

Comportamento físico de janelas em fibra de vidro

Physical behaviour of fibre glass windows

N. Simões^{a,b,†}, N. Vieira^c, J. Prata^{a,b}, A. Vieira^b

^a *Universidade de Coimbra, CERIS, Departamento de Engenharia Civil, Coimbra, Portugal*

^b *Itecons, Coimbra, Portugal*

^b *FWD, Porto, Portugal*

[†] *Autor para correspondência: nasimoes@dec.uc.pt*

RESUMO

A opção por janelas minimalistas é uma tendência arquitetónica que tem tido um franco crescimento no mercado nacional e internacional e que tem despertado o interesse de vários fabricantes por serem sistemas com um valor comercial apreciável, já que são tipicamente comercializadas para preencher vãos de grandes dimensões. O tipo de abertura é principalmente de correr, o que associado à grande dimensão, resulta num conjunto de desafios a ter em conta no desenvolvimento de janelas. O minimalismo é conseguido com recurso à redução da dimensão dos perfis, em particular nas vistas em alçado. A conjugação da reduzida dimensão dos perfis, a tipologia de abertura de correr e as grandes áreas condiciona o comportamento térmico, acústico, permeabilidade ao ar, estanquidade à água e resistência ao vento.

A opção por perfis não metálicos poderá beneficiar o comportamento térmico e reduzir o impacto ambiental por serem materiais com menor massa volúmica e condutibilidade térmica. No entanto, o seu desenvolvimento tem que ser cuidado de modo a não comprometer a resistência mecânica, já que uma maior deformabilidade dos perfis terá impacto direto nos níveis de permeabilidade ao ar, estanquidade à água e resistência ao vento. A fibra de vidro é um material que pode ser usado para fabricar perfis. O objetivo principal deste trabalho é apresentar a caracterização térmica e física de janelas utilizando esse material.

Baseado nos resultados dos ensaios de permeabilidade ao ar, estanquidade à água e resistência ao vento, assim como nos resultados do cálculo de transmissão térmica, foi possível identificar um conjunto de regras que podem ser usadas para garantir um desempenho satisfatório de janelas de correr minimalistas utilizando fibra de vidro para produzir os perfis. Os ensaios foram realizados no laboratório de Itecons no âmbito do projeto “Evoslide”, cuja empresa promotora líder é a FWD.

ABSTRACT

Minimalist windows are an architectural trend that has great commercial value but which also brings up specific challenges. The preference for minimalist systems appears to be enduring, mainly because large window panes with slim frames are aesthetically pleasing and allow more natural light and sunlight to come into a building. However, these solutions, in particular sliding windows, are known to have some functional disadvantages in terms of thermal and acoustic performance, watertightness and durability.

Non-metal window solutions have better thermal behaviour and, even in the most aggressive environments, they are not subject to oxidation and corrosion, which are common phenomena in the currently available solutions. Non-metal frames are lighter and may well have a smaller ecological footprint. However, they have to

Palavras-chave:

Janelas; caixilho em fibra de vidro; desempenho térmico; estanquidade à água; resistência ao vento; permeabilidade ao ar.

Keywords:

Windows; fibreglass frame; thermal behaviour; watertight; wind resistance; air permeability.

ensure a good mechanical behaviour and offer adequate wind resistance and watertightness. Fibreglass is one option that can be used to produce frames. The main objective of this work is to present the thermal and physical characterization of windows using this material.

Based on preliminary air permeability, watertightness and wind resistance tests, together with thermal transmittance calculations, the fibreglass solution appears to be promising. This paper presents the results of a programme of experiments carried out at Itecons' laboratory under the research project "Evoslide", leaderead by the company FWD.

1. Introdução

O desempenho térmico da envolvente de um edifício depende, principalmente, da qualidade da sua envolvente opaca (paredes, coberturas e pavimentos), mas pode também ser largamente condicionado pelos elementos envidraçados. Como parte integrante das fachadas e coberturas, os vãos envidraçados devem também contribuir para limitar as ações externas, salvaguardando a segurança e o bem estar dos ocupantes. As janelas têm-se tornado cada vez mais relevantes para atingir um bom comportamento energético e a procura de soluções ótimas é uma prioridade entre fabricantes e investigadores ([1],[2]).

O desempenho térmico de uma janela [3] é normalmente caracterizado pelo seu coeficiente de transmissão térmica (U_w), que é calculado de acordo com as metodologias recomendadas nas normas ISO 10077-1:2017 [4] e ISO 10077-2:2017 [5] ou através de ensaios realizados de acordo com o método da Hot-box, de acordo com as normas ISO 8990:1994 [6] e ISO 12567-1:2010 [7]. Este parâmetro depende da transmissão térmica do vidro (U_g) e do caixilho (U_f), bem como da transmissão térmica linear (Ψ) [8], que descreve o fluxo de calor adicional causado pela interação entre o caixilho e o vidro. Um dos elementos mais críticos nas janelas é o caixilho.

Nos últimos anos, a introdução de vidros duplos e triplos que incluem películas de baixa emissividade e gases inertes, permitiu às janelas atingir um desempenho térmico superior [9]. Esta melhoria pode ser ainda mais significativa quando se opta por espaçadores térmicos não metálicos no perímetro entre vidros, permitindo uma redução de cerca de 10% do valor do U_w ([9],[10]). Por outro lado, poucas alterações têm sido feitas nos perfis dos caixilhos, tanto a nível técnico como no que respeita à seleção de materiais inovadores adequados. O caixilho pode representar cerca de 20% a 30% da área total da janela e corresponde a um ponto fraco termicamente, uma vez que o seu coeficiente de transmissão térmica é, geralmente, muito mais elevado do que o das zonas envidraçadas. Além disso, no Inverno, a concentração de perdas de calor nos caixilhos origina temperaturas baixas na sua superfície interior, o que contribui para um maior risco de ocorrência de condensação ([11],[12],[13]).

A madeira foi um dos primeiros materiais utilizados na produção de caixilhos de janelas. No entanto, este é um material que requer uma maior manutenção. Assim, apesar do bom desempenho térmico que apresenta (com valores de U_w que atualmente podem variar entre 1,5 e 2,0 W/(m²°C) ([4],[2])), os caixilhos de madeira não são uma alternativa na construção intensiva. Uma solução amplamente utilizada é o PVC, que apresenta uma maior resistência térmica comparativamente às soluções de alumínio. Os caixilhos em PVC oferecem valores de U_f que podem variar entre 1,6 e 2,8 W/(m²°C) [2]. No entanto, os perfis em PVC caracterizam-se por uma baixa rigidez estrutural e são normalmente reforçados com perfis metálicos internos. Por sua vez, os caixilhos de alumínio apresentam valores próximos dos 6 W/(m²°C). Apesar do seu baixo desempenho térmico, o alumínio é amplamente utilizado devido à sua elevada resistência mecânica e durabilidade. De forma a reduzir os coeficientes de transmissão térmica, os caixilhos de alumínio podem receber um perfil de rotura térmica, normalmente feito de poliamida, permitindo valores de U_f entre 1,4 e 4,0 W/(m²°C) ([4],[2]). Para obter desempenhos melhorados, surgiram também no mercado caixilhos que combinam diferentes materiais, tais como alumínio e madeira.

Vários estudos sublinham a importância de seguir novas estratégias para o desenvolvimento de novas soluções com elevado desempenho térmico ([2],[14]) e baixo impacto

ambiental [15]. Recentemente, surgiu uma alternativa interessante aos materiais convencionais, que são os perfis de caixilharia em fibra de vidro. Appelfeld et al. [1] apresentaram um estudo de perfis de caixilharia de fibra de vidro reforçada. Os resultados apresentam um bom comportamento térmico e mecânico e os perfis em fibra de vidro aparentam ser uma alternativa fiável. Relativamente ao comportamento ambiental, Shiva et al. [15] avaliaram o impacto total do Ciclo de Vida (LC) de uma parede virada a sul com soluções envidraçadas e concluíram que janelas de alumínio contribuem para o impacto total do LC da parede em cerca de 16-31%, enquanto que, nas janelas com caixilhos em fibra de vidro, este valor para cai para cerca de 8-23%.

Outros aspetos de grande importância para um bom desempenho das janelas são a estanquidade ao ar e à água e a resistência ao vento [16]. A infiltração do ar devido à baixa estanquidade ao ar das janelas pode comprometer o desempenho energético dos edifícios [17], bem como o conforto térmico dos moradores [18]. Além disso, um elevado nível de permeabilidade ao ar também afeta o comportamento acústico das fachadas [19]. Por outro lado, a falta de estanquidade à água também é indesejável, uma vez que contribui para a deterioração prematura dos elementos de construção nas proximidades das janelas [20]. A resistência ao vento pode ser avaliada experimentalmente de acordo com a norma EN 12211:2016 [21]. A deformação máxima alcançada quando a janela é sujeita a grandes diferenças de pressão é medida e a capacidade de suportar picos de pressão sem falhas pode ser observada. Ao contrário da resistência ao vento, a estanquidade ao ar e à água é difícil de prever e pode ficar comprometida com falhas na fabricação e instalação das janelas [22]. Por este motivo, tanto a permeabilidade ao ar como a estanquidade à água são geralmente determinadas em laboratório, de acordo com as normas EN 1026:2016 [23] e EN 1027:2016 [24], respetivamente. Relativamente à estanquidade à água, Van Den Bossche [16] realizou recentemente um levantamento exaustivo de estudos experimentais (em laboratório e in-situ), do qual concluiu que as janelas de correr são consistentemente as que apresentam o pior desempenho. Este tipo de sistema de abertura também compromete a permeabilidade ao ar (que aumenta) e o desempenho térmico e acústico. No entanto, como é frequentemente uma preferência de arquitetos, promotores e proprietários, merece ainda mais ser um alvo de investigação e de desenvolvimentos.

Motivados pelo desafio de desenvolver janelas de correr minimalistas utilizando perfis em fibra de vidro, o objetivo principal do presente estudo é a avaliação do desempenho térmico, de uma nova geração de geometrias deste tipo de perfis. Como parte do desenvolvimento, foi ainda realizado um conjunto de testes laboratoriais a fim de obter os níveis de isolamento sonoro aos sons aéreos, o desempenho em termos de permeabilidade ao ar e à água, bem como a classificação da resistência ao vento para uma geometria semelhante às utilizadas nas janelas convencionais. Baseado nos resultados dos ensaios, foi possível identificar um conjunto de regras que podem ser usadas para garantir um desempenho satisfatório de janelas de correr minimalistas utilizando fibra de vidro. Os ensaios foram realizados no laboratório de Itecons no âmbito do projeto Evoslide, cuja empresa promotora líder é a FWD.

2. Materiais e métodos

A subsecção seguinte descreve as geometrias dos perfis utilizados nos ensaios de laboratório e a nova geometria em desenvolvimento, bem como os respetivos cálculos de transmissão térmica.

2.1. Descrição dos perfis

Numa primeira fase, foram instalados três provetes de janelas de correr na câmara de ensaios de caixilhos do Itecons para serem caracterizados em termos de permeabilidade ao ar, água e vento. As janelas caracterizam-se por terem perfis com geometrias próximas das utilizadas nas janelas convencionais. O primeiro provete, mostrado na Figura 1a), consiste numa janela de correr com duas folhas móveis, com dimensões externas (Altura) x (Comprimento) de 3,0 x 3,0 m. O segundo provete (Figura 1b), em que a preocupação era acrescentar uma terceira folha, tem dimensões externas de 2,25 x 3,84 m. O terceiro provete (Figura 1c) é novamente composto por

duas folhas móveis, mas com uma dimensão maior do que o primeiro, 3,0 x 4,8 m.

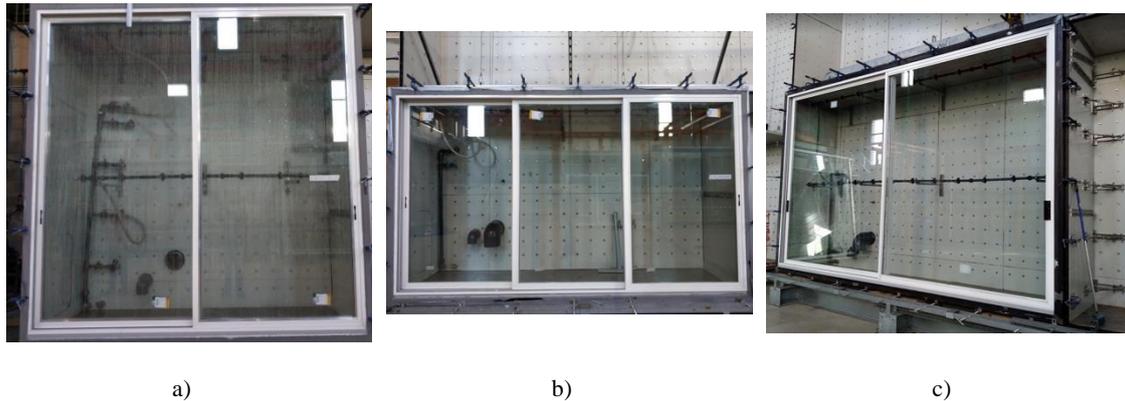


Figura 1 - Ensaios de permeabilidade ao ar, estanqueidade à água e resistência ao vento: a) janelas de correr com 2 folhas móveis (3,0 m x 3,0 m); b) janelas de correr com três folhas móveis (2,25 m x 3,84 m); c) janelas de correr com duas folhas móveis (3,0 m x 4,8 m).

Em termos de caracterização acústica foram usadas as câmaras reverberantes do Itecons. Foi construída uma parede com uma área de 10 m² num aro. A parede é composta por dois panos de betão separados por uma camada de lã mineral. A parede tinha uma abertura de aproximadamente 7 m² para a instalação do provete de ensaio (uma janela de correr com uma folha móvel com as dimensões nominais de 2,42 m x 2,86 m. A figura 2 mostra a janela dentro das câmaras acústicas.



Figura 2 - Instalação da janela dentro das câmaras acústicas: a) vista da câmara emissora; b) vista da câmara recetora.

No âmbito do projeto foram desenvolvidos desenhos para um novo perfil minimalista em fibra de vidro. O cálculo do seu comportamento térmico foi determinado, e depois foram aplicadas medidas de melhoria. Para tal, foi determinado o valor de transmissão térmica (valor U_f) de cada perfil do caixilho (lateral, central e superior) e analisado o impacto da redução da espessura dos perfis e do preenchimento das cavidades de ar com um material isolante.

A figura 3 ilustra os desenhos esquemáticos dos perfis minimalistas de fibra de vidro otimizados com um material isolante que preenche as cavidades de ar.

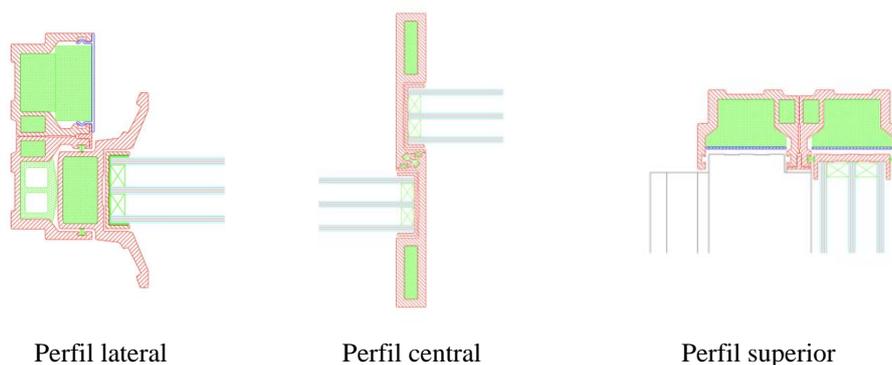


Figura 3 - Desenhos esquemáticos dos perfis minimalistas com material isolante (a verde) a preencher as cavidades de ar.

A Tabela 1 apresenta as propriedades físicas dos materiais, necessárias ao cálculo do coeficiente de transmissão térmica dos perfis do caixilho.

Tabela 1 - Propriedades físicas dos materiais considerados nos cálculos da transmissão térmica dos perfis.

Componente	Material	Condutividade térmica [W/(m.°C)]
Perfil do caixilho	Fibra de vidro	0,30
	Policarbonato	0,20
	Pelúcias	0,14
	EPDM	0,25
	Espuma de isolamento térmico	0,023
Painel isolante (ISO 10077-2)		0,035

2.2. Métodos

Nesta subsecção, é feita uma breve descrição dos princípios de ensaios e cálculo realizados. Estes referem-se às principais normas que devem ser seguidas de acordo com a norma de produto das janelas, Norma Europeia EN 14351-1:2006+A2:2016.

Cálculo da transmissão térmica: a transmissão térmica de cada perfil de caixilharia da janela, U_f , foi determinada de acordo com a norma ISO 10077-2:2017 utilizando um método de cálculo numérico bidimensional de acordo com a norma ISO 10211:2017. Para este fim, foi utilizado o software Bisco, da Physibel. O software aplica o método das diferenças finitas Cranck-Nicolson.

Ensaio da permeabilidade ao ar: este teste é realizado de acordo com a norma EN 1026:2016 e baseia-se na aplicação de uma série crescente de pressões de teste (positivas e negativas) no provete de ensaio, determinando-se a sua permeabilidade ao ar através da medição de fluxo de ar que atravessa o provete. O provete ensaiado é classificado de acordo com o especificado na norma EN 12207:2016.

Ensaio de estanqueidade à água: este teste é realizado de acordo com a norma EN 1027:2016. O provete de ensaio é classificado conforme especificado na norma EN 12208:1999. O ensaio consiste na pulverização da superfície do provete de ensaio expectável de ser molhada, de forma contínua e regularmente dispersa, com um caudal especificado de água, enquanto incrementos positivos de pressão de teste são aplicados em intervalos de tempo regulares. É registado o instante e o local por onde o provete perde a estanqueidade.

Ensaio de Resistência ao vento: este teste é realizado de acordo com a norma

EN 12211:2016. O provete de ensaios é classificado conforme especificado na norma EN 12210:2016. O ensaio de resistência ao vento subdivide-se na realização de três testes distintos e sucessivos ao provete de ensaio. O primeiro teste (teste de flecha) permite aferir se o provete tem uma deformação admissível ou não. O segundo teste (teste de pressão repetida) testa a capacidade do provete para conservar as suas propriedades. E o terceiro teste (teste de segurança) verifica a segurança dos utilizadores através da sujeição do provete a condições extremas.

Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, R_w : O teste é realizado no laboratório, em conformidade com a norma ISO 10140-2:2010, utilizando o seguinte procedimento: medição do nível de pressão sonora na sala da fonte para 2 posições de fonte e dentro da gama de varrimento de um microfone em movimento; medição simultânea do nível de pressão sonora na sala recetora durante uma rotação do microfone e para as mesmas 2 posições da fonte emissora dentro da sala da fonte; medição do ruído de fundo dentro da gama de varrimento de um microfone em movimento na sala recetora (com a fonte desligada); avaliação dos tempos de reverberação na sala recetora considerando 1 posição da fonte e 2 medições de decaimentos, pelo menos, para 3 posições de microfone. A curva de isolamento sonoro normalizada é então determinada em conformidade com a norma ISO 10140-2:2010, e o índice de isolamento sonoro é determinado em conformidade com a norma ISO 717-1:2013.

3. Resultados

3.1. Ensaio de permeabilidade ao ar, estanquidade à água e resistência ao vento

A classificação dos provetes em termos de permeabilidade ao ar, estanquidade à água e resistência ao vento foi feita de acordo com as normas de classificação EN 12207:2016, EN 12208:1999 e EN 12210:2016, respetivamente, como mencionado anteriormente.

O primeiro provete com dimensões externas de 3,0 m x 3,0 m atingiu as seguintes classes:

- **Classe 2** para permeabilidade ao ar (a classe 4 é a máxima);
- **Classe 4A** para estanquidade à água (o que significa que a estanquidade foi perdida aos 200 Pa de pressão);
- **Classe B1** para a resistência ao vento (B é a classe de flecha média, 1 é uma resistência muito baixa à pressão do vento).

Para avaliar a influência da utilização de um perfil central reforçado nos resultados dos ensaios, o perfil foi reforçado e os ensaios foram repetidos, conduzindo aos seguintes resultados

- **Classe 2** para permeabilidade ao ar (igual à anterior);
- **Classe 4A** para a estanquidade à água (igual à anterior);
- **Classe B3** para a resistência ao vento (mesma classe de flecha para pressões de vento mais elevadas).

A comparação dos resultados mostra que o reforço permite uma melhoria muito significativa sob a ação do vento. A classe B1 obtida inicialmente significa que, para uma pressão de ensaio de 400 Pa, a flecha frontal relativa foi inferior a 1/200. Após o reforço do perfil central, a deformação frontal relativa medida para uma pressão de ensaio 3 vezes superior (1200 Pa) foi 1/279, sendo menor do que a medida inicialmente.

Para a janela de correr com três folhas móveis (proвете 2) com um perfil central reforçado, os resultados obtidos foram os seguintes:

- **Classe 2** para permeabilidade ao ar;
- **Classe 4A** para a estanquidade à água;
- **Classe C2** (flecha frontal relativa de 1/310) para a resistência ao vento.

Os resultados obtidos permitem-nos concluir que a adição de uma folha não afetou o desempenho do sistema.

O terceiro provete, que era uma janela de correr de duas folhas com uma área muito grande, de 3,0 m x 4,8 m, obteve os seguintes resultados no primeiro conjunto de ensaios:

- **Classe 3** para permeabilidade ao ar;
- **Classe 2A** para a estanquidade à água;
- **Classe A1** (flecha frontal relativa de 1/182) para a resistência ao vento.

Posteriormente, foram feitas as seguintes modificações na janela:

- Alterações no sistema de fixação de reforço central;
- Instalação de componentes de vedação adicionais na zona de cruzamento entre o perfil vertical e o perfil horizontal inferior;
- Instalação de um perfil do tipo goteira reproduzindo um segundo nível de drenagem;
- Instalação de tampa de drenagem com deflectores.

Após a realização das alterações acima mencionadas, os ensaios laboratoriais foram repetidos, e os resultados foram os seguintes:

- **Classe 3** para permeabilidade ao ar;
- **Classe 5A** para a estanquidade à água;
- **Classe B2** (flecha frontal relativa de 1/224) para resistência ao vento.

Estes resultados mostram que os perfis de fibra de vidro podem ser utilizados em janelas de correr e aplicados em zonas em que a ação do vento não seja muito intensa.

3.2. Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea

Uma janela com uma folha móvel e uma folha fixa foi testada em laboratório. A janela tem dimensões nominais de 2,42 m x (L) 2,86 m e vidros duplos compostos por: vidro de 8 mm termicamente temperado "SGG SECURIT PLANICLEAR (Plux) 8 mm", caixa de ar de 14 mm (90 % Árgon) e vidro laminado de 8,76 mm "SGG STADIP SILENCE 44.2".

Para avaliar o impacto das modificações no sistema de janelas, foram realizados quatro ensaios acústicos. O primeiro teste (Teste 1) permitiu a deteção de pontos fracos no isolamento acústico na área de contacto entre os perfis centrais, particularmente nos topos (inferior e superior). Na primeira tentativa de corrigir estes pontos fracos (testes 2 e 3), foram aplicadas as seguintes medidas: reforço do isolamento do perfil inferior da folha fixa; aplicação de uma junta de borracha na zona de contacto entre a folha fixa e a folha móvel; e melhoria da vedação das partes superiores do perfil central da folha fixa. Finalmente (Teste 4), os perfis da folha fixa foram preenchidos com lã mineral e a selagem da zona da ombreira foi melhorada com perfis de junta entre o caixilho e a folha. A Figura 4 mostra representações gráficas do índice de redução sonora, R_w , em bandas de frequência de terceira oitava entre 100 Hz e 5000 Hz, para cada teste realizado.

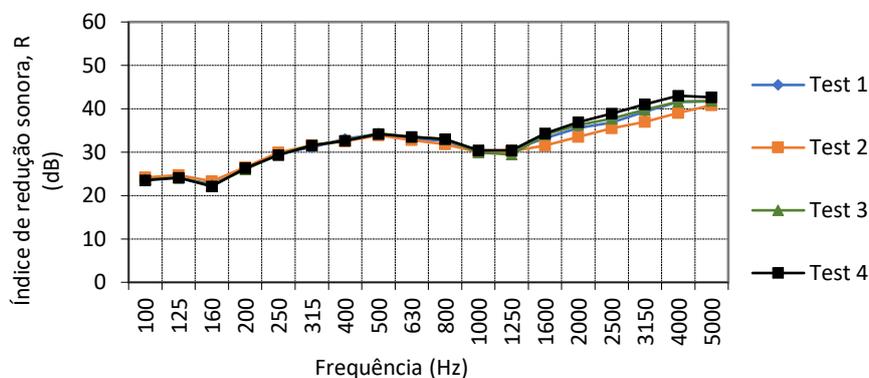


Figura 4 - Representação gráfica do índice de redução sonora, R_w , em bandas de frequência de terceira oitava, entre 100 Hz e 5000 Hz, para cada teste realizado (Testes 1 a 4).

A Tabela 2 apresenta um resumo dos resultados obtidos nos ensaios acústicos realizados em laboratório (Testes 1 a 4).

A Tabela 3 mostra os valores de U_f dos perfis de caixilharia em fibra de vidro otimizados (Figura 3) bem como a redução de U_f , em %, quando comparada com os perfis iniciais (sem um material isolante a encher as cavidades de ar).

Tabela 2 - Resultados obtidos nos ensaios de determinação do índice de isolamento a sons aéreos.

Frequência [Hz]	Índice de redução sonora, R [dB]			
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
R_w (C; C_{tr} ; $C_{100-5000}$; $C_{tr,100-5000}$) [dB]	34 (-1; -3; -1; -3)	33 (-1; -2; 0; -2)	34 (-1; -3; -1; -3)	35 (-2; -4; -1; -4)

A Figura 5 ilustra alguns exemplos de detalhes construtivos das configurações testadas.



Figura 5 - Detalhes construtivos das configurações testadas: a) juntas do caixilho fixo; b) juntas do caixilho fixo (zona central); c) vedação inferior do perfil central da folha móvel; d) vedação inferior do perfil central da folha fixa; e) vedação da zona de encontro do caixilho fixo e da zona de bloqueio da folha móvel; f) reforço da vedação da central na zona de encontro do caixilho fixo e da zona de bloqueio da folha móvel com juntas; g) aspeto visual das ranhuras de drenagem da folha móvel; h) aspeto visual da vedação dos perfis.

Tabela 3 - Transmissão térmica dos perfis em fibra de vidro otimizados utilizados na janela de correr minimalista.

Perfil	U_f [W/(m ² .°C)]	Redução do U_f [%]
Central	4,986	0,20
Lateral esquerdo	0,941	33,6
Lateral direito	0,908	36,3
Superior esquerdo	0,911	49,0
Superior direito	0,892	49,1

Os resultados mostram que os valores U_f dos perfis de fibra de vidro são significativamente inferiores aos das soluções de janelas minimalistas atualmente disponíveis no mercado que, em média, apresentam valores U_f de 3,5 W/(m².°C) para os perfis laterais e 14 - 25 W/(m².°C) para o perfil central.

Os resultados mostram também que os perfis de fibra de vidro podem ser otimizados enchendo as caixas-de-ar com um material isolante. Esta medida permite uma redução do valor U_f até 49%.

4. Conclusões

Neste trabalho de investigação foi realizado um conjunto de ensaios laboratoriais com o objetivo de avaliar a viabilidade do uso de perfis em fibra de vidro em janelas de correr, tendo

por base a garantia de um comportamento satisfatório. Foi determinado o isolamento sonoro a sons aéreos, o desempenho em termos de permeabilidade ao ar, estanquidade à água e resistência ao vento. Estes testes preliminares foram realizados sobre uma geometria semelhante à utilizada nas janelas convencionais. Como este tipo de material e perfis demonstram ser promissores, a segunda fase do trabalho consistiu em desenvolver e otimizar uma geometria do perfil para uma janela de correr minimalista com base no seu desempenho térmico. Os valores de transmissão térmica, U_f , dos perfis otimizados foram determinados e apresentados no trabalho. Os resultados mostram que os perfis de fibra de vidro podem ser uma alternativa aos perfis de alumínio, não só para janelas convencionais, mas também para janelas de correr minimalistas.

Agradecimentos

Esta investigação foi suportada pelo projeto **EvoSlide**, com o título “Evolution in Window Sliding System” (POCI-01-0247-FEDER-033658) financiado pelo Compete 2020 e pelo FEDER.

Referências

- [1] D. Appelfeld, C.S. Hansen, S. Svendsen, Development of a slim window frame made of glass fiber reinforced polyester, *Energy Build.* 42 (2020) 1918-1925.
- [2] A. Gustavsen, B.P. Jelle, D. Arasteh, C. Kohler, State-of-the-Art Highly Insulating Window Frames. Research and Market Review, SINTEF Build. Infrastruct., Project report 6, 2007.
- [3] N. Simões, J. Prata, S. Martins, A. Tadeu, Thermal Performance of Windows: Experimental Validation of Numerical Results, 39th IAHS (International Association for Housing Science) World Congress, 17 to 20 de September, Milan, Italy, 2013.
- [4] International Organization for Standardization (ISO). ISO 10077-1, Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Part 1: General, 2017.
- [5] International Organization for Standardization (ISO). ISO 10077-2, Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Part 2: Numerical method for frames, 2017.
- [6] International Organization for Standardization (ISO). ISO 8990, Thermal insulation - Determination of steady-state thermal transmission properties - Calibrated and guarded hot box, 1994.
- [7] International Organization for Standardization (ISO). ISO 12567-1, Thermal performance of windows and doors - Determination of thermal transmittance by hot box method - Part 1: Complete windows and doors, 2010.
- [8] A. Tadeu, I. Simões, N. Simões, J. Prata, Simulation of dynamic linear thermal bridges using a boundary element method model in the frequency domain. *Energy Build.* 43 (12) (2011) 3685–3695.
- [9] B.P. Jelle, A. Hynd, A. Gustavsen, D. Arasteh, H. Goudey and R. Hart, Fenestration of today and tomorrow: A state-of-the-art review and future research opportunities, *Sol. Energy Mater Sol. Cells*, 96 (2012) 1-28.
- [10] DGS Group: www.dgsgroup.co.uk/catalogues/spacer/.
- [11] B. Moshfegh, D. Loyd and B. Karlsson, Heat transfer at modern windows - risk of condensation, *Energy Build.*, 13 (1989) 119-125.
- [12] J. Kim, T. Kim, S. Leigh, Double window system with ventilation slits to prevent window surface condensation in residential buildings, *Energy Build.*, 43 (2011) 3120-3130.
- [13] International Organization for Standardization (ISO). ISO 13788, Hygrothermal performance of building components and building elements - Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation - Calculation methods, 2001.
- [14] M. Löffler and D. Buck, Glazing Edge-Seal using Foamglass as Spacer and Frameless window design, *Sol. Energy*, 61(5) (1997) 303-312.
- [15] S. Saadatian, N. Simões, F. Freire, Integrated environmental, energy and cost life-cycle analysis of windows: Optimal selection of components, *Build. Environ.*, 188 (2021).
- [16] N. Van Den Bossche, A. Janssens, Airtightness and watertightness of window frames: Comparison of performance and requirements, *Build. Environ.*, 110 (2016) 129-139.

- [17] M. Sherman, R. Chan, *Building Airtightness: Research and Practice*. Lawrence Berkeley National Laboratory Report No. LBNL-53356, 2004.
- [18] P.O. Fanger, A.K. Melikov, H. Hanzawa, J. Ring, Air turbulence and sensation of draught, *Energy Build.*, 12 (1) (1988) 21-39.
- [19] V. Iordache, T. Catalina, Acoustic approach for building air permeability estimation, *Build. Environ.*, 57 (2012) 18-27.
- [20] J. Straube, E. Burnett, Rain control and design strategies, *J. Therm. Envelope Build. Sci.*, 23 (1999) 41-56.
- [21] European Standards (EN). EN 12211 - Windows and doors - Resistance to wind load - Test method, 2016.
- [22] RDH, *Water Penetration Resistance of Windows e Study of Manufacturing, Building Design, Installation and Maintenance Factors*, RDH Building Engineering Limited, Vancouver, 2002.
- [23] European Standards (EN). EN 1026, Windows and doors - Air Permeability - Test method, 2016.
- [24] European Standards (EN). EN 1027, Windows and doors - Watertightness - Test method, 2016.
- [25] International Organization for Standardization (ISO). ISO 10211, *Thermal bridges in building construction – Heat flows and surface temperatures – Detailed calculations*, 2017.

ORCID

Nuno Simões 0000-0003-3418-0030 (<https://orcid.org/0000-0003-3418-0030>)
Nuno Vieira 0009-0009-2425-5124 (<https://orcid.org/0009-0009-2425-5124>)
Joana Prata 0000-0003-3413-8895 (<https://orcid.org/0000-0003-3413-8895>)