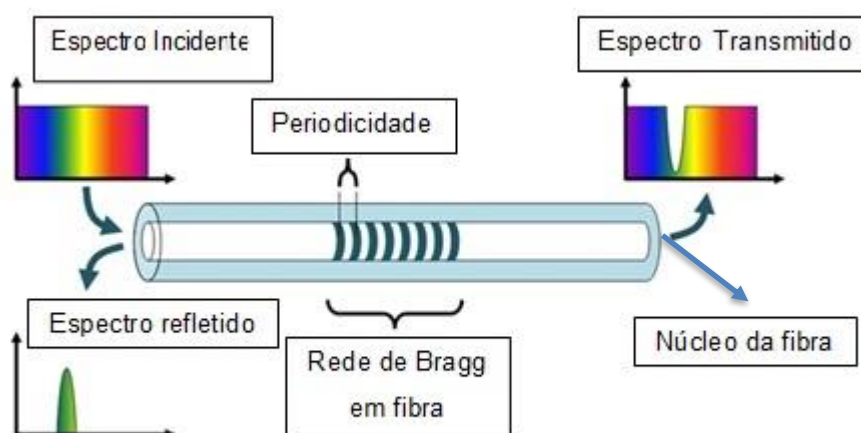
2.9 USO DOS SENSORES E INTERROGADOR

Para se fazer a análise estrutural, é preciso ter em posse alguns elementos medidores de deformações, como os *strain gauges* que, através da deformação de um corpo, permitem calcular uma força externa agindo sobre ele. Segundo Malerba, Guarnieri e Barros (2008), esses dispositivos são compostos por uma resistência elétrica fina, colocada sobre uma base isolante e fixada ao corpo de prova, de maneira que se deformem proporcionalmente à estrutura em questão. A temperatura pode ser um fator que atrapalhe nas medições, uma vez que pode alterar a resistividade e provocar dilatação térmica da peça analisada, gerando assim sinais inexistentes (Malerba, Guarnieri e Barros, 2008). Para corrigir isso, faz-se o uso de um segundo *strain gauge* numa região escondida e uma configuração em ponte de *Wheatstone*, que além de ajustar as falhas anteriores, pode aumentar a sensibilidade e a qualidade do sinal medido (Malerba, Guarnieri e Barros, 2008). Em contraponto, existem os sensores de fibra ótica que foram utilizados nesse trabalho.

De acordo com Pereira (2016), a descoberta da sensibilidade à luz em fibra óticas ocorreu ainda no século XX, em 1978, por pesquisadores liderados por Kenneth O. Hill, no Canadá, e foi o pioneiro para o progresso da tecnologia de sensores baseados nas redes de Bragg. Nos estudos, foi observado que, quando se expôs as fibras de sílica dopadas com germânio à luz de um laser de argônio, ocorria um aumento da luz refletida em decorrência da alteração permanente do índice de refração no núcleo fibroso (Pereira, 2016). Essa modulação periódica atua como um sistema de refletores internos que acopla os modos de propagação da luz, dando assim origem aos dispositivos conhecidos como redes de Hill, inicialmente (Pereira, 2016). A Figura 9 representa o funcionamento simplificado dos sensores FBG (*Fiber*

Bragg Grating). Nota-se que quando o raio laser passa pela fibra, apenas uma luz específica é refletida, conseqüentemente esse comprimento de onda refletido é chamado de Bragg e “quando o FBG está sujeito a tensão mecânica externa, o espectro da faixa de comprimento de onda refletida muda, o que significa que a tensão mecânica na fibra pode ser medida e interpretada.” (ATGRATING, 2022, parágrafo 15).

Figura 9 – Funcionamento simplificado do FBG



Fonte: Atgrating (2022)

Não significa dizer que estes sensores somente trabalham sozinhos, por isso essa tecnologia traz um grande benefício que é a chamada “multiplexagem” (HBM, 2025). Diversos sensores FBG podem ser alocados em uma única fibra ótica, separados por praticamente qualquer distância, segundo a HBM (2025). Essa aglomeração de sensores oferece uma perda irrelevante, sem mistura de sinais, mas para isso é importante que haja uma banda espectral necessária do espectro de luz seja exclusivo para cada um (HBM, 2025). Uma vez revestidos adequadamente, cada um desses pequenos arranjos, podem obter características multifuncionais, uma vez que estes podem se tornar sensíveis a outros fatores como por exemplo deslocamento, aceleração e pressão (HBM, 2025).

Conforme explica Pereira (2016), em 1981, Lam e Garside provaram que a fotossensibilidade identificada por Hill estava associada à absorção de dois fótons do laser de argônio com comprimento de onda de 488 nm, o que levou a adoção da luz ultravioleta a 244 nm para uma mudança mais precisa do índice de refração. Mais

tarde, em 1993, foi proposta uma técnica de gravação de redes de Bragg utilizando um padrão de interferência gerado por uma máscara de fase. Essa abordagem apresenta como principais vantagens a estabilidade do padrão e a facilidade de alinhamento, o que favorece a reprodução das redes, embora o período gravado dependa do período da máscara utilizada (Pereira, 2016). O funcionamento desses sensores ópticos se dá pela reflexão de uma faixa estreita de comprimento de onda, cuja posição varia de acordo com as mudanças físicas do ambiente, como temperatura e deformações (Pereira, 2016). Essas variações interferem tanto no índice de refração quanto no espaçamento das redes na fibra, e conseqüentemente, vão alterar o resultado do comprimento de onda (Pereira, 2016). Mesmo assim, a medição da temperatura e da deformação podem ser realizadas, justamente tirando proveito dessas mudanças, mas será preciso isolar os efeitos térmicos quando se quer obter deformações mais exatas (Pereira, 2016). Para isso, pode-se utilizar sensores que combinem esses dois parâmetros, o que vai compensar os efeitos térmicos sobre o sinal óptico (Pereira, 2016).

2.10 EQUAÇÕES PRINCIPAIS

O comprimento de onda Bragg (λ_B) depende do índice de refração do núcleo (n_{ef}) e pelo período da microestrutura (Λ), dando origem à equação (1):

$$\lambda_B = 2n_{ef} \Lambda \quad (1)$$

Como dito anteriormente, os sensores FBG possuem sensibilidades tanto térmicas quanto mecânicas. De acordo com a HBM (2025), a partir do momento em que uma fibra é esticada ou comprimida, o sensor irá medir a deformação. Esse fenômeno é possível pois, quando deformada, a fibra óptica causa uma alteração no período da microestrutura, no índice de refração e do comprimento de onda de Bragg. Quase se observa os mesmos efeitos quando se analisa a sensibilidade às temperaturas: a variação do índice de refração da sílica também causa uma mudança no comprimento de onda de Bragg, já o período da microestrutura é afetado por conta da expansão térmica, porém, uma vez sabendo que o coeficiente de expansão térmica da sílica é baixo, torna este efeito pouco significativo.

A equação (2) mostra o quanto o sensor pode ser susceptível à deformação e pode ser obtida através da alternância do comprimento de onda:

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = \frac{\Delta(n_{ef} \Lambda)}{n_{ef} \Lambda} = \left(1 + \frac{1}{n_{ef}} \frac{\Delta(\partial n_{ef})}{\partial \varepsilon} \Delta \varepsilon\right) = (1 + \rho_e) \Delta \varepsilon = \beta_\varepsilon \Delta \varepsilon \quad (2)$$

O termo β_ε corresponde a sensibilidade à deformação do sensor, (ρ_e) constante fotoelástica (*photoelastic constant*), é uma variação do índice de refração com a tensão axial. O parâmetro (ρ_e) para a fibra ótica é aproximadamente -0,212, em outras palavras, implica que a sensibilidade à deformação do sensor FBG, dando origem à equação (3):

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\Delta \varepsilon} = \beta_\varepsilon \lambda_B = 0.788 \lambda_B \quad (3)$$

Por outro lado, pode-se determinar a influência da temperatura ao se fazer a derivada da expressão do comprimento de onda, como está mostrado na equação (4):

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\Delta T} = \frac{\Delta(n_{ef} \Lambda)}{n_{ef} \Lambda} = \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\Delta \Lambda}{\Delta T} + \frac{1}{n_{ef}} \frac{\Delta n_{ef}}{\Delta T}\right) \Delta T = (\alpha + \zeta) \Delta T = \beta_T \Delta T \quad (4)$$

O termo β_T refere-se à sensibilidade térmica do sensor, (α) ao coeficiente de expansão térmica da fibra, (ζ) ao coeficiente termo-ótico, então há uma dependência do índice de refração na temperatura. Pode-se assumir que estes valores são constantes para uma vasta faixa de temperatura em questão e assim, garantem uma aproximação da sensibilidade à temperatura.

$$\alpha = 0.55 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

$$\zeta = 5.77 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

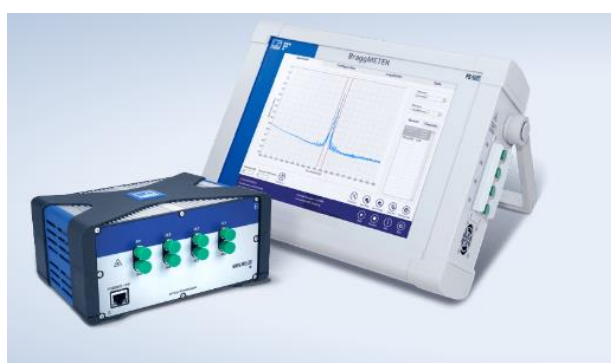
2.11 INSTALAÇÃO DO STRAIN GAUGE

Quando se trata de a instalação adequada do *strain gauge* sobre superfícies de vidro, deve-se ter em mente os altos cuidados que esse procedimento exige. Primeiro de tudo tem que ser levado em conta que o vidro é um material sensível a concentração de tensões, o que delimita consideravelmente a abrasão mecânica direta (Achintha, 2022). Dessa forma, o processo deve começar com uma limpeza minuciosa da parte superior usando produtos como o CSM-3, aplicado com esponjas de gaze, com o objetivo de remover óleos e contaminantes (canal

Micro-Measurements – a VPG Brand, 2018). Posteriormente, aplica-se o condicionador A (ácido fosfato), que atua na preparação química da superfície (canal Micro-Measurements – a VPG Brand, 2018). O neutralizador 5A é então utilizado para ajustar o pH, criando uma base ideal para a aderência do adesivo cianocrilato (Embon 200), que requer uma face neutra ou ligeiramente básica. Feito este preparo, o sensor é cuidadosamente posicionado com ajuda de uma fita (PCT-2M) e o catalisador C é aplicado com cautela evitando o excesso, uma vez que pode comprometer a adesão. A cura do adesivo é realizada pressionando manualmente e posterior inspeção visual da uniformidade da colagem. Por último, os terminais do sensor são soldados rapidamente para amenizar os efeitos da transferência de calor, e os resíduos de fluxo são removidos com solvente, garantindo a estabilidade do sistema de medição, segundo *Micro-Measurements-VPG* (2018).

Pereira (2016) descreve que a leitura das variações do comprimento de onda em sensores FBG demanda o uso de equipamentos especializados, como o interrogador óptico e o analisador de espectro óptico (OSA), como mostra a Figura 10. Este é de uso mais abrangente e é utilizado para monitorar a potência em diversos comprimentos de onda baseando-se na multiplexação espectral, enquanto os interrogatórios ópticos são dispositivos projetados com a finalidade de leitura de sensores baseados exatamente em redes de Bragg (Pereira, 2016). Esses instrumentos enviam um sinal óptico através da fibra, recebem o sinal refletido e analisam a posição do pico de comprimento de onda, comparando-o com o sinal de referência. Em aplicações com diversos sensores na mesma fibra, utiliza-se a multiplexação no tempo (TDM) para identificar corretamente a origem de cada sinal refletido (Pereira, 2016).

Figura 10 – Interrogador óptico



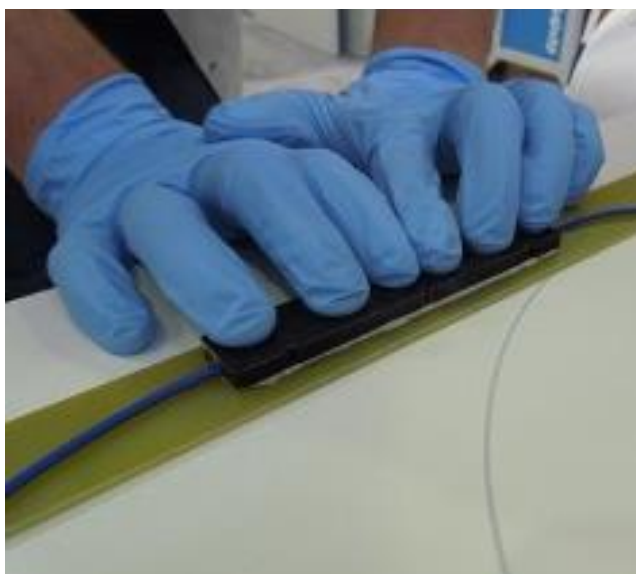
Fonte: HBM (2025)

O Método dos Elementos Finitos pode ser uma boa alternativa para simular o comportamento estrutural das placas de vidro laminado quando estão sob os efeitos de cargas concentradas. No estudo feito por Liu et al. (2020), a modelagem identificou regiões críticas de deformação, fazendo com que a instalação dos sensores FBG fosse certa. Essa concordância ratificou a eficácia da conduta numérica como suporte a inspeção estrutural do vidro de maneira praticamente síncrona. Segundo o site ANSYS (2023), este não possui um módulo específico dedicado exclusivamente ao estudo de vidros estruturais, porém oferece ótimas ferramentas que possibilitam analisar e modelar esforços solicitados ao vidro. O modelo material MAT_GLASS (MAT_280) dentro do LS-DYNA, permite simular características como variação de resistência ao longo da espessura, fratura frágil e dependência à taxa de deformação (Wilking, Graf e Haufe, 2023).

3 MATERIAIS E MÉTODO

Antes de todo o processo, deve-se levar em conta que os sensores FBG são muito sensíveis em relação à temperatura e deformações. Para este trabalho, foi feito um pré teste numa superfície conhecida: uma barra de alumínio serviu de base experimental. Desse modo, para contornar essas dificuldades, algumas estratégias como utilizar outro sensor somente para temperatura ou posicionar *dummy sensor*, são maneiras de fazer uma compensação térmica ou mecânica. Deve-se verificar o comprimento de onda de referência (λ_0) de cada sensor, conforme informado pelo fabricante, e registrá-lo no software de aquisição. Portanto, a instalação exige bastante atenção detalhada na forma de posicionar os sensores, considerando o tipo de superfície e as condições ambientais do local de aplicação. A Figura 11 mostra que esse procedimento objetiva garantir que o sensor esteja fixo de maneira consistente na estrutura em estudo, de modo que toda deformação mecânica seja transferida inteiramente ao núcleo da fibra ótica, sem quaisquer perdas.

Figura 11 – Instalação do sensor



Fonte: HBM (2025)

Segundo HBM (2025), existem alguns métodos de colocação dos aparelhos, sendo a colagem direta com adesivo epóxi o meio mais comum. Para uma boa fixação, antes é preciso garantir que a superfície esteja livre de contaminantes, como poeira, e que esteja seca e limpa. Para isso, se faz uso de álcool isopropílico ou acetona, seguida de um lixamento brando da área para aumentar a aderência. Dessa

maneira, o sensor pode ser colado com uma camada fina de adesivo de alta performance, como o HBM X280, resistente à umidade. A temperatura e o período de cura do adesivo devem ser respeitados seguindo rigorosamente as recomendações do fabricante, assim se previne tensões residuais na fibra.

A soldagem a ponto é outro método onde sensores envoltos em aço inoxidável, como os modelos HBM FS62 e FS63, são fixos por soldagem direta à estrutura metálica, sempre tendo o cuidado de controlar o calor para impedir danos à fibra ótica. Esse processo garante excelente acoplamento mecânico e resistência a variações térmicas, sendo o mais indicado para solicitações de longo prazo em estruturas industriais e equipamentos metálicos.

Em alguns casos, utiliza-se colagem por parafusos, grampos ou suportes especialmente projetados. Essa técnica é recomendada para medições sazonais ou quando não se deseja alterar permanentemente a estrutura monitorada. Apesar de fácil, a fixação mecânica pode introduzir pequenas folgas, sendo necessário um ajuste adequado de torque e apoio.

O último recurso citado é chamado de incorporação ou embutimento. Caso se deseje realizar o monitoramento interno de tensões, deformações e variações térmicas em regiões inacessíveis após a efetivação da estrutura, os sensores FBG podem ser introduzidos durante a fabricação ou cura de materiais como concreto, compósitos e laminados. O envolvimento da fibra deve ser robusto o suficiente para suportar as pressões internas e aos esforços de tração durante o processo de moldagem.

Qualquer que seja a metodologia empregada, deve-se sempre ter cautela para que a fibra ótica permaneça sem dobras acentuadas, protegida contra abrasão, impactos e agentes químicos, e que seja presa com calma, através de fitas adesivas de baixa aderência. O trajeto do cabo até o interrogador ótico também deve estar devidamente protegido de interferências mecânicas, evitando assim compressões que possam atrapalhar as medições.

3.1 PRECAUÇÕES DURANTE A INSTALAÇÃO

De posse do comprimento de onda de referência (λ_0) de cada sensor, esse parâmetro irá servir para o cálculo da deformação e para a compensação de temperatura.

Durante a colagem, deve-se evitar a formação de bolhas de ar entre o sensor e a superfície, uma vez que isso compromete a transmissão da deformação. Após a fixação, é desejável fazer uma proteção extra, como uso de tubos termorretráteis, resina epóxi ou canaletas protetoras, principalmente em ambientes externos ou industriais. Já os cabos ópticos, necessitam ser roteados de maneira a minimizar vibrações e choques. Recomenda-se colocá-los em curvas suaves e prendê-los de forma espaçada, com alívio de tensão próximo às conexões. Além disso, a limpeza das interfaces ópticas é crucial para garantir a menor perda de sinal possível.

3.2 CORREÇÕES DAS SENSIBILIDADES

Quanto à temperatura, a HBM apresenta diversas soluções como a utilização de um segundo sensor FBG próximo ao que está medindo a deformação, porém sem este estar diretamente atuante na estrutura, e assim, ao sofrer a mesma variação térmica, sua leitura irá servir para subtrair o efeito da temperatura da medição total. Um sensor “*dummy*” é aparelho idêntico, sem carga mecânica e é fixado ao mesmo material. Dessa forma, a diferença entre os sensores fornece a deformação real, eliminando o componente térmico. Outra opção, é fazer uso daqueles que possuem projeto mecânico que compensa automaticamente a expansão térmica, chamados sensores atermais. Por último, o efeito térmico pode ser corrigido por equações que relacionam o deslocamento de comprimento de onda ($\Delta\lambda$) com o coeficiente de expansão térmica (α) e o coeficiente termo-óptico (ξ) da fibra. Assim, é possível calcular, de maneira analítica, o componente térmico e removê-lo das leituras experimentais.

3.3 INTERROGADORES

Os interrogadores, representados na Figura 12, são os dispositivos responsáveis por emitirem a luz de amplo espectro por meio da fibra ótica, dessa forma cada sensor FBG reflete um comprimento de onda específico que é identificado. Com isso, é possível descobrir o pico de reflexão e a partir da posição deste, calcula-se a variação da temperatura ou a deformação. A HBM oferece interrogadores que contém o *Smart Peak Detection* (SPD), que usam algoritmos de detecção inteligente e aumentam a eficácia da leitura, mesmo em redes com muitos sensores. Já os HBM *FiberSensing* utilizam tecnologia de varredura espectral (*wavelength scanning*).

Figura 12 - Interrogador HBM FS22



Fonte: HBM (2025)

3.4 CALIBRAÇÃO

Após a instalação, faz-se uma espécie de *reset* das leituras com base no comprimento de onda de Bragg inicial (λ_0). Esse valor é o ponto de referência para todos os deslocamentos futuros. O interrogador óptico detecta, em tempo real, as variações de λ e as converte em deformação ou temperatura conforme os parâmetros de calibração do sensor. Os interrogadores da HBM já são calibrados em fábrica e não exigem calibração constante. O sistema óptico é estável a longo prazo, e a calibração do sensor é mantida por meio dos valores de referência do comprimento de onda de Bragg. Todavia, nunca será desnecessário realizar testes com sensores padrão regularmente para verificações de referência, principalmente quando se trata de medições de alta precisão.

Os softwares *BraggMONITOR* e *catman®* da HBM permitem configurar, visualizar e gravar os espectros de reflexão, além de monitorar múltiplos sensores simultaneamente. A linearidade da resposta óptica, juntamente com a estabilidade do sistema, oferece um resultado exato, mesmo após anos de operação.

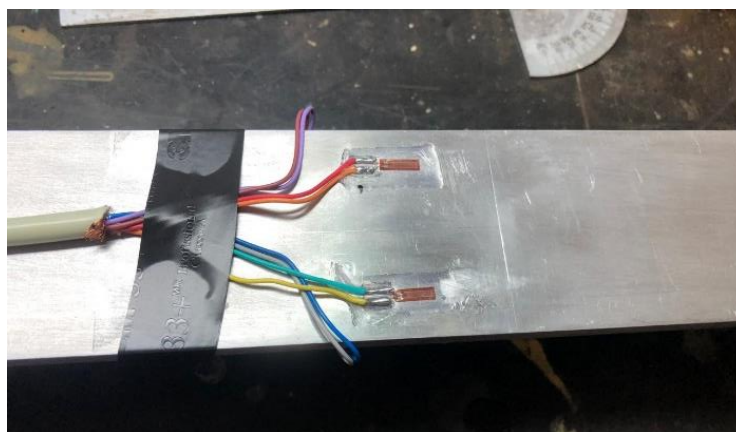
4 ESTUDO DE CASO: INSTRUMENTAÇÃO COM SENSORES FBG

Neste capítulo foi abordado um estudo de caso no qual utilizou-se o sensor tipo FS62PSS numa barra de alumínio. Destacou-se todo o procedimento de instalação do aparelho e de seus auxiliares, bem como um sensor de temperatura e uma roseta. A grande vantagem de todo esse procedimento é que pode ser feito exatamente igual para o estudo de vidros.

4.1 SENSOR DE DEFORMAÇÃO

A parte prática do projeto consistiu na fixação correta do sensor, o que significa, inicialmente, demandou uma área lisa e o mais livre possível de quaisquer sujeiras. Seguindo as recomendações do manual da HBM, a superfície foi devidamente preparada, sendo utilizado álcool isopropílico e algodão. Logo após, fez-se a secagem total para não deixar o mínimo de álcool, assim como representado na Figura 13.

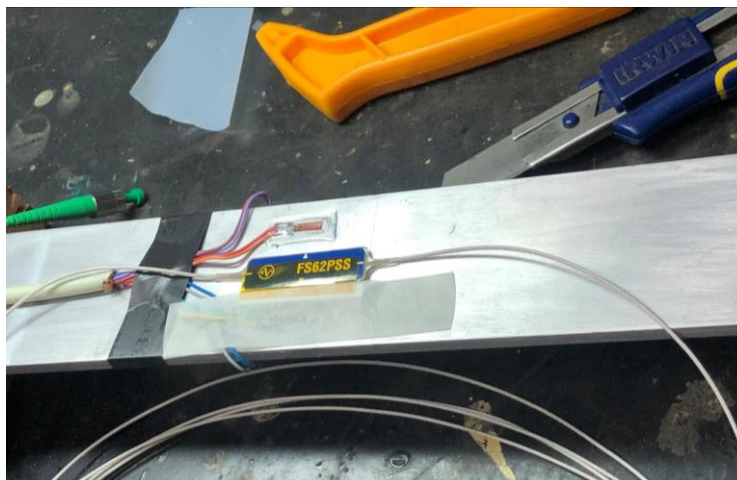
Figura 13 – Área limpa da barra



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Uma marcação cruzada foi feita para que o sensor fosse posicionado rigorosamente no centro, tanto na horizontal quanto na vertical, da barra analisada. Dessa maneira, utilizou-se uma fita para prender o sensor antes de sua colagem, como mostra a Figura 14.

Figura 14 – Fixação parcial



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A fita branca na parte inferior serve como uma dobradiça onde o sensor foi dobrado como uma porta e assim, aplicou-se três gotas de cola CA80. Uma outra fita foi posta paralelamente à primeira e, posteriormente, fez-se uma força uniforme durante um minuto para que a colagem fosse feita de maneira mais uniforme possível. Passados cerca de dez minutos, retirou-se quaisquer resíduos de fita ou cola restante.

A roseta FS62PSR Patch Strain Rosette, representada pela Figura 15, também foi instalada seguindo praticamente os cuidados do sensor, ou seja, superfície extremamente limpa e regular e contou com o auxílio da marcação em cruz. Este equipamento, por meio da combinação de várias medições em diferentes direções, pôde calcular as principais componentes de deformação e tensão.

Figura 15 – Roseta FS62PSR



Fonte: Manual HBM (2025)

Esta roseta possui 3 sensores FBG dispostos em 0° , 60° e 120° , sendo o alinhamento de cada um indicado pelas letras “a”, “b” e “c”. Posicionou-se o aparelho tomando como referência a letra “a” e utilizou-se as marcas brancas de alinhamento horizontal que estão presentes na etiqueta do sensor para amparar nesse posicionamento e então, acertou-se a posição vertical tendo como base a seta de direção “a” e a intersecção das marcações de “b” e “c”.

Após essa etapa, iniciou-se o processo de colagem colocando, no princípio, fitas adesivas nas bordas da roseta para que evite que o excesso de cola escape. Igualmente como foi feito no sensor, a roseta foi virada como uma portinhola e foram aplicadas 6 gotas em formato de triângulo. Em seguida, pressionou-se o utensílio, de maneira uniforme, durante um minuto e aguardou-se mais dez minutos para secagem total. As fitas auxiliares foram removidas com cuidado e os resíduos restantes foram todos removidos.

4.2 SENSOR DE TEMPERATURA

Para que a influência da temperatura seja compensada nas leituras, fez-se o uso do sensor FS63RTS, como mostra a Figura 16. Neste caso, como este sensor não foi embutido, as recomendações de preparação da área foram praticamente as mesmas listadas anteriores no quesito de ter uma superfície mais plana e regular possível.

Figura 16 – Sensor de Temperatura FS63RTS



Fonte: Manual HBM (2025)

Uma vez que este sensor foi utilizado em conjunto com outros de superfície, foi recomendado instalá-lo fixo à parede, através do auxílio de abraçadeiras de cabo. Diferentemente do sensor de deformação, este permite o uso de uma simples fita colante, o que o torna reutilizável. Outra vantagem é ter uma espécie de casca protetora que envolve de maneira cilíndrica todo o arranjo, oferecendo maior durabilidade. Para o roteamento dos cabos, o processo foi feito para assegurar que nenhum deles ficasse solto e que as curvaturas fossem mantidas respeitando os limites permitidos, para isso, utilizou-se fitas adesivas resistentes.

5 CONCLUSÕES

5.1 VERIFICAÇÃO DOS OBJETIVOS

O presente trabalho evidenciou, de forma teórica e prática, a importância dos sensores FBG em termos de análise estrutural em vidros, um campo que vem crescendo, de modo geral, dentro da engenharia atual. A partir dos estudos discutidos, compreendeu-se conceitos desde a fundamentação conceitual do vidro como material estrutural até a instrumentação detalhada dos sensores ópticos, demonstrando um caráter inovador.

Verificou-se que o vidro possui características mecânicas que o qualificam como um material de relevância estrutural, especialmente quando aliado a sistemas de monitoramento inteligente, além de suas propriedades estéticas e capacidade de reciclagem total. O estudo também mostrou a evolução histórica do vidro, seus tipos, normas técnicas e a influência das camadas intermediárias — como o PVB — na resistência e durabilidade das estruturas. O uso de softwares de simulação, como o ANSYS com o modelo MAT_GLASS, reforçou a importância das ferramentas computacionais na análise de comportamento sob carga, impactando diretamente na segurança dos projetos.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A instrumentação com sensores FBG mostrou-se uma alternativa precisa e versátil para a medição de deformações e variações térmicas. O estudo de caso realizado com o sensor FS62PSS e o sensor de temperatura FS63RTS consolidou o entendimento do funcionamento e da calibração desses dispositivos, evidenciando a simplicidade do processo de instalação e a alta estabilidade de leitura. A comparação entre a aplicação em alumínio e a projeção para vidros estruturais comprovou que o método é totalmente adaptável e promissor para ensaios futuros. De modo geral, a junção entre um material tradicional e uma tecnologia óptica de ponta abre caminho para edificações mais seguras, sustentáveis e inteligentes, nas quais o controle de deformações, tensões e temperaturas poderá ser realizado de maneira contínua e não invasiva. Por fim, espera-se que este estudo sirva de base para novas pesquisas e aplicações práticas, principalmente dentro do ambiente acadêmico, onde há amplo potencial para o aprimoramento experimental. A incorporação dos sensores FBG em estruturas de vidro não apenas amplia o horizonte tecnológico das engenharias, como também contribui para a construção de um futuro sustentável.

REFERÊNCIAS

- ABRAVIDRO. **Sampa sky receberá dois novos decks de vidro**. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://abridayro.org.br/punoticias/sampa-sky-recebera-dois-novos-decks-de-vidro/>. Acesso em: 25 maio 2025.
- ACHINTHA, M. A. Novel technique for enhancing stress concentration features in glass. *In: CHALLENGING GLASS CONFERENCE PROCEEDINGS*, 8., 2022, Ghent. **Proceedings** [...] Ghent: Ghent University, 2022. Disponível em: <https://proceedings.challengingglass.com/index.php/cgc/article/view/365>. Acesso em: 20 nov. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7199**: Vidros na construção civil – Projeto, execução e aplicações. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ALHUSSEIN, A. N. D. *et al.* Fiber Bragg grating sensors: design, applications, and comparison with other sensing technologies. **Sensors**, Basel, v. 25, n. 7, p. 2289, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/7/2289>. Acesso em: 18 abr. 2025.
- ANDRADE, J. **Projeto de Estruturas em Vidro**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade da Madeira, Funchal, Portugal, 2021. Disponível em: https://digituma.uma.pt/bitstream/10400.13/3981/1/Projeto%20de%20Estruturas%20em%20Vidro_Joana%20Andrade.pdf. Acesso em: 12 out. 2025.
- ANSYS. **Windshield glass roof material modeling**. Canonsburg, 2023. Disponível em: <https://innovationspace.ansys.com/forum/forums/topic/windshield-glass-roof-material-modeling/>. Acesso em: 14 ago. 2025.
- ATGRATING Technologies. **Tipo de fibra Bragg grating (FBG)**. Shenzhen, 2022. Disponível em: <https://pt.atgrating.com/products/fiber-bragg-grating-fbg/>. Acesso em: 25 maio 2025.
- BARAKAT, P. N.; FARAGALLAH, R. N. Evolution of smart glass and its role to redirect architectural buildings. **JES. Journal of Engineering Sciences**, Assiut, v. 52, n. 1, p. 1-14, jan./fev. 2024. Disponível em: https://jesaun.journals.ekb.eg/article_323457.html. Acesso em: 20 abr. 2025.
- BRANDT-SLOWIK, J. Structure-property correlations in borosilicate in comparison to soda-lime glass. **Glass on Web**, Nova Gorica, 2023. Disponível em: <https://www.glassonweb.com/article/structure-property-correlations-borosilicate-comparison-soda-lime-glass>. Acesso em: 18 abr. 2025.
- CARACTERIZAÇÃO e aplicação de chip interrogador de FBG [por] Claudedir Biazoli. [S.l.], 2018. 1 vídeo (17:24). Publicado pelo canal de Renato Archer. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=ZD5LYM6IDRo>. Acesso em: 17 abr. 2025.

DIGICOM. **O que é vidro laminado**. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.digicomweb.com.br/artigos-tecnicos/o-que-e-vidro-laminado.html>. Acesso em: 24 maio 2025.

DLUBAL. **Módulo adicional para o rfem 5 - rf-glass**. Tiefenbach, 2024. Disponível em: <https://www.dlubal.com/pt/produtos/produtos-anteriores/modulos-adicionais-rfem/estruturas-de-vidro/rf-glass>. Acesso em: 24 maio 2025.

FLECKENSTEIN, E. *et.al.* Influence of a multilayer interlayer with a stiff core on the performance of laminated glass. **Glass Structures & Engineering**, Cham, v. 9, p. 251-264, 2024. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40940-024-00262-3>. Acesso em: 20 abr. 2025.

HÄNIG, J. *et.al.* Examination of laminated glass with stiff interlayers – numerical and experimental research. **International Journal of Structural Glass and Advanced Materials Research**, [S.l.], v. 3, n. 1, p. 1-14, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3844/sgamrsp.2019.1.14>. Acesso em: 20 nov. 2025.

HBM International. **O que é sensor FBG (Fiber Bragg Grating)?** Darmstadt, 2025. Disponível em: <https://www.hbm.com/pt/4596/dicas-e-informacoes-o-que-e-sensor-fbg/>. Acesso em: 15 ago. 2025.

HBM. **FS22 industrial braggmeter: interrogador óptico estático e dinâmico**. Darmstadt, 2025. Disponível em: https://www.hbm.com/pt/4604/fs22-interrogador-optico-industrial/?product_type_no=Interrogador%20%C3%93ptico%20FS22:%20Medi%C3%A7%C3%A3o%20Est%C3%A1tica%20e%20Din%C3%A2mica. Acesso em: 3 nov. 2025.

HBM. **Optical interrogators and data acquisition modules**. Darmstadt, 2025. Disponível em: https://www.hbm.com/pt/2322/interrogadores-opticos-da-hbm-fibersensing/?product_type_no=Interrogadores%20Ópticos. Acesso em: 14 ago. 2025.

HBM. **Sensor óptico de temperatura newlight FS63 para medições de temperatura precisas e confiáveis**. Darmstadt, 2025. Disponível em: https://www.hbm.com/pt/8125/newlight-fs63-sensor-optico-de-temperatura/?product_type_no=Sensor%20%C3%B3ptico%20de%20deforma%C3%A7%C3%A3o%20FS63. Acesso em: 06 nov. 2025.

HBM. **Perguntas mais frequentes sobre tecnologia & sistemas FBG (Fiber Bragg Grating)**. Darmstadt, 2025. Disponível em: <https://www.hbm.com/pt/1629/perguntas-mais-frequentes/>. Acesso em: 2 nov. 2025.

LEE, J. *et.al.* Flake formation and composition in soda-lime-silica and borosilicate glasses. **Heliyon**, Amsterdam, v. 9, e16333, 2023. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10245155/>. Acesso em: 10 out. 2025.

LIBOS, I. L. S. **Análise estrutural e de viabilidade de fachada em vidro estrutural**. 2017. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade

Federal do Ceará, Fortaleza, 2017. Disponível em:
<https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/29813>. Acesso em: 18 abr. 2025.

LIU, B. *et. al.* Strain monitoring of laminate glass in glass trestle by fiber Bragg grating sensors. **Optik – International Journal for Light and Electron Optics**, Munique, v. 208, 2020. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030402620303302>. Acesso em: 25 maio 2025.

MALERBA, P. C.; GUARNIERI, F. L.; BARROS, J. Aplicação da extensometria através de strain gage: elaboração de uma célula de carga com sistema de aquisição de dados computadorizado. *In*: ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 12.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE PÓS-GRADUAÇÃO, 8., 2008, São José dos Campos. **Anais [...]**. São José dos Campos: Univap, 2008. p. 1-4. Disponível em:
https://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2008/anais/arquivosINIC/INIC1471_01_A.pdf. Acesso em: 6 maio 2025.

MARTINO, G. **Why is glass used in fences and walls in Brazil?** Rio de Janeiro, 27 jan. 2023. Disponível em: <https://www.archdaily.com/995512/why-is-glass-used-in-fences-and-walls-in-brazil>. Acesso em: 20 nov. 2025.

MENDONÇA, O. B. M. **Utilização de vidro como parte estrutural de fachadas.** 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil com ênfase em Construção Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020. Disponível em:
<https://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10031448.pdf>. Acesso em: 07 maio 2025.

MIGO Glass. **SGP laminated glass.** Qingdao, 2024. Disponível em:
<https://pt.migoglass.net/info/sgp-laminated-glass-93369423.html>. Acesso em: 24 maio 2025.

PEREIRA, A. H. B. **Strain gage óptico, funcionamento e aplicações.** 2016. Monografia (Especialização em Automação Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em:
<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/17082>. Acesso em: 5 maio 2025.

PRADEEP, S. *et. al.* Use of high-performance glass as a sustainable building material. **International Journal of Innovative Research in Technology (IJIRT)**, Ahmedabad, v. 6, n. 2, p. 22-33, 2019. Disponível em:
<https://ijirt.org/article?manuscript=148434>. Acesso em: 20 abr. 2025.

RAVINDER, R. *et. al.* Revealing the compositional control of electrical, mechanical, optical, and physical properties of inorganic glasses. **arXiv**. Ithaca. ID :2103.12050, 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2103.12050>. Acesso em: 23 abr. 2025.

SALAMA, S. The study of the historical development of glass in ancient times. **Journal of Architecture, Art & Humanistic Science**, Cairo, v. 4, n. 17, p. 12-20,

2019. Disponível em: <https://doaj.org/article/3de59d62e42b43929858d0cb1a584a52>. Acesso em: 09 out. 2025.

SILVA, J. C. **Vidro estrutural: caracterização do material e estudo de caso**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Automação Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/17084/1/CT_CEAUT_2015_05.pdf. Acesso em: 6 maio 2025.

SILVA, W. T.; FILGUEIRAS, C. A. L. O vidro e sua importância na vida e na química. **Química Nova**, São Paulo, v. 46, n. 5, p. 491–501, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20230033>. Acesso em: 25 abril 2025.

TUTORIAL: how to install a strain gauge sensor on glass x [por] Colin [S.I.], 2018. 1 vídeo (10:31). Publicado pelo canal Micro-measurements – a VPG Brand. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=ZD5LYM6IDRo>. Acesso em: 17 abr. 2025.

VIDRO Novo. **Vidro temperado quebrado**. São Paulo, [20--]. Disponível em: <https://www.vidronovo.com.br/vidro-temperado-quebrado>. Acesso em: 24 maio 2025.

VIDRO Novo. **Composição química do vidro**. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://www.vidronovo.com.br/composicao-quimica-do-vidro>. Acesso em: 27 abr. 2025.

VILABO. **O vidro borossilicato**. Marinha Grande, 2020. Disponível em: <https://vilabo.com/o-vidro-borossilicato/>. Acesso em: 24 maio 2025.

WESTPHAL, F. S. **Manual técnico do vidro plano para edificações**. São Paulo: Abividro – Associação Brasileira das Indústrias de Vidro, 2020. Manual técnico. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/313693214_Manual_Tecnico_do_Vidro_Plano_para_Edificacoes. Acesso em: 18 maio 2025.

WILKING, C.; GRAF T.; HAUFE A. **Status and strategies of glass modelling with mat_glass (mat_280)**. 2023. Apresentação de slides (36 p.), color. Formato PDF. *on-line*. Disponível em: https://lsdyna.ansys.com/wp-content/uploads/2023/12/Current-Strategies-of-Glass-Modelling-with-MAT_280-Andre-Haufe-Ansys-1.pdf. Acesso em: 14 ago. 2025.

YANIK, S.; ARSLAN, M.; SİRELİ, G. K. Chemical strengthening of soda-lime glasses via ion-exchange method. **Journal of the Turkish Chemical Society, Section A: Chemistry**, Itsambul, v. 11, n. 3, p. 1237-1244, 2024. Disponível em: <https://dergipark.org.tr/en/pub/jotcsa/issue/84640/1378346>. Acesso em: 16 maio. 2025.

ZEMANOVÁ, A.; SCHMIDT, J.; ŠEJNOHA, M. Evaluation of tensile strength of glass from combined experimental and numerical analysis of laminated glass. **Wit Transactions on The Built Environment**, Southampton, v. 175, p. 29-39, 2019. Disponível em:

<https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/HPSM18/HPSM18004FU1.pdf>.
Acesso em: 20 maio. 2025.

ZHAO, E. Tempered glass vs laminated glass: which is safer for your home or building? **TBK Metal**, Foshan, 2025. Disponível em:
<https://www.tbkmetal.com/tempered-glass-vs-laminated-glass-which-is-safer/>.
Acesso em: 20 nov. 2025.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

HBK. Fibersensing. **Mounting instructions:** FS62PSS, FS62PSR, FS63LTS patch strain, patch rosette and laboratory temperature sensors. 5. ed. Vilar do Pinheiro, Portugal: HBK FiberSensing, 2025. 44 p. (Documento DVS: A05257 05 E00 00, de 02.2025).

HBK. Fibersensing. **Mounting instructions:** FS62RSS, FS63RTS rugged strain and temperature sensors. 4. ed. Vilar do Pinheiro, Portugal: HBK FiberSensing, 2025. 40 p. (Documento DVS: A05038 04 E00 00, de 06.2025).