

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

MATHEUS BERNAUD COGO

**TECNOLOGIA DE COBERTURAS E VEDAÇÕES VERTICAIS EM
ETILENO TETRAFLUOROETILENO (ETFE) APLICADO À
CONSTRUÇÃO CIVIL**

Porto Alegre

Dezembro 2021

MATHEUS BERNAUD COGO

**TECNOLOGIA DE COBERTURAS E VEDAÇÕES VERTICAIS EM
ETILENO TETRAFLUOROETILENO (ETFE) APLICADO À
CONSTRUÇÃO CIVIL**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientadoras:
Lais Zuchetti
Dóris Zechmeister
Fernanda Lamego Guerra**

Porto Alegre
Dezembro 2021

MATHEUS BERNAUD COGO

**TECNOLOGIA DE COBERTURAS E VEDAÇÕES VERTICAIS EM
ETILENO TETRAFLUOROETILENO (ETFE) APLICADO À
CONSTRUÇÃO CIVIL**

Este trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título
de ENGENHEIRO CIVIL

Porto Alegre, dezembro de 2021

Prof.^a Lais Zuchetti
Dra. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul
Orientadora

Prof.^a Dóris Zechmeister
Dra. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul
Orientadora

Prof.^a Fernanda Lamego Guerra
Dra. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul
Orientadora

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Ana Paula Maran
UFRGS
Dra. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

Prof.^a Fernanda Pacheco
UNISINOS
Dra. pela Universidade do Vale do Rio
dos Sinos

Resumo

A construção civil está avançando cada vez mais na procura por sistemas construtivos aprimorados e inovadores, buscando aliar potencialidades e reduzir as restrições relacionadas à sua aplicação e desempenho. Como uma possível solução para revestimento de sistemas de coberturas e de vedações verticais externos (SVVE), o ETFE, uma lâmina de polímero plástico à base de flúor, tem atraído atenção por ser uma alternativa leve, translúcida, maleável e resistente. A lâmina de ETFE pode ser empregada em camadas simples ou múltiplas, de diversas formas geométricas, tamanhos e cores para se adaptar à estrutura desejada. Desta forma, este artigo tem como objetivo avaliar a tecnologia das membranas de ETFE para utilização em coberturas e sistemas de vedação verticais externos (SVVE). Esta avaliação comparativa das propriedades mecânicas, métodos construtivos, desempenho e sustentabilidade do ETFE com revestimentos similares utilizados e disponíveis no mercado é realizada através de revisão bibliográfica. Como potenciais benefícios de sua utilização, destacam-se seu elevado índice de transmissibilidade luminosa na faixa de 94-97% da luz visível, a sua natureza autolimpante, seu potencial reciclável e sua possibilidade de integração com sistemas alternativos de geração de energia. Como obstáculo a ser mitigado verifica-se o índice desfavorável de redução de som na faixa entre 8-10 dB que o material apresenta.

Palavras-chave: cobertura; construção civil; desempenho construtivo; ETFE; revestimento externo; sustentabilidade; tecnologia da construção; vedação vertical.

Abstract

The civil construction is increasingly advancing in the search for improved and innovative construction systems, seeking to combine potentialities and reduce restrictions related to their application and performance. As a possible solution for coating of external vertical sealing systems and roofs, ETFE, a fluorine-based plastic polymer sheet, has attracted attention as it is a light, translucent, flexible and resistant alternative in the construction sector. The ETFE sheet can be used in single or multiple layers, in different geometric shapes, sizes and colors in order to adapt to the desired structure. Thus, this article aims to evaluate the technology of ETFE membranes for its use in roofing and external vertical sealing systems. This comparative evaluation of the mechanical properties, construction methods, performance and sustainability of the ETFE with similar coatings used and available on the market is carried out through a literature review. As potential benefits of its use, its high light transmission index in the range of 94-97%, its self-cleaning nature, its recyclable potential and the possibility of integration with alternative energy generation systems stand out. An obstacle to be mitigated is the unfavorable sound reduction index in the range of 8-10 dB that the material represents.

Keywords: roof; civil construction; constructive performance; ETFE; external coating; sustainability; construction technology; vertical sealing.

1. Introdução

O papel das edificações consiste na adaptação do espaço, de modo a amenizar os efeitos dos fatores externos e prover um ambiente interno adequado. Contudo, é possível ter um aproveitamento dos aspectos positivos do ambiente externo a fim de se obter ganhos para o interno ao invés de isolá-lo, criando assim, uma associação entre os ambientes (ROBINSON-GAYLE *et al.*, 2001).

Com o intuito de tornar as edificações esteticamente agradáveis em contato com o ambiente externo, o vidro começou a ser utilizado em sistemas de cobertura (ABNT,

2021a) e de vedações verticais externos (SVVE) (ABNT, 2021b), os locais onde, com maior frequência, esta interação pode ocorrer. Entretanto, o uso do vidro conduz a inúmeros desafios, entre eles o uso de uma estrutura auxiliar que sustente seu peso próprio, limite de formatos devido à sua rigidez, a dificuldade em garantir a geometria dos cortes desejados, entre outros (KOWALSKI; PASTUSZKA; ROMAIN, 2016).

Como solução às limitações do vidro e com as inovações tecnológicas impulsionando o desenvolvimento de materiais, a utilização de polímeros plásticos oferece uma alternativa leve e de baixo custo à gama de materiais da construção civil (LAMNATOU *et al.*, 2018). Um dos materiais que têm sido aplicado amplamente é um plástico à base de flúor conhecido como ETFE, abreviação de etileno tetrafluoroetileno, uma lâmina de polímero utilizada em sistemas de coberturas e fachadas que necessitam de soluções leves, translúcidas, maleáveis e resistentes. Este material foi desenvolvido para apresentar comportamento estrutural, térmico, energético, sonoro, lumínico e sustentável de comparável ou melhor qualidade ao vidro e a outros modelos de revestimento disponíveis no mercado (HU *et al.*, 2017).

O ETFE foi primeiramente utilizado na construção em 1982 como material de reposição de um defeituoso polímero previamente existente na cobertura do *Burguer's Zoo Mangrove Hall* em Arnhem, Holanda (Figura 1) (LECUYER, 2008). A partir disso, foi ganhando popularidade com a sua utilização e se espalhando por todos os continentes.

Figura 1: Burguer's Zoo Mangrove Hall



Fonte: (ARCHIEXPO, 2021)

Em 2001, o material teve sua primeira aparição em larga escala como a membrana encapsulante do *Eden Project* em Cornwall, Reino Unido (Figura 2), uma concepção de biosfera em ambiente controlado. O ETFE foi selecionado devido à capacidade de regular as condições ambientais na edificação através da transparência aos raios UV, possibilitada pela utilização de múltiplas camadas em padrões específicos de impressão, tornando o local propício para abrigar a flora específica daquele clima (LYNCH, 2019). Da mesma forma, um grande percentual dos painéis do polímero é controlado para regular a pressão, que varia de 250 Pa a 400 Pa, garantindo a devida adaptação às condições climáticas (CHARBONNEAU; POLAK; PENLIDIS, 2014).

Figura 2: Eden Project



Fonte: (LYNCH, 2019)

Uma das obras mais famosas a utilizar o ETFE é o *Water Cube* em Beijing, China (Figura 3). Utilizado amplamente para esportes aquáticos nos jogos Olímpicos de 2008, este complexo esportivo é revestido com mais de 3.000 bolhas de ETFE, constituído de uma estrutura dupla de almofadas do polímero separadas por uma larga cavidade de ar, servindo para controle térmico das camadas (XIANG *et al.*, 2017). Durante à noite, luzes de LED iluminam as bolhas, criando diferentes padrões.

Figura 3: Water Cube



Fonte: (STARR, 2008)

Uma das tipologias onde mais se utiliza o ETFE são os estádios, podendo ser empregado como sistema de vedação vertical e de cobertura. Um exemplo recente desta utilização é o novo *U.S. Bank Stadium* em Minneapolis, Estados Unidos (Figura 4), inaugurado em 2016, onde a utilização do polímero possibilitou que o Super Bowl (a final do Futebol Americano no país) fosse realizado numa cidade de clima predominantemente gelado para a época (-14°C a -3°C). Como um importante fator está a cobertura de 60% do estádio em ETFE, combinando aquecimento solar térmico, luz natural e reduzindo a demanda de energia, de iluminação artificial, climatização interna e a utilização de mais de 2.000 toneladas de aço. Sua cobertura assimétrica e angular foi projetada para remover o excesso de neve, onde o “reservatório de calor” armazenado nas camadas do polímero condensam a mesma (WILLIAMS, 2018).

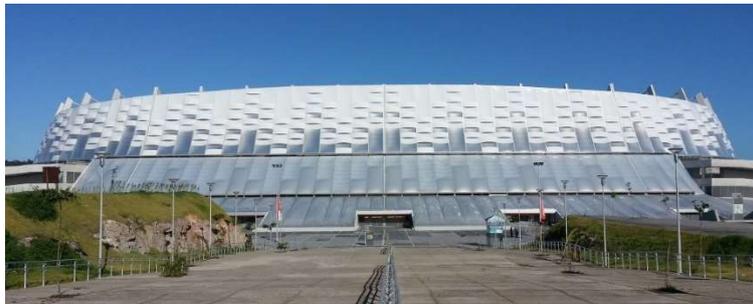
Figura 4: US Bank Stadium



Fonte: (VECTOR FOILTEC, 2021a)

A primeira utilização do ETFE na América Latina ocorreu na Arena Pernambuco em São Lourenço da Mata, Brasil (Figura 5), como palco da Copa do Mundo de 2014. A fachada lateral é composta por um sistema de almofadas pneumáticas de ETFE medindo 5m x 15m presas às bordas por perfis de alumínio (REVISTA PROJETO, 2020). De acordo com o escritório de arquitetura que projetou o estádio (FERNANDES, 2013), foram utilizadas lâminas transparentes e opacas bem como padrões de impressão para permitir um controle diversificado de iluminação natural no interior do estádio. Além disso, na fachada constam aberturas que permitem o aproveitamento de ventilação natural, contribuindo para o conforto térmico interno, uma vez que o estado de Pernambuco apresenta clima com muito sol e calor o ano todo.

Figura 5: Fachada lateral da Arena Pernambuco



Fonte: (REVISTA PROJETO, 2020)

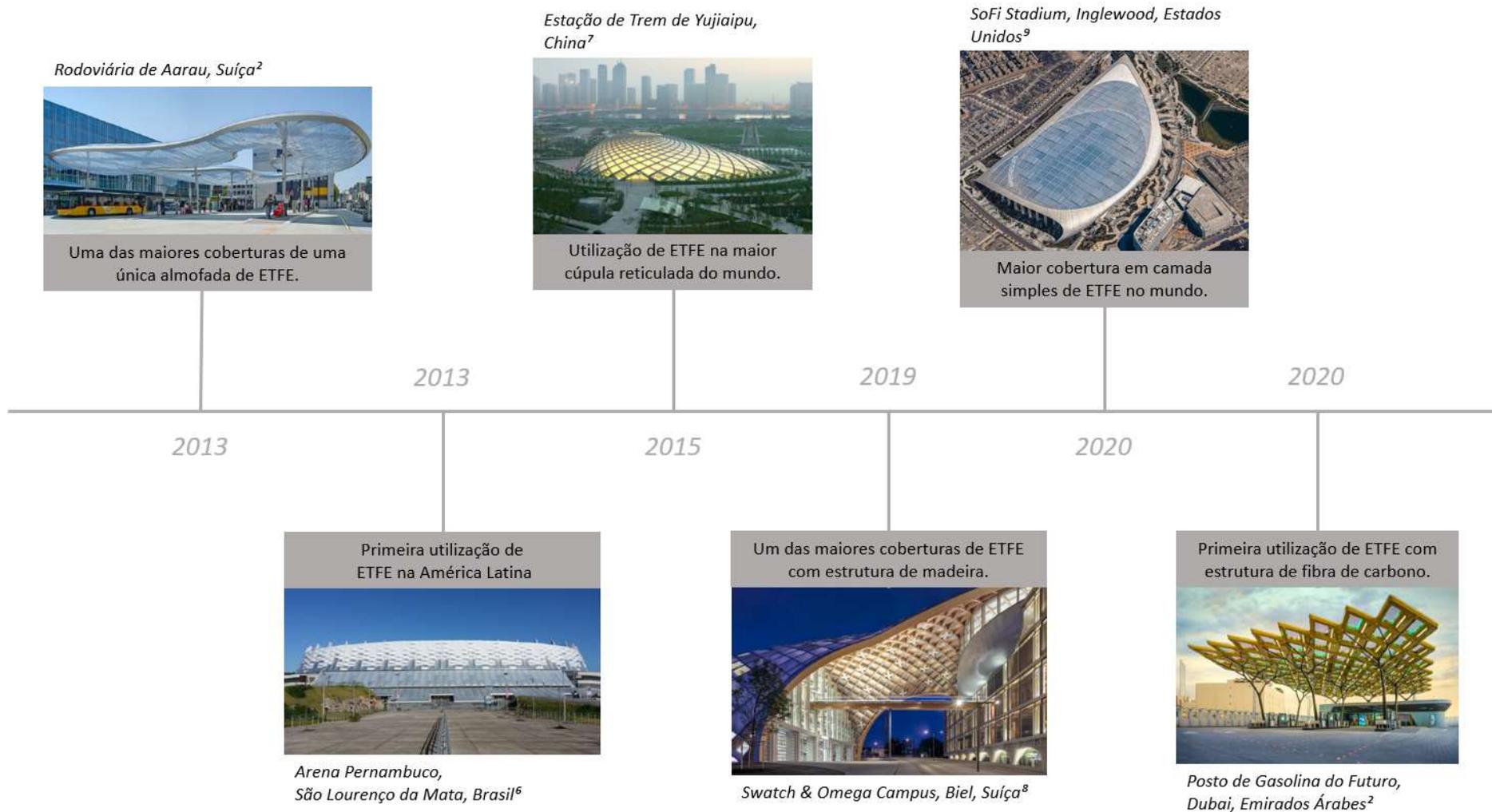
Atualmente, o ETFE é considerado um dos materiais mais inovadores na construção civil e no ramo de estruturas leves, com a criação de edificações das mais variadas e não usuais formas geométricas (DUNN, 2015) (Figuras 6 e 7). Ao mesmo tempo, este material é reconhecido pelas suas propriedades, técnicas construtivas, desempenho e sustentabilidade. Contudo, por se tratar de um material de construção inovador, a correta compreensão de suas características e a identificação de suas limitações torna-se crucial para justificar a viabilidade da sua utilização. Este artigo tem o objetivo de avaliar, através de revisão bibliográfica, a tecnologia das membranas de ETFE para utilização em sistemas de vedação verticais externos (SVVE) e sistemas de coberturas, comparando-as a outros revestimentos similares utilizados e disponíveis no mercado.

Figura 6: Linha do tempo de construções em ETFE parte 1



Fonte: Adaptado de ¹(ARCHIEXPO, 2021); ²(VECTOR FOILTEC, 2021b); ³(LYNCH, 2019); ⁴(CORRÊA, 2019); ⁵(STARR, 2008)

Figura 7: Linha do tempo de construções em ETFE parte 2



Fonte: Adaptado de ²(VECTOR FOILTEC, 2021b); ⁶(REVISTA PROJETO, 2020); ⁷(BDIR, 2015); ⁸(ARCHITONIC, 2019); ⁹(JACKSON, 2021)

2. Propriedades do Material

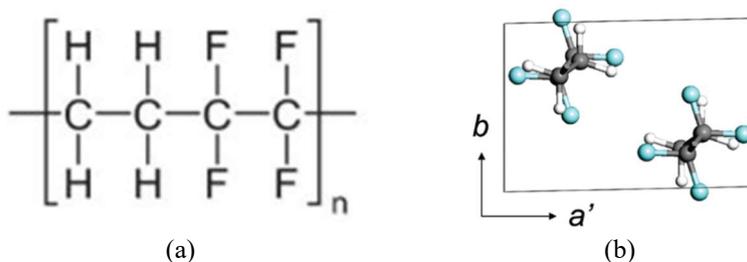
Com base na Norma para edificações habitacionais NBR 15575-5¹ (ABNT, 2021a), a cobertura de uma edificação deve apresentar níveis mínimos de desempenho, como: controlar os fluxos de calor, lumínico e acústico; garantir durabilidade, manutenibilidade, estanqueidade e salubridade no ambiente habitável; oferecer segurança na operação, integridade estrutural e proteção da chuva dirigida, neve, granizo, poeira, poluentes, alérgenos, pragas, entre outros.

Vários são os materiais que podem ser utilizados nos sistemas de coberturas de edificações, entre eles, inclui-se o ETFE. Para tal propósito, as produções do polímero começaram a ser desenvolvidas em 1973, inicialmente com o intuito de servir para isolamento de fios e cabos (TENG, 2012). Foram empregadas polimerizações de pequenas moléculas para construir longas cadeias moleculares do material, tornando-se no fim o etileno tetrafluoroetileno, um copolímero composto de 25% Etileno e 75% Teflon. Todo o processo de manufatura é à base d'água, sem solventes e aditivos (ROBINSON, 2005).

2.1. Características Físico-Químicas

O ETFE possui uma cadeia molecular ortorrômbica em formato de 4 planos em alternância entre si com uma natureza paracristalina (Figura 8) (FUNAKI; PHONGTAMRUG; TASHIRO, 2011; TANIGAMI et al., 1986). Por esta razão, a película de ETFE não se deteriora, descolore ou endurece ao longo de sua vida útil superior a 30 anos, ao passo que suas propriedades antiaderentes e sua resistência química contra ácidos e alcalinos a torna um material autolimpante (HU *et al.*, 2017).

Figura 8: a) Cadeia molecular do ETFE; b) Estrutura ortorrômbica do ETFE



Fonte: (CHARBONNEAU; POLAK; PENLIDIS, 2014); (HU *et al.*, 2017)

A utilização de ETFE na construção diminui a quantidade de aço e alumínio necessária para apoiar os revestimentos, quando comparada a utilização do vidro, por exemplo. As almofadas de ETFE pesam em média 0,45kg/m², enquanto uma lâmina de vidro de 6mm de espessura pesa cerca de 14,70 kg/m² (CANDEMIR, 2003). Considerando as estruturas que suportam estes materiais, a utilização deste polímero pesa de 100 a 250 vezes menos do que uma cobertura em vidro (HU *et al.*, 2017).

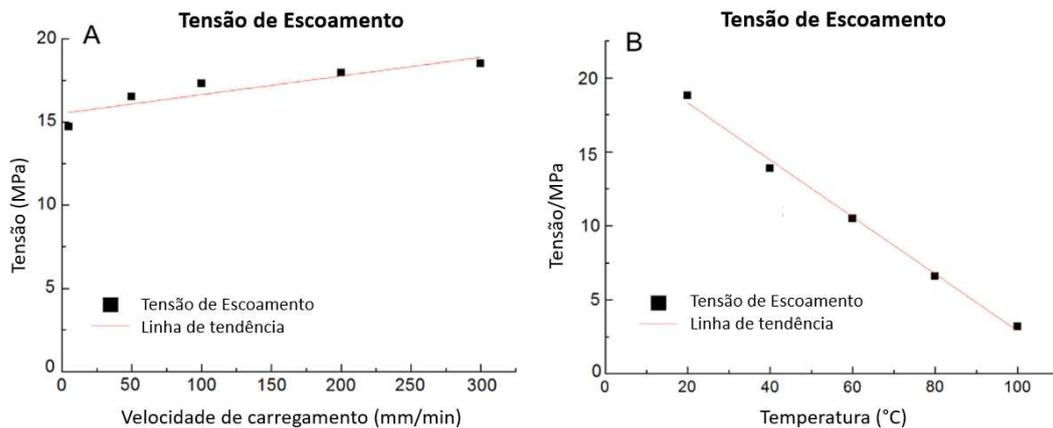
¹ Por mais que a NBR 15575 (ABNT, 2021c) seja uma norma referente à avaliação dos requisitos mínimos de desempenho para edificações habitacionais, ela é a única norma brasileira disponível para este material.

2.2. Características Mecânicas

A forte ligação química entre os dois polímeros coexistentes em sua cadeia molecular oferece fraca gravitação intermolecular e emaranhamento de partículas. Este último fenômeno é o causador do comportamento viscoso e plástico do material que, por sua vez, possui tensão de escoamento e módulo de elasticidades dependentes da taxa de deformação. Além disso, devido às propriedades de viscosidade do material, foi comprovado que suas propriedades mecânicas dependem da temperatura e das velocidades e modos de carregamento (HU *et al.*, 2017).

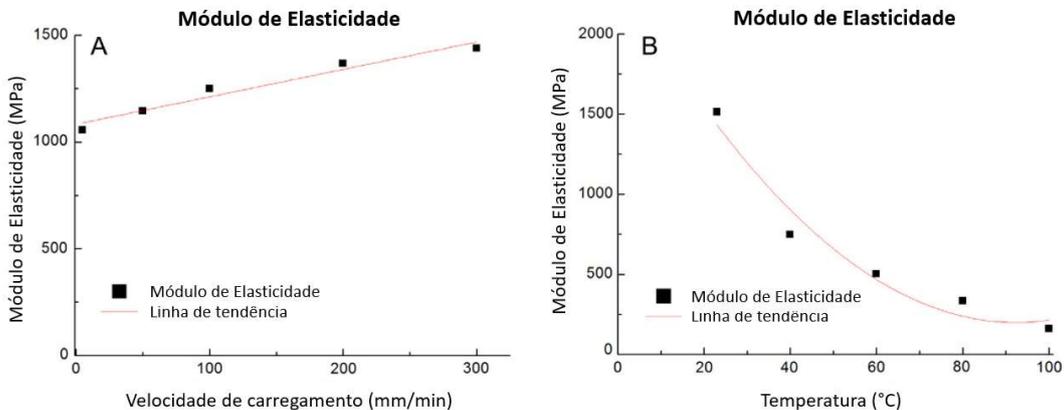
Devido a este último fato, uma série de testes de tração uniaxial sob uma ampla faixa de temperaturas e velocidades de carregamento foram realizados por Hu *et al.* (2015). Nestes testes, verificou-se que a tensão de escoamento e o módulo de elasticidade diminuem com o aumento da temperatura e crescem com o aumento da velocidade de carregamento (Figuras 9 e 10). Porém, a diferença para os valores encontrados na temperatura é de uma taxa quatro vezes maior em relação à diferença na velocidade de carregamento. Isso indica que o efeito da temperatura nas propriedades mecânicas é maior do que a velocidade de carregamento em condições normais de trabalho.

Figura 9: Tensão de Escoamento x (A) Velocidade de Escoamento e (B) Temperatura



Fonte: Adaptado de (HU *et al.*, 2015)

Figura 10: Módulo de Elasticidade x (A) Velocidade de Escoamento e (B) Temperatura



Fonte: Adaptado de (HU *et al.*, 2015)

Uma pesquisa realizada pelo Laboratório DSET em Phoenix, Estados Unidos, teve como base testes de tração de ETFE, num intervalo de tempo de 10 anos, exposto ao ambiente árido do estado do Arizona. Foi constatado que a exposição a altos índices de radiação solar e temperatura teve influência de no máximo 12% nas propriedades de tração da membrana (MORITZ, 2007).

Além disso, algumas propriedades mecânicas do ETFE estão demonstradas no Quadro 1. As faixas de valores a serem encontrados são indicativas da variabilidade das propriedades das lâminas de ETFE disponíveis no mercado.

Quadro 1: Propriedades Mecânicas do ETFE

Características Gerais	Valores
Resistência à Tração	44 MPa - 53 MPa
Resistência ao Escoamento	20 MPa - 30 MPa
Resistência ao Cisalhamento *	400 MPa - 440 MPa
Módulo de Elasticidade	300 MPa - 1000 MPa
Alongamento na ruptura	150% - 600%
Temperatura de Fusão	265°C - 278°C
Temperatura máxima de serviço	150°C
*Depende do formato, orientação e velocidade de carregamento da força	

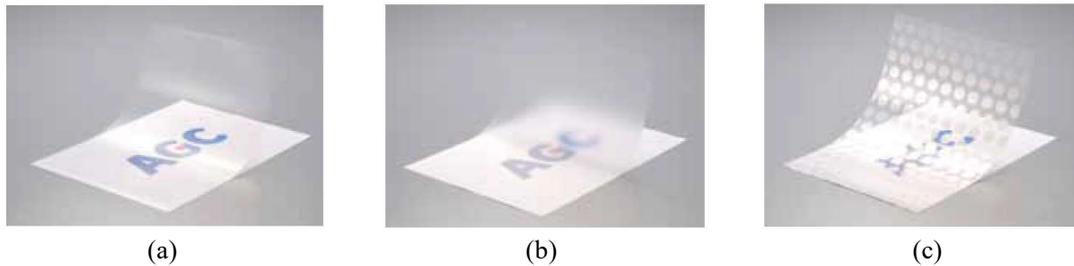
Fonte: Adaptado de (CHARBONNEAU; POLAK; PENLIDIS, 2014)

3. Tecnologia da Construção

Durante a sua fabricação, a lâmina de ETFE é extrudada através de uma matriz para enfim ser produzida com uma espessura de 30 a 300 µm e largura de 1,2 a 2,2m (HU *et al.*, 2017). A lâmina pode ser fabricada em três tipos de produtos: lâmina transparente, lâmina translúcida ou lâmina impressa com um design gráfico (Figura 11). Além disso, a mesma pode ser produzida em cores, adicionando pigmentos ao material durante o processo de fabricação. A fabricação de ETFE ainda é bastante especializada, onde os fabricantes geralmente fornecem todo o sistema de revestimento e supervisionam a produção e montagem do material no canteiro de obras (ROBINSON, 2005). Os mesmos estão espalhados por 4 continentes:

- América do Norte: Big Span Structures (EUA), Dünn (EUA), Textile Coated (EUA), Durandal (México);
- América do Sul: Cidelsa (Peru);
- Ásia: Ningbo Wanhao (China), BDIR (China);
- Europa: Vector Foiltec (Alemanha), IASO (Espanha), Canobbio (Itália), AGC Chemicals Europe (Reino Unido).

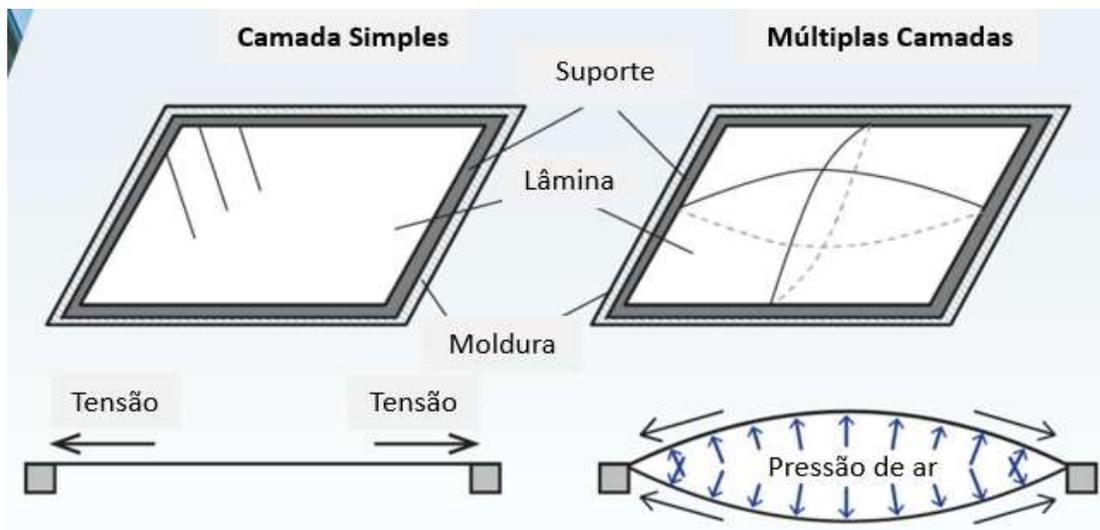
Figura 11: a) Lâmina de ETFE transparente; b) Lâmina de ETFE translúcida; c) Lâmina de ETFE com impressões



Fonte: (AGC, 2018)

O ETFE pode ser utilizado em uma camada única esticada entre dois suportes ou em múltiplas camadas de retenção de ar para criar uma almofada (Figura 12). Para ambos os casos, o material requer um processo de pré-tensionamento para que o filme transfira as cargas impostas por meio de tensão, a fim de não ocorrerem dobras (ROBINSON, 2005).

Figura 12: Exemplos de utilização da membrana de ETFE

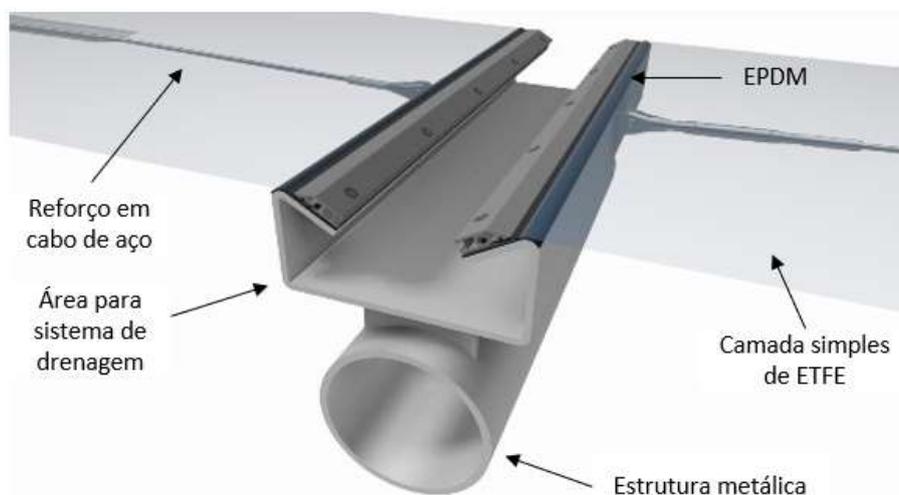


Fonte: Adaptado de (BROWNELL, 2021)

3.1. Camada Simples

Revestimentos externos em camada única de ETFE são suportados por uma estrutura primária, tensionada mecanicamente e presa às bordas do painel (Figura 13). Os painéis de camada simples, por suportarem cargas apenas com a resistência do material, são menores do que os painéis de múltiplas camadas que possuem auxílio da pressão interna das camadas controladas pneumaticamente. Por ser limitado pela capacidade de carga do material, o tamanho de cada painel de ETFE simples é de aproximadamente 1,5m, sendo utilizados para cobrir pequenas superfícies (PAVLOVIC; DJORIC-VELJKOVIC; KARAMARKOVIC, 2018).

Figura 13: Estrutura de Camada Simples de ETFE



Fonte: (BIG SPAN, 2021)

Um exemplo de construção em painel simples é a *Estação Central de Bonde de Piotrkowska* em Lódz, Polônia (Figura 14). A instalação do revestimento em painéis de membrana colorida foi comparativamente mais fácil do que a montagem dos painéis de vidro anteriormente previstos. As lâminas foram entregues em rolos que, uma vez posicionados em seu local designado, foram fixados em extrusões de alumínio presos ao longo da estrutura de aço da cobertura, vedadas com borracha EPDM (Etileno-Propileno-Dieno) para garantir estanqueidade (KOWALSKI; PASTUSZKA; ROMAIN, 2016) e tensionados a uma força de 7,5MPa (MORITZ; SIDE, 2021).

Figura 14: Estação Central de Bonde de Piotrkowska

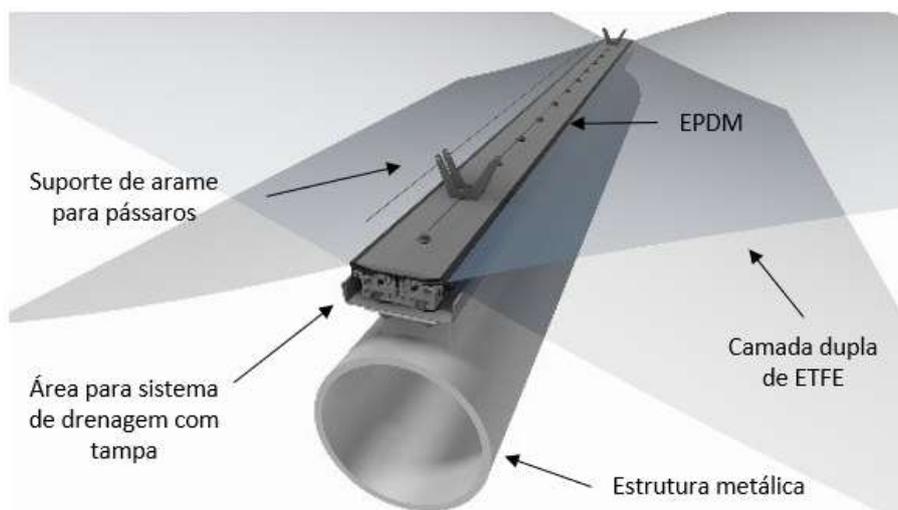


Fonte: (KOWALSKI; PASTUSZKA; ROMAIN, 2016)

3.2. Múltiplas Camadas

O conjunto de múltiplas camadas de ETFE é criado a partir da conexão por solda das extremidades de duas a cinco lâminas de ETFE ao redor de seu perímetro (Figura 15). As almofadas são recebidas esvaziadas no local de trabalho para então serem desdobradas, montadas em suas molduras de alumínio para enfim serem fixadas na estrutura primária, vedadas com EPDM para garantir estanqueidade e infladas (MONTICELLI; CAMPIOLI; ZANELLI, 2009). As estruturas podem ser fornecidas com suporte de arame de proteção contra perfurações ocasionadas por pássaros (WILSON, 2013).

Figura 15: Estrutura de Múltiplas Camadas de ETFE



Fonte: (BIG SPAN, 2021)

As almofadas de ETFE possuem vãos virtualmente ilimitados em sua direção mais longa graças à capacidade de transporte em rolos. Em sua direção mais curta, verifica-se a existência de vãos máximos que variam de 3,5m a 5m. Quando no formato circular, possui diâmetro máximo de 11m. Vãos ainda maiores podem ser alcançados com o devido uso de sistemas de suporte estrutural secundários, como redes de cabos. Em contrapartida, os painéis de vidro são limitados a vãos de 3,3m por aproximadamente 16m. (CHARBONNEAU; POLAK; PENLIDIS, 2014).

O sistema de insuflação de ar das almofadas de ETFE consiste em dois ventiladores, um em funcionamento e outro reserva, que filtram o ar, bombeiam e controlam a pressão, temperatura e umidade do ar dentro das camadas (Figura 16). Estes ventiladores são alimentados por motores elétricos de baixa potência e operam com 50% da capacidade a 50W, pressurizando 1000m² de área de almofadas (MONTICELLI; CAMPIOLI; ZANELLI, 2009). A pressão interna das camadas é geralmente de 200Pa a 750Pa.

Figura 16: Mecanismo de insuflação das almofadas de ETFE



Fonte: Adaptado de (BIG SPAN, 2021)

O sistema de insuflação pode ser conectado a sensores que controlam ativamente o ventilador para se adaptar a diferentes situações de carga. Durante tempestades de neve ou vento forte², os sensores podem aumentar automaticamente a pressão das camadas para até 1000Pa a fim de suportar a carga adicional (ROBINSON, 2005). Em caso de falha do sistema de abastecimento, a pressão das camadas é mantida de 3 a 6 horas devido ao uso de válvulas de retenção (WILSON, 2013).

3.3. Manutenção

O atributo de autolimpeza do ETFE é interessante quando se considera os custos de manutenção da limpeza de uma grande área de revestimento externo. A membrana de ETFE é uma versão modificada do Teflon e, como resultado, é anti-adesivo. Poeira, microrganismos e depósitos minerais da neve ou da água da chuva permanecem soltos na superfície da lâmina e são removidos naturalmente pela chuva. Por outro lado, a face interna das almofadas não se beneficia da limpeza propiciada pela água da chuva, portanto precisa de limpeza em períodos que variam de 5 a 10 anos (ROBINSON, 2005).

Embora o ETFE não possa ser quebrado como o vidro, ele pode ser perfurado por objetos pontiagudos. Seu reparo é realizado soldando a membrana por calor no local danificado. Curiosamente, a lâmina tem considerável resistência à propagação de rasgos, logo, um furo irá penetrar na camada da folha, mas não continuará em seu perímetro (PAVLOVIC; DJORIC-VELJKOVIC; KARAMARKOVIC, 2018).

O ETFE é resistente ao intemperismo, como luz ultravioleta e poluição. Portanto, quando exposto a estes elementos, não sofre degradação química ou física, mantendo sua resistência (ROBINSON, 2005).

Manter um nível de pressão de ar constante dentro das camadas de ETFE é fundamental para o funcionamento estrutural da cobertura, sendo importante a manutenção das conexões entre as almofadas. O controle das concentrações de tensão nas juntas auxiliará na manutenção da vida útil da estrutura (ROBINSON, 2005).

Por fim, as almofadas podem ser facilmente substituídas ou reparadas e não requerem acesso dentro da estrutura, logo, a manutenção pode ser realizada externamente. Se eventualmente for necessário substituir todo o painel que sustenta a almofada, seu baixo peso permite que seja substituído sem a necessidade de andaimes ou equipamentos de elevação. Além disso, realizar a manutenção da cobertura com os trabalhadores não é complexo, pois as almofadas podem suportar o peso do tráfego de pedestres (PAVLOVIC; DJORIC-VELJKOVIC; KARAMARKOVIC, 2018).

4. Aspectos de Desempenho

Os aspectos de desempenho, conforme preconiza a NBR 15575 (ABNT, 2021c), são geralmente atendidos pela correta especificação dos materiais quanto ao atendimento aos

² A norma NBR 15575-5 (ABNT, 2021a) aborda os requisitos mínimos sobre ensaio de arrancamento em sistemas de cobertura. Porém, estudos não são claros e divergem sobre a capacidade de resistência do ETFE em cargas de sucção ao vento. Logo, tornam-se necessários estudos futuros relacionando o material a este modelo de ensaio.

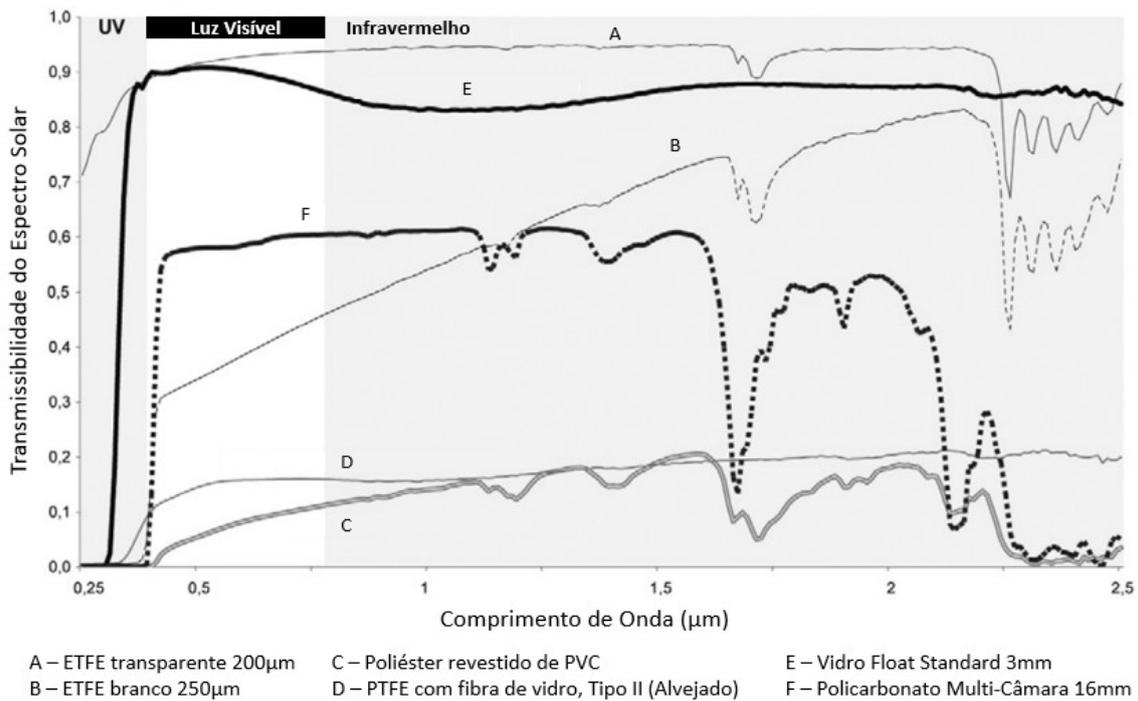
requisitos de luminosidade, energia termal, acústica, segurança e sustentabilidade. Por conseguinte, esta seção apresenta uma análise detalhada do desempenho construtivo do ETFE de forma a compreender o seu comportamento aos diferentes tópicos abordados.

4.1. Desempenho Lumínico

Por meio da manipulação bem planejada de luz, sombra e contraste, um ambiente pode ser criado com as informações necessárias para uma melhor percepção e comunicação visual entre o interior e o exterior de uma construção (LAU *et al.*, 2016).

Com este intuito, as características ópticas do ETFE oferecem múltiplas alternativas construtivas. O polímero apresenta alta translucidez ao transmitir 83-88% da faixa de raios UV (300-380nm) e até 94-97% da luz visível (380-780nm), sendo mais transparente comparado a um vidro de 6mm que transmite no máximo 89% (ROBINSON, 2005), como demonstrado na Figura 17. Este desempenho na transmissão de luz que quase se aproxima da luz natural é vantajoso para estufas e jardins botânicos e pode ser muito bem utilizado em edificações que desejam tornar seu ambiente interno mais agradável, como shoppings, estádios e ginásios (LAMNATOU *et al.*, 2018).

Figura 17: Transmissão luminosa de diferentes materiais

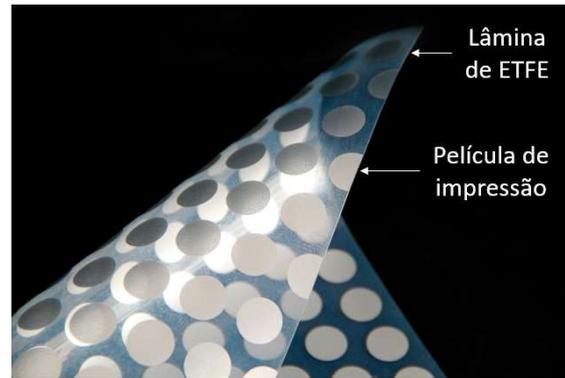


Fonte: Adaptado de (CREMERS, 2011)

É uma característica dos materiais transparentes que, além de permitirem a entrada da luz nos ambientes internos, deixam adentrar calor (ROBINSON-GAYLE *et al.*, 2001), podendo ser indesejável para alguns ambientes, ao passo que a alta transmissão de luminosidade pode ser prejudicial à saúde humana, visto que o polímero permite passar mais de 80% dos raios UV. Para tal ocasião, diferentes métodos de aplicação do polímero podem ser adotados. Para controle da iluminação e da radiação solar, um recurso é a impressão nas lâminas do polímero, sendo empregada atualmente em quase todas as

instalações de revestimento em ETFE (Figura 18). O uso de lâminas coloridas de ETFE em combinação com impressão adicional e um maior número de camadas expande o potencial para maior controle solar e abre uma gama ainda mais ampla para ajustar os sistemas de revestimento de acordo com os requisitos locais relacionados ao projeto (MAYWALD, 2019).

Figura 18: Lâmina de ETFE com películas de impressão



Fonte: Adaptado de (BIG SPAN, 2021)

Um exemplo disso é o *The Avenues Mall* em Kuwait City, Kuwait (Figura 19), um shopping coberto por 100.000m² de ETFE que possui um sistema de 3 camadas de 200µm, 80µm e 200µm de espessura respectivamente e uma tinta de opacidade média impressa na superfície interna da lâmina superior em um padrão de matriz hexagonal de 7mm cobrindo 84% da área da cobertura. Este sistema garante uma redução da transmissibilidade para 16% de raios UV e 21% da luz visível (MAYWALD, 2019).

Figura 19: The Avenues Mall



Fonte: (MAYWALD, 2019)

Um estudo foi realizado por Liu et al. (2016) para se obter o valor de radiação solar absorvida, transmitida e refletida comparando diversos tipos de ETFE com alguns tipos de membranas, como PTFE (Politetrafluoroetileno), TPO (Polioléfina Termoplástica), PE (Polietileno) e PVC (Policloreto de Vinila). Ao mesmo tempo, foram medidas as temperaturas de placas de aço inseridas dentro de um cubo cujas faces eram revestidas por alguns modelos destes materiais. Os resultados podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1: Coeficientes de radiação solar e temperatura do aço em coberturas de membranas

Membrana	Espessura (mm)	Cor	Impressão (%)	Transmissão (%)	Reflexão (%)	Absorção (%)	Temperatura do Aço (°C)		
							Fechado	2 Faces abertas	
ETFE	Simples	0,25	Incolor	0%	80%	8%	12%	99,9	67,9
	Simples	0,25	Azul Claro	0%	70%	9%	21%	-	-
	Simples	0,25	Incolor	63%	32%	37%	30%	75,7	54,8
	Simples	0,25	Incolor	80%	16%	52%	32%	68,1	50,3
	Camada dupla	0,50	Incolor	0%	69%	15%	16%	-	-
	Camada tripla	0,75	Incolor	0%	57%	20%	23%	-	-
	Camada tripla	0,75	Incolor	63%-63%-0%	10%	50%	40%	69,2	43,4
	Camada tripla	0,75	Incolor	63%-63%-46%	7%	52%	41%	65,2	41,2
	Simples*	0,25	Prata	100%	5%	61%	34%	-	-
	Camada dupla*	0,50	Incolor	100%	2%	61%	37%	-	-
Camada tripla*	0,75	Incolor	100%	1%	62%	37%	-	-	
PTFE	FGT-250D-2	0,25	Branco	-	24%	62%	14%	-	-
	B18089	1,20	Marrom	-	2%	60%	38%	45,5	42,1
TPO	1,20	Branco	-	0%	81%	19%	-	-	
PVC-PVDF	1,00	Branco	-	3%	87%	10%	-	-	
PE	0,08	-	-	74%	8%	18%	87,7	61,7	
*Teste realizado somente na película de impressão						Exposto direto ao sol	63,5	62,8	
						Temperatura ambiente	32,0	34,0	

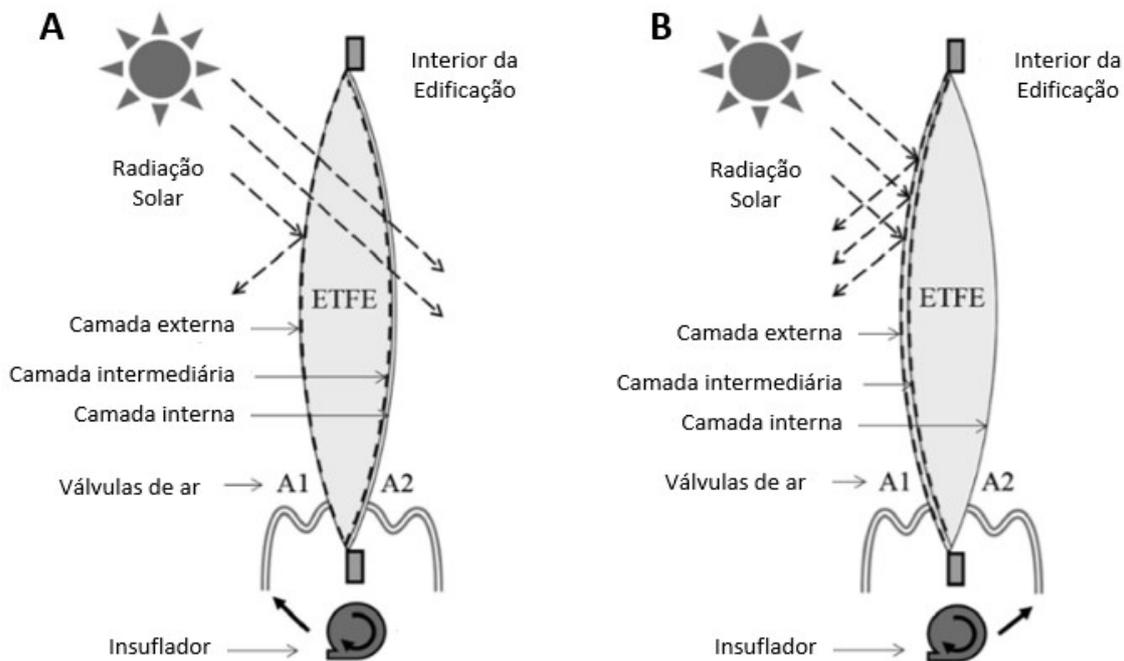
Fonte: Adaptado de (LIU *et al.*, 2016).

Com base nos resultados do estudo apresentado na Tabela 2, pode-se concluir que:

- As transmissões da radiação solar do PTFE, PVC e TPO são menores, enquanto o ETFE simples sem impressão e do PE são maiores (LIU *et al.*, 2016);
- Os pontos de impressão auxiliam na diminuição da transmissão de radiação solar do ETFE, sendo modificado pelas suas diferentes proporções. O mesmo vale para o número de camadas (quanto mais camadas, menor a transmissão) (LIU *et al.*, 2016);
- A diferença entre a temperatura das placas de aço e a temperatura ambiente aumenta à medida que o valor de transmissão de radiação solar de cada membrana também aumenta (LIU *et al.*, 2016).

Uma solução inovadora para reduzir o ganho solar é usar almofadas de ETFE controladas remotamente, fornecendo uma solução de revestimento que reage às demandas de controle solar e transmissão de luz em resposta aos requisitos do cliente ou variações do ambiente externo. O sistema pode ser acionado para alternar os modos de operação por controles automatizados ou manuais. Um exemplo deste sistema pode ser produzido com três camadas contendo impressões opacas em que a camada intermediária alterna, cobrindo e descobrindo as camadas externas e internas de forma a criar um telhado com sombreamento adaptável que abre e fecha à passagem de luz (Figura 20), podendo transmitir 15% de raios UV e 26% de luz visível quando aberto e 5% de raios UV e 9% da luz visível quando fechado (MAYWALD, 2019).

Figura 20: Almofadas de ETFE com impressões controladas remotamente: A) Camada intermediária permitindo entrada de radiação solar; B) Camada intermediária bloqueando entrada de radiação solar



Fonte: (FLOR *et al.*, 2021)

Embora as lâminas de ETFE sejam muito transparentes, estudos ópticos relacionados à luminosidade revelam que camadas múltiplas quando infladas diminuem naturalmente a percepção visual em paralelo com a direção do olhar, logo uma imagem externa à edificação vista pelo público interno, não ficaria nítida (CANDEMIR, 2003).

4.2. Desempenho Térmico

A radiação solar que atinge a superfície da Terra tem uma faixa de comprimento de onda de 400nm a 2000nm. Quando a luz solar irradia um objeto, o mesmo absorve, reflete e transmite a radiação solar (LIU *et al.*, 2016).

As propriedades térmicas de uma edificação são aspectos importantes, pois afetam o desempenho térmico e a necessidade de utilização de fontes artificiais de energia para o adequado desempenho da construção. Um prédio bem isolado será mais fácil de aquecer e resfriar do que um prédio com isolamento inadequado (ROBINSON-GAYLE *et al.*, 2001).

As membranas são materiais em que seu peso gira em torno de 1kg/m², o que resulta em uma pequena capacidade de calor. O calor necessário para aumentar a temperatura do material da membrana por unidade de área em 1°C é cerca de 10% do painel de vidro de 1cm de espessura e 0,5% da parede de concreto de 20cm de espessura. Além disso a espessura das membranas é geralmente inferior a 1mm, gerando uma resistência térmica muito pequena (TIAN *et al.*, 2021).

A capacidade que um material possui de perder calor (W) em uma unidade de área (m²) a cada grau (K) é medida com o “Valor U”, referente à transmitância térmica em

(W/m².K), ou seja, quanto menor o seu valor, menos energia o material perde para o ambiente em forma de calor (CANDEMIR, 2003). À medida que há a possibilidade de utilização de múltiplas camadas em revestimentos de membrana, sua capacidade de isolamento térmico aumenta. Este é o caso das almofadas de ETFE, onde o ar preso entre as camadas torna o revestimento altamente isolante termicamente e, dependendo da quantidade de camadas, melhor ou similar ao vidro (Tabela 2). Ao mesmo tempo, à medida que são adicionadas mais camadas, o índice de isolamento aumenta e automaticamente o “Valor U” diminui (HU *et al.*, 2017).

Tabela 2: Transmitância de ETFE e Vidro e sua avaliação referente à NBR 15575 (ABNT, 2021c)

	Valor U (W/m ² .K)							
	ETFE					VIDRO		
	Nº de Camadas					Nº de Camadas		
	1	2	3	4	5	1	2	3
NBR 15575-5 (ABNT, 2021a)	5,60	2,94	1,96	1,47	1,18	6,30	3,20	1,90
NBR 15575-4 (ABNT, 2021b)	5,60	2,94	1,96	1,47	1,18	6,30	3,20	1,90

■ Atende à todas as zonas bioclimáticas
■ Atende às zonas bioclimáticas 3 a 8
■ Não atende ao requisito mínimo de desempenho da norma NBR 15575

Fonte: Adaptado de (ROBINSON, 2005); (WILSON, 2013).

Para atender aos níveis mínimos de desempenho dos materiais citados em relação aos critérios de avaliação referentes à norma NBR 15575 (ABNT, 2021c), em sistemas de cobertura, o valor mínimo da transmitância térmica é de 2,3W/m².K para todas as zonas bioclimáticas. Já para sistemas de vedação verticais externos (SVVE), a transmitância térmica mínima é de 2,7W/m².K para as zonas bioclimáticas 1 e 2, e de 3,7W/m².K para as zonas bioclimáticas 3 a 8. Ambos os níveis de desempenho dependem do índice de radiação solar do material e das zonas bioclimáticas brasileiras.

4.3. Desempenho Acústico

A acústica em estruturas com revestimentos externos em membranas é desafiadora pelas propriedades físicas leves dos materiais, sendo necessária atenção a propriedades como reflexão, absorção, transmissão e isolamento do som (HU *et al.*, 2017).

Uma fachada em membranas é descrita como acusticamente transparente, ou seja, não isolam ou absorvem quantidades significativas de energia sonora. Enquanto o vidro tem um índice de redução de som entre 29 dB e 41 dB, o ETFE encontra-se com o índice entre 8 dB e 10 dB (CANDEMIR, 2003). Isto é evidenciado pelo seu uso em baixas frequências (31,5 – 250 Hz), onde as lâminas de ETFE pré-tensionadas são 100% acusticamente transparentes e o som em baixa frequência pode passar diretamente pela membrana. Em frequências mais altas (250 – 8000 Hz), as lâminas de ETFE absorvem um máximo de 30% do som e a maioria é refletida de volta para o espaço (CHIU; NOBLE; VALMONT, 2015).

Estas características podem ser vistas de diferentes maneiras dependendo da construção. Se o edifício for uma biblioteca ao lado de uma rodovia ou estação de trem, a fachada em ETFE pode ser um problema pois o ruído seria transmitido internamente, mas se for um centro de lazer em um campo, esta é uma boa solução, pois o ruído interno é transmitido para fora ao invés de refletido (ROBINSON-GAYLE *et al.*, 2001).

Além disso, o ruído da chuva é uma limitação para as membranas, onde o impacto da mesma incidindo em uma fachada de ETFE pode causar um ruído de tambor dentro do espaço construído. Com o intuito de mitigar este impacto, pesquisas foram realizadas em uma estrutura de múltiplas camadas de ETFE e seus resultados mostram que a adição de materiais como TNT e gel de silicone (na camada superior interna e camada superior externa respectivamente) como absorvedores de choque pode ser a maneira mais eficaz na redução do ruído (TOYODA; TAKAHASHI, 2013).

Com base nos critérios de desempenho acústico referentes à norma NBR 15575 (ABNT, 2021c), tanto para coberturas quanto para sistema de vedação verticais externos (SVVE), o nível mínimo de desempenho de isolamento a ruído aéreo externo encontra-se entre 20 dB e 30 dB, dependendo da localização da habitação e da classe do ruído. Este resultado demonstra que para a norma brasileira, o ETFE não se encaixa aos requisitos mínimos de desempenho, dependendo assim da adição de materiais de mitigação de ruído para se adequar à norma.

4.4. Segurança Contra Incêndio

Um dos atributos da película de ETFE é o seu desempenho ao fogo. Devido ao flúor contido na sua estrutura molecular e ao seu baixo índice de oxigênio, em casos de incêndio, o ETFE é autoextinguível e permite que o fogo não se espalhe pela membrana (HU *et al.*, 2017).

A resistência ao fogo sem a possibilidade de ferimentos ao público, seja internamente ou no entorno da edificação, é uma vantagem do polímero em relação ao vidro. Este último não queima em condições de incêndio, portanto não há problemas relacionados a seus subprodutos, porém, se o fogo for intenso o suficiente, o vidro se estilhaçará (ROBINSON-GAYLE *et al.*, 2001). De acordo com Wang *et al.* (2014), a tensão crítica do vidro de 26,60 MPa sugere que os painéis de vidro são consideravelmente mais propensos a quebrar na faixa de temperatura de 75°C a 125°C.

Para o ETFE, ao invés de quebrar ou derreter, o material se encolhe quando exposto ao fogo (Tabela 3), permitindo que a fumaça e o próprio fogo sejam ventilados para o exterior, ou seja, quaisquer resquícios do material são levados pelos gases ventilados para fora (CHARBONNEAU; POLAK; PENLIDIS, 2014). Tal ventilação também evita que o aumento de calor possa causar uma explosão ou colapso das estruturas do edifício. Além disso, seu comportamento autoextinguível não justifica sua aplicação em projetos que contenham espaços compartimentados como forma de prevenção à propagação do fogo. Todavia, a lâmina de polímero produz gases tóxicos quando exposto a temperaturas acima de 800°C (HU *et al.*, 2017).

Tabela 3: Comportamento de diferentes materiais em altas temperaturas

	Temperatura de Uso*	Temperatura de Derretimento
ETFE	150°C	220°C - 270°C
PTFE	260°C	330°C
Vidro	75°C - 125°C	1200°C

*Amolecimento (ETFE e PTFE) ou estilhaçamento (Vidro)

Fonte: Adaptado de (WANG et al., 2014); (HUBER et al., 2009); (CANDEMIR, 2003)

Em relação à especificação de desempenho para dificultar a ocorrência da inflamação generalizada e não gerar fumaça excessiva capaz de impedir a fuga de ocupantes em situações de incêndio, de acordo com a norma EN 13501 (CEN, 2018), o ETFE é classificado como Classe B s1 d0. Fazendo a devida correlação com a norma NBR 15575 (ABNT, 2021b; ABNT, 2021a), o ETFE é especificado como Classe IIA, logo o material atende aos requisitos mínimos de desempenho em fachada³ e faces interna e externa de coberturas.

4.5. Sustentabilidade

Uma questão cada vez mais importante na engenharia é o impacto ambiental dos materiais de construção. Neste sentido, as lâminas de ETFE têm a capacidade de, em alguns aspectos, melhorar o desempenho ambiental das construções considerando dois pontos de vista: reduzindo a carga ambiental geral causada pelo processo de manufatura e construção e reduzindo a carga de energia necessária para operação da construção (HU et al., 2017).

4.5.1. Impactos e Ciclo de Vida

A utilização de almofadas de ETFE, comparado a outras alternativas como o vidro, reduzem a quantidade de aço e alumínio necessários para apoiar os revestimentos estruturais, como mencionado no item 2.1. Este fato, auxilia no conceito de energia incorporada, uma medida de sustentabilidade que indica a quantidade de energia usada para a utilização do material, desde a sua produção até a sua utilização. A energia incorporada de uma lâmina de ETFE é de 27MJ/m², enquanto o vidro seria 300MJ/m² (ROBINSON-GAYLE et al., 2001).

A natureza anti-adesiva do ETFE, por se tratar de uma versão modificada do Teflon, significa que o revestimento externo precisa ser limpo com menos frequência do que em revestimentos de vidro. Isso leva a uma redução no custo de manutenção (ROBINSON-GAYLE et al., 2001).

Um fator alto de transmissão de luz do polímero pode levar a uma menor necessidade de utilização de luz artificial para a operação da edificação, reduzindo o consumo de energia (ROBINSON-GAYLE et al., 2001). Porém, no caso de almofadas de ETFE,

³ De acordo com a NBR 15575-4 (ABNT, 2021b), os níveis mínimos de desempenho são atendidos pelas Classes I e IIB. Porém, em 2021, é abordada a inclusão da Classe IIA nestes critérios visto que esta classe possui requisitos melhores do que a Classe IIB.

tornam-se necessárias unidades de insuflação controlando continuamente a pressão do ar dentro das mesmas e requerem energia contínua para alimentar o suprimento de ar. Uma unidade geralmente é composta por dois motores, sendo um deles reserva, e opera com aproximadamente 50W a cada 1000m² (ROBINSON, 2005).

De acordo com estudos de Flüeler e Aller (2011), em termos de durabilidade, a lâmina de ETFE é relatada com boa resistência ao intemperismo pelo material ser 75% de Teflon, não possuindo redução notável no desempenho e com vida útil superior a 30 anos. Entretanto, destaca-se que construções que contém ETFE devem ser protegidas contra impactos de granizo, objetos pontiagudos e contra vandalismo a fim de não ocorrerem fissuras ou rasgos.

A reciclagem do ETFE é auxiliada pela ausência de aditivos no processo de manufatura. A lâmina pode ser removida de sua estrutura de alumínio e lavada. Assim que o material estiver limpo, ele pode ser reciclado e adicionado na produção do ETFE virgem. Esta reutilização é preferível ao aterro sanitário, pois existem pequenas chances de contaminação do solo pela liberação lenta de gás HF (Fluoreto de Hidrogênio) (ROBINSON-GAYLE *et al.*, 2001).

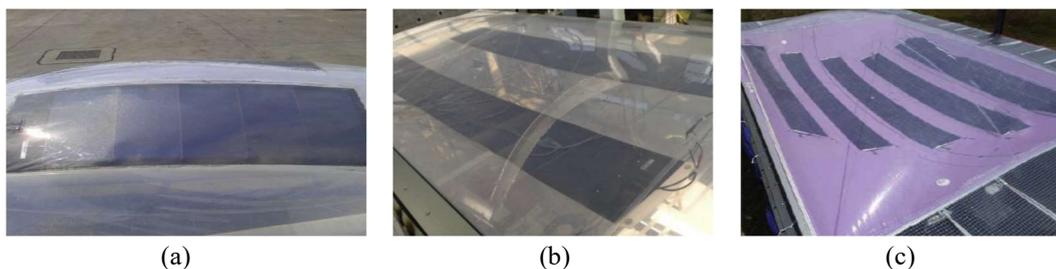
4.5.2. Alternativas Energéticas

Nos últimos anos, as construções sustentáveis tornaram-se mais atraentes devido ao aumento do uso de energias renováveis e à conscientização da demanda de desempenho das construções. Para atender estas demandas, as habilidades do ETFE podem ser aprimoradas com a adição de tecnologias avançadas (HU *et al.*, 2017).

Devido ao seu fechamento hermético, flexibilidade estrutural e alta transmissibilidade de luz superior a 90%, a integração de células fotovoltaicas com almofadas de ETFE torna-se viável, podendo ser utilizada energia solar para gerar eletricidade, melhorando, assim, o desempenho energético da edificação (HU; CHEN; SONG, 2016).

As células fotovoltaicas são utilizadas convencionalmente em estruturas de ETFE de 2 ou 3 camadas, onde a célula pode ser integrada na lâmina superior, do meio ou inferior, como visto na Figura 21. Ao mesmo tempo, somando-se múltiplas camadas de ETFE com uma célula fotovoltaica contida dentro de uma das camadas, a temperatura interna da almofada aumenta de tal forma que também pode ser possível armazenar energia termal. Dependendo da energia armazenada nas baterias solares, a energia utilizada para inflar a almofada e mantê-la em forma pode ser compensada e os edifícios em ETFE podem se tornar autossustentáveis (HU *et al.*, 2017).

Figura 21: a) ETFE de 2 camadas com célula fotovoltaica na lâmina superior; b) ETFE de 3 camadas com célula fotovoltaica na lâmina do meio; c) ETFE de 2 camadas com célula fotovoltaica na lâmina inferior



Fonte: (HU *et al.*, 2017)

Considerando estes fatos, Hu et al. (2016) apresentaram um trabalho sobre desempenho e viabilidade de CIPVT (*Cushion roof Integrated Photovoltaic Thermal - Cobertura em almofada com célula Fotovoltaica/Termal Integrada*) em uma almofada de tripla camada de ETFE. Os resultados mostraram que a eletricidade média armazenada na célula fotovoltaica contida na lâmina intermediária foi de 54,5W.h e a energia média utilizada foi de 42,9 W.h, garantindo um sistema eletricamente independente. Enquanto isso, a temperatura do ar medida dentro da almofada variou de 31,2°C a 67,8°C, sendo de 16,8°C a 31,0°C mais alta que a temperatura ambiente externa, mostrando um potencial atraente para a coleta de energia térmica. Como as temperaturas das lâminas superior e inferior foram menores que a intermediária, a resistência estrutural da camada de revestimento está dentro de valores satisfatórios. No entanto, algumas limitações devem ser observadas, pois as distribuições de tensão/deformação das almofadas de ETFE não foram investigadas neste estudo.

5. Impactos, Potencialidades e Restrições da Tecnologia de ETFE

O ETFE possui diversas características que possibilitam a sua utilização na construção civil. Para evidenciar estas informações, um quadro resumo foi elaborado referente à tecnologia do ETFE (Quadro 2). Particularidades relacionadas ao seu peso e valores de resistências estão apresentadas em propriedades mecânicas. Modo de fabricação, transporte e possibilidades de utilização em obra estão destacados em tecnologia da construção. O desempenho lumínico, térmico, acústico, contra incêndio e características relacionadas à sustentabilidade também foram destacadas no referido quadro. Ao mesmo tempo, foram incluídas comparações com vidro e outros tipos de membranas, como Policarbonato, PTFE, PE, PVC e TPO.

Quadro 2: Quadro comparativo da tecnologia do ETFE

CARACTERÍSTICAS	ETFE		Vidro
Propriedades do Material	<ul style="list-style-type: none"> A película não se deteriora, descolore ou endurece ao longo de sua vida útil; Peso médio de 0,45kg/m² quando utilizado em múltiplas camadas; Capacidade de redução da estrutura que a suporta em razão do seu baixo peso; Tensão de escoamento e módulo de elasticidade dependentes da temperatura e da variação da velocidade de carregamento; Resistência à tração de 44 MPa a 53 MPa; 	<ul style="list-style-type: none"> Resistência ao escoamento de 20 MPa a 30 MPa; Resistência ao cisalhamento de 400 MPa a 440 MPa; Módulo de elasticidade de 300 MPa a 1000 MPa; Alongamento na ruptura de 150% a 600%; Temperatura de fusão de 265°C a 278°C; Temperatura máxima de serviço de 150°C. 	<ul style="list-style-type: none"> Um exemplar de 6mm de espessura tem um peso médio de 14,70kg/m²; Possui uma estrutura de 100 a 250 vezes mais pesada que o ETFE para suportá-lo.
Tecnologia da Construção	<ul style="list-style-type: none"> Fabricação com espessuras de 30 a 300µm, largura de 1,2 a 2,2m e em lâminas transparentes, translúcidas, com pigmentação ou impressas com um design gráfico; Fabricantes fornecem o sistema de revestimento e supervisionam a produção e montagem do material no canteiro de obras; Utilização em camadas simples ou múltiplas (almofadas) de 2 a 5 lâminas; O ETFE é recebido em rolos, desdobrado, fixado em extrusões de alumínio perimetrais e vedado com EPDM. Acréscimo de insuflação para camadas múltiplas; Os painéis de camada simples possuem dimensões de aproximadamente 1,5m; Os painéis de múltiplas camadas, possuem vãos máximos de 11m de diâmetro ou 3,5m a 5m na sua direção mais curta e virtualmente ilimitados na sua direção mais longa; 	<ul style="list-style-type: none"> O sistema de insuflação controla a pressão, temperatura e umidade do ar dentro das camadas. Em caso de falha, a pressão é mantida de 3 a 6 horas por válvulas de retenção; A pressão interna das camadas é geralmente de 200 Pa a 750 Pa, podendo chegar a 1000 Pa a fim de suportar cargas adicionais; Material anti-adesivo, resultando em autolimpeza externa por água da chuva. Face interna das almofadas necessita de limpeza periódica de 5 a 10 anos; Possibilidade de perfuração por objetos pontiagudos, sendo o reparo feito por solda localizada. Possui considerável resistência à propagação de rasgos; Material de fácil manutenção manual, sem necessidade de andaimes ou equipamentos de elevação. 	<ul style="list-style-type: none"> Limitação de dimensões construtivas em vãos de 3,3m por aproximadamente 16m.
DESEMPENHO	ETFE		Comparações com outros materiais
	Potencialidades	Restrições	
Desempenho Luminico	<ul style="list-style-type: none"> Translucidez na faixa de 94-97% da luz visível quando utilizado em lâmina transparente; Mitigação da radiação solar por lâminas coloridas e/ou com impressões; Possibilidade de controlar a incidência de luminosidade remotamente quanto utilizado em múltiplas camadas. 	<ul style="list-style-type: none"> Transmissão de radiação solar na faixa de 83-88% quando utilizado em lâmina transparente; Possibilidade de diminuição de nitidez do ambiente externo quando visto do ambiente interno devido à sua curvatura. 	<ul style="list-style-type: none"> VIDRO: Translucidez na faixa de 89% da luz visível quando fabricado na espessura de 6mm; POLICARBONATO: Translucidez na faixa de 60% da luz visível; PTFE: Translucidez na faixa de 16% da luz visível; Transmissão de radiação solar na faixa entre 2-24%; PE: Translucidez entre 0-10% da luz visível; Transmissão de radiação solar de 74%; PVC-PVDF: Transmissão de radiação solar de 3%; TPO: Transmissão de radiação solar de 0%.
Desempenho Térmico	<ul style="list-style-type: none"> Permite isolamento adequado quando utilizado em múltiplas camadas (quanto mais, melhor) com Valor U de 1,18 W/m².K para 5 camadas. 	<ul style="list-style-type: none"> Em camada simples possui um índice insatisfatório de isolamento térmico com Valor U de 5,60 W/m².K. 	<ul style="list-style-type: none"> VIDRO: Capacidade de isolamento térmico similar ao ETFE de acordo com a quantidade de camadas.
Desempenho Acústico	<ul style="list-style-type: none"> Mitigação de ruídos externos e da chuva por absorvedores de choque; Transmissão de som de 30% em frequências de 250 Hz a 8000 Hz. 	<ul style="list-style-type: none"> Índice de redução de som (acusticamente transparente), entre 8 dB e 10 dB; Transmissão de som próximo de 100% em frequências de 31,5 Hz a 250 Hz; Chuva causa ruído de tambor internamente. 	<ul style="list-style-type: none"> VIDRO: Índice adequado de redução de som na faixa entre 29 dB e 41 dB.
Segurança contra Incêndio	<ul style="list-style-type: none"> Auto Extinguível; Quando exposto ao fogo, o material se encolhe, permitindo que a fumaça e o próprio fogo sejam ventilados para o exterior; Temperatura de uso (amolecimento) do material na faixa de 150°C. 	<ul style="list-style-type: none"> Produz gases tóxicos quando exposto à temperaturas superiores a 800°C; Outros tipos de membrana podem possuir melhor desempenho, como o PTFE. 	<ul style="list-style-type: none"> VIDRO: Quando exposto ao fogo, tende a estilhaçar; VIDRO: Temperatura de uso (estilhaçamento) na faixa de 75°C a 125°C; PTFE: Temperatura de uso em 260°C.
Sustentabilidade	<ul style="list-style-type: none"> Índice energético de 27MJ/m² desde a sua produção até sua utilização; Natureza anti-adesiva, menor frequência de uso de água para limpeza; Vida útil superior a 30 anos; Material reciclável após lavagem; Possibilidade de integração com sistema fotovoltaico e termal. 	<ul style="list-style-type: none"> Consumo de 50W devido à utilização de unidades de insuflação para bombeamento e controle da pressão do ar dentro das camadas a cada 1000m²; Possibilidade de danos à lâmina por granizo e objetos pontiagudos; Possibilidade de contaminação do solo caso haja despejo em aterro sanitário. 	<ul style="list-style-type: none"> VIDRO: Índice energético de 300MJ/m² desde a sua produção até sua utilização; VIDRO: Maior frequência de uso de água para limpeza.

Fonte: Autoria própria

6. Considerações Finais

O ETFE apresenta-se como uma possibilidade construtiva inovadora de modo a oferecer uma alternativa para sistemas de vedações verticais e de coberturas. Podendo ser empregado em camadas simples ou múltiplas, de diversas formas, tamanhos e cores, esta membrana apresenta características, propriedades e desempenho que justificam o emprego deste material.

Modelado inicialmente para ser um substituto ao vidro, o ETFE oferece maior potencial construtivo. Em grandes extensões, sua leveza permite uma redução significativa do peso da estrutura sem restringir o nível de estabilidade ao revestimento externo. Com base nas fontes estudadas (Quadro 3), seu desempenho lumínico, contra incêndio e sustentável apresentam níveis satisfatórios de execução construtiva. Ao passo que seu desempenho térmico e acústico, por mais que não sejam inadequados, deixam a desejar quando a membrana é aplicada em camada única, logo, depende de mais fatores para tornar-se satisfatório. Além disso, existe a preocupação com o comportamento do material em temperaturas acima de 800°C, uma vez que se torna suscetível à emissão de gases tóxicos.

Quadro 3: Mapa de Referências

Artigos	Temas Abordados																								
	CANDEMIR <i>et al.</i> , 2003	CHARBONNEAU; POLAK; PENLIDIS, 2014	FLÜELER; ALLER, 2011	FUNAKI; PHONGTAMRUG; TASHIRO, 2011	HU <i>et al.</i> , 2017	HU <i>et al.</i> , 2016	HU <i>et al.</i> , 2015	HU; CHEN; SONG, 2016	HUBER <i>et al.</i> , 2009	KOWALSKI; PASTUSZKA; ROMAIN, 2016	LAMINATOU <i>et al.</i> , 2018	LAU <i>et al.</i> , 2016	LIU <i>et al.</i> , 2016	MAYWALD, 2019	MONTICELLI; CAMPIOLI; ZANELLI, 2009	PAVLOVIC; DIORIC-VELIKOVIC; KARAMARKOVIC, 2018	ROBINSON, 2005	ROBINSON-GAYLE <i>et al.</i> , 2001	TANGAMI <i>et al.</i> , 1986	TENG, 2012	TIAN <i>et al.</i> , 2021	TOYODA; TAKAHASHI, 2013	WANG <i>et al.</i> , 2014	XIANG <i>et al.</i> , 2017	
Propriedades do Material																									
Características Físico-Químicas	X	X		X	X						X						X	X	X	X	X				
Características Mecânicas	X	X			X		X				X						X								
Tecnologia da Construção																									
Camada Simples	X									X						X	X	X							
Múltiplas Camadas	X															X	X	X							
Manutenção	X									X						X	X								
Aspectos de Desempenho																									
Desempenho Lumínico	X				X						X	X		X		X	X	X							
Desempenho Térmico	X				X						X		X			X	X	X			X				X
Desempenho Acústico	X				X						X					X	X	X							X
Desempenho Contra Incêndio	X	X			X				X							X	X	X							
Sustentabilidade - Impactos e Ciclo de Vida	X		X		X						X					X	X	X	X						
Sustentabilidade - Alternativas Energéticas	X				X	X		X			X							X				X			X

Fonte: Autoria própria

Em relação ao desempenho lumínico e contra incêndio, a NBR 15575 (ABNT, 2021c) não apresenta resultados de níveis de desempenho específicos aos dados apontados no presente artigo. Para o desempenho térmico, os valores de transmitância do material constam na norma e atendem parcialmente, dependendo de fatores como índice de radiação solar do material e zonas bioclimáticas brasileiras. Considerando o desempenho acústico, os valores de redução de ruído do material não se encaixam nos requisitos mínimos exigidos, dependendo da adição de materiais de mitigação de ruído para se adequar à norma.

Por ser um material inovador na construção, há amplas oportunidades de pesquisa e desenvolvimento a serem realizados. Suas limitações ainda podem exigir aperfeiçoamentos para serem mitigados. Outra barreira a ser vencida é a qualificação de mão de obra, concentrada apenas na utilização pelo fabricante. Não obstante, uma vez que forem realizadas capacitações ao corpo técnico de engenharia da obra, a membrana inclina-se para um cenário de maior utilização.

Em síntese, foi evidenciado o conhecimento disponível de modo que os projetistas possam entender o verdadeiro potencial construtivo do ETFE. Com sua utilização crescente na construção civil, é questão de tempo para esta membrana deixar de ser considerada como revestimento externo somente de alto padrão, para poder ser uma possibilidade construtiva usual em qualquer edificação.

7. Referências

- ABNT. **NBR 15575-5 - Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas**. 5^a ed. [s.l.: s.n.].
- ABNT. **NBR 15575-4 - Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE**. 5^a ed. [s.l.: s.n.].
- ABNT. **NBR 155751 - Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 1: Requisitos Gerais**. 5^a ed. [s.l.: s.n.].
- AGC. **Fluon ETFE Film**. Disponível em: <https://www.agc-chemicals.com/file.jsp?id=jp/en/fluorine/products/etfefilm/download/pdf/ETFE_film_brochure_E.pdf>. Acesso em: 16 set. 2021.
- ARCHIEXPO. **Texlon® ETFE textile membrane NEW MANGROVE HALL BURGERS' ZOO, NETHERLANDS**. Disponível em: <<https://www.archiexpo.com/prod/vector-foiltec/product-68767-1912371.html>>. Acesso em: 16 out. 2021.
- ARCHITONIC. **Swatch and Omega Campus**. Disponível em: <<https://www.architonic.com/fr/project/shigeru-ban-architects-swatch-headquarters-swatch-and-omega-campus/20126395>>. Acesso em: 20 nov. 2021.
- BDIR. **Yujiapu Railway Station**. Disponível em: <<https://www.bdir.com/product/yujiapu-railway-station-etfe-cushions-tensile-roof-membrane-structure>>. Acesso em: 20 nov. 2021.
- BIG SPAN. **ETFE Film**. Disponível em: <<https://bigspans.com/membranes/etfe-film/>>. Acesso em: 15 set. 2021.
- BROWNELL, B. **F-CLEAN - ETFE Greenhouse Coverings**. [s.l.] AGC Chemicals, 2021.
- CANDEMIR, K. U. **Inflatable Pillow System as a Glass Substitute In Terms of Building Envelope**. [s.l.] Izmir Institute of Technology, 2003.
- CEN. **BS EN 13501-1 - Fire classification of construction products and building elements - Part 1: Classification using data from reaction to fire tests**. [s.l.] British Standards Institution, 2018.
- CHARBONNEAU, L.; POLAK, M. A.; PENLIDIS, A. Mechanical properties of ETFE foils: Testing and modelling. **Construction and Building Materials**, v. 60, p. 63–72, 2014.
- CHIU, S.; NOBLE, D.; VALMONT, E. Acoustics in architectural fabric structures: The case of ETFE pillows. **Fabric Structures in Architecture**, p. 241–256, 1 jan. 2015.
- CORRÊA, A. **Allianz Arena em Munique: saiba como visitar e se vale a pena**. Disponível em: <<https://turismo.eurodicas.com.br/allianz-arena-em-munIQUE/>>. Acesso em: 20 nov. 2021.
- CREMERS, J. M. Energy saving design of membrane building envelopes. **Structural Membranes 2011 - 5th International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures**, p. 147–157, 2011.

- DUNN. **ETFE - Lightweight Architecture**. Disponível em: <https://dunn-lwa.com/materiales/m_etfe>. Acesso em: 26 jun. 2021.
- FERNANDES, A. A. **ETFE é usado pela primeira vez na América Latina**. Disponível em: <<http://fernandes.arq.br/etfe-e-usado-pela-primeira-vez-na-america-latina/>>. Acesso em: 6 jul. 2021.
- FLOR, J. F. et al. Virtual reality as a tool for evaluating user acceptance of view clarity through ETFE double-skin façades. **Energy and Buildings**, v. 231, p. 110554, 2021.
- FLÜELER, P.; ALLER, D. **Long-Term Expectations and Experiences of ETFE-Membrane Constructions** International Conference on Durability of Building Materials and Components, 2011. Disponível em: <<http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB22466.pdf>>
- FUNAKI, A.; PHONGTAMRUG, S.; TASHIRO, K. Crystal structure analysis of ethylene-tetrafluoroethylene alternating copolymer. **Macromolecules**, v. 44, n. 6, p. 1540–1548, 2011.
- HU, J. et al. Uniaxial tensile mechanical properties and model parameters determination of ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) foils. **Construction and Building Materials**, v. 75, p. 200–207, 2015.
- HU, J. et al. Energy performance of ETFE cushion roof integrated photovoltaic/thermal system on hot and cold days. **Applied Energy**, v. 173, p. 40–51, 2016.
- HU, J. et al. Buildings with ETFE foils: A review on material properties, architectural performance and structural behavior. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 411–422, 2017.
- HU, J.; CHEN, W.; SONG, H. **Novel BIPV / T ETFE cushion**. VI International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures, 2016
- HUBER, S. et al. Emission from Incineration of Fluoropolymer materials: A literature survey. **Norwegian Institute for Air Research**, n. November 2014, 2009.
- JACKSON, S. **How SoFi Stadium airs live football and other aerial visuals on its roof**. Disponível em: <<https://www.therams.com/news/how-sofi-stadium-airs-live-football-and-other-aerial-visuals-on-its-roof>>. Acesso em: 20 nov. 2021.
- KOWALSKI, W.; PASTUSZKA, S.; ROMAIN, P. How an Innovative Membrane Brought a Vision to Life. **Procedia Engineering**, v. 155, p. 486–495, 2016.
- LAMNATOU, C. et al. Ethylene tetrafluoroethylene (ETFE) material: Critical issues and applications with emphasis on buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. August 2017, p. 2186–2201, 2018.
- LAU, B. et al. Understanding Light in Lightweight Fabric (ETFE Foil) Structures through Field Studies. **Procedia Engineering**, v. 155, n. 0, p. 479–485, 2016.
- LECUYER, A. **ETFE: Technology and Design**. [s.l.] Basel ; Boston : Birkhäuser, 2008.
- LIU, H. et al. Solar radiation properties of common membrane roofs used in building structures. **Materials and Design**, v. 105, p. 268–277, 2016.
- LYNCH, P. **O que é o ETFE e por que ele se tornou o polímero favorito dos**

arquitetos? Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/914923/o-que-e-o-etfe-e-por-que-ele-se-tornou-o-polimero-favorito-dos-arquitetos>>. Acesso em: 26 jun. 2021.

MAYWALD, C. **Coating of ETFE – Solar Shading for Architectural Applications**. SOFTENING THE HABITATS. **Anais...**Milan: Proceedings of the TensiNet Symposium, 2019

MONTICELLI, C.; CAMPIOLI, A.; ZANELLI, A. **Environmental load of ETFE cushions and future ways for their self-sufficient performances** **Environmental load of ETFE cushions and future ways for their self-sufficient performances**. Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures. **Anais...**Valencia: Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium, 2009

MORITZ, K. **ETFE-Folie als Tragelement**. [s.l.] Technischen Universität München, 2007.

MORITZ, K.; SIDE, R. **Design aspects of single - layer ETFE film systems (compared to pneumatic cushions)**. [s.l: s.n.].

PAVLOVIC, A.; DJORIC-VELJKOVIC, S.; KARAMARKOVIC, J. The importance of ethylene-tetrafluoroethylene for building daylighting. **Facta universitatis - series: Architecture and Civil Engineering**, v. 16, n. 3, p. 355–374, 2018.

REVISTA PROJETO. **PROJETO + AGC: saiba a opinião de especialistas ao especificar ETFE em grandes obras**. Disponível em: <<https://revistaprojeto.com.br/noticias/projeto-agc-saiba-a-opiniao-de-especialistas-ao-especificar-etfe-em-grandes-obras/>>. Acesso em: 6 jul. 2021.

ROBINSON-GAYLE, S. et al. ETFE foil cushions in roofs and atria. **Construction and Building Materials**, v. 15, n. 7, p. 323–327, 2001.

ROBINSON, L. A. **Structural Opportunities of ETFE**. [s.l.] Massachusetts Institute of Technology, 2005.

STARR, J. **Beijing Cubism: How ETFE Revolutionized the Bubble**. Disponível em: <<https://archinect.com/features/article/79033/beijing-cubism-how-etfe-revolutionized-the-bubble>>. Acesso em: 16 out. 2021.

TANIGAMI, T. et al. Structural studies on ethylene-tetrafluoroethylene copolymer 1. Crystal structure. **Polymer**, v. 27, n. 7, p. 999–1006, 1986.

TENG, H. Overview of the development of the fluoropolymer industry. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 2, n. 2, p. 496–512, 2012.

TIAN, G. et al. Indoor thermal environment of thin membrane structure Buildings: A review. **Energy and Buildings**, v. 234, p. 110704, 2021.

TOYODA, M.; TAKAHASHI, D. Reduction of rain noise from Ethylene / TetraFluoroEthylene membrane structures. **Applied Acoustics**, v. 74, n. 12, p. 1309–1314, 2013.

VECTOR FOILTEC. **U. S. BANK STADIUM - Transparent is the New Retractable Roof**. Disponível em: <<https://www.vector-foiltec.com/projects/u-s-bank-stadium-transparent-roof/>>. Acesso em: 16 out. 2021a.

VECTOR FOILTEC. **Vector Foiltec Projects**. Disponível em: <<https://www.vector->

foiltec.com/projects/>. Acesso em: 20 nov. 2021b.

WANG, Y. et al. Experimental study on critical breaking stress of float glass under elevated temperature. **Materials and Design**, v. 60, p. 41–49, 2014.

WILLIAMS, M. A. **U.S. Bank Stadium Design Innovation Reveal**. Disponível em: <<https://www.hksinc.com/our-news/articles/u-s-bank-stadium-design-innovation-reveal/>>. Acesso em: 26 jun. 2021.

WILSON, A. ETFE Foil : A Guide to Design. **Architen Landrell**, p. 1–12, 2013.

XIANG, X. et al. On-site measurement and ventilation improvement of an aquatics center using double ETFE cushion structure. **Procedia Engineering**, v. 205, p. 469–476, 2017.