



Artigo Original

e-ISSN 2177-4560

DOI: 10.19180/2177-4560.v18n12024p89-109

Submetido em: 06 set. 2024

Aceito em: 02 dez. 2024

Análise empírica nas fachadas envidraçadas: aplicação do filme de polímeros termocrômicos integrado no vidro para conforto térmico e lumínico

Empirical analysis of glazed façades: application of thermochromic polymer film integrated into the glass for thermal and lighting Comfort

Análisis empírico de fachadas acristaladas: aplicación de una película polimérica termocrômica integrada en el vidrio para confort térmico y lumínico

Hilma Ferreira  <https://orcid.org/0009-0007-8495-2090>

Universidade Federal de Pernambuco.

Doutoranda em Design pela Universidade Federal de Pernambuco.

E-mail: hilma.santos@ufpe.br

Jullyene Costa  <https://orcid.org/0009-0009-1396-6043>

Universidade Federal de Pernambuco.

Mestre em Design pela Universidade Federal de Pernambuco.

E-mail: Jullyene.costa@ufpe.br

Tarciana Andrade  <https://orcid.org/0000-0002-8251-2522>

Universidade Federal de Pernambuco.

Doutorado em Design pela Universidade de Lisboa em regime de cotutela com a Universidade Federal de Pernambuco.

E-mail: andrade.tarci@gmail.com

Amilton Arruda  <https://orcid.org/0000-0003-4551-4497>

Universidade Federal de Pernambuco.

Professor do PPG em Design da Universidade Federal de Pernambuco.

E-mail: amilton.arruda@ufpe.br

Resumo: Para contribuir com a mitigação das mudanças climáticas, é essencial considerar a importância do envidraçamento de fachadas na promoção da eficiência energética e do conforto térmico. Este artigo realiza uma análise qualitativa de dois projetos, começando pela identificação das envoltórias como ponto de partida, seguida pela escolha das tipologias de vidro e, finalmente, pela análise comparativa com foco na redução da exposição solar nos espaços internos. O primeiro projeto analisado é o Centro Jack H. Miller — EUA, que recebeu a certificação LEED, enquanto o segundo, o Centro Universitário Unibra — BR, necessitou de intervenções após sua conclusão. Os estudos revelam que a aplicação de filmes termocrômicos pode contribuir para a melhoria do conforto térmico.

Palavras-chave: Fachadas. Vidro dinâmico. Termocromismo. Película plástica. Desempenho. Termoenergético.

Abstract: To help mitigate climate change, it is essential to consider the importance of façade glazing in promoting energy efficiency and thermal comfort. This article carries out a qualitative analysis of two projects, starting with the identification of the envelopes as a starting point, followed by the choice of glass typologies and, finally, a comparative analysis focusing on the reduction of solar exposure in internal spaces. The first project analyzed is the Jack H. Miller Center - USA, which received LEED certification, while the second, the Unibra University Center - BR, required interventions after its completion. The studies show that the application of thermochromic films can help improve thermal comfort.

Keywords: Facades. Dynamic glass. Thermochromism. Plastic film. Performance. Thermo-energetic.

Resumen: Para contribuir a mitigar el cambio climático, es esencial tener en cuenta la importancia del acristalamiento de las fachadas a la hora de promover la eficiencia energética y el confort térmico. Este artículo realiza un análisis cualitativo de dos proyectos, comenzando por la identificación de las envolventes como punto de partida, seguido de la elección de las tipologías de acristalamiento y, por último, un análisis comparativo centrado en la reducción de la exposición solar en los espacios interiores. El primer proyecto analizado es el Centro Jack H. Miller - EE.UU., que obtuvo la certificación LEED, mientras que el segundo, el Centro Universitario Unibra - BR, requirió intervenciones tras su finalización. Los estudios demuestran que la aplicación de láminas termocrómicas puede contribuir a mejorar el confort térmico.

Palabras clave: Fachadas. Vidrio dinámico. Termocromismo. Película plástica. Rendimiento. Termoenergético.

1 Introdução

Com base no conceito de sustentabilidade, o vidro assume um papel crucial na estrutura externa de edificações, sendo um material versátil em termos de aplicação. Este material é amplamente utilizado na arquitetura contemporânea, impulsionado tanto por avanços estéticos quanto tecnológicos, fomentados pelo modernismo. Segundo Queiroz (2023, p. 14), a influência do vidro no conforto térmico de uma edificação está relacionada ao seu grau de transparência, à extensão das aberturas, à integração com elementos de sombreamento e ao uso de revestimentos com baixa emissividade, que ajudam a reduzir a perda de calor no inverno e o ganho de calor no verão.

Para aprimorar o desempenho térmico da edificação, é essencial considerar o aproveitamento da luz natural, uma vez que seu uso impacta não apenas a eficiência energética e a sustentabilidade, mas também o bem-estar dos ocupantes. As superfícies envidraçadas no exterior de um edifício desempenham um papel vital no controle do excesso de luz solar, oferecendo iluminação natural e aquecimento ao ambiente interno. Juntamente com esses elementos, as películas¹ de proteção são materiais que influenciam diretamente o controle da radiação solar no ambiente construído (FERREIRA et al., 2023).

O estado do conhecimento atual indica que as pesquisas em arquitetura estão cada vez mais vinculadas ao avanço tecnológico, à utilização de novos materiais e sistemas. Um dos aspectos mais

¹ Materiais de proteção solar que bloqueia 99% dos raios ultravioleta, bloqueando efetivamente os raios solares nocivos.

destacados nos edifícios modernos é o sistema de envidraçamento, que pode cobrir toda a envoltória² do edifício, atuando como fechamento e, simultaneamente, como revestimento (FERREIRA et al., 2022).

Com o desenvolvimento de novos produtos, a indústria vidreira tem possibilitado que profissionais idealizem vidros que promovam melhorias e avanços em termos de sustentabilidade (WESTPHAL, 2016). A tecnologia atual oferece produtos envidraçados com a aplicação de películas especiais que estão ganhando espaço no mercado. Tais películas são compostas por elementos químicos que alteram a cor conforme os diferentes níveis de incidência de luz e a variação de temperatura. Essa característica auxilia no controle passivo dos ganhos de calor solar nos edifícios.

O filtro termocrômico, um componente distintivo do vidro utilizado em fachadas de edificações, proporciona proteção solar passiva, contribuindo para a redução da dependência de sistemas de refrigeração mecânica, o que diminui o consumo de energia elétrica e promove o conforto térmico. Além disso, otimiza o aproveitamento da luz natural nos ambientes internos, reduzindo a necessidade de iluminação artificial (DIAS, 2021).

Este artigo, portanto, realiza uma análise qualitativa de dois projetos que utilizam películas para a proteção solar, considerando suas características e as diferentes tipologias de vidros, com o objetivo de adquirir conhecimentos específicos que aprimoram o conforto térmico, reduzindo a exposição solar no interior dos ambientes.

Neste contexto, o artigo está organizado da seguinte forma: no tópico 2, são abordados os conceitos de termocromismo, suas características, composição por meio da combinação de polímeros termoplásticos, corantes termocrômicos e o processo de fabricação voltado para a sustentabilidade; no tópico 3, são apresentados os procedimentos metodológicos utilizados para obter dados concretos, bem como a análise comparativa focada em estudos de caso que visam reduzir a exposição solar nos ambientes internos; o tópico 4 oferece uma descrição dos dois estudos de caso selecionados para análise qualitativa; o tópico 5 discute as análises resultantes dos estudos de caso e suas particularidades; e, finalmente, no tópico 6, são apresentadas as conclusões finais do artigo.

2 Revisão Teórica

O termocromismo é um fenômeno em que a cor de certas substâncias muda em resposta à variação de temperatura, seja ao aquecer ou resfriar essas substâncias. Essa propriedade pode proporcionar conforto e

² Denominação daquilo que cobre ou embrulha; invólucro ou revestimento.

praticidade no cotidiano dos usuários, pois as alterações na cor resultam de mudanças na estrutura molecular da substância, que afetam a maneira como a luz é absorvida ou refletida.

Existem diversos mecanismos que podem causar o termocromismo, incluindo mudanças na estrutura cristalina, transições de fase ou reações químicas específicas. Quando a temperatura varia, esses mecanismos podem induzir mudanças na cor da substância, tornando-a visivelmente diferente. Importante destacar que essas alterações são frequentemente reversíveis, permitindo que o material retorne à sua cor original quando a temperatura se normaliza (SALAMATI et al., 2029).

O desenvolvimento e a inovação em materiais termocrômicos³ têm contado com a colaboração de cientistas, pesquisadores, especialistas e engenheiros de materiais ao longo do tempo. Este fenômeno tem sido amplamente estudado e aplicado em diversas indústrias, resultando em avanços notáveis. Recentemente, visando criar vidros mais sustentáveis em termos de eficiência energética e conforto térmico, estudos científicos têm explorado as propriedades ópticas e térmicas de materiais termocrômicos e sensoriais, no intuito de aplicá-los em janelas e fachadas.

No contexto da arquitetura contemporânea, o uso de vidro tem sido profundamente influenciado por essas inovações, levando a progressos significativos tanto na construção civil quanto na indústria de materiais. Segundo estimativas, cerca de 70% da produção total de vidros no Brasil é destinada a edifícios altamente envidraçados. Nesse cenário, estudos indicam que aproximadamente 22% a 30% do consumo de energia elétrica em tais edifícios é usado para iluminação, enquanto 40% a 46% é destinado ao uso de ar-condicionado (COSTA et al., 2022).

Com o objetivo de integrar o envidraçamento às construções de maneira que se considere tanto o conforto térmico quanto a luminosidade, contribuindo para um design arquitetônico moderno e sustentável, o presente estudo realiza uma análise empírica sobre um polímero termoplástico termocrômico (Figura 1). Este material possui transmitância variável, reagindo às mudanças de temperatura ao alterar sua cor, controlando a entrada de luz solar e calor, o que confere um aspecto dinâmico e interativo à edificação.

Uma das características mais importantes desse filtro termocrômico é sua capacidade de mudar a transmissão térmica em resposta à temperatura ambiente. Quando a temperatura externa aumenta, a película torna-se menos transparente, bloqueando uma maior quantidade de radiação solar e reduzindo o ganho de calor no interior do ambiente. Em contrapartida, quando a temperatura externa diminui, o filtro se torna mais transparente, permitindo uma maior entrada de luz natural no espaço interno (CUI et al., 2018). Conforme Cui (2018, p. 9), essa tecnologia tem se expandido globalmente, principalmente devido aos seus benefícios em termos de desempenho térmico e economia de energia.

³ Termo: Relativo ao calor e Crômicos: Relativo a cores

Considerando o modelo industrializado, a aplicação de vidro termocrômico em envoltórias de edificações deve levar em conta vários fatores que beneficiam o projeto arquitetônico: o estilo predominante na região, o nível de insolação da fachada, a eficiência energética para controle e redução do consumo de energia, a integração visual com o entorno e o impacto ambiental, com uma busca constante por alternativas sustentáveis e materiais de baixo impacto. A Figura 1 apresenta um modelo da composição do filtro que oferece ao ambiente uma transparência natural, permitindo a adaptação e aplicação em vidros de qualquer cor, harmonizando a estética com a funcionalidade.

Figura 1. Película termocrômica de dióxido de vanádio



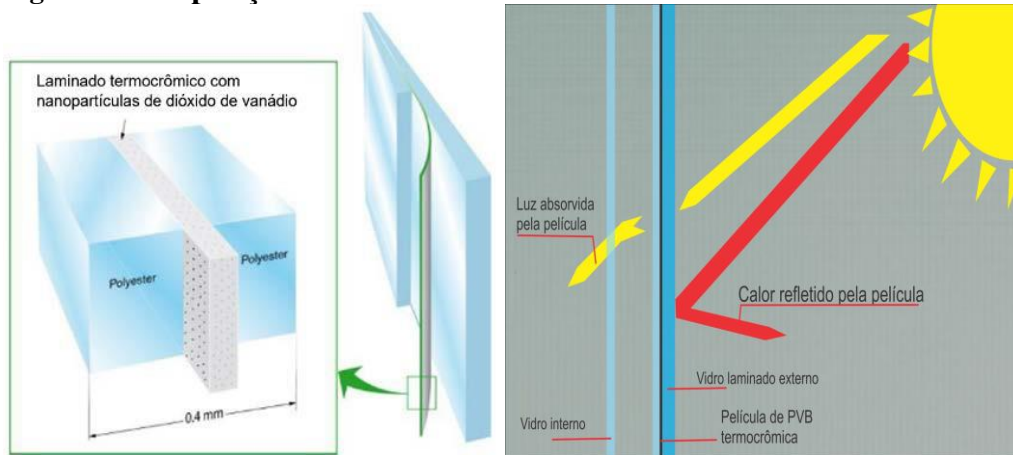
Fonte: Zhão, Mofid, Gão, Tan, Jelle, Yin e Yang (2020).

O filme é composto por nanopartículas de dióxido de vanádio (VO_2), e a cor muda de transparente para translúcida ao entrar em contato com a luz do sol. Quando os raios infravermelhos atingem o vidro, a película absorve o calor e escurece.

Dióxido de vanádio (VO_2) é um material promissor para janelas inteligentes economizadoras de energia devido à sua transição metal-isolante reversível perto da temperatura ambiente e acompanhando grandes mudanças em suas propriedades ópticas (CUI et al., 2018).

De acordo com Chohfi (2017, p. 8), a composição do vidro Termocrômico — laminado ou insulado + filme PVB na camada intermediária — conforme ilustrado na Figura 2, proporciona uma barreira parcial ao caminho do calor, e a quantidade de iluminação nessa área depende da cor e da espessura do vidro utilizado.

Figura 2. Composição do vidro laminado + filtro termocrômico



Fonte: Costa e Amorim, Gão (2022).

Esses filtros são normalmente produzidos pela mistura de pigmentos sensíveis ao calor em materiais como polímeros ou tintas. Esses pigmentos mudam de cor com as mudanças de temperatura, constituídos por uma combinação de polímeros termoplásticos e corantes Termocrômicos (produtos químicos derivados do vanádio).

Considerando que os materiais Termocrômicos podem apresentar uma ampla variedade de cores personalizáveis com base em necessidades específicas, essa diversidade é devida à presença de diferentes corantes ou pigmentos sensíveis à temperatura no material. Conforme os autores Seeboth *et al.* (2013, p. 18), os pigmentos mais frequentemente empregados para proporcionar Termocromismo são os leucos colorantes, também referidos como uma técnica que causa uma mudança de um estado sem cor ou levemente colorido para um estado colorido após ser exposto a certos estímulos químicos ou físicos. Quando utilizado em polímeros termoplásticos adaptados ao vidro, podem criar cores diversas com aplicação ou remoção de calor.

Figura 3. Filtro termocrômico aplicado no vidro



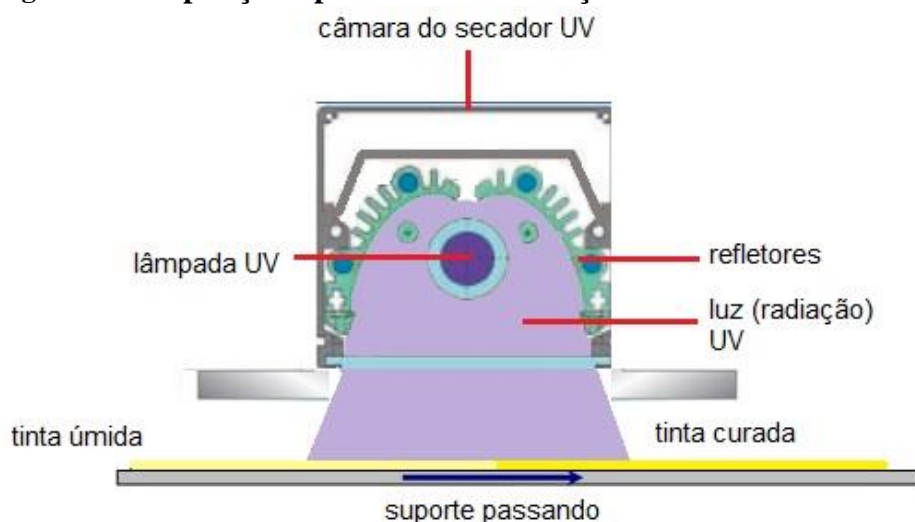
Fonte: Ferreira, Moreira e Arruda, Gão (2023).

A fabricação do filtro termocrômico é um processo complexo que envolve múltiplas etapas cuidadosamente executadas para garantir a qualidade e a durabilidade do produto final. O processo começa com a preparação da tinta termocrômica, que é formulada para reagir a variações de temperatura, alterando suas propriedades ópticas, como a cor e a transmitância de luz. Essa tinta especial é então aplicada sobre um substrato, que geralmente consiste em um filme plástico vaporizado.

A aplicação da tinta no substrato pode ser realizada utilizando diversas técnicas de impressão, como a serigrafia ou a impressão offset, que permitem uma distribuição uniforme da tinta sobre a superfície do filme. Após a aplicação, o material é submetido a um rigoroso processo de secagem, cujo objetivo é remover qualquer traço de umidade residual e acelerar a cura da tinta. Esse passo é crucial, pois a secagem adequada assegura que a tinta adira firmemente ao substrato, prevenindo falhas ou desgastes prematuros durante o uso do filme.

Uma vez que a tinta termocrômica está devidamente seca e curada, o filme segue para a etapa de laminação. Durante essa fase, várias camadas do filme termocrômico são sobrepostas, utilizando adesivos específicos que garantem a coesão entre as camadas. A laminação não apenas aumenta a resistência mecânica do filme, mas também melhora suas propriedades de isolamento térmico e durabilidade. O processo de laminação é finalizado com a aplicação controlada de calor e pressão, que são essenciais para a fusão completa das camadas. Essa combinação de calor e pressão une as camadas de forma permanente, resultando em um filme termocrômico resistente, flexível e durável (Figura 4).

Figura 4. Composição e processo de fabricação



Fonte: Westphal (2016).

Além disso, o controle rigoroso de cada uma dessas etapas de fabricação é fundamental para garantir que o filme termocrômico mantenha suas propriedades de forma consistente ao longo do tempo. A qualidade

do produto final depende não só da precisão na aplicação e secagem da tinta, mas também da eficiência do processo de laminação, que deve assegurar a homogeneidade do material e a ausência de imperfeições que possam comprometer seu desempenho.

Essa atenção ao detalhe durante a fabricação é o que permite que o filme termocrômico desempenhe suas funções de forma eficaz em uma ampla variedade de aplicações, desde fachadas de edifícios até dispositivos eletrônicos. A tecnologia utilizada no desenvolvimento desses filtros representa uma fusão de química avançada e engenharia de materiais, resultando em produtos que contribuem para a eficiência energética e o conforto ambiental das edificações onde são aplicados.

Em suma, o processo de fabricação do filtro termocrômico envolve uma série de etapas meticulosas que vão desde a preparação inicial da tinta até a laminação final das camadas do filme. Cada fase é fundamental para garantir que o produto final atenda aos requisitos técnicos necessários para sua aplicação, proporcionando não apenas um controle eficaz da luz e do calor, mas também uma durabilidade que permite sua utilização em condições adversas por longos períodos.

Segundo os autores Cagnani *et al.* (2022, p.345-372), as técnicas de secagem incluem o uso de placas quentes, forno, luz ultravioleta e infravermelha. A escolha depende das propriedades do revestimento utilizado e do processo de composição. Por outro lado, a preferência pela tecnologia relacionada à espessura do filme está ligada à resolução do padrão de impressão e ao processo de cura quando exposto à luz UV. A Figura 5 evidencia o processo de secagem do filme e evaporação do solvente, mostrando o substrato passando por um ambiente com temperatura controlada. Essas composições e procedimentos têm sido foco de pesquisa desde a década de 1980, devido à sua transição de isolador térmico para isolador de temperatura relativamente baixa.

Figura 5. Sistema de secagem por forno



Fonte: Seeboth, Lotzsch e Ruhmann (2013).

Um questionamento relevante que surge neste estudo é em relação à aplicação desses materiais em edificações envidraçadas no contexto brasileiro. No entanto, assim como qualquer tecnologia inovadora, poucas empresas nacionais disponibilizam o produto no mercado devido ao alto custo. Esta tecnologia está presente no Brasil desde 2017, conforme comentado por Chohfi (2017) em sua palestra, “a comercialização não é muito conhecida, nem tão utilizada, como outros modelos de vidros que oferecem a mesma proposta”.

Acredita-se que a compreensão das propriedades técnicas, estudos sobre a aplicação e desempenho térmico da película Termocrômica no Brasil possam contribuir para a disseminação das potencialidades do material como dispositivo de controle térmico em edificações. Nesse sentido, o próximo tópico abordará os procedimentos metodológicos e casos de aplicação.

3 Material e Método

O presente estudo analisa qualitativamente dois projetos que aplicam filtros ao longo dos envidraçados das fachadas. Para tanto, identificam-se inicialmente as envoltórias como parâmetro inicial, seguidas pela seleção das tipologias de vidro e, por fim, pela análise comparativa, tendo em vista a redução da exposição solar no interior do ambiente.

Em relação aos critérios para a seleção dos estudos de caso, têm-se: a) por meio de revisão de literatura, identificou-se o projeto de referência internacional, o Centro Jack H. Miller de Artes Musicais, em Michigan, EUA, de 2015. Tal projeto obteve, em 2017, a certificação LEED⁴ (*Leadership in Energy and Environmental Design*) e aplicou nos vidros filtros Termocrômicos (os quais se adaptam às mudanças de temperatura do ar e de iluminação solar); b) o segundo projeto, por sua vez, adotou como premissa a necessidade de contemplar o contexto climático de Recife–PE, e, concomitantemente, era do conhecimento dos investigadores, que, ao longo da jornada profissional, tomaram ciência da necessidade de adaptar os filtros designados para o projeto inicial do Centro Universitário Unibra (projeto também construído em 2015).

A necessidade de intervenção posterior teve a intenção de aprimorar o conforto dos usuários, sobretudo no que tange às questões de controle térmico, diminuição da incidência de luz solar, redução do calor e do brilho excessivo nas salas de aula. No que se refere à análise qualitativa dos casos de estudo, considerou-se a tipologia do filtro utilizado, bem como os dados de referência disponibilizados pelos

⁴ LEED: O LEED é utilizado em mais de 160 países e consiste em um sistema internacional de certificação para construções sustentáveis. Esse sistema tem em vista promover e atestar o comprometimento das edificações com os princípios da sustentabilidade na construção civil (LOTTI, 2015). O LEED considera o consumo de energia de cada material para otimizar a transmissão térmica, favorecer a iluminação natural e, conseqüentemente, reduzir as emissões de dióxido de carbono, analisando e qualificando as fachadas de um edifício (U.S., 2009).

fornecedores. Nesse sentido, foram elucidados os distintos níveis de proteção solar UV, transmissão de luz visível (VLT), coeficiente de ganho de calor solar (SHGC), reflexão e transmitância térmica, além do desempenho de proteção solar dos vidros com a aplicação dos filtros, entre outras características voltadas para o comparativo dos dois estudos.

3.1 Estudos de caso

Este tópico irá explorar em detalhes os dois estudos de caso mencionados anteriormente: o Centro Jack H. Miller, localizado nos Estados Unidos, e o Centro Universitário Unibra, no Brasil. Ambos os projetos exemplificam abordagens distintas na aplicação de tecnologias de vidros arquitetônicos, refletindo as diferentes necessidades e condições climáticas de suas respectivas regiões.

Ao longo do texto, serão discutidos aspectos técnicos específicos dos filtros e tipos de vidro utilizados em cada caso. Serão abordadas as composições dos materiais, incluindo as camadas e os tratamentos aplicados, assim como as especificações técnicas fornecidas pelos fabricantes.

No caso do Centro Jack H. Miller, o foco será no vidro translúcido dinâmico com camada intermediária de PVB termocrômico, destacando como essa tecnologia avançada contribui para a eficiência energética e o controle ambiental interno da edificação. Já no estudo do Centro Universitário Unibra, será explorado o uso de vidro monolítico refletivo prata, juntamente com um filtro PVB incolor, para entender como essas escolhas influenciam na segurança, controle solar e conforto acústico.

3.1.1 Estudo de caso 1

O primeiro estudo de caso examinou uma edificação específica com uma fachada de vidro, localizada no campus do Hope College, em Holland, Michigan, EUA. Trata-se do Centro de Artes Musicais Jack H. Miller, uma construção concluída em 2015, que obteve a certificação LEED Silver em 2017. A conquista dessa certificação reflete a adoção de práticas inovadoras e soluções práticas que foram cuidadosamente planejadas e implementadas para alcançar um desempenho elevado em termos de sustentabilidade.

A certificação LEED Silver foi obtida através da aplicação de uma série de estratégias focadas em várias áreas cruciais para a sustentabilidade. Entre essas estratégias, destacam-se a economia de água, que incluiu o uso de sistemas de encanamento eficientes e paisagismo de baixa demanda hídrica, e a eficiência energética, alcançada por meio de uma combinação de técnicas de isolamento, iluminação natural, e sistemas de controle de temperatura que reduzem significativamente o consumo de energia. Além disso, a seleção

critérioria de recursos sustentáveis, como materiais de construção de baixo impacto ambiental e práticas de reciclagem durante a construção, também contribuiu para a certificação (U.S., 2009).

Outro aspecto relevante foi o foco no bem-estar ambiental interno, que envolveu o controle da qualidade do ar, o uso de materiais não tóxicos e a maximização da iluminação natural nos espaços internos, promovendo um ambiente saudável e confortável para os ocupantes. Segundo o escritório de arquitetura, o projeto do Centro de Artes Musicais Jack H. Miller demonstra como a integração de soluções sustentáveis em edifícios pode não apenas atender às exigências de certificações como o LEED, mas também proporcionar benefícios tangíveis em termos de eficiência operacional e qualidade de vida.

Esse estudo de caso serve como um exemplo ilustrativo de como uma abordagem integrada ao design sustentável pode ser eficaz em edifícios institucionais, inspirando futuras construções a adotarem práticas semelhantes para alcançar objetivos de sustentabilidade e eficiência energética.

Figura 6. Centro Jack H. Miller de Artes Musicais



Fonte: Seeboth, Lotzsch e Ruhmann (2013).

Obra, realizada pelo escritório de arquitetura HGA (EUA), teve como desafio a construção de um centro musical estudantil com uma estrutura aproximada de 5.956 m². No entanto, havia uma linha de trem em seu entorno que poderia afetar potencialmente a acústica. O projeto precisava incluir áreas reservadas para salas de música, como salas de aula, ensaios, recitais, concertos e escritórios. Para abrandar essa situação e resolver os problemas acústicos, a equipe selecionou materiais que bloqueassem o som e melhorassem a acústica.

Entre os revestimentos para isolamento externo, a escolha especificada foi o vidro dinâmico Termocrômico automatizado, com orientação voltada para o oeste. A escolha recaiu sobre o vidro dinâmico Suituitive de 8 mm (4 + 4) transparente, com uma camada intermediária de PVB dinâmico Termocrômico de 1,22 mm na cor cinza, que ajusta sua transparência conforme a temperatura do ar e a intensidade da luz solar. Conforme o autor do projeto Olgers (2017 p. 2), o material escolhido garantiu iluminação natural e

contribuiu para a certificação LEED, oferecendo uma solução inovadora para atender os requisitos de desempenho da edificação ao longo do ano, cobrindo períodos de manhã, tarde e noite (figura 7).

Figura 7. Centro Jack H. Miller de Artes Musicais

MANHÃ

TARDE

NOITE



Fonte: Seeboth, Lotzsch e Ruhmann (2013).

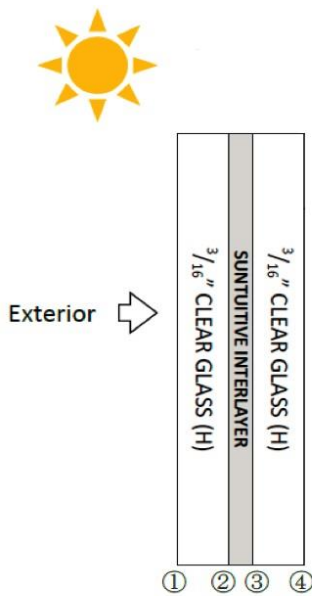
O estudo teve como objetivo encontrar uma tecnologia capaz de oferecer uma transmitância de luz visível em torno de 69%, além de proporcionar uma iluminância adequada (medida em lux) nos ambientes internos, com um bloqueio solar de aproximadamente 78%. Essa tecnologia foi particularmente aplicada nas áreas entre o hall de entrada principal e as circulações que dão acesso ao mezanino, onde a qualidade da iluminação natural e a proteção contra os efeitos nocivos da radiação solar eram prioridades.

Para atingir uma composição de vidro que equilibra a irradiância solar com a proteção e a transmissão luminosa desejadas, foi instalado um sistema de envidraçamento duplo. Este sistema consistiu em dois vidros laminados, que oferecem maior resistência e segurança, combinados com camadas intermediárias do filtro Suituitive. Esse filtro foi escolhido por sua capacidade de adaptar-se às variações da intensidade solar, proporcionando conforto térmico e luminoso ao ambiente interno.

O conjunto resultante apresentou uma espessura total de aproximadamente 8 mm para o vidro, com uma camada adicional de 1,22 mm do filtro Suituitive, totalizando uma solução robusta e eficaz para o controle da iluminação e proteção solar. A aplicação desse sistema não só atendeu aos requisitos técnicos de transmissão de luz e bloqueio solar, mas também contribuiu para a eficiência energética do edifício, reduzindo a necessidade de iluminação artificial e ajudando a manter uma temperatura interna agradável.

Além disso, o uso de vidros laminados e do filtro Suituitive reforça a segurança estrutural e a durabilidade das fachadas, enquanto promove um ambiente interno confortável e bem iluminado, alinhado com as metas de sustentabilidade e bem-estar dos ocupantes. Este sistema pode servir como referência para futuros projetos que busquem soluções eficientes e inovadoras no uso de vidros em edificações, especialmente em áreas com alta exposição solar.

Figura 8. Composições de vidro termocrômico



Fonte: Cui, Ke, Liu, Chen, Wang, Zhang, Zhou, Wang, Gao e Long (2018).

As características e práticas adotadas no edifício, desde a escolha de sua localização até a seleção cuidadosa dos revestimentos, desempenharam um papel fundamental na promoção da sustentabilidade e eficiência energética. A incorporação do filtro termocrômico nos vidros foi relevante e contribuiu significativamente para a redução do consumo de energia elétrica.

O filtro termocrômico, que ajusta automaticamente sua transparência em resposta à intensidade da luz solar, proporcionou uma série de benefícios que vão além do simples controle térmico. Essa tecnologia permitiu uma redução substancial na necessidade de climatização artificial, pois ajudou a manter uma temperatura interna mais estável, evitando o superaquecimento nos dias mais ensolarados. Além disso, ao filtrar a luz solar excessiva, o filtro contribuiu para diminuir a dependência de iluminação artificial durante o dia, ampliando ainda mais as economias de energia. Assim pode-se afirmar que tal solução contribuiu para a redução do impacto ambiental da edificação.

Essas vantagens tiveram uma influência direta nos usuários do ambiente interno, criando um espaço mais confortável e saudável para os ocupantes. O controle eficaz da temperatura e da luminosidade resultou em um ambiente de trabalho e convivência mais agradável, com menos flutuações térmicas e melhor qualidade de luz natural. Esses fatores não só aprimoraram o bem-estar dos ocupantes, como também elevaram o desempenho geral da edificação em termos de funcionalidade e eficiência.

A adoção dessas práticas sustentáveis demonstra um compromisso com a redução da pegada ecológica do edifício, ao mesmo tempo em que promove a sustentabilidade a longo prazo. A combinação de localização estratégica, escolha de materiais eficientes e tecnologias avançadas como o filtro termocrômico

exemplifica como um projeto pode equilibrar a necessidade de desempenho superior com a responsabilidade ambiental. Essa abordagem integrada serve como um modelo para futuras construções, revelando que é possível alcançar altos padrões de sustentabilidade sem comprometer a qualidade de vida dos ocupantes.

3.1.2 Estudo de caso 2

O segundo estudo de caso está ambientado no quente e tropical Nordeste brasileiro, mais precisamente no Recife-PE, que compreende uma das maiores áreas metropolitanas e um importante polo cultural do país. Concomitantemente, vale salientar, que a arquitetura educacional tem adotado uma nova tendência no uso de envoltórias inovadoras. Um exemplo marcante dessa tendência é o Centro Universitário Unibra, conhecido como Campus II, que foi construído em 2015. O campus está situado ao redor de um edifício histórico (anteriormente um hospital psiquiátrico, fundado em 1940 e desativado no início dos anos 2000). Essa combinação de preservação histórica com inovação arquitetônica reflete o compromisso da instituição com a modernidade e a sustentabilidade, sem deixar de lado o respeito ao patrimônio cultural.

Com o objetivo de promover uma abordagem educacional inovadora e proporcionar bem-estar aos usuários, o projeto do invólucro do edifício incorporou soluções avançadas em eficiência energética e conforto ambiental. A fachada do edifício foi equipada com vidro de proteção solar Cebrace Cool Lite STB 120, um material de alta tecnologia que combina estética e funcionalidade. Esse vidro laminado de 8 mm (composição de 4 + 4 mm), possui características reflexivas e uma coloração prata, sendo reforçado com um filme PVB incolor (Polivinil Butiral) de 0,38 mm, que oferece proteção adicional.

Desenvolvido com nanotecnologia de alto desempenho, o vidro Cebrace Cool Lite STB 120 foi projetado para reduzir significativamente a entrada de calor nos ambientes internos. Ele consegue diminuir em até 69% o calor que penetra no edifício, o que é especialmente relevante para o clima quente e úmido do Nordeste brasileiro, onde as temperaturas elevadas são uma constante. Essa redução na carga térmica contribuiu de forma significativa para o conforto térmico dos ocupantes, tornando os espaços internos mais agradáveis mesmo durante os dias mais quentes do ano.

Além de melhorar o conforto térmico, a escolha desse vidro reflete uma preocupação com a sustentabilidade e a eficiência energética. Ao reduzir a necessidade de climatização artificial, o uso do vidro Cebrace Cool Lite contribui para uma economia de energia, alinhando-se com as práticas de construção sustentável que estão se tornando cada vez mais importantes na arquitetura contemporânea. Essa solução não contribui para a melhoria da qualidade de vida dos estudantes e funcionários, e também demonstra um compromisso com a redução do impacto ambiental da construção.

O projeto do Campus II do Centro Universitário Unibra exemplifica como a combinação de inovação tecnológica, respeito ao patrimônio histórico e compromisso com a sustentabilidade pode resultar em edificações que não apenas atendem às necessidades funcionais, mas também promovem o bem-estar dos usuários e a preservação do meio ambiente. Este exemplo pode inspirar outras instituições a adotar práticas similares, contribuindo para o avanço da arquitetura educacional no Brasil.

Figura 9. Centro Universitário Unibra, Campus II



Fonte: Hanazaki (2019).

Na tentativa de oferecer mais conforto sonoro, segurança e bloqueio da radiação ultravioleta, o projeto teve em vista atender à regulamentação da norma técnica ABNT NBR 7199, que orientou a escolha da estrutura e cor do vidro. Entretanto, devido à localização do edifício em relação ao norte geográfico da região, após a montagem da fachada, surgiu a necessidade de implementar uma solução adicional. Foi decidido revestir internamente os vidros com uma película insulfilm adesivo plástico fumê de controle solar e redução de ruídos.

Essa película tinha como objetivo reduzir o índice de luminosidade, a incidência de calor e a transmissão de ruídos externos para o interior da edificação, proporcionando maior conforto acústico e proteção contra os raios UV nas salas de aula e demais setores. Este caso demonstra que, apesar de a fachada ter sido projetada para proporcionar maior conforto térmico e acústico aos usuários, a película selecionada conferiu um resultado inadequado às necessidades específicas do ambiente em questão.

4 Análises das Discussões

Os estudos de caso apresentados demonstraram que os procedimentos adotados contribuíram significativamente para a promoção de práticas sustentáveis nas edificações. No caso 1, observou-se que a implementação de novas tecnologias, embora ainda em ascensão e não amplamente difundidas nas construções urbanas do Brasil, teve um impacto positivo. Apesar do conhecimento limitado sobre essa tecnologia, o estudo evidenciou melhorias consideráveis na eficiência energética e na qualidade acústica dos ambientes, destacando o potencial dessas inovações para transformar o setor da construção civil, sendo uma edificação que obteve certificação LEED.

Por outro lado, o caso 2 destacou o papel crucial do controle da luminosidade no ambiente interno. A escolha de uma solução estratégica para reduzir o excesso de luz transmitida pelo vidro foi um ponto central nesse estudo. Embora essa abordagem tenha sido eficaz em diminuir a entrada de luz natural, ela não conseguiu atender completamente às demandas de conforto térmico, o que resultou em um desafio para equilibrar a redução da luminosidade com a necessidade de manter uma temperatura agradável no interior da edificação.

Estes resultados sublinham a complexidade envolvida na escolha de materiais e tecnologias para projetos sustentáveis, onde é necessário considerar múltiplos fatores, como eficiência energética, conforto térmico, controle de luminosidade e qualidade acústica. A Tabela 1 resume as características físicas dos materiais utilizados nos dois estudos de caso, com base nas especificações fornecidas pelos fabricantes Pleotint LCC-USA e Cebrace-BR. Esses dados evidenciam as particularidades de cada solução adotada e como elas impactam diferentes aspectos da sustentabilidade e do conforto nos ambientes analisados.

Em suma, os estudos indicam que, embora tecnologias emergentes como as abordadas no caso 1 ofereçam promissores benefícios sustentáveis, há uma necessidade contínua de pesquisa e adaptação para maximizar seu potencial nas condições específicas das construções urbanas brasileiras. Além disso, o caso 2 reforça a importância de uma abordagem integrada que equilibre todos os elementos de conforto e eficiência para alcançar resultados verdadeiramente sustentáveis.

Tabela 1. Análise comparativa entre os estudos de caso – PVB = Polivinil Butiral. Os sinais “•”, “••” ou “•••” para critério definem hierarquia de interesse. O maior número de pontos significa que foi dada mais atenção ao critério destacado. Um “-” significa que o critério em questão não ocorreu

Características	Caso de Estudo 1	Caso de Estudo 2
Projeto	Centro Jack H. Miller de Artes Musicais	Centro Universitário Unibra (Campus II)
Local	Michigan - EUA	Recife-PE

Ano Conclusão	2015	2015
Certificação LEED do projeto	•••	-
Aplicação do filtro na fachada localizada a	Oeste	Leste
Sistema de esquadria com vidro	vidros laminados incolor	vidros laminados refletido prata
Tipologia filtro	PVB termocrômica 1,22 mm cinza	PVB incolor - Polivinil Butiral - 0,38mm
Fornecedor do filtro	Pleotint LCC-USA	Cebrace-BR
Disponibilidade no mercado brasileiro	Dificuldade de acesso no mercado brasileiro devido ao custo e conhecimento técnico	Acessível no Brasil
Quantidade de vidros	02 folhas de vidro e camada intermediária PVB termocrômica 1,22 mm cinza	02 folhas de vidro com filme PVB para proteção solar 0,38 mm prata refletivo
Espessura do vidro	4 mm + 4 mm = 8 mm	4 mm + 4mm = 8 mm
Característica do filtro	Promover proteção da exposição solar	Promover proteção solar
Transmitância Térmica	2,130 W (m ² K)	5,600 W (m ² K)
Fator solar	0,28	0,29
Transmissão de luz (VLT)	0,49 – 60%	0,20 – 45%
Ganho de calor solar (SHGC)	0,36 – 10%	0,42 – 30%
Reflexão externa	0,10	0,316 – 30%
Proteção UV	100%	99%
Necessidade de sinal elétrico para operar	-	-
Proteção Acústica	•••	••
Contribui para reduzir a necessidade de energia elétrica	•••	••
Contribui para a sustentabilidade da edificação	•••	••
Qual o propósito da aplicação do filtro?	Controle do ganho/perda de calor, luz na edificação e proteção acústica	Controle acústico, iluminação e segurança. Não ofereceu as mesmas condições de eficiência em relação ao controle térmico
Houve necessidade de melhoria no projeto?	-	Sim
Qual melhoria?	-	Aplicação de revestimento interno ao vidro com película adesiva com o objetivo de reduzir o índice lumínico dos ambientes, que provocou a ampliação dos índices reflexivos dos vidros
Características da película implementada	-	Película insulfilme adesivo plástico fumê de controle solar e redução de ruídos

Fonte: Dos autores (2024).

De acordo com a análise da tabela apresentada, observa-se que ambos os projetos foram concluídos simultaneamente, mas utilizaram tipos distintos de vidro, refletindo diferentes abordagens tecnológicas. No projeto 1, foi empregado um vidro translúcido dinâmico, com uma camada intermediária de PVB termocrômico, enquanto no projeto 2 foi utilizado um vidro monolítico refletivo prata, combinado com um filtro incolor, cada um proveniente de fornecedores distintos.

O filme termocrômico utilizado no projeto 1 demonstrou uma eficácia notável, oferecendo 100% de proteção solar contra a radiação UV. Em contrapartida, o vidro do projeto 2 permitiu a entrada de até 99% dos raios UV, o que indica uma menor proteção contra os efeitos nocivos dessa radiação. No que diz respeito à transmitância térmica, o vidro do projeto 1 apresentou um valor de 2,130 W/(m²K), indicando uma alta eficiência no isolamento térmico. Por outro lado, o vidro utilizado no projeto 2 teve uma transmitância térmica de 5,600 W/(m²K), o que sugere uma menor capacidade de isolamento e, portanto, uma maior transferência de calor, com variações dependendo da região onde foi instalado.

Especificamente no caso 2, o desempenho do vidro pode permitir uma redução de 69% na entrada de calor no ambiente interno, enquanto no projeto 1 o conforto térmico pode ser mais otimizado, com uma redução de 78% na entrada de calor. Os dados para a análise comparativa foram fornecidos pelos fabricantes dos vidros. Essa diferença reflete a capacidade superior do vidro termocrômico em controlar a temperatura interna, ajustando-se às condições climáticas e proporcionando um ambiente mais agradável.

Em resumo, a aplicação do filme termocrômico no estudo 1 permitiu um controle ativo da entrada de luz e calor na edificação, ao mesmo tempo em que oferecia um baixo fator de ameaça em termos de radiação UV, o que foi essencial para atender aos requisitos de certificações como a LEED. Por outro lado, no estudo 2, o vidro com filtro PVB foi mais focado em aspectos de segurança e controle solar, com uma posterior adição de película plástica para aprimorar a acústica e proporcionar uma proteção solar adicional.

Ambos os tipos de vidro possuem aplicações e técnicas específicas, sendo que, em muitos casos, podem ser combinados para atender a múltiplas necessidades de conforto, segurança e eficiência em diferentes ambientes. No entanto, considera-se que o uso das propriedades do vidro termocrômico no estudo 2 poderia ter potencializado ainda mais o conforto térmico e acústico do espaço construído, oferecendo uma solução mais integrada e eficiente. A implementação dessa tecnologia no projeto 2 poderia possibilitar uma gestão mais eficaz das condições internas, especialmente em regiões de alta insolação, demonstrando que a integração de tecnologias avançadas pode trazer benefícios substanciais para o desempenho geral das edificações.

5 Considerações finais

As etapas de desenvolvimento deste estudo serviram como base fundamental para selecionar, descrever e comparar dois estudos de caso que abordaram a aplicação de películas em projetos de fachadas de edificações. Ao examinar a aplicação das duas técnicas, constatou-se que o estudo 1, focado na utilização da película termocrômica, demonstrou um controle eficiente sobre o ganho e a perda de calor, e luz na edificação, contribuindo diretamente para a regulação térmica do ambiente. Em contrapartida, o estudo 2, que envolveu a aplicação do filme PVB, foi direcionado principalmente para questões de segurança, controle acústico e gerenciamento da iluminação. Contudo, essa técnica não apresentou o mesmo nível de eficiência no controle térmico quando comparada ao primeiro estudo.

Além disso, foi observado que a adição da película adesiva na parte interna dos ambientes resultou em um aumento da reflexividade dos vidros na parte externa da edificação, o que possivelmente está levando a um maior número de colisões de pássaros contra as fachadas. É importante destacar que ambas as películas possuem aplicações e técnicas específicas, podendo ser utilizadas de forma complementar para atender às necessidades de conforto e segurança em diferentes ambientes, maximizando as vantagens de suas propriedades técnicas. A análise do primeiro caso revelou que a aplicação de filtros termocrômicos pode ser uma estratégia eficaz para projetos que buscam obter a certificação LEED, dado que essa tecnologia contribui para a eficiência energética e a sustentabilidade das construções.

Estudos futuros poderão aprofundar a investigação sobre as vantagens e limitações das diferentes abordagens adotadas nas edificações, podendo inclusive fazer uso de ferramentas para simulação climática, que levam em conta o norte geográfico, semelhante contexto climático para a análise comparativa e determinação de um mesmo ambiente de teste para a simulação. Assim, poder-se-á inserir os dados disponibilizados pelos fornecedores, e avaliá-los tendo em conta os mesmos parâmetros ambientais e construtivos das edificações.

Por fim, vale ressaltar que, embora o conhecimento atual indique que a tecnologia dos vidros termocrômicos ainda não é amplamente acessível, sua aplicação tem o potencial de contribuir de forma significativa para a eficiência energética e a sustentabilidade. Pesquisas futuras poderão avaliar mais detalhadamente a eficácia desses filtros em contextos climáticos específicos, além de explorar as tendências de aplicação desses filtros no Brasil.

Referências

CAGNANI, G. R., CAGNANI, L. D. **Deposição de filmes finos por técnicas roll-to-roll**. p. 345 -372. In: Nanotecnologia Aplicada a Polímeros. São Paulo: Blucher, 2022.

CHOHFI, R. E. **Alcance Iluminação Natural, Eficiência Energética, Geração de Eletricidade e Certificação LEED com Duas Tecnologias Avançadas de Vidro: 1. Vidro Termocrômico e 2. Vidro Fotovoltaico.** Greenbuilding Brasil, 2017.

COSTA, J. F. W.; AMORIM, C. N. D. **Materiais transparentes e translúcidos inovadores em fachadas e seu desempenho em iluminação natural:** panorama internacional e aplicabilidade no contexto brasileiro. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 22, n. 4, p. 179-198, out./dez. 2022.

CUI. Y., KE. Y., LIU. C., CHEN. C., WANG. N., ZHANG. L., ZHOU. Y., WANG. S., GAO. Y., LONG. Y. **Thermochromic VO₂ for Energy-Efficient Smart Windows,** Joule, Volume 2, Issue 9, 2018.

DIAS, L. S. **Desempenho termoenergético e lumínico de fachadas envidraçadas com brise-soleil em edificações multipavimentos climatizadas:** tipos de vidros e tipologias de brises. / Luma de Souza. 2021.

FERREIRA, H., MOREIRA, F., & ARRUDA, A. J. V. **Graphic Composition on Glass:** technique and conceptual model in bioinspired design: UFSC – Florianópolis, 2023. 2 p

FERREIRA, H. O. S.; ARRUDA, A.; ANDRADE, M. **Análise nas fachadas cinética e dinâmica:** um estudo de design sobre técnicas e modelos conceituais. Design & Tecnologia, Rio de Janeiro, dez. 2022. 8 p

HANAZAKI, P. "UNIBRA IBGM / Hanazaki Paisagismo" 08 Abr 2019. ArchDaily Brasil. Disponível em; <<https://www.archdaily.com.br/br/914465/unibra-ibgm-hanazaki-paisagismo/> Acesso 31 Mar 2024.

LOTTI, M. G. M. 2015. **Processo de desenvolvimento e implantação de sistemas, medidas e práticas sustentáveis com vista a certificação ambiental de empreendimentos imobiliários:** estudo de caso: Empreendimento Bairro Ilha Pura – Vila Dos Atletas 2016. Projeto de Graduação (Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio De Janeiro, 2015.

OLGERS, G. Engenhosidade de design acústico para uma instalação acolhedora e de classe mundial, 2017. Disponível em: <https://hga.com/projects/hope-college-jack-h-miller-center-for-musical-arts/> Acesso em: 18 mar. 2024.

QUEIROZ, N. **Projeto da envoltória guiado por desempenho:** método paramétrico interoperável com enfoque no desempenho térmico, visual e luminoso: Universidade Federal de Santa Catarina, 2023. 14 p

SALAMATI, M., KAMYABJOU, G., MOHAMADI, M., TAGHIZADE, K., KOWSARI, E. **Preparation of TiO₂@W-VO₂ thermochromic thin film for the application of energy efficient smart windows and energy modeling studies of the produced glass.** Construction and Building Materials, Volume 218, 2019.

SEEBOTH, A.; LÖTZSCH, D.; RUHMANN.; R. **First example of a non-toxic thermochromic polymer material** – based on a novel mechanism. J. Mater. Chem. C, 2013, 1, 2811;

U.S. Green Building Council. 2009. LEED Reference Guide for Green Building Design and Construction For the Design, **Construction and Major Renovations of Commercial and Institutional Buildings Including** 2009 Edition USGBC Membership.

X.P. ZHAO, S.A. MOFID, T. GAO, G. TAN, B.P. JELLE, X.B. YIN, R.G. YANG, Durability-enhanced vanadium dioxide thermochromic film for smart windows, **Materials Today Physics**, Volume 13, 2020.

WESTPHAL, Fernando Simon. **Manual Técnico do Vidro Plano para Edificação.** São Paulo: Abividro, 2016.

Agradecimentos

Gostaríamos de expressar nossa sincera gratidão à equipe editorial da Revista Boletim por proporcionar-nos a oportunidade de compartilhar nosso trabalho. Agradecemos profundamente aos revisores anônimos por suas valiosas contribuições e sugestões, que foram essenciais para o aprimoramento deste artigo.

Além disso, gostaríamos de reconhecer o apoio e a colaboração de nosso orientador Amilton Arruda e instituições, que nos forneceram o ambiente e os recursos necessários para conduzir esta pesquisa. Por fim, um agradecimento especial a todos que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho se tornasse realidade.